



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Tesi di tirocinio di formazione e orientamento

(Convenzione stipulata tra ISPRA e Università degli Studi di Padova)

**Dalla raccolta alla divulgazione dei dati meteo-mareografici:
definizione degli standard divulgativi e ideazione sezione
dedicata sul portale www.ispravenezia.it**

Dr.Ing. Alessio Andriotto

Tutor ISPRA: *Dott. Franco Crosato*

Tutor dell'Ente Promotore *Prof. Ing. Andrea Defina*

Data	Firma Tirocinante	Firma del Tutor ISPRA	Firma Responsabile Servizio ISPRA
Firma del Tutor Ente Promotore*			

* Il Tutor dell'Ente Promotore sarà citato nella pubblicazione ISPRA solo in presenza della firma

Abstract

Il presente documento descrive le attività che ho svolto presso ISPRA – Servizio Laguna di Venezia durante il mio tirocinio di formazione ambientale. I temi trattati hanno riguardato la raccolta, l'elaborazione, la validazione e la divulgazione dei dati meteo-mareografici registrati dalla Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del Litorale Nord Adriatico. Sono state quindi applicate le tecniche necessarie alla validazione dei dati “grezzi”, mentre per quanto riguarda l'aspetto divulgativo l'attenzione è stata rivolta alla redazione di elaborati meteo-mareografici destinati agli utenti del sito web www.ispravenezia.it. Inoltre, è stato proposto lo sviluppo di una sezione dedicata alla meteorologia, basata su un'analisi storica, al fine di fornire agli utenti del sito web le conoscenze di base per la consultazione degli elaborati meteo-mareografici. A titolo di esempio delle attività appena descritte sono allegati al presente lavoro: un rapporto tecnico sulla modifica della quota del caposaldo di una stazione mareografica, un bollettino meteo-mareografico (agosto 2012) e un'analisi di evento di marea (1 marzo 2011).

Prefazione

Da ormai più di un secolo, Venezia e la sua laguna sono sottoposte ad un monitoraggio continuo di carattere sia idraulico che ambientale. In particolare, è dal lontano 1872 che si registrano e archiviano misurazioni mareografiche relative ai livelli di marea. Pur con il susseguirsi del passaggio delle competenze tra enti diversi nel corso degli anni, gli archivi mareografici sono arrivati intatti ai giorni nostri, costituendo un indubbio tesoro di conoscenza. Questi archivi vengono attualmente nutriti da una continua e capillare raccolta dati in Laguna di Venezia, Laguna di Marano-Grado e arco costiero alto Adriatico. Infatti, nelle lagune veneto-friulane e lungo la costa antistante è attualmente attiva la Rete Mareografica della Laguna di Venezia e dell'Arco Costiero Nord Adriatico (RMLV), composta da più di 50 stazioni che registrano in continuo parametri meteo-mareografici, con trasmissione in tempo reale alla sede del Servizio Laguna di Venezia (ISPRA).

In questo percorso formativo si è voluta porre particolare attenzione sul flusso dei dati registrati presso le stazioni della RMLV, dalla loro raccolta fino alla loro diffusione al pubblico, affrontando i vari step che portano alla validazione del dato, le problematiche che si possono incontrare nell'elaborazione e nell'analisi di questi affascinanti, quanto complessi, dati ambientali.

Sono state infatti affrontate le procedure di validazione atte a rendere ufficiali i dati mareografici e le tecniche di elaborazione e analisi utili a descrivere l'evolvere di particolari fenomeni meteo-marini. Un'attenzione specifica è stata inoltre posta all'analisi dei dati meteorologici relativi al periodo 2000-2011 per valutare la presenza di particolari trend meteo-climatici in atto. A tal riguardo è stato proposto lo sviluppo di una sezione del sito web della sede ISPRA di Venezia al fine di caratterizzare la situazione meteo-climatica dell'ultimo dodicennio relativamente al bacino lagunare veneziano.

Il Tutor

Dott. Franco Crosato

Sommario

1. Introduzione	7
1.1 La marea	7
1.2 La marea nel Mare Adriatico.....	9
1.3 La marea nella laguna di Venezia.....	11
1.4 Inquadramento climatico della Laguna di Venezia	12
1.5 La subsidenza e i fattori di rischio connessi	13
2. Metodologia	17
3. Raccolta, elaborazione, validazione e divulgazione dei dati meteo-mareografici	19
3.1 La misurazione della marea	20
3.2 Stazioni mareografiche sottoposte alla procedura di validazione	22
3.2.1 Procedura di validazione	24
3.3 Redazione di documenti a carattere tecnico-scientifico	35
Conclusioni.....	51
Bibliografia.....	53
Allegati	55

1. Introduzione

1.1 La marea

La marea è un movimento periodico di innalzamento e abbassamento del livello del mare che si verifica in tutto il globo terrestre. Le cause sono imputabili alle forze gravitazionali del Sole e della Luna agenti nei confronti delle masse d'acqua presenti sul pianeta.

Si definiscono perciò alcune grandezze di riferimento:

- Alta marea (colmo), livello corrispondente al massimo innalzamento della acque;
- Bassa marea (cavo), livello corrispondente al massimo abbassamento;
- Escursione o ampiezza di marea, differenza tra livelli di alta e bassa marea.

Le maree sono inoltre classificabili secondo la loro periodicità giornaliera e secondo l'ampiezza di marea. In base alla periodicità si definiscono: diurne, se si realizza un solo ciclo di innalzamento e abbassamento del livello del mare; semidiurne se le alte e le basse maree riscontrate sono due e di ampiezza poco differente; miste con due alte maree e due basse maree di ampiezza però molto diverse. Se si considera l'ampiezza, le maree vanno distinte in macrotidali se l'escursione di marea è superiore a 4 metri, microtidali se invece tale grandezza non supera i due metri, come avviene nel Mare Adriatico. È importante precisare che l'ampiezza di marea varia in funzione della morfologia del bacino interessato.

Il livello di marea rilevato presso una determinata località dipende quindi dalle forze gravitazionali esercitate dal Sole e dalla Luna e dalle condizioni meteorologiche; i due effetti sono distinguibili in due componenti distinte della marea, astronomica e meteorologica; quest'ultima è nota come "sovrizzo".

La marea astronomica è determinata dalla combinazione delle forze gravitazionali esercitate dal Sole e dalla Luna con la forza centrifuga dovuta alla rotazione della Terra effettuata attorno al proprio asse¹. L'azione delle forze citate varia con i cicli astronomici della Terra e della Luna, influenzando quindi il livello della marea astronomica. La massima escursione di marea si presenta in condizioni di sizigia, cioè con l'allineamento tra Sole Luna e Terra (distinguibile nei casi di Luna nuova e Luna Piena), posizione che esalta il rigonfiamento delle acque in quanto le forze di attrazione della Luna e del Sole si sommano. La minima escursione invece si realizza con la posizione di quadratura (primo ed ultimo quarto), a causa della sottrazione degli effetti delle due forze d'attrazione: lunare e solare (figura 1).

¹ Guérin, 2007

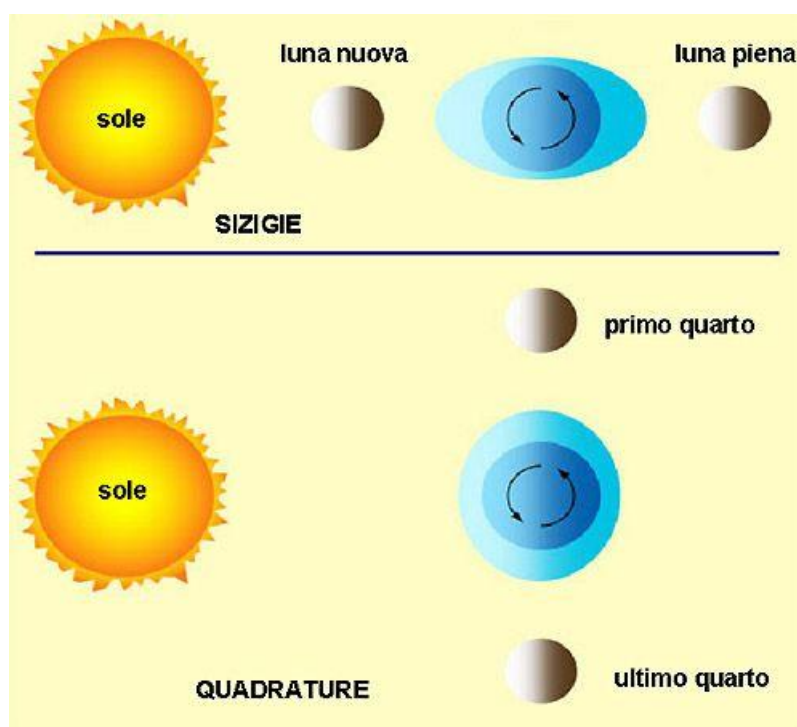


Figura 1. Posizione del sistema Terra-Sole-Luna in condizioni di sizigia e quadratura²

La componente meteorologica della marea è determinata da fattori quali la pressione atmosferica e il vento, che agiscono direttamente sul livello del mare. Tale componente è nota come “sovrалzo” ed è ottenuta, per una località ben definita, dalla differenza tra la marea reale misurata e la marea astronomica; in base all’azione degli agenti meteorologici il sovrалzo può assumere valori positivi o negativi rispetto alle oscillazioni astronomiche. La pressione atmosferica è data dalla forza esercitata dalle masse d’aria su tutta la superficie terrestre. Questa forza agisce anche su mari e oceani comprimendoli in funzione della sua intensità: un aumento della pressione atmosferica agente su un bacino produce un abbassamento del livello del mare; viceversa una depressione ne causa un innalzamento³. Questo fenomeno è noto come “effetto barometrico inverso” che associa ad un incremento di pressione pari a +1 hPa una diminuzione del livello del mare di -1 cm e viceversa. L’effetto del vento sul livello del mare si esplica invece in funzione delle sue caratteristiche come durata, direzione e velocità, e della forma e dell’estensione del bacino. Il vento tende ad insaccare le acque lungo la direzione di propagazione; in particolare se soffia verso zone costiere ne causa un aumento del livello del mare.

² http://www.ispravezenia.it/ispra/index.php?folder_id=60

³ Polli, 1961a

La marea può essere alterata inoltre da oscillazioni libere della superficie idrica note come “sesse”. La loro generazione avviene quando il passaggio di una perturbazione meteorologica, l’azione del vento e le variazioni bariche associate producono un dislivello temporaneo in una zona del mare. L’equilibrio del livello del mare viene quindi ristabilito con la generazione delle sesse che si smorzano gradualmente⁴. Nel Mare Adriatico le sesse principali presentano periodicità pari a 22 e 11 ore, valori molto simili alle periodicità delle maree, per questo motivo possono contribuire significativamente alla marea registrata.

In condizioni meteorologiche normali caratterizzate da venti deboli ed alta pressione il sovrалzo presenta un andamento regolare e si attesta su valori poco significativi; nel caso siano invece in atto perturbazioni meteorologiche di varia natura si rilevano scostamenti significativi tra la marea astronomica e quella reale. Inoltre, in presenza di sesse il sovrалzo assume un andamento periodico simile a quello della marea, in quanto esse si sovrappongono alla componente meteorologica della marea.

1.2 La marea nel Mare Adriatico

Il Mare Adriatico è un bacino semi-chiuso a causa della conformazione stretta, allungata e poco profonda ed è orientato lungo l’asse SE-NO. La sua lunghezza è pari a circa 800 km, ha una larghezza compresa tra i 90 e i 220 km, mentre la profondità diminuisce verso Nord: il valore massimo è pari a 1200 m all’altezza di Otranto, nel settore settentrionale invece scende sotto i 100 m. Questi fattori incidono sull’ampiezza della marea astronomica, favorendone un deciso incremento verso Nord: l’oscillazione della marea varia dai ± 10 cm di Otranto, fino ai ± 60 cm a Venezia.

La propagazione della marea avviene secondo una rotazione in senso antiorario attorno ad un punto fisso detto anfidromico, in cui l’ampiezza di marea è nulla. Tale punto è situato a circa metà distanza tra Ancona e Zara e da esso l’ampiezza di marea aumenta con la distanza⁵. La marea entra nell’Adriatico dal canale di Otranto e va a lambire la costa orientale dalmata risalendo a Nord fino a Trieste. In seguito varia la direzione nel golfo di Venezia secondo l’asse Est-Ovest costeggiando il litorale veneto-friulano per poi percorrere tutta la costa italiana e completare il ciclo ad Otranto in un tempo complessivo di 12 ore e 24 minuti.

La modalità di propagazione della marea è rappresentabile da un sistema di curve, di cui si distinguono due gruppi: linee cotidali che uniscono tutti i punti che raggiungono l’alta

⁴ (Polli, 1962)

⁵ (Polli, 1961b)

marea nel medesimo istante e linee di uguale semiampiezza di marea che congiungono i punti con uguale valore dell'ampiezza di marea. Le linee cotidali sono rappresentate come una rotazione rispetto al punto anfidromico, espressa in gradi sessagesimali. A seconda della componente della marea astronomica, ad un determinato angolo corrisponde un ritardo nel passaggio del colmo di marea. Ad esempio per la componente diurna lunare ad una rotazione di 30° corrisponde un intervallo temporale pari ad un'ora⁶.

Le maree diurne e semidiurne presentano un differente andamento delle due famiglie di curve. Nel caso delle maree diurne le linee cotidali sono disposte longitudinalmente e parallelamente fra loro, in quanto il loro punto anfidromico non è situato nel Mare Adriatico: Inoltre presentano valori crescenti dalla costa orientale a quella occidentale, con una differenza di fase pari a circa tre ore, a significare che la propagazione avviene da Est a Ovest⁷. Le linee di uguale semiampiezza di marea sono disposte parallelamente tra loro e perpendicolarmente rispetto alle linee cotidali, con valori crescenti da Otranto fino al Golfo di Trieste (figura 2a). Per quel che concerne le maree semidiurne, il punto anfidromico è localizzato tra Ancona e Sebenico per cui le linee cotidali sono disposte radialmente dal punto anfidromico appena citato; si precisa che raggi opposti hanno fase di marea opposta. Le linee di eguale semiampiezza di marea presentano forma ellissoidale e anche in questo caso l'ampiezza è maggiore nel Nord Adriatico (figura 2b).

Per quanto riguarda il Nord Adriatico, si deve segnalare l'influenza dei bassi fondali responsabili nel ritardo di propagazione della marea. I massimi valori dell'ampiezza di marea sono rilevabili presso Trieste⁸.

⁶ Polli, 1960

⁷ Ibidem

⁸ Polli, 1961b

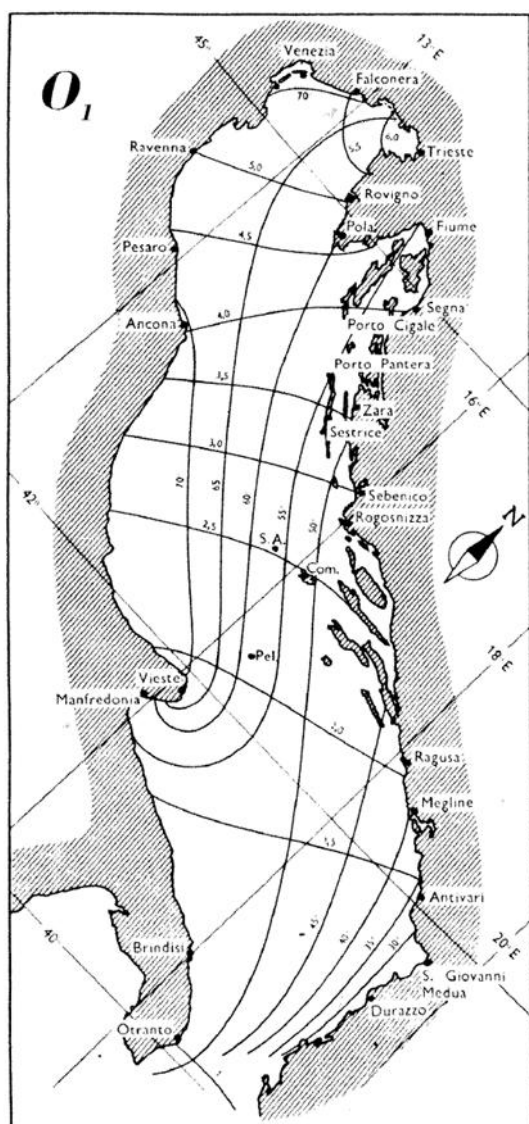


Figura 2a. Modalità di propagazione di una componente diurna di marea

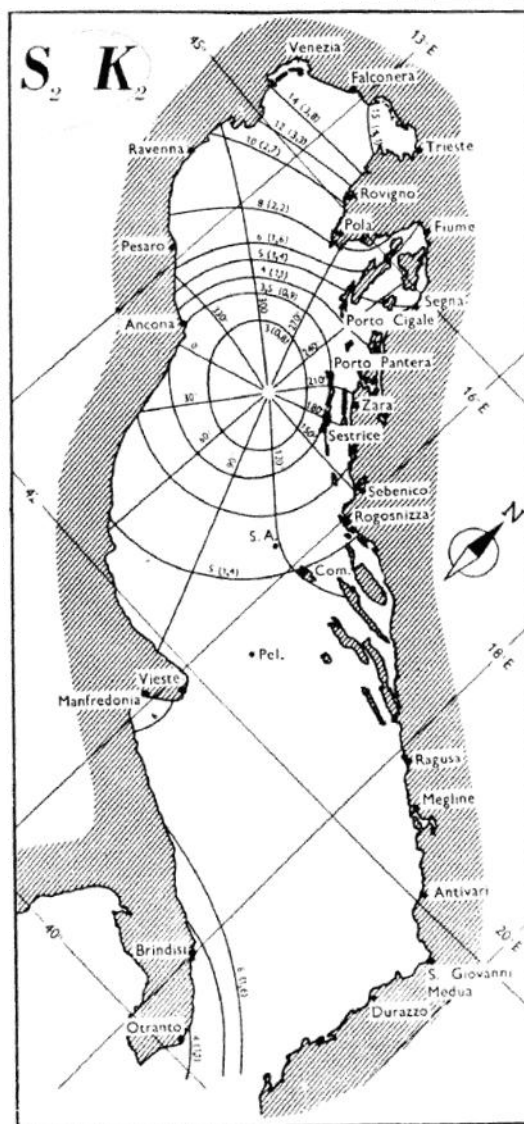


Figura 2b. Modalità di propagazione di una componente semidiurna di marea

1.3 La marea nella laguna di Venezia

La laguna di Venezia si estende per circa 50 km tra le foci del Sile a Nord e del Brenta a Sud , con una larghezza media di circa 12 km. È delimitata dai litorali di Pellestrina e Lido a Est, separati tra loro dalle bocche di porto che mettono in comunicazione la laguna con il Mare Adriatico, mentre a Ovest è separata dalla terraferma tramite la conterminazione lagunare.

La propagazione della marea avviene attraverso le tre bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia, che si presenta con ampiezze praticamente uguali e un ritardo di pochi minuti⁹,

⁹ Polli, 1952

per poi diffondersi in laguna attraverso le cosiddette direttrici di marea che rappresentano le vie preferenziali di propagazione della marea. All'ingresso dei canali di porto la marea subisce un'attenuazione dell'ampiezza dell'onda ed aumenta il ritardo di propagazione; successivamente si diffonde all'interno della laguna attraverso la rete di canali interni subendo ulteriori smorzamenti a causa dell'attrito esercitato dai canali e dai bassi fondali. Ciò è spiegabile dal fatto che, con l'allontanamento dalle bocche di porto i canali lagunari seguono percorsi molto tortuosi e subiscono una riduzione della sezione. Ciò è verificabile soprattutto nella laguna settentrionale a causa della configurazione morfologica caratterizzata dalla diffusa presenza di bassi fondali e barene.

Nel caso dei canali artificiali l'ampiezza di marea viene invece amplificata, in quanto i tracciati sono rettilinei (a differenza dei canali naturali) e presentano sezioni costanti dalla profondità che può giungere anche a 15 m. Questa casistica è verificabile nel canale Vittorio Emanuele e nel canale di Malamocco-Marghera, i quali sono adibiti al passaggio di grosse navi dirette al porto industriale di Marghera.

Attualmente la laguna è interessata da processi erosivi di tale intensità da causare l'approfondimento dei fondali e la riduzione della superficie occupata dalle barene. Ciò incide sulla propagazione della marea in quanto si riduce la resistenza opposta alle correnti in ingresso dalle bocche di porto favorendo l'amplificazione dei colmi di marea in alcuni punti, come accade nel canale di Lido e nella laguna centrale¹⁰.

1.4 Inquadramento climatico della Laguna di Venezia

Il clima è definito come l'insieme delle condizioni meteorologiche che si sono verificate in un determinato luogo per un lungo periodo di tempo, fissato convenzionalmente in 30 anni dall'Organizzazione Mondiale Meteorologica¹¹.

La situazione climatica della Laguna di Venezia è stata analizzata e descritta per il trentennio 1971-2000 dall'ARPAV (Agenzia Regionale per la Prevenzione e la Protezione Ambientale del Veneto) nell'ambito della realizzazione dell'Atlante Geologico della Provincia di Venezia. Le influenze principali sono dovute principalmente dall'effetto orografico delle Alpi e dall'azione parzialmente mitigatrice del Mar Adriatico, esplicita limitatamente alle correnti d'aria provenienti dai quadranti orientali e sud-orientali. Di conseguenza, le temperature invernali risultano basse a causa dell'azione dei venti di Bora provenienti da NE. Durante la stagione estiva è da segnalare invece l'azione delle brezze in

¹⁰ D'Alpaos, 2010

¹¹ <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faqs.html>

condizioni di alta pressione. Tra le altre peculiarità climatiche si segnalano l'afa estiva, l'attività temporalesca delle stagioni estive e autunnali caratterizzata da precipitazioni molto intense.

Le variabili climatiche di maggiore interesse sono la precipitazione, la temperatura e il vento che verranno analizzate ora con maggiore dettaglio.

La distribuzione delle precipitazioni è di tipo stagionale: i valori massimi si registrano nella stagione autunnale tra i mesi di settembre e novembre, mentre l'inverno rappresenta la stagione più secca. È interessante rilevare che durante l'estate avvengono fenomeni molto intensi, come temporali e più raramente trombe d'aria che si concentrano soprattutto nella zona a SE di Venezia.

Per quanto riguarda il regime termometrico si ha l'influenza dall'azione mitigatrice del Mare Adriatico, limitata però dai venti di Bora provenienti da NE, che impediscono una penetrazione efficace delle correnti più miti provenienti dal mare. Inoltre l'escursione termica annua è inferiore rispetto all'entroterra della Provincia di Venezia, caratterizzato invece da un regime climatico più continentale.

Il territorio lagunare è sottoposto all'azione dei venti di Bora e Scirocco. La Bora è un vento locale molto intenso proveniente da NE che agisce solamente sul litorale Nord Adriatico nelle stagioni autunnale ed invernale per un *fetch* limitato ad 80 km. La generazione del vento di Bora avviene a Trieste a causa della differenza di temperatura e pressione tra il mare caldo e l'entroterra freddo ed è correlata a nuclei sia di alta pressione che di bassa pressione. Lo Scirocco è un vento caldo tipico della stagione autunnale la cui formazione avviene invece nel continente africano in associazione ad una diminuzione della pressione. Dal Mar Mediterraneo esso entra nel Mare Adriatico tramite lo stretto di Otranto caricandosi di umidità e soffiando lungo tutto l'Adriatico per un *fetch* pari a circa 800 km. L'importanza dei venti sul regime delle maree sarà analizzata in dettaglio nel capitolo 3 e nell'allegato 3.

1.5 La subsidenza e i fattori di rischio connessi

Per subsidenza si intendono i movimenti di abbassamento verticale della superficie terrestre, indipendentemente dalle cause, dallo sviluppo areale e dall'evoluzione temporale del fenomeno, dalla velocità di spostamento del terreno e dalle alterazioni ambientali che ne conseguono. Tale fenomeno può esplicarsi con tassi di abbassamento annui variabili tra il mm e il cm e su scale locali o regionali. Questi fattori variano in base alle cause del processo di subsidenza, che si distinguono in naturali e antropiche. Il primo caso riguarda

processi geologici, che si esplicano su scala regionale in tempi molto lunghi tali da non interferire con le attività umane. Nel secondo caso la subsidenza si esplica in tempi molto più rapidi, a scale territoriali più limitate ma con gravi compromissioni per il territorio.

Per quanto riguarda Venezia e la laguna, la subsidenza è provocata sia da fenomeni naturali, che da fattori antropici. Il litorale Nord Adriatico è una formazione geologica relativamente recente e per questo caratterizzata dal costipamento naturale degli strati argillosi e sabbiosi del sottosuolo lagunare. Un altro fenomeno naturale è l'abbassamento dei fondali torbosi della laguna, spiegabile con il fatto che la torba subisce un restringimento con l'assorbimento di acqua salata proveniente dal Mare Adriatico¹².

L'emungimento di acque sotterranee è invece un fattore antropico: l'estrazione delle acque dal sottosuolo provoca una compattazione del terreno a cui corrisponde una riduzione del proprio spessore e quindi un abbassamento del piano di campagna. Tale attività veniva attuata in modo particolarmente gravoso negli anni compresi tra gli anni '30 e la fine degli anni '60 a causa delle esigenze del porto industriale di Marghera¹³. Per valutarne gli effetti negativi è stato confrontato il livello medio rilevato a Venezia – Punta della Salute con quello di Trieste, città presa come riferimento in quanto non interessata da subsidenza, nel periodo che va dal 1872 (anno in cui sono iniziate le attività di rilevamento del livello di marea a Venezia) al 2011. Fino agli anni '30 l'andamento per le due città è molto simile, con una leggera preponderanza di Venezia; con l'inizio degli emungimenti delle acque il livello medio mare misurato a Venezia subisce un incremento significativo che si arresta solo con l'interruzione delle attività di estrazione delle acque sotterranee. Dagli anni '70 fino al 2000 nella città lagunare il livello medio mare si stabilizza, per poi aumentare nuovamente dopo il 2000. Questo nuovo incremento non risulta imputabile a fenomeni di subsidenza, bensì di eustatismo e ciò è constatabile dal fatto che il livello medio mare segue il medesimo andamento sia a Venezia che a Trieste (figura 3a). L'eustatismo è un fenomeno che si realizza su scala globale e consiste nell'aumento del livello medio mare provocato dal cambiamento climatico.

Le conseguenze delle attività estrattive si possono verificare anche nell'improvviso aumento della frequenza dei casi di acqua alta registrato tra gli anni '50 e gli anni '60 (figura 3b).

Attualmente i processi di subsidenza si sono stabilizzati nel capoluogo veneto, tanto che i tassi di abbassamento si aggirano attorno a 1mm/anno; maggiormente colpiti sono il

¹² Gottardo, 1975

¹³ Ferla et al., 2006

litorale di Cavallino-Treporti e la laguna settentrionale, con valori che giungono fino a 3 mm/anno¹⁴. Una nota va fatta per le bocche di porto: i lavori di realizzazione del MO.S.E. (Modulo Sperimentale Elettromeccanico) hanno provocato abbassamenti circoscritti ma alquanto rilevanti in archi temporali molto brevi¹⁵.

La subsidenza può rappresentare quindi un notevole fattore di rischio per Venezia e il suo bacino lagunare a causa della ridotta altimetria e del concomitante fenomeno dell'eustatismo. Queste variabili infatti contribuiscono sinergicamente all'aumento della frequenza dei casi di alta marea e rendono il territorio maggiormente esposto ai fenomeni erosivi.

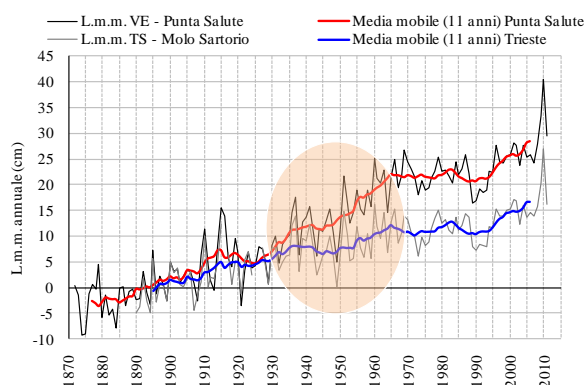


Figura 3a. Confronto tra la variazione del livello medio mare a Venezia e Trieste per il periodo 1872-2011

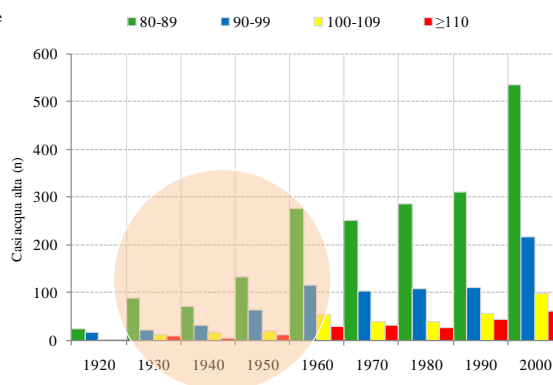


Figura 3b. Frequenza dei casi di alta marea rilevati a Venezia nel periodo 1872-2011

¹⁴ Atlante geologico della Provincia di Venezia, 2011

¹⁵ Strozzi et al., 2009

2. Metodologia

Nella presente relazione sono descritte le modalità di validazione e divulgazione dei dati meteo-mareografici. La validazione dei dati è effettuata secondo una procedura ben definita al fine di eliminare gli errori strumentali e garantirne un utilizzo ottimale, per esempio negli studi sul regime mareale della Laguna di Venezia. In alcuni casi possono essere impiegati anche dati non validati, ma è comunque necessario compiere delle operazioni di “sgrezzatura” atte ad eliminare gli errori strumentali più grossolani.

Per quanto riguarda la divulgazione del dato, l’attenzione è stata posta sulla realizzazione di documenti meteo-mareografici da pubblicare sul sito web www.ispravenezia.it, che viene effettuata secondo criteri ben definiti. A tale scopo quindi si devono considerare la tipologia di utenza a cui destinare le pubblicazioni, le nozioni di base necessarie alla comprensione del documento e l’obiettivo per cui è stato redatto.

Nella fase di validazione dei dati e di redazione dei suddetti documenti di fondamentale importanza è il supporto fornito dalla sala operativa del Servizio Laguna di Venezia, che riceve in tempo reale le rilevazioni effettuate dalle stazioni meteo-mareografiche della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord Adriatico (RMLV). Nella sala operativa è possibile valutare, relativamente ai dati grezzi:

- il buon funzionamento dei sistemi di trasmissione del dato in tempo reale e in tempo differito;
- la bontà delle rilevazioni effettuate dagli strumenti posti nelle stazioni della RMLV;
- la situazione meteo-mareografica in tempo reale;
- la situazione meteo-mareografica determinatasi in tempi relativamente recenti.

3. Raccolta, elaborazione, validazione e divulgazione dei dati meteo-mareografici

Il Servizio Laguna di Venezia di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) gestisce la RMLV allo scopo di raccogliere, elaborare, analizzare e divulgare dati mareografici e meteorologici. La RMLV comprende 52 stazioni mareografiche situate nel bacino lagunare veneziano e nella fascia costiera estesa tra il delta del fiume Po e la Laguna di Marano-Grado (figura 4). La totalità delle stazioni è attrezzata per la registrazione dei dati meteo-mareografici in locale e per la trasmissione in tempo reale o in tempo differito dei dati stessi dalle centrali dedicate. Alcune stazioni sono anche dotate di strumentazione apposita per registrare anche l'ampiezza e il periodo del moto ondoso e parametri meteorologici quali direzione e velocità del vento, pressione atmosferica, temperatura dell'aria, precipitazioni, umidità e radiazioni solare.

I dati raccolti dalla RMLV costituiscono la base di riferimento per attività scientifiche riguardanti la previsione della marea in alto Adriatico, le variazioni del livello medio mare sul lungo periodo, la difesa di Venezia dalle acque alte, lo studio delle trasformazioni morfologiche della laguna, il rischio di inondazione per la fascia costiera Nord adriatica, ecc.

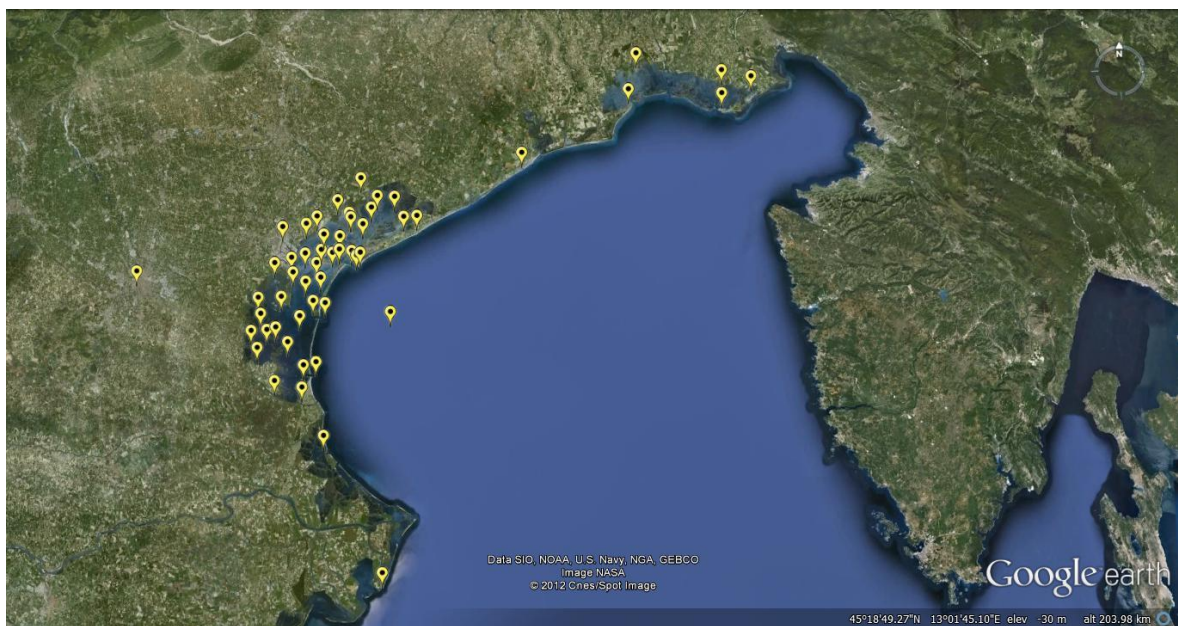


Figura 4. Stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord Adriatico (RMLV)

La misurazione del livello di marea presuppone l'introduzione di un piano di riferimento rispetto al quale riferire le quote mareali rilevate. Per la Laguna di Venezia questo riferimento è rappresentato dallo Zero Mareografico di Punta della Salute (Z.M.P.S.). Esso è pari al livello medio del mare del 1897 ed è stato calcolato mediando i dati di 25 anni di osservazioni (dal 1885 al 1909) ed assegnando il valore di riferimento all'anno centrale¹⁶. Rispetto al piano di riferimento ZMPS, lo Zero della Rete Altimetrica Fondamentale dello Stato IGM (livello medio del mare registrato a Genova nel 1942 mediando i dati registrati dal 1937 al 1946) risulta più alto di 23.56 cm¹⁷.

3.1 La misurazione della marea

Le stazioni mareografiche della RMLV sono generalmente costituite da cabine sostenute da pali di fondazione e circondate da ormeggi per permettere l'attracco delle imbarcazioni durante le periodiche visite di ispezione (figura 5). All'interno delle cabine è installata la strumentazione per il rilevamento del livello di marea e la trasmissione dei dati misurati. È presente inoltre un pozzetto, definito di calma, collegato con il mare tramite due fori opposti e sfalsati. La funzione del pozzetto di calma è quella di attenuare le oscillazioni provocate dal moto ondoso, filtrando solamente le oscillazioni legate al regime delle maree.



Figura 5. Stazione mareografica di Meda - Bocca Lido

¹⁶ Dorigo, 1961

¹⁷ Cavazzani, 1977

Per la registrazione del livello di marea si utilizzano appositi strumenti denominati mareografi, i quali ne rilevano la quota ad intervalli regolari di cinque/dieci minuti. I mareografi utilizzati nella RMLV sono di diverse tipologie; i più diffusi prevedono l'utilizzo di un galleggiante inserito all'interno del pozzetto di calma. Il galleggiante è collegato ad una puleggia tramite un filo teso da un contrappeso, mentre a sua volta la puleggia è collegata al mareografo. Il mareografico fornisce l'altezza di marea rispetto al punto di riferimento che, come detto in precedenza, è rappresentato dallo ZMPS (figura 6).

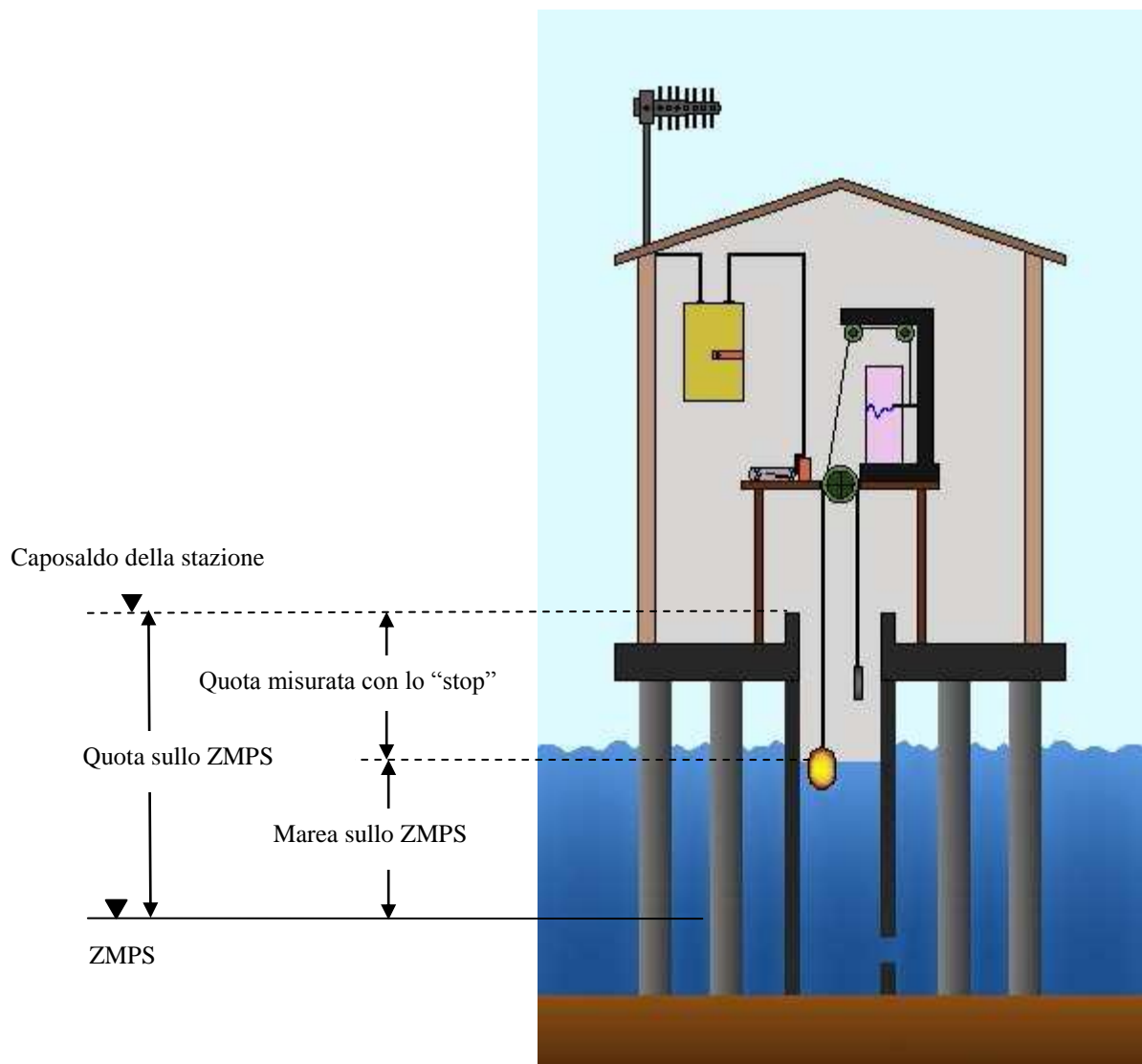


Figura 6. Modalità di misurazione del livello di marea con mareografo a galleggiante

Altri strumenti impiegati per le misurazioni mareografiche sono gli ondometri e gli idrometri a pressione. L'ondometro è installato esternamente alla cabina ed è costituito da un sensore ad ultrasuoni. Il livello di marea è calcolato dalla media mobile dei valori campionati ogni 5 minuti in un intervallo temporale adeguato al fine di filtrare le

oscillazioni provocate dal moto ondoso. Tale intervallo temporale è pari a 30 minuti nelle stazioni a mare (come Piattaforma CNR), mentre per le stazioni situate in laguna, in quanto meno esposte al moto ondoso, è uguale all'intervallo di campionamento¹⁸. Un idrometro a pressione è invece uno strumento che viene posto sul fondo del mare e calcola l'altezza di marea misurando la pressione della colonna d'acqua sovrastante in base alla legge idrostatica.

Di seguito è descritta la procedura di validazione dei dati mareografici che ho applicato per le serie di dati grezzi di alcune stazioni della RMLV.

3.2 Stazioni mareografiche sottoposte alla procedura di validazione

Nel presente lavoro sono state analizzate le serie di dati grezzi rilevati nelle otto stazioni mareografiche indicate in tabella 1. In base alla localizzazione geografica sono state suddivise in due gruppi: quelle a mare e quelle interne alla laguna (figura 7). In sede di validazione sarà considerata la diversa influenza del moto ondoso sulla misurazione dei dati, fenomeno che risulta più intenso all'esterno della laguna.

N° in mappa	Stazioni	Anni sottoposti a processo di validazione	Mareografi disponibili	Localizzazione
1	Chioggia diga Sud	2011	1 galleggiante + 1 idrometro a pressione	Mare
2	Malamocco diga Nord	2011	2 galleggianti	Mare
3	Faro Rocchetta	2011	2 galleggianti	Laguna
4	Piattaforma CNR	2011	1 ondometro	Mare
5	Meda - Bocca Lido	2011	1 galleggiante	Mare - Laguna
6	San Nicolò	2011 - 05/2012	2 galleggianti	Laguna
7	Sant'Erasmo	2011	1 galleggiante	Laguna
8	Murano	2009 - 2010 - 2011	2 galleggianti + 1 ondometro	Laguna

Tabella 1. Stazioni mareografiche sottoposte al processo di validazione dei dati

¹⁸ ISPRA, 2012a

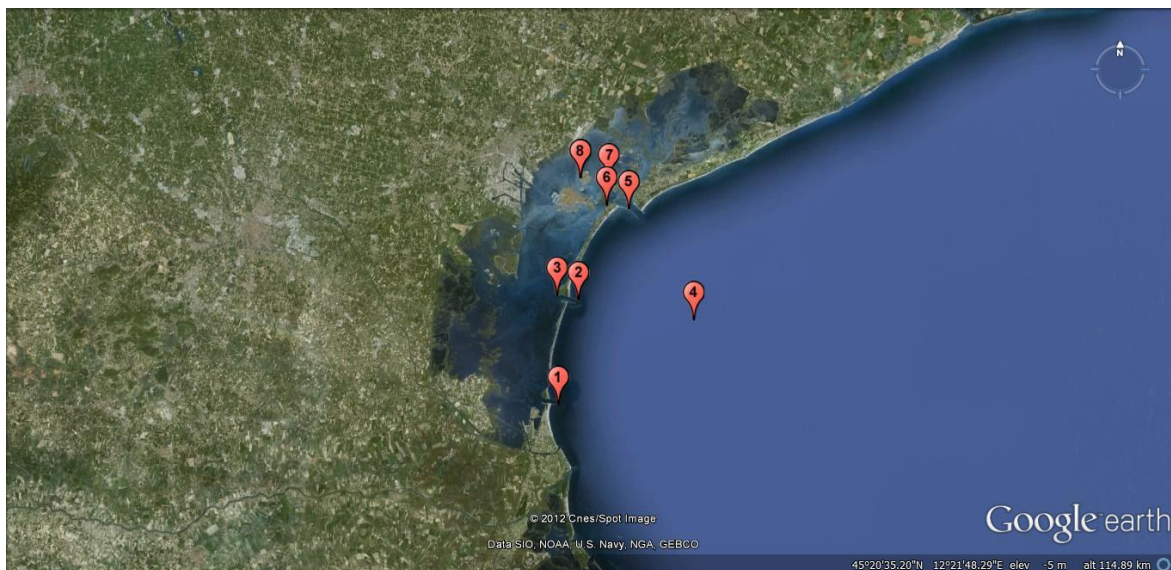


Figura 7. Stazioni della RMLV sottoposte a procedura di validazione dei dati mareografici

Nel corso delle analisi sono state considerate le direttrici di propagazione della marea, che rappresentano le vie preferenziali lungo le quali la marea, proveniente dal Mare Adriatico, si diffonde nella laguna attraverso la rete interna di canali. Si considera in questo caso la direttrice mare comprendente le stazioni di Chioggia Diga Sud, Malamocco Diga Nord e Piattaforma CNR, a cui si aggiunge la stazione di Faro Rocchetta, pur essendo interna alla laguna, in quanto situata sulla direttrice di Malamocco.

Le altre stazioni interne alla laguna (figura 8) sono localizzate nella direttrice del canale di Lido, in cui è presente la stazione di Meda-Bocca Lido (5), che a sua volta si suddivide in due direttrici secondarie che seguono i seguenti canali principali:

- canale di San Nicolò (6), in cui è situata l'omonima stazione, da cui si diparte la diramazione per Murano (8);
- canale di Sant'Erasmo (7) dell'omonima stazione, che rappresenta la prima diramazione del canale di Lido all'interno della laguna.

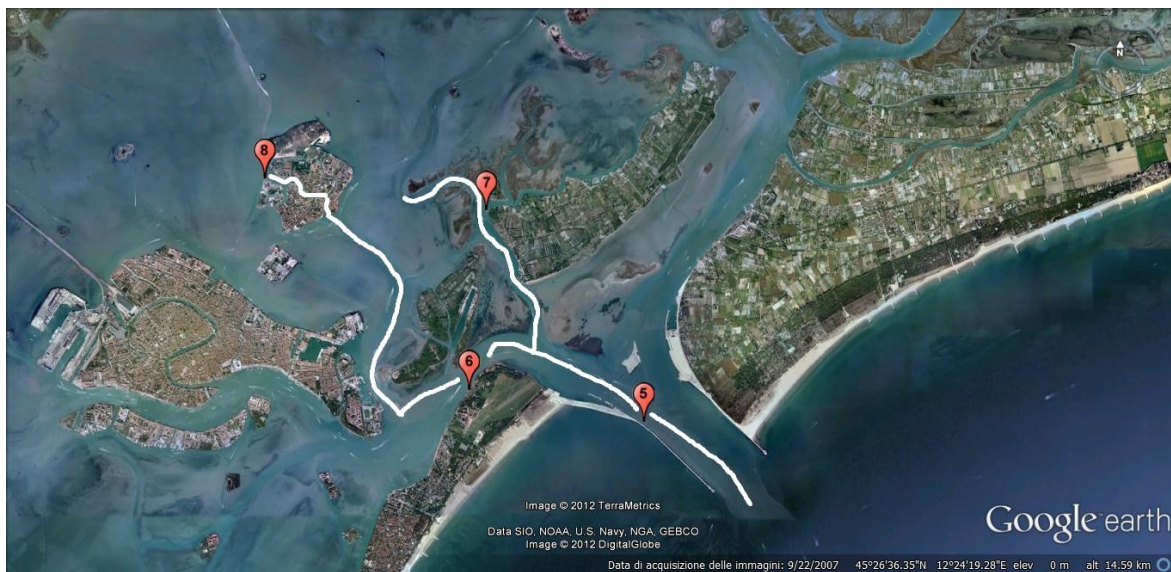


Figura 8. Direttrici di propagazione della marea per le stazioni interne alla laguna

3.2.1 Procedura di validazione

I dati mareografici rilevati nelle stazioni della RMLV possono essere caratterizzati da errori di diversa origine, soprattutto di tipo strumentale. È quindi necessario effettuare delle operazioni di correzione e verifica dei dati grezzi rilevati dallo strumento, attraverso la procedura di validazione. Tale procedura si articola nelle seguenti fasi:

1. Verifica delle operazioni di taratura;
2. Filtro differenza dei dati grezzi;
3. Analisi del livello medio mare;
4. Analisi del sovrizzo;
5. Analisi delle quadrature.

Verifica delle operazioni di taratura

La misura della marea avviene con strumenti appositi denominati mareografi, i quali registrano il livello idrometrico ad intervalli regolari di cinque/dieci minuti. Ogni stazione è visitata periodicamente dagli operatori. Al fine di verificare il regolare funzionamento della strumentazione essi effettuano l'operazione di "stop", misurando manualmente la quota della marea (distanza tra caposaldo della stazione e pelo dell'acqua) e confrontandola con il valore restituito dallo strumento (figura 6). Se viene rilevata una discrepanza tra le due misurazioni, l'operatore procede con la taratura dello strumento correggendone il dato di livello. Queste operazioni vengono segnalate nelle apposite schede stazioni redatte dagli operatori in occasione delle visite alle stazioni (tabella 2).

Nel caso sia stata effettuata una taratura dello strumento, è necessario intervenire sui dati grezzi cercando di capire il motivo ed il momento in cui è intervenuto il problema. Nel caso in cui si sia di fronte ad un caso di semplice deriva strumentale, l'entità della correzione deve essere distribuita nell'intervallo temporale compreso tra la data in cui è stata effettuata la taratura e la visita precedente. Ad esempio nella stazione di Chioggia Diga Sud è stata effettuata una correzione pari a +2 cm in data 10 maggio 2011. Per la correzione dei dati perciò si deve fare riferimento alla precedente visita avvenuta il 6 aprile 2011. I giorni trascorsi tra le due visite sono 33 e sono stati suddivisi a loro volta in tre parti uguali di 11 giorni in cui è stata distribuita la correzione di +2 cm: nella prima parte i dati non sono stati modificati, nella seconda sono stati sottoposti ad una correzione di +1 cm e nella terza parte di +2 cm.

DATA	NOME STAZIONE		C.S.	OPERATORE	Nome Cognome
10/05/2011	Chioggia Diga Sud		257		
	Orario	Lettura	Note		
STOP Arrivo	09,00s	276	-19.0		
Ott	09,01s	-21	Scarico dati, svuoto memoria, regolo quota, sostituzione batteria		
Tele/Siap	09,04s	-19	Ok		
Mecc	09,00s	-21	Cambio Diagramma e regolo quota		
STOP Part.	09,06s	277	-20		
NOTE					

Tabella 2. Scheda stazione compilata durante la visita c/o la stazione di Chioggia Diga Sud il 10/05/2011

Filtro differenza dei dati grezzi

In questa fase si applica un filtro differenza al fine di individuare gli errori grossolani presenti nel segnale mareografico. Il filtro differenza è calcolato come la differenza tra il valore di un dato di livello e quello immediatamente antecedente ad esso e viene confrontato visivamente sul tracciato mareografico. Per le stazioni interne alla laguna scelta l'entità del filtro è stata fissata a ± 5 cm, mentre Piattaforma CNR, localizzata in mare aperto a circa 15 km dalla costa il filtro è stato fissato ± 10 cm, a causa delle oscillazioni di marea provocate dalla maggiore intensità del moto ondoso.

Gli errori più frequentemente rilevati con il filtro differenza sono:

- Assenza di dati;
- Spike;
- Scarrucolamenti;
- Assenza di un preciso significato fisico assunto dai dati

Un primo problema constatato durante la validazione consiste nell'assenza di dati. Ciò è visualizzabile nel tracciato mareografico con dei “buchi”, mentre il filtro differenza mostra dei picchi in corrispondenza dei valori mancanti (figura 9). L'assenza di dati può essere causata da un'avaria nel sistema di registrazione oppure da problemi di ricezione o trasmissione del dato dalla stazione mareografica alla centrale operativa. Il primo caso può essere risolto, ove possibile, con l'interpolazione manuale del dato. Nel secondo caso invece il problema è risolvibile con lo scarico manuale da parte degli operatori in quanto i dati sono presenti nella memoria del mareografo.

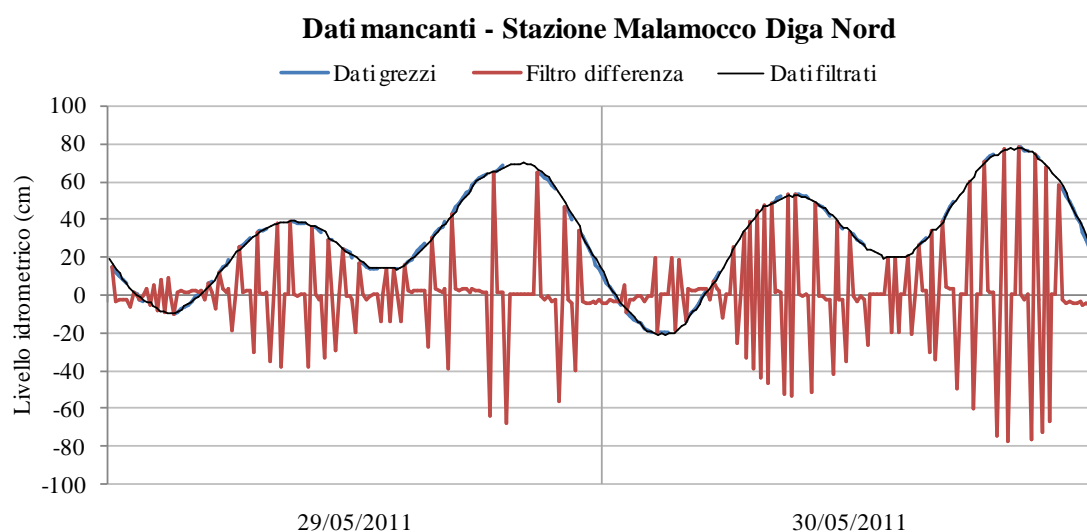


Figura 9. Esempio di dati mancanti e relativa correzione. Stazione di Malamocco Diga Nord, 29-30 /05/ 2011

Uno spike consiste invece in un picco anomalo del tracciato mareografico ed è segnalato dal filtro differenza con un'improvvisa oscillazione (figura 10). In alcune stazioni poste a lato dei grandi canali navigabili, quale ad esempio il canale di San Nicolò, ciò è provocato dal passaggio di navi di grosso carico responsabili di un moto ondoso di tale intensità da causare degli svasi d'acqua, cioè dei rapidi svuotamenti del pozzetto di calma situato all'interno della stazione stessa. Questa casistica è verificabile nei casi in cui sia presente più di uno strumento, anche se va precisato che spesso strumenti diversi hanno anche diversa sensibilità. Se lo spike è presente in entrambi gli strumenti, i dati interessati non sono oggetto di correzione, se invece lo spike è dovuto al malfunzionamento dello strumento, si procede all'eliminazione puntuale del dato.

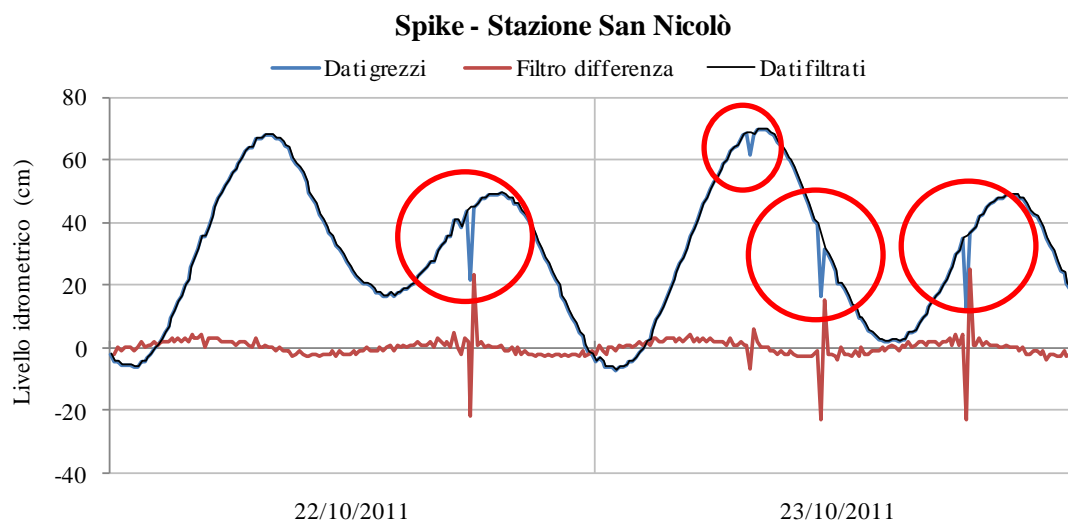


Figura 10. Spike rilevati nella stazione di San Nicolò tra il 22 e il 23 ottobre 2011.

Lo scarrucolamento consiste in una variazione del tracciato della marea causata da uno scivolamento della fettuccia sulla puleggia collegata al galleggiante. Questo errore è visualizzabile nell'andamento della marea come uno spostamento verticale del segnale mareografico pari all'entità dello scarrucolamento stesso (figura 11). Tale problema è rilevato dagli operatori durante le visite di controllo alle stazioni, mentre in sede di validazione viene corretta la serie mediante il calcolo dalla differenza con i dati rilevati in un altro mareografo della medesima stazione (ove presente). Un errore provocato da uno scarrucolamento è risolvibile con la traslazione verticale dei dati mareografici per un valore pari all'entità dello scarrucolamento.

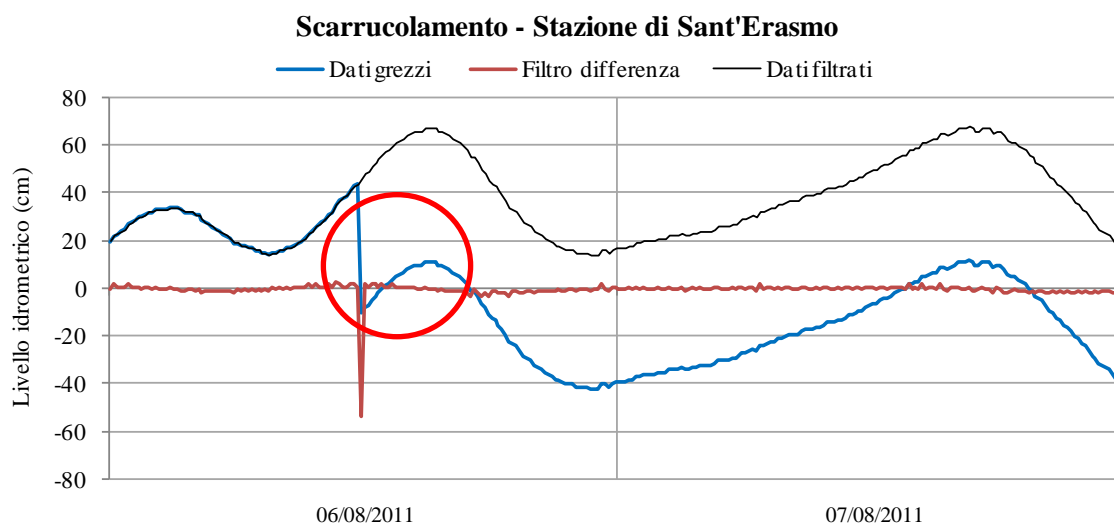


Figura 11. Scarrucolamento verificatosi nella stazione di Sant'Erasmo tra il 6 e il 7 agosto 2011.

Un ultimo problema in cui si è incorsi durante la procedura di validazione consiste nella presenza di dati senza alcun significato fisico reale. Ciò può essere causato dal

malfunzionamento o dall'avaria dei sistemi di misura; la correzione consiste nella sostituzione dei dati con rilevazioni corrette effettuate da uno strumento appartenente alla medesima stazione oppure con l'eliminazione dei dati nel caso sia presente un solo strumento.

Analisi del livello medio mare

L'analisi del livello medio mare consiste nel calcolo della media aritmetica di tutta una serie di dati mareografici corretti con l'aiuto dell'applicazione del filtro differenza ed è riferita ad intervalli temporali mensili (figura 12) e decadali (figura 13). Le medie calcolate sono confrontate distintamente per le stazioni a mare (con Faro Rocchetta) e per le altre stazioni interne alla laguna, allo scopo di verificare la concordanza dei dati rilevati rispettivamente con le stazioni di Lido Diga Sud e Punta della Salute, di cui sono disponibili i dati validati per l'anno 2011. L'analisi dà esito positivo se non si osservano differenze significative tra i livelli medi delle stazioni maggiori di ± 1 cm. In caso contrario sarà necessario individuare le cause dello scostamento tra i livelli, che in molti casi sono imputabili a:

- Mancate correzioni nel corso della prima analisi del dato;
- variazioni delle quote del caposaldo rispetto allo ZMPS;
- problemi di tipo strumentale.

Quest'ultima casistica è stata riscontrata durante la procedura di validazione dei dati registrati presso la stazione mareografica di Piattaforma CNR, motivo per cui si è deciso non rilasciare come serie validata come sarà analizzato in dettaglio nei paragrafi successivi.

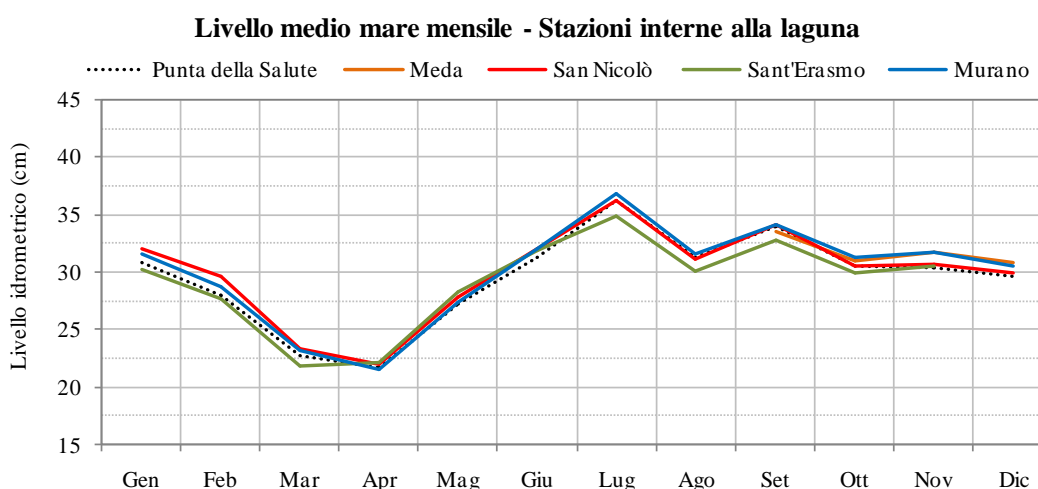


Figura 12. Confronto tra i livelli medi mensili delle stazioni interne alla laguna calcolati per l'anno 2011

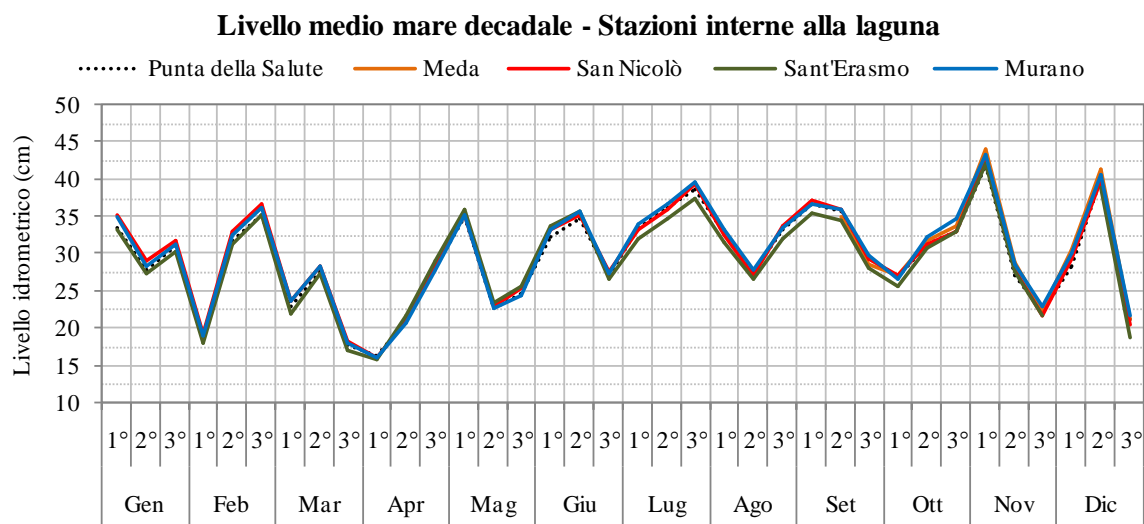


Figura 13. Confronto tra i livelli medi decadali delle stazioni interne alla laguna calcolati per l'anno 2011

Dal confronto tra le stazioni a mare (Chioggia Diga Sud, Malamocco Diga Nord, Lido Diga Sud e Piattaforma CNR), più Faro Rocchetta, è emerso che il livello medio mare di Piattaforma CNR è decisamente maggiore rispetto alle altre serie. È da notare inoltre come l'entità della differenza calcolata con i livelli medi delle altre stazioni sia molto variabile nel corso dell'anno 2011 (figure 14 e 15).

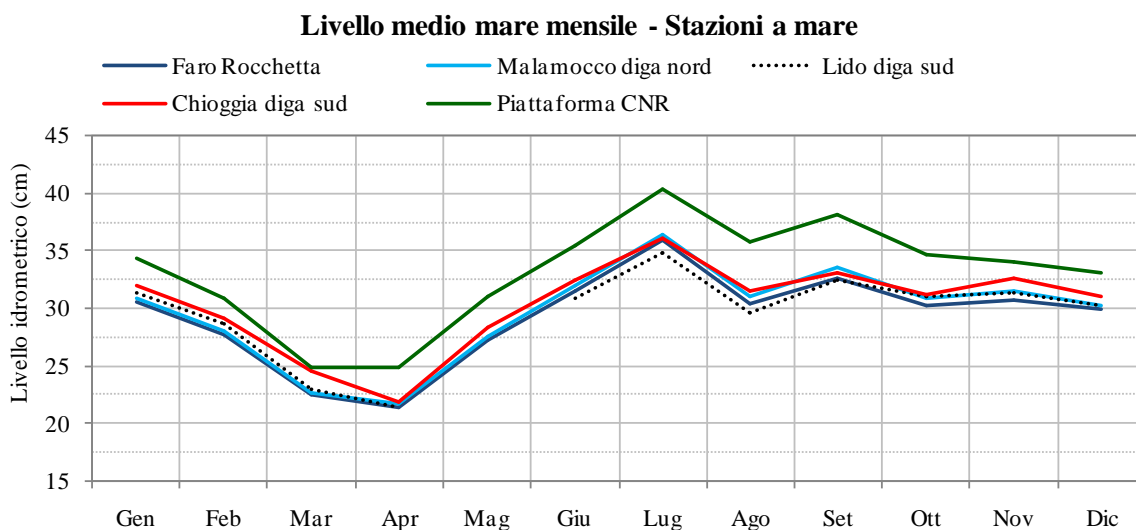


Figura 14. Confronto tra i livelli medi mensili delle stazioni a mare e Faro Rocchetta calcolati per l'anno 2011

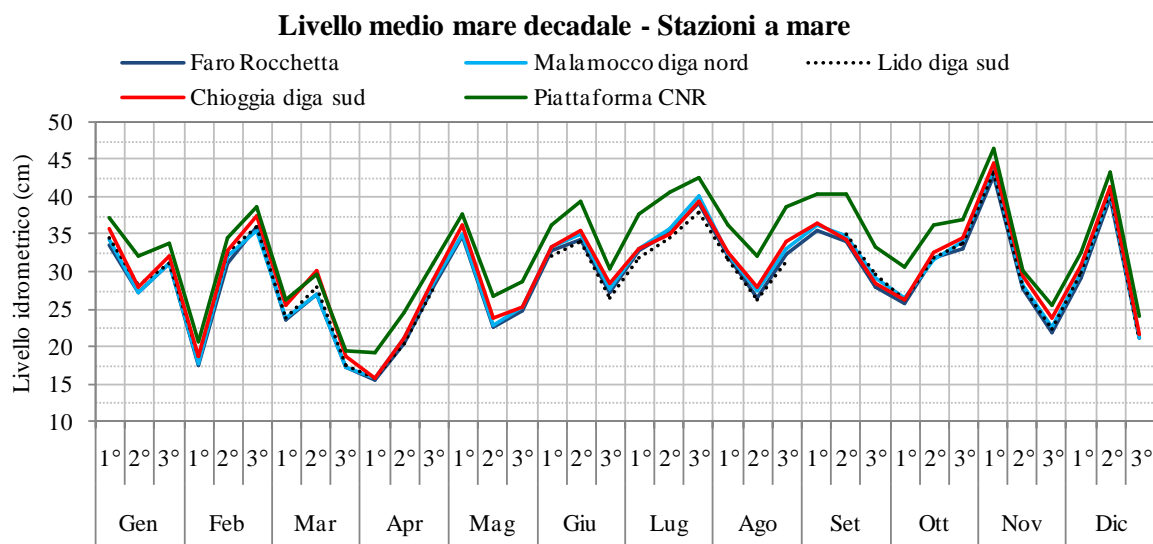


Figura 15. Confronto tra i livelli medi decadali delle stazioni a mare e Faro Rocchetta calcolati per l'anno 2011

Un'ulteriore analisi è stata effettuata confrontando, per le medesime stazioni, le serie di dati grezzi. Anche in questo caso si osserva che il livello di marea misurato presso Piattaforma CNR è decisamente maggiore rispetto alle altre stazioni di confronto, che tra loro invece presentano valori in linea (figura 16).

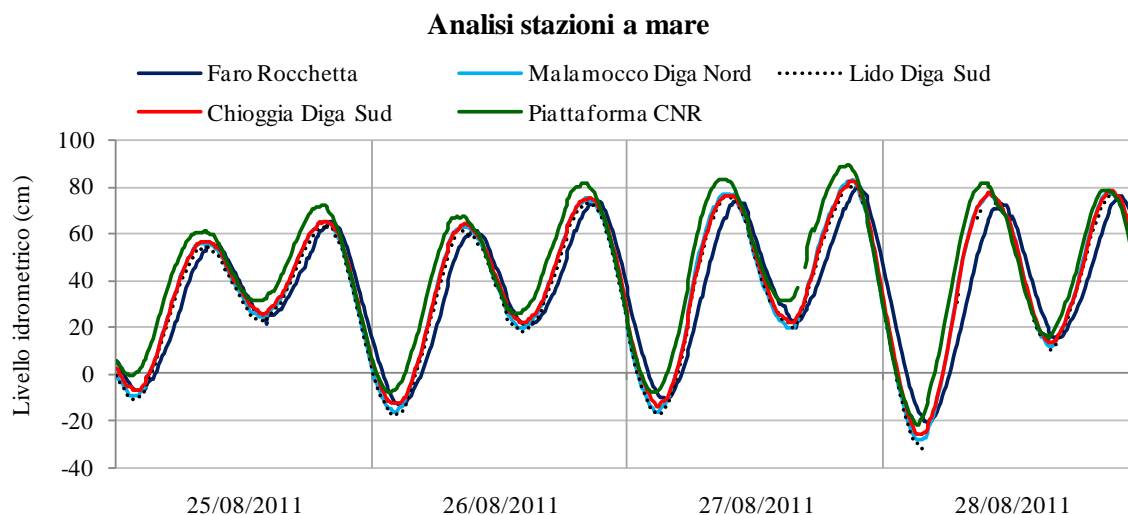


Figura 16. Andamento livelli di marea stazioni a mare e di Faro Rocchetta (periodo 25-28/08/2011)

Per verificare se tale non uniformità di valori sia stata causata da una variazione del caposaldo di Piattaforma CNR, è stato effettuato un confronto tra i livelli medi mare di

Piattaforma CNR con quelli della stazione di Punta della Salute¹⁹ (ottenuti da serie già validate) per gli anni compresi dal 2007 al 2011 (figura 17). Dall'analisi del livello medio mare mensile è risultato che la differenza tra le stazioni di Punta della Salute e Piattaforma CNR non è distribuita uniformemente nel tempo, per cui è stata scartata l'ipotesi di un abbassamento del caposaldo. Si è quindi ipotizzato che l'errore sia dovuto presumibilmente all'algoritmo che elabora i dati rilevati dallo strumento, che in questo caso è un ondometro a ultrasuoni. Come spiegato in precedenza, l'ondometro calcola il livello di marea dalla media mobile, effettuata ogni 30 minuti, dei valori campionati ogni 5 minuti grazie ad un apposito algoritmo, il quale filtra le oscillazioni provocate dal moto ondoso. È molto probabile però che nel caso di Piattaforma CNR, l'algoritmo dell'ondometro conteggi anche gli spike causati dal moto ondoso, falsando la misurazione del livello reale mareografico. Ciò è stato constatato dall'analisi sia dei dati istantanei d'altezza d'onda che di quelli mediati. Si è quindi deciso di non rilasciare come validata la serie di dati relativa all'anno 2011 e si propone perciò di verificare la funzionalità dell'algoritmo utilizzato per filtrare il segnale d'onda di Piattaforma CNR.

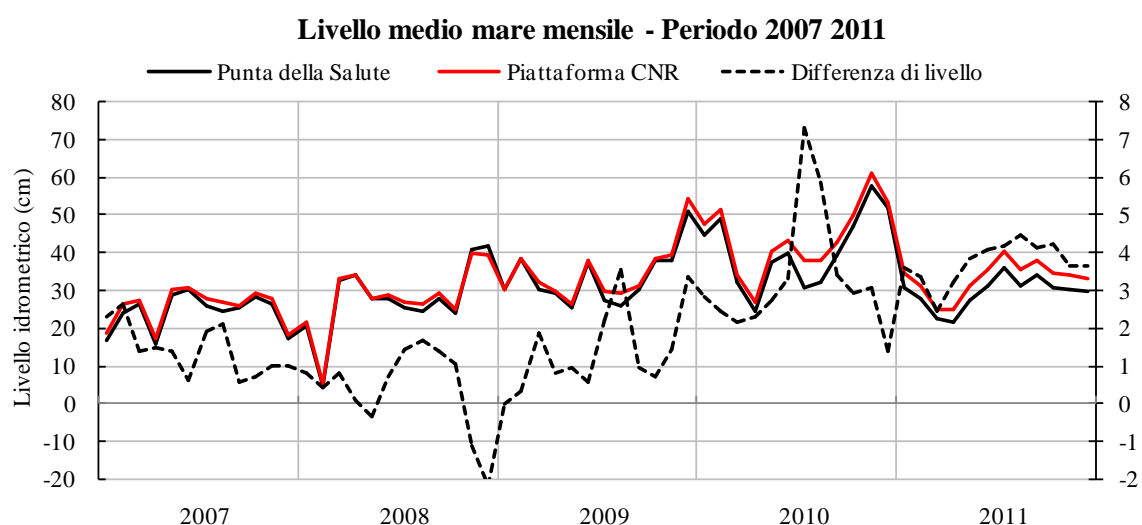


Figura 17. Confronto dei livelli medi mare mensili calcolati per le stazioni di Punta della Salute e Piattaforma CNR per gli anni compresi tra il 2007 e il 2011

¹⁹ Le serie della stazione di Punta della Salute sono quelle ritenute meno affette da errori in quanto la quota del caposaldo è periodicamente controllata sulla base di una convenzione tra ISPRA, ICPSM e CNR-ISMAR.

Analisi del sovrалzo

Come noto, il sovrалzo rappresenta la componente meteorologica della marea e si calcola con la differenza tra la marea osservata e quella astronomica.

La marea astronomica è data dalla sovrapposizione di un certo numero di oscillazioni armoniche, aventi periodicità diverse. Nel caso della Laguna di Venezia se ne considerano otto, di cui quattro diurne e quattro semidiurne, descritte da parametri noti come “costanti armoniche” che sono l’ampiezza, il ritardo di fase e la frequenza angolare²⁰. Per effettuare l’analisi del sovrалzo esse sono calcolate come costanti armoniche annualizzate, con l’apposito software Polifemo, in quanto basate sui valori orari dei dati filtrati per un anno di misurazioni del livello di marea e sulle serie storiche di dati registrati. La marea astronomica viene quindi calcolata in funzione delle costanti armoniche e di un livello di riferimento dato dalla differenza tra il livello medio mare attuale e lo ZMPS, chiamato A_0 e pari a 26 cm²¹. La formula applicata è la seguente:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\sigma_n t - \kappa_n)$$

In cui $y(t)$ è il livello della marea astronomica, N il numero delle oscillazioni armoniche, A_n l’ampiezza, κ_n il ritardo di fase, σ_n frequenza angolare e t il tempo.

Nota la marea astronomica, viene quindi eseguita l’analisi del sovrалzo allo scopo di verificare eventuali errori nell’orario dello strumento provocati da un’errata regolazione dell’orologio durante le operazioni di stop del mareografo oppure da un’avaria dello strumento. In tale evenienza si osserverebbe un andamento periodico della curva del sovrалzo. L’eventuale correzione si effettua traslando la curva della marea osservata nel tempo della quantità necessaria a minimizzare la periodicità del sovrалzo, che è individuabile dalle schede stazione. L’entità della correzione è infatti calcolabile dalla differenza tra l’orario fornito dallo strumento e quello esatto relativo all’operazione di stop effettuata dagli operatori.

Errori d’orario non sono stati rilevati nel corso delle validazioni (figura 18).

²⁰ ICPSM, ISPRA, CNR-ISMAR, 2012

²¹ Cordella et al., 2010

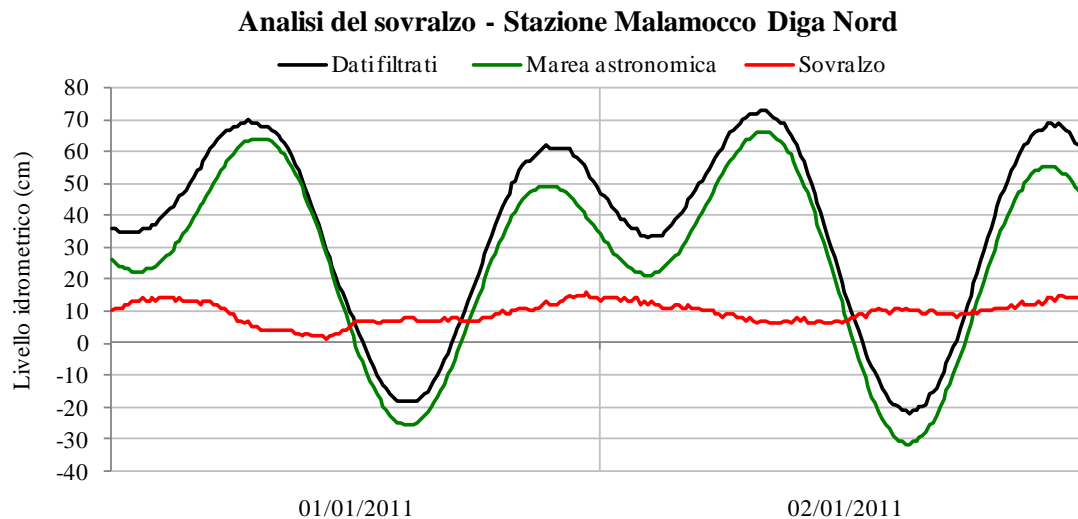


Figura 18. Analisi del sovranzo effettuata per la stazione di Malamocco Diga Nord (1-2 gennaio 2011).

Analisi del fenomeno delle quadrature

La quadratura di marea è un fenomeno durante il quale il livello del mare all'interno della laguna si mantiene costante per un intervallo temporale di almeno tre ore. Tale fenomeno si può verificare in presenza delle seguenti condizioni:

- Presenza di una quadratura astronomica;
- Pressione atmosferica stabile;
- Velocità del vento inferiore a 6 m/s;
- Oscillazioni della marea non superiori a ± 1 cm.

Le quadrature sono spesso utilizzate per verificare la validità delle quote del caposaldo delle stazioni mareografiche; infatti si presume che in tale situazione i livelli misurati presso differenti stazioni mareografiche siano coincidenti (figura 19). Nel caso in cui una stazione sia colpita da fenomeni di subsidenza o da cedimenti strutturali della cabina, in situazione di quadratura essa mostrerebbe valori maggiori rispetto alle altre stazioni analizzate. Durante il procedimento di validazione un problema analogo è stato riscontrato nella stazione di San Nicolò (vedi allegato 1).

Analisi delle quadrature: 28 marzo 2011

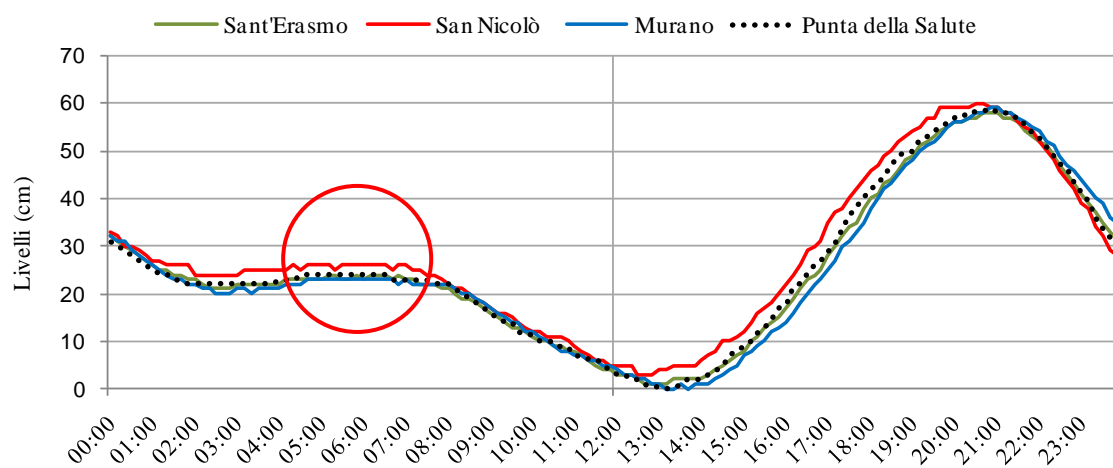


Figura 19. Confronto curve di marea all'interno della Laguna di Venezia in situazione di quadratura.

3.3 Redazione di documenti a carattere tecnico-scientifico

Il Servizio Laguna di Venezia di ISPRA, tra le altre, si occupa della redazione di elaborati a carattere divulgativo, destinati quindi ad un pubblico non necessariamente dotato di particolari competenze tecnico-scientifiche. Questi documenti riguardano le varie situazioni meteorologiche e mareografiche verificatesi nel bacino lagunare e nel litorale Nord Adriatico. Gli elaborati sono pubblicati nella sezione *Meteo e marea* del sito web www.ispravenezia.it e si distinguono in:

- Bollettino meteo-mareografico;
- Analisi eventi di marea.

3.3.1 Bollettino Meteo-Mareografico

Il bollettino Meteo-Mareografico è un elaborato pubblicato con periodicità mensile allo scopo di fornire all'utente del sito web un'analisi sui principali eventi meteorologici e mareografici susseguitisi nell'arco di un mese. Nell'attività di stage svolta presso il Servizio Laguna di Venezia ho redatto il bollettino meteo-mareografico di agosto 2012 ed ho partecipato alla stesura dei bollettini relativi ai mesi di luglio, settembre ed ottobre del medesimo anno.

Il bollettino è suddiviso in due sezioni:

- Meteorologia;
- Mareografia.

Meteorologia

Le variabili esaminate nell'analisi meteorologica sono la temperatura (espressa in °C), la pressione (hPa) e la precipitazione (mm); tali grandezze sono state scelte come riferimento in quanto rappresentano le variabili meteorologiche più note e fruibili al pubblico. Per tutte le misure sono utilizzati i dati rilevati presso la stazione meteorologica "Lido Meteo", la stazione meteo della RMLV che meglio si presta a rappresentare la situazione meteo del bacino lagunare. Riguardo alla modalità di rilevazione e divulgazione dei dati, la temperatura e la pressione sono misurate ad intervalli di 10 minuti mentre nel bollettino ne sono riportati gli andamenti mensili. Nell'elaborato è riportata un'analisi qualitativa dei principali fenomeni meteorologici verificatisi nel bacino Adriatico nel corso del mese analizzato, ponendo particolare attenzione alla provenienza di tali fenomeni, ai concomitanti dislivelli barici e alle conseguenti alterazioni del regime termo-pluviometrico; nell'allegato 2 ad esempio è evidenziato il ruolo svolto dagli anticiclone

africani nei confronti del regime termometrico. Questa analisi è descritta in un grafico che mette a confronto l'andamento delle pressioni medie giornaliere con l'altezza di precipitazione; è noto infatti che i fenomeni perturbativi si verificano in corrispondenza di abbassamenti barici.

Dal punto di vista quantitativo l'attenzione è rivolta alle temperature e alle precipitazioni, di cui si effettua anche un confronto con le serie storiche relativamente agli anni 2001-2011. Di questo periodo sono infatti a disposizione i dati mensili delle temperature minima e massima e della precipitazione; per ogni mese è stato calcolato il valore medio della grandezza in esame a partire dai dati rilevati ogni anno per lo stesso mese. Con questa modalità sono state perciò ottenute le serie storiche.

Per la temperatura si riportano i valori massimi e minimi con i rispettivi orari di rilevamento, le medie mensili delle temperature minime e massime, per le quali è anche calcolata la differenza rispetto alle relative medie del periodo 2001-2011. Inoltre è effettuato un confronto grafico tra la media mensile delle temperature minime e massime del periodo 2001-2011 con l'andamento dei valori minimi e massimi giornalieri al fine di individuare eventuali anomalie termiche. Nell'allegato 2 ad esempio è stato segnalato il raggiungimento della massima temperatura giornaliera di tutto il periodo 2001-2011.

Riguardo alle precipitazioni, sono indicati il numero di giorni piovosi (precipitazione ≥ 1 mm) e l'altezza di precipitazione totale del mese. L'analisi storica è visualizzabile graficamente dal confronto tra l'andamento pluviometrico dell'ultimo anno con le medie mensili del periodo 2001-2011 al fine evidenziare le eventuali anomalie del regime pluviometrico. Ad esempio, nell'allegato 2 è stato evidenziato il carattere siccitoso delle precipitazioni di agosto, mentre nel bollettino meteo-mareografico relativo al mese di ottobre 2012 abbiamo focalizzato l'attenzione sul fatto che le precipitazioni ricadute erano decisamente maggiori rispetto al valore medio del periodo 2001-2011.

Mareografia

Nella sezione mareografica del bollettino viene analizzato l'andamento dei livelli di marea per alcune stazioni della RMLV prossime ai principali centri abitati delle lagune veneto-friulane quali: Venezia-Punta della Salute, Burano, Chioggia Vigo e Grado.

Per ogni stazione sono riportati i valori numerici di alcuni parametri d'interesse per il lettore quali: minimo e massimo mensile di marea con relativa escursione, livello medio mare mensile e il numero di eventi in cui il livello di marea ha superato i +110 cm, soglia di riferimento per l'allagamento dei principali centri urbani. Graficamente è osservata la

correlazione tra il livello medio mare mensile ed il numero di eventi con livello di marea maggiore di +110 cm, in riferimento agli ultimi dodici mesi.

L'analisi mareografica pone particolare attenzione al sovrizzo, ossia il contributo meteorologico della marea osservata. Le alterazioni del regime di marea sono infatti rilevabili dall'andamento di tale componente, le cui cause sono rilevabili dall'analisi meteorologica. Normalmente esse sono imputabili a dislivelli barici e/o all'innescò di venti di Scirocco o di Bora. Nel caso dello spirare dello Scirocco il livello di marea subisce un incremento nell'Alto Adriatico e nel bacino lagunare. Con l'azione dei venti di Bora invece si osserva una significativa differenziazione nei livelli di marea, che si constata anche dalla diversa entità dei sovrizzi (fenomeno dei "sovrizzi differenziati"). Nell'allegato 2 si può osservare che, nel giorno 26 agosto, l'azione del vento di Bora ha causato un aumento del livello di marea osservata a Chioggia Vigo, mentre a Grado la diminuzione è stata tale da far assumere al sovrizzo valori negativi.

Nell'analisi mareografica viene quindi sottolineato il ruolo fondamentale svolto dal vento nei confronti del regime mareale. Tale variabile non è però analizzata dettagliatamente nella sezione meteorologica del bollettino per alcuni motivi: il vento è una grandezza vettoriale misurabile dalla direzione e dalla velocità (rilevate dagli appositi strumenti ogni 10 minuti), per cui il calcolo dei valori giornalieri non ha significato all'interno del bollettino come effettuato invece per pressione, pioggia e temperatura. Di converso, la pubblicazione dell'andamento completo della direzione e della velocità del vento andrebbe a discapito della praticità e della chiarezza del bollettino (che si ricorda essere un documento divulgativo), per cui l'attenzione sul vento è posta a livello qualitativo solamente nei casi in cui esso rappresenti causa di alterazioni significative del regime delle maree. Attualmente, solo nel bollettino meteo-mareografico di febbraio 2012 è stato riprodotto l'andamento mensile della direzione del vento (posto a confronto con i sovrizzi delle stazioni mareografiche) a causa della durata eccezionale del vento di Bora (pari a 12 giorni) che si è reso responsabile di una significativa e durevole alterazione del normale regime idraulico lagunare.

Si precisa infine che tutte le misurazioni dei livelli di marea registrati fanno riferimento allo ZMPS comprese, per esigenze di uniformità delle informazioni in tempo reale, anche quelle relative alla stazione di Grado, pur non appartenendo al bacino lagunare veneziano.

3.3.2 Analisi eventi di marea

L'analisi di eventi di marea è redatta in occasione di eventi di particolare interesse dal punto di vista mareografico, in quanto responsabili dell'alterazione del normale regime idraulico lagunare. Nella fattispecie vengono analizzati le forzanti meteorologiche dell'evento e i livelli di marea rilevati in laguna in un intervallo temporale limitato ai giorni in cui si sono verificati i fenomeni meteorologici e mareografici. Anche questo documento è perciò strutturato in due differenti sezioni riguardanti la meteorologia e la mareografia.

I principali eventi descritti in questo documento riguardano i casi di alta marea eccezionale, i casi di acqua alta e il verificarsi del fenomeno dei "sovralti differenziati". L'acqua alta si realizza quando il livello di marea raggiunge o supera il valore di +110 cm sullo ZMPS, valore tale da causare allagamenti dei centri abitati interni alla laguna (esempio Venezia, Burano, Chioggia).

Nell'allegato 3 da me redatto si riporta l'analisi di un fenomeno di differenziazione dei livelli di marea dovuto all'azione di un vento di Bora.

Analisi meteorologica

L'analisi meteorologica è svolta al fine di determinare le forzanti dell'evento di marea oggetto di studio. In questa fase si pone attenzione alle pressioni misurate in alcune stazioni mareografiche localizzate lungo il Mar Adriatico appartenenti alla Rete Mareografica Nazionale (RMN); in questo modo si determinano i dislivelli barici tra l'Adriatico settentrionale e meridionale responsabili dell'insorgere dell'evento. L'azione della pressione sul livello del mare si verifica a seguito del fenomeno fisico noto come "effetto barometrico inverso", in cui i dislivelli barici provocano corrispondenti ed inverse variazioni del livello marino.

Successivamente si confronta il regime dei venti misurati presso le medesime stazioni della RMN, allo scopo di verificare se i dislivelli barici riscontrati in precedenza siano associabili a tipologie di venti che possano influenzare i livelli di marea nel Nord Adriatico e nelle lagune veneto-friulane.

Ciò avviene nel caso dello Scirocco: tale vento proviene da SE e agisce su tutto il Mare Adriatico provocando l'insaccamento delle acque nel Nord Adriatico e nella laguna. Inoltre, può rendersi responsabile dell'aumento del livello del mare in Alto Adriatico anche se viene rilevato solamente nelle stazioni dell'Adriatico centrale e meridionale a causa del *fecth* (superficie di mare interessata dall'azione del vento) molto elevato (quasi 800 km).

L'analisi meteorologica si conclude con lo studio della direzione e della velocità del vento rilevati presso una stazione della RMLV localizzata a mare (Lido Diga Sud o Piattaforma CNR), per verificare se l'instaurarsi di condizioni favorevoli al particolare evento di marea sia imputabile a condizioni meteorologiche locali, come avviene nel caso di vento di Bora (allegato 3).

A seconda della casistica identificata, l'attenzione può essere focalizzata sulle condizioni meteorologiche rilevate in tutto il Mare Adriatico, oppure solamente nella zona settentrionale.

Analisi mareografica

In questa sezione dell'elaborato è presentato lo studio del livello di marea osservata e del sovrizzo misurati presso alcune stazioni della RMLV interne alla laguna e/o in mare, scelte in base alla loro localizzazione geografica.

L'azione del vento di Bora ad esempio avviene lungo la direttrice della laguna orientata da NE a SO, causando uno spostamento delle masse d'acqua dalla zona settentrionale (posta sopravento) alla zona meridionale della laguna (sottovento)²². Notevoli dislivelli idrici si realizzano all'interno della laguna e nell'Alto Adriatico. Tale fenomeno assume il nome di "sovrizzi differenziati", in quanto la componente meteo (il sovrizzo) può variare tra una stazione e l'altra. Negli eventi di alta marea eccezionale invece si osserva in tutte le stazioni l'incremento del livello di marea. Emblematico appare l'esempio della stazione di Punta della Salute: nel caso di acqua alta questa stazione assume particolare rilevanza, in quanto rappresenta la situazione mareografica che si verifica nella città di Venezia, soggetta in questi casi a frequenti allagamenti. Se invece il fenomeno analizzato è quello dei sovrizzi differenziati, questa stazione non è particolarmente interessata dall'evento di marea, essendo situata in posizione centrale rispetto alle zone lagunari soggette a svuotamento (Nord) e a quelle soggette ad insaccamento (Sud). In questo caso l'analisi di evento verterà principalmente sul confronto tra livelli di marea e i sovrizzi rilevati presso le stazioni situate alle estremità della laguna (Burano e Grassano a Nord con Chioggia e Val Fogolana a Sud) e del litorale Alto Adriatico (Grado e Porto Cervo).

²² Pirazzoli, 2007

3.4 Contenuti a carattere meteo-climatico da divulgare sul sito web

Viene qui presentato un progetto avente lo scopo di descrivere la situazione meteo-climatica di Venezia e del suo bacino lagunare relativamente al periodo 2000-2011. Si propone di inserire questo contributo nella sezione *Meteo e marea* del sito web della sede ISPRA di Venezia www.ispravenezia.it, sezione in cui sono già disponibili documenti relativi alle condizioni meteorologiche e mareografiche rilevate a Venezia e in altri centri della Laguna e del litorale Nord-Adriatico.

Ad oggi, la sezione *Meteo e marea* si presenta così composta:

- Bollettino meteo-mareografico, pubblicato mensilmente e suddiviso in due sezioni riguardanti:
 - a) la meteorologia, in cui si analizzano i valori rilevati nella stazione di Lido Meteo relativamente ai parametri: pressione, temperatura e precipitazione;
 - b) la mareografia, in cui si descrive l'andamento della marea osservata in alcune stazioni della RMLV prossime ai principali centri abitati delle lagune di Venezia e Marano-Grado, ponendo particolare attenzione sul contributo meteorologico insito nei livelli di marea osservata;
- Analisi eventi di marea, trovano qui spazio documenti tecnico-scientifici redatti in occasione di eventi di particolare interesse dal punto di vista mareografico, in cui si analizzano i livelli di marea raggiunti e le forzanti meteorologiche che li hanno determinati;
- Previsioni di marea astronomica, sono qui riportate le previsioni di marea astronomica per il bacino di San Marco e le velocità di corrente alla bocca di porto di Lido (documento pubblicato con periodicità annuale a cura di ISPRA, ICPSM del Comune di Venezia e CNR-ISMAR di Venezia).

Al fine di fornire all'utente del sito web www.ispravenezia.it le conoscenze meteo-climatiche basilari per la consultazione delle pubblicazioni contenute nell'intera sezione *Meteo e marea*, si propone di inserire le analisi che seguiranno come primo capitolo della sezione stessa.

Questo progetto ha anche lo scopo di creare una base per una futura sezione dedicata esclusivamente alla climatologia, estendendo l'analisi (attualmente proposta per il solo periodo 2000-2011) su un periodo temporale più lungo, grazie alla banca dati fornita dagli annali idrologici redatti dall'Istituto Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia.

Si deve infatti precisare che esiste una differenza netta tra il concetto di meteo ed il concetto di clima. Il **meteo** è lo stato dell'atmosfera inteso per un certo istante e in un dato luogo, descritto sulla base di grandezze fisiche quali precipitazione, temperatura e pressione; il **clima** è definito invece come l'insieme delle condizioni meteorologiche che si sono verificate in un determinato luogo per un lungo periodo di tempo, fissato convenzionalmente in 30 anni dall'Organizzazione Mondiale Meteorologica.

Si propone ora di intitolare il primo capitolo della sezione *Meteo e marea* “ANALISI DELLA SITUAZIONE METEOROLOGICA A VENEZIA DAL 2000”. Le grandezze meteorologiche analizzate e rappresentate in questa nuova porzione di sito provengono da registrazioni effettuate presso la stazione Lido Meteo relativamente al periodo gennaio 2000 - dicembre 2011. Alla fine di ogni anno verranno aggiornate le analisi con gli ultimi 12 mesi, dopo che le varie grandezze meteorologiche saranno sottoposte ad idoneo processo di validazione.

La stazione di Lido Meteo appare come la stazione meteorologica della RMLV più vicina al centro urbano di Venezia (figura 20) e quella rappresentante al meglio la situazione meteorologica del bacino di San Marco. Per lo stesso motivo, il bollettino meteo-mareografico, pubblicato mensilmente nella sezione *Meteo e marea* del sito web, riporta l'analisi dettagliata di vari parametri meteorologici registrati presso questa stazione (temperatura massima e minima giornaliera, pressione media giornaliera e precipitazione totale giornaliera). Lido Meteo è inoltre la stazione meteorologica della RMLV con la più lunga serie temporale; sono infatti disponibili dati informatizzati dal 1989 e dati cartacei a partire dall'anno 1917.

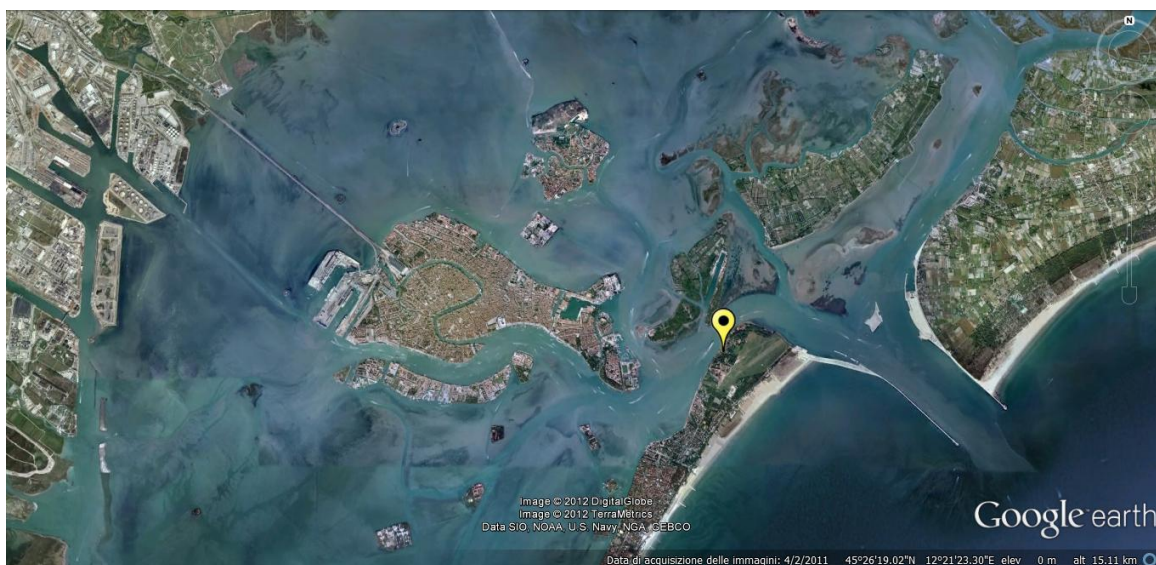


Figura 20. Localizzazione della stazione meteorologica di Lido Meteo

Il nuovo capitolo della sezione *Meteo e marea* è incentrato sull'analisi delle variabili meteorologiche più note e più fruibili al pubblico e, per questo motivo, già utilizzate nel resto della sezione: precipitazione, pressione e temperatura dell'aria.

Da tale analisi si valuterà se le variabili osservate abbiano assunto nel periodo degli andamenti tali da definire l'instaurarsi di particolari trend meteo-climatici.

Precipitazioni

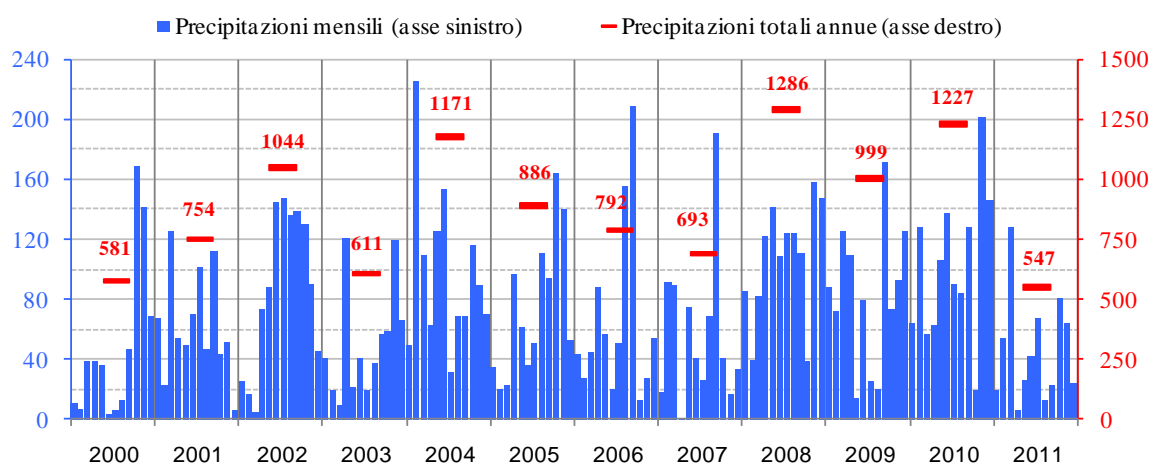


Figura 21

In figura 21 sono riportati gli andamenti mensili ed annuali delle precipitazioni, espresse in millimetri di pioggia (mm). In termini quantitativi si riscontra una situazione pluviometrica molto variabile nel periodo. Per quanto riguarda la distribuzione stagionale si osserva una maggiore concentrazione nei mesi autunnali anche se con qualche eccezione: infatti, nel 2004 il mese più piovoso è stato febbraio, mentre nel 2006 la stagione più piovosa è stata l'estate (agosto e settembre).

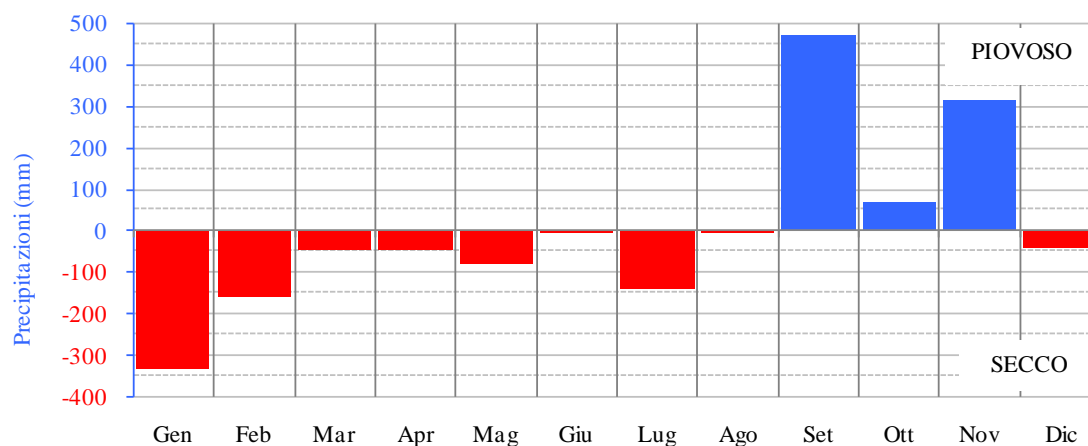


Figura 22

In figura 22 è rappresentato lo scostamento delle precipitazioni totali mensili riferite a tutto il periodo 2000-2011 dalla media annuale del periodo stesso. Lo scopo è quello di individuare la distribuzione stagionale delle precipitazioni: i mesi più piovosi risultano essere settembre e novembre (ed in minima parte ottobre), tanto che le piogge dei tre mesi autunnali compensano il deficit pluviometrico dei restanti mesi. Di converso, i mesi invernali sono i più secchi, in particolare gennaio e febbraio.

In figura 23 si confrontano, in termini di medie riferite al periodo 2000-2011, le precipitazioni mensili con il rispettivo numero di giorni piovosi.

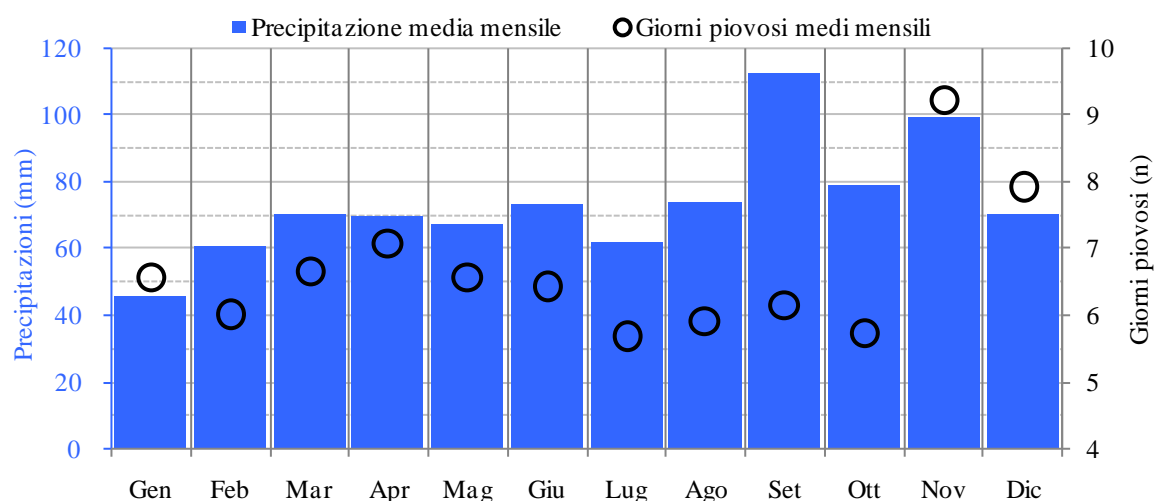


Figura 23

Tale espressione è riferita ai giorni durante i quali è stata registrata un'altezza di pioggia di almeno 1 mm. Dal grafico appare evidente come settembre sia il mese caratterizzato

mediamente dai fenomeni pluviometrici più intensi: al massimo quantitativo di precipitazioni corrisponde un limitato numero di giorni piovosi. A novembre si registrano il maggior numero di giorni piovosi ed un'altezza di precipitazione media di poco inferiore a settembre: rispetto a quest'ultimo, a novembre si manifestano mediamente fenomeni di maltempo meno intensi ma più diffusi nel mese.

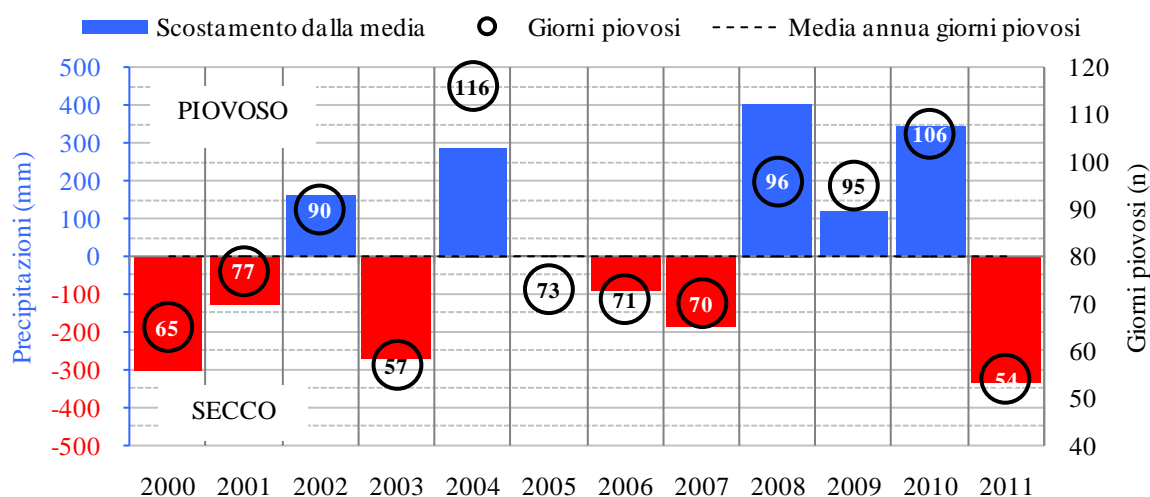


Figura 24

In figura 24 sono rappresentati gli scostamenti della precipitazione totale annua rispetto alla media del periodo ed il numero di giorni piovosi annui (la cui media è pari a 80). Dall'analisi di questo dodicennio appare chiara una relazione di proporzionalità diretta tra le due grandezze. Questa proporzionalità diretta non è però lineare, cosa evidente in particolare negli anni più piovosi: ad esempio, negli anni 2008 e 2009 il numero di giorni piovosi è confrontabile, mentre l'altezza di precipitazione annua risulta significativamente differente. Una correlazione più stretta tra i due parametri sembra più evidente negli anni caratterizzati da eventi pluviometrici di minore entità.

Si segnalano inoltre le maggiori anomalie pluviometriche negative registrate negli anni 2000, 2003 e 2011 e quelle positive negli anni 2004, 2008 e 2010.

Temperatura dell'aria

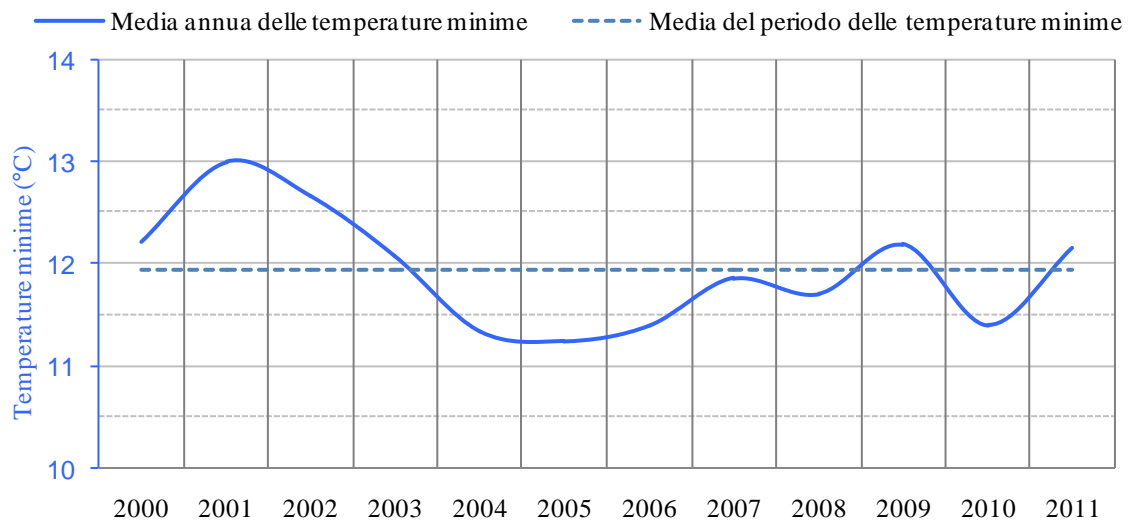


Figura 25

In figura 25 è riportato l'andamento delle temperature minime medie annue ed il confronto con la relativa media riferita all'intero periodo. L'andamento è variabile: nei primi anni le temperature minime sono mediamente superiori, mentre dal 2004 al 2008 si scende sotto la media. In seguito si nota una certa oscillazione attorno alla temperatura media del periodo, andamento questo che impedisce la determinazione di un chiaro trend termometrico.

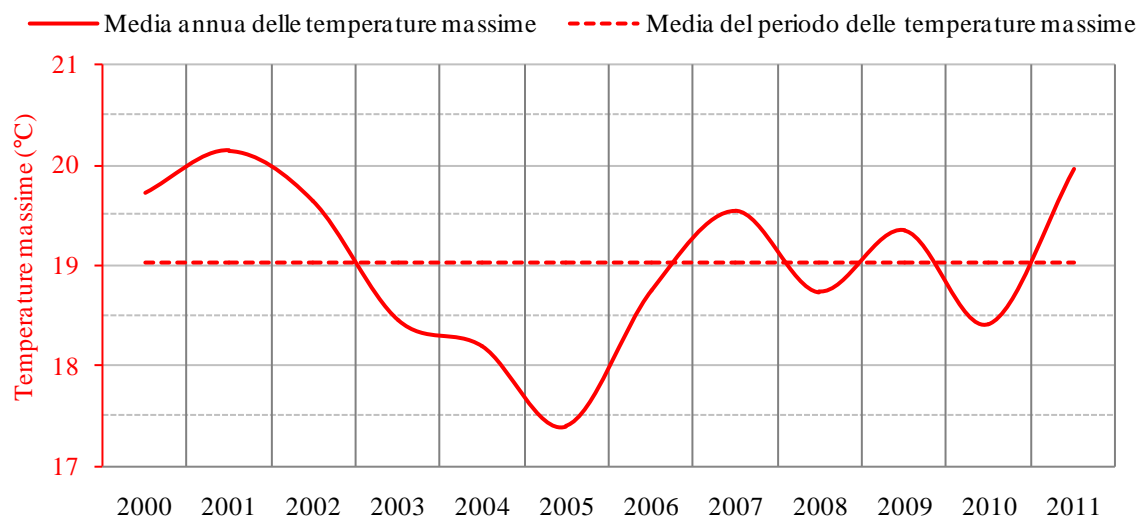


Figura 26

In figura 26 è riportato l'andamento delle temperature massime medie annue ed il confronto con la rispettiva media riferita all'intero periodo. Anche in questo caso

l'andamento è variabile: nei primi anni le temperature massime sono superiori alla media, mentre tra il 2003 ed il 2006 i valori scendono sotto la media del periodo. Dal 2007 in poi si nota un'oscillazione attorno alla media del periodo, andamento simile a quello mostrato dalle temperature minime.

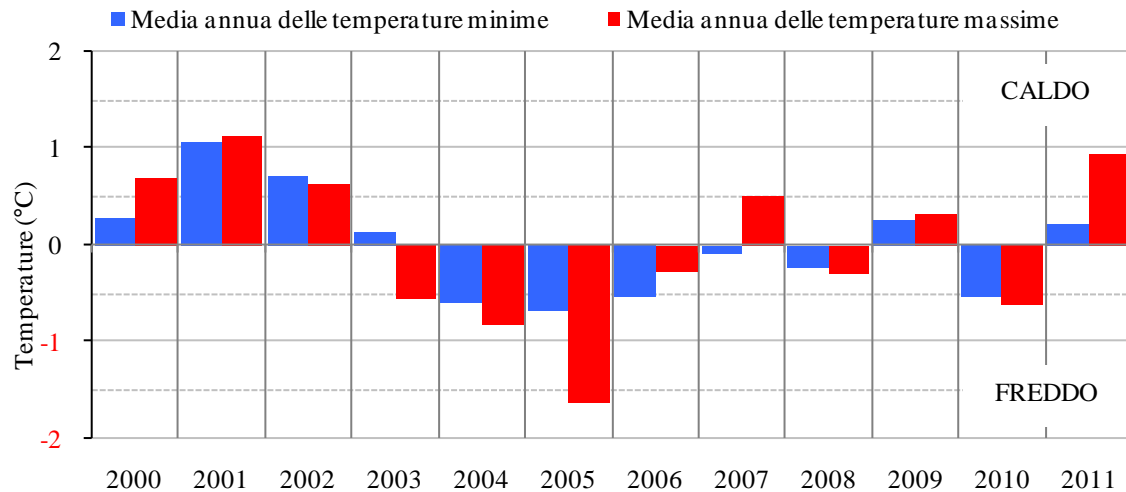


Figura 27

In figura 27 si osservano gli scostamenti delle temperature minime e massime medie annue in riferimento ai rispettivi valori medi dell'intero periodo. Nel corso di uno stesso anno gli scostamenti sono quasi sempre dello stesso segno (ad eccezione degli anni 2003 e 2007). Da notare, inoltre, che nella maggior parte degli anni qui rappresentati, le anomalie delle temperature massime presentano gli scarti maggiori rispetto alle anomalie delle temperature minime.

Pressione atmosferica e regimi climatici

Come noto, i regimi climatici del Mediterraneo sono fortemente connessi a quelli del Nord Atlantico. Questa stretta correlazione a distanza è nota con il termine di “teleconnessioni”.

In Europa ed in Mediterraneo una delle teleconnessioni più rilevanti, specie nella stagione invernale, è rappresentata dalla North Atlantic Oscillation (NAO), anomalia pressoria del Nord Atlantico che si manifesta tra l’anticiclone subtropicale ed il ciclone subpolare.

Tale anomalia pressoria è misurata tramite un indice che esprime le fluttuazioni della differenza di pressione atmosferica al livello del mare tra l’arcipelago delle Azzorre e l’Islanda. Quando l’indice NAO è positivo, anticiclone e ciclone sono più intensi del normale. In particolare, l’anticiclone delle Azzorre diviene talmente forte da invadere il Mediterraneo, quindi anche l’Italia, assicurando condizioni di tempo stabile. Se invece l’indice NAO è negativo, anticiclone e ciclone sono più deboli del normale. In questo caso l’anticiclone si ritira verso Sud-Ovest lasciando spazio alle perturbazioni atlantiche che, invadendo il Mediterraneo, portano nell’Europa meridionale inverni umidi e spesso molto piovosi. La debolezza dell’anticiclone delle Azzorre consente anche la ricorrente discesa di incursioni fredde da Nord, chiamate anche correnti a getto del fronte polare.

Per gli approfondimenti si consiglia di consultare l’articolo “2010: un anno da ricordare per l’eccezionale crescita del livello medio mare a Venezia e nel Nord Adriatico”²³, in cui è descritto il ruolo dell’indice NAO sul notevole incremento del livello medio mare registrato nel corso dell’anno 2010 a Venezia e in alto Adriatico.

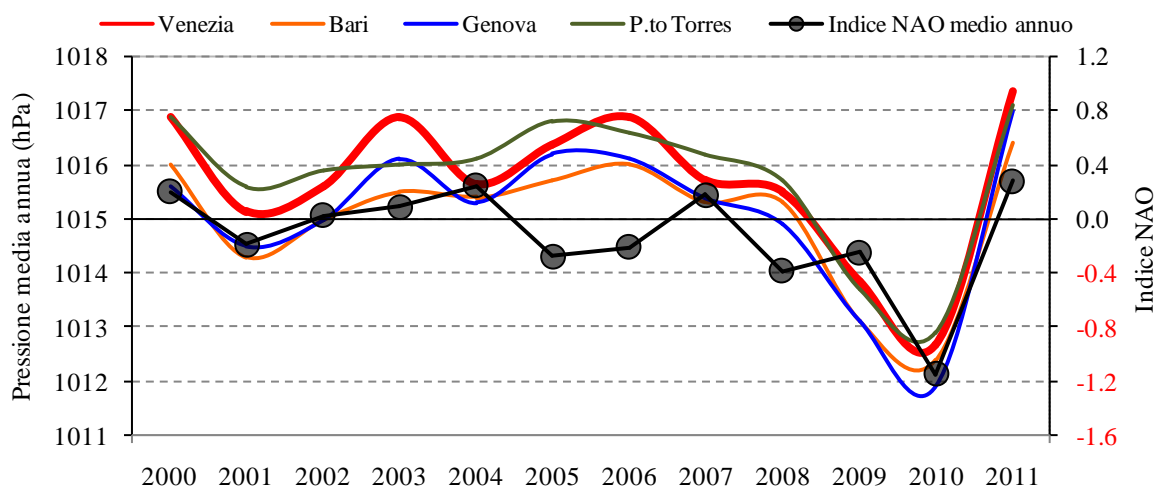


Figura 28

²³ ISPRA, 2012b

In figura 28 viene rappresentato il confronto tra l'andamento medio annuo delle pressioni registrate in alcuni siti italiani che si affacciano sul Mar Mediterraneo e dell'indice NAO nel corso del periodo 2000-2011. In particolare, la marcata diminuzione delle pressioni medie annue registrate nel periodo 2008-2010 in Mediterraneo è accompagnata da una corrispondente diminuzione dell'indice NAO medio annuo.

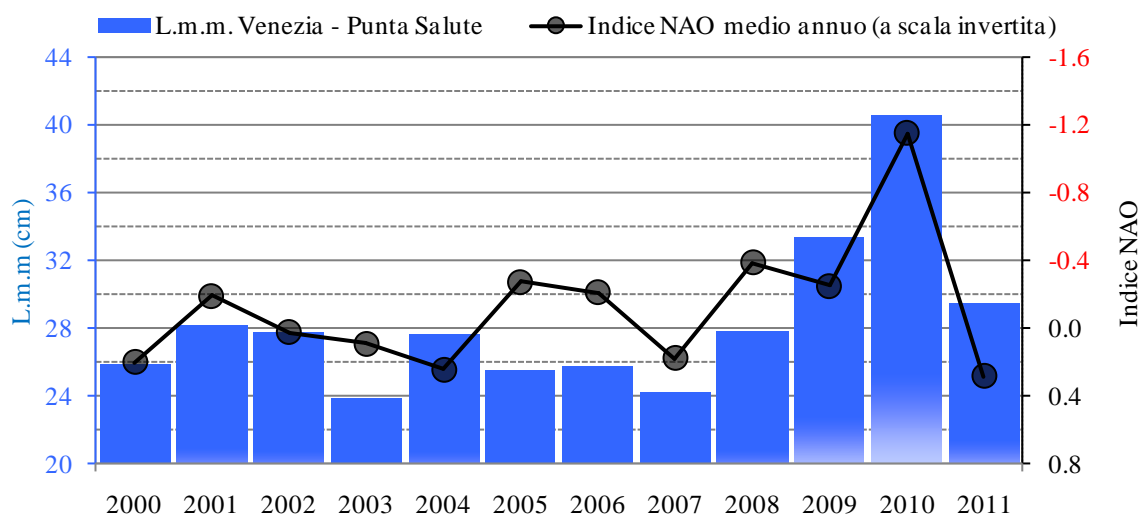


Figura 29

In figura 29 si confronta il livello medio mare (L.m.m.) calcolato per Venezia - Punta della Salute con l'indice NAO (a scala invertita). Da notare che il livello medio mare record positivo del 2010 si registra in corrispondenza del valore record negativo dell'indice NAO.

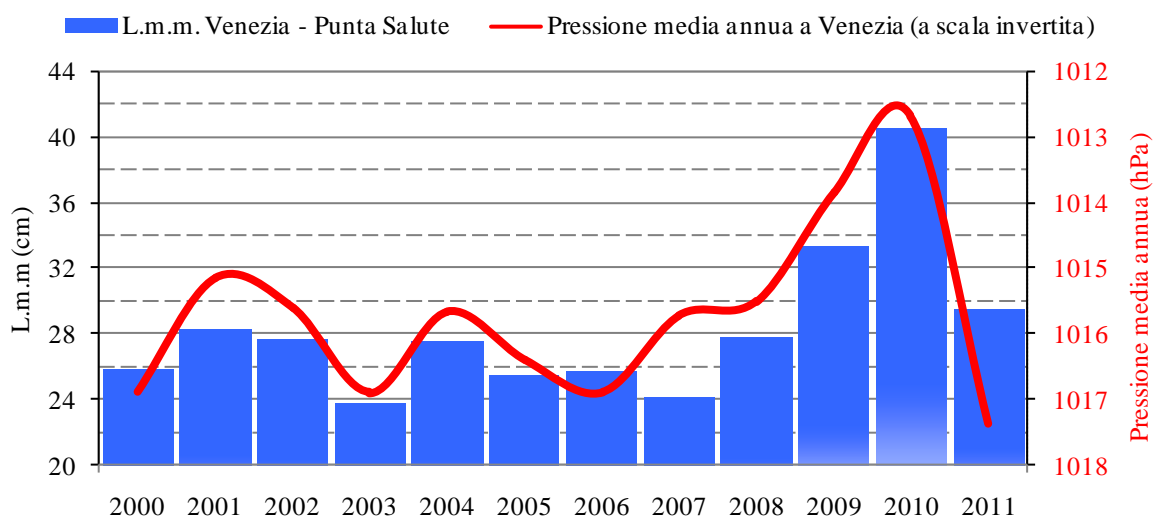


Figura 30

Come noto, la pressione atmosferica è una delle forzanti meteorologiche più influenti sul livello medio del mare: a seguito del fenomeno fisico definito come “effetto barometrico inverso”, dislivelli barici provocano corrispondenti ed inverse variazioni del livello marino. In figura 30, analogamente al grafico precedente, appare evidente che nel 2010, in corrispondenza del valore minimo della pressione media annua del periodo, è stato raggiunto il valore massimo del livello medio mare a Venezia - Punta della Salute. Successivamente, nell’anno 2011 l’aumento repentino delle pressioni è stato accompagnato da un corrispondente abbassamento del livello medio mare.

Attualmente si è in procinto di recuperare i dati storici antecedenti l’anno 2000 allo scopo, come già dichiarato in precedenza, di estendere a ritroso nel tempo le analisi meteorologiche appena descritte al fine di creare un’apposita sezione dedicata alla climatologia.

Conclusioni

In questo lavoro è stato descritto il flusso dei dati meteo-mareografici nelle fasi di raccolta, elaborazione, validazione, analisi e divulgazione. Particolare attenzione è stata rivolta alle ultime tre fasi; i dati meteo-mareografici sono impiegati per molteplici scopi, uno dei principali consiste nello studio degli eventi meteo-mareografici che si verificano nel bacino lagunare veneziano e nell'arco costiero Alto Adriatico. È quindi necessario che i dati siano di buona qualità per avere una migliore comprensione dei fenomeni meteo-marini che si verificano in tale ambito. È questo il motivo per cui assume grande rilevanza il processo di validazione dei dati, descritto in tutte le fasi che lo compongono.

L'aspetto divulgativo è stato curato con la realizzazione di alcuni elaborati meteo-mareografici seguendo alcuni vincoli, come le caratteristiche dell'utenza a cui rivolgere la propria attenzione e le conoscenze scientifiche che si vogliono diffondere. Gli elaborati prodotti da ISPRA – Servizio Laguna di Venezia seguono infatti degli schemi ben definiti per garantire una certa semplicità nella comprensione delle nozioni trasmesse. Il tutto senza che ciò vada a discapito della qualità dei contenuti e per soddisfare tutte le tipologie di utenza con il servizio offerto. A tale scopo è stato proposto lo sviluppo di una sezione dedicata alla meteorologia, che sarà inserita a breve nel sito web www.ispravenezia.it, costruita a partire da una serie storica di dati meteorologici ricavati dall'archivio ISPRA.

Una buona qualità del dato serve a garantirne un utilizzo immediato alla collettività sia come dato puro, sia come dato elaborato utile alla redazione di ricerche volte ad analizzare l'evoluzione delle caratteristiche mareografiche, meteo-climatiche e morfologiche dell'ambiente lagunare veneziano.

Bibliografia

AAVV., 2011, *Atlante geologico della Provincia di Venezia*, Assessore all'Ambiente Servizio Geologico, Difesa del Suolo e Tutela del Territorio, Provincia di Venezia, Venezia.

Cavazzoni S., 1977, *Variazioni batimetriche e idrografiche nella Laguna di Venezia intercorse tra il 1933 ed il 1971*, Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Estratto dal volume VII "Rapporti e Studi" della commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia, Venezia

Cordella M., Zampato L., Pastore F., Tomasin A., Canestrelli P., Ferla M., 2010, *Le tavole annuali di marea per Venezia*, Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Tomo CLXIX, Venezia.

D'Alpaos L., 2010, *L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche*, Comune di Venezia Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Venezia.

Dorigo L., 1961, *Le osservazioni mareografiche in Laguna di Venezia*, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Estratto dal volume "I Rapporti preliminari della commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia", Venezia.

Ferla M., Cordella M., Michielli L., Rusconi A., 2006. *Variazioni di lungo periodo del livello del mare nella Laguna di Venezia*, Atti del 41° convegno ECSA (Estuarine Coastal Sciences Association), Venezia.

Gottardo D., 1975, *Propagazione della marea nella Laguna di Venezia*, Giornale Economico Speciale, Venezia.

Guérin O., 2007, *Comprendre les mareés*, Editions Ouest- France.

ICPSM, ISPRA, CNR-ISMAR, 2011, *Previsioni delle altezze di marea per il bacino di San Marco e delle velocità di corrente per il Canal Porto di Lido – Laguna di Venezia, valori astronomici 2012*, 2012.

ISPRA, 2012a, *Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici*, Manuali e linee guida 77/2012, Roma.

ISPRA, 2012b, *2010: un anno da ricordare per l'eccezionale crescita del livello medio mare a Venezia e nel Nord Adriatico*, Quaderni ricerca marina 4/2012, Roma.

Pirazzoli P.A., 2007, *Bora e acqua alta*, Università di Milano Dipartimento di Medicina del Lavoro, Milano.

Polli S., 1952, *Propagazione della marea nella Laguna di Venezia*, Istituto Talassografico Sperimentale, Pubblicazione n. 288, Trieste.

Polli S., 1960, *La propagazione delle maree nell'Adriatico*, Istituto Talassografico Sperimentale, Pubblicazione n. 370, Trieste.

Polli S., 1961a, *Sul fenomeno dell'acqua alta nell'Adriatico settentrionale*, Istituto Talassografico Sperimentale, Pubblicazione n. 384, Trieste.

Polli S., 1961b, *La propagazione della marea nel golfo di Venezia*, Istituto Talassografico Sperimentale, Pubblicazione n. 385, Trieste.

Polli S., 1962, *Le sesse (seiches) dell'Adriatico*, Istituto Talassografico Sperimentale, Pubblicazione n. 393, Trieste.

Strozzi T., Teatini P., Tosi L., 2009, *TerraSAR-X reveals the impact of the mobile barrier works on the Venice coastal stability*, Remote Sensing of Environment 113

ISPRA, http://www.ispravenezia.it/ispra/index.php?folder_id=60

WMO, <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faqs.html>

Allegati

Allegato 1. Proposta di variazione della quota del caposaldo e relativa correzione dei dati di marea nella stazione di San Nicolò.

Allegato 2. Bollettino meteo-mareografico – agosto 2012.

Allegato 3. Analisi dell'evento di marea dell'1 marzo 2011.

Allegato 1

Proposta di variazione della quota del caposaldo e relativa correzione dei dati di marea della stazione di San Nicolò

Nel presente documento sono stati analizzati i livelli di marea registrati presso la stazione mareografica di San Nicolò, confrontandoli con quelli di altre stazioni limitrofe interne alla Laguna di Venezia.

Nel processo di validazione dei dati per l'anno 2011 di alcune stazioni afferenti alla Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale alto Adriatico (RMLV) quali Meda Bocca Lido¹, San Nicolò, Sant'Erasmo e Murano, è stato effettuato il confronto tra le medie decadali e mensili dei livelli di marea delle suddette stazioni² (figura 1).

Come punto di riferimento è stata scelta la stazione di Punta della Salute; infatti, data la sua importanza, la quota del suo caposaldo è tenuta costantemente sotto controllo (in base ad una apposita convenzione tra ISPRA, ICPSM e CNR-ISMAR di Venezia), per cui si ritiene che i dati registrati in questa postazione siano i meno affetti da errori.

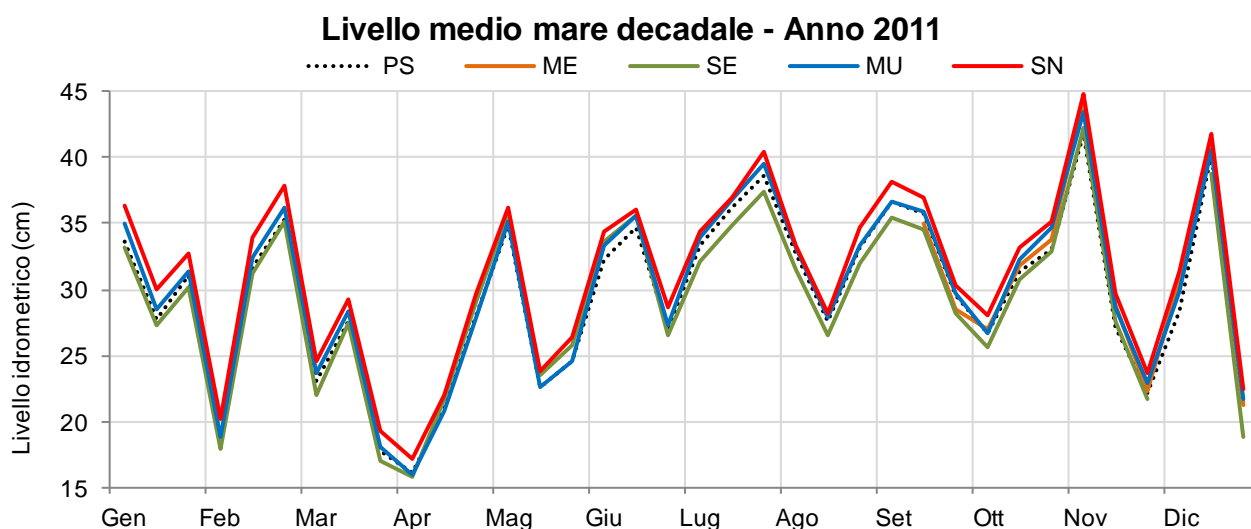


Figura 1

Si può notare come il livello medio mare calcolato per la stazione di San Nicolò sia decisamente superiore rispetto a quello delle altre stazioni qui analizzate, con una differenza media annuale per il 2011 pari +1,6 cm rispetto al livello medio mare calcolato per Punta della Salute.

Siccome il processo di validazione per la stazione di Murano riguarda anche gli anni 2009 e 2010, è stato esteso l'intervallo temporale di analisi del livello medio mare anche per Punta della Salute e San

¹ Per la stazione di Meda Bocca Lido saranno sottoposti a validazione solo gli ultimi quattro mesi del 2011.

² Nelle figure presenti in questo documento le stazioni sono state rappresentate con apposite sigle: PS (Punta della Salute), ME (Meda Bocca Lido), SE (Sant'Erasmo), MU (Murano) e SN (San Nicolò).

Nicolò (figura 2). Si nota come il livello registrato a San Nicolò sia sempre maggiore di Punta della Salute, mentre Murano presenta degli scostamenti più contenuti (tabella 1).

Anno	Livello medio mare annuo (L.M.M.)			Differenze L.M.M. con Punta della Salute	
	PS	MU	SN	MU-PS	SN-PS
2009	33.4	34.0	35.2	0.6	1.8
2010	40.5	41.0	41.6	0.5	1.1
2011	29.5	30.1	31.1	0.6	1.6

Tabella 1

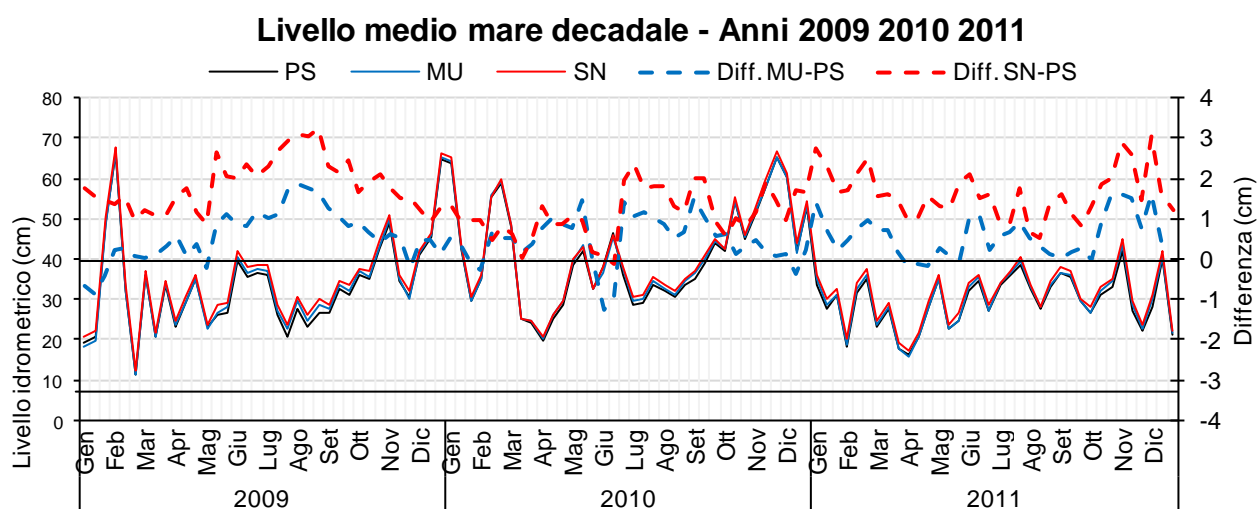


Figura 2

Successivamente sono state analizzate due quadrature³ per trovare conferma dei risultati ottenuti dall'analisi del livello medio mare. Nella prima quadratura (4-5 giugno 2010) lo scostamento tra i livelli medi nel periodo tra San Nicolò e Punta della Salute è pari a +0.9 cm (figura 3), in linea con la differenza del livello medio mare del 2010, pari a +1.1 cm. Nella seconda (28 marzo 2011) i livelli medi si discostano di +1.3 cm, in linea con la differenza del livello medio mare, riferita al 2011, di +1.6 cm.

³ Fenomeno nel quale il livello mareale all'interno di un bacino semichiuso, quale la Laguna di Venezia, rimane costante per almeno tre ore in condizioni di meteo stabile.

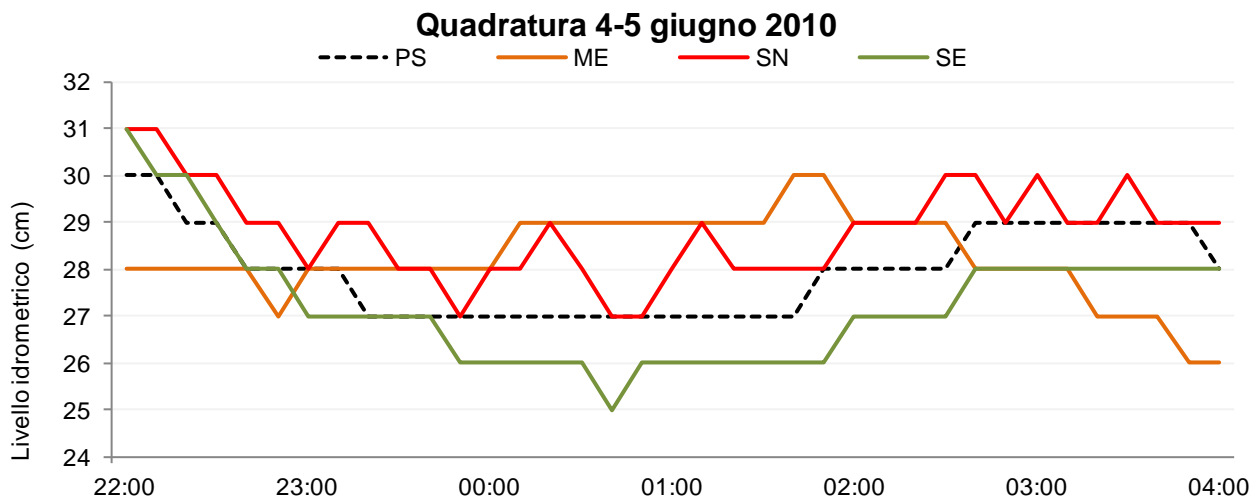


Figura 3

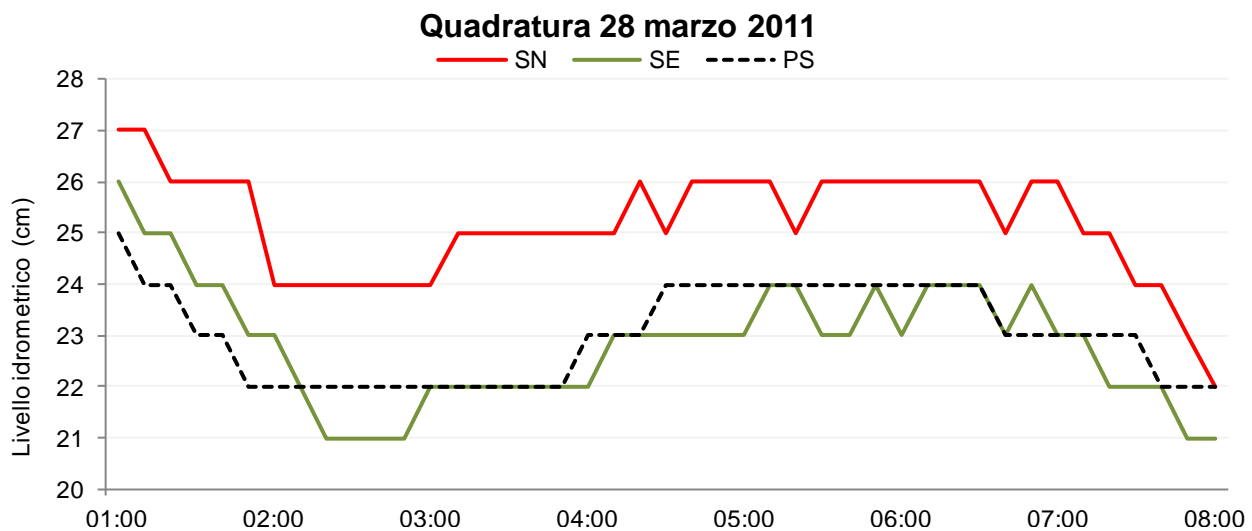


Figura 4

Si è quindi potuto avere conferma che la differenza di livello tra San Nicolò e Punta della Salute sia stata significativa nel periodo analizzato. Ciò è presumibilmente imputabile allo sprofondamento della cabina mareografica osservato a partire dal 2010 e responsabile dell'abbassamento del caposaldo (solidale alla cabina), ufficialmente fissato a 170,5 cm rispetto allo ZMPS (Zero Mareografico di Punta della Salute). Infatti, nell'ultimo periodo, il manufatto in calcestruzzo ha subito un grave dissesto strutturale (figure 5 e 6), per questo si è dovuto provvedere alla definitiva chiusura della stazione per motivi di sicurezza il 31 maggio 2012 (figura 7). Contestualmente è stato installato un nuovo strumento (ondametro) per la misurazione del livello di marea (figura 8).

Piastrina mareografica

Pozzetto di calma



Figura 5



Figura 6



Figura 7



Figura 8

Dalle schede stazioni a disposizione (anni 2009, 2010 e 2011), sono stati rilevati inoltre diversi errori nell'operazione di taratura degli strumenti da parte degli operatori, errori che hanno falsato la misurazione del livello idrometrico. È stato perciò necessario ampliare l'intervallo temporale dell'analisi dei livelli medi per verificare la validità sia delle precedenti serie validate per San Nicolò che delle misure idrometriche effettuate fino al 31 maggio 2012 (validando la serie fino a tale data).

Ne è risultato che negli anni 2005 e 2006 gli scostamenti tra le stazioni di Punta della Salute e San Nicolò erano pressoché trascurabili, tali quindi da confermare la bontà delle serie e della quota del caposaldo. Dal 2007 al 2012 la differenza di livello tra le due stazioni considerate è aumentata considerevolmente (tabella 2). Si deve inoltre osservare come questa grandezza vari notevolmente anche all'interno di uno stesso anno (figura 9), per cui è stata compiuta un'analisi dettagliata dei livelli medi decadal al fine di ricercare gli istanti in cui gli errori degli operatori avevano falsato la serie.

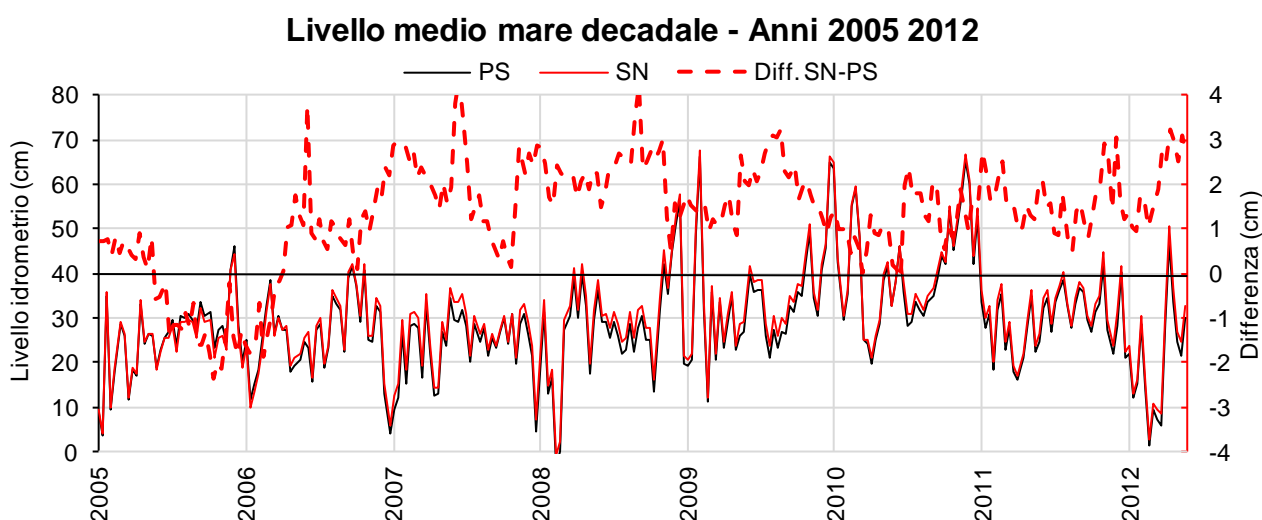


Figura 9

Anno	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Punta della Salute (PS)	25.5	26.1	24.1	27.7	33.2	40.7	29.5	20.1
San Nicolò (SN)	24.9	26.7	26.1	29.9	35	41.8	31.1	22.2
Differenza SN-PS	-0.6	0.6	2	2.2	1.8	1.1	1.6	2.1

Tabella 2

In questo modo è stato possibile constatare come lo sprofondamento della cabina e l'errore di rilevazione del caposaldo abbiano inciso nel corso degli anni in modo differente sui dati mareografici misurati. Alla data del 31 maggio 2012 si propone perciò una quota di caposaldo pari a 168 cm, mentre sulle serie pregresse si propone di apportare le seguenti correzioni (figura 10):

- dall'1 gennaio 2005 al 10 novembre 2006: dati invariati;
- dall'11 novembre 2006 fino al 31 dicembre 2009: -2 cm;
- dall'1 gennaio 2010 al 10 ottobre 2011: -1 cm;
- dall'11 ottobre 2011 al 31 maggio 2012: -2 cm.

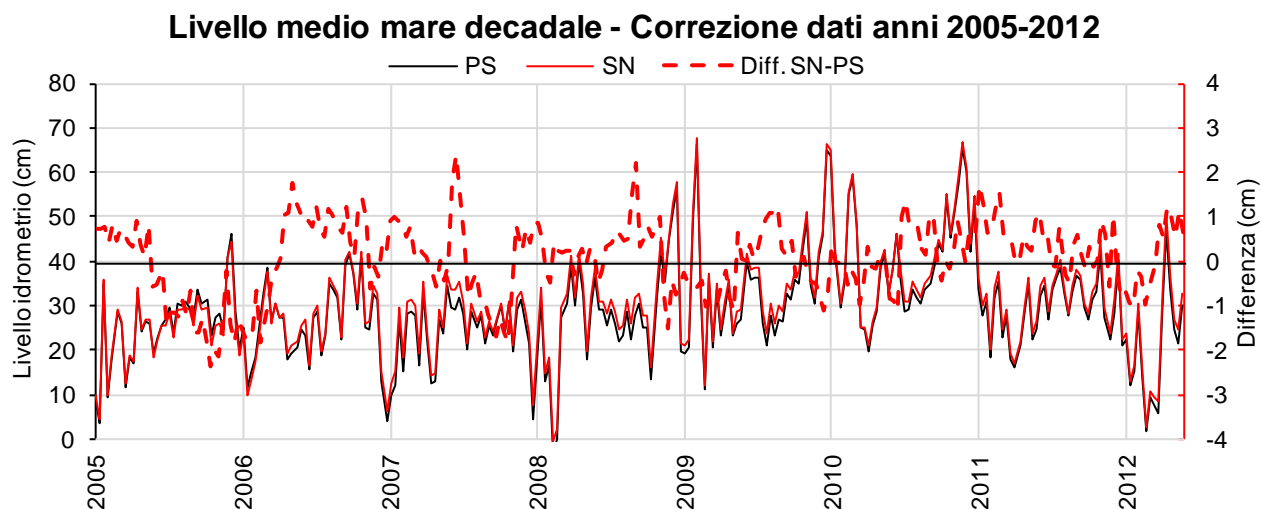


Figura 9

Per quanto riguarda la stazione di Murano, i dati oggetto di validazione riguardano gli anni 2009, 2010 e 2011. Dal confronto con i dati validati della stazione di Punta della Salute è risultato nel triennio uno scostamento medio annuo pari a circa +0.5 cm.

A seguito della variazione del caposaldo di Punta della Salute avvenuta l'1 giugno 2012 (pari a +1.5 cm), si propone dalla stessa data un adeguamento di +1 cm della quota del caposaldo di Murano (+1.5 cm di Punta della Salute, -0.5 cm di adeguamento derivante dall'analisi dei livelli medi).

La nuova quota proposta per il caposaldo di Murano è di 245.50 cm ZMPS a partire dall'1 giugno 2012. Non si ritengono invece necessarie correzioni alle serie mareografiche antecedenti.



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

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

Bollettino Meteo-Mareografico

Numero 8

-

Agosto 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

Allegato 2

Note di lettura per la consultazione del Bollettino Meteo-Mareografico

Il bollettino Meteo-Mareografico, consultabile e scaricabile dal sito internet www.ispravenezia.it alla sezione “Meteo e marea”, è un prodotto periodico del Servizio Laguna di Venezia (Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine - ISPRA), pubblicato mensilmente.

Il bollettino è composto da 2 sezioni:

1. Sezione meteorologica

Le misure analizzate in questa sezione sono la temperatura massima e minima giornaliera (espressa in °C), la pressione media giornaliera (hPa) e la precipitazione totale giornaliera (mm).

Per tutte le misure sono utilizzati i dati rilevati presso la stazione meteorologica “Lido Meteo”, la stazione meteo della RMLV (Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord Adriatico) che meglio si presta a rappresentare la situazione meteo del bacino lagunare.

2. Sezione mareografica

Viene analizzato l'andamento dei livelli di marea per alcune stazioni della RMLV prossime ai principali centri abitati delle lagune di Venezia e di Marano-Grado. Oltre ad elencare una serie di parametri mareografici registrati nel periodo di riferimento, viene posta particolare attenzione agli effetti provocati dal contributo meteorologico (sovrizzo) sui livelli di marea osservati.

Tutte le misurazioni riferite ai livelli di marea registrati fanno riferimento allo ZMPS (Zero Mareografico di Punta della Salute) comprese, per esigenze di uniformità delle informazioni in tempo reale, anche quelle relative alla stazione mareografica di Grado, pur non appartenendo al bacino lagunare veneziano.

Si ricorda inoltre che il Servizio Laguna di Venezia pubblica regolarmente altri documenti nel proprio sito www.ispravenezia.it quali il bollettino di marea giornaliero e le elaborazioni modellistiche per le previsioni di marea per le stazioni di Venezia - Punta della Salute, Burano, Chioggia, Grado e Porto Caleri, aggiornate più volte nel corso della giornata. Vengono emessi anche altri prodotti aventi finalità specifiche come ad esempio speciali bollettini relativi all'analisi di eventi eccezionali di “*acqua alta*”.

Appare inoltre utile ricordare che, alla sezione “Dati” del sito, sono disponibili i dati in tempo reale e quelli differiti di 24 h rispettivamente per 25 e 15 stazioni della RMLV. Sono inoltre disponibili e scaricabili, previa registrazione, i dati storici validati di tutte le stazioni della RMLV.

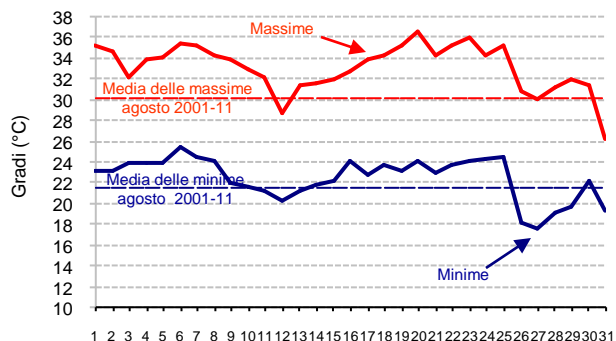
Si precisa che tutti i dati sono espressi in ora solare locale. I dati mareografici relativi all'anno 2011 sono stati rilasciati come validati mentre quelli del 2012 sono da considerarsi provvisori. I dati meteorologici relativi agli anni 2011 e 2012 sono da considerarsi anch'essi provvisori.

Meteorologia

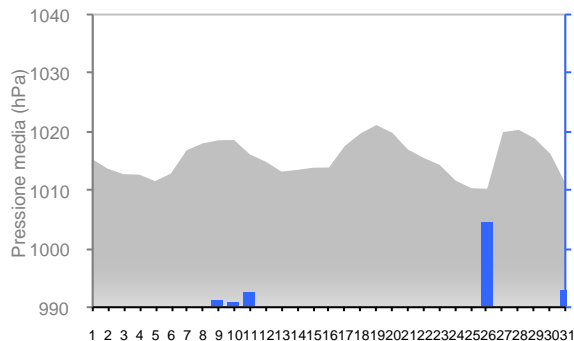
Stazione: **Lido Meteo**

Periodo: **Agosto 2012**

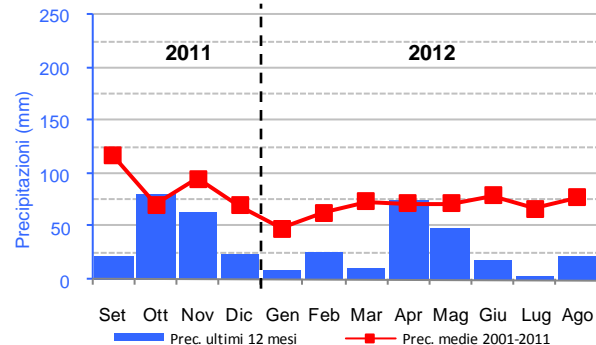
Temperatura massima e minima giornaliera



Pressione media e precipitazioni totali giornaliere



Precipitazioni mensili ultimo anno e undicennio 2001-2011



ANALISI DEL PERIODO

Durante agosto 2012 l'azione pressoché continua di anticloni africani ha determinato le massime temperature annuali, che si sono attestate su valori superiori rispetto alle medie del periodo 2001-2011. L'azione anticiclonica è stata lievemente mitigata solo nei primi giorni del mese da venti provenienti dai quadranti settentrionali e, nella seconda settimana, da venti provenienti dai Balcani. Di maggiore effetto sono risultate le correnti atlantiche che hanno interrotto l'azione anticiclonica, provocando un brusco abbassamento delle temperature verso la fine del mese, in particolar modo delle minime giornaliere, scese al di sotto dei valori medi del periodo.

La temperatura minima registrata è stata di +17.6 °C il giorno 27 alle ore 4:50 e quella massima di +36.5 °C il giorno 20 alle ore 13:20.

La temperatura media del periodo è stata di 26.9 °C, superiore di +1.1 °C rispetto alla media del periodo di riferimento 2001-2011.

La temperatura media delle minime giornaliere è stata di 22.4 °C, superiore di +0.9 °C alla rispettiva media del periodo, mentre la temperatura media delle massime giornaliere è stata di 33.1 °C, notevolmente superiore (+3.0 °C) rispetto alla media del periodo di riferimento; questo valore rappresenta il massimo registrato nel periodo 2001-2011, eguagliato solamente nel mese di agosto 2001.

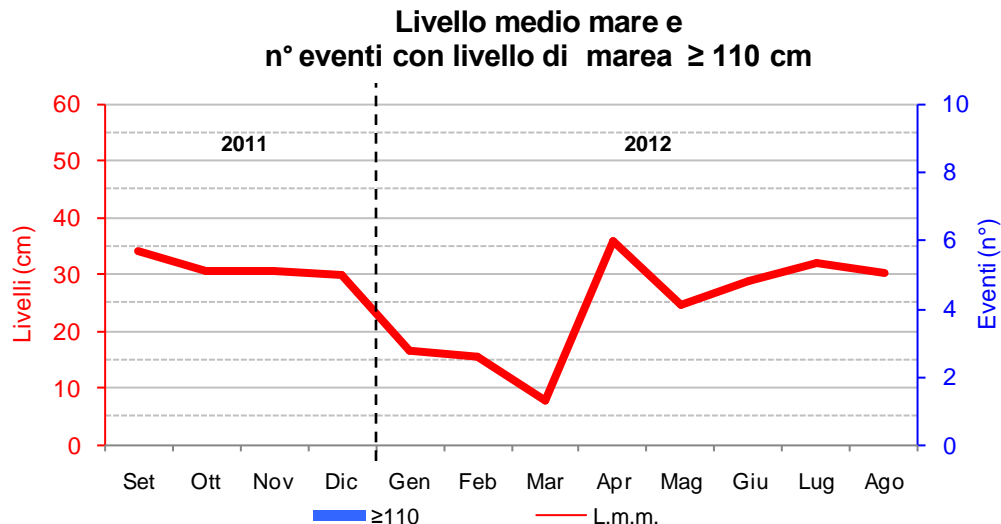
Agosto 2012 è stato un mese molto secco: le precipitazioni registrate corrispondono ad un totale 21,8 mm, distribuite in 4 giorni piovosi. Le scarse precipitazioni mensili si inseriscono in un contesto di un'annata particolarmente siccitosa, al di sotto delle medie mensili con le sole eccezioni dei mesi di ottobre 2011 ed aprile 2012.

Mareografia

Stazione: **Venezia - Punta della Salute**

Periodo: **Agosto 2012**

Massimo	+82 cm 31 agosto (h 22:00)
Minimo	-33 cm 01 agosto (h 04:20) 18 agosto (h 05:00)
Escursione massima di marea	115 cm
Livello medio mare mensile	30.24 cm
n° eventi con livello di marea ≥ 110 cm	-



ANALISI DEL PERIODO

Nel mese di agosto 2012, la marea a Venezia - Punta della Salute ha raggiunto la quota massima di +82 cm il giorno 31 alle ore 22:00 e la quota minima di -33 cm nei giorni 1 (ore 04:20) e 18 (ore 05:00). Il livello medio mare mensile calcolato risulta pari a 30.24 cm, valore inferiore sia ai 31.76 cm registrati nel mese di luglio che ai 31.25 cm fatti registrare ad agosto 2011.

Non si sono registrati eventi di acqua alta (≥ 110 cm sullo Z.M.P.S.).

Nei primi giorni del mese i sovralti si sono mantenuti su valori positivi, per poi attestarsi attorno allo zero dal 7 agosto grazie al ritorno dell'alta pressione. A seguito del passaggio di una debole perturbazione all'inizio della seconda decade, si è osservato un andamento periodico del sovralto con l'ampiezza che ha raggiunto valori di +21 cm e che progressivamente è ritornato nella norma nei giorni successivi al 14 agosto. Il sovralto ha mantenuto un andamento pressoché regolare sino al 26 agosto giorno nel quale, a causa dei venti di Bora associati al calo barico, si sono verificate delle oscillazioni del segnale che si sono attenuate nei giorni seguenti. Alla fine del mese si registra un lieve aumento del sovralto, associato ad un nuovo calo della pressione.



ISPRA

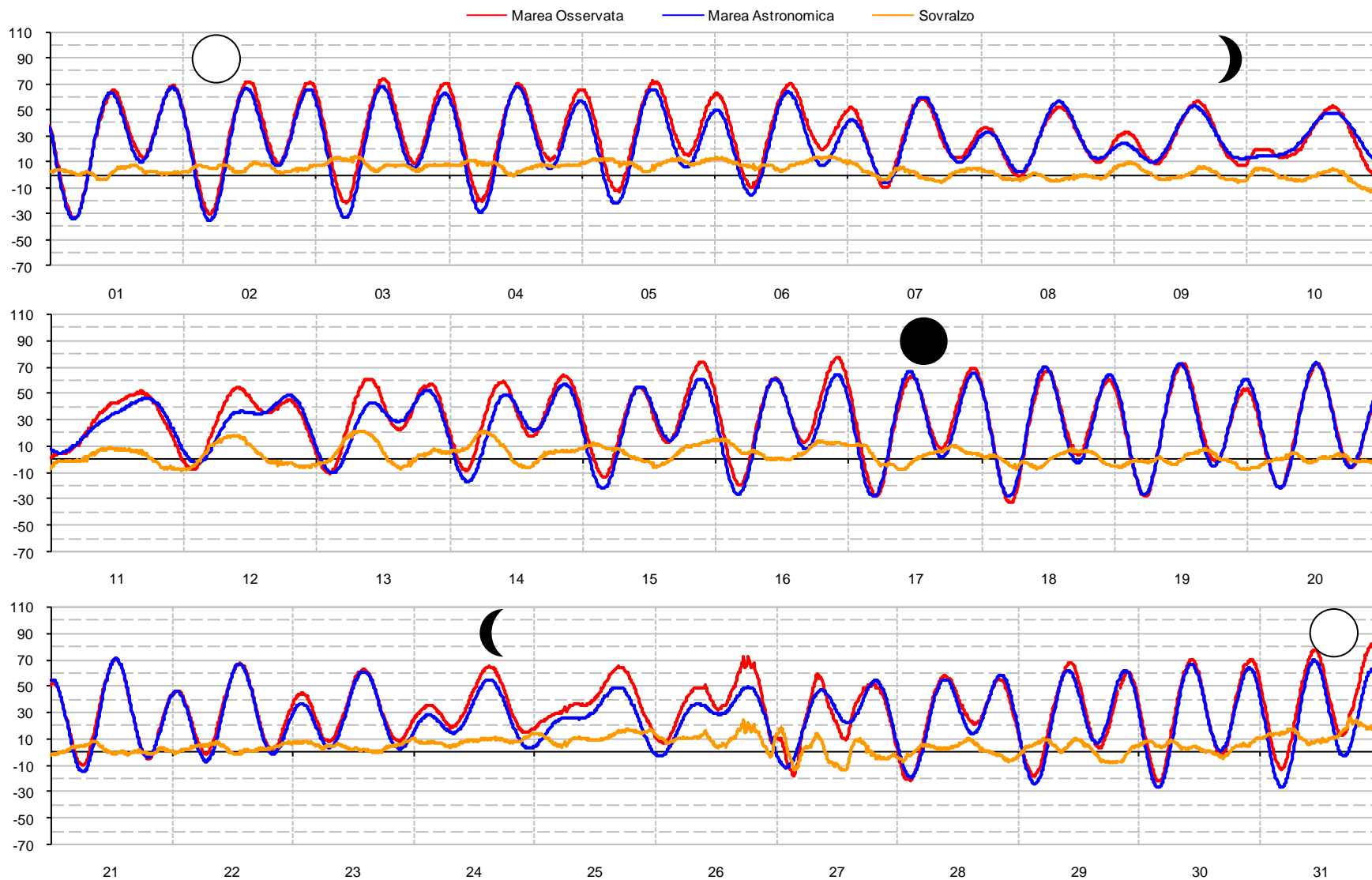
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Bollettino n. 8 - Anno 2012

Mareografia

Stazione: **Venezia - Punta della Salute**

Periodo: **Agosto 2012**

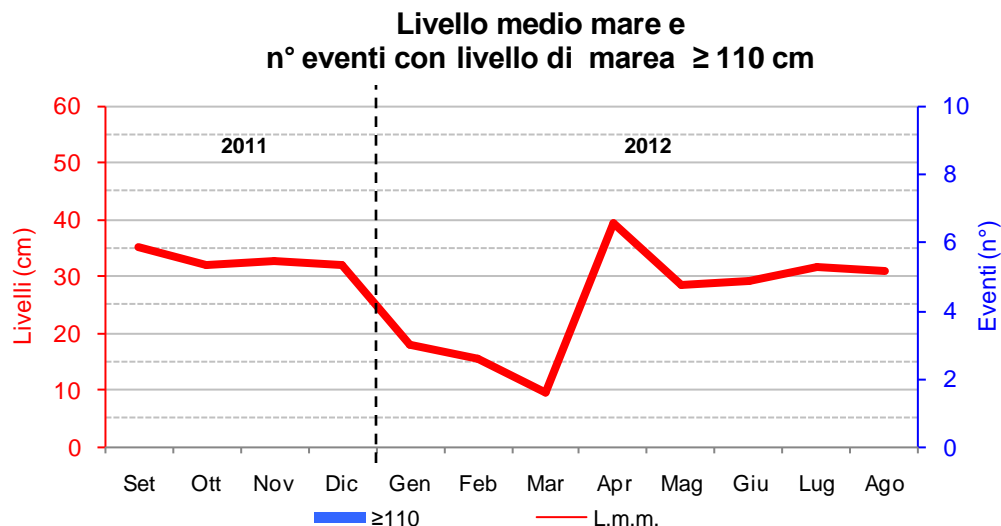


Mareografia

Stazione: **Burano**

Periodo: **Agosto 2012**

Massimo	+75 cm 31 agosto (h 23:10)
Minimo	-23 cm 01 agosto (h 05:00)
Escursione massima di marea	98 cm
Livello medio mare mensile	31.01 cm
n° eventi con livello di marea ≥ 110 cm	-



ANALISI DEL PERIODO

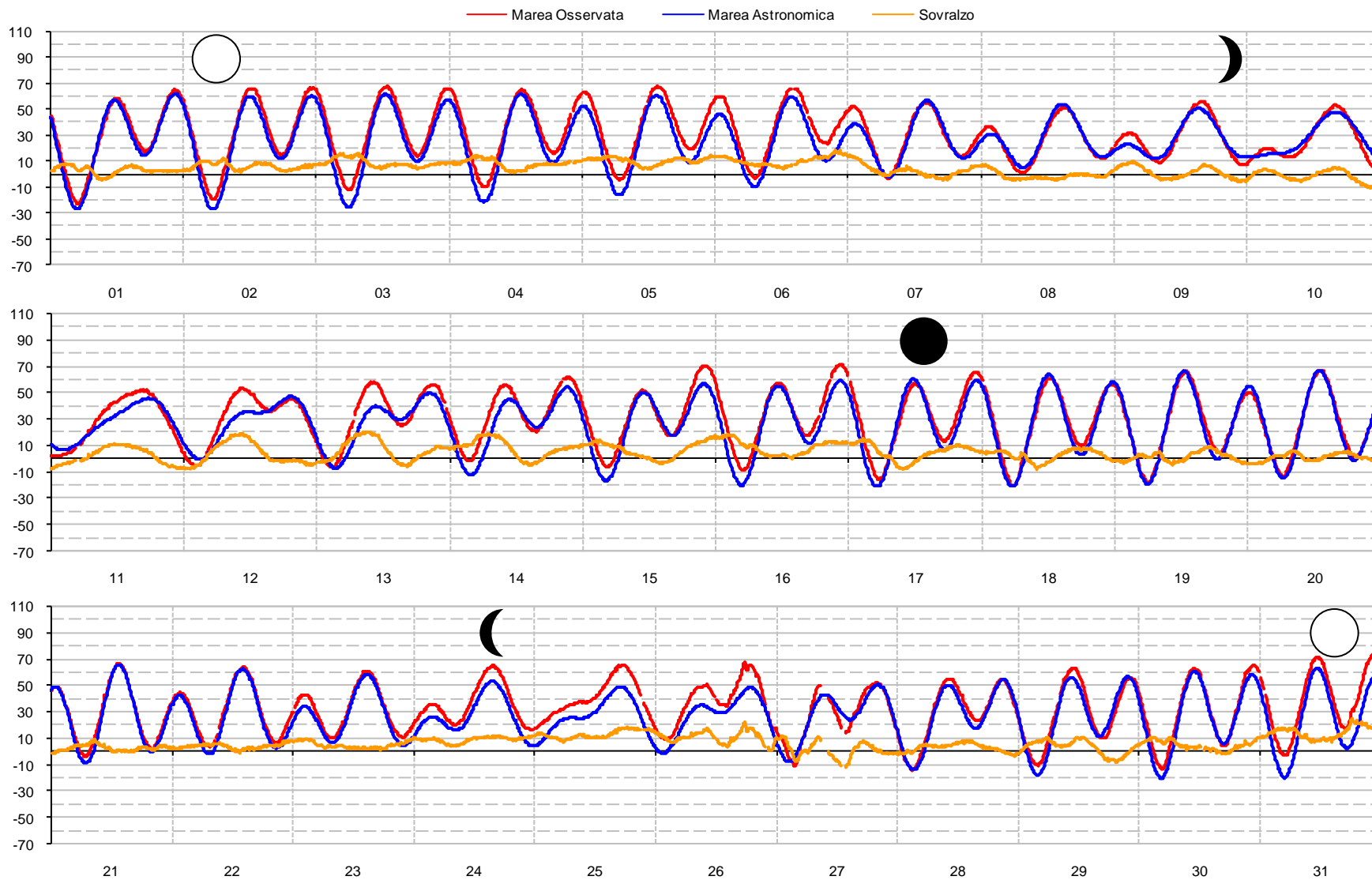
Nel mese di agosto 2012, la marea a Burano ha raggiunto la quota massima di +75 cm il giorno 31 alle ore 23:10 e la quota minima di -23 cm il giorno 1 alle ore 05:00. Il livello medio mare mensile calcolato risulta pari a 31.01 cm, valore pressoché in linea con i 31.41 cm registrati nel mese di luglio, ma inferiore ai 32.83 cm fatti registrare ad agosto 2011.

Non si sono registrati eventi di acqua alta (≥ 110 cm sullo Z.M.P.S.).

Nei primi giorni del mese i sovralti si sono mantenuti su valori positivi, per poi attestarsi attorno allo zero dal 7 agosto grazie al ritorno dell'alta pressione. A seguito del passaggio di una debole perturbazione all'inizio della seconda decade, si è osservato un andamento periodico del sovralto con l'ampiezza che ha raggiunto valori di +20 cm e che progressivamente è ritornato nella norma nei giorni successivi al 15 agosto. Il sovralto ha mantenuto un andamento pressoché regolare sino al 26 agosto giorno nel quale, a causa dei venti di Bora associati al calo barico, si sono verificate delle oscillazioni del segnale che si sono attenuate nei giorni seguenti. Alla fine del mese si registra un lieve aumento del sovralto, associato ad un nuovo calo della pressione.



Stazione: **Burano**

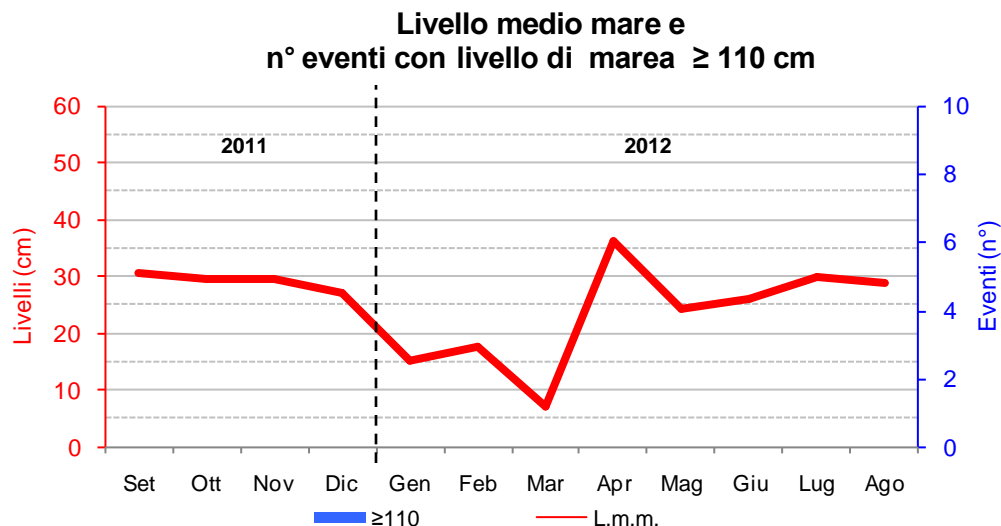
Periodo: **Agosto 2012**

Mareografia

Stazione: **Chioggia Vigo**

Periodo: **Agosto 2012**

Massimo	+82 cm 26 agosto (h 17:50) 31 agosto (h 22:00)
Minimo	-33 cm 01 agosto (h 03:40)
Escursione massima di marea	115 cm
Livello medio mare mensile	28.75 cm
n° eventi con livello di marea ≥ 110 cm	-



ANALISI DEL PERIODO

Nel mese di agosto 2012, la marea a Chioggia Vigo ha raggiunto la quota massima di +82 cm nei giorni 26 (ore 17:50) e 31 (ore 22:00) e la quota minima di -33 cm il giorno 1 alle ore 03:40. Il livello medio mare mensile calcolato risulta pari a 28.75 cm, valore inferiore ai 29.81 cm registrati nel mese di luglio, ma pressoché in linea ai 28.32 cm fatti registrare ad agosto 2011. Non si sono registrati eventi di acqua alta (≥ 110 cm sullo Z.M.P.S.).

Nei primi giorni del mese i sovralti si sono mantenuti su valori positivi, per poi attestarsi attorno allo zero dal 7 agosto grazie al ritorno dell'alta pressione. A seguito del passaggio di una debole perturbazione all'inizio della seconda decade, si è osservato un andamento periodico del sovralto con l'ampiezza che ha raggiunto valori di +22 cm e che progressivamente è ritornato nella norma nei giorni successivi al 14 agosto. Questo andamento pressoché regolare si è mantenuto fino al 26 agosto, giorno nel quale i venti di Bora associati al calo barico hanno determinato un forte incremento del livello di marea, insaccata nella parte meridionale della Laguna, e oscillazioni del segnale del sovralto (valore massimo raggiunto +33 cm) che si sono attenuate nei giorni seguenti.



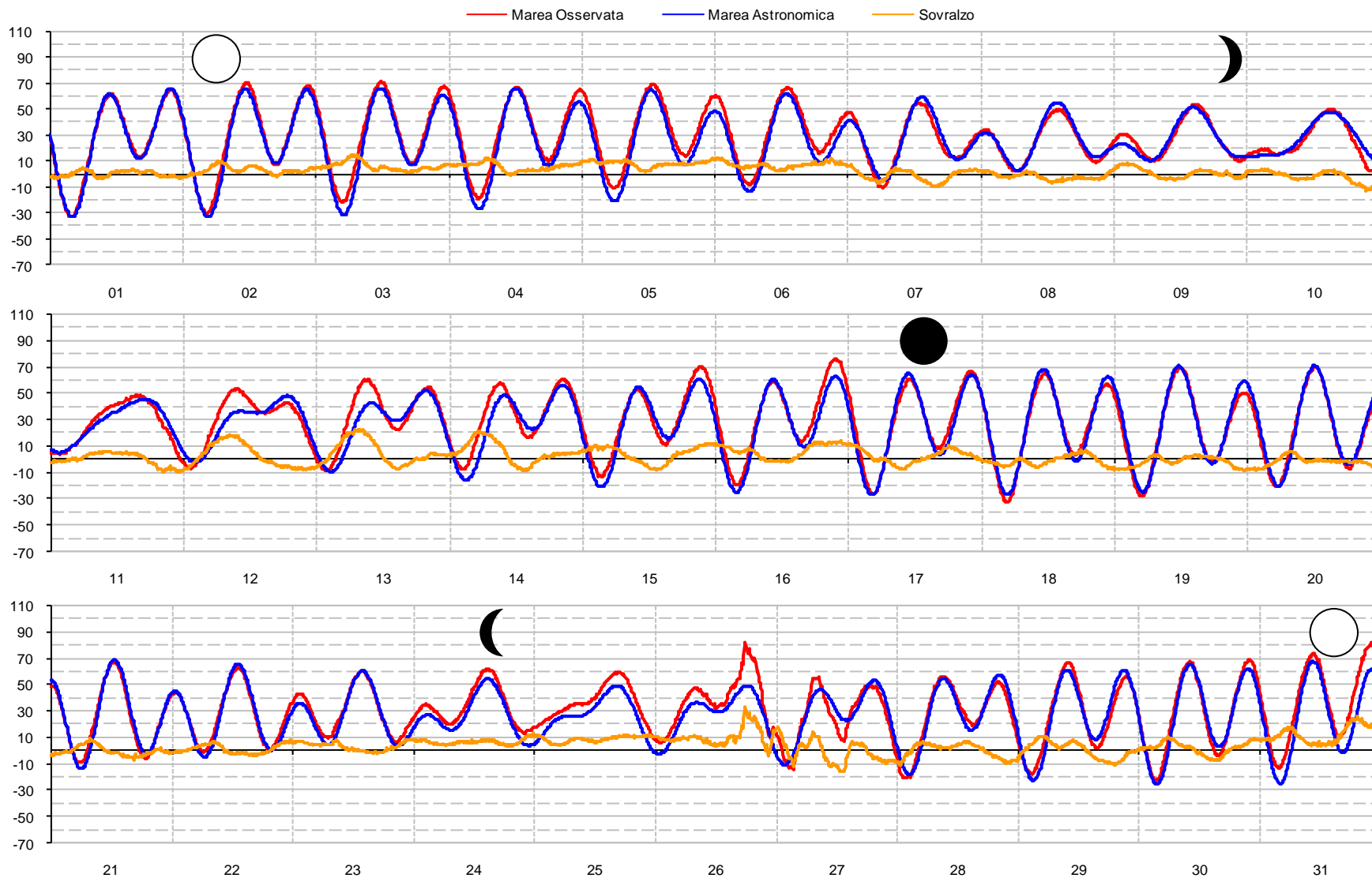
ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Bollettino n. 8 - Anno 2012

Mareografia

Stazione: **Chioggia Vigo**

Periodo: **Agosto 2012**

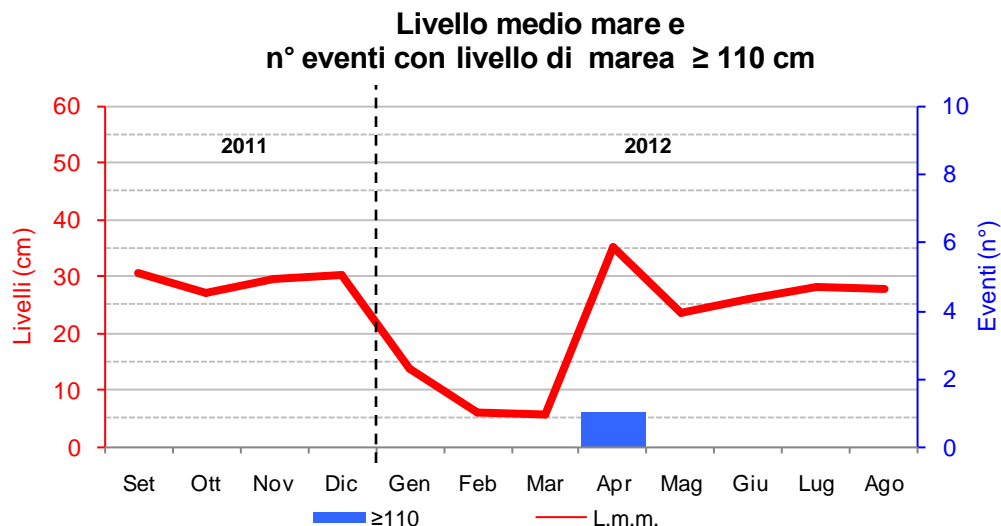


Mareografia

Stazione: **Grado**

Periodo: **Agosto 2012**

Massimo	+86 cm 31 agosto (h 21:40)
Minimo	-45 cm 01 agosto (h 03:00)
Escursione massima di marea	131 cm
Livello medio mare mensile	27.70 cm
n° eventi con livello di marea ≥ 110 cm	-



ANALISI DEL PERIODO

Nel mese di agosto 2012, la marea a Grado ha raggiunto la quota massima di +86 cm il giorno 31 alle ore 21:40 e la quota minima di -45 cm il giorno 1 alle ore 03:00. Il livello medio mare mensile calcolato risulta pari a 27.70 cm, valore pressoché in linea ai 28.09 cm registrati nel mese di luglio, ma inferiore ai 28.93 cm fatti registrare ad agosto 2011. Non si sono registrati eventi di acqua alta (≥ 110 cm sullo Z.M.P.S.).

Nei primi giorni del mese i sovralti si sono mantenuti su valori positivi, per poi attestarsi attorno allo zero dal 7 agosto grazie al ritorno dell'alta pressione. A seguito del passaggio di una debole perturbazione all'inizio della seconda decade, si è osservato un andamento periodico del sovralto con l'ampiezza che ha raggiunto valori di +22 cm e che progressivamente è ritornato nella norma nei giorni successivi al 14 agosto. Questo andamento pressoché regolare si è mantenuto fino al 26 agosto, giorno nel quale i venti di Bora associati al calo barico hanno determinato un forte decremento del livello di marea, tipico comportamento della Laguna di Grado in caso di Bora, e oscillazioni del segnale del sovralto (valore minimo raggiunto -31 cm) che si sono attenuate nei giorni seguenti.



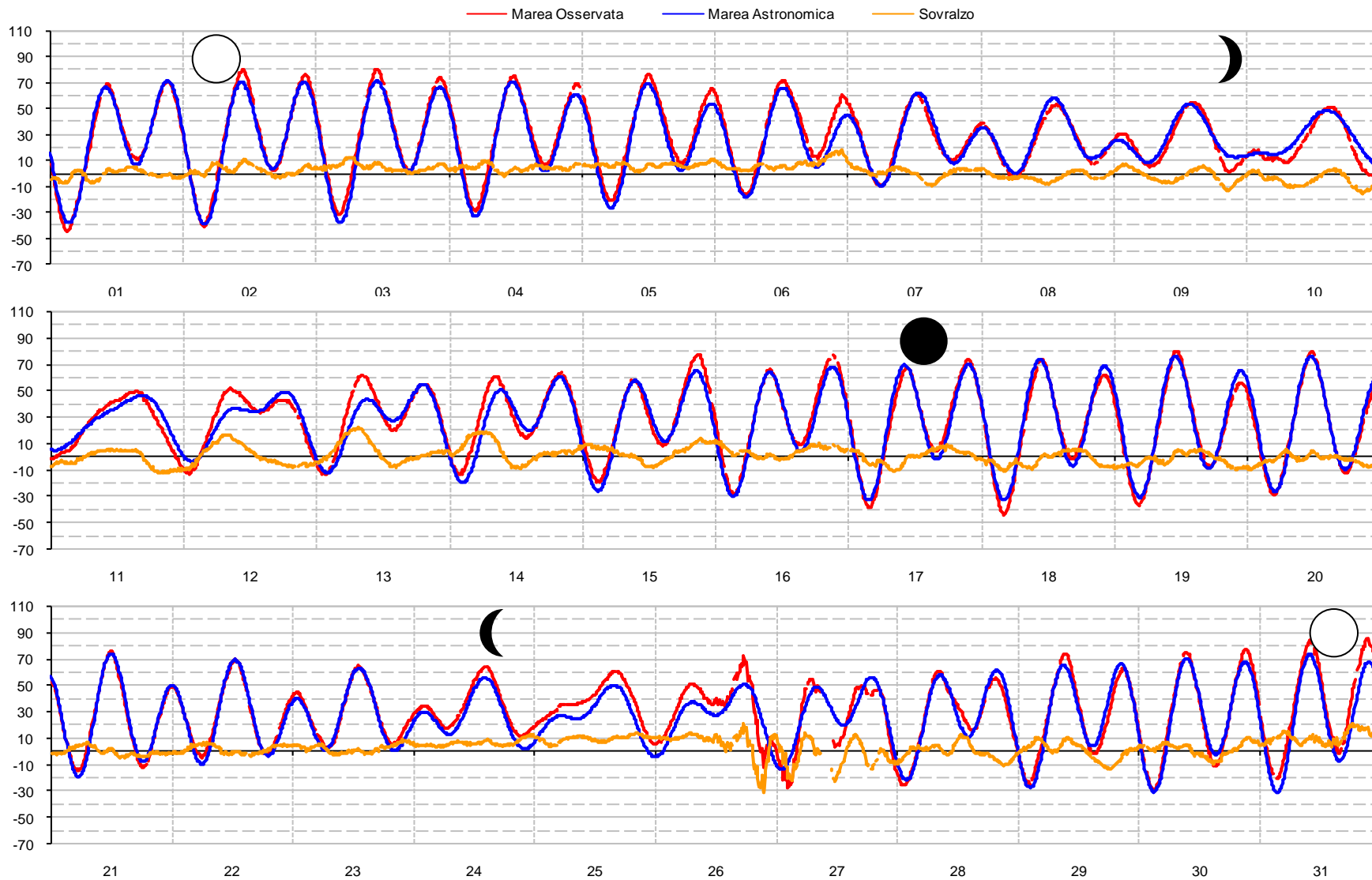
ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Bollettino n. 8 - Anno 2012

Mareografia

Stazione: **Grado**

Periodo: **Agosto 2012**





Allegato 3

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. 01/2011

-

01 Marzo 2011

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

Analisi evento 1 marzo 2011

In questo documento è presentata l'analisi dell'evento del giorno 1 marzo 2011, caratterizzato dal fenomeno dei sovralti differenziati: il vento di Bora agisce lungo la direttrice NE-SO, lungo la quale è orientata la Laguna di Venezia, causando un'inclinazione del livello idrico lungo la medesima direttrice. Il vento quindi realizza uno spostamento delle masse d'acqua dalla zona settentrionale (posta in sopravento) alla zona meridionale della laguna (sottovento). Di conseguenza, in queste condizioni meteorologiche si osservano dei notevoli dislivelli idrici all'interno della laguna.

Analisi meteorologica

Tra i giorni 24 e 26 febbraio sono stati misurati valori della pressione atmosferica molto elevati a Venezia rispetto alla stazione di Bari: il dislivello barico massimo di 11,8 hPa è stato rilevato il giorno 24 febbraio alle ore 4:00 (figura 1). Dalle ore 12 del 26 febbraio si osserva un calo della pressione a Venezia, che si assesta sui valori rilevati a Bari, rimasti nel frattempo pressoché costanti. I valori barici subiscono successivamente un'ulteriore diminuzione in entrambe le stazioni fino alle ore 12:00 del giorno 27 febbraio in cui le pressioni raggiungono i valori minimi del periodo, annullando il precedente gradiente barico. In seguito si osserva una crescita delle pressioni in entrambe le stazioni, molto più rapida a Venezia, fino alla fine del giorno 28 febbraio. Un brusco crollo delle pressioni si verifica a Bari, tanto che alle ore 20:00 del giorno 1 marzo si rileva il massimo gradiente barico rispetto ai valori misurati a Venezia (12,1 hPa).

Raggiunto il minimo barico a Bari, le pressioni ritornano a crescere in entrambe le stazioni e con maggiore intensità a Bari, fino a presentare un gradiente molto più contenuto dal giorno 3 febbraio.

Per quanto riguarda il regime dei venti, nei giorni compresi tra il 24 e il 27 febbraio, a Piattaforma CNR si registrano venti di provenienza prevalente dai quadranti settentrionali (figura 2). Per quanto riguarda la velocità, anch'essa è caratterizzata da un andamento irregolare e raggiunge un picco massimo pari a 12,1 m/s il giorno 26 febbraio alle ore 2:40.

Dall'inizio del giorno 28 febbraio, il vento assume una direzione costante e si instaura un regime di Bora: la provenienza è quella del quadrante nord-orientale e la velocità aumenta decisamente, fino al valore massimo di 23,2 m/s registrato il giorno 1 marzo alle ore 20:00. Questo picco è raggiunto in corrispondenza del massimo gradiente barico di 12,1 hPa misurato tra le stazioni di Bari e Venezia. Da questo istante il vento subisce una diminuzione graduale della velocità, mantenendo la direzione costante fino alla fine del giorno 4 febbraio.

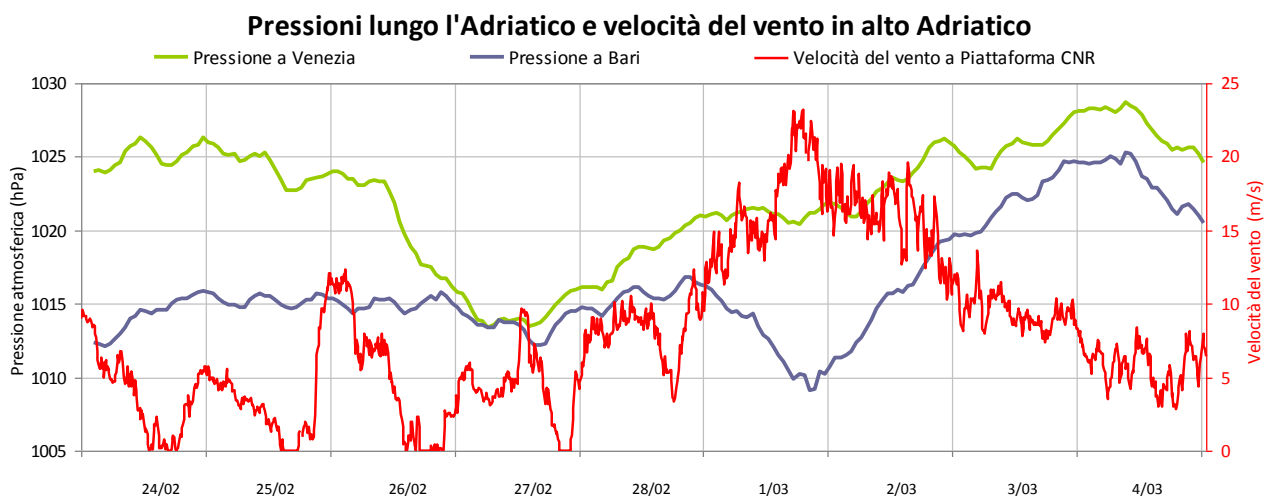


Figura 1

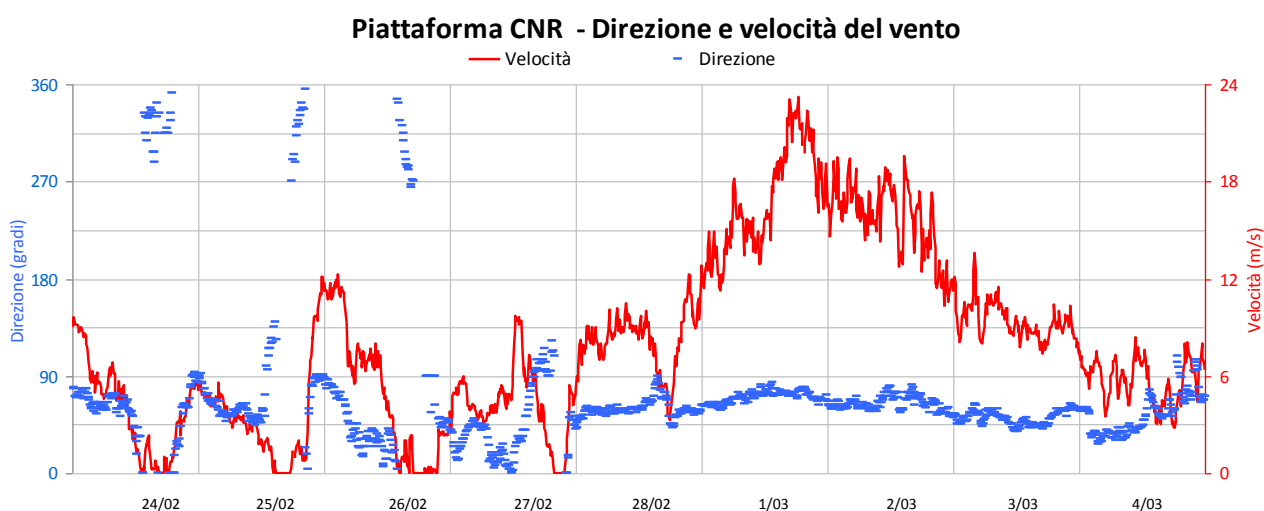


Figura 2

Analisi mareografica

Il regime mareale della laguna presenta un andamento regolare tra i giorni 24 e 28 febbraio: i livelli rilevati nelle varie stazioni mareografiche sono molto simili tra loro; le uniche differenze consistono nelle ampiezze di marea e nei ritardi di propagazione, correlati alla diversa dislocazione geografica delle stazioni stesse. L'unica lieve alterazione, rilevata il giorno 26 febbraio, consiste in un leggero insaccamento avvenuto nella stazione di Val Fogolana, causato da un vento proveniente dal primo quadrante, di intensità massima pari a 12,3 m/s (figura 3).

Dal 1 marzo l'azione del vento di Bora altera decisamente il regime idraulico lagunare, causando il fenomeno dei cosiddetti sovralti differenziati: il vento proveniente da nord-est causa lo

spostamento della massa d'acqua lagunare lungo l'asse NE-SO. Per questo motivo nella laguna settentrionale i livelli subiscono una decisa diminuzione rispetto alla laguna meridionale, zona in cui si insaccano le acque lagunari. Questo fenomeno si osserva soprattutto dal confronto tra le stazioni di Grassabò e Val Fogolana, situate rispettivamente alle estremità settentrionale e meridionale della laguna: la massima differenza tra i livelli di marea rilevati tra queste stazioni è infatti uguale a 124 cm (1 marzo, ore 22:30). I picchi massimi misurati sono pari a +58 cm a Grassabò (ore 23:30 del 28 febbraio), + 88 cm a Punta della Salute (ore 09:40, 2 marzo), e +149 cm a Val Fogolana (ore 22.30, 1 marzo). Da evidenziare che nella stazione di Grassabò l'altezza di marea in corrispondenza dei cavi assume valori negativi a causa dello svuotamento del bacino lagunare in sopravento.

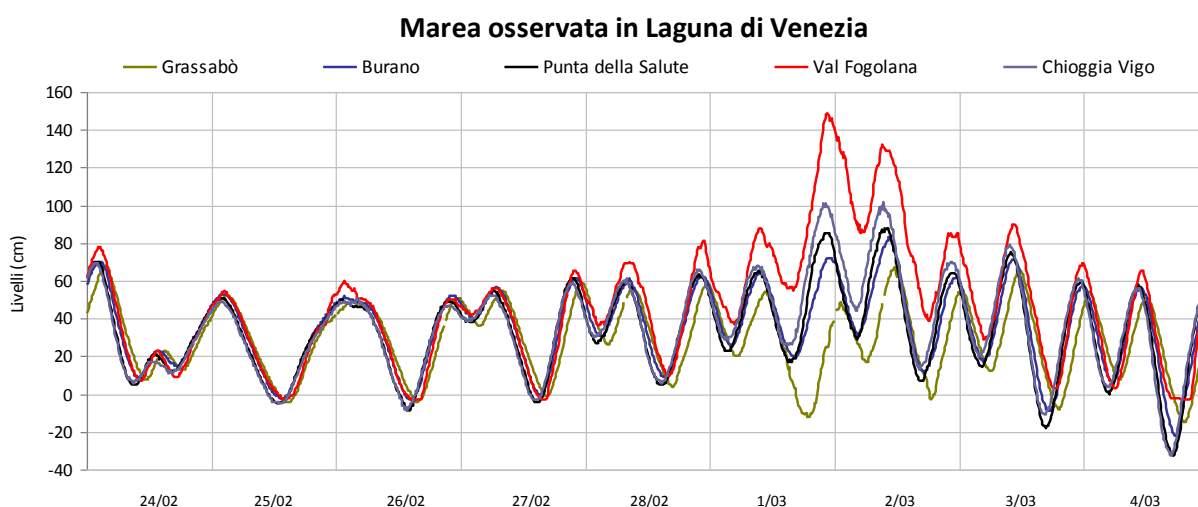


Figura 3

Molto interessante è l'analisi dei sovralti: essi sono calcolati come differenza tra marea osservata e marea astronomica e permettono di eseguire uno studio più approfondito sulla componente meteorologica della marea, legata in questo caso all'intensificazione del vento di Bora. Si nota innanzitutto un andamento periodico dei sovralti nei giorni precedenti l'evento e ciò è probabilmente legato alla presenza di una sessa (oscillazione libera del livello marino), che sembra mantenersi anche dopo la cessazione del vento di Bora (figura 4).

Tra i giorni 24 e 27 febbraio i valori calcolati non mostrano particolari differenze tra le varie stazioni, ad eccezione del leggero picco di Val Fogolana all'inizio del giorno 26 febbraio dovuto all'azione di un vento proveniente dal primo quadrante che ha causato un leggero insaccamento. I fenomeni più interessanti si osservano invece a partire dal giorno 1 marzo: l'azione del vento di Bora altera decisamente il regime idraulico lagunare causando la differenziazione dei sovralti.

Si può notare come il valore massimo del sovralto sia stato individuato nella stazione di Val Fogolana (+92 cm) alle ore 02:00 del giorno 2 marzo perché soggetta all'insaccamento delle

acque lagunari, mentre la stazione di Grassabò è soggetta a svuotamento, e mostra sovralti negativi con il valore minimo di -26 cm (ore 20:20 giorno 1 marzo) in corrispondenza della massima intensità del vento (23,2 m/s). La massima differenza del sovralto tra le due stazioni è uguale 112 cm (ore 22:30, giorno 1 marzo). Si può quindi sottolineare che, come avviene per i livelli di marea in condizioni di vento di Bora, anche l'entità dei sovralti aumenta lungo la direttrice NE-SO in cui è orientata la laguna.

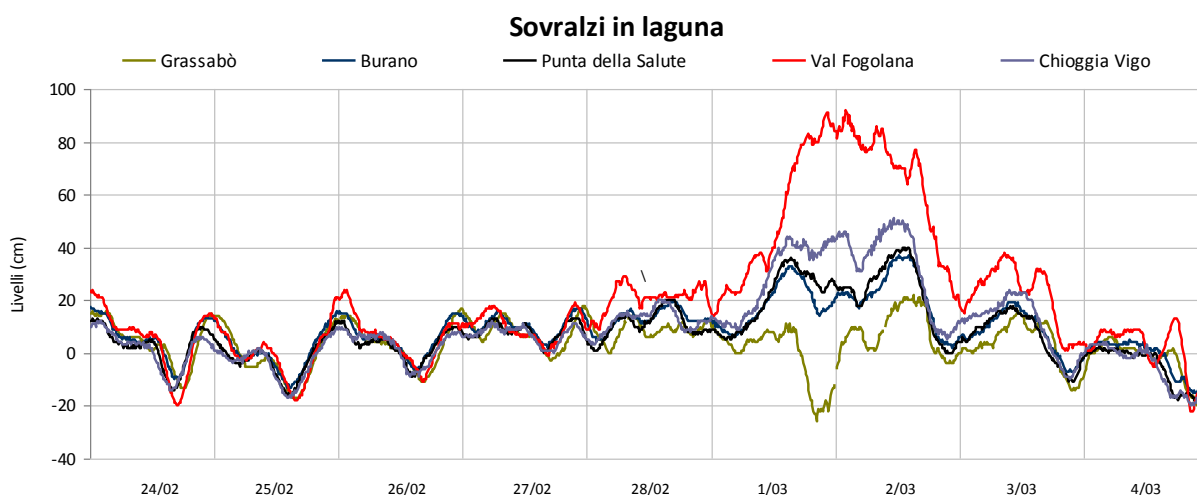


Figura 4

Nel nord Adriatico, l'andamento delle maree è molto simile a quello mostrato dalla Laguna di Venezia. Nei giorni 24 e 25 febbraio l'andamento delle maree nelle tre stazioni qui analizzate è molto simile, con valori leggermente inferiori rilevati nella stazione di Grado (figura 5). Un vento proveniente dal primo quadrante (di intensità pari a 12,1 m/s) provoca una differenziazione significativa nelle prime ore del 26 febbraio. La stazione di Porto Caleri si trova in posizione di sottovento e presenta un livello idrico maggiore rispetto a Grado (in sopravvento), che subisce lo svuotamento del proprio bacino lagunare. Cessato l'effetto del vento, il regime mareale si regolarizza nuovamente. Dal giorno 28 febbraio un vento di Bora altera decisamente il regime delle maree nell'alto Adriatico: alla massima intensità del vento corrisponde un insaccamento nella stazione di Porto Caleri, tanto che si raggiunge un picco di +123 cm, alle ore 21:40 del giorno 1 marzo. La stazione di Grado, posta in sopravvento, subisce invece una nuova e più marcata azione di svuotamento, tanto che il livello idrico raggiunge anche valori negativi.

Si deve notare che, con la cessazione del vento di Bora, i colmi di marea delle tre stazioni qui considerate si assestano su valori simili mentre, per quanto riguarda i cavi di marea, la stazione di Grado presenta valori inferiori rispetto a quelli rilevati a Porto Caleri e a Piattaforma CNR; inoltre essi sono diminuiti ulteriormente rispetto ai valori minimi misurati durante l'azione del vento di Bora (figura 5).

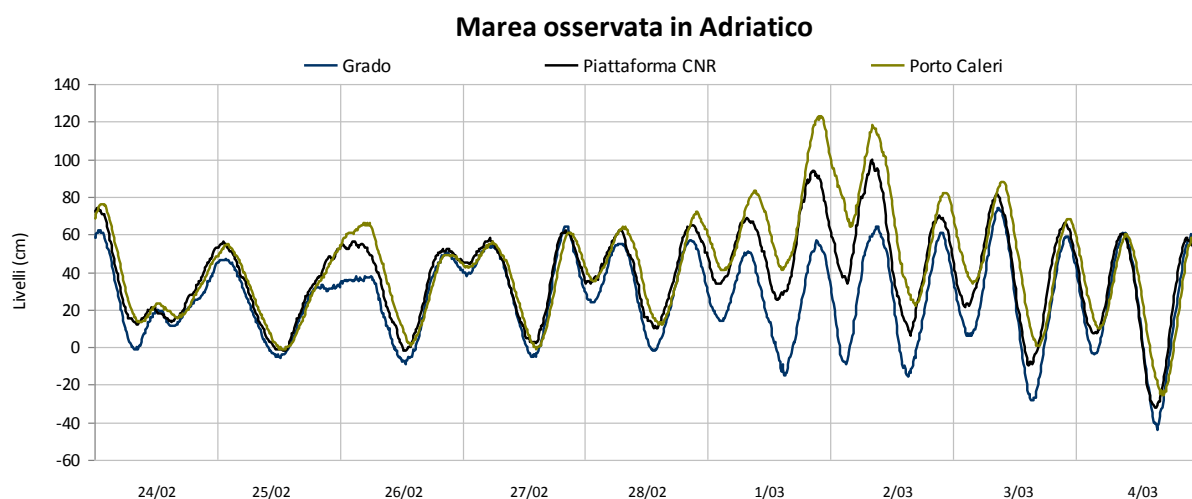


Figura 5

Per quanto riguarda l'analisi dei sovralti, anche nell'alto Adriatico si osserva un andamento periodico, causato probabilmente dalla presenza di una sessa. Si nota che con il vento del 26 febbraio aumentano i sovralti calcolati nelle stazioni di Piattaforma CNR e Porto Caleri, mentre diminuiscono a Grado a causa della sua posizione sopravento. Il giorno 27 febbraio i sovralti si stabilizzano fino al 28, giorno in cui si instaura il vento di Bora. Successivamente i sovralti si differenziano significativamente (figura 6): nella stazione di Porto Caleri si raggiunge il picco di +67 cm il giorno 2 febbraio alle ore 8:10, mentre a Grado si manifesta il giorno 2 febbraio alle ore 2:40 (+79 cm).

Con la cessazione del vento di Bora i sovralti registrati presso le tre stazioni si attenuano, attestandosi su valori molto simili ed arrivando a raggiungere simultaneamente valori negativi il giorno 4 febbraio.

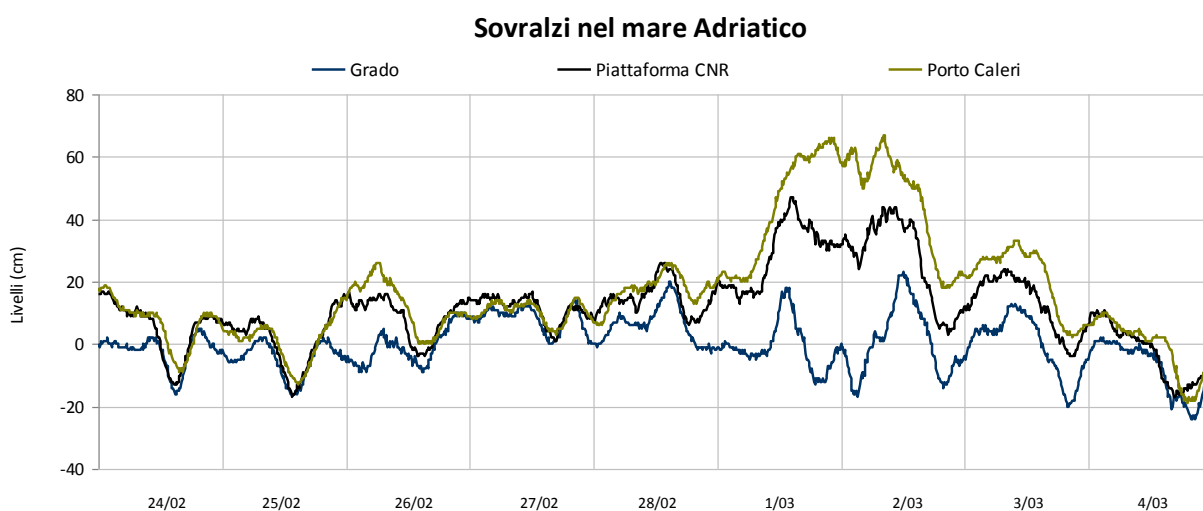


Figura 6

Si deve precisare che il vento di Bora altera in modo maggiore il regime idraulico lagunare, piuttosto che quello del nord Adriatico: a mare i sovralti calcolati sono inferiori rispetto a quelli delle stazioni interne alla laguna. Ciò è dovuto al fatto che la Laguna di Venezia è un bacino chiuso rispetto al mare Adriatico.

Conclusioni

Il giorno 1 marzo 2011, a causa dell'azione di un forte vento di Bora, nel bacino lagunare veneziano è stata osservata una notevole alterazione del normale regime idraulico, consistente in differenze molto ampie dei livelli di marea tra le varie località interne alla laguna.

Il vento di Bora soffia lungo la direttrice NE-SO, coincidente con l'orientamento della Laguna di Venezia, e ciò crea lo spostamento della massa d'acqua presente nella laguna stessa dal bordo sopravento a quello sottovento. È questo il fenomeno responsabile della differenziazione dei sovralti.