



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

*Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine
Servizio Laguna di Venezia*

Analisi eventi di marea

Rapporto n. 01/2012

Eventi di marea eccezionale in alto Adriatico

- Novembre 2012 -

Castello, 4665 - 30122 Venezia
Tel: 041 5220555 / 5235895 - Fax: 041 5220521
Segreteria previsione di marea: 041 5202027 / 5202083
e-mail: venezia@isprambiente.it
www.ispravenezia.it

Eventi di alta marea eccezionale in Alto Adriatico nel corso della prima metà del mese di Novembre 2012

In questo documento viene presentata l'analisi relativa a due eventi di alta marea eccezionale succedutesi nel corso della prima metà del mese di novembre 2012. Gli eventi esame di studio rappresentano due buoni esempi del noto fenomeno di "storm surge", ovvero il manifestarsi di un sensibile incremento del livello di marea lungo il litorale Alto Adriatico di natura meteorologica, causato dall'azione contemporanea di una forte differenza di pressione atmosferica lungo il Mar Adriatico e dalla presenza di persistenti venti di Scirocco.

Situazione meteorologica

I due eventi trattati in questo documento, considerati indipendenti, hanno avuto la loro manifestazione massima nella notte tra il 31 ottobre ed il 1° novembre e nella mattinata dell'11 novembre.

La situazione meteorologica che ha originato il primo evento è stata caratterizzata dall'approssimarsi di un esteso vortice depressionario da Ovest, con minimo barico incentrato sulle Isole Baleari. L'avvicinamento della depressione ha determinato un vero e proprio crollo barico lungo tutto il bacino Adriatico, solo per Venezia è stato calcolato un gradiente negativo di 21 hPa in meno di 20 ore. La discesa barica lungo l'Adriatico non è stata però omogenea, si è manifestata infatti una considerevole differenziazione nei valori pressori lungo la costa, come mostrano i dati provenienti da alcune stazioni della Rete Mareografica Nazionale (RMN) dell'ISPRA. In particolare tra il centro-nord ed il sud del bacino stesso (primo ovale in figura 1), si è osservato un primo scarto barico che ha innescato un considerevole rinforzo di venti di Scirocco lungo il medio-basso Adriatico. La situazione in Alto Adriatico è stata invece caratterizzata dalla persistenza di forti venti dal primo quadrante, facendo sì che il Golfo di Venezia venisse spazzato per 24 ore quasi esclusivamente da venti di Bora (nel primo ovale in figura 2 si nota come lo Scirocco non sia stato registrato in Alto Adriatico).

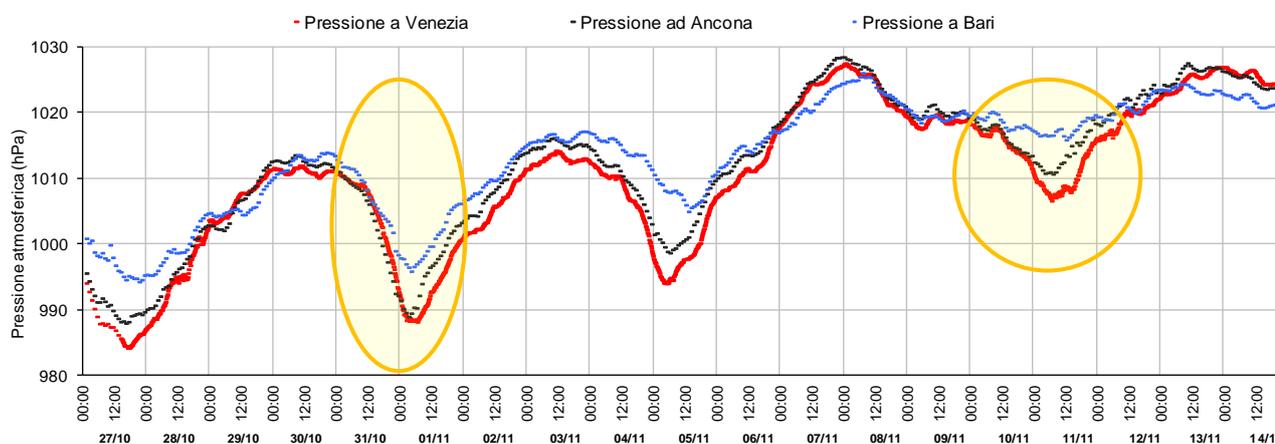


Figura 1 - Pressioni atmosferiche lungo la costa Adriatica

Successivamente, tra i giorni 4 e 5 un'altra perturbazione, decisamente meno intensa della precedente, ha interessato il Nord Italia pur non provocando effetti particolarmente rilevanti sull'andamento della marea in Alto Adriatico. Al cessare dell'impulso meteo appena descritto, l'Italia settentrionale è stata investita da una rapida irruzione artica che ha portato tempo stabile e un drastico calo delle temperature. Il giorno 10 novembre l'Italia ha visto il nuovo ingresso di una saccatura atlantica, figura meteorologica classica per il periodo autunnale, specie se a comandare i regimi climatici dell'Europa meridionale sono i valori costantemente negativi dell'indice NAO (North Atlantic Oscillation). Lungo l'Adriatico è quindi ricomparsa la "forbice" tra i valori barici registrati alle estremità del bacino (secondo ovale in figura 1). La differenza pressoria tra sud e nord Adriatico ha portato nuovamente all'innescò di venti dal secondo quadrante, venti quindi di Scirocco che questa volta sono stati registrati lungo tutta la lunghezza del bacino Adriatico (secondo ovale in figura 2).

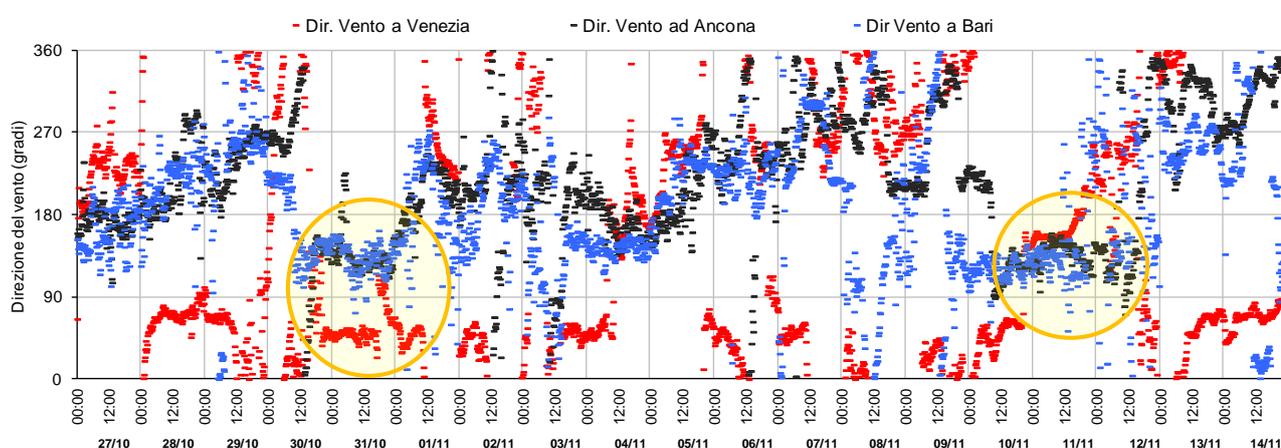


Figura 2 - Direzione di provenienza dei venti lungo la costa Adriatica

Nei giorni successivi il nucleo depressionario ha lasciato l'Italia e la pressione è tornata gradualmente a salire, mostrando a Venezia un aumento molto più rapido rispetto a quello delle altre località esaminate lungo l'Adriatico. Infatti, dal giorno 13 novembre sulla costa medio-alto adriatica si cominciano a registrare pressioni più alte rispetto a quelle registrate lungo la costa meridionale.

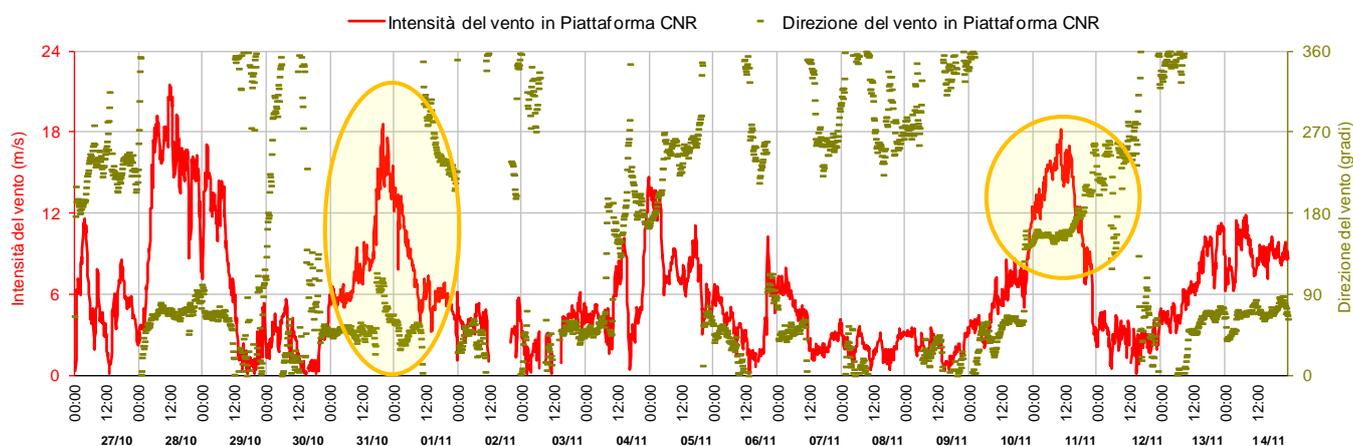


Figura 3 - Regime dei venti presso la stazione oceanografica "Piattaforma CNR" (alto Adriatico)

A comprova di quanto appena descritto, dal grafico in figura 3 appare evidente quale sia stata la natura dei venti in Alto Adriatico nel corso del periodo analizzato.

Nel primo caso, se si eccettuano le 2 ore centrali ove la circolazione si è temporaneamente disposta da ESE, la Bora ha soffiato per quasi 24 ore consecutive con velocità massima pari a 18.6 m/s registrata verso le ore 20 del 31 ottobre (primo ovale in figura 3). Da notare come tre giorni prima, il 28 ottobre, si erano registrati sempre venti provenienti dal primo quadrante ma di intensità ben superiore e per un tempo più prolungato.

Nel corso del secondo evento analizzato, quello dell'11 novembre, in Nord Adriatico si sono registrati per circa 24 ore consecutive venti provenienti dal secondo quadrante (SSE) con intensità massima appena superiore ai 18 m/s.

Marea e moto ondoso

Com'è noto, l'azione congiunta del calo di pressione e dello spirare dei venti dai quadranti meridionali lungo il bacino Adriatico in direzione SE-NO determina una significativa amplificazione del fenomeno della marea nell'Adriatico settentrionale.

In figura 4 sono evidenti i due picchi di marea eccezionale registrati in Nord Adriatico presso la stazione della RMLV di ISPRA posizionata presso la Piattaforma Oceanografica CNR (mare aperto, a circa 15 km dalla costa veneziana) nei giorni 1 e 11 novembre 2012.

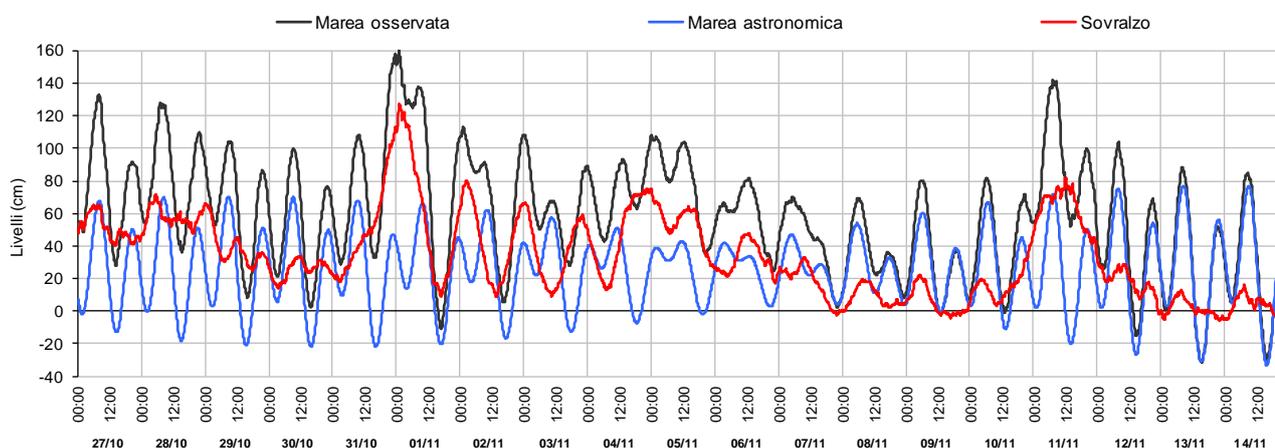


Figura 4 - Andamento dei livelli di marea presso la stazione oceanografica "Piattaforma CNR" (alto Adriatico)

Presso questa stazione il 1° novembre viene rilevato un colmo di marea pari a +160 cm sullo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS) alle ore 1:00, con un sovrizzo (il cosiddetto contributo meteorologico) di 127 cm sopra la marea astronomica. E' evidente che un sovrizzo così spinto non è da mettere in relazione alla circolazione dei venti nella parte settentrionale dell'Adriatico, dominata come

detto dalla Bora, bensì dalla persistenza dello Scirocco che, lungo tutta la parte centro-meridionale, ha potuto soffiare su di un *fetch* di quasi 800 km.

Nelle figure 5 e 6 viene mostrato il regime ondoso in Adriatico centro-settentrionale e contemporaneamente l'andamento del sovrizzo presso Piattaforma CNR (figura 7).

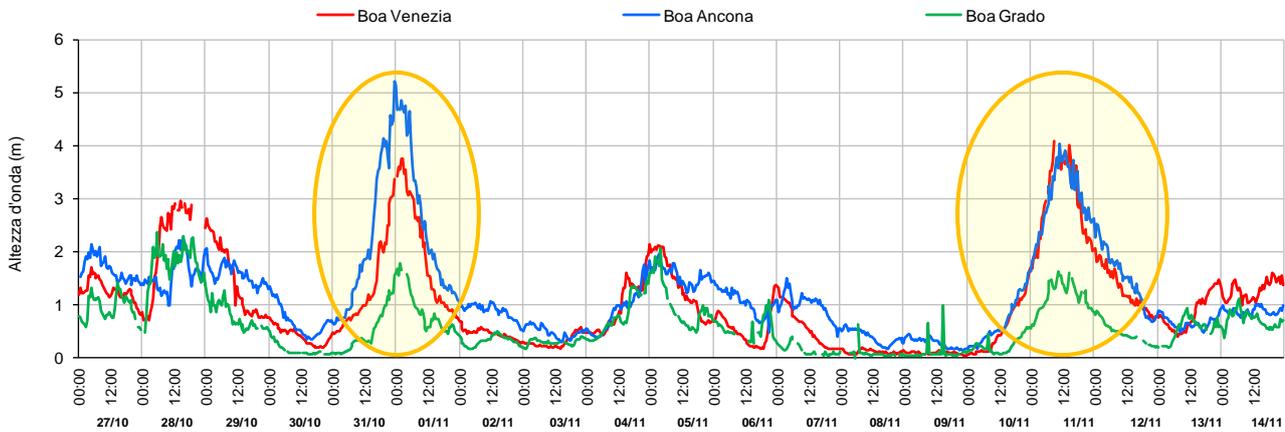


Figura 5 - Altezza d'onda significativa in Alto Adriatico

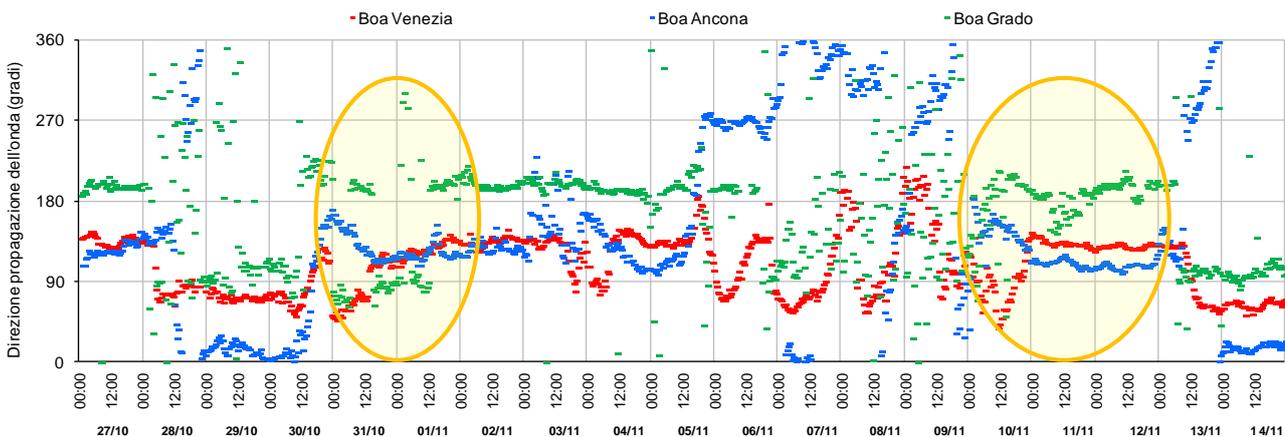


Figura 6 - Direzione di propagazione d'onda in Alto Adriatico

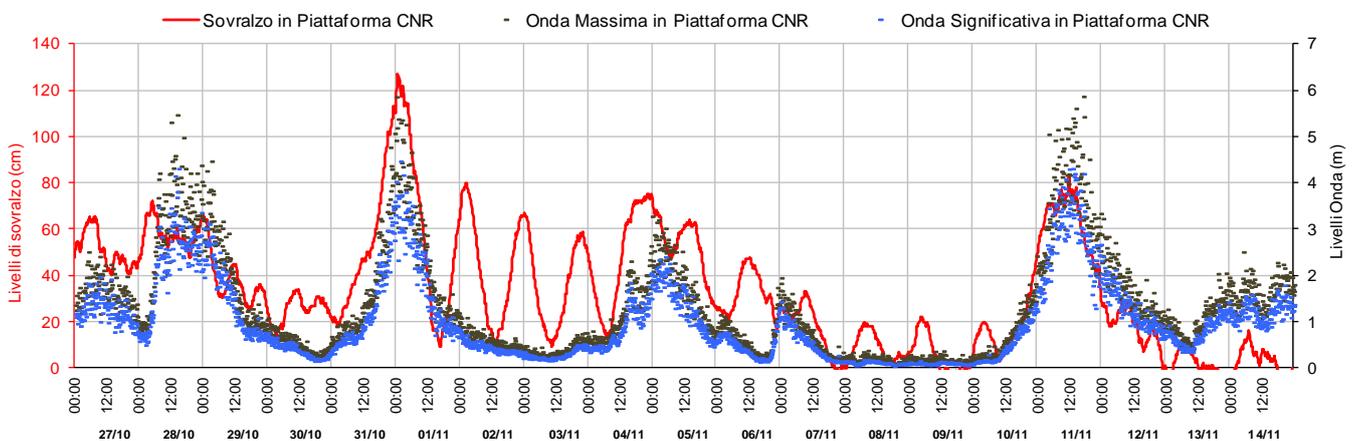


Figura 7 - Confronto tra altezza d'onda e livelli di sovrizzo presso la stazione oceanografica "Piattaforma CNR" (Alto Adriatico)

Come si può notare dai grafici precedenti, pur in presenza di vento di Bora, la direzione di propagazione dell'onda in Alto Adriatico è da SE, quindi non è minimamente influenzata dalla Bora. Tuttavia, la boa della Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia, situata al largo di Grado, mostra una direzione di propagazione d'onda prevalentemente da Est (primo ovale in figura 6), probabilmente perché risente del forte vento locale di Bora. Infatti, solo a ridosso del Golfo di Trieste, la Bora sembra riuscire a contrastare la direzione d'onda da SE provocata dai venti di Scirocco spiranti in medio-basso Adriatico. Altro aspetto degno di nota appare anche l'entità dell'altezza d'onda registrata presso questa boa, nettamente smorzata rispetto all'altezza d'onda registrata presso le boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) dell'ISPRA situate al largo di Venezia e Ancona.

Nel complesso, durante l'evento del 1° novembre, tutta la costa Nord-Adriatica è stata sottoposta alla severa azione di una violenta mareggiata sostenuta da condizioni di alta marea eccezionale, anche se non uniformi lungo il litorale. Sono stati infatti registrati estesi fenomeni di erosione lungo le spiagge di Grado, Lignano, Caorle, Jesolo, il cordone litoraneo della Laguna di Venezia e a sud di Chioggia.

Degna di segnalazione appare l'anomala manifestazione mareale registrata presso la stazione Malamocco Diga Nord. In figura 8 viene rappresentato l'andamento della marea osservata presso le stazioni della RMLV situate sui moli foranei della Laguna di Venezia, fronte mare. Dal grafico è evidente, in entrambi gli eventi analizzati, l'andamento anomalo del segnale mareale presso la stazione Malamocco Diga Nord: l'andamento della curva è attendibile in quanto registrato da tutti e tre gli apparati di registrazione presenti all'interno della cabina mareografica.

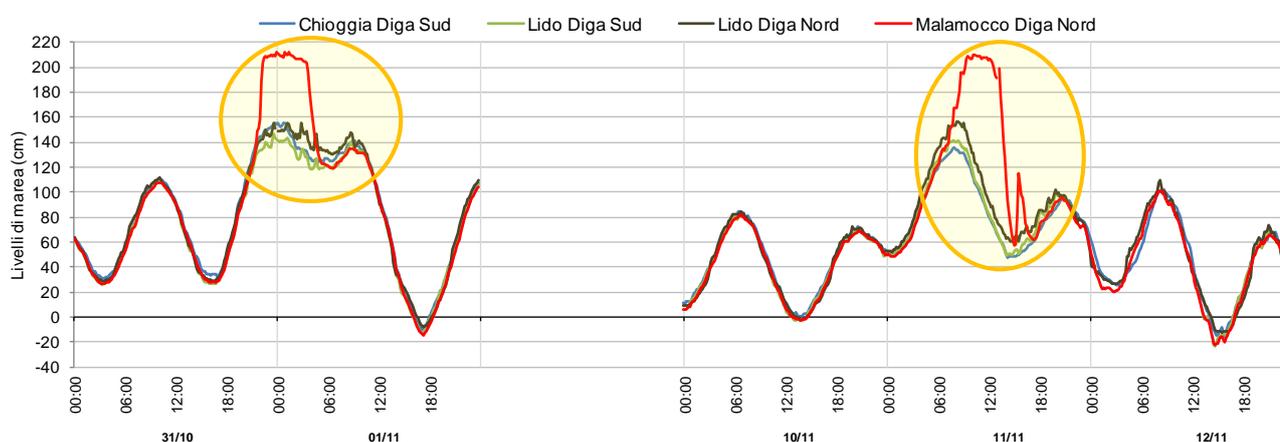


Figura 8 - Andamento dei livelli di marea alle bocche di porto della Laguna di Venezia

In entrambi gli eventi, la fase di colmo di marea appare ben registrata e sostanzialmente concorde alle 2 stazioni alla bocca di Lido e a quella di Chioggia. Le due impennate registrate dalla curva di marea a Malamocco Diga Nord hanno dato luogo ad un appiattimento del colmo intorno ai 210 cm ZMPS (circa + 50 cm rispetto ai colmi registrati presso le altre cabine mareografiche) per circa 2/3 ore. Sembrerebbe quindi che l'acqua di mare sia fuoriuscita dalla bocca del pozzetto di calma ed abbia interessato tutto

l'interno della cabina ove il livello ha raggiunto un'altezza tale da portare a fondo scala i galleggianti usati per le misure. Per comprendere le cause che hanno portato a questo fenomeno, singolare solo per la stazione di Malamocco Diga Nord, bisognerebbe probabilmente considerare altri fenomeni legati alla dinamica del moto ondoso a ridosso del molo foraneo (*wave set-up*) e alla configurazione della bocca così come oggi risulta dopo l'esecuzione della lunga lunata posizionata a sud dell'imboccatura portuale. Spostando l'attenzione alle stazioni ubicate sull'intero arco costiero Nord-Adriatico, dall'ovale in figura 9 si può notare una differenza significativa tra i livelli di marea registrati in zone dove l'azione della Bora tende ad insaccare l'acqua (es. Porto Caleri) e quelli registrati in zone dove questo vento locale tende a svuotare lo specchio d'acqua (es. Grado Darsena).

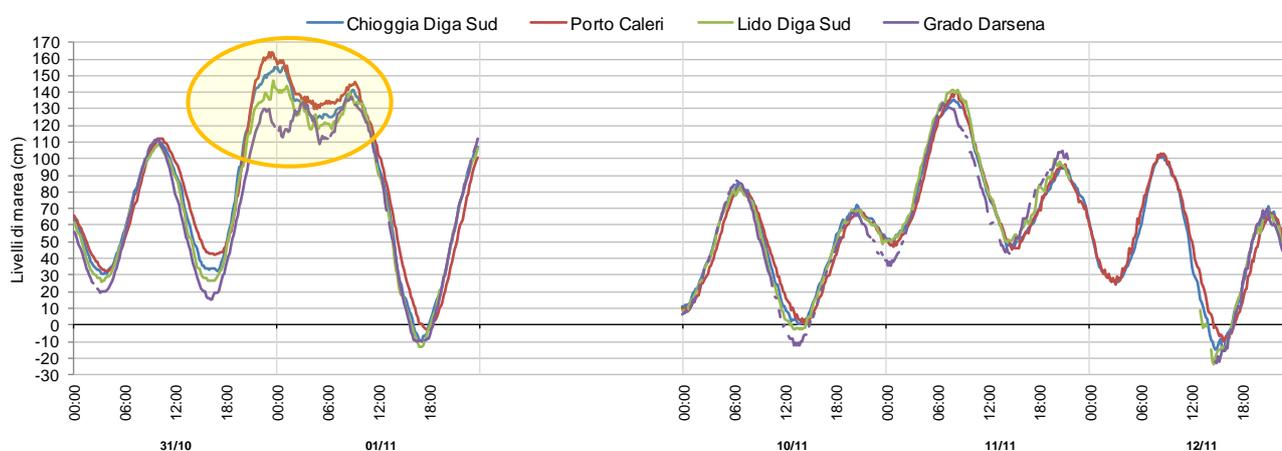


Figura 9 - Andamento dei livelli di marea sulla costa Nord-adriatica

L'accento ad una diversificazione tra i livelli di marea in mare appare evidente anche se ci spostiamo all'interno di un bacino chiuso come la Laguna di Venezia. La Bora infatti, soffiando nella direzione di maggior sviluppo della laguna (NE-SO), tende a spostare grosse quantità d'acqua dal bordo sopravento a quello sottovento, rendendo lo specchio lagunare paragonabile ad un cuneo, la cui superficie inclinata risulta depressa verso la laguna settentrionale.

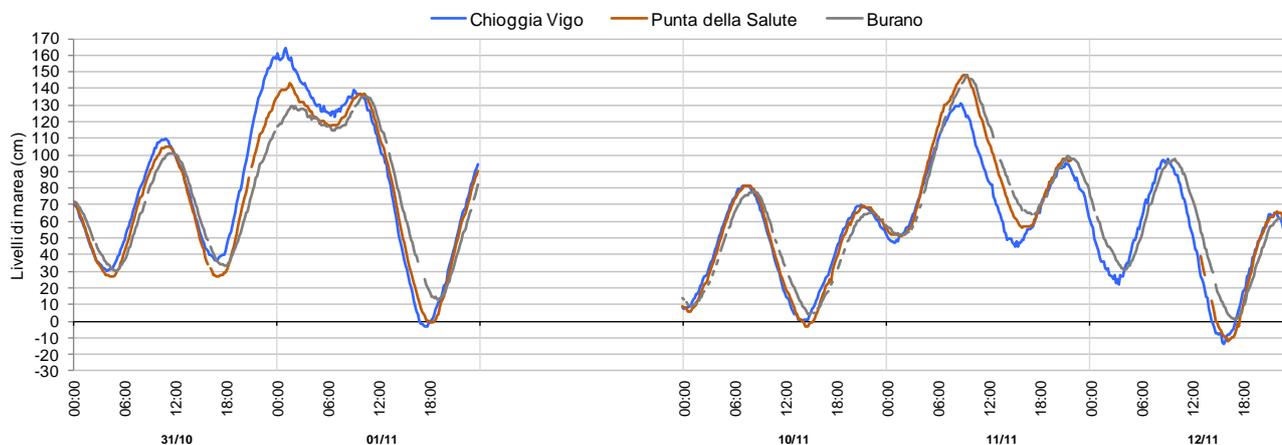


Figura 10 - Andamento dei livelli di marea all'interno della Laguna di Venezia

Come appare evidente nei due grafici sopra e sotto, in occasione del primo evento di alta marea eccezionale si può notare il forte scostamento dei livelli di marea (figura 10) e dei sovralzi (figura 11) tra la laguna sud (Chioggia Vigo) e la laguna nord (Burano), con valori intermedi registrati nella laguna centrale (Punta della Salute). Questa situazione di scostamento tra i sovralzi, dovuta all'effetto dello spirare di un vento locale, è nota come fenomeno dei "sovralzi differenziati".

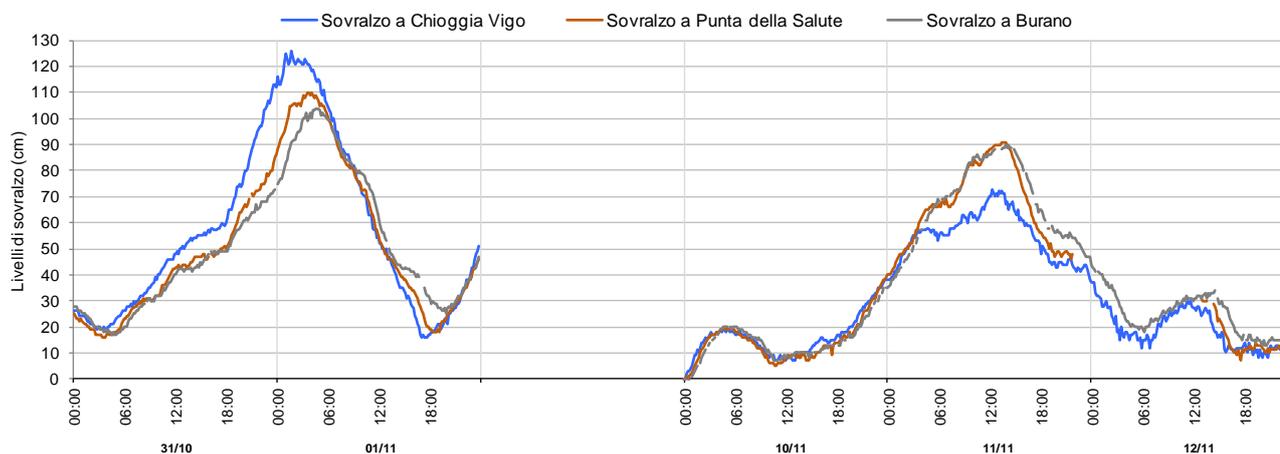


Figura 11 - Andamento dei sovralzi all'interno della Laguna di Venezia

Passando ora all'analisi mareografica del secondo evento, in mare aperto (stazione di Piattaforma CNR) il giorno 11 novembre viene rilevato un colmo di marea pari a +142 cm sullo ZMPS alle ore 7:20, con un sovralzo di 70 cm (figura 4), cioè appena superiore alla metà del valore fatto registrare nel corso dell'evento di inizio mese. I livelli di marea registrati presso le altre stazioni della costa alto adriatica si presentano tra loro pressoché in linea (figure 8 e 9), situazione analoga si può riscontrare anche all'interno del bacino lagunare veneziano (figura 10), con l'unica eccezione per la laguna sud. Infatti, nel corso dell'11 novembre, presso il centro abitato di Chioggia i livelli di marea ed i relativi sovralzi si sono attestati su valori nettamente inferiori a quelli delle altre stazioni lagunari a seguito dello svuotamento della parte di bacino sopravento al vento di Scirocco.

L'evento di marea eccezionale dell'11 novembre, dovuto esclusivamente alla presenza di persistenti venti di Scirocco, è parso nettamente meno severo dell'evento del giorno 1, cosa desumibile sia indirettamente dal confronto dei sovralzi, sia dal confronto delle differenti altezze d'onda in medio-alto Adriatico (figura 5).

Inoltre, dal grafico in figura 6 (secondo ovale) risulta manifesto come per 24 ore la direzione di propagazione dell'onda per le tre boe analizzate sia rimasta costante, ma differente nei valori. La direzione registrata ad Ancona si attesta attorno ai 110° (ESE), a Venezia sui 130° (SE), mentre nel Golfo di Trieste sui 180°-200° (SSO), fenomeno intuibile se si immagina il ruotare dell'angolo di spinta dell'onda con il ruotare della morfologia della linea di costa Alto Adriatica.

Nei grafici rappresentati nelle figure 12 e 13 si sono voluti mettere a confronto i livelli di marea registrati alle bocche di porto di Lido e Chioggia con i livelli registrati rispettivamente a Punta Salute e Chioggia Vigo in modo da evidenziare eventuali scarti significativi tra i livelli interni ed esterni tralasciando il caso della bocca di Malamocco a causa del singolare fenomeno innanzi descritto. I grafici fanno risaltare che, sia alla bocca di Lido che a quella di Chioggia, all'interno della laguna si registrano livelli più elevati solo nella fasi calanti, mostrando le due bocche in fase con il regolare flusso-riflusso di marea.

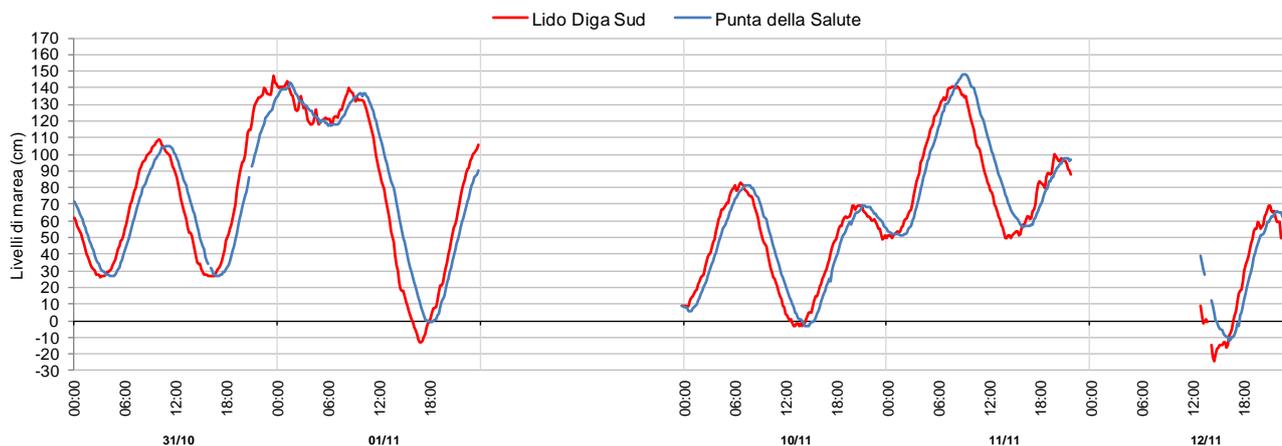


Figura 12 - Andamento dei livelli di marea tra mare e laguna (Bocca di Lido)

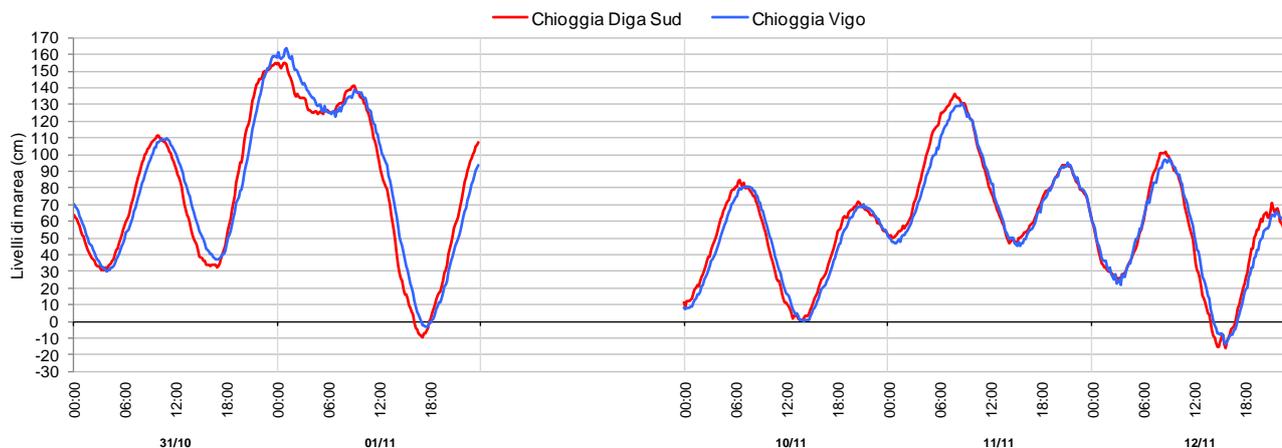


Figura 13 - Andamento dei livelli di marea tra mare e laguna (Bocca di Chioggia)

Statistiche e trend

Si vuole infine porre l'attenzione su quella che sembra essere una relazione sempre più stretta tra la frequenza del verificarsi di eventi di alta marea eccezionale così estremi e l'ormai indiscutibile trend in crescita del livello medio dei mari.

In particolare, nel grafico in figura 14 viene posta in rilievo sia per Venezia che per Trieste il trend generale di crescita del livello medio mare che, al netto degli effetti dei noti fenomeni di subsidenza tipici del sottosuolo veneziano, fa risaltare spiccate analogie per le due località della costa Nord-Adriatica.

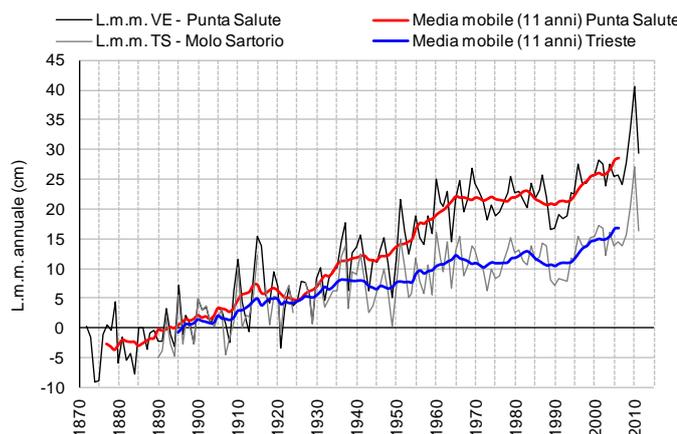


Figura 14 - Livello medio mare annuale nel periodo 1872-2011 (confronto Venezia-Punta della Salute e Trieste-Molo Sartorio)

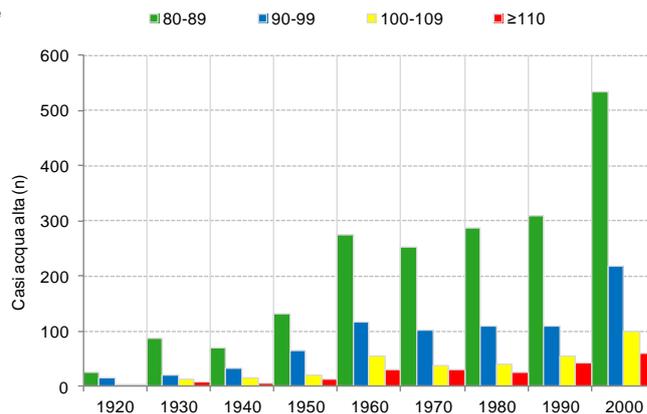


Figura 15 - Frequenza assoluta casi di acqua alta per decenni e classi di altezza (Venezia - Punta della Salute)

Il grafico in figura 15 conferma quanto appena detto ponendo però l'attenzione su un altro aspetto di primaria importanza per una città come Venezia, cioè il più che sensibile aumento della frequenza dei casi di acqua alta nel corso dell'ultimo secolo. Infatti, come appare chiaramente, tutte le classi di altezza presentano valori in aumento, specie quelle più basse (80-89 cm e 90-99 cm), a conferma che l'aumento delle alte maree sostenute dipende principalmente dall'aumento del livello medio mare.

Punta della Salute (dal 1872)		Burano (dal 1990)		Chioggia Vigo (dal 1990)		Lido Diga Sud (dal 1969)		Grado Darsena (dal 1992)	
04/11/1966	194	01/12/2008	154	01/11/2012	164	22/12/1979	176	01/12/2008	172
22/12/1979	166	06/11/2000	148	08/12/1992	162	01/02/1986	166	24/12/2010	156
01/02/1986	158	11/11/2012	148	09/12/1992	144	01/12/2008	158	23/12/2009	152
01/12/2008	156	25/12/2009	145	23/12/2009	142	08/12/1992	157	25/12/2009	152
12/11/1951	151	16/11/2002	143	10/11/2004	141	24/12/2010	155	20/11/1996	145
11/11/2012	148	24/12/2010	140	25/12/2009	139	23/12/2009	148	03/12/2010	144
16/04/1936	147	23/12/2009	140	24/12/2010	139	25/12/2009	146	31/10/2004	142
16/11/2002	147	01/11/2012	135	01/12/2008	138	01/11/2012	144	08/12/1992	141
15/10/1960	145	03/12/2005	133	16/11/2002	137	16/11/2002	144	06/05/1997	138
25/12/2009	145	03/12/2010	131	21/11/1999	134	11/11/2012	141	21/11/2000	138
03/11/1968	144	08/12/1992	131	03/12/2010	133	03/12/2010	141	16/11/2002	138
06/11/2000	144	31/10/2004	129	28/10/2012	133	31/10/2004	140	03/12/2005	138
23/12/2009	144	09/12/1992	129	24/12/2009	132	22/12/1981	139	01/11/2012	137
24/12/2010	144	30/11/2009	128	11/11/2012	131	17/02/1979	138	14/10/1993	137
01/11/2012	143	24/12/2009	127	31/10/2004	127	18/11/1996	138	06/11/2000	137
08/12/1992	142	27/12/2004	124	07/11/1999	127	26/10/1981	136	24/12/2009	137
17/02/1979	140	20/02/2010	122	04/10/1992	126	24/11/1987	136	11/11/2012	136
05/11/1967	138	12/10/1991	122	27/12/2004	125	10/11/2004	136	02/10/1993	136
26/11/1969	138	23/12/2010	121	05/10/1992	124	24/12/2009	136	20/12/1997	136
22/12/1981	138	08/02/2009	120	07/10/1998	124	26/11/1969	134	06/06/2002	135

Tabella 1 - Elenco dei primi 20 casi di alta marea registrata presso alcune stazioni della RMLV dalla data di messa in funzione

Conclusioni

Nella prima metà del mese di novembre 2012, a seguito del passaggio di due importanti impulsi meteorologici, sul bacino Alto Adriatico e nelle lagune veneto-friulane sono stati registrati due eventi di alta marea eccezionale. Tra i due è di sicuro l'evento del 1° novembre quello che si è manifestato come il più severo, basti pensare che il solo contributo meteorologico (sovrалzo) in mare aperto ha sfiorato i 130 cm sullo ZMPS. Infatti, se solo l'impulso meteo avesse ritardato di qualche ora, in concomitanza temporale con la massima astronomica di +66 cm delle ore 9:30, esso avrebbe potuto dar luogo ad una marea eccezionale di +193 cm sullo ZMPS (dalla somma di 127 cm di sovrалzo e 66 cm di componente astronomica), paragonabile quindi allo storico caso del 4 novembre 1966. È però doveroso ricordare che nell'appena citato evento del 1966 il sovrалzo calcolato a Punta della Salute aveva superato i 180 cm, contro i 110 cm fatti registrare nella medesima stazione nel corso dell'evento del 1° novembre 2012.

Dall'analisi dei livelli massimi di marea raggiunti nel corso dei due eventi, è doveroso segnalare che presso la stazione di Punta della Salute, stazione della RMLV con la più lunga serie storica (dal 1872), i due eventi si collocano al 6° posto (11 novembre con 148 cm sullo ZMPS alle ore 9.20) e al 13° posto (1° novembre con 143 cm sullo ZMPS alle ore 1.40). In tabella 1 viene presentato l'elenco dei primi venti valori massimi di marea registrati presso le stazioni di Punta della Salute, Burano, Chioggia Vigo, Lido Diga Sud e Grado Darsena, ognuna dalla data di inizio delle rilevazioni mareografiche.

A seguito di eventi estremi come quelli descritti nel presente documento, sembra fondamentale porre l'attenzione sulle conseguenze dirette ed indirette che essi hanno innescato. Infatti, le immediate ripercussioni che producono eventi simili sono tangibili non solo per il manifestarsi del noto fenomeno delle *acque alte* che affligge Venezia ed il suo bacino lagunare, ma anche per il non meno allarmante rischio costiero da mareggiate. Se poi, all'amplificazione del fenomeno di marea, si aggiunge una contemporanea situazione idraulica critica con i maggiori fiumi in piena, è evidente come anche questo possa diventare un fattore di alto rischio per tutto il litorale Nord-Adriatico. Se i tronchi terminali dei fiumi non riescono a recapitare a mare le loro portate di piena a causa della concomitante comparsa di un'alta marea eccezionale, il già elevato rischio idraulico in tutto l'entroterra della fascia costiera è destinato ad aumentare.