



**ISPRA**  
Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

# Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici



MANUALI E LINEE GUIDA



**ISPRA**

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

# **Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici**

---

---

### **Informazioni legali**

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo manuale.

**ISPRA** - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale  
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma  
[www.isprambiente.it](http://www.isprambiente.it)

ISPRA, Manuali e Linee Guida 77/2012

ISBN 978-88-448-0532-6

Riproduzione autorizzata citando la fonte

### **Elaborazione grafica**

ISPRA

Grafica di copertina: Franco Iozzoli  
Foto di copertina: Franco Crosato

### **Coordinamento editoriale:**

Daria Mazzella  
ISPRA – Settore Editoria

***NOVEMBRE 2012***

---

## **Autori**

Ing. Devis Canesso (ISPRA – Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine – Servizio Laguna di Venezia) – Capp. 1 e 2;

Ing. Devis Canesso, Dott. Marco Cordella (ISPRA – Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine – Servizio Laguna di Venezia) – Cap. 3;

Ing. Giovanni Arena (ISPRA – Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine – Servizio Mareografico – Settore Reti di Monitoraggio) – Cap. 1 (§ 2.1.7) e Cap. 4.

## **Ringraziamenti**

Gli autori desiderano ringraziare l'Ing. Mauro Bencivenga (Direttore del Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine) per le dettagliate informazioni, procedure di controllo e validazione applicate dalla Rete Mareografica Nazionale.

Si ringrazia inoltre l'Ing. Maurizio Ferla (Direttore del Servizio Laguna di Venezia) per il proprio contributo nel miglioramento di questo documento ed il costante sostegno per lo sviluppo di attività scientifiche e di ricerca in seno al Servizio Laguna di Venezia.

Si ringrazia infine il Dott. Franco Crosato per gli utili consigli e l'attività di revisione svolta.

---

## PRESENTAZIONE

Misurare il fenomeno delle maree comporta una duplice serie di operazioni tra loro complementari: la prima è costituita dalle operazioni di campagna di misura e di raccolta del dato sul campo, mentre la seconda consiste nel metodico riordino, organizzazione, archiviazione e revisione dei dati raccolti, al fine di rilasciare e divulgare al pubblico dati affidabili e di buona qualità. L'obiettivo di questo manuale è di illustrare ed esemplificare puntualmente le procedure adottate in seno ad ISPRA, nell'ambito delle attività di validazione dei dati mareografici.

Tutte le fasi del controllo di qualità dei dati presentate in questo documento costituiscono l'applicazione dei protocolli di varie istituzioni europee ed internazionali che si occupano a vario titolo della raccolta e dell'analisi di dati mareografici ed oceanografici, in particolare dell'European Sea Level Service (ESEAS), dell'European Global Ocean Observing System (EuroGOOS) e dell'Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), nonché delle tecniche pratiche tramandate dalla lunga esperienza in materia mareografica maturata in quegli istituti che hanno storicamente registrato i dati di marea, come l'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, le cui competenze sono ora in capo ad ISPRA.

---

# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>1. IL FENOMENO DELLA MAREA .....</b>	<b>2</b>
1.1 Dinamica della marea .....	2
1.1.1 Aspetti generali e definizioni .....	2
1.1.2 La componente astronomica della marea .....	3
1.1.3 La componente meteorologica della marea .....	4
1.2 Propagazione della marea .....	5
1.2.1 Aspetti generali e definizioni .....	5
1.2.2 Curve caratteristiche di propagazione della marea .....	5
1.2.3 Propagazione della marea in ambienti di transizione .....	6
1.2.3.1 Un caso particolare: la propagazione della marea nella Laguna di Venezia .....	6
<b>2. MISURAZIONE DEL LIVELLO DI MAREA .....</b>	<b>9</b>
2.1 Strumenti per la misura del livello del mare .....	9
2.1.1 Generalità sulle misure mareografiche .....	9
2.1.2 Ubicazione delle stazioni di misura .....	9
2.1.3 Stazioni con galleggiante e pozzetto di calma .....	10
2.1.4 Stazioni con strumenti a pressione .....	13
2.1.5 Stazioni con strumenti acustici .....	14
2.1.6 Stazioni con strumenti radar .....	16
2.1.7 Configurazione tecnica di una stazione mareografica di nuova concezione della Rete Mareografica Nazionale .....	17
2.1.8 Aspetti conclusivi sulle stazioni mareografiche .....	19
2.2 Riferimenti altimetrici di una stazione mareografica .....	20
2.2.1 Aspetti generali e definizioni .....	20
2.2.2 Raccomandazioni dell'Intergovernmental Oceanographic Commission .....	21
2.2.3 Operazioni di livellazione .....	23
2.3 Cenni sulle reti mareografiche .....	24
2.3.1 La rete mareografica nazionale italiana (RMN) .....	24
2.3.2 La rete mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico (RMLV) .....	26
<b>3. VALIDAZIONE DEI DATI MAREOGRAFICI IN USO PRESSO LA RETE MAREOGRAFICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA (RMLV) .....</b>	<b>29</b>
3.1 Il concetto di qualità nei dati mareografici .....	29
3.1.1 Aspetti generali e definizioni .....	29

---

3.1.2	Dalla misura alla validazione dei dati mareografici .....	29
3.1.3	L'importanza dei metadati .....	31
3.2	Procedure di controllo della qualità dei dati mareografici .....	32
3.2.1	Livelli di qualità applicabili ai dati mareografici .....	32
3.2.2	Validazione dei dati mareografici – Livello 1 .....	33
3.2.2.1	Individuazione di uno spike.....	36
3.2.2.2	Individuazione di uno scarrucolamento.....	37
3.2.2.3	Individuazione di un blocco .....	38
3.2.2.4	Integrazione di dati mancanti .....	39
3.2.2.5	Individuazione di dati privi di significato fisico.....	40
3.2.2.6	Estrazione dei dati orari ed applicazione del filtro di Pugh.....	40
3.2.3	Validazione dei dati mareografici – Livello 2.....	43
3.2.3.1	Analisi delle costanti armoniche .....	43
3.2.3.2	Analisi del residuo.....	46
3.2.3.3	Analisi del livello medio del mare.....	47
3.2.3.4	Elaborazioni statistiche.....	51
3.2.4	Metodi empirici ed applicazioni pratiche.....	51
3.2.4.1	Analisi per direttrice di propagazione della marea .....	51
3.2.4.2	Analisi del fenomeno delle quadrature.....	53
3.2.4.3	Applicazione del metodo delle quadrature per la verifica della quota dei capisaldi .....	54
<b>4.</b>	<b>ELABORAZIONI MAREOGRAFICHE IN USO PRESSO LA RETE MAREOGRAFICA NAZIONALE (RMN) .....</b>	<b>60</b>
4.1	Analisi di marea.....	60
4.2	Livello medio del mare.....	65
4.3	Analisi dei residui.....	78
4.4	Onde anomale.....	80
	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>84</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>85</b>
	<b>ALLEGATO A .....</b>	<b>89</b>
	<b>ALLEGATO B.....</b>	<b>90</b>

---

## INTRODUZIONE

Le osservazioni mareografiche registrate, raccolte e trasmesse da una rete mareografica costituiscono da sempre una notevole fonte di informazioni per lo studio di varie questioni di interesse tecnico e scientifico quali, ad esempio, le variazioni del livello del mare, la difesa dalle alte maree, le trasformazioni morfologiche delle coste, degli estuari e delle lagune, o il rischio di inondazione da mareggiata della fascia costiera oggetto del monitoraggio. Se i mareografi sono installati all'interno dei porti vi è inoltre un interesse pratico, legato alla necessità di ottenere misure idrometriche affidabili per condurre in sicurezza le operazioni portuali, per determinare le quote di progetto delle opere marittime, delle banchine e dei frangiflutti, e per verificare i loro possibili assestamenti o cedimenti nel tempo. Affinché queste analisi diano contributi scientifici consistenti è necessario che i dati di livello di marea utilizzati siano preventivamente corretti e validati, al fine di escludere eventuali errori in essi presenti.

Questo documento illustra le procedure necessarie per la validazione dei dati mareografici, elencando le varie problematiche che si possono presentare durante il processo di controllo della qualità e le modalità per correggere e risolvere le criticità riscontrate. Esso viene presentato in tre parti: nella prima viene trattata la fenomenologia della marea, nella seconda vengono descritte le tecniche per la misurazione del livello di marea, nella terza viene esposta la metodologia alla base della validazione dei dati mareografici.

La prima parte descrive le caratteristiche principali del fenomeno della marea, la sua generazione, la periodicità, la suddivisione nei contributi astronomico e meteorologico e la propagazione in mare aperto e in ambienti di transizione, approfondendo il caso particolare della Laguna di Venezia.

Nella seconda parte vengono presentate le diverse tipologie di strumenti con cui è possibile misurare la marea, vengono descritti il funzionamento e la dotazione di una stazione mareografica, le caratteristiche che un luogo deve avere per ospitarla, le operazioni necessarie per il suo corretto posizionamento plano-altimetrico. Vengono illustrate inoltre alcune caratteristiche delle reti mareografiche, descrivendo la storia e la struttura della Rete Mareografica Nazionale (RMN) e della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico (RMLV).

Nella terza parte si espone la metodologia da adottare per portare a termine correttamente le validazioni, delineando le varie fasi di cui si compone questo processo e i livelli di qualità raggiungibili, diversificando le procedure in base alle caratteristiche morfologiche dei bacini su cui viene effettuato il monitoraggio: per gli ambienti di transizione si espone la metodologia adottata per la RMLV, per i monitoraggi su larga scala si riportano le elaborazioni in uso presso la RMN. Vengono illustrate, in particolare: l'applicazione del filtro standard, l'utilizzo del filtro di Pugh per l'estrazione dei dati orari, le modalità di calcolo della marea astronomica, l'analisi delle costanti armoniche, l'analisi del residuo e l'analisi del livello medio del mare su diverse scale temporali attraverso il filtro  $X_0$  di Doodson ed il filtro di Bloomfield. Si riportano inoltre alcuni metodi empirici applicabili in ambiente lagunare come l'analisi per direttrice di propagazione della marea e l'analisi delle quadrature. Di quest'ultima si fornisce anche un'applicazione pratica, illustrando la proposta di modifica della quota di caposaldo di alcune stazioni della RMLV.

Negli allegati, infine, si presentano un esempio dell'applicazione del filtro  $X_0$  di Doodson per il calcolo del livello medio del mare su base giornaliera ed una lista di siti web di interesse dal punto di vista mareografico, con collegamenti diretti ad enti e progetti internazionali, europei e nazionali.



---

# 1. IL FENOMENO DELLA MAREA

## 1.1 Dinamica della marea

### 1.1.1 Aspetti generali e definizioni

I mari e gli oceani sono sempre agitati da movimenti ondulatori e percorsi da correnti più o meno uniformi e profonde. Le cause che generano questi fenomeni sono eterogenee e sono tali da produrre diversi stati di agitazione del mare, tra cui vanno considerate:

- le *onde*, generate dal vento per attrito con la superficie del mare, si propagano per lunghi tratti al di fuori della zona di generazione e anche dopo la cessazione della causa generatrice, fino a frangere in prossimità delle coste;
- le *maree*, oscillazioni periodiche del livello marino, dovute all'attrazione gravitazionale degli astri e, secondariamente, alle perturbazioni meteorologiche;
- le *correnti*, movimenti lineari delle masse d'acqua;
- le *sesse*, oscillazioni stazionarie libere che si producono nei mari interni (ad esempio l'Adriatico), nei bacini chiusi e nei porti;
- gli *tsunami*, oscillazioni prodotte da un fenomeno sismico.

In questo documento i fenomeni trattati riguardano esclusivamente le maree, periodici movimenti di innalzamento e abbassamento della superficie del mare causati dall'attrazione del Sole e della Luna sulle masse d'acqua presenti sulla Terra.

La fase di innalzamento raggiunge il suo culmine nel momento di massima elevazione del livello marino, detta alta marea (o colmo), mentre la fase di abbassamento termina con la minima elevazione della superficie marina, detta bassa marea (o cavo). La differenza tra alta e bassa marea viene chiamata escursione o ampiezza di marea.

Le maree sono le onde più lunghe conosciute dai mareografi, avendo un periodo di 12 ore e 25 minuti ed una lunghezza pari alla metà della circonferenza terrestre (poco più di 20'000 km considerando per la Terra il raggio quadratico medio).

In base alla periodicità con cui si presentano le alte e basse maree nell'arco di un giorno è possibile classificarle come (cfr. § 3.2.3.1):

- maree diurne, quando si verifica una sola alta marea e una sola bassa marea al giorno;
- maree semidiurne, quando si verificano due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza poco diversa;
- maree miste, quando si verificano due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza molto diversa.

L'ampiezza delle maree risulta sensibilmente diversa in base alla morfologia dei bacini in cui si presentano ma, in generale, i valori minimi si registrano in mezzo agli oceani mentre i valori massimi si misurano in prossimità delle coste. Nelle isole Midway ad esempio, situate in pieno Oceano Pacifico, l'escursione di marea è pari a circa 30 cm mentre nella Baia di Fundy, sulla costa atlantica del Canada, l'ampiezza di marea arriva fino a 20 m. Nel Mediterraneo si hanno generalmente deboli escursioni di marea, con valori inferiori a 50 cm, con qualche eccezione per il golfo di Gabès (Tunisia) e l'alto Adriatico, in cui si raggiungono valori superiori a 100 cm (Matteotti, 1999).

L'ampiezza della marea influenza inoltre anche l'evoluzione stessa della morfologia costiera, delle spiagge e degli estuari e determina l'intensità delle correnti di marea. In base ad essa si possono definire due tipi estremi di ambienti di marea:

- macrotidali, quando si presentano maree di tipo semidiurno con escursione superiore a 4 m;
- microtidali, quando si presentano maree di tipo diurno o misto con escursione inferiore a 2 m.

Le situazioni intermedie che non ricadono nei primi due casi si definiscono mesotidali.

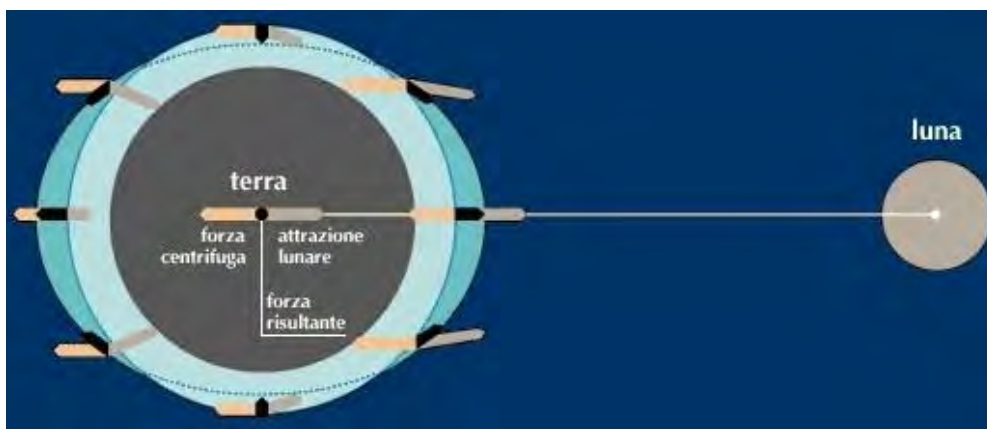
Al di là di queste classificazioni e differenze, la marea registrata in una certa località è sempre data dalla composizione di due fattori che sommano i propri effetti: la componente astronomica e quella meteorologica.

### 1.1.2 La componente astronomica della marea

La componente astronomica influenza esclusivamente l'ampiezza della marea, ed è a sua volta una combinazione di due forze che agiscono sulle masse d'acqua che ricoprono la Terra:

- la forza di attrazione gravitazionale del sistema Terra-Luna-Sole;
- la forza centrifuga dovuta alla rotazione del sistema Terra-Luna attorno al proprio baricentro.

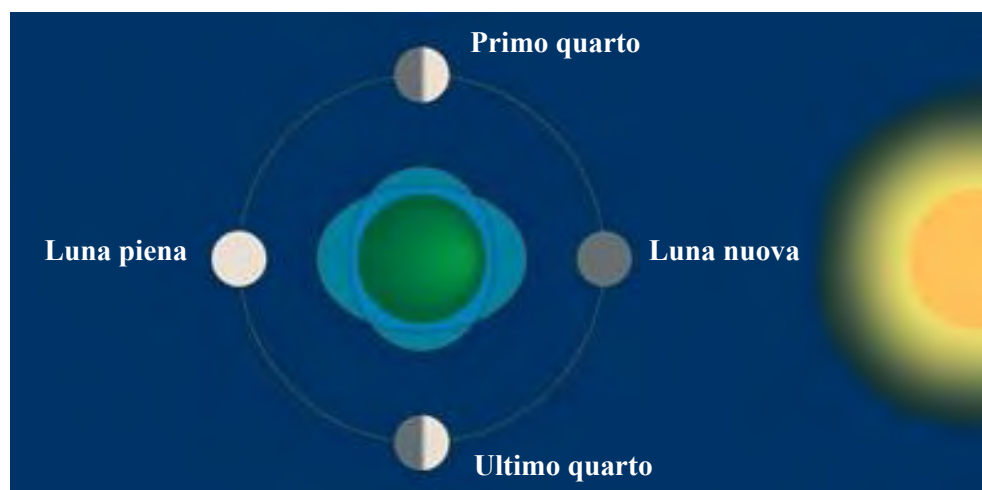
La forza di attrazione gravitazionale è data dalla legge di gravitazione universale di Newton, la quale afferma che due punti materiali si attraggono con una forza di intensità direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.



**Figura 1.1** - Combinazione delle forze che generano la componente astronomica della marea.

Esaminando il caso di un pianeta ricoperto in modo uniforme dall'acqua e soggetto all'azione di un solo satellite, tale forza fa in modo che la superficie del mare si disponga secondo un ellissoide, che ruota seguendo sempre il satellite che lo attrae. Per un osservatore fermo sul pianeta il fenomeno appare come una variazione ciclica del livello del mare, a cui viene dato il nome di marea.

La forza centrifuga è una forza apparente che agisce su un corpo in moto circolare e nel sistema Terra-Luna ha direzione opposta rispetto a quella di attrazione gravitazionale. La combinazione di queste due forze fa in modo che la superficie degli oceani si modelli in modo da essere sempre in equilibrio tra la forza centrifuga del moto della Terra e la forza di attrazione degli astri (figura 1.1).



**Figura 1.2** - Posizione relativa della Luna rispetto alla Terra ed al Sole durante il mese lunare.

---

La Terra è soggetta all'attrazione gravitazionale di tutti i corpi celesti del sistema solare, anche se gli effetti predominanti sono quelli della Luna e del Sole. La Luna infatti è il satellite più vicino alla Terra mentre il Sole ha una massa molto considerevole, pari a circa 330'000 volte quella della Terra.

A seconda della posizione relativa che questi astri assumono tra loro, la marea registrata sulla Terra presenta delle caratteristiche diverse: quando il Sole, la Luna e la Terra sono allineati (luna piena e luna nuova) i rigonfiamenti della massa d'acqua terrestre dovuti all'attrazione lunare si sommano a quelli solari, dando luogo alle maree sizigiali, caratterizzate dalle maggiori escursioni di marea.

Quando il Sole e la Luna sono in posizione di quadratura (primo e ultimo quarto) i rigonfiamenti della massa d'acqua terrestre dovuti all'attrazione lunare si sottraggono a quelli solari, dando luogo alle maree di quadratura, caratterizzate dalle minori ampiezze di marea (figura 1.2).

### 1.1.3 La componente meteorologica della marea

La componente meteorologica della marea agisce direttamente sul livello marino ed è originata dall'azione del vento e della pressione atmosferica sulla superficie del mare. Gli effetti di questi fenomeni fisici vengono generalmente indicati con il termine "sovrizzo" (*surge*) o "residuo" e possono generare incrementi positivi o negativi rispetto alle normali oscillazioni astronomiche. Il sovrizzo infatti è, per definizione, la differenza tra la marea reale misurata in una certa località e la componente astronomica della marea prevista nella medesima località. Infatti nella letteratura scientifica esso viene spesso indicato anche con il termine inglese *meteorological residual*.

Gli elementi che danno il maggior contributo alla formazione del sovrizzo sono quindi la pressione atmosferica ed il vento. La pressione atmosferica è data dalla forza che le masse d'aria esercitano sulla superficie terrestre. Tale forza agisce anche sui mari e sugli oceani e li comprime in relazione alla sua intensità: un nucleo di bassa pressione che insiste sopra un bacino esercita una forza ridotta sulla superficie sottostante, con un conseguente incremento del livello marino. Al contrario, un nucleo di alta pressione tende a schiacciare la superficie del mare e ad abbassare il suo livello. Tale meccanismo è noto come "effetto barometrico inverso". Per avere un'idea del contributo della pressione atmosferica sulla marea basti pensare che in mare aperto, secondo la teoria idrostatica, ad una diminuzione della pressione atmosferica di 1 hPa corrisponde un innalzamento di circa 1 cm del livello marino.

Il vento, invece, agisce sulla superficie del mare insaccando le acque nel suo verso di propagazione. Se esso soffia verso le coste tende a far aumentare temporaneamente il livello in prossimità dei litorali, fenomeno noto come *set-up*. Al contrario, se il vento soffia verso il mare tende a far defluire le acque verso il largo, con una diminuzione del livello in vicinanza della costa, ed una conseguente riduzione anche della marea registrata.

Qualora un bacino sia caratterizzato da particolari caratteristiche morfologiche, in seguito al passaggio di una perturbazione meteorologica, l'azione congiunta del vento e di una variazione locale di pressione atmosferica può produrre un temporaneo dislivello in una zona limitata del mare. Per ristabilire l'equilibrio nei livelli, sulla superficie del bacino si generano delle oscillazioni libere che si smorzano lentamente, dette *sesse* (*seiches*). Queste onde sono generalmente stazionarie e tipiche dei bacini chiusi o semichiusi, dei laghi e dei porti. Esse possono dare un contributo non trascurabile alla marea registrata in una certa località, specialmente se si trovano in fase con la marea astronomica. È questo il caso del mare Adriatico, dove le due sesse principali hanno periodi molto prossimi (circa 21.33 ore e 12.19 ore) a quelli delle maree (circa 12.42 ore), (Polli, 1962).

Il livello di marea misurato in una certa località è dato pertanto dalla somma del contributo astronomico e di quello meteorologico (sovrizzo e sesse). A seconda delle condizioni meteorologiche, il sovrizzo può risultare positivo o negativo, così da sommarsi o sottrarsi alla componente astronomica della marea. Un esempio significativo in tal senso è quello rappresentato dalla Laguna di Venezia, in cui i fenomeni di alta marea eccezionale si verificano per valori del sovrizzo molto elevati, con una marea misurata pari anche a più di due volte la marea astronomica.

---

## 1.2 Propagazione della marea

### 1.2.1 Aspetti generali e definizioni

In prossimità delle coste, al variare del livello marino si generano delle correnti che accompagnano la salita e la discesa della marea. Quando essa inizia a crescere si innesca una corrente verso terra che dà origine al flusso di marea, in grado di sommergere le zone costiere più basse. Quando la marea inizia a calare si ha uno scorrimento inverso diretto verso il mare, il riflusso di marea, che scopre nuovamente la porzione di costa prima sommersa. Le zone costiere soggette all'alternarsi della correnti di marea sono dette piane intertidali. La loro conformazione può variare da una stretta fascia nastriforme ad un'ampia estensione di territorio a seconda della natura della zona costiera e delle caratteristiche della marea. La massima velocità della corrente si raggiunge sempre all'incirca a metà delle fasi di flusso e riflusso, con verso opposto nei due casi, e tende ad annullarsi in corrispondenza dell'alta o della bassa marea, creando condizioni di acqua ferma o di stanca.

La propagazione della marea assume caratteri diversi in base alle caratteristiche morfologiche del bacino nel quale essa si sviluppa. A livello teorico, in una determinata zona costiera, l'alta marea dovrebbe presentarsi contemporaneamente al passaggio della Luna sul meridiano passante per quel punto. In realtà l'alta marea si verifica con un ritardo di alcune ore in relazione alla conformazione della costa e alla sua posizione. Infatti, la configurazione dei bacini oceanici influisce notevolmente sui movimenti del mare e, da luogo a luogo, le acque possono rispondere in maniera diversa alle forzanti che generano le maree. L'intervallo di tempo che intercorre tra il transito della Luna sul meridiano locale e l'istante dell'alta marea che segue è detto intervallo lunitidale o stabilimento di porto. Esso è variabile durante l'anno per una stessa località e può essere diverso anche in zone tra loro vicine.

### 1.2.2 Curve caratteristiche di propagazione della marea

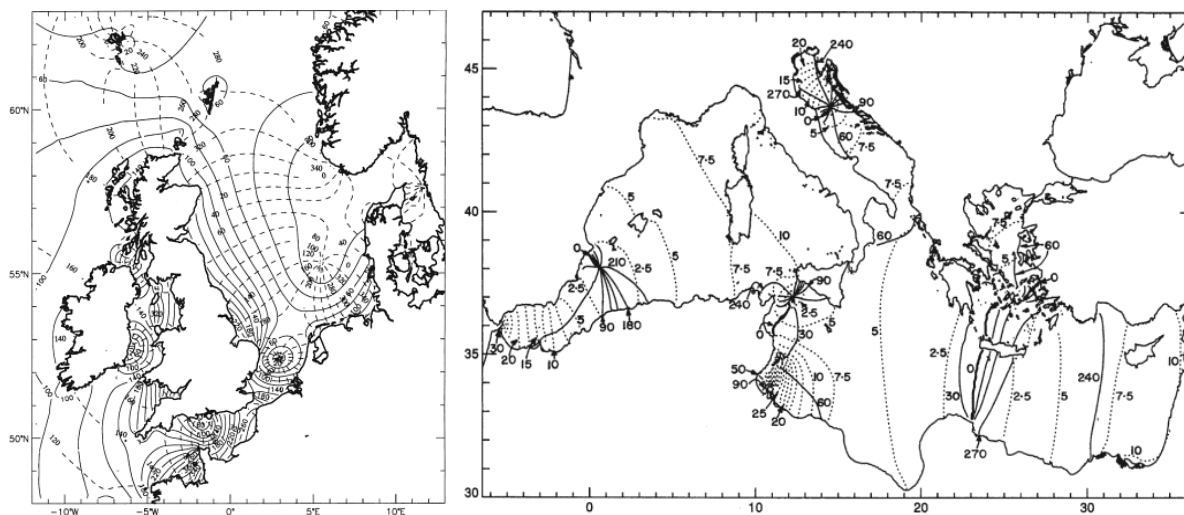
La propagazione dell'onda di marea, sia nei bacini oceanici che in quelli semichiusi, si può rappresentare mediante un duplice sistema di linee, dette curve caratteristiche di propagazione della marea (figura 1.3). Esse sono costituite da due famiglie di linee tra loro perpendicolari:

- le linee cotidali, che congiungono i punti che presentano lo stesso intervallo lunitidale, registrando quindi alta marea simultaneamente;
- le linee di uguale escursione della marea, rappresentata in molti casi dalla semi-ampiezza di marea.

Tali curve possono essere tracciate per ogni singola componente della marea astronomica, dopo che essa sia stata scomposta in oscillazioni elementari di tipo sinusoidale. Il procedimento si avvale delle tecniche di analisi armonica e prevede il calcolo delle costanti armoniche per ogni componente della marea astronomica (di questo aspetto si parlerà in modo più approfondito nel § 3.2.3.1)

In un bacino in cui si abbiano a disposizione le curve caratteristiche di propagazione si osserva che le diverse linee cotidali si dipartono da uno o più punti in cui la superficie del mare non risente dell'effetto della marea, detti punti anfidromici. Le linee cotidali si allontanano a raggiera da questi punti e l'ampiezza delle maree cresce lungo ogni linea a mano a mano che ci si allontana da essi. In questi punti, infatti, l'ampiezza della marea è nulla, in quanto vi interferiscono maree con fasi opposte.

La presenza dei punti anfidromici deriva dall'azione della forza di Coriolis, dovuta alla rotazione terrestre, sulle correnti di marea. Agendo sulle masse d'acqua, questa forza è in grado di generare movimenti rotatori negli oceani e nei mari rispettivamente in senso antiorario nell'emisfero boreale e orario in quello australe. Queste rotazioni, dette "anfidromie", derivano infatti dalla composizione degli effetti di una oscillazione longitudinale, dovuta alla marea stessa, con una oscillazione trasversale che si sviluppa nel mare a causa della rotazione terrestre e della forza di Coriolis.



**Figura 1.3** – A sinistra: curve caratteristiche di propagazione della marea nel Mare del Nord. A destra: curve caratteristiche di propagazione della marea nel mare Mediterraneo. Le linee cotidali sono tracciate con segno continuo mentre le linee di ugual escursione di marea sono rappresentate con segno tratteggiato. Fonte: Raúl Periáñez (2005), “Modelling the Dispersion of Radionuclides in the Marine Environment: An Introduction”, Springer.

### 1.2.3 Propagazione della marea in ambienti di transizione

La marea assume singolari caratteristiche quando si propaga all'interno di particolari ambienti di transizione come le lagune o gli estuari fluviali. In mare aperto o sulle coste il segno più vistoso della sua propagazione è rappresentato dalla ciclica variazione del livello del mare, causata dal continuo susseguirsi di alte e basse maree. All'interno di una laguna il fenomeno propagatorio risulta più complesso per la presenza delle bocche lagunari, che mettono in comunicazione la laguna con il mare aperto. Infatti durante la fase di flusso il livello idrico della laguna non è in grado di alzarsi con la stessa velocità del livello del mare aperto, che risulta quindi più alto, e genera una forte corrente di marea entrante in laguna. Durante la fase di riflusso invece avviene il fenomeno opposto, con un livello in laguna più alto di quello del mare aperto, tale da produrre una forte corrente di marea uscente dalla laguna. Nella fase di flusso, inoltre, la marea si propaga lungo i canali che innervano la laguna e ne invade le zone più interne. Nella propagazione l'onda di marea subisce generalmente un ritardo, un'attenuazione e una deformazione progressivi nell'avanzare dalle bocche lagunari alle località più interne, a causa delle resistenze al moto che incontra in ambienti tanto dissipativi (Gottardo, 1975).

Negli estuari fluviali la variazione del livello alla foce può indurre la marea a risalire controcorrente l'asta del fiume anche per centinaia di chilometri nell'entroterra. Talvolta, se la corrente fluviale è forte e l'estuario è poco profondo, le maggiori alte maree determinano un'onda solitaria vera e propria che risale il fiume, fenomeno noto come mascheretto (*mascaret*). In un estuario inoltre, per ragioni idrodinamiche, l'intervallo di tempo che intercorre tra una bassa marea e la successiva alta marea è molto più corto dell'intervallo tra un colmo ed il successivo cavo, poiché l'onda di marea viaggia più velocemente della depressione indotta dalla bassa marea che la precede e di quella che la segue.

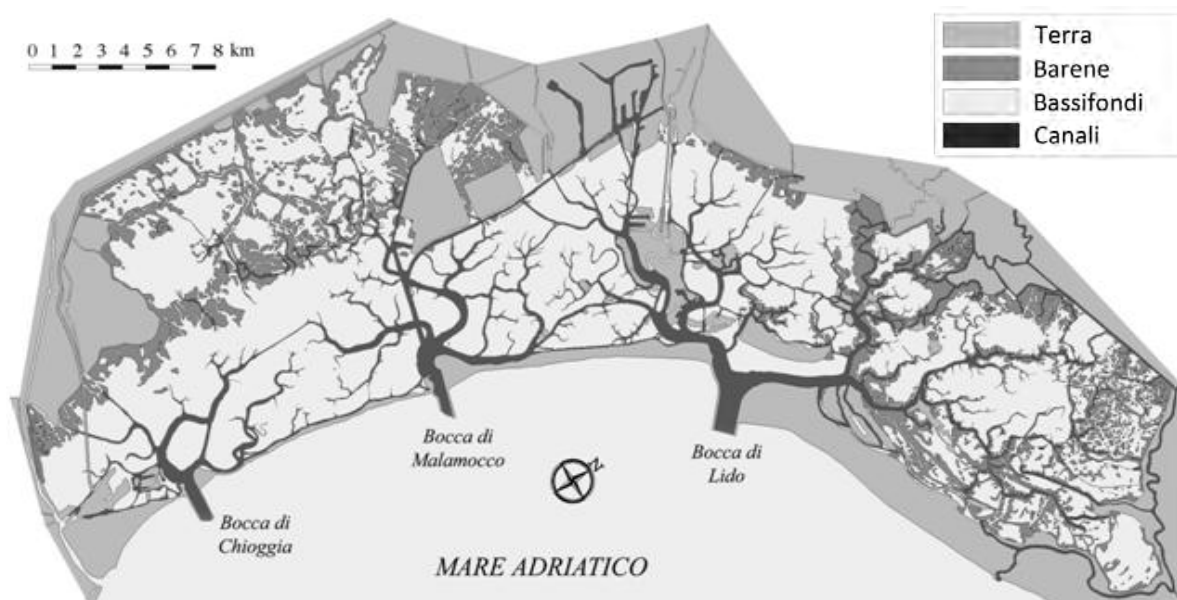
#### 1.2.3.1 Un caso particolare: la propagazione della marea nella Laguna di Venezia

La Laguna di Venezia si estende su una superficie di circa 549 km<sup>2</sup> tra il corso terminale del Brenta a sud (foce di Brondolo) ed il tratto finale del Sile a nord (foce di Piave Vecchia), con una lunghezza di circa 50 km ed una larghezza compresa tra 11 e 12 km.

Essa è messa in comunicazione con il mare Adriatico attraverso le tre bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia mentre verso la terraferma il suo perimetro è delimitato dalla linea di

conterminazione lagunare. La profondità media è di circa 1.5 m e varia da poche decine di centimetri nelle zone più interne, a qualche decina di metri nei canali artificiali e nelle bocche di porto.

La Laguna Veneta ha subito modificazioni morfologiche considerevoli nel corso dei secoli, a causa degli interventi antropici volti a salvaguardare gli interessi commerciali e militari della Serenissima Repubblica di Venezia e, successivamente, dello Stato Italiano. Basti pensare che all'inizio del Trecento le bocche di porto erano otto (Jesolo, Lido Maggiore, Lido-Tre Porti, Lido-Sant'Erasmus, Lido-San Niccolò, Malamocco, Chioggia e Brondolo) e all'interno del bacino lagunare si riversavano vari fiumi, tra i quali il Brenta, il Sile, il Bacchiglione ed il Piave. Al giorno d'oggi, invece, tutti i maggiori corsi d'acqua sfociano all'esterno della laguna, i litorali sono stati oggetto di interventi di difesa con la costruzione dei murazzi, all'interno della laguna sono stati scavati numerosi canali artificiali, tra cui il Canale Malamocco-Marghera (Canale dei Petroli) ed il Canale Vittorio Emanuele III, mentre alle tre bocche di porto, protette e armate tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento, sono in fase di ultimazione le opere per difendere la città di Venezia dalle sempre più frequenti acque alte. La laguna attuale, pertanto, è molto diversa da come si presentava alcuni secoli fa e oggi sarebbe quasi del tutto interrita se l'intervento dell'uomo non avesse cercato di conservarla artificialmente.



**Figura 1.4** – *Composizione morfologica della Laguna di Venezia.*

La Laguna di Venezia è situata nella parte settentrionale del mare Adriatico e, come detto sopra, è messa in comunicazione con esso attraverso le tre bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia (figura 1.4). La propagazione della marea al suo interno presenta dei caratteri peculiari e tipici delle lagune, che sono tuttavia influenzati anche dal comportamento della marea nel bacino su cui la laguna si affaccia. Il mare Adriatico, infatti, per la sua conformazione stretta e poco profonda, tende ad ampliare la componente astronomica della marea che si sviluppa nel Mediterraneo: se nel Canale d'Otranto l'escursione media è pari a  $\pm 10$  cm, in Laguna di Venezia l'escursione media è dell'ordine di  $\pm 60$  cm, con valori massimi di  $\pm 75-80$  cm (Berrelli, 2004).

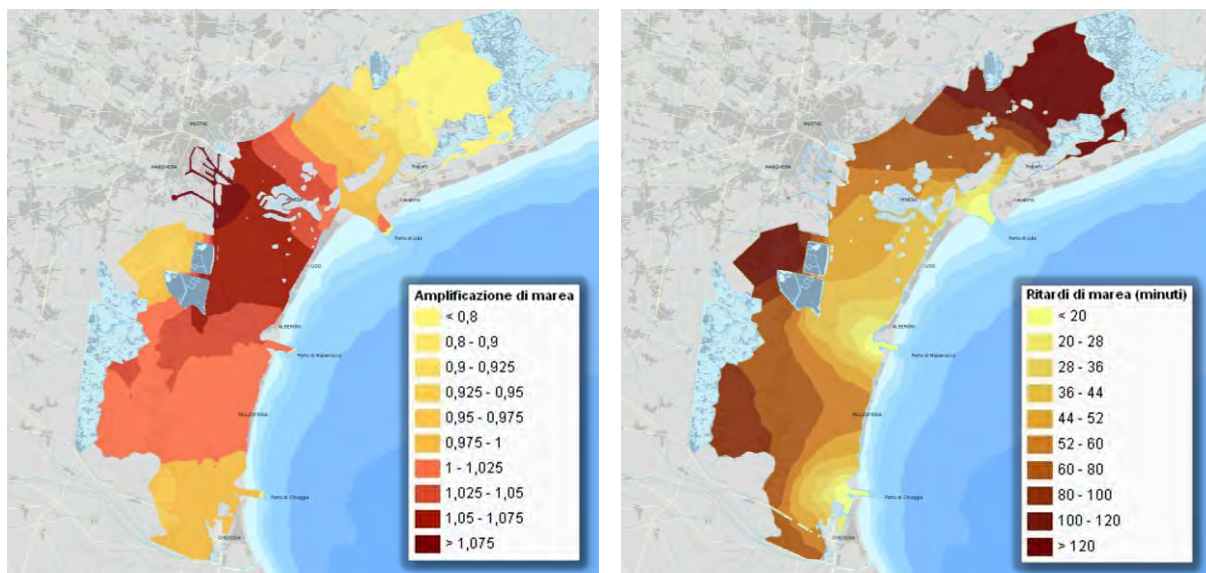
Nell'Adriatico l'onda di marea si propaga come un raggio rotante in senso antiorario attorno ad un punto anfidromico, situato circa a metà della distanza Ancona-Zara (figura 1.3). Nel momento in cui la marea entra nel canale d'Otranto essa percorre il mare Adriatico in senso antiorario con una celerità di propagazione di circa 130 km/h. Essa risale dapprima la costa balcanica della Dalmazia in direzione sud-nord, lambisce l'Istria e prosegue verso Trieste e Grado. Successivamente ruota in senso est-ovest verso Lignano, Venezia e Chioggia, per percorrere infine la costa italiana verso Ancora, Vieste e Brindisi e riunirsi ad Otranto, dopo 12 ore e 24 minuti, con la successiva onda di marea proveniente dallo Ionio per ricominciare il ciclo (Polli, 1961a).



In condizioni normali la laguna è sottoposta ad un regime di marea astronomica con periodo di 12 ore ed escursione media di  $\pm 30-35$  cm rispetto al livello del medio mare. Tuttavia, essendo situata all'estremità di un mare semi-chiuso come l'Adriatico, essa è soggetta a grandi escursioni del livello delle acque, le più vistose delle quali provocano fenomeni come l'acqua alta, che allaga periodicamente le isole più basse, o l'acqua bassa, che rende impraticabili i canali meno profondi. I primi si verificano soprattutto nei periodi autunnali e primaverili, in concomitanza con particolari condizioni meteorologiche, mentre i secondi si presentano tipicamente nei mesi di gennaio e febbraio (Polli, 1952).

Nel golfo di Venezia l'onda di marea si propaga da nord-est a sud-ovest con un ritardo molto contenuto: essa si presenta alle tre bocche di porto quasi contemporaneamente, sfasata solo di pochi minuti. Attraverso le bocche di Lido, Malamocco e Chioggia, la marea si espande nella laguna diramandosi attraverso i suoi canali (Polli, 1961b). Essi permettono il flusso e riflusso dell'acqua, consentendo il ricambio idrico necessario alla sopravvivenza dell'ecosistema lagunare stesso. La loro profondità, che diminuisce progressivamente dalle bocche verso la gronda lagunare, varia tra i 15 m del canale artificiale Malamocco-Marghera nel suo tratto più prossimo alla bocca di Malamocco e gli 1-2 m circa degli altri canali, mentre la loro lunghezza supera talvolta anche i 20 km.

Durante la fase di flusso, la marea si propaga lungo i canali ed invade i vasti e bassi fondali della laguna. L'onda di marea nel propagarsi subisce importanti modificazioni, in particolare: un ritardo, un'attenuazione e una deformazione che si accrescono progressivamente con l'avanzamento dalle bocche di porto alle località più interne. L'attenuazione, in particolare, risulta essere maggiore nelle zone più remote della laguna settentrionale, dove l'ampiezza di marea astronomica può essere inferiore del 20-30% rispetto a quella registrata a Venezia. In questi luoghi (Grassabò, Cavallino) il ritardo con cui un'alta marea si presenta rispetto al mare aperto può raggiungere anche le 3 ore (figura 1.5). Durante la fase di riflusso, infine, l'acqua affluita nella laguna si ritira nei canali e, lungo questi, torna al mare. (Gottardo, 1975).



**Figura 1.5** – A sinistra: attenuazione o amplificazione del colmo di marea rispetto a quello misurato alla bocca di porto di Lido. Valori superiori ad 1 del fattore di amplificazione indicano un aumento dell'altezza dell'onda di marea, quindi una sua esaltazione. Valori inferiori ad 1 implicano una riduzione dell'altezza dell'onda, quindi un suo smorzamento. A destra: tempo di propagazione dell'onda di marea all'interno del bacino lagunare. Il tempo è riferito al momento in cui l'onda di marea entra in laguna attraverso la bocca di Lido. Fonte: "Atlante della Laguna: Venezia tra terra e mare" (2006), a cura di S. Guerzoni e D. Tagliapietra, Marsilio, Venezia.

---

## 2. MISURAZIONE DEL LIVELLO DI MAREA

### 2.1 Strumenti per la misura del livello del mare

#### 2.1.1 Generalità sulle misure mareografiche

Le misurazioni mareografiche, da un punto di vista tecnico, presentano molte difficoltà legate sia ai problemi logistici che si incontrano per raggiungere il sito scelto, sia al posizionamento e all'utilizzo della strumentazione, che deve operare in modo sicuro ed affidabile in un ambiente spesso ostile.

Uno dei problemi più significativi delle misure strumentali di marea riguarda la necessità di filtrare il livello da misurare, poiché la superficie del mare è sempre agitata e mossa da onde aventi ampiezza e periodo eterogenei. Le misure di marea, infatti, presuppongono la capacità di isolare le onde a periodo lungo (le maree) da quelle a periodo corto, come le onde generate dal vento. Inoltre anche la temperatura e le proprietà fisiche dell'acqua, come la salinità o la densità, possono influire sulle misurazioni in modo più o meno evidente a seconda del tipo di strumento utilizzato.

I metodi per la misurazione del livello del mare possono essere divisi in due categorie: quelli appropriati per le misure in prossimità della costa, e quelli adatti ad essere impiegati al largo e off-shore (Pugh, 1987; IOC, 1985). Le tecnologie attualmente disponibili per la misurazione del livello del mare in vicinanza della costa possono essere ricondotte a quattro tipologie:

- galleggiante alloggiato all'interno di un pozzetto di calma;
- strumenti a pressione;
- sistemi acustici;
- sistemi radar (ondametri).

La precisione con cui effettuare le misure deve essere almeno di 1 cm, valore adeguato per rappresentare i processi idrodinamici legati alla propagazione delle maree ed il livello medio del mare, qualora il sistema di misura sia costantemente monitorato, controllato e caratterizzato da una stabilità a lungo termine (IOC, 2006).

Le misure effettuate al largo si avvalgono generalmente di boe accelerometriche. Le procedure da adottare per l'analisi e la validazione dei dati derivanti dall'utilizzo delle boe non fanno tuttavia parte del presente documento, in cui vengono illustrati i metodi da utilizzare per il trattamento e la validazione dei dati registrati dalle stazioni situate in prossimità della costa (cfr. capitolo 3).

#### 2.1.2 Ubicazione delle stazioni di misura

Esistono numerose raccomandazioni da parte delle istituzioni internazionali che si occupano della raccolta ed analisi dei dati mareografici sulle caratteristiche che un sito deve avere per poter ospitare una stazione mareografica, in relazione allo scopo per cui le misurazioni vengono effettuate (IOC, 1985; 1994; 2006).

Innanzitutto è fondamentale che la stazione di misura sia in grado di resistere alle peggiori condizioni atmosferiche che si possano prevedere nel luogo prescelto per l'installazione. Sono da evitare, se possibile, terreni soggetti a subsidenza naturale o antropica, perché poco stabili, o estuari fluviali, in quanto i fenomeni legati alle correnti di densità e alla stratificazione possono danneggiare la stazione e falsare le misure. Sono da escludere inoltre, per la corretta registrazione del fenomeno della marea, bacini semichiusi in cui si verifichino sconnessioni con il mare aperto in occasione di forti basse maree, aree in prossimità di promontori o stretti per le forti correnti di marea che vi si generano (Pugh, 1987), zone soggette a traffico di natanti (per evitare il rischio di collisioni accidentali) o aree in cui si possano prevedere vicine espansioni portuali o marittime in grado di alterare il regime delle maree. In località ove l'ampiezza dell'onda di marea sia di dimensione paragonabile alla profondità del bacino di



---

misura, gli inevitabili effetti non lineari causati dall'interazione della marea col fondale possono produrre risultati non soddisfacenti, per cui è preferibile scegliere postazioni di misura situate in aree a profondità non troppo bassa. Problematiche simili possono sorgere inoltre in prossimità a foci fluviali o in bacini di configurazione molto complessa.

Se vengono utilizzati galleggianti alloggiati in pozzetti di calma o sonde acustiche, l'altezza del pozzetto deve essere tale da poter consentire la registrazione dei livelli di marea più alti. I fori del pozzetto devono inoltre essere posizionati almeno due metri al di sotto della marea astronomica più bassa e consentire al galleggiante di operare fino ad un metro al di sotto di tale limite. Essi devono inoltre essere tenuti liberi da eventuali incrostazioni o occlusioni.

Per favorire l'installazione e la manutenzione periodica sono da preferire luoghi di facile accessibilità ma, al tempo stesso, devono essere presi tutti gli accorgimenti necessari per evitare atti di vandalismo, furti o manomissioni.

È fondamentale, infine, che la stazione possa essere collegata ad un piano di riferimento geodetico (*datum*) e che la sua posizione permetta il controllo periodico del caposaldo (*tide gauge bench mark*), (cfr. § 2.2.1).

### 2.1.3 Stazioni con galleggiante e pozzetto di calma

Una stazione mareografica equipaggiata con un galleggiante alloggiato in un pozzetto di calma è in genere costituita da una cabina sorretta da pali di fondazione e circondata da *dolphins*, per permettere l'accosto delle imbarcazioni durante i periodici sopralluoghi per la manutenzione (figura 2.1). All'interno della cabina sono posizionati gli strumenti di misura e le apparecchiature per l'acquisizione e la trasmissione dei dati rilevati (figura 2.2).

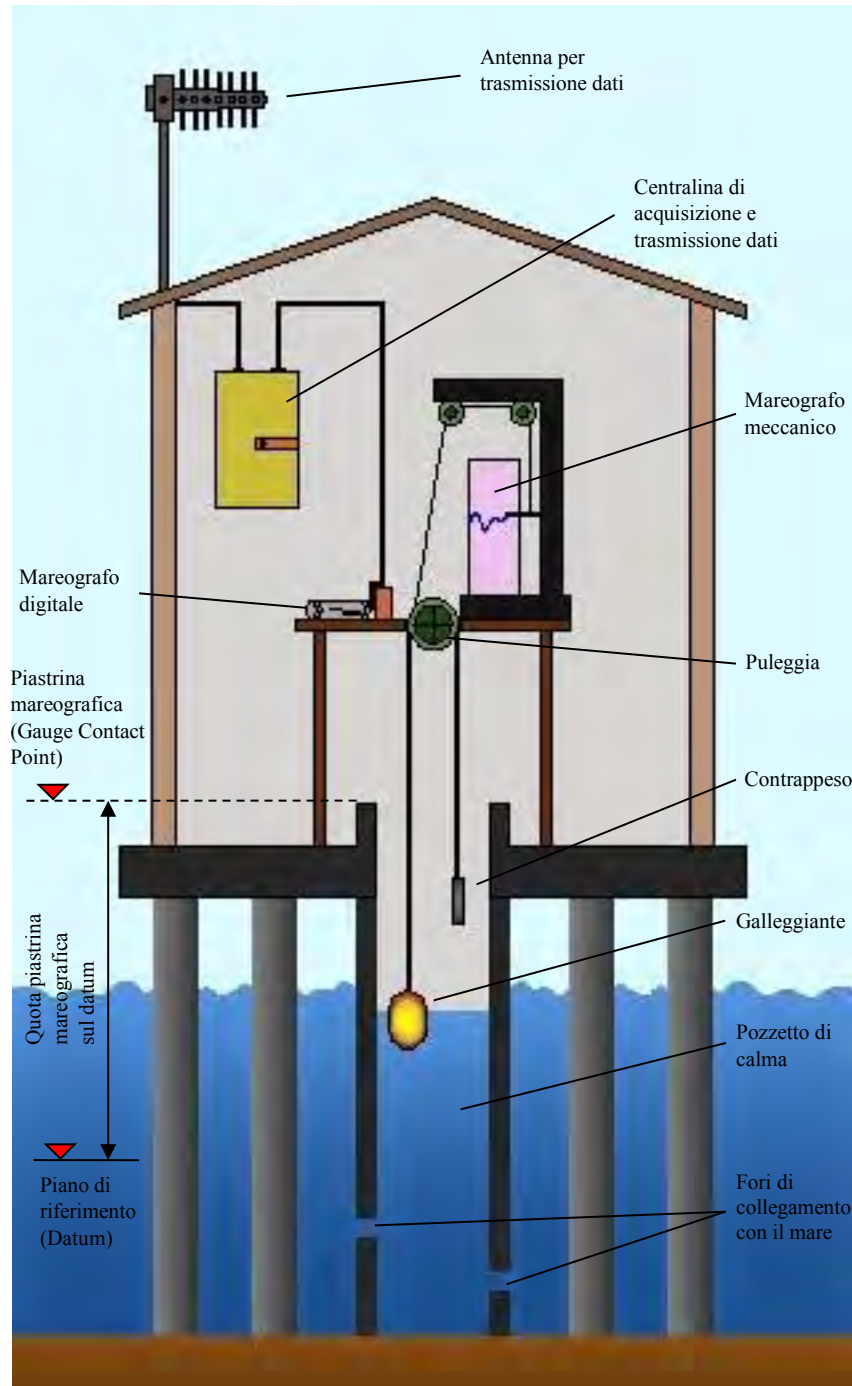
La principale funzione della cabina mareografica, oltre ad alloggiare la strumentazione, è quella di ospitare il pozzetto di calma che si apre sul pavimento, collegato al mare aperto tramite fori opposti e sfalsati. Nelle stazioni mareografiche dell'arco costiero nord adriatico, ad esempio, si hanno due fori situati rispettivamente a circa 30 cm e 60 cm dal fondo, con sezioni pari a 1/400 della sezione orizzontale del pozzetto e un diametro variabile di 2-5 cm (Caterini et al., 2011). Questo accorgimento permette di ottenere un filtro del segnale da registrare attraverso un'attenuazione delle oscillazioni ad alta frequenza causate dal moto ondoso. In questo modo si possono osservare solamente le oscillazioni più rilevanti dal punto di vista mareografico, ossia quelle aventi il periodo più lungo: le maree.



**Figura 2.1** – Stazione mareografica situata in prossimità dell'isola di Murano.

Esistono stazioni anche prive di cabina mareografica, ad esempio quelle dello United States National Ocean Service, in cui il pozzetto di calma è costituito da un cilindro verticale sormontato da un piccolo

vano in cui viene alloggiata la strumentazione. Il pozzetto in questo caso viene inserito all'interno di un tubo di supporto infisso sul fondale, mentre il raccordo tra il pozzetto e il tubo viene creato attraverso una imboccatura conica, con lo scopo di ridurre le possibili fluttuazioni di livello all'interno del pozzetto dovute all'azione del moto ondoso. I fori di collegamento con il mare, in questo caso, sono sei paia e vengono praticati sul tubo di supporto inferiore.



**Figura 2.2** – Sezione schematica di una stazione mareografica con galleggiante e pozzetto di calma.

Indipendentemente dalle particolari tipologie e varianti costruttive di una stazione mareografica, dal punto di vista operativo la marea viene misurata attraverso uno strumento detto mareografo, in grado di registrare le quote di marea con il relativo orario di rilevazione. Il mareografo è collegato ad una puleggia sulla quale è allacciato il galleggiante inserito all'interno del pozzetto di calma tramite un cavo teso da un contrappeso.

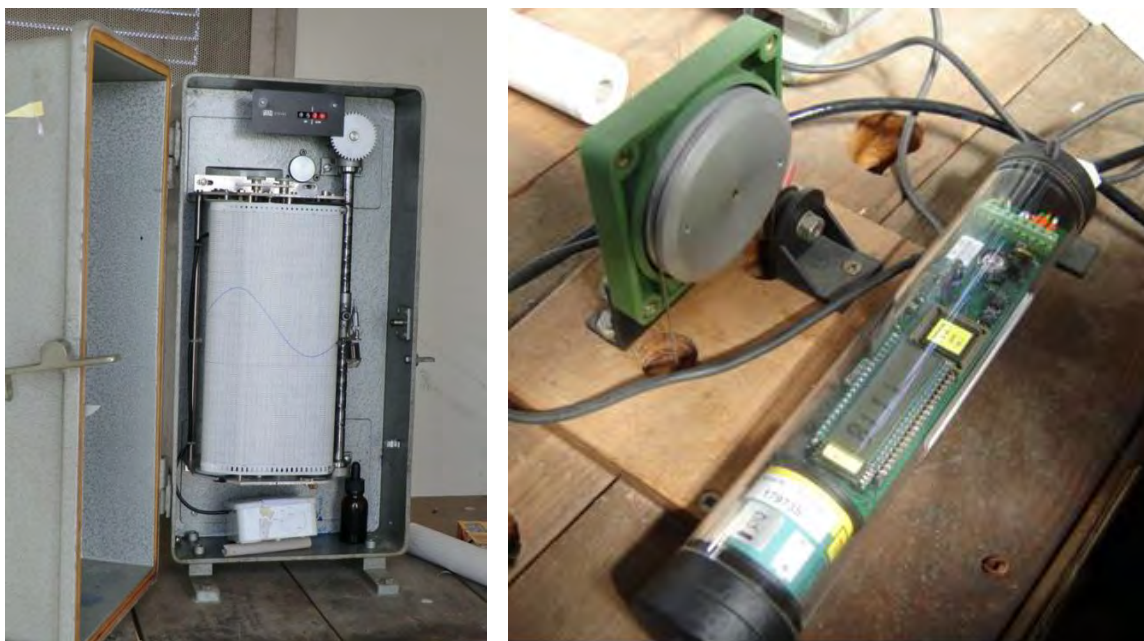
Per fornire un livello di marea rispetto al piano di riferimento prescelto (*datum*), la quota rilevata dal galleggiante viene messa in relazione con la quota della piastrina mareografica della stazione (*gauge contact point*), riferita anch'essa allo stesso piano di riferimento attraverso la definizione del caposaldo della stazione (*tide gauge bench mark*). La differenza tra la quota del caposaldo della stazione e la quota fornita dal galleggiante determina l'altezza di marea registrata dal mareografo rispetto al piano di riferimento prescelto.

I mareografi vengono settati per fornire direttamente la misura della marea rispetto al *datum* e la registrazione del livello idrometrico avviene in modo diverso a seconda del tipo di mareografo installato nella stazione. Esistono infatti mareografi di tipo meccanico e, più recentemente, mareografi di tipo elettronico (figura 2.3).

I mareografi meccanici sono dotati di diagrammi cartacei (mareogrammi) sui quali un pennino ad inchiostro segna in continuo la curva di marea. La durata di ciascun diagramma è variabile e può essere regolata, ad esempio, su periodi di 2 o 4 mesi, trascorsi i quali il mareogramma deve essere fisicamente sostituito da un operatore. Il rapporto di riduzione della altezze di marea registrate nel mareogramma può cambiare a seconda delle specifiche tecniche dello strumento e può essere pari, ad esempio, a 1/10.

I mareografi digitali raccolgono il dato in modo informatizzato nella loro memoria interna (*data logger*), con la possibilità di trasmetterlo in tempo reale o differito, qualora la stazione mareografica sia equipaggiata con le necessarie apparecchiature. La frequenza di campionamento dei dati è variabile in base allo strumento utilizzato e può essere impostata in relazione alle proprie esigenze (si può registrare, ad esempio, un dato ogni 5-10 minuti o meno).

Questa tipologia di stazione, ancora oggi tra le più utilizzate dai servizi mareografici nazionali per la sua robustezza e semplicità, presenta tuttavia alcuni svantaggi, in particolare: il costo elevato delle opere civili, la difficoltà di installazione su fondali profondi, gli errori causati dalla differente densità e salinità dell'acqua all'interno e all'esterno del pozzetto di calma in zone soggette a stratificazione, l'interrimento del pozzetto in aree caratterizzate da rilevante trasporto solido o l'ostruzione dei fori causata da molluschi, mitili e altri organismi marini. Inoltre la condizione fondamentale per l'utilizzo del pozzetto di calma, nel quale si sposta il galleggiante, è che il fondo del pozzo si trovi ad un livello inferiore rispetto alle basse maree, condizione non sempre soddisfatta, specialmente in quelle zone dove l'escursione di marea è particolarmente elevata.

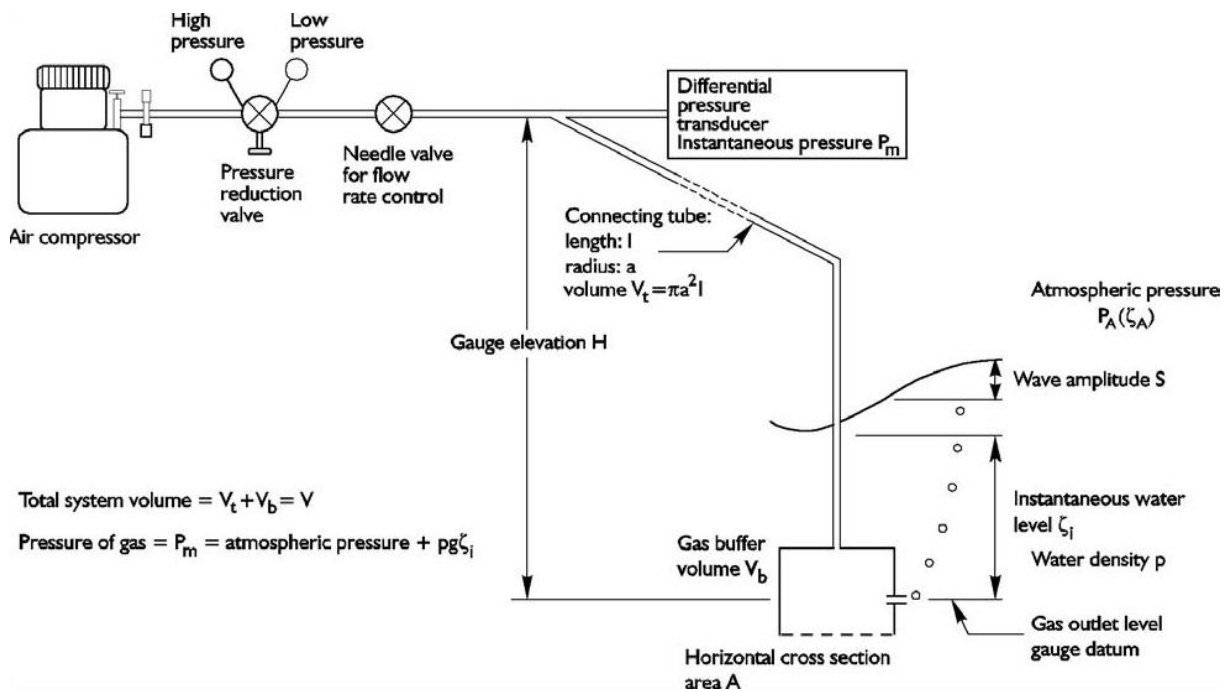


**Figura 2.3** – Mareografi in uso presso ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico. A sinistra: mareografo meccanico posto nella stazione mareografica di Val Grande. A destra: mareografo elettronico all'interno della stazione mareografica di Punta della Salute.

### 2.1.4 Stazioni con strumenti a pressione

A differenza dei mareografi a galleggiante, che misurano direttamente il livello del mare, l'utilizzo di strumenti a pressione consente di ricavare in modo indiretto la quota di marea attraverso la misura della pressione generata dalla colonna d'acqua che insiste sullo strumento. Nonostante l'impiego di questi dispositivi presupponga la conoscenza di parametri locali come densità, accelerazione gravitazionale e pressione atmosferica, essi presentano alcuni vantaggi pratici rispetto ai comuni strumenti a galleggiante: sono più economici in quanto non necessitano di opere civili, possono essere installati potenzialmente in qualsiasi tipo di ambiente marino (come ad esempio litorali sabbiosi o atolli corallini), presentano una maggior stabilità rispetto al *datum* prescelto, permettono di posizionare il dispositivo misuratore della pressione anche a centinaia di metri dallo strumento che ne acquisisce i dati (*data logger*). Tra i principali svantaggi si possono evidenziare la complessità della valutazione iniziale del caposaldo della stazione (*tide gauge bench mark*), la difficoltà nel riconoscere eventuali guasti o malfunzionamenti da parte di operatori poco esperti, gli errori che possono essere introdotti nelle misure nel caso di forti burrasche.

Gli strumenti a pressione più comuni possono essere raggruppati in due tipologie: i *bubblers* pneumatici e i trasduttori di pressione in mare. Nei *bubblers* pneumatici, l'aria compressa fornita da un compressore viene pompata verso una camera gorgogliatrice posizionata sul fondale marino attraverso un tubo di connessione. Lungo di esso, una serie di valvole permette di ridurre la pressione dell'aria inizialmente pompata e di instaurare un flusso costante, mentre un trasduttore differenziale misura la pressione presente al suo interno (figura 2.4). La pressione necessaria per liberare l'aria sotto forma di bolle dallo scarico situato sul fondale permette di ricostruire la quota del livello marino soprastante attraverso l'applicazione della legge di Stevino (teoria idrostatica). Se il trasduttore differenziale di pressione è collegato con l'atmosfera non è necessario misurare la pressione atmosferica locale, in quanto l'altezza di marea risulta direttamente proporzionale alla pressione misurata. È tuttavia indispensabile conoscere la densità dell'acqua: essa può essere ottenuta attraverso dei campionamenti periodici, con la semplificazione di considerarla costante nel caso in cui l'acqua risulti ben miscelata.

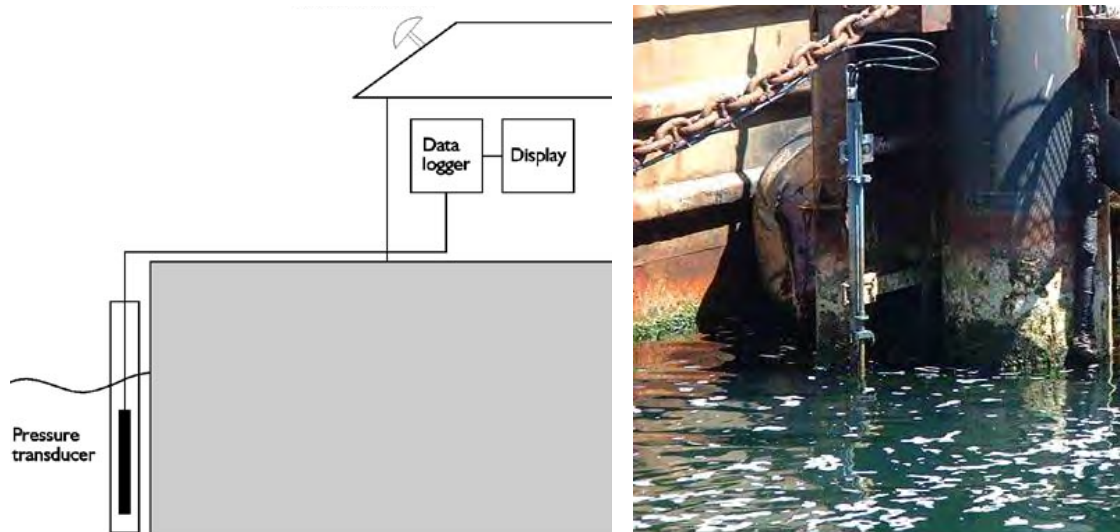


**Figura 2.4** – Funzionamento schematico di un bubbler pneumatico. Fonte: IOC (2006), “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation, Volume IV, Manuals and Guides 14”.

L'altra tipologia di strumento a pressione è rappresentata dai trasduttori montati direttamente in mare (figura 2.5). Essi possono essere usati negli ambienti più ostili (come le regioni polari) e sono



generalmente alloggiati in un tubo protettivo fissato su banchine o moli. In alternativa possono essere ancorati anche sul fondo del mare e collegati alla terraferma attraverso cavi armati, o inseriti all'interno del pozzetto di calma di una stazione a galleggiante. Il principio di funzionamento, come per i *bubblers* pneumatici, si basa sul calcolo del livello idrometrico attraverso la legge di Stevino. A seconda del tipo di sensore utilizzato, si possono avere misure della sola pressione idrostatica, utilizzando un dispositivo differenziale direttamente collegato all'atmosfera, o misure di pressione totale (atmosfera e idrostatica), che richiedono l'utilizzo di un barometro per scindere le due componenti. Anche in questo caso la stima della densità dell'acqua è indispensabile per il corretto funzionamento di questi dispositivi, così come il monitoraggio della temperatura, che influenza fortemente la precisione delle misure.



**Figura 2.5** – A sinistra: funzionamento di un trasduttore di pressione montato in mare. A destra: trasduttore di pressione nel molo di Port Stanley (Isole Falkland). Fonte: IOC (2006), “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation, Volume IV, Manuals and Guides 14”.

Uno dei maggiori problemi legati all'impiego dei trasduttori di pressione è rappresentato dalla definizione del loro caposaldo rispetto al piano di riferimento. Uno dei metodi più usati è quello di confrontare le misure del trasduttore con un idrometro già presente nello stesso luogo e collegato al *datum* prescelto. Questo procedimento deve essere ripetuto ad intervalli regolari e consente di avere una precisione dell'ordine del centimetro sul posizionamento dello strumento rispetto al riferimento. Un altro metodo consiste nell'utilizzare un sistema di trasduttori di pressione multipli (detti anche “*B gauges*”), utilizzabili però solamente in ambienti macrotidali soggetti a moderato moto ondoso (IOC, 1994).

### 2.1.5 Stazioni con strumenti acustici

Questa tipologia di stazioni prevede l'utilizzo di una sonda in grado di registrare e calcolare il tempo che un impulso acustico impiega per riflettersi verticalmente sulla superficie del mare. La misura del livello idrometrico viene quindi ricavata indirettamente in base al tempo di riflessione e alla velocità del suono nell'aria.

A livello teorico, le sonde acustiche potrebbero essere impiegate all'aperto, montandole su un supporto posto al di sopra dello specchio liquido di cui si desidera registrare il livello (figura 2.6). Questo tipo di installazione è tipico degli ondometri, strumenti che registrano in continuo il moto ondoso. Da essi è possibile ricavare il livello di marea attraverso l'applicazione di una media mobile su un'opportuna finestra temporale al fine di filtrare il segnale dalle oscillazioni ad alta frequenza indotte dal moto ondoso. Ad esempio, in Piattaforma Acqua Alta (CNR-ISMAR) nell'alto Adriatico

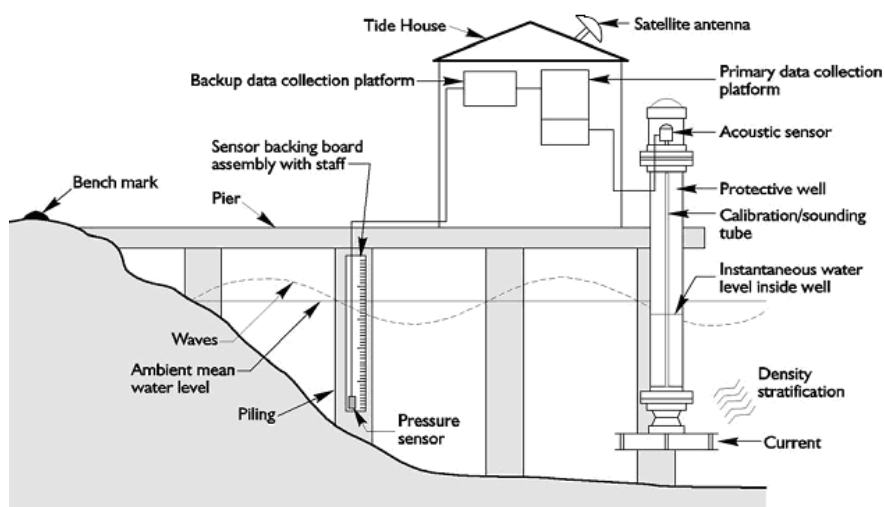
l'ampiezza della finestra temporale applicata alla media mobile è pari a 30 minuti su dati campionati ogni 5 minuti.

L'utilizzo delle sonde montate all'aperto viene in genere sconsigliato poiché nelle condizioni in cui la superficie del mare è poco regolare (ad esempio in presenza di forte moto ondoso) l'impulso sonoro tende a dispersi, non venendo riflesso in direzione verticale. Per ovviare a questo problema esistono varie soluzioni: lo strumento può essere inserito all'interno di un tubo di risonanza, che rende la superficie liquida più omogenea e protegge la sonda dall'ambiente esterno, oppure alloggiato nel pozzetto di calma di una stazione a galleggiante. Altrettanto frequente è l'installazione in un tubo protettivo, avente diametro di circa 25 cm, che può contenere solo la sonda acustica oppure il tubo di risonanza e la sonda stessa (figura 2.7).



**Figura 2.6** – Ondametro ad ultrasuoni montato all'esterno della stazione di Murano (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico).

L'inconveniente principale di questo tipo di strumenti è legato al fatto che la velocità del suono dipende fortemente dalla temperatura e, in minor parte, dall'umidità dell'aria. Per ottenere l'accuratezza desiderata nella misura dei livelli è quindi necessario installare uno o più sensori per registrare la temperatura. Inoltre, se si può prevedere un gradiente di temperatura, dovrebbero essere impiegati più termometri, posti a livelli diversi lungo la traiettoria che le onde acustiche percorrono tra la sonda e la superficie del mare. Un metodo più accurato per compensare l'effetto della temperatura consiste nell'impiego di un riflettore acustico associato alla sonda che emette l'impulso sonoro.



**Figura 2.7** – Schema di una stazione del tipo “Next-Generation Water Level Measurement System” appartenente allo United States National Ocean Service. Fonte: IOC (2006), “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation, Volume IV, Manuals and Guides 14”.

Questo tipo di problematica viene enfatizzata quando si utilizzano sonde inserite all'interno dei tubi di risonanza o dei tubi protettivi, in quanto il gradiente di temperatura, se non vengono prese particolari precauzioni, è particolarmente accentuato in questi casi. L'impiego dei tubi, tuttavia, è spesso indispensabile per evitare la dispersione del fascio acustico in presenza di moto ondoso. La conciliazione di questi aspetti tra loro opposti rende talvolta difficoltoso l'utilizzo delle sonde acustiche nelle misurazioni mareografiche, nonostante l'economicità che contraddistingue questa soluzione rispetto alle altre precedentemente descritte.

### 2.1.6 Stazioni con strumenti radar

Questo tipo di strumentazione è di concezione relativamente recente e si basa sullo stesso principio di funzionamento delle sonde acustiche. A differenza di quest'ultime, tuttavia, i dispositivi radar non soffrono del loro inconveniente principale, ossia dell'influenza della temperatura sulla velocità del suono nell'aria. Per questo motivo essi vengono spesso impiegati per sostituire le sonde acustiche da dismettere o per creare delle nuove reti di misura, grazie anche alla loro economicità.

Gli strumenti radar emettono degli impulsi elettromagnetici che vengono riflessi sulla superficie del mare. La misura del livello idrico viene ricavata in modo indiretto sulla base del tempo di riflessione. Un metodo di misura più raffinato si fonda, invece, sull'invio di una frequenza continua da parte del dispositivo radar e sul calcolo della quota di marea attraverso lo sfasamento dell'onda riflessa.

Un'altra tecnologia recentemente introdotta nella Rete Mareografica Nazionale (cfr. § 2.3.1) è quella che si avvale dei sensori radar a microonde. Essi sono equipaggiati con un cavo teso calato all'interno del pozzetto di calma e ancorato al fondo, attraverso cui viaggiano gli impulsi a microonde inviati verso il livello da misurare. I risultati dei primi tre anni di sperimentazione sono molto buoni, sia per la stabilità del segnale che per la precisione, che raggiunge valori millimetrici.



**Figura 2.8** – A sinistra: idrometro radar in fase di test presso il porto di Liverpool (Gran Bretagna). Fonte: IOC (2006), “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation, Volume IV, Manuals and Guides 14”. A destra: mareografo a microonde in fase di installazione presso il porto di Sciacca. Fonte: ISPRA – Rete Mareografica Nazionale.

---

### 2.1.7 Configurazione tecnica di una stazione mareografica di nuova concezione della Rete Mareografica Nazionale<sup>1</sup>

Il pozzo di calma è realizzato con un tubo in materiale plastico di 40 cm di diametro chiuso sul fondo e con 2 “ombrinali” laterali (posizionati a 20 cm dal fondo del tubo) per il ricambio dell’acqua. Il tubo è fissato alla banchina per mezzo di 2 staffe distanziali.

L’asta idrometrica (in plastica) per una lettura ottimale viene installata, a fianco del tubo di calma. Il fissaggio avviene con un apposito supporto (slitta) in acciaio inossidabile dotato di morsetti di fissaggio che permettono l’asportazione dell’asta stessa per la pulizia e per la regolazione in altezza.

Nella parte superiore del tubo è stata installata una piastra circolare in materiale indeformabile che serve da supporto per i sensori di livello:

- un Idrometro a microonde (TLR) completo di cavo guida d’onda e tubo di protezione della stessa;
- un Idrometrico Digitale (shaft encoder) Cod. Grey (TIDROM) di tipo a galleggiante.

All’interno del tubo viene posizionato anche il sensore di temperatura dell’acqua.

La parte superiore viene chiusa da un apposito coperchio (ventilato) che serve da alloggiamento e protezione per i sensori. Tale coperchio ha una chiusura di sicurezza contro l’effrazione. Inoltre all’interno del coperchio trova alloggiamento un radio-modem per la trasmissione dati al sistema principale che si trova nelle immediate vicinanze e una batteria di alimentazione.

All’esterno con un apposito “paletto” di sostegno fissato alla struttura del tubo di calma è stato installato un pannello solare da 60 W completo di regolatore di tensione (figure 2.9 e 2.10)

Nelle vicinanze viene installato il palo abbattibile (per ribaltamento) di 10 metri tipo SIAP+MICROS abbattibile. Per il fissaggio è creato un plinto di circa un metro quadrato ancorato al piano banchina. Il palo è fissato al plinto con 4 tirafondi torti e annegati nel cemento.

Lo stesso palo serve da supporto al box di Stazione, con grado di protezione IP 65, all’interno del quale, assieme agli apparati accessori per la connettività e la protezione, sono alloggiati:

- una unità di controllo **DA9000**;
- un terminale UMTS Wavecom modello **Fastrack Extreme 10**;
- un radio-modem per la ricezione dei dati di livello;
- un sensore di pressione atmosferica **PA9880**;
- una batteria da 65 Ah;

Sul palo sono inoltre montati con appositi bracci e staffaggi:

- un pannello solare da 60 W completo di regolatore di tensione montato sul palo da 10 m a 6 metri di altezza;
- un sensore di velocità vento modello TVV ed uno di direzione vento modello TDV di produzione Siap+Micros montati in cima palo;
- un sensore combinato di temperatura e umidità dell’aria SIAP+Micros modello **TTEPRH** montato sul palo da 10 m.

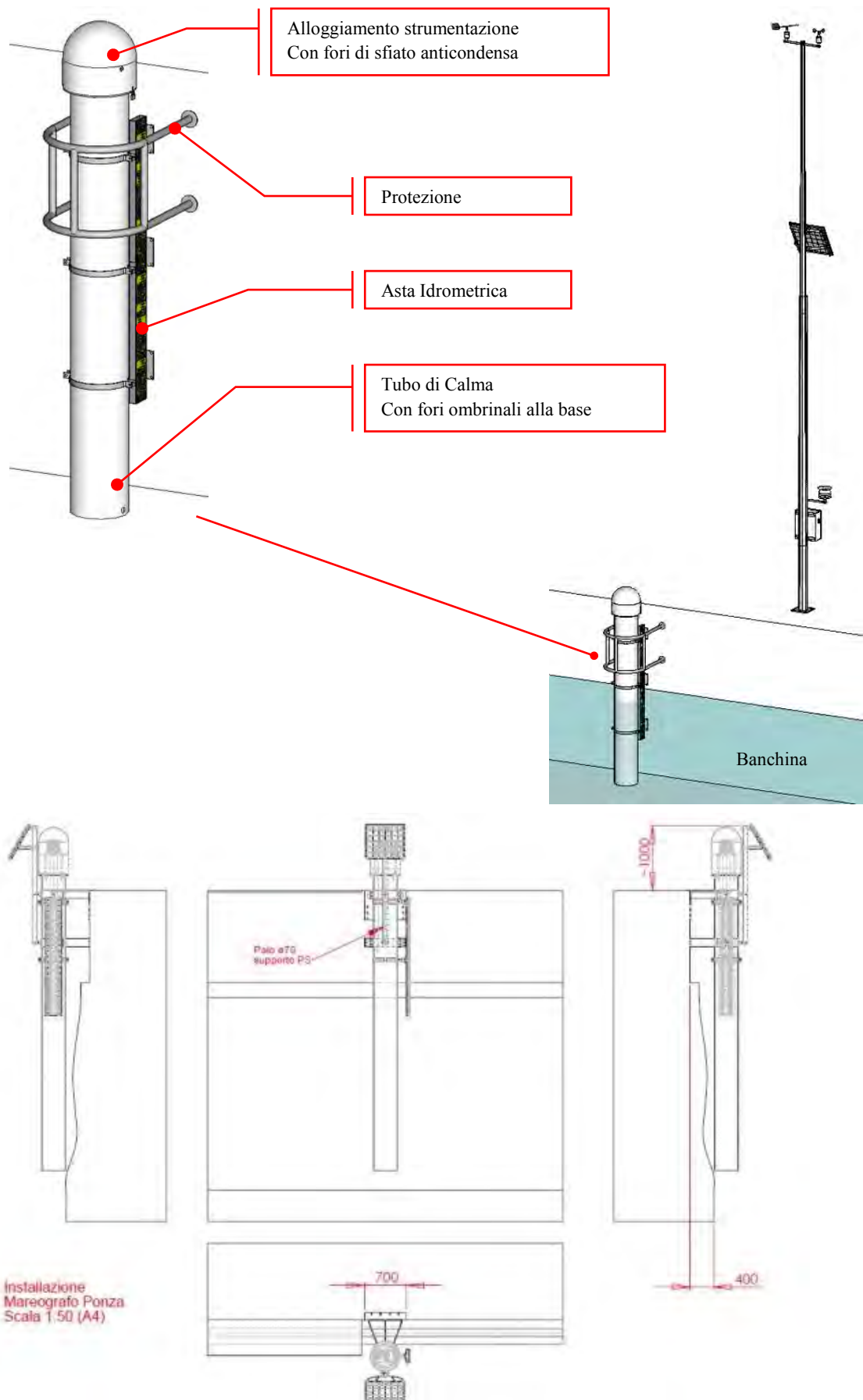
I collegamenti tra il palo e i sensori alloggiati nella testa del tubo di calma avvengono via cavo con canalizzazione interrata.

Si riportano nel seguito schemi, disegni e documentazione fotografica di una stazione mareografica di nuova concezione della RMN.

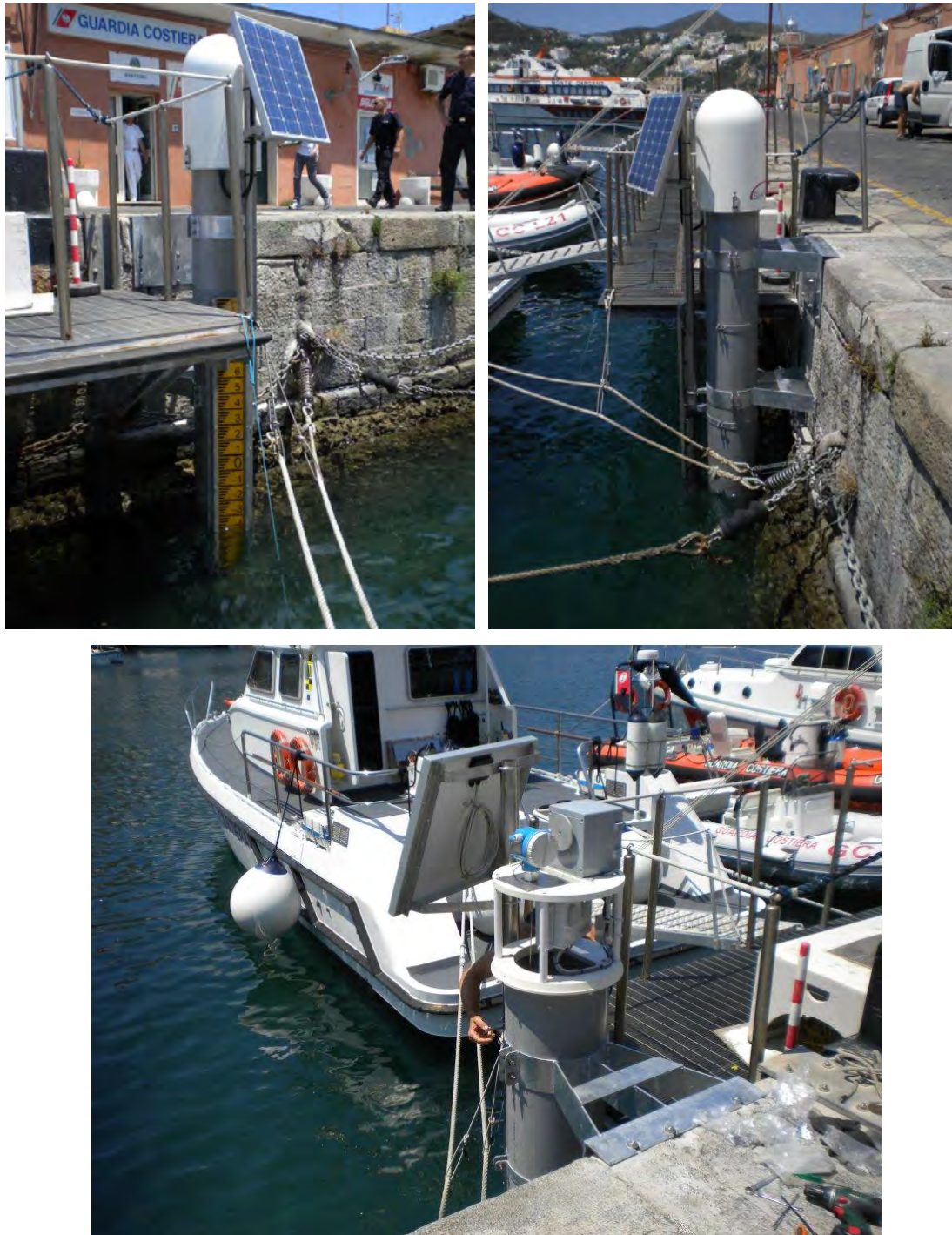
---

<sup>1</sup> A cura di Ing. Giovanni Arena (ISPRA – Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine – Servizio Mareografico – Settore Reti di Monitoraggio)





**Figura 2.9** – *Sopra: vista di insieme della stazione mareografica e meteorologica di nuova tipologia della RMN. Sotto: disegno operativo del tubo di calma, sensori e sistema di alimentazione della versione speciale per il sito di Ponza. Fonte: ISPRA – Rete Mareografica Nazionale.*



**Figura 2.10** – Stazione mareografica installata presso il comprensorio portuale dell'isola di Ponza. Fonte: ISPRA – Rete Mareografica Nazionale.

### 2.1.8 Aspetti conclusivi sulle stazioni mareografiche

Indipendentemente dal tipo di strumento utilizzato per la misurazione della marea, una stazione mareografica è in genere attrezzata con più dispositivi di rilevazione, siano essi ondometri, idrometri a pressione o mareografi a galleggiante. La ridondanza dei sensori, infatti, garantisce la continuità delle registrazioni anche in caso di malfunzionamenti di tipo meccanico o elettrico.

Le apparecchiature per la trasmissione dei dati di marea in tempo reale o differito completano infine la dotazione di una stazione mareografica. La granularità con cui vengono registrati i livelli di marea e la modalità di trasmissione dipendono strettamente dallo scopo per cui gli strumenti vengono installati.

---

Vi sono casi in cui è sufficiente la trasmissione in tempo reale di un dato di marea ogni 5-10 minuti, ad esempio per i sistemi di allertamento da inondazione costiera (come la Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico). Per i sistemi di allerta contro gli tsunami, invece, è necessario un monitoraggio molto più frequente, ad esempio con una rilevazione ogni 15 secondi. Lo studio del cambiamento secolare del livello del mare può adottare i dati trasmessi in tempo differito, rappresentati da una serie di misure inviate regolarmente con cadenza prefissata, ad esempio giornaliera.

Qualora non siano presenti gli strumenti per l'invio dei dati si deve provvedere manualmente alla raccolta dei dati stessi, mediante un operatore che si rechi fisicamente alla cabina della stazione mareografica. I mareografi digitali infatti registrano le altezze di marea anche nella loro memoria interna, da cui è possibile scaricare i file con un apposito computer palmare.

Con i procedimenti esposti all'interno del § 2.1 si hanno a disposizione le registrazioni del livello di marea allo stato grezzo. Tale denominazione deriva dal fatto che questi dati possono contenere errori di varia natura, come derive strumentali, oscillazioni indotte dall'esterno sul livello del pozzetto, sfasamenti temporali, ecc. In un secondo momento i dati grezzi vengono analizzati ed elaborati per ottenere i dati corretti e validati mediante le tecniche illustrate all'interno del capitolo 3.

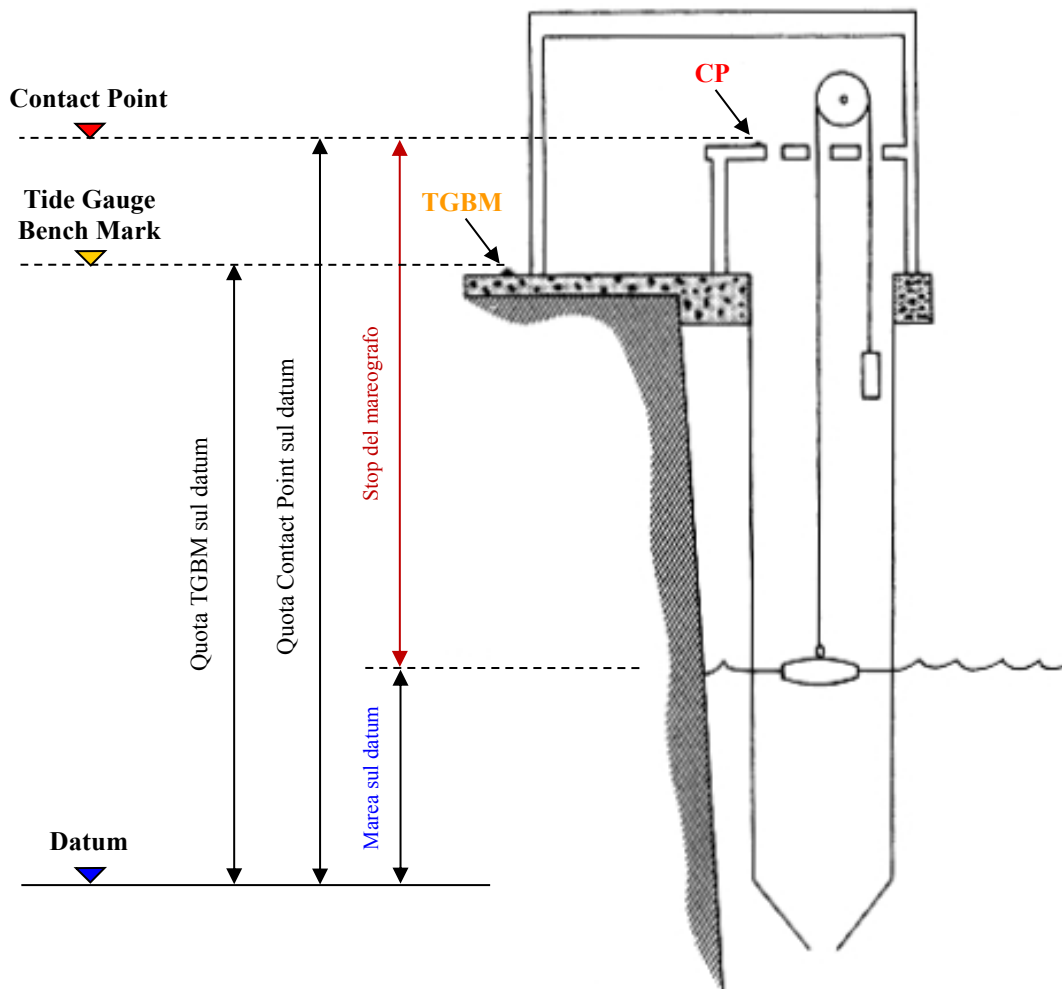
## 2.2 Riferimenti altimetrici di una stazione mareografica

### 2.2.1 Aspetti generali e definizioni

Le misurazioni del livello del mare effettuate attraverso i mareografi forniscono una misura relativa del movimento della superficie marina rispetto alla terraferma. Affinché le quote misurate possano essere utilizzabili è necessario che esse siano riferite ad un piano di riferimento (*datum*), in modo da poter collegare la variazione del livello idrico rispetto al *datum* prescelto. Per questo motivo una stazione mareografica viene sempre connessa geodeticamente ad una rete di livellazione (locale o nazionale) precedentemente esistente nel luogo di installazione o costruita ex-novo per il monitoraggio puntuale dei livelli di marea.

Per una stazione mareografica, indipendentemente dalle tipologie illustrate nel paragrafo precedente, devono essere definiti alcuni riferimenti altimetrici fondamentali per la corretta misura della marea (figura 2.11). In particolare:

- il caposaldo della stazione (*tide gauge bench mark* - TGBM), riferimento rispetto al quale viene misurato il livello idrico registrato dalla stazione stessa. Se il TGBM viene collegato geodeticamente ad un piano di riferimento locale (o nazionale), la quota di marea misurata dalla stazione può essere riferita allo stesso *datum* locale (o nazionale);
- la piastrina mareografica (*gauge contact point* - CP), riferimento proprio della stazione connesso geodeticamente al TGBM. Grazie a questa connessione, i livelli idrici misurati rispetto al CP possono essere riferiti direttamente al TGBM. Ogni strumento inserito all'interno di una stazione mareografica ha la propria piastrina, che permette inoltre l'operazione di *stop* del mareografo (ossia la misura locale del livello da parte di un operatore per le operazioni di settaggio periodico dello strumento);
- il caposaldo GPS (*GPS bench mark* - GPSBM), riferimento utilizzato per il posizionamento plano-altimetrico della stazione attraverso il sistema GPS, collegato anch'esso tramite livellazione di alta precisione al TGBM, da effettuarsi almeno una volta all'anno;
- lo zero della stazione mareografica (*tide gauge zero* - TGZ), livello idrico corrispondente ad una quota di marea pari a zero per la stazione mareografica esaminata. Il TGZ deve essere sempre messo in relazione alla quota della piastrina e del caposaldo della stazione, controllando periodicamente il suo corretto posizionamento.



**Figura 2.11** – Posizionamento dei riferimenti altimetrici per una stazione mareografica a galleggiante. Fonte: IOC (1985), “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation, Volume I, Manuals and Guides 14”.

## 2.2.2 Raccomandazioni dell’Intergovernmental Oceanographic Commission

La Commissione Oceanografica Intergovernativa dell’Unesco (IOC) fornisce agli stati membri delle Nazioni Unite uno strumento di cooperazione per lo studio degli oceani, permette la condivisione di conoscenze, informazioni e tecnologia, coordina i programmi nazionali e aiuta i governi nazionali a risolvere eventuali problematiche legate agli oceani e alle coste. L’IOC è stata fondata nel 1960 e da allora non ha mai smesso di fornire indicazioni d’indirizzo sulle metodologie da applicare per le misure oceanografiche.

Per quanto riguarda le osservazioni puntuali del livello marino tramite stazioni mareografiche, le raccomandazioni della Commissione suggeriscono di adottare come punto primario di riferimento un caposaldo a terra posizionato su una superficie stabile (IOC, 2002; 2006). Questo punto è rappresentato dal TGBM che può essere scelto, ad esempio, tra una roccia affiorante, una parete in muratura o un edificio solido e robusto. Quando il TGBM è situato su una superficie orizzontale ha la forma di una piccola semisfera in ottone, con il livello dato dal punto più alto della sua superficie. Quando invece è posto su una superficie verticale ha la forma di una piastra metallica con un intaglio orizzontale o di una placca avente un’estremità sporgente, sopra la quale è possibile appoggiare una staffa graduata per le operazioni di livellazione (figura 2.12).





**Figura 2.12** – Capisaldi di livellazione per la definizione del TGBM in prossimità della stazione mareografica di Punta della Salute (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico). A sinistra: caposaldo verticale posto su una parete di un edificio. A destra: caposaldo orizzontale posizionato su un cippo.

È tuttavia poco affidabile basarsi sulla stabilità di un solo TGBM, in quanto nel tempo può subire danni accidentali, essere soggetto a dei movimenti o divenire inutilizzabile in seguito alla demolizione dell'edificio su cui era posto. Viene raccomandato pertanto di sceglierlo come riferimento tra almeno 5 punti entro qualche centinaio di metri, al più un chilometro, intorno alla stazione mareografica. Se il TGBM deve essere ridefinito, il vantaggio di avere gli altri 5 riferimenti locali consiste nel poter ripristinare il nuovo TGBM rispetto alla posizione originale (cfr. § 4.1 in IOC, 2002; 2006).

Questi punti devono essere collegati tra loro attraverso livellazioni di alta precisione e dimostrare di mantenere nel tempo la stessa quota relativa. Se attraverso queste periodiche livellazioni non si osservano variazioni verticali apprezzabili sui capisaldi posizionati nell'intorno della stazione, si può supporre che l'area attorno alla medesima stazione sia stabile. Anche in questa condizione tuttavia non è possibile escludere che dei movimenti verticali possano avere interessato solidalmente l'insieme dei capisaldi e della stazione rispetto ad un'area molto più grande. Questa eventualità può essere indagata attraverso campagne di livellazione su ampia scala o tecniche di livellazione spaziale-satellitare.

È auspicabile inoltre, ma non essenziale, che tutti i riferimenti all'interno dell'area circostante la stazione mareografica vengano collegati alla rete nazionale di livellazione e periodicamente controllati rispetto a questa rete, così da poter quotare il TGBM rispetto al piano di riferimento nazionale. Questa operazione, tuttavia, viene sconsigliata per gli studi sul cambiamento del livello del mare, in quanto le reti nazionali di livellazione tendono ad essere ridefinite ad intervalli periodici. Per l'Italia, ad esempio, il primo riferimento storico adottato fu quello riferito al mareografo di Venezia-Punta della Salute 1897, mentre attualmente sono in uso i riferimenti Genova 1942 per l'Italia continentale, Catania 1965 per la Sicilia, Cagliari 1956 per la Sardegna e Lampedusa 2005 per le Isole Pelage (IGM, 2012).

Pertanto, per la corretta interpretazione delle misure mareografiche, è importante che il TGBM sia chiaramente identificato con un nome e un numero e quindi documentato assieme ai metadati della stazione. Infatti esso consente di risalire al piano di riferimento (*datum*) rispetto al quale vengono misurati i livelli marini della stazione.

### 2.2.3 Operazioni di livellazione

Per consentire di verificare la stabilità del TGBM ed il suo posizionamento geodetico è necessario portare a termine periodicamente delle campagne di livellazione, che hanno requisiti e caratteristiche diversi a seconda della rete di livellazione a cui si desidera collegare il TGBM.

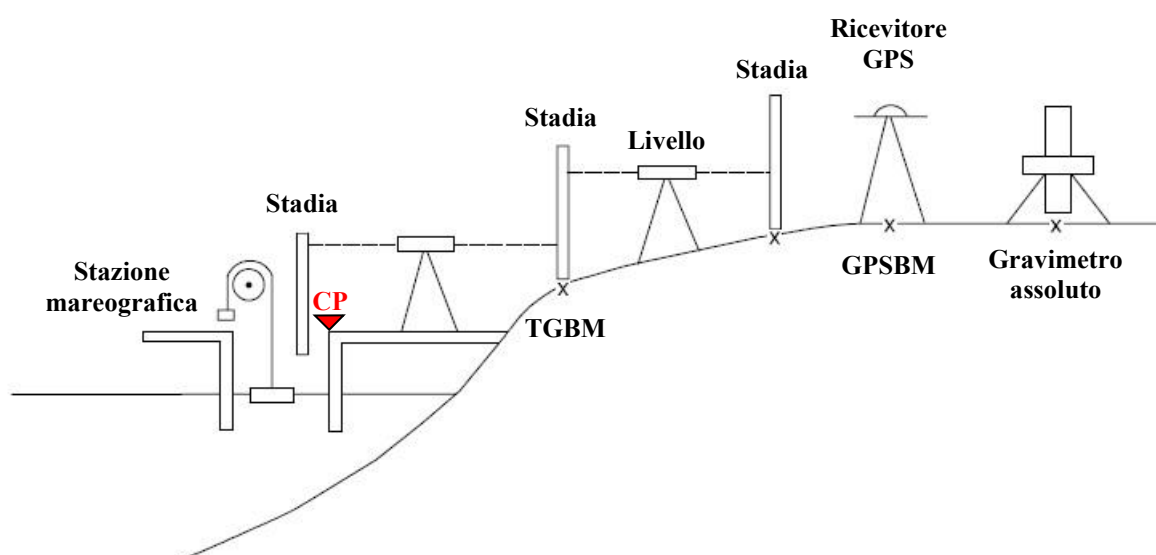
Qualora venga utilizzata una rete locale, dovrà essere predisposta una livellazione di alta precisione da effettuarsi una o più volte all'anno, in relazione alle caratteristiche geologiche del terreno. La distanza da ricoprire in questo caso è inferiore a 1 km, mentre viene richiesto un errore inferiore a 1 mm sulla definizione altimetrica del caposaldo. È consigliabile avvalersi di personale esperto e qualificato per ottenere la migliore precisione possibile, conseguibile con tecniche come la livellazione geometrica dal mezzo.

Qualora si scelga di collegarsi ad una rete su ampia scala, la distanza da ricoprire può arrivare fino a 10 km, con un errore sulla quota altimetrica del TGBM inferiore a 1 cm. Su distanze di pochi chilometri, le livellazioni di precisione hanno un'accuratezza di 1 o 2 mm, che consente di rilevare gli spostamenti verticali del TGBM rispetto agli altri riferimenti locali. Se la distanza è superiore a 10 km, gli errori sistematici diventano rilevanti e possono falsare la rilevazione della quota del TGBM, rendendo comparabili i risultati delle livellazioni di alta precisione con quelli ottenibili dai sistemi GPS. In questo caso, la quota ottenuta viene calcolata per il GPSBM e in un secondo momento viene riportata sul TGBM attraverso una livellazione ad alta precisione (figura 2.13).

Un altro metodo utilizzato per il controllo della quota altimetrica del TGBM è il sistema DORIS, una tecnica di geodesia spaziale che si basa sull'orbitografia Doppler ed il radioposizionamento satellitare (cfr. § 4.4 in IOC, 2002; 2006).

Un ultimo metodo presuppone l'utilizzo di un gravimetro assoluto, in grado di misurare la variazione dell'accelerazione di gravità terrestre attraverso la stima della velocità di caduta nel vuoto di un peso posto al suo interno. Questo strumento rende possibile la misura di eventuali spostamenti verticali del suolo in un punto preso come riferimento. Successivamente questa quota viene riportata sul TGBM con una livellazione ad alta precisione, permettendo così di valutarne la stabilità altimetrica.

Si sottolinea che l'accuratezza ottenibile con i sistemi GPS, DORIS o i gravimetri assoluti è pressoché identica: l'errore che risulta nella definizione della quota altimetrica del TGBM è inferiore a 1 cm.



**Figura 2.13** – Schema delle operazioni di livellazione necessarie tra i vari capisaldi in prossimità di una stazione mareografica. Fonte: IOC (1994), “Manual on Sea Level – Measurement and Interpretation, Volume II, Manuals and Guides 14”.

---

## 2.3 Cenni sulle reti mareografiche

### 2.3.1 *La rete mareografica nazionale italiana (RMN)*

La mareografia è uno dei rami più importanti della oceanografia, la scienza che studia i fenomeni fisici dei mari e degli oceani. Nei mari italiani, dove le maree raggiungono solo raramente ampiezze notevoli, lo studio delle maree interessa l'idraulica e l'idrografia, essendo questo fenomeno direttamente collegato alla buona conservazione delle lagune, degli estuari e dei porti.

In Italia, sebbene le prime indagini sulle acque naturali risalgano all'inizio del XVIII secolo, così come le prime osservazioni sulle piogge e le prime sistematiche letture del livello idrometrico di alcuni corsi d'acqua, il Servizio Idrografico Italiano (S.I.I.) entrò in funzione solo nel secondo decennio del Novecento. Tale organismo unico era stato istituito col compito specifico di osservare e studiare, su tutto il territorio del Regno, le acque naturali di qualunque categoria: superficiali, come i fiumi, i torrenti e i laghi, o sotterranee, come le falde freatiche ed artesiane. Esso doveva inoltre registrare le grandezze idrografiche terrestri, come le precipitazioni atmosferiche e la temperatura dell'aria, uniformando, organizzando e rendendo disponibili le informazioni raccolte. Prima di allora infatti, tali misurazioni erano eseguite in maniera non coordinata dalle singole strutture preunitarie che svolgevano tale compito (ISPRA, 2012a).

Con l'istituzione del Servizio Idrografico Italiano le osservazioni e le indagini idrografiche vennero estese a tutto il territorio nazionale, suddiviso in dieci grandi compartimenti delimitati con criteri puramente idrografici, in modo che ognuno di essi fosse racchiuso da linee spartiacque e comprendesse solo bacini interi, indipendentemente da suddivisioni provinciali e regionali. I compartimenti vennero affidati ad altrettante Sezioni Autonome del Genio Civile nell'ambito del Ministero dei Lavori Pubblici.

Nella storia della mareografia in Italia, il primo strumento ad essere installato fu quello dell'Istituto Talassografico di Trieste, collocato nel 1859 presso il Molo Sartorio, seguito pochi anni più tardi dal mareografo di Rimini (1867), da quello di Venezia (1871) e da quello di Genova presso l'Istituto Idrografico della Marina Militare (1883). Le osservazioni mareografiche estese all'intero territorio nazionale iniziarono tra il 1896 ed il 1897, anni in cui gli Uffici del Genio Civile fecero entrare in funzione i mareografi di Imperia, Livorno, Civitavecchia, Napoli (Arsenale e Mandracchio), Messina, Palermo, Catania, Ancona, Ravenna (Porto Corsini), Cagliari e La Maddalena. Successivamente, nel 1920, furono installate anche le stazioni di Reggio Calabria e Vieste. Nel 1942 fu istituito il Servizio Mareografico Nazionale presso il Servizio Tecnico Centrale del Ministero dei Lavori Pubblici, per dare sistematicità e continuità al rilevamento mareografico. Sotto questa gestione, il complesso delle stazioni mareografiche assunse la connotazione di una vera e propria rete razionalmente distribuita. La localizzazione delle stazioni nacque da considerazioni sia di carattere cognitivo, per ottenere elementi che consentissero di studiare e prevedere il fenomeno della marea lungo l'intera estensione delle coste italiane, sia di carattere prettamente operativo. Infatti le stazioni erano affidate alle locali sezioni operative degli Uffici del Genio Civile per le Opere Marittime, che provvedevano alla loro installazione e manutenzione in accordo con il Servizio Mareografico. In quest'ottica le stazioni mareografiche erano fondamentali per conoscere l'andamento dei livelli del mare nei principali porti italiani, al fine di consentire il mantenimento dei fondali, di condurre in sicurezza le operazioni portuali, di determinare le quote di progetto delle opere marittime, banchine o frangiflutti, o di verificare i loro possibili assestamenti o cedimenti nel tempo.

Nel 1986 la Rete Mareografica Italiana, ancora gestita dal Settore Mareografico del Ministero dei Lavori Pubblici, fu completamente ristrutturata e rinnovata. Il numero delle stazioni venne razionalizzato e portato a 25, in particolare: Imperia, Genova, Livorno, Civitavecchia, Napoli, Salerno, Palinuro, Messina, Palermo, Porto Empedocle, Catania, Reggio Calabria, Crotone, Taranto, Otranto, Bari, Vieste, Ortona, Ancona, Ravenna, Venezia-Lido, Trieste, Cagliari, Carloforte e Porto Torres, a cui sono da aggiungere le stazioni di Genova e Brindisi dell'Istituto Idrografico della Marina Militare,

---

la stazione di Trieste dell'Istituto Talassografico e la stazione di Rimini gestita dall'Amministrazione Comunale. Nel contempo fu effettuata la sostituzione di tutti i mareografi meccanici a favore di strumenti elettronici a galleggiante, alimentati a pannelli solari, in grado di registrare le osservazioni su supporti di memoria rimovibili (De Angelis, 1987; APAT, 2003).

Nel 1989, con l'entrata in vigore della Legge 18 maggio 1989, n. 183, sulla difesa del suolo, le competenze in materia di mareografia furono trasferite ai Servizi Tecnici della Presidenza del Consiglio dei Ministri, e nello specifico al Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. Quest'ultimo gestiva la Rete Mareografica con la collaborazione dei propri Uffici Compartimentali, che provvedevano all'attivazione del servizio di manutenzione in caso di malfunzionamento e al ritiro periodico dei supporti rimovibili di memoria allo stato solido e al loro invio presso la Direzione Generale di Roma, dove i dati venivano decodificati, validati ed archiviati.

Nel 1999, a seguito dell'istituzione dell'APAT avvenuta con il Decreto Legislativo 30 luglio 1999, n. 300, il Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale venne a far parte dell'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici. La Rete Mareografica Nazionale venne allora ampliata, ammodernata e portata a 26 stazioni di misura uniformemente distribuite lungo le coste del territorio nazionale ed ubicate prevalentemente all'interno delle strutture portuali: Trieste, Venezia-Lido, Ancona, Ravenna, Pescara, Ortona, Isole Tremiti, Vieste, Bari, Otranto, Taranto, Crotone, Reggio Calabria, Messina, Catania, Porto Empedocle, Lampedusa, Palermo, Palinuro, Salerno, Napoli, Cagliari, Carloforte, Porto Torres, Civitavecchia, Livorno, Genova ed Imperia (ISPRA, 2012a). Le stazioni erano dotate anche di un sensore anemometrico per la misura di velocità e direzione del vento a 10 metri dal suolo, di un sensore barometrico, e di sensori per rilevare la temperatura dell'aria e dell'acqua. Tutte le stazioni, inoltre, erano fornite di un sistema locale di gestione e memorizzazione dei dati e di un apparato di trasmissione in tempo reale alla sede centrale del Servizio Mareografico a Roma, che aveva il compito di raccogliere, validare, elaborare e pubblicare i dati raccolti, fornendo valutazioni sullo stato dei mari italiani, nonché di progettare, realizzare e gestire le reti di rilevamento mareografico e ondometrico per il monitoraggio delle caratteristiche fisiche e di qualità dei mari italiani.

Nel 2008 l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT) confluì presso l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), istituito con la Legge 6 agosto 2008, n. 133, di conversione, con modificazioni, del Decreto Legge 25 giugno 2008, n. 112. Anche il Servizio Mareografico Nazionale seguì questo trasferimento e ricevette un ampliamento dei suoi compiti, in particolare per quanto riguarda la misura delle onde anomale, il rilievo sistematico e l'elaborazione delle grandezze relative al clima marittimo, allo stato dei litorali ed ai livelli marini, la pubblicazione sistematica degli elementi osservati, elaborati e di cartografia, la predisposizione di criteri, metodi e standard di raccolta, analisi e consultazione dei dati relativi all'attività svolta.

Il Servizio Mareografico inoltre, assunse la gestione della Rete Ondometrica Nazionale (R.O.N.), realizzata nel 1989 dal Ministero dei Lavori Pubblici, e potenziò ulteriormente la Rete Mareografica Nazionale (R.M.N.), che attualmente è composta da 35 stazioni di misura: Trieste, Venezia-Lido, Ravenna, Ancona, San Benedetto del Tronto, Ortona, Isole Tremiti, Vieste, Bari, Otranto, Taranto, Crotone, Reggio Calabria, Messina, Catania, Porto Empedocle, Sciacca, Lampedusa, Palermo, Ginostra, Palinuro, Salerno, Napoli, Cagliari, Carloforte, Porto Torres, Ponza, Gaeta, Anzio, Civitavecchia, Marina di Campo, Livorno, La Spezia, Genova ed Imperia (figura 2.14).

Per la misura del livello idrometrico, tutte le stazioni della rete presentano al loro interno un sensore a microonde (radar) con precisione millimetrica, installato in coppia con un secondo sensore di livello a galleggiante basato su tecnologia *shaft-encoder* (con funzione di *back-up*).

Le stazioni sono dotate anche di un anemometro, per la rilevazione della velocità e della direzione del vento a 10 metri dal suolo, e di altri sensori per la misura della pressione atmosferica, della temperatura dell'aria, della temperatura dell'acqua e dell'umidità relativa. Inoltre 10 stazioni della Rete Mareografica sono state dotate di una sonda multiparametrica per la valutazione della qualità dell'acqua, che fornisce misure di temperatura, pH, conducibilità e redox.



Tutte le stazioni sono dotate di un sistema locale di gestione e memorizzazione dei dati e di un apparato di trasmissione in tempo reale (UMTS) alla sede centrale del Servizio Mareografico Nazionale di Roma. Inoltre in 9 stazioni, considerate strategiche per la misura di fenomeni particolari come le onde anomale, è presente un secondo sistema di trasmissione dati via satellite con tecnologia IRIDIUM, che garantisce il collegamento anche in presenza di un *black-out* del sistema UMTS.



**Figura 2.14** – Stazioni ISPRA della Rete Mareografica Nazionale (RMN). Fonte: [www.mareografico.it](http://www.mareografico.it).

Considerato quanto esposto, il notevole patrimonio storico di conoscenza prodotto dalla Rete Mareografica Italiana in più di un secolo di attività merita tutta l'attenzione del mondo tecnico e della ricerca che, sulla base di un paziente lavoro di recupero e ricostruzione, potrà ulteriormente contribuire all'elaborazione delle risposte ai quesiti più attuali relativi all'andamento dei livelli marini, alla protezione delle aree di interfaccia terra-mare, alla conoscenza dell'interazione tra le forzanti meteorologiche e i fenomeni idrodinamici marini.

### 2.3.2 La rete mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico (RMLV)

Le misurazioni sistematiche del livello del mare e dei massimi e dei minimi di marea iniziarono a Venezia nel 1871, quando l'Ing. Tomaso Mati istituì il primo mareografo a palazzo Loredan in Campo Santo Stefano, presso la sede del Genio Civile (Dorigo, 1961). Questa data rappresenta l'inizio delle registrazioni di marea con metodo scientifico, ossia con l'introduzione di un piano di riferimento da cui ricavare delle altezze di marea rilevate in orari ben precisi (il Comune Marino del 1825<sup>2</sup>). Prima

<sup>2</sup> Nella regione Veneta, ed in parte nella regione Emilia, era costume riferire le isoipse al livello medio delle alte maree. Ciò era dovuto al fatto che la linea corrispondente a tale livello appariva segnata visibilmente su un muro di sponda in pietra (specie se di natura calcarea), come una linea abbastanza netta di colore verde scuro lasciata dall'azione dell'acqua marina. Questa linea corrisponde con sufficiente approssimazione all'altezza media di tutte le alte maree del luogo e veniva assunta come termine di confronto delle altezze, denominandola "comune alta marea" o "comune marino".

Il livello medio del mare e il comune marino, storicamente adottati quali riferimenti per le misure mareografiche, sono caratterizzati da sostanziali differenze. Mentre il livello medio del mare ricavato da osservazioni mareografiche eseguite sulla costa in una certa località è paragonabile geodeticamente al livello medio determinato in modo analogo in un'altra località della costa, non così avviene per la media delle alte o delle basse maree. In quest'ultimo caso, infatti, il riferimento non è uguale nei due punti perché varia a seconda dell'ampiezza di marea che si verifica in tali località, anche se spazialmente molto vicine tra loro.

---

del 1871 non si hanno a disposizione dati quantitativi sulle quote raggiunte dalla marea, ma sono reperibili delle cronache compilate in occasione degli eventi di alta marea eccezionale, note con il termine di “acque alte”. Questi documenti forniscono informazioni di tipo qualitativo sul fenomeno e sono disponibili fin dal VI secolo, con descrizioni del tipo: “L’incremento dell’acqua fu 8 piedi più del solito” (18 gennaio 1386), o “L’acque arrivarono agli scalini dell’altar maggiore di Sant’Antonino” (9 novembre 1750), (Giordani Soika, 1976).

Nel 1888, l’Istituto Geografico Militare istituì un altro mareografo presso l’Arsenale di Venezia e nel 1906 venne installata la stazione mareografica che storicamente ricopre il maggior interesse, quella di Punta della Salute in bacino di San Marco. Inizialmente essa fu posta sul Canal Grande ma nel 1923 fu spostata nel sito dove si trova tutt’ora, sul lato del Canale della Giudecca. Il riferimento adottato fu il livello medio del mare del 1897, ancora oggi utilizzato per la misura dei livelli marini in tutte le stazioni mareografiche della Laguna di Venezia e delle lagune dell’Alto Adriatico e noto come Zero Mareografico di Punta della Salute.

Le misurazioni del livello del mare erano originariamente effettuate dal Genio Civile e dall’Istituto Geografico Militare. Esse divennero di competenza del Magistrato alle Acque quando, con la Legge istitutiva n. 257 del 24 maggio 1907, lo Stato Italiano ricostituì questo istituto come autorità idraulica preposta al buon governo delle acque nei bacini idrografici, nelle lagune e lungo i litorali dell’area adriatica nord orientale. Tra i suoi compiti il Magistrato alle Acque doveva provvedere alla raccolta metodica ed ordinata delle osservazioni idrografiche riguardati le lagune, i litorali, il mare, i fiumi e i bacini montani. Per assolvere a tali funzioni, all’interno del Magistrato alle Acque venne costituito l’Ufficio Idrografico con il proprio Servizio Mareografico, che acquisì il patrimonio di dati e osservazioni mareografiche iniziate nel 1871.

Alla fine del 1908 l’Ufficio Idrografico, insieme alle oltre 400 stazioni destinate all’attività di sistematica osservazione delle grandezze idrologiche territoriali (precipitazioni, parametri meteorologici, livelli e portate fluviali, livelli freatici), disponeva per il proprio Servizio Mareografico di 18 stazioni per il rilevamento della marea nella Laguna di Venezia e lungo il litorale Adriatico da Marano Lagunare alla Foce del Po, per salire poi a 23 stazioni nel 1911.

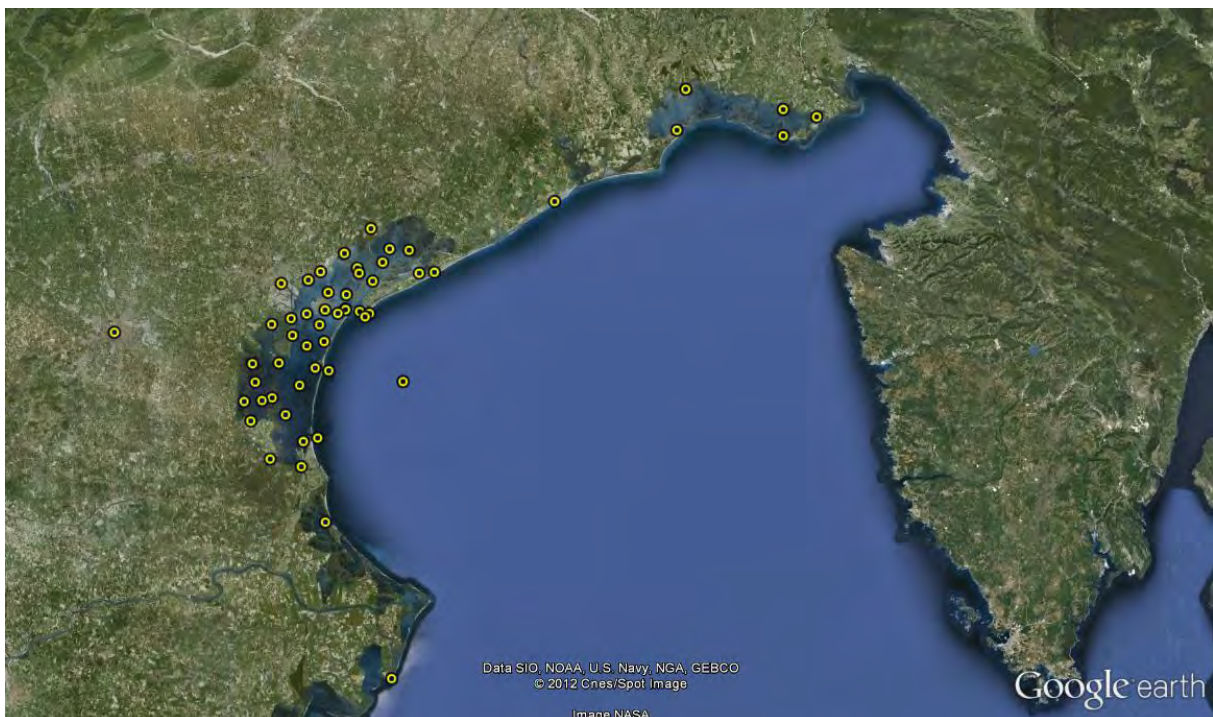
In seguito all’evento alluvionale del 4 novembre 1966 e all’emanazione della prima Legge Speciale per Venezia, l’Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque realizzò nei primi anni Settanta del secolo scorso il progetto di ampliamento della rete mareografica in Laguna di Venezia. Tale progetto portò a 40 il numero delle stazioni fisse della rete, a cui si aggiunsero le preesistenti 5 stazioni nella Laguna di Marano-Grado, la stazione di Caorle lungo il litorale a nord della Laguna di Venezia, e quella di Porto Caleri, all’interno dell’omonima laguna a sud di Chioggia, per un totale di 47 stazioni di misura. Attualmente le stazioni di misura della Rete Mareografica in Laguna di Venezia sono 50, di cui più della metà attrezzate per la trasmissione in tempo reale dei dati e la restante parte per la trasmissione in tempo differito via GSM. Alcune di queste stazioni sono in grado di registrare anche l’ampiezza ed il periodo del moto ondoso nonché alcuni parametri climatici come pressione atmosferica, intensità e direzione del vento, temperatura, umidità, precipitazioni e radiazione solare (ISPRA, 2012b).

L’Ufficio Idrografico svolse le sue funzioni per quasi un secolo, fino al 2002, quando l’attività è stata affidata all’Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT), confluita nel 2008 all’interno dell’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Tra le proprie mansioni, ISPRA assicura la continuità della raccolta delle osservazioni meteo-mareografiche ed il regolare esercizio della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico. L’ente svolge inoltre i compiti operativi di protezione civile già attribuiti ai Servizi Tecnici Nazionali dalla Legge 24 febbraio 1992, n.225, poi trasferiti all’APAT in virtù della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 27 febbraio 2004. In base a tale direttiva la rilevazione del dato in tempo reale si rende necessaria per il monitoraggio, l’analisi e l’evoluzione di grandezze climatologiche ed ambientali, nonché dello stato del mare, utili anche alla modellistica previsionale di eventi marittimi e costieri a scala locale. A tal fine, le centrali della Rete Mareografica della Laguna di Venezia scambiano dati in tempo reale con i Centri Operativi di Protezione Civile delle Regioni Veneto e Friuli

Venezia Giulia concorrendo quindi a completare il quadro del monitoraggio idrologico in tempo reale in tutta l'area idrografica del Triveneto.

I dati raccolti dalle stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico, inoltre, costituiscono le fonti di riferimento per lo studio di varie questioni di interesse tecnico-scientifico quali: le variazioni del livello del mare, le trasformazioni morfologiche del bacino lagunare e la difesa dall'inquinamento delle sue acque, la sostenibilità delle attività antropiche (navigazione, pesca, portualità) rispetto alle esigenze di tutela dell'ambiente lagunare, la difesa di Venezia dalle alte maree ed il rischio di inondazione di tutta la fascia costiera nord adriatica.

In particolare, per quanto riguarda la segnalazione degli eventi di alta marea eccezionale (*storm surges*) sono in esercizio da alcuni anni dei modelli statistici per la previsione a breve termine (48 ore) presso le stazioni di Venezia Punta della Salute, Venezia Lido Diga Sud, Chioggia, Burano, Grado e Porto Caleri. Tale sistema di previsione è stato recentemente potenziato attraverso la messa a punto di alcuni modelli deterministici basati su tecniche di assimilazione dati in tempo reale per la previsione di marea a medio e lungo termine (5 giorni). Accanto a queste tematiche si stanno approfondendo le conoscenze nel campo della variabilità climatica e l'analisi delle serie storiche di dati ambientali relativamente alla zona costiera e agli ecosistemi lagunari dell'Alto Adriatico. Tali attività sono subordinate allo scopo di rendere operative adeguate procedure di valutazione del rischio derivante dagli impatti indotti dai possibili cambiamenti climatici nelle aree costiere nord-adriatiche mediante apposito *Decision Support System* (DSS).



**Figura 2.15** – Stazioni ISPRA della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico (RMLV). Fonte: [http://www.ispravenezia.it/ispra/index.php?folder\\_id=20](http://www.ispravenezia.it/ispra/index.php?folder_id=20).

---

### 3. VALIDAZIONE DEI DATI MAREOGRAFICI IN USO PRESSO LA RETE MAREOGRAFICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA (RMLV)

#### 3.1 Il concetto di qualità nei dati mareografici

##### 3.1.1 Aspetti generali e definizioni

Misurare il fenomeno delle maree comporta diverse fasi lavorative: la prima consiste nelle operazioni di campagna di misura e di raccolta del dato sul campo, illustrate nel capitolo precedente. La seconda fase, complementare alla prima, consiste nel metodico riordino, organizzazione, archiviazione e revisione dei dati raccolti, al fine di rilasciare e divulgare al pubblico dati affidabili e di buona qualità. Non è affatto semplice dare una definizione esaustiva di qualità, ma per definire questo concetto generale si può ricorrere alla norma ISO 9000:2005, secondo cui la qualità è la totalità degli elementi e delle caratteristiche di un prodotto o servizio che concorrono alla capacità dello stesso di soddisfare esigenze espresse o implicite.

Dalla stessa norma possono essere ricavate altre importanti relazioni inerenti ad una visione generale di gestione della qualità (*quality management*), data dalla sinergia tra il controllo e la garanzia di qualità. In particolare per controllo della qualità (*quality control*) si intende l'insieme delle tecniche operative e delle attività utilizzate per soddisfare i requisiti di qualità, mentre per garanzia di qualità (*quality assurance*) si intendono tutte le azioni pianificate e metodiche necessarie per fornire un'adeguata affidabilità che un prodotto o un servizio siano in grado di soddisfare i requisiti di qualità. La *quality assurance* ha un'accezione prettamente preventiva, mentre il *quality control* verifica la conformità del prodotto durante e/o al termine del processo produttivo.

Questi concetti generali possono essere tradotti in ambito mareografico, dove la valutazione della qualità del dato consente di giudicare quanto i dati misurati rappresentano il fenomeno che è stato realmente osservato. Il controllo di qualità consiste nelle operazioni di verifica, correzione e validazione del dato per assicurargli una validità scientifica. In particolare l'obiettivo è di "garantire la coerenza dei dati all'interno di un singolo *data set* o di un insieme di *data set* al fine di assicurare che la qualità e gli errori nelle misure siano evidenti per l'utente, il quale dispone di informazioni sufficienti per valutarne l'idoneità per un impiego" (IOC, 2006). La garanzia di qualità è data invece dall'insieme delle attività volte al corretto funzionamento delle stazioni mareografiche, nonché dai metodi con cui vengono eseguite le calibrazioni periodiche degli strumenti e dagli standard adottati per l'archiviazione dei dati (come ad esempio la norma ISO 8601:2004 per la rappresentazione della data e dell'ora associati ad un livello misurato).

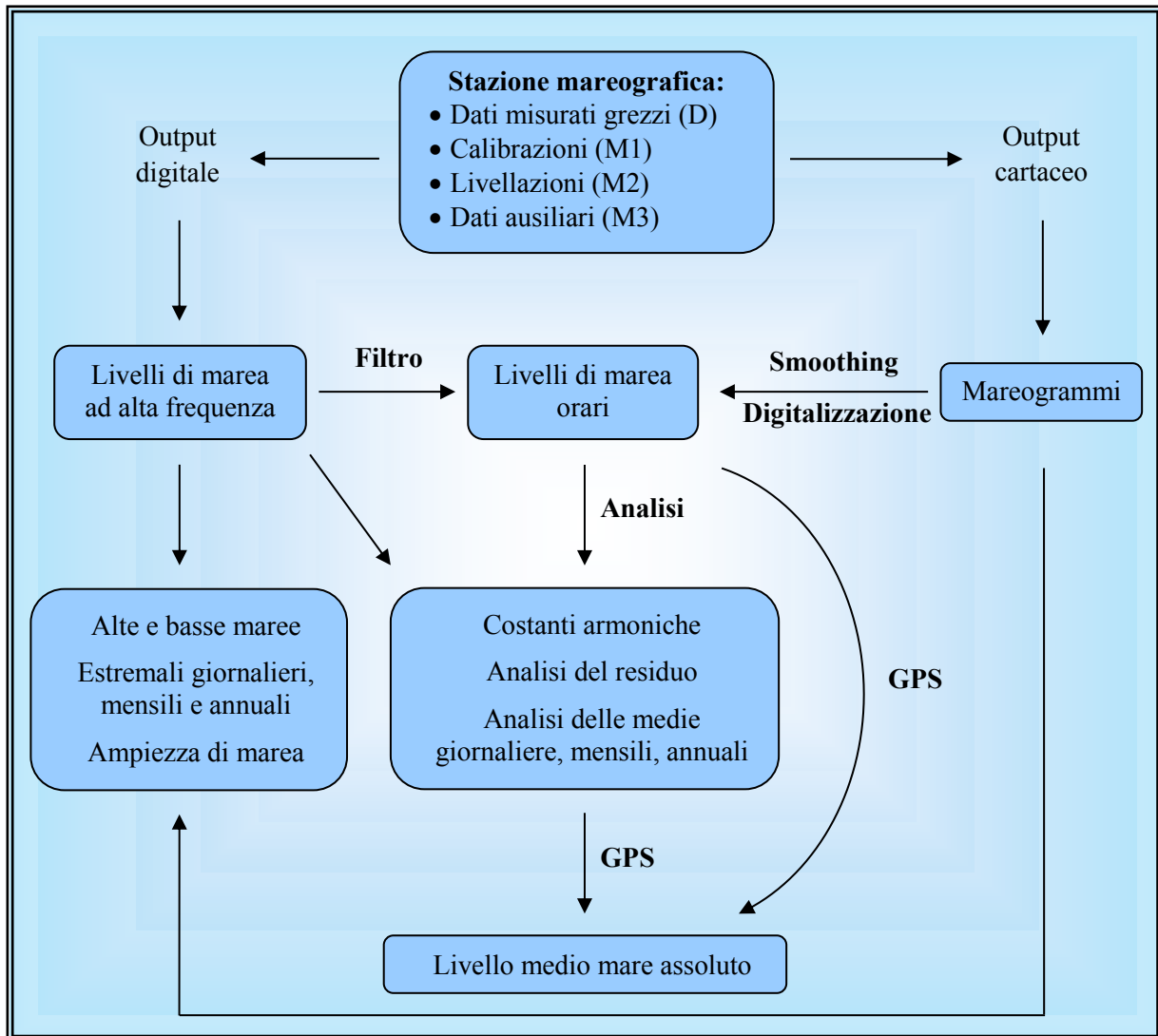
##### 3.1.2 Dalla misura alla validazione dei dati mareografici

Per ogni stazione mareografica, in base ad una adeguata gestione della qualità, dovrebbero essere disponibili quattro tipi di informazioni (figura 3.1):

- le misure di livello marino allo stato grezzo, in forma cartacea o digitale (D);
- i dati di calibrazione, ossia le misure manuali eseguite in sito durante le operazioni periodiche di settaggio del mareografo (M1);
- le informazioni di livellazione, legate all'utilizzo del *datum* di riferimento e al posizionamento del *tide gauge bench mark* e del *gauge contact point* (M2);
- altri dati ausiliari che possono essere utili nelle varie fasi del controllo di qualità (M3).

Gli ultimi tre tipi di informazioni, contrassegnati dalla lettera M, rappresentano i metadati da associare alle misure di marea vere e proprie (D). Essi risultano fondamentali non solo per il controllo di qualità dei dati registrati ma anche per il loro corretto scambio e integrazione tra *data set* locali o globali, nonché per la loro archiviazione.





**Figura 3.1** – Schema dei principali dati disponibili per una stazione mareografica e dei processi normalmente applicati alle misure di livello del mare. La maggior parte dei moderni sensori fornisce output digitali. Fonte: ESEAS-RI (2002), “Quality Control of Sea Level Observations – Version 1.0”.

I livelli misurati sui quali applicare le procedure di validazione devono essere digitalizzati nel caso di mareogrammi cartacei (ormai obsoleti), mentre sono direttamente disponibili per i mareografi che forniscono un output digitale, con formati diversi in base al sistema di acquisizione. In quest’ultimo caso l’intervallo temporale con cui vengono registrati i dati è generalmente inferiore a 1 ora, essendo programmabile dagli operatori, ad esempio, con una frequenza di un dato ogni 5 minuti o superiore. Queste misure sono sottoposte ad un primo controllo di qualità per rilevare gli errori più grossolani presenti nei dati grezzi dovuti, nella maggior parte dei casi, a guasti o malfunzionamenti degli strumenti di misura o di trasmissione/ricezione dei dati. Con questi dati è possibile ottenere statistiche sulle alte e basse maree, calcolare gli estremali su varie scale temporali e ricavare l’ampiezza di marea. I valori orari sono ottenuti attraverso dei filtri adeguati (o attraverso lo *smoothing* quando si debbano digitalizzare dei mareogrammi cartacei) da cui vengono successivamente ricavate le costanti armoniche della marea, necessarie per portare a termine l’analisi del residuo (cfr. § 3.2.3.2). Con le misure orarie è possibile rappresentare ed analizzare l’andamento del livello medio del mare su scala giornaliera, mensile e annuale. Questa operazione può tuttavia essere compiuta anche sui dati ad alta frequenza che abbiano passato il primo controllo di qualità.

Infine, avendo a disposizione serie continue di rilevazioni GPS, è possibile ottenere delle informazioni sul livello medio del mare anche in termini assoluti. In questo caso, attraverso l’analisi delle serie continue di dati GPS e la stima della deformazione del suolo in prossimità della stazione mareografica

---

è possibile ottenere, ad esempio, il tasso assoluto di crescita del livello medio mare (Teferle N., 2000; Bingley R. et al. 2000, 2001; Shaker A. et al., 2011).

### 3.1.3 L'importanza dei metadati

La disponibilità di metadati associati alle registrazioni di livello di marea è di fondamentale importanza per il controllo di qualità dei dati mareografici. I metadati, infatti, forniscono molte informazioni necessarie durante il processo di validazione dei dati e per la successiva fase di archiviazione in database. Per questo motivo essi devono essere forniti secondo standard precisi, ad esempio quelli adottati dal Federal Geographic Data Committee, dal Dublin Core o dalla norma ISO 19115:2003, oppure quelli suggeriti dagli IOC Manuals and Guides. La norma ISO 19115:2003, in particolare, è stata adottata anche dallo European Sea Level Service (ESEAS) e prevede che ogni *data set* sia provvisto dei seguenti metadati:

- codice nazione (in base alla classificazione ISO);
- codice identificativo della stazione mareografica;
- organizzazione responsabile della raccolta e del trattamento dei dati;
- codice identificativo del *data set* (ad esempio, nome del sito ed anno);
- coordinate geografiche e sistema di coordinate adottato (ad esempio WGS84);
- *datum* rispetto a cui sono riferite le misure mareografiche;
- tipo di strumento installato e relative caratteristiche;
- descrizione del processo di installazione dello strumento;
- data e ora di inizio dell'acquisizione dei dati (UT);
- data e ora di fine dell'acquisizione dei dati (UT);
- eventuali controlli di qualità già applicati al *data set*;
- data policy;
- parametri misurati (livello del mare, pressione atmosferica, velocità del vento, temperatura, ecc.) con relativa unità di misura.

Anche i metadati devono essere sottoposti ad un controllo di qualità di base che consiste, ad esempio, nel verificare che alcuni di essi abbiano valori ragionevoli, come le coordinate geografiche o le date di inizio e fine registrazione, con test del tipo (EuroGOOS, 2010):

- latitudine compresa tra -90 e +90, longitudine compresa tra -180 e +180;
- anno compreso tra quello di inizio registrazione e quello presente;
- mese compreso tra 1 e 12;
- giorno compreso nel range atteso per il mese in esame;
- ore comprese tra 0 e 23;
- minuti compresi tra 0 e 59.

Oltre ai metadati appena descritti, di fatto obbligatori per ogni serie di misure, ogni *data set* dovrebbe contenere anche ulteriori informazioni affinché i dati siano adeguatamente qualificati e possano essere usati con sicurezza da ogni tipologia di utente. Queste informazioni ausiliarie si riferiscono, ad esempio (ESEAS, 2002):

- alle caratteristiche del sito in cui la stazione è posta, con documentazione (anche fotografica) dei riferimenti altimetrici (TGBM, CP, ecc.) e del *datum* prescelto;
- alle caratteristiche dello strumento installato, con modello, principio di funzionamento, metodo di misura, caratteristiche della stazione mareografica, storia operativa e programma di manutenzione, taratura e calibrazione;
- alle modalità di campionamento dei dati, con il tipo di acquisizione adottato (in continuo, istantaneo o mediato) ed il relativo intervallo temporale, i periodi di mancato funzionamento dello strumento e le eventuali correzioni applicate alle misure;
- ai controlli di qualità già applicati al *data set*, che devono essere adeguatamente documentati.

---

## 3.2 Procedure di controllo della qualità dei dati mareografici

### 3.2.1 Livelli di qualità applicabili ai dati mareografici

Alle misurazioni del livello del mare possono essere applicati diversi livelli di *quality control*, in relazione al grado di controllo che si ha sui dati e alla quantità di informazioni che verranno messe a disposizione degli utenti finali.

Lo scopo principale del controllo di qualità dei dati mareografici è quello di rilevare e, se possibile, correggere gli errori, al fine di minimizzare la conseguente perdita di informazioni. Alla luce di questo obiettivo si possono definire i seguenti livelli di qualità (Raicich, 2002; ESEAS, 2002):

- **Livello 0:** include i dati grezzi così come registrati dalla stazione mareografica, generalmente non corretti in base ai periodici settaggi dello strumento. Questa tipologia di misure può essere messa a disposizione del pubblico da parte dell'organizzazione responsabile della raccolta e del trattamento dei dati per fornire informazioni in tempo reale;
- **Livello 1:** comprende i dati che hanno superato un controllo di qualità di base e che sono stati provvisti pertanto di un apposito codice di qualità (ad esempio: valore mancante, valore sospetto, dato interpolato, cambio di *datum*, ecc., come illustrato nelle tabelle da 3.1 a 3.5). Gli intervalli di acquisizione e i parametri misurati vengono mantenuti così come forniti dalla stazione mareografica. Questi dati vengono messi a disposizione della comunità scientifica assieme alla relativa documentazione e ai metadati specifici (cfr. § 3.2.2);
- **Livello 2:** include i dati che sono stati sottoposti ad un controllo di qualità completo, comparando anche i dati di stazioni confrontabili, e rappresentati in un formato standard. In questo livello sono contenuti anche i dati estratti dalle serie complete originali (come valori orari ed estremi) nonché le elaborazioni statistiche (come i livelli medi giornalieri, mensili ed annuali) corredati da una documentazione integrale e particolareggiata (cfr. § 3.2.3);
- **Livello 3:** comprende i dati che hanno subito ulteriori correzioni dal livello 2, apportate, ad esempio, in seguito all'analisi del movimento del suolo in prossimità del mareografo condotta attraverso la tecnologia GPS (Rickards L. et al., 1997).

Alla base del controllo di qualità si pone un'attenta analisi ed ispezione dei dati grezzi di livello 0 raccolti dalle stazioni mareografiche, attraverso un procedimento modulare che si può schematizzare in più fasi applicate in successione, come verrà illustrato nei paragrafi successivi. È importante sottolineare che il processo di validazione è strutturato in modo da poter ottenere dati di livello superiore solamente se in precedenza sono stati portati a termine i controlli previsti dai livelli inferiori<sup>3</sup>. Ad esempio, i dati di livello 2 possono essere ottenuti a partire dai dati di livello 1 ma non direttamente da quelli di livello 0.

Da un punto di vista operativo è essenziale che tutte le procedure di controllo della qualità di un *data set* siano adeguatamente documentate e accompagnino sempre i rispettivi dati. I problemi accertati, gli errori riscontrati e le soluzioni adottate devono essere comprovati e inseriti all'interno di un registro in grado di tener traccia delle modifiche apportate (comprese le date in cui questi cambiamenti sono stati effettuati e l'identificazione dell'operatore che li ha determinati).

I dati grezzi di livello 0, inoltre, non devono mai essere cancellati o sostituiti dai dati di livello superiore. Essi devono essere conservati accanto ai dati validati nel caso in cui si dovesse provvedere ad un nuovo controllo di qualità partendo dai dati originali. È bene sottolineare, infatti, che la validazione dei dati non costituisce di per sé un risultato assoluto: può accadere che dati validati in passato possano essere messi in discussione a causa di errori commessi in sede di validazione o da conoscenze recenti non disponibili al momento della validazione.

---

<sup>3</sup> Nei prossimi paragrafi verranno presentate le procedure di controllo della qualità dei dati per la loro validazione ed il loro rilascio per quanto riguarda i livelli di qualità 1 e 2. Le correzioni da applicare per ottenere dati di livello 3 non sono illustrate nel presente documento. Si rimanda alla letteratura specifica per il raggiungimento di questo livello di qualità.

### 3.2.2 Validazione dei dati mareografici – Livello 1

Gli errori che possono verificarsi nei dati di livello marino e nei relativi parametri possono essere divisi in due tipologie: gli errori casuali e quelli sistematici. Tra gli errori casuali si possono includere, ad esempio, i malfunzionamenti degli strumenti di misura, le avarie elettroniche, i problemi nella trasmissione/ricezione dei dati in telemisura, l'errata trascrizione di valori numerici nelle registrazioni manuali, le errate calibrazioni dello strumento, ecc. Gli errori sistematici possono essere dovuti, ad esempio, a disomogeneità nelle procedure di raccolta dei dati mareografici o alla sostituzione dello strumento con un altro avente un principio di funzionamento diverso (cfr. § 2.1). Inoltre, lo spostamento della stazione mareografica può portare a forti discontinuità nei dati di livello marino mentre i cambiamenti morfologici dell'ambiente circostante la stazione, come l'inserimento di manufatti o costruzioni portuali, possono produrre delle tendenze nei dati o delle variazioni nei parametri propri della marea (cfr. § 3.2.3.1).

Il processo di controllo della qualità e validazione dei dati consiste nel portare a termine una serie di controlli nel *data set* originale di livello 0 (generalmente su livelli registrati ad intervalli temporali inferiori all'ora) qualificandone i dati con opportuni codici di qualità (*flags*) e creando una nuova serie di dati che incorpora le correzioni sugli errori riscontrati. Ogni singolo dato appartenente alle serie di osservazioni così ottenute deve essere contrassegnato in base ai *flags* di controllo definiti dall'organizzazione responsabile della raccolta e del trattamento dei dati, con la possibilità che questi possano cambiare a seconda dell'organizzazione in questione, come illustrato nelle seguenti tabelle.

Flag description	ARGO	SEADATANET	ESEAS	WOD	BODC
no QC was performed	0	0	0	0	Q
good data	1	1	1	0	blank
probably good data	2	2	1	0	blank
probably bad data that are potentially correctable	3	3	3	4	K
bad data	4	4	4	4	K
value changed	5	5	2	0	R
interpolated value	8	8	2	0	T
missing value	9	9	9	0	N

**Tabella 3.1** – *Quality flags del progetto internazionale Argo. Fonte: Argo (2012), "Argo data management - User's manual, Version 2.7".*

Flag description	ARGO	SEADATANET	ESEAS	WOD	BODC
no quality control	0	0	0	0	Q
good value	1	1	1	0	blank
probably good value	2	2	1	0	blank
probably bad value	3	3	3	4	K
bad value	4	4	4	4	K
changed value	5	5	2	0	R
value below detection	0	6	0	0	<
value in excess	0	7	0	0	>
interpolated value	8	8	2	0	T
missing value	9	9	9	0	N
value phenomenon uncertain	0	A	0	0	Q

**Tabella 3.2** – *Quality flags del progetto europeo SeaDataNet. Fonte: <http://www.seadatanet.org/Standards-Software/Data-Quality-Control> (consultato nel mese di giugno 2012).*



Flag description	ARGO	SEADATANET	ESEAS	WOD	BODC
no quality control	0	0	<b>0</b>	0	Q
correct value	1	1	<b>1</b>	0	blank
interpolated value	8	8	<b>2</b>	0	T
doubtful value	3	3	<b>3</b>	4	K
isolated spike or wrong value	4	4	<b>4</b>	4	K
correct but extreme value	1	1	<b>5</b>	0	blank
reference change detected	0	0	<b>6</b>	0	U
constant values for more than a defined time interval	0	0	<b>7</b>	0	Q
out of range	3	3	<b>8</b>	4	K
missing value	9	9	<b>9</b>	0	N

**Tabella 3.3** – *Quality flags dello European Sea Level Service (ESEAS). Fonte: ESEAS-RI (2002), “Quality Control of Sea Level Observations, Version 1.0”.*

Flag description	ARGO	SEADATANET	ESEAS	WOD	BODC
accepted value	1	1	1	<b>0</b>	blank
range outlier (outside of broad range check)	3	3	3	<b>1</b>	K
failed inversion check	3	3	3	<b>2</b>	K
failed gradient check	3	3	3	<b>3</b>	K
observed level "bullseye" flag and zero gradient check	3	3	3	<b>4</b>	K
combined gradient and inversion checks	3	3	3	<b>5</b>	K
failed range and inversion checks	4	4	4	<b>6</b>	K
failed range and gradient checks	4	4	4	<b>7</b>	K
failed range and questionable data checks	4	4	4	<b>8</b>	K
failed range and combined gradient and inversion checks	4	4	4	<b>9</b>	K

**Tabella 3.4** – *Quality flags del World Ocean Database – National Oceanographic Data Center (Stati Uniti d’America). Fonte: [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr\\_wod.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html) (consultato nel mese di giugno 2012).*

Flag description	ARGO	SEADATANET	ESEAS	WOD	BODC
acceptable value	1	1	1	0	<b>blank</b>
below detection limit	3	6	3	0	<b>&lt;</b>
in excess of quoted value	3	7	3	0	<b>&gt;</b>
taxonomic flag for affinis (aff.)	0	0	0	0	<b>A</b>
beginning of CTD down/up cast	0	0	0	0	<b>B</b>
taxonomic flag for confer (cf.)	0	0	0	0	<b>C</b>
thermometric depth	0	0	0	0	<b>D</b>
end of CTD down/up cast	0	0	0	0	<b>E</b>
extrapolated value	0	0	0	0	<b>H</b>
taxonomic flag for single species (sp.)	0	0	0	0	<b>I</b>
improbable value, unknown quality control source	3	3	3	4	<b>K</b>

improbable value, originators quality control	3	3	3	4	<b>L</b>
improbable value, BODC quality control	3	3	3	4	<b>M</b>
null value	9	9	9	0	<b>N</b>
improbable value, user quality control	3	3	3	4	<b>O</b>
trace/calm	0	0	0	0	<b>P</b>
indeterminate	0	A	7	0	<b>Q</b>
replacement value	5	5	0	0	<b>R</b>
estimated value	0	0	0	0	<b>S</b>
interpolated value	8	8	2	0	<b>T</b>
uncalibrated	0	0	6	0	<b>U</b>
control value	0	0	0	0	<b>W</b>
excessive difference	0	0	0	0	<b>X</b>

**Tabella 3.5** – *Quality flags del British Oceanographic Data Centre (BODC). Fonte: [http://www.bodc.ac.uk/data/codes\\_and\\_formats/request\\_format/](http://www.bodc.ac.uk/data/codes_and_formats/request_format/) (consultato nel mese di giugno 2012).*

Prima di applicare le varie fasi necessarie per la valutazione della qualità dei dati di livello di marea è necessario analizzare la documentazione contenente le operazioni svolte dal personale addetto alla manutenzione periodica dei mareografi, inserita all'interno dei metadati associati al *data set* in corso di validazione.

Ogni stazione mareografica, infatti, viene regolarmente visitata per la sostituzione dei mareogrammi, lo scarico dei dati dalle memorie fisiche e le operazioni pianificate di ispezione. Quest'ultime, in particolare, hanno lo scopo di verificare lo stato di funzionamento delle strumentazioni ed effettuare le operazioni di *stop* ai mareografi. Lo *stop* consiste nell'esecuzione di una misurazione manuale, mediante cordella metrica, del livello di marea all'interno del pozzetto di calma rispetto alla piastrina della stazione (CP). Il livello di marea rispetto al *datum* viene calcolato per differenza, sottraendo la misura manuale effettuata dall'operatore (*stop*) alla quota della piastrina mareografica (figura 2.8).

Il valore dell'altezza di marea, la data e l'ora vengono annotati su un apposito registro, aggiornato di volta in volta. Nel caso in cui, a seguito del calcolo del livello di marea rispetto al piano di riferimento, si osservi uno scostamento superiore a  $\pm 1$  cm rispetto all'altezza indicata dal mareogramma o dal display degli strumenti elettronici, l'operatore effettua la regolazione manuale del mareografo starato. Ciò avviene adattando la misura strumentale al valore misurato manualmente. Nello stesso tempo l'operazione effettuata viene annotata nell'apposita documentazione, in modo da tener memoria di tutte le operazioni di settaggio effettuate sugli strumenti di misura.

Qualora l'operatore abbia effettivamente provveduto alla regolazione manuale dello strumento, in sede di validazione è necessario ripartire linearmente a ritroso nel tempo la correzione introdotta sui dati di livello. Tale procedimento è facilmente intuibile se si ricorre ad un esempio. Si supponga che il 27 dicembre 2010 un mareografo segni ad un certo istante un livello di marea di 28 cm mentre un operatore, nello stesso istante, misuri con la cordella metrica un livello di 26 cm. Lo strumento risulta quindi starato di 2 cm. Ipotizzando che la visita precedente alla stazione sia avvenuta il 25 novembre 2010, il tempo trascorso tra le due visite, estremi inclusi, è di 33 giorni. Per introdurre la correzione di 2 cm, questo periodo di tempo viene diviso in tre parti uguali di 11 giorni: nella prima parte non viene apportata nessuna modifica, nella seconda parte si applica una correzione di 1 cm ed, infine, nell'ultima parte si passa ad una correzione di 2 cm. In questo modo si è in grado di distribuire con gradualità gli errori derivanti dalle derive strumentali dei mareografi.

Dopo aver portato a termine questo tipo di verifica con le relative correzioni sui dati di livello 0, si procede con i controlli di qualità da applicare per ottenere i dati di livello 1. Essi permettono di rilevare e correggere gli errori più grossolani presenti nei dati grezzi dovuti, nella maggior parte dei casi, a guasti o malfunzionamenti degli strumenti di misura, o ad avarie nei sistemi di trasmissione e ricezione dei dati.

---

In questo tipo di errori si possono includere:

- gli *spike*, picchi anomali del tracciato di marea di durata molto ridotta;
- gli *scarrucolamenti*, variazioni repentine del livello di marea dovute ad uno scorrimento sulla puleggia della fune agganciata al galleggiante;
- i *blocchi*, arresti prolungati del mareografo ad una quota costante;
- i *dati mancanti*, buchi nel tracciato di marea per mancata registrazione, trasmissione o ricezione dei dati;
- la presenza di *valori privi di significato fisico*, dovuti alle cause più diverse.

Da un punto di vista operativo, il miglior modo per rilevare questo tipo di errori è l'ispezione visiva del *data set*, adeguatamente rappresentato in forma grafica. Questo tipo di verifica, tuttavia, può risultare particolarmente gravosa in presenza di grandi quantità di dati e recentemente essa tende ad essere quanto più possibile automatizzata.

La procedura di controllo consiste nell'applicazione di un filtro ai dati grezzi attraverso il calcolo della differenza di livello di marea tra due osservazioni successive assumendo che, in condizioni fisiche standard, essa sia inferiore ad una certa tolleranza (filtro standard) assunta pari a:

$$toll = \frac{2\pi \cdot A \cdot dt}{720} \quad (1)$$

dove  $A$  è l'ampiezza di marea tipica del sito, mentre  $dt$  è l'intervallo di misura tra due dati successivi (cfr. § 4.2 in ESEAS, 2002). Ad esempio, con un'ampiezza di marea di 110 cm ed una granularità temporale nelle misure di 10 minuti, la tolleranza risulta pari a circa 10 cm (dati provenienti da ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico). Utilizzando tale soglia si suppone che sia minima la probabilità di avere una differenza di livello di marea di  $\pm 10$  cm in un intervallo di 10 minuti.

Per le misure di marea la tolleranza espressa dall'equazione (1) è generalmente soddisfatta, poiché il tracciato di marea è una curva che varia in modo graduale, con differenze di livello tra due osservazioni successive molto contenute. Il superamento della tolleranza avviene invece quando si presentano i problemi sopra citati. È necessario evidenziare, tuttavia, che questa è una condizione necessaria ma non sufficiente: può avvenire infatti che, in caso di forti mareggiate, il moto ondoso prodotto dal vento induca a cospicue variazioni tra due successive misurazioni del livello di marea. Tale circostanza non rappresenta un errore e si può manifestare più di frequente nelle stazioni mareografiche situate in mare aperto.

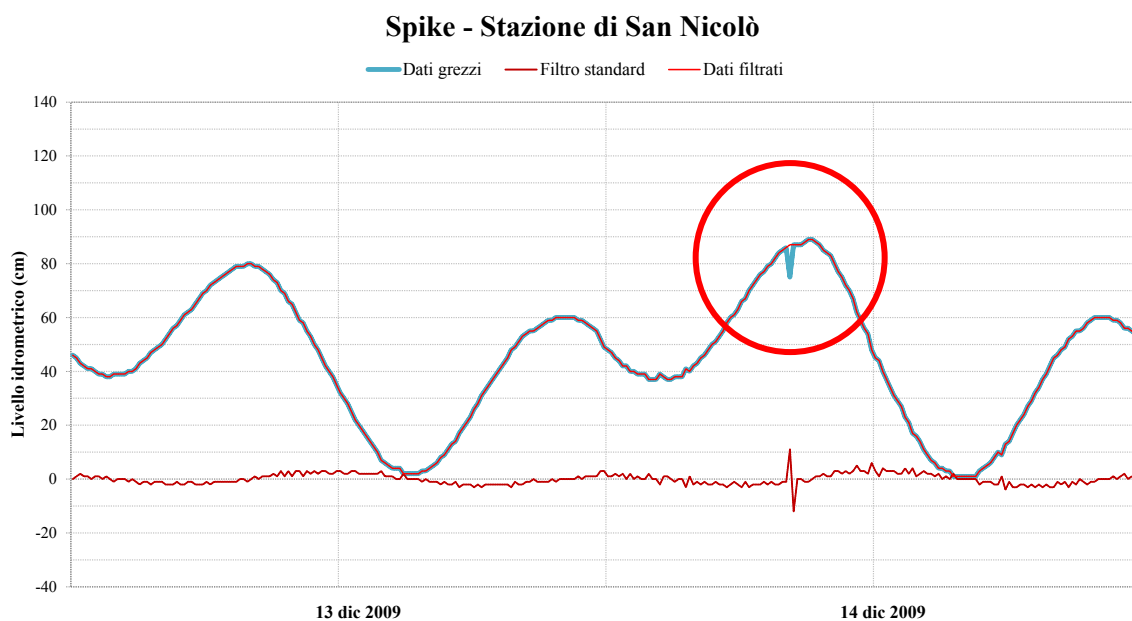
Quando l'applicazione del filtro permette di riscontrare questi tipi di anomalie si provvede alla correzione del dato grezzo di livello 0, con modalità diverse a seconda del tipo di errore rilevato. Per minimizzare la perdita di informazioni, la correzione dei dati errati è sempre da preferire alla loro eliminazione, pratica quest'ultima da adottare solamente in caso di particolari condizioni di incertezza. La correzione deve comunque essere effettuata con cautela, al fine di escludere l'introduzione di informazioni artificiali nel *data set*. Inoltre dovranno essere utilizzati solamente dati che abbiano superato tutti i controlli di qualità, provenienti da altri strumenti presenti nella stessa stazione mareografica o da stazioni situate nelle immediate vicinanze a quella in esame (Raicich, 2002).

### 3.2.2.1 Individuazione di uno *spike*

La presenza di uno *spike* è segnalata da un picco anomalo presente nel tracciato di marea, con il filtro standard che subisce una rapida escursione positiva e negativa. La correzione di questo tipo di errore può esser fatta in due modi: il primo prevede l'eliminazione dello *spike* senza la sostituzione del valore di livello di marea che si presume essere corretto. Il tracciato di marea rimane così privo del dato registrato nell'istante in cui si è manifestato lo *spike*. Questo tipo di correzione si introduce quando nella stazione considerata è presente un solo mareografo e non si hanno altre osservazioni per integrare il dato cancellato. Il secondo metodo consiste invece nel sostituire il dato anomalo di livello

con un dato registrato da un altro strumento della stessa stazione (figura 3.2). Questa via è percorribile se in quella stazione sono presenti più strumenti e solo uno di essi presenta lo *spike*. Se entrambi gli strumenti dovessero presentare uno *spike* nello stesso istante si consiglia di mantenerlo e di indagare il fenomeno nelle successive fasi di controllo, per verificare se questo problema si manifesta anche in stazioni contermini.

Un metodo più sofisticato per la rilevazione di eventuali *spike* si basa sul test di adattamento di una *spline* applicata ad una finestra mobile. L'ampiezza della finestra temporale dev'essere pari a circa 12-16 ore, centrata nell'istante temporale che si sta indagando. Il grado della *spline*, normalmente pari a 2, può essere comunque selezionato e determinato in base alle caratteristiche della marea e alla granularità temporale con cui vengono registrati i dati. L'algoritmo dovrà segnalare come *spike* i valori che differiscono più di 3 volte lo scarto quadratico medio dalla *spline*. Questo procedimento va poi ripetuto anche sui residui (dati dalla differenza tra il livello misurato e la marea astronomica prevista) al fine di rilevare gli *spike* che non sono stati riscontrati direttamente sui livelli osservati (ESEAS, 2002; EuroGOOS, 2010). Per questo motivo l'utilizzo del metodo delle *spline* non può essere applicato sui dati ricevuti in tempo reale, ma può essere utilizzato solamente per controlli in tempo differito. In questo modo sarà possibile rilevare gli *spike* effettivamente presenti e non catalogare erroneamente come tali alcuni fenomeni reali come, ad esempio, oscillazioni ad alta frequenza dovute alle sesse o agli tsunami.



**Figura 3.2** – Esempio di *spike* con relativa correzione. Stazione di San Nicolò (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 13-14 dicembre 2009.

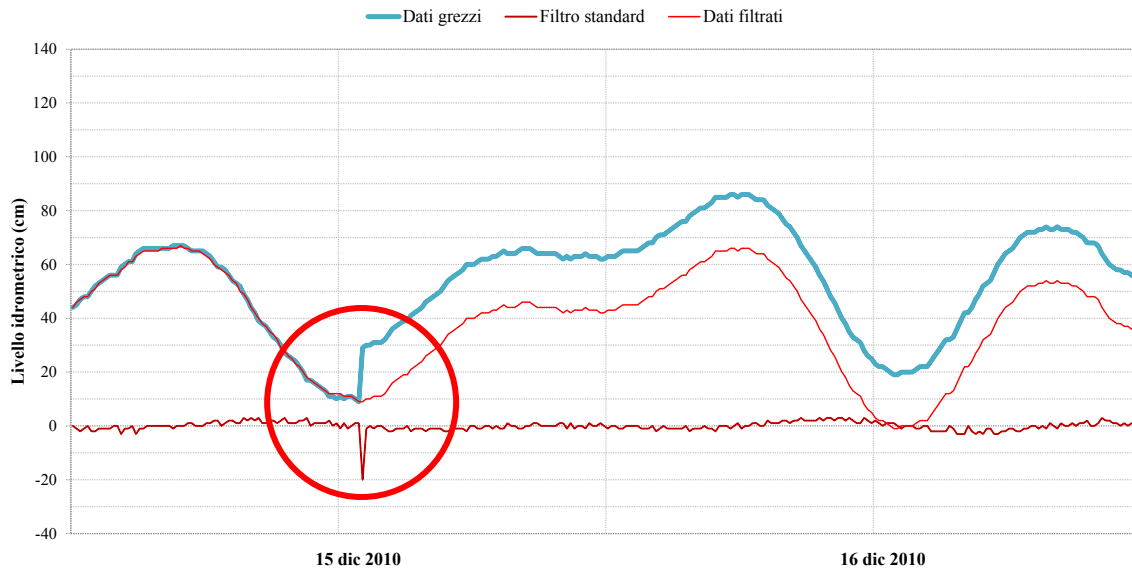
### 3.2.2.2 Individuazione di uno scarrucolamento

Uno scarrucolamento, errore tipico degli strumenti a galleggiante, si manifesta come una improvvisa traslazione del tracciato di marea, con il filtro standard che subisce una variazione pari all'entità dello scarrucolamento. Per correggere questo tipo di errore, analogamente a quanto visto per lo *spike*, si può ricorrere alle osservazioni di un altro strumento posizionato nella stessa stazione, sostituendo tutti i dati registrati dal mareografo dal momento dello scarrucolamento fino al suo nuovo settaggio da parte del personale addetto alla manutenzione.

Se nella stazione è presente un solo mareografo la correzione è più complessa, in quanto è necessario conoscere il diametro della puleggia collegata al mareografo. Con questa informazione è possibile correggere l'errore e ripristinare la continuità della serie dei dati traslando le misure di una quantità

pari alla semicirconferenza della puleggia. Questo metodo è facilmente applicabile se lo scarrucolamento si verifica in prossimità dei colmi o dei cavi della marea (figura 3.3). Qualora esso si presenti durante le fasi di marea crescente o calante la correzione potrebbe essere falsata a causa del forte gradiente di livello che si manifesta in queste condizioni.

### Scarrucolamento - Stazione di Lido diga sud

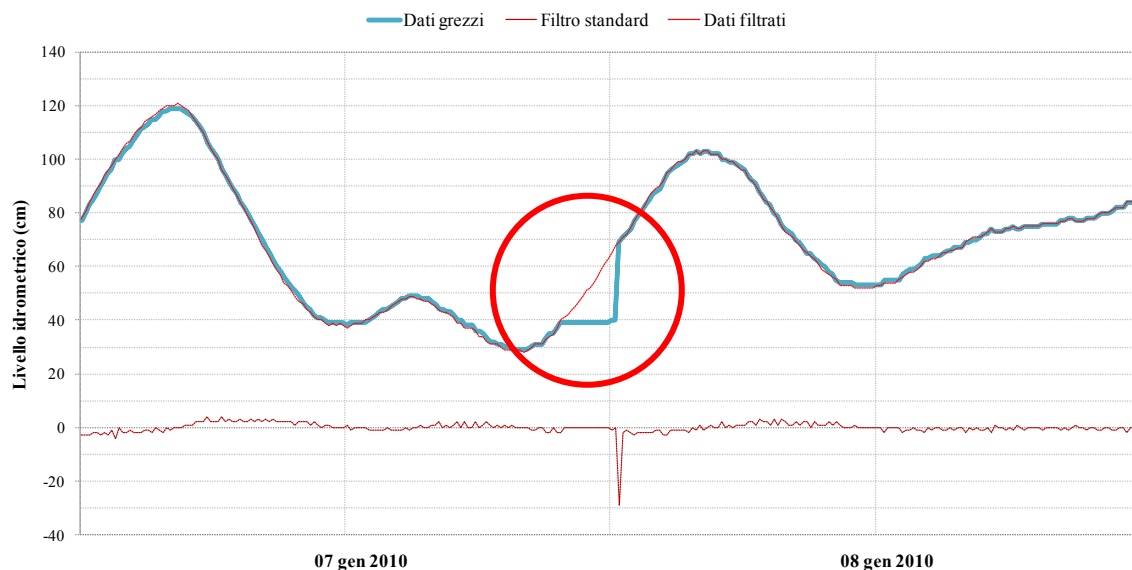


**Figura 3.3** – Esempio di scarrucolamento con relativa correzione. Stazione di Lido Diga Sud (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 15-16 dicembre 2010.

#### 3.2.2.3 Individuazione di un blocco

La presenza di un blocco del mareografo è segnalata dal manifestarsi di una quota costante nel tracciato di marea per una durata pari a quella del blocco. Il filtro standard non fornisce indicazioni nel momento in cui lo strumento si blocca, ma presenta un picco nel momento in cui avviene lo sblocco e lo strumento inizia a misurare regolarmente (figura 3.4).

### Blocco a quota costante - Stazione di Punta della Salute

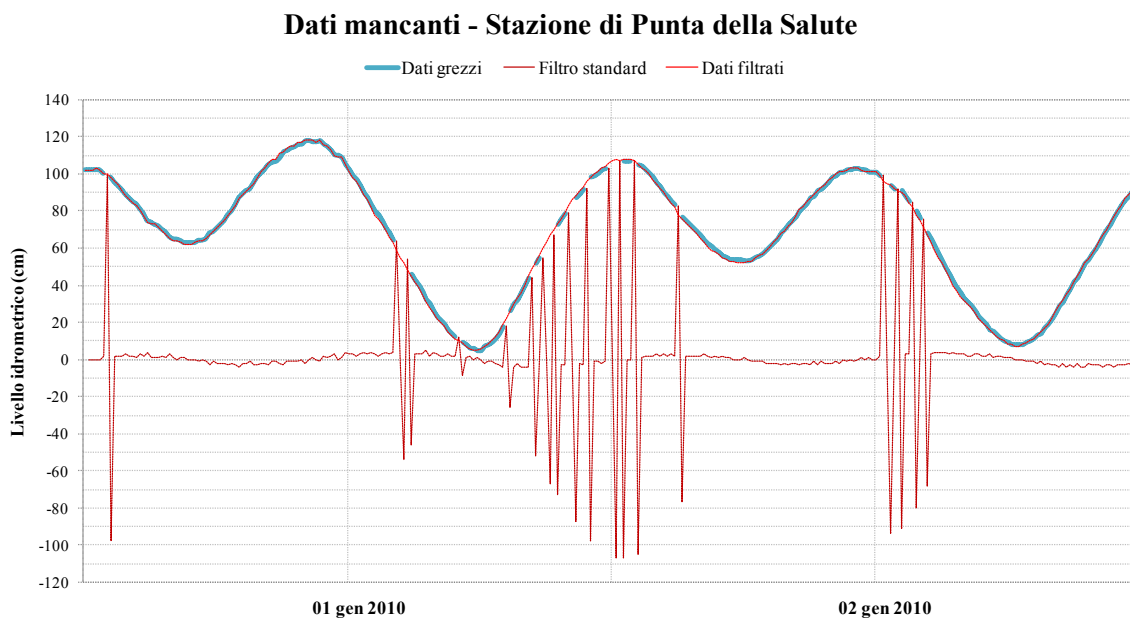


**Figura 3.4** – Esempio di blocco con relativa correzione. Stazione di Punta della Salute (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 7-8 gennaio 2010.

Il numero di dati o di intervalli temporali in base ai quali si può interpretare un blocco effettivamente come tale dipende dalla granularità temporale con cui vengono raccolte le misure di livello. Per dati registrati ad intervalli orari, ad esempio, si può individuare un blocco quando la marea, in una fase lontana dalla quadratura astronomica, non subisce variazioni in 3 osservazioni successive (IOC, 1992). La correzione di questo tipo di problema dipende dalla ridondanza di strumenti presenti all'interno della stazione. Se essa è dotata di un solo strumento vengono cancellati i dati registrati nell'intervallo di tempo in cui il mareografo è rimasto bloccato. Se la stazione è equipaggiata con più strumenti, si possono utilizzare i dati registrati da un altro mareografo per sostituirli a quelli dello strumento bloccato.

#### 3.2.2.4 Integrazione di dati mancanti

Quando vi sono dati mancanti nel tracciato di marea, esso presenta dei veri e propri buchi mentre il filtro standard mostra una serie di picchi in corrispondenza dei dati mancanti (figura 3.5). La mancanza del dato può essere dovuta ad un'avaria temporanea nei sistemi elettronici di registrazione oppure a dei problemi di trasmissione o ricezione del segnale di invio dei dati dalla stazione mareografica alla centrale di raccolta.



**Figura 3.5** – Esempio di dati mancanti con relativa correzione. Stazione di Punta della Salute (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 1-2 gennaio 2010.

Per correggere questo tipo di problema, se il dato mancante non è stato registrato per un'avaria temporanea del mareografo, è sufficiente integrare i dati mancanti con altre registrazioni provenienti da uno strumento presente nella stessa stazione, possibilmente dopo che queste abbiano superato tutti i controlli di qualità. Se l'indisponibilità della misura di livello, invece, è dovuta ad un problema di ricezione o trasmissione del segnale, il dato è comunque presente nella memoria locale del mareografo (*data logger*). Per averlo a disposizione si deve però attendere lo scarico manuale dei dati da parte del personale addetto alla manutenzione della stazione mareografica.

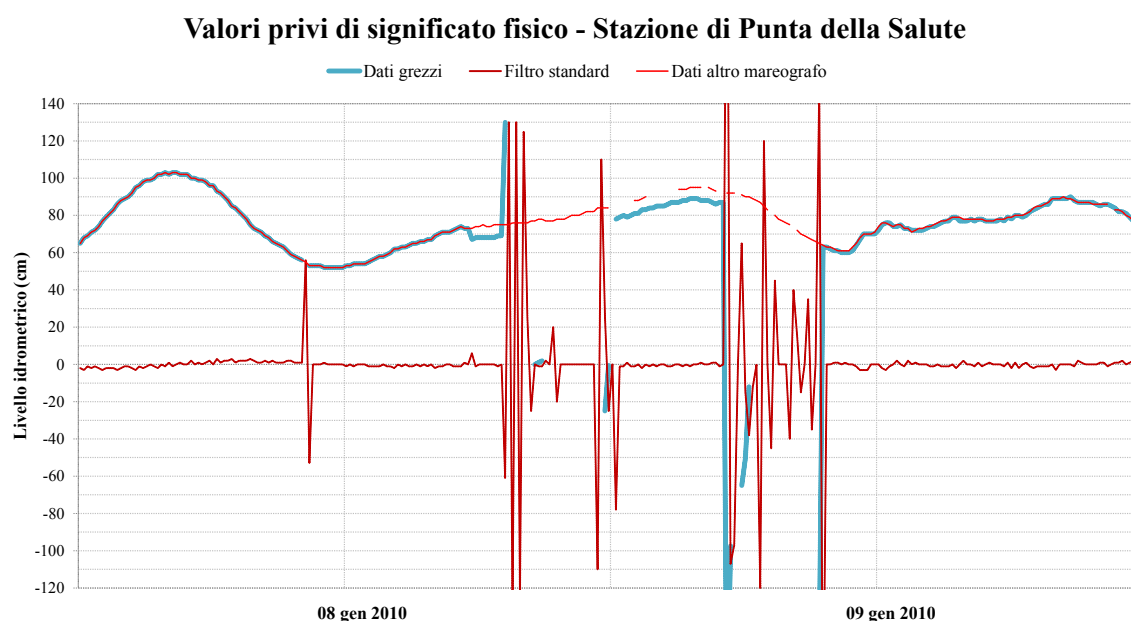
Qualora la stazione sia costituita da un solo strumento e non si possano ottenere i dati dal *data logger* del mareografo, è possibile interpolare i dati mancanti solamente a condizione che la componente astronomica della marea sia predominante rispetto a quella meteorologica. Tuttavia, a causa del periodico alternarsi di basse ed alte maree, non è consigliabile interpolare dati mancanti che superino una finestra temporale di 6-7 ore (IOC, 1985).



### 3.2.2.5 Individuazione di dati privi di significato fisico

La presenza di valori privi di significato fisico può essere dovuta alle cause più diverse, ma in genere essi sono causati da malfunzionamenti o avarie degli strumenti di misura (figura 3.6). La loro individuazione, oltre ad essere basata su un'analisi visiva del tracciato di marea, può essere resa immediata programmando in modo corretto il mareografo. Dopo aver scelto un adeguato *range* di valori all'interno dei quali può oscillare la marea nel sito in esame, lo strumento archivia come dato privo di significato fisico la misura di livello che cade al di fuori del *range* preimpostato.

La correzione di questo tipo di problema prevede l'eliminazione del dato errato e la sua eventuale sostituzione con osservazioni corrette provenienti da un altro strumento della stessa stazione mareografica, ove presente.



**Figura 3.6** – Esempio di tracciato di marea contenente valori privi di significato fisico. Stazione di Punta della Salute (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 8-9 gennaio 2010.

### 3.2.2.6 Estrazione dei dati orari ed applicazione del filtro di Pugh

Dopo aver portato a termine le verifiche appena descritte ed aver provveduto eventualmente a correggere o eliminare i dati errati, il passaggio al controllo di qualità successivo (dati di livello 2) prevede, come *step* intermedio, l'estrazione dei dati orari a partire dalle osservazioni registrate con granularità temporale maggiore. Le misure di livello, infatti, vengono raccolte normalmente con un intervallo temporale compreso tra 1 minuto e 1 ora, e pari nella maggioranza dei casi a 5, 6 o 10 minuti. Intervalli inferiori al minuto si possono prevedere solamente nelle regioni in cui ricorrono frequentemente le sesse o si debbano predisporre sistemi di allerta contro gli tsunami.

L'estrazione dei livelli a cadenza oraria si realizza attraverso un processo di filtro dei dati che elimina le alte frequenze presenti nel segnale di marea in base alla frequenza di taglio (*cut-off*) propria del filtro utilizzato<sup>4</sup>. Questo procedimento consente di ottenere dei dati filtrati dall'eventuale rumore di fondo dovuto al moto ondoso, mantenendo al tempo stesso la specificità del fenomeno della marea. L'applicazione del filtro, inoltre, risulta particolarmente utile per il calcolo della marea astronomica e la conseguente analisi del residuo, dal momento che molti dei software che permettono di calcolare il contributo astronomico utilizzano in input dati orari di livello (Foreman, 1996; Tomasin, 2005).

<sup>4</sup> Non si confonda questa tipologia di filtro utilizzata per l'estrazione dei dati orari con il filtro standard precedentemente applicato.

In letteratura esistono vari tipi di filtro applicabili per l'estrazione dei dati orari (Godin, 1972) ma il filtro di Pugh risulta essere tra i più utilizzati ed efficaci (Pugh, 1987).

Questo filtro permette il calcolo dei valori orari partendo da osservazioni registrate ad intervalli di 5, 10, 15 o 30 minuti, è di tipo simmetrico (non introduce quindi degli sfasamenti) e si basa sull'applicazione della seguente formula:

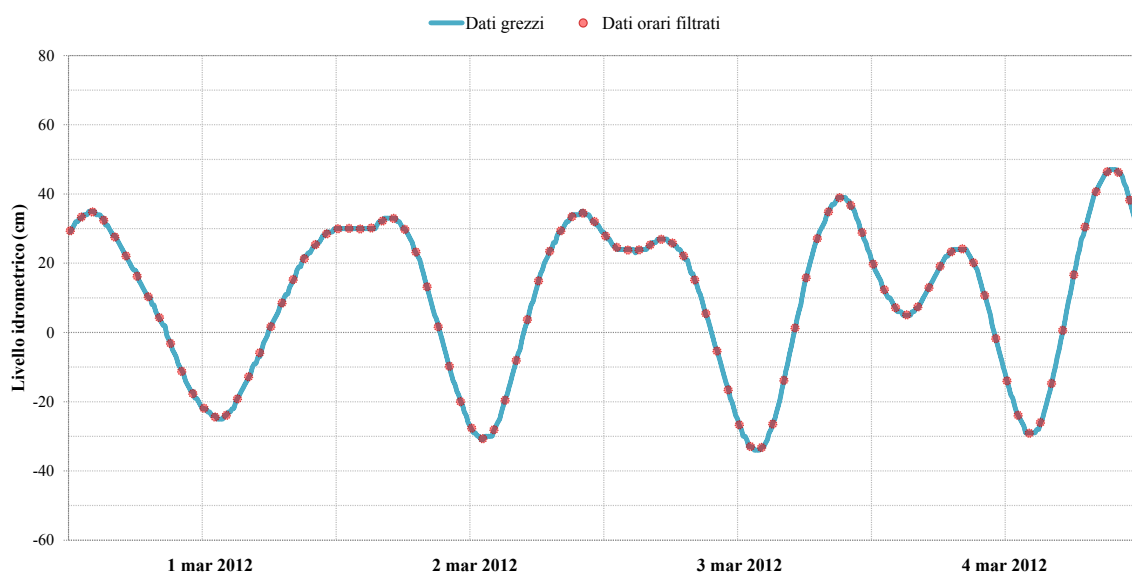
$$X_f(t) = F_0 \cdot X(t) + \sum_{m=1}^M F_m \cdot [X(t+m) + X(t-m)] \quad (2)$$

dove  $X_f(t)$  è il dato orario filtrato,  $X(t)$  è il livello registrato al tempo  $t$ ,  $F_{0...m}$  sono i pesi da applicare alle osservazioni registrate ad intervalli inferiori all'ora (tabella 3.6). Utilizzando l'equazione (2), il livello riferito ad un'ora specifica viene messo in relazione con i dati registrati precedentemente e successivamente a tale istante, all'interno di una finestra temporale la cui ampiezza dipende dalla frequenza con cui vengono raccolti i dati. Ad esempio, se l'intervallo di acquisizione è di un dato ogni 10 minuti, per ottenere il dato orario filtrato saranno necessari 55 dati, in particolare: il livello registrato all'ora in esame, 27 misure antecedenti a quell'istante (pari a 4 ore e mezza di osservazioni) e 27 misure successive. In questo modo il dato orario filtrato viene riferito all'ora centrale di una finestra temporale avente un'ampiezza di 9 ore. Il risultato dell'applicazione del filtro di Pugh è rappresentato, quindi, da una serie di misure orarie estratte dal *data set* di livelli registrati ad intervalli temporali inferiori all'ora (figura 3.7).

Dati raccolti ogni 5 minuti (M = 54)						
0	0.0648148					
1	0.0643225	0.0628604	0.0604728	0.0572315	0.0532331	0.0485954
2	0.0434525	0.0379505	0.0322412	0.0264773	0.0208063	0.0153661
3	0.0102800	0.0056529	0.0015685	-0.0019127	-0.0047544	-0.0069445
4	-0.0084938	-0.0094346	-0.0098173	-0.0097074	-0.0091818	-0.0083247
5	-0.0072233	-0.0059642	-0.0046296	-0.0032942	-0.0020225	-0.0008672
6	0.0001321	0.0009493	0.0015716	0.0019984	0.0022398	0.0023148
7	0.0022492	0.0020729	0.0018178	0.0015155	0.0011954	0.0008830
8	0.0005986	0.0003568	0.0001662	0.0000294	-0.0000560	-0.0000970
9	-0.0001032	-0.0000862	-0.0000578	-0.0000288	-0.0000077	0.
Dati raccolti ogni 10 minuti (M = 27)						
0	0.1296296					
1	0.1257208	0.1144630	0.0971907	0.0759010	0.0529545	0.0307322
2	0.0113057	-0.0038254	-0.0138889	-0.0188692	-0.0194147	-0.0166494
3	-0.0119285	-0.0065884	-0.0017344	0.0018986	0.0039967	0.0046296
4	0.0041458	0.0030310	0.0017660	0.0007136	0.0000589	-0.0001939
5	-0.0001725	-0.0000576	0.			
Dati raccolti ogni 15 minuti (M = 18)						
0	0.1944445					
1	0.1814184	0.1457861	0.0967236	0.0460983	0.0047054	-0.0208333
2	-0.0294517	-0.0249741	-0.0138889	-0.0026017	0.0047148	0.0069445
3	0.0054533	0.0026489	0.0004986	-0.0002909	-0.0001735	0.
Dati raccolti ogni 30 minuti (M = 12)						
0	0.3750000					
1	0.2898969	0.10622099	-0.0355467	-0.0625000	-0.0164860	0.0208333
2	0.0179817	0.	-0.0061020	-0.0020433	0.0002740	0.

**Tabella 3.6** – Lista dei coefficienti  $F$  da utilizzare nell'equazione (2) suddivisi in base all'intervallo temporale con cui vengono registrati i dati di livello di marea. Nella riga 0 sono riportati i coefficienti  $F_0$ , seguiti dagli altri in gruppi di sei ed in ordine crescente. Ad esempio, per i dati raccolti ogni 10 minuti il coefficiente  $F_{20}$  è pari a 0.0030310. Fonte: Pugh (1987), "Tides, surges and mean sea level", John Wiley & Sons Ltd.

### Filtro di Pugh - Stazione di Punta della Salute

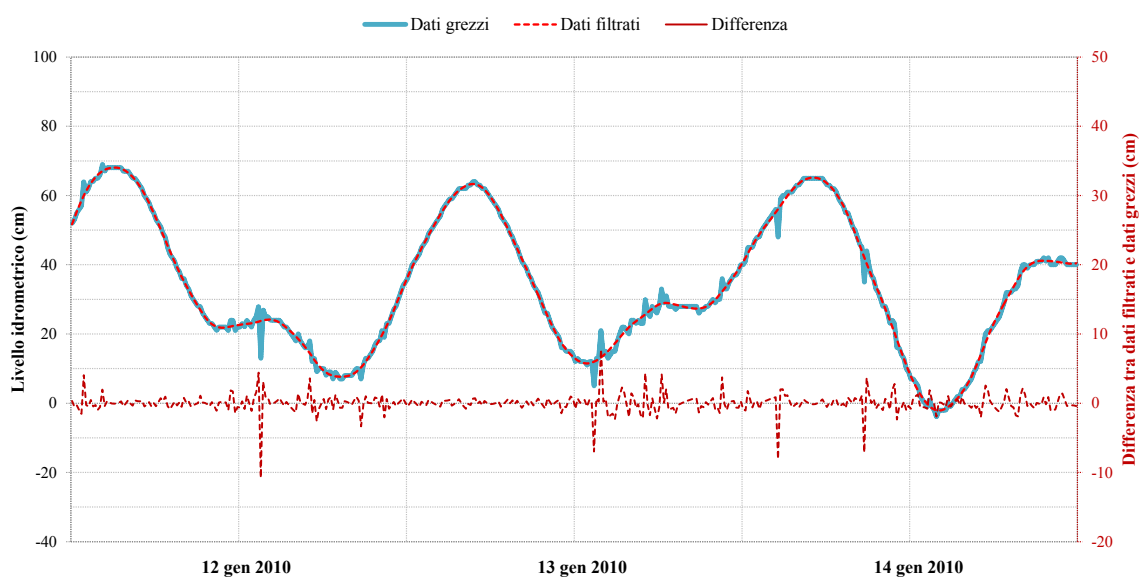


**Figura 3.7** – Filtro di Pugh applicato per l'estrazione di dati orari. Stazione di Punta della Salute (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 1-4 marzo 2012.

Un'ulteriore possibile utilizzo del filtro di Pugh consiste nell'applicarlo ricorsivamente a tutte le misure contenute in un *data set* e non solamente ai dati registrati con cadenza oraria. Questo procedimento consente di filtrare dal segnale di marea le oscillazioni ad alta frequenza dovute, ad esempio, al forte moto ondoso o al passaggio di grandi imbarcazioni in prossimità della stazione mareografica (figura 3.8). L'algoritmo infatti è in grado di eliminare dal segnale le vibrazioni aventi frequenza superiore a 0.5 cicli/ora (EuroGOOS, 2010).

L'applicazione del filtro di Pugh con questa finalità va portata a termine con particolare cautela, poiché si ottengono buoni risultati solamente se il tracciato di marea è privo di dati mancanti. Inoltre, i dati filtrati che vadano ad integrare o sostituire quelli originariamente misurati devono essere segnalati in modo adeguato con un apposito *flag*.

### Filtro di Pugh - Stazione di Fusina



**Figura 3.8** – Filtro di Pugh applicato per la riduzione del rumore dovuto al moto ondoso nel segnale di marea. Stazione di Fusina (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 12-14 gennaio 2012.

---

### 3.2.3 Validazione dei dati mareografici – Livello 2

Partendo dai dati che hanno superato i controlli di qualità previsti per il livello 1, illustrati nel paragrafo precedente, è possibile ottenere i dati di livello 2, che presuppongono un controllo di qualità puntuale per l'intero *data set*. Le ulteriori verifiche da applicare consentono di rilevare e correggere gli errori che non sono stati riscontrati nelle fasi precedenti come, ad esempio, eventuali avarie dell'orologio interno del mareografo, sfasamenti temporali o errori nel posizionamento del caposaldo della stazione mareografica. Per rilevare queste anomalie è necessario portare a termine un'analisi completa della marea attraverso i seguenti controlli:

- analisi delle costanti armoniche, che consente di valutare le variazioni delle componenti armoniche della marea e di calcolare la marea astronomica (cfr. § 3.2.3.1);
- analisi del residuo, che consiste nella ricerca di scostamenti anormali nella curva del residuo, dato dalla differenza tra marea misurata e marea astronomica prevista (cfr. § 3.2.3.2);
- analisi del livello medio del mare, che consente di confrontare i livelli medi su base giornaliera, decadale, mensile ed annuale di stazioni contermini (cfr. § 3.2.3.3);

Queste verifiche vengono condotte sui dati di livello 1 registrati ad alta frequenza temporale precedentemente analizzati e corretti. I dati orari da essi estratti (cfr. § 3.2.2.6) sono utilizzati per il calcolo della marea astronomica necessaria per l'analisi del residuo, ma non sostituiscono le osservazioni registrate con granularità temporale maggiore. Al termine del processo di controllo di qualità, pertanto, i dati di livello 2 dovranno avere la stessa granularità temporale dei dati di livello 1 da cui derivano, possibilmente affiancati dai dati orari filtrati e da elaborazioni statistiche di sintesi, per fornire all'utente finale informazioni globali sulle serie validate (cfr. § 3.2.3.4).

All'interno delle verifiche applicate per ottenere dati di livello 2 possono essere inseriti anche dei metodi empirici, utilizzabili in quelle situazioni in cui la quantità e la posizione delle stazioni siano tali da garantire una densità di monitoraggio molto elevata. È questo il caso, ad esempio, delle lagune, ed in particolare delle stazioni appartenenti alla Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico (cfr. § 2.3.2), per le quali sono applicabili i seguenti ulteriori controlli:

- analisi per direttrice di propagazione della marea, che permette di mettere a confronto la marea misurata in stazioni mareografiche poste nella stessa direttrice di propagazione;
- analisi del fenomeno delle quadrature, che consiste nella comparazione dei livelli di stazioni vicine durante una marea di quadratura che si presenti in particolari condizioni meteorologiche.

Questi due tipi di analisi, complementari alle prime tre esposte, saranno discusse nel § 3.2.4.

#### 3.2.3.1 Analisi delle costanti armoniche

Il calcolo delle costanti armoniche è un'operazione necessaria per la previsione della marea astronomica, componente indispensabile per effettuare la successiva analisi del residuo. Questo tipo di analisi permette di rilevare possibili errori di orologio del mareografo, che si possono manifestare con valori atipici di armoniche usualmente stabili, nonché importanti modificazioni della morfologia costiera in prossimità della stazione mareografica in esame.

La componente astronomica di marea (cfr. § 1.1.2) è descritta da una precisa formulazione matematica come sovrapposizione di varie oscillazioni armoniche elementari a diversa periodicità. Per ottenere il livello di marea astronomica in un certo istante si sommano i valori assunti in quell'istante da alcune curve sinusoidali, a cui si deve eventualmente aggiungere un livello di riferimento. La marea astronomica viene calcolata infatti con la seguente formula:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(\sigma_n t - \kappa_n) \quad (3)$$

---

dove  $A_0$  è il livello di riferimento,  $A_n$  è l'ampiezza,  $\sigma_n$  è la frequenza angolare,  $\kappa_n$  è il ritardo di fase della componente armonica  $n$ , mentre  $t$  è il tempo.

Il computo del livello  $A_0$  è di fondamentale importanza per riprodurre correttamente la marea astronomica, perché la sommatoria presente nell'equazione (3) fornisce di fatto una componente astronomica che oscilla attorno ad un livello nullo. Il termine  $A_0$  è invece legato ai fenomeni di eustatismo e subsidenza della zona in esame, ed è pari alla differenza tra il livello medio del mare annuale relativo al periodo in analisi ed il piano di riferimento assunto per le misure mareografiche. Esso risulta quindi necessario per evitare un errore sistematico nelle proiezioni. Ad esempio per la Laguna di Venezia, in cui le osservazioni mareografiche adottano come *datum* il livello medio del mare del 1897 (riferimento noto come Zero Mareografico di Punta della Salute) questa quantità è andata aumentando a partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso e dal 2010 è pari a 26 cm (Cordella et al., 2011).

L'ampiezza ed il ritardo di fase di ciascuna componente elementare inserita nell'equazione (3) sono detti costanti armoniche e possono essere calcolate analizzando ampie serie storiche di dati di livello del mare. L'estensione di tali serie, in linea teorica, dovrebbe superare la lunghezza del ciclo metonico (235 mesi lunari, pari a 19 anni solari) ossia il periodo di tempo entro cui si possa considerare terminata un'oscillazione di marea che tenga conto di tutte le costituenti astronomiche. Ai fini pratici, tuttavia, è possibile estrarre le costanti armoniche partendo come minimo da un anno di osservazioni mareografiche (EuroGOOS, 2010).

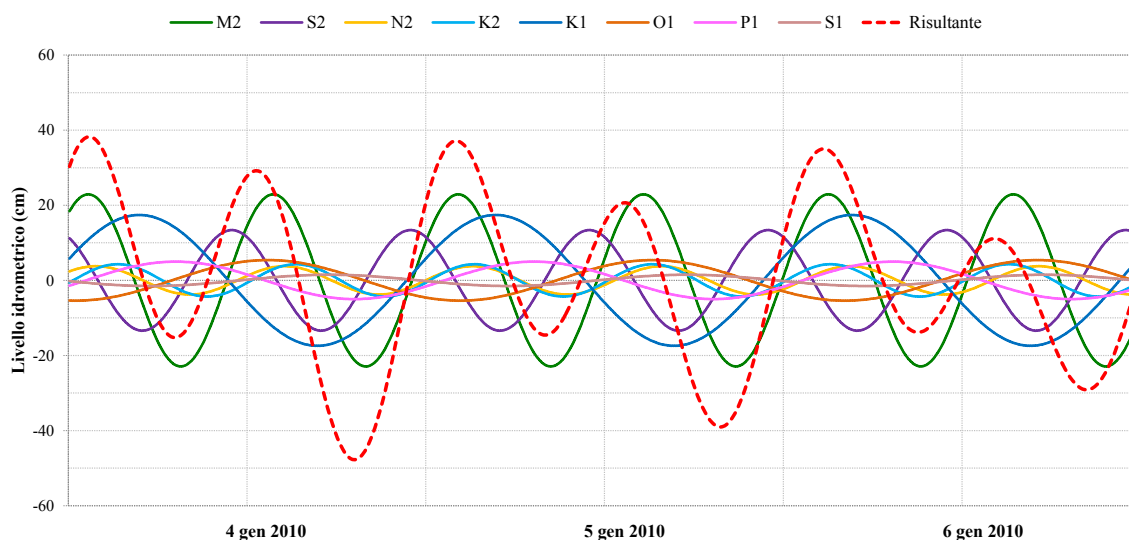
Il calcolo dell'ampiezza e del ritardo di fase di ogni componente armonica, a causa del carico computazionale che comporta, attualmente viene effettuato in modo esclusivo attraverso appositi software messi a punto da varie istituzioni nazionali ed internazionali, in particolare:

- il pacchetto Foreman, sviluppato presso l'Istituto di Scienze Oceaniche di Victoria in Canada (Foreman, 1977) e migliorato dal Sea Level Center dell'Università delle Hawaii (UHSLC) e da Puertos del Estado (PE) in Spagna (Caldwell, 1998);
- il software SLDP (Sea Level Data Processing), basato sul pacchetto Foreman, messo a punto dal Sea Level Center dell'Università delle Hawaii (UHSLC) in collaborazione con il National Oceanographic Data Center (NODC), utilizzato presso ISPRA – Rete Mareografica Nazionale (Kilonsky et al., 1991; Caldwell et al., 1992; Foreman et al., 2009);
- il pacchetto POL TASK2000, utilizzato dal Permanent Service for Mean Sea Level/Proudman Oceanographic Laboratory (Bell et al., 1999);
- il software TIRA, adottato dall'Australian National Tidal Facility (Murray, 1964);
- il software Polifemo, utilizzato presso ISPRA – Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del Litorale Nord-Adriatico (Tomasin, 2005).

È importante sottolineare che le costanti armoniche utilizzate per la previsione della marea astronomica in un certo sito non possono essere aggregate e calcolate con pacchetti diversi. Se l'analisi viene impostata inizialmente con un certo software, esso dovrà essere utilizzato per ricavare tutte le costanti armoniche necessarie (ESEAS, 2002)

Il numero di costanti armoniche da calcolare per la previsione della marea astronomica in un dato luogo dipende, infatti, dalle caratteristiche e dalla morfologia del sito stesso. Nel caso della Laguna di Venezia, ad esempio, sono sufficienti otto componenti mareali (figura 3.9) per il calcolo pratico della marea astronomica prevista (Defant, 1960), quattro semidiurne (M2, S2, N2, K2) e quattro diurne (K1, O1, P1, S1). In altre località il numero di costanti armoniche richiesto può essere superiore, specialmente in quei casi in cui la costa sia soggetta a maree dall'andamento fortemente non lineare, risenta dell'influenza di fiumi ed estuari o la configurazione del bacino presenti caratteristiche di particolare complessità. In queste situazioni il numero di costanti armoniche può essere scelto in base allo scostamento che le diverse componenti presentano rispetto ad una media vettoriale (ESEAS, 2002). È utile ricordare, infatti, che il numero di costanti armoniche è teoricamente infinito, per cui viene di norma limitato alle oscillazioni di ampiezza significativa. L'espansione di Doodson, ad esempio, include 399 costituenti armoniche, di cui 100 componenti di lungo periodo, 160 a periodicità diurna, 115 a periodicità semidiurna e 14 con periodo prossimo alle 8 ore (Doodson, 1922).

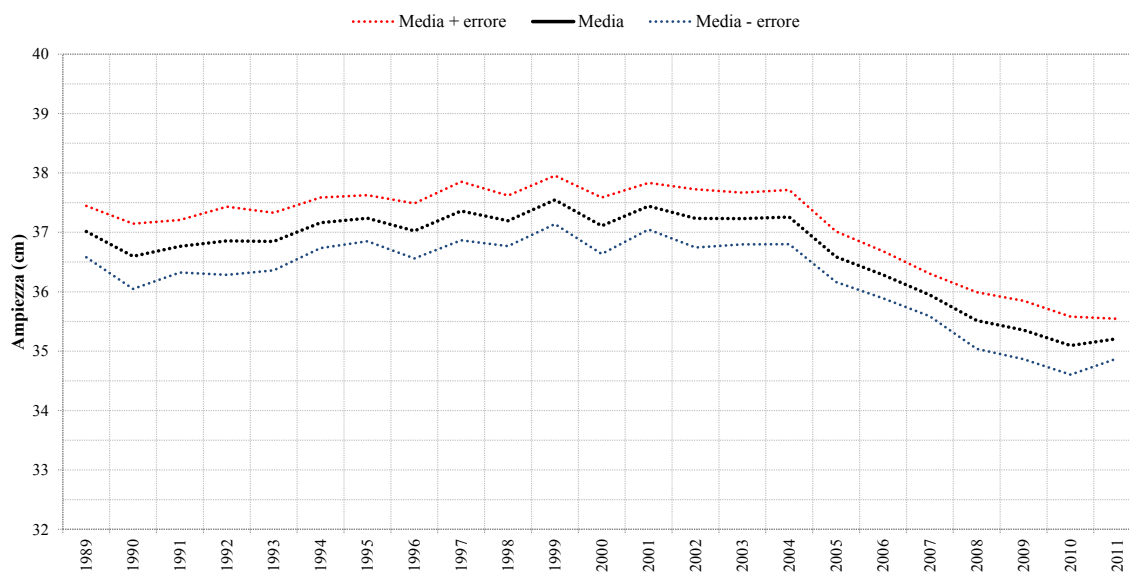
### Componenti della marea astronomica secondo l'analisi armonica: Stazione di Punta della Salute



**Figura 3.9** – Le 8 componenti principali della marea astronomica necessarie per il calcolo della marea astronomica nella stazione di Punta della Salute (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 4-6 gennaio 2012.

L'analisi delle costanti armoniche permette di accertare se siano avvenute delle importanti modificazioni morfologiche nelle vicinanze della località in cui è situata la stazione mareografica di cui si stanno controllando i dati. In questo caso infatti, esse tendono a variare nel corso degli anni e potrebbero spiegare eventuali comportamenti anomali di lungo periodo sulle registrazioni di marea (figura 3.10). Per questo motivo, inoltre, per calcolare in modo preciso la marea astronomica è sempre consigliabile utilizzare delle costanti armoniche che si basino su misure di marea molto recenti, evitando di fare semplice affidamento sui valori storici (Sposito e Vultaggio, 1988).

### Costanti armoniche M2 + S2 - Stazione di Chioggia Vigo



**Figura 3.10** – Variazione delle costanti armoniche nel tempo per due componenti della marea astronomica. Stazione di Chioggia Vigo (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), ampiezza delle componenti M2 e S2 dal 1989 al 2011.



Una volta note le costanti armoniche è possibile ricavare anche il fattore di forma della marea (Dietrich, 1963) ed analizzare eventualmente la sua variazione, attraverso la formula:

$$F = \frac{K1+O1}{M2+S2} \quad (4)$$

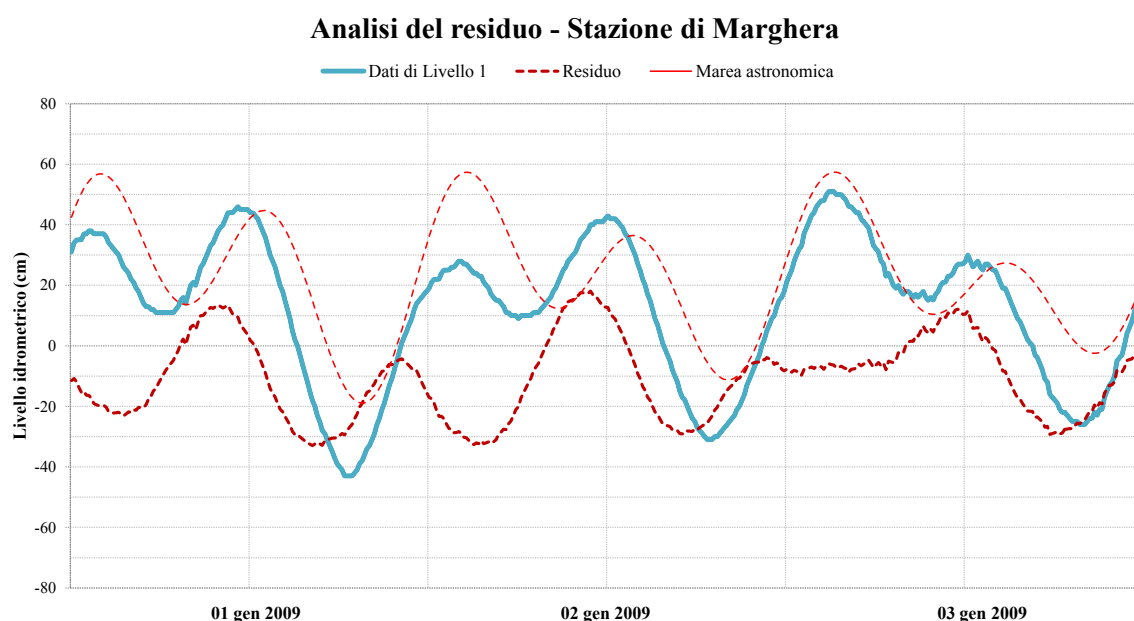
in cui sono contenute le ampiezze delle principali armoniche costituenti la marea, in particolare la lunisolare declinazione diurna (K1), la lunare diurna principale (O1), la lunare semidiurna principale (M2) e la solare semidiurna principale (S2). Inoltre, in base al valore del fattore di forma è possibile dare una classificazione rigorosa della marea secondo i seguenti intervalli (Foreman, 1996): marea semidiurna, se  $0 \leq F \leq 0.25$ ; marea mista, se  $0.25 \leq F \leq 3.00$ ; marea diurna, se  $F > 3.00$  (cfr. § 1.1.1).

### 3.2.3.2 Analisi del residuo

Il processo di analisi del residuo permette di individuare eventuali problematiche legate al tempo, in particolare malfunzionamenti dell'orologio interno del mareografo, errata attribuzione di data e orario alle misure di livello o possibili sfasamenti temporali nel tracciato di marea (*shift* o derive orarie). Questi errori possono essere dovuti, ad esempio, ad una errata regolazione dell'orologio durante le operazioni di stop del mareografo o ad un'avaria dello strumento.

Per compiere questo tipo di analisi è necessario calcolare la marea astronomica prevista per la stazione mareografica in esame, ottenibile mediante l'equazione (3) e le costanti armoniche annualizzate, ossia basate sulle serie storiche di dati registrati e sui dati della serie annuale in esame. Una volta nota la componente astronomica è possibile calcolare il residuo (*surge*), dato dalla differenza tra marea reale registrata dal mareografo e marea astronomica.

L'analisi del residuo consiste nel controllo visivo della curva rappresentativa del residuo stesso, alla ricerca di sue eventuali periodicità. Infatti se l'orologio del mareografo è impostato su un orario errato o produce sfasamenti temporali nel tracciato di marea, il residuo appare come una curva periodica, simile ad una curva di marea, fenomeno dovuto alla differenza di fase che viene a crearsi tra marea misurata e marea astronomica prevista (figura 3.11). Al contrario il residuo non presenta alcuna periodicità se i dati di livello sono corretti da un punto di vista temporale.



**Figura 3.11** – Analisi del residuo di un data set in anticipo di un'ora rispetto alla marea astronomica prevista. Stazione di Marghera (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 1-3 gennaio 2009.

---

In certi casi può accadere che il residuo sia periodico anche in assenza di reali problemi di orario del mareografo. Ciò si verifica, in particolare, quando delle onde di sessa si sovrappongono alla marea astronomica. La loro ampiezza, tuttavia, tende a smorzarsi gradualmente normalizzando il residuo, cosa che non accadrebbe in presenza di uno sfasamento temporale delle misure di livello di marea.

Qualora venga riscontrato un problema di orario nel *data set* è sufficiente, nella maggioranza dei casi, traslare avanti o indietro nel tempo la serie di misure di una quantità pari all'errore di orario riscontrato. Ciò è possibile solamente se il ritardo o l'anticipo sono dei multipli dell'intervallo di tempo con cui vengono raccolte le misure. In caso contrario è necessario interpolare i dati fino a raggiungere il posizionamento temporale corretto (ESEAS, 2002).

Per determinare l'entità della correzione possono essere utilizzati i metadati che accompagnano le misure: infatti durante le operazioni di stop per il settaggio manuale dei mareografi deve essere annotato l'orario fornito dallo strumento e quello relativo all'istante in cui viene effettuato lo stop. La differenza tra questi due orari rappresenta l'entità della correzione temporale da apportare ai dati registrati affetti da errore. In assenza di queste informazioni, l'entità della correzione può essere determinata mediante un'analisi di correlazione tra dati osservati e dati di marea astronomica previsti, oppure confrontando la fase della componente armonica M2 rispetto alla situazione originale una volta che sia stata applicata la traslazione temporale della serie errata.

Tuttavia, se una stazione mareografica è ridondante dal punto di vista della strumentazione, è raro che si presenti contemporaneamente un problema di orario in tutti gli strumenti presenti al suo interno. I diversi mareografi, infatti, registrano le misure di livello di marea in modo indipendente l'uno dall'altro, archiviando i dati su memorie fisiche separate.

È opportuno sottolineare infine che questo tipo di analisi è utilizzabile solo se l'errore di orario è superiore ai 20-30 minuti. Un errore più piccolo infatti, dell'ordine di pochi minuti, non è individuabile con la curva del residuo. In tal caso si rende necessario il confronto con il tracciato di marea fornito da uno strumento montato nella stessa stazione.

### 3.2.3.3 *Analisi del livello medio del mare*

Un'ulteriore analisi da effettuare consiste nel calcolo e nel controllo dei valori di livello medio del mare su base decadale, mensile ed annuale per stazioni contermini o appartenenti alla stessa direttrice. Questa verifica permette di mettere in relazione i livelli registrati in stazioni prossime tra loro al fine di rilevare eventuali errori non ancora riscontrati, verificare l'esatto settaggio dei mareografi ed il corretto valore del caposaldo della stazione.

Se le stazioni, ad esempio, sono situate all'interno di una laguna, il livello medio del mare deve essere simile e differire, al massimo, di una quantità pari ad 1 cm. Se invece le stazioni sono installate in mare è tollerabile una differenza più ampia, comunque contenuta entro qualche centimetro. Questa maggiore tolleranza è dovuta principalmente all'intensità del moto ondoso, che sotto costa ed in mare aperto può essere superiore a quello che si può sviluppare in una laguna, ambiente caratterizzato da bassi fondali e *fetch* limitato. In caso di mareggiate, infatti, può accadere che il pozzetto di calma di una stazione non sia in grado di filtrare efficacemente il moto ondoso che, sovrapponendosi al tracciato di marea, produce livelli medi più elevati. Inoltre l'analisi dei livelli di stazioni situate in ambienti diversi comporta la necessità di tenere in considerazione anche la morfologia dei luoghi, in quanto essi modificano la curva di marea, ne influenzano l'andamento e l'entità dei livelli misurati.

Per il calcolo del livello medio del mare si possono utilizzare due metodi, entrambi applicati ai dati orari filtrati (cfr. § 3.2.2.6), in particolare la media aritmetica e la media calcolata sui dati estratti dal filtro  $X_0$  di Doodson (IOC, 1985).

La media aritmetica è il modo più semplice e diretto per il calcolo dei livelli medi e consiste nel sommare i valori orari osservati nella decade o nel mese in esame e dividerli successivamente per il numero di ore della decade o del mese. L'errore dovuto alla presenza di cicli di marea incompleti all'inizio e alla fine di ogni mese è trascurabile ai fini pratici. La media annuale può essere calcolata

con i valori medi mensili, ponderati in base al numero di giorni di ciascun mese, oppure con la media aritmetica di tutti i valori orari registrati durante l'anno, escludendo dal calcolo i giorni in cui i dati orari risultano mancanti (Pugh, 1987).

Un metodo più raffinato per il calcolo del livello medio mensile è quello che si avvale di un filtro di convoluzione, in particolare del filtro  $X_0$  di Doodson. Esso appartiene alla categoria dei filtri numerici di tipo passa basso (*low-pass*) ed è in grado di rimuovere il fenomeno dell'*aliasing* dai livelli medi mensili, che consiste in oscillazioni ad alta frequenza su periodi di pochi giorni (Doodson et al., 1941). L'applicazione del filtro  $X_0$  comporta l'attenuazione dell'energia dell'onda di marea su frequenze superiori a quella diurna.

Esso fornisce il livello medio giornaliero calcolato a mezzogiorno partendo da osservazioni registrate ad intervallo orario. È un filtro di tipo simmetrico che richiede 24 dati orari per ogni valore calcolato, secondo la seguente formula:

$$X_T = \frac{1}{30} \cdot \sum_{d=-19}^{d=19} F(d) \cdot H(T+d) \quad d \neq 0 \quad (5)$$

dove  $X_T$  è il livello medio giornaliero calcolato al tempo  $T$ ,  $H(t)$  sono i livelli orari registrati al tempo  $t$ ,  $F(d)$  sono i pesi da applicare e  $T$  l'orario di riferimento (ore 12:00).

Utilizzando l'equazione (5), il livello medio giornaliero viene messo in relazione con i dati registrati precedentemente e successivamente a tale istante, all'interno di una finestra temporale di 39 ore. Per ottenere la media giornaliera sono necessari 24 dati orari, centrati alle ore 12:00 del giorno di riferimento, suddivisi in 12 misure nelle 19 ore antecedenti a quell'istante e 12 misure nelle 19 ore successive, ponderate in base alla seguente serie di valori:

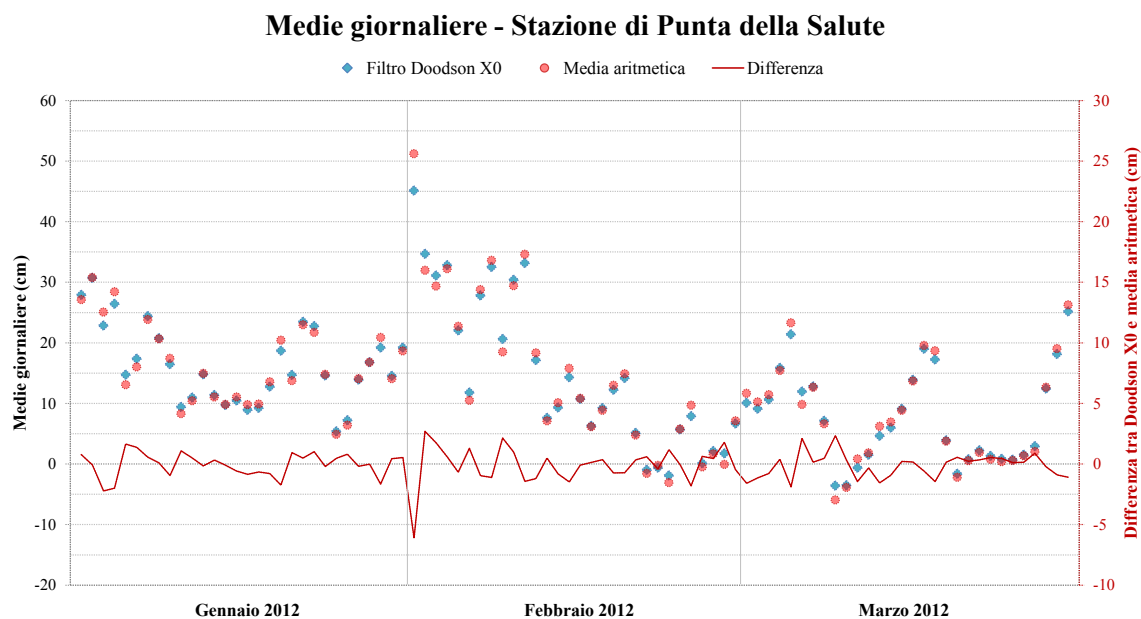
$$F(t) = (2, 1, 1, 2, 0, 1, 1, 0, 2, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1).$$

Il filtro è simmetrico, quindi  $F(t) = F(-t)$ , ed un peso pari a 0 equivale a non utilizzare quella misura per il calcolo del livello medio giornaliero. Inoltre, la condizione espressa da  $d \neq 0$  nell'equazione (5) equivale ad escludere il livello misurato alle ore 12:00 del giorno di riferimento (cfr. [Allegato A](#)).

Partendo dai livelli medi giornalieri calcolati con il filtro  $X_0$  è possibile ottenere il livello medio mensile, applicando a questi valori la media aritmetica. Il livello medio annuale può essere ricavato attraverso i livelli medi mensili, ponderandoli in base al numero di giorni di ciascun mese, oppure con la media aritmetica di tutti i livelli medi giornalieri calcolati per l'anno in esame.

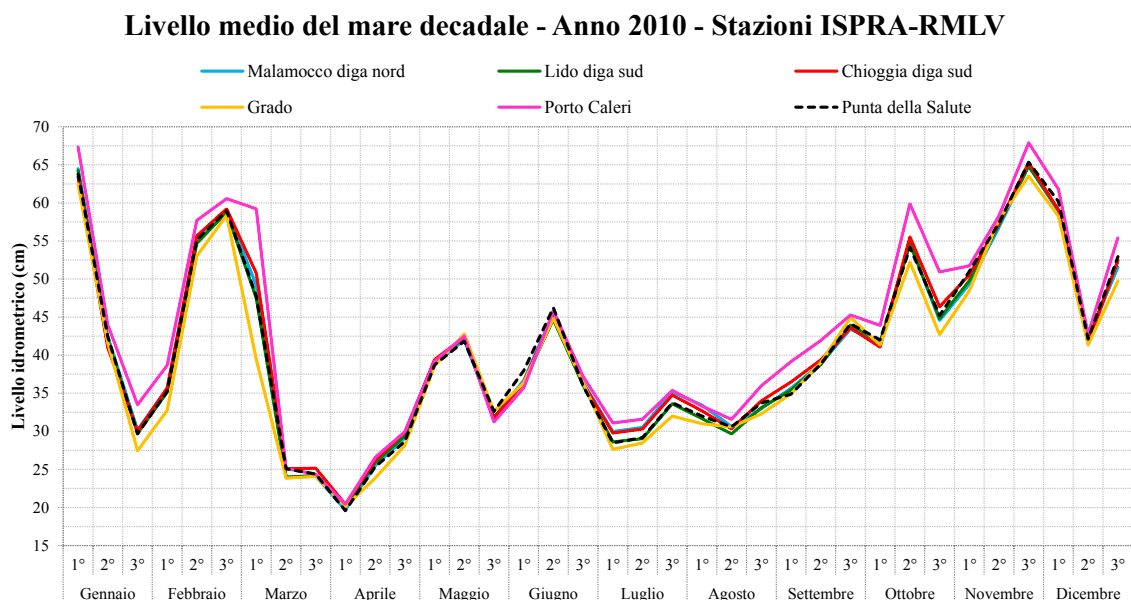
È opportuno sottolineare che il valore giornaliero calcolato attraverso il filtro  $X_0$  di Doodson può differire anche sensibilmente da quello ricavato tramite la media aritmetica dei 24 dati orari del giorno in esame (figura 3.12).

Su base mensile, tuttavia, queste differenze tendono a compensarsi ed il livello medio mensile calcolato con i due metodi proposti è praticamente coincidente se il *data set* non presenta molti dati mancanti. In questo caso, infatti, la differenza è dell'ordine del millimetro, inferiore quindi alla precisione di 1 cm con cui è necessario raccogliere le misure mareografiche (IOC, 2006). In presenza di dati mancanti, il filtro di Pugh, applicato per ottenere i dati orari, può fornire risultati poco soddisfacenti, se non addirittura errati. In questo caso, per il calcolo del livello medio giornaliero e mensile, è preferibile applicare il filtro  $X_0$  di Doodson ai dati orari estratti direttamente dalle osservazioni registrate ad intervalli temporali inferiori all'ora.



**Figura 3.12** – Differenza tra le medie giornaliere calcolate con il filtro  $X_0$  di Doodson e con la media aritmetica. Stazione di Punta della Salute (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), gennaio-marzo 2012.

Indipendentemente dal metodo utilizzato per calcolare i livelli medi giornaliere, decadali, mensili ed annuali (figure da 3.13 a 3.15), lo scopo di questa analisi è di verificare la compatibilità e la concordanza delle misure di marea registrate da stazioni mareografiche distanti l'una dall'altra ma riferite allo stesso piano di riferimento.



**Figura 3.13** – Andamento del livello medio mare decadale di alcune stazioni ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico, anno 2010.

### Livello medio del mare mensile - Anno 2010 - Stazioni ISPRA-RMLV

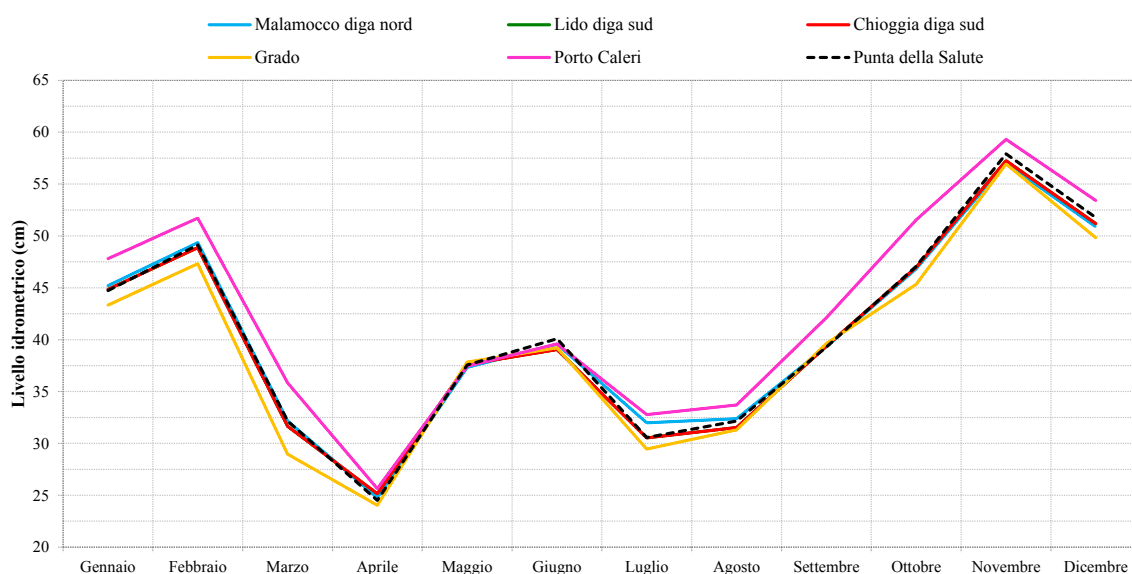


Figura 3.14 – Andamento del livello medio mare mensile di alcune stazioni ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico, anno 2010.

### Livello medio del mare annuale - Stazioni ISPRA-RMLV

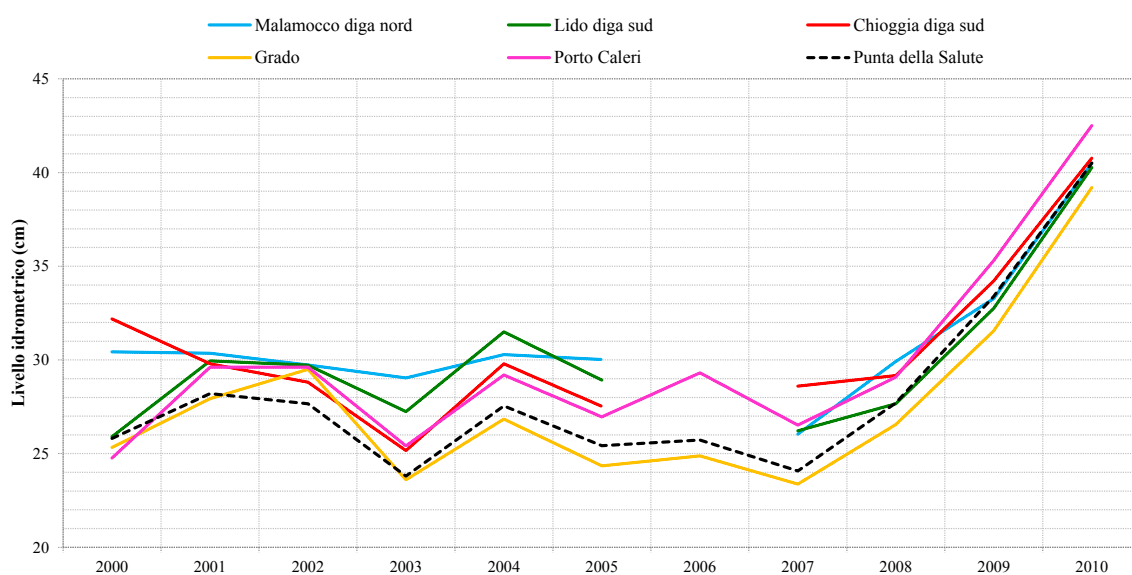


Figura 3.15 – Andamento del livello medio mare mensile di alcune stazioni ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico, anno 2010.

Qualora una stazione presenti un errore di settaggio del suo mareografo, il livello medio del mare rispetto a stazioni confrontabili può risultare discordante. L'entità della differenza di livello medio dà un'utile informazione sulla correzione da apportare ai dati di livello di marea. La finestra temporale in cui viene calcolata la media (decadale, mensile, annuale) permette inoltre di risalire al momento in cui il problema ha iniziato a manifestarsi. Quando viene rilevata una differenza significativa di livello medio del mare tra stazioni contermini, è opportuno indagare le ragioni che causano questo fenomeno, controllando adeguatamente le varie fasi della validazione. In questo modo si possono escludere eventuali errori commessi durante il processo di controllo della qualità.

---

#### 3.2.3.4 Elaborazioni statistiche

Una volta che una serie di dati di livello di marea abbia superato con successo questi controlli si può considerare validata, quindi adatta ad essere utilizzata in qualunque tipo di analisi tecnico-scientifica che ne presupponga l'impiego. Il livello di qualità 2 prevede infine di calcolare alcune statistiche di base da rilasciare accanto alle misure di marea vere e proprie. Queste statistiche dovrebbero essere ricavate anche dai *data set* storici ed essere aggiornate di anno in anno, così da poter essere utilizzate anche durante le verifiche per il controllo della qualità.

Le statistiche dovrebbero contenere, in particolare:

- i limiti superiore ed inferiore della serie di misure, dati dalla maggiore alta marea e dalla minore bassa marea, su base mensile ed annuale;
- gli estremi storici per la stazione in esame, su base mensile ed annuale;
- la massima ampiezza di marea, calcolata su base mensile ed annuale dall'alta alla bassa marea e dalla bassa all'alta marea;
- gli estremi, la media e la deviazione standard dei dati orari di livello, del residuo e dell'ampiezza di marea;
- il livello medio del mare (*mean sea level*) su base decennale, mensile ed annuale;
- il livello medio di marea (*mean tide level*) su base mensile ed annuale, dato dalla media delle alte e basse maree;
- la funzione di densità per i dati orari e i residui;
- eventuali elaborazioni più complesse sugli estremi come, ad esempio, il tempo di ritorno associato alle massime alte maree e minori basse maree.

Queste statistiche permettono di fornire all'utente finale alcune informazioni di sintesi sulle serie validate, spesso necessarie ed utili in elaborazioni speditive che non richiedano l'impiego del *data set* completo.

#### 3.2.4 Metodi empirici ed applicazioni pratiche

Esistono situazioni particolari in cui è possibile portare a termine ulteriori controlli sui *data set* mettendo a confronto le misure di strumenti posizionati a breve distanza tra loro. È questo il caso delle lagune, ed in particolare delle stazioni appartenenti alla Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico (cfr. § 2.3.2). Il numero ed il posizionamento delle stazioni appartenenti a questa rete sono tali da garantire una densità di monitoraggio molto elevata, grazie alla quale è possibile portare a termine alcune verifiche basate sull'applicazione di tecniche pratiche, tramandate dall'esperienza in materia mareografica maturata in seno all'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, le cui competenze sono ora in capo ad ISPRA. Tali metodi empirici consistono nell'analisi per direttrice di propagazione della marea e nell'analisi del fenomeno delle quadrature, di cui si mostrerà anche un'applicazione pratica utilizzata nel controllo dei capisaldi di alcune stazioni.

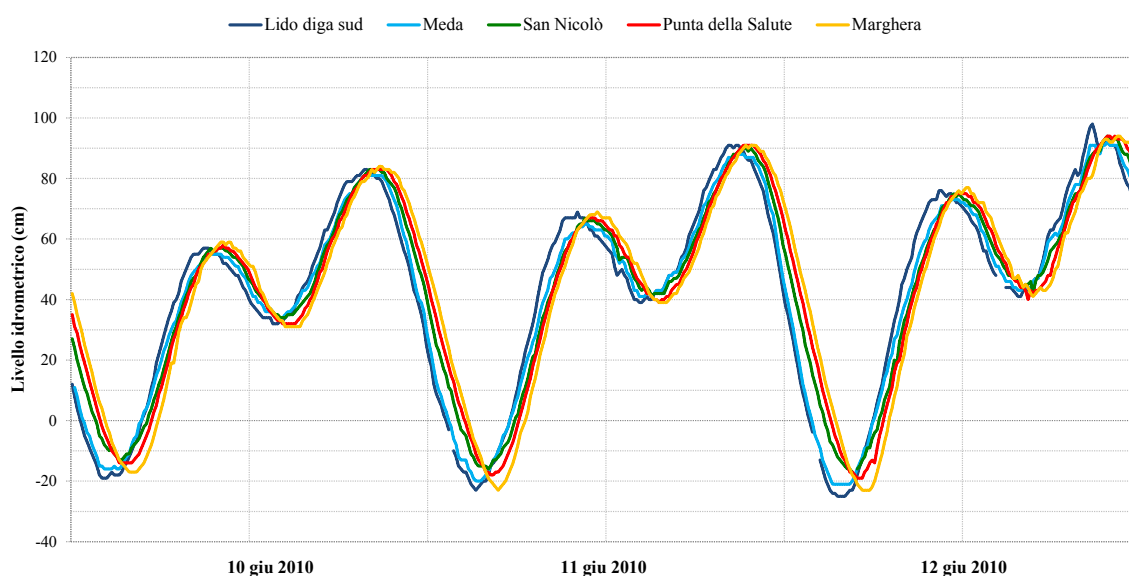
##### 3.2.4.1 Analisi per direttrice di propagazione della marea

L'analisi per direttrice di propagazione della marea consente di mettere a confronto le osservazioni raccolte da più stazioni mareografiche posizionate lungo una stessa direttrice, dove per direttrice di propagazione si intende una via preferenziale attraverso cui si muovono le masse d'acqua durante le fasi di flusso e riflusso della marea.

Questo tipo di analisi, che si effettua tramite un confronto visivo tra più curve sovrapposte, consente di rilevare eventuali errori nel tracciato di marea non riscontrati nelle fasi precedenti. Lungo una direttrice infatti, la marea subisce sempre un ritardo di propagazione ed eventualmente una attenuazione della sua ampiezza, in relazione alle caratteristiche morfologiche e dinamiche dell'ambiente in cui la stazione mareografica è situata (figura 3.16).



### Analisi per direttrice di marea - Stazioni ISPRA-RMLV



**Figura 3.16** – Andamento dei livelli di marea registrati dalle stazioni presenti sulla direttrice passante per Punta della Salute ed il bacino di San Marco (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 10-12 giugno 2010.

Mettendo a confronto i livelli misurati da stazioni poste nella medesima direttrice è possibile verificare la bontà dei dati registrati, dal momento che le curve di marea di stazioni che appartengono alla stessa direttrice hanno un andamento molto simile, salvo essere traslate nel tempo per il ritardo di propagazione ed attenuate in ampiezza. Questa analisi permette di rilevare eventuali starature dei mareografi, dovute ad errate regolazioni degli strumenti stessi, o variazioni del caposaldo della stazione mareografica causate, ad esempio, dalla subsidenza del terreno o dal movimento della intera stazione, generati da urti accidentali con imbarcazioni o da cedimenti nelle opere civili e nelle fondazioni. Inoltre, se per le varie stazioni sono disponibili statistiche storiche e dati di livello raccolti in molti anni di osservazioni, sono individuabili anche possibili sfasamenti temporali non riscontrati nell'analisi del residuo. In questo caso infatti l'organizzazione responsabile della raccolta e del trattamento dei dati, basandosi sulle caratteristiche storiche delle stazioni, conosce il ritardo di propagazione della marea rispetto ad un punto di riferimento. Ciò consente di ricavare il tempo che intercorre tra il passaggio del colmo di marea in più stazioni appartenenti alla stessa direttrice e di verificare che esso si mantenga su valori costanti: una sua variazione significativa infatti può essere indice di uno sfasamento temporale nelle registrazioni di una certa stazione.

Il concetto di direttrice, tuttavia, è adattabile in base alle situazioni che si possono presentare per una rete di stazioni mareografiche. Se la rete osservativa è costituita unicamente da stazioni situate in mare aperto a grande distanza tra loro, non esiste di fatto una direttrice di propagazione. In questo caso il confronto dei livelli misurati assume scarso significato, in quanto le caratteristiche della marea potrebbero essere molto diverse tra le varie stazioni. Se la rete è costituita invece da stazioni posizionate lungo un arco costiero, la direttrice è rappresentata dalla linea della costa ed il confronto tra i dati di diverse stazioni può fornire informazioni di un certo rilievo. Un'analisi di questo tipo può essere condotta, ad esempio, tra le stazioni di Trieste, Venezia e Ravenna della Rete Mareografica Nazionale (ISPRA-RMN), situate lungo la costa adriatica settentrionale. Se la rete, infine, si sviluppa all'interno di una laguna, come accade, ad esempio, per la Laguna di Venezia o la Laguna di Marano-Grado (ISPRA-RMLV), una direttrice di propagazione è costituita da una successione dei principali canali che innervano la laguna stessa. In questo caso l'analisi per direttrici risulta particolarmente efficace, in quanto le stazioni posizionate lungo di esse forniscono livelli idrici caratterizzati da un'effettiva attenuazione dell'ampiezza di marea ed da un ritardo di propagazione piuttosto contenuto. L'entità dell'attenuazione è variabile a seconda della morfologia della laguna in prossimità della

stazione considerata: una stazione situata nei pressi di un importante canale, ad esempio, fornisce attenuazioni molto più ridotte rispetto un'altra stazione posizionata in una zona barenicola, in cui le resistenze al moto tendono a smorzare significativamente l'onda di marea (Gottardo, 1975). L'utilizzo e l'efficacia dell'analisi per direttrice di propagazione, pertanto, vanno valutati di caso in caso, in funzione della localizzazione delle stazioni e della rete osservativa.

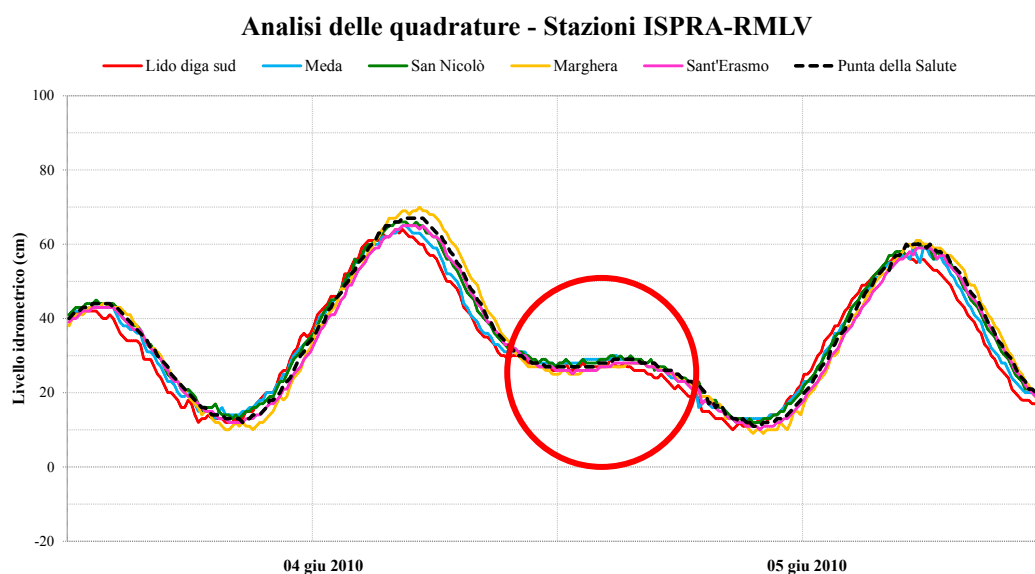
### 3.2.4.2 Analisi del fenomeno delle quadrature

Quando l'analisi per direttrice di propagazione fornisce risultati soddisfacenti, un metodo pratico per individuare eventuali variazioni nel caposaldo di una stazione mareografica consiste nell'analisi delle quadrature, fenomeni durante i quali il livello del mare all'interno di una laguna o di un tratto limitato di costa si mantiene pressoché costante per un intervallo di tempo esteso fino a sei ore (figura 3.17).

Una quadratura può verificarsi solamente in particolari condizioni meteo-marine: deve essere presente infatti una marea di quadratura (primo o ultimo quarto del mese lunare) con oscillazioni di livello contenute in  $\pm 1$  cm per una durata di almeno 3 ore, durante la quale si manifestino condizioni meteorologiche favorevoli, caratterizzate da pressione atmosferica stabile nella zona in esame ed intensità del vento inferiore a 7-10 nodi (grado 3 della scala Beaufort). Quadrature di questo tipo in un anno di osservazioni sono molto rare, nell'ordine di due o tre casi, benché il fenomeno astronomico di marea di quadratura si verifichi due volte ogni mese.

Questo tipo di analisi consente di verificare indirettamente la correttezza delle quote dei capisaldi di stazioni contermini attraverso un confronto dei livelli di marea durante la quadratura. In questa situazione, infatti, i livelli misurati da stazioni confrontabili devono essere pressoché identici. In caso contrario è plausibile supporre che una o più stazioni abbiano subito una variazione della quota del caposaldo. Ciò si manifesta in particolare quanto sussiste una differenza costante nel tempo tra i livelli registrati dalle diverse stazioni, anche a seguito dei periodici interventi di settaggio del mareografo.

Vale la pena ricordare l'importanza storica di questo metodo, che per gran parte del Novecento è stato l'unico mezzo che ha consentito di verificare la correttezza della quota dei capisaldi di stazioni che, a causa della loro ubicazione, erano difficilmente raggiungibili con linee di livellazione di alta precisione. Al giorno d'oggi è possibile ottenere risultati più precisi con tecniche come la livellazione GPS o l'interferometria satellitare tuttavia, per la sua semplicità ed economicità, questo metodo può ancora essere applicato con profitto in reti come la Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico (cfr. § 3.2.4.3).



**Figura 3.17** – Andamento del livello di marea durante una quadratura verificatasi nella Laguna di Venezia (ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico), 4-5 giugno 2010.

### 3.2.4.3 Applicazione del metodo delle quadrature per la verifica della quota dei capisaldi

In questo paragrafo si riporta un esempio pratico di utilizzo del metodo delle quadrature applicato nella verifica della quota dei capisaldi di alcune stazioni della Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico, frutto di un'analisi portata a termine nel Maggio 2011.

I livelli di marea registrati nelle stazioni di Malamocco diga nord, Faro Rocchetta e Chioggia diga sud, evidenziano come il livello misurato in queste posizioni negli ultimi anni sia significativamente superiore a quello rilevato in altre stazioni della R.M.L.V. Dall'analisi dell'andamento del livello medio mare mensile presso le suddette stazioni emerge chiaramente che i livelli di marea misurati in queste stazioni situate alle bocche di porto sono costantemente superiori a quelli rilevati sia a Punta della Salute che a Lido diga sud.

Tale situazione risulta particolarmente evidente dopo la variazione di quota del caposaldo per la stazione di Lido diga sud intervenuta il 25/05/2011, che ha comportato anche la correzione dei dati registrati in questa stazione a partire dal 01/01/2007.

Nei confronti effettuati sul livello medio mare mensile si è scelto di utilizzare le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud come punti di riferimento. La stazione di Punta della Salute infatti, data l'importanza storica, è tenuta costantemente sotto controllo (ad esempio attraverso la convenzione sul controllo del caposaldo tra ISPRA-RMLV, ICPSM e CNR-ISMAR di Venezia) e si ritiene pertanto che i dati registrati in questa posizione siano quelli meno affetti da errori. I dati provenienti dalla stazione di Lido diga sud, invece, essendo stati recentemente esaminati e corretti, possono essere utilizzati come solida base di appoggio per compiere nuove analisi su altre stazioni.

Nel confronto con gli strumenti situati alle dighe non è stata considerata la stazione di Lido diga nord, in quanto situata in una zona soggetta a continua sedimentazione, che ha causato l'interrimento di tutta l'area a ridosso della stazione; a questo problema si è aggiunta anche l'attuale ostruzione dei fori del pozzetto di calma. Tali problematiche hanno reso le misurazioni dall'anno 2010 completamente inattendibili ai fini della validazione.

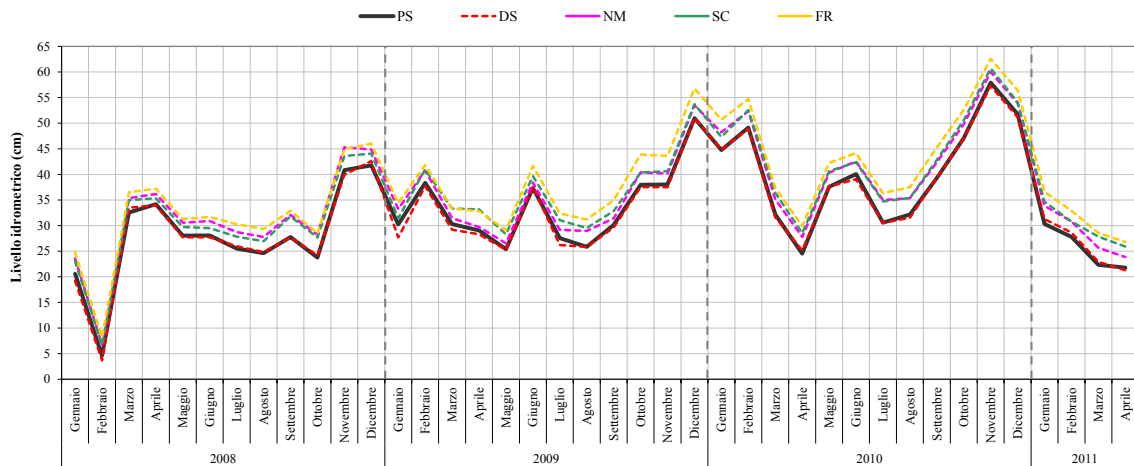
#### Analisi del livello medio del mare

Facendo riferimento al triennio 2008-2010, si riportano nella seguente tabella i livelli di medio mare annuale registrati nelle stazioni di Punta della Salute, Lido diga sud, Malamocco diga nord, Faro Rocchetta e Chioggia diga sud.

Livello medio mare annuale nel triennio 2008-2010			
Anno	2008	2009	2010
Punta della Salute	27.69 cm	33.43 cm	40.58 cm
Lido diga sud	27.58 cm	32.79 cm	40.34 cm
Malamocco diga nord	30.85 cm	35.31 cm	43.57 cm
Faro Rocchetta	31.80 cm	37.99 cm	45.82 cm
Chioggia diga sud	30.09 cm	36.25 cm	43.84 cm

L'analisi di questi dati mostra che la stazione di Faro Rocchetta registra i valori di medio mare annuale più elevati tra quelli delle stazioni considerate, con una differenza dell'ordine dei 4-5 cm rispetto a Punta della Salute. Le stazioni di Malamocco diga nord e Chioggia diga sud, pur mostrando valori di medio mare annuale confrontabili tra loro, forniscono valori comunque superiori sia a Punta della Salute che a Lido diga sud, con una differenza dell'ordine dei 3 cm. Questo tipo di andamento inoltre si mantiene inalterato anche nel corso del 2011 (figura 3.18).

**Livello medio mare mensile - Anni 2008-2011 - Stazioni alle bocche di porto**

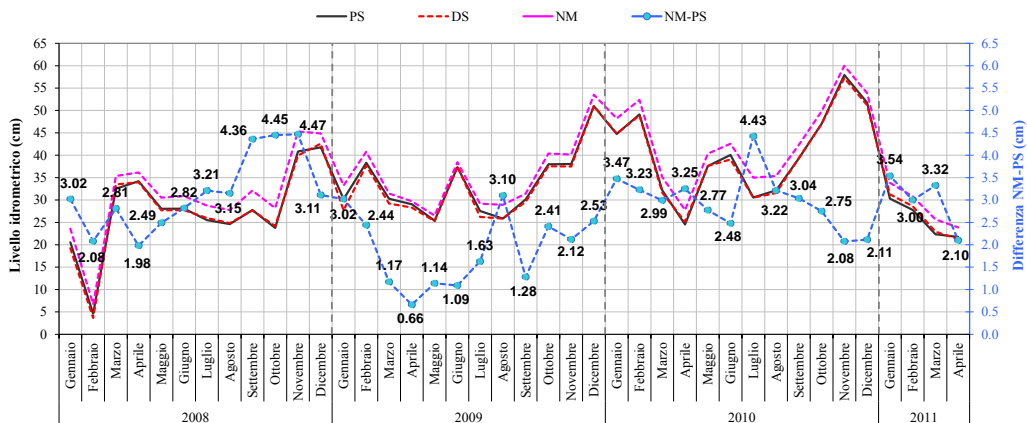


**Figura 3.18** – Andamento del livello medio mare mensile delle stazioni situate alle dighe foranee presso le bocche di porto da Gennaio 2008 ad Aprile 2011. Legenda delle sigle: PS = Punta della Salute, DS = Lido diga sud, NM = Malamocco diga nord, SC = Chioggia diga sud, FR = Faro Rocchetta. Fonte dei dati: ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico.

### Stazione di Malamocco diga nord

Analizzando le differenze di livello medio mare annuale della stazione considerata rispetto alle stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud, la tendenza sopra citata viene confermata. Nel 2008 a Malamocco diga nord si è registrata una differenza di +3.16 cm rispetto a Punta della Salute e di +3.27 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2009 tale differenza è stata di +1.88 cm rispetto a Punta della Salute e di +2.52 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2010 questa quantità è salita rispettivamente a +2.98 cm e +3.23 cm, stabilizzandosi attorno a questi valori anche nei primi mesi del 2011 (figura 3.19). Negli ultimi tre anni, pertanto, la differenza di livello medio mare tra la stazione di Malamocco diga nord e le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud è stata mediamente di +3 cm.

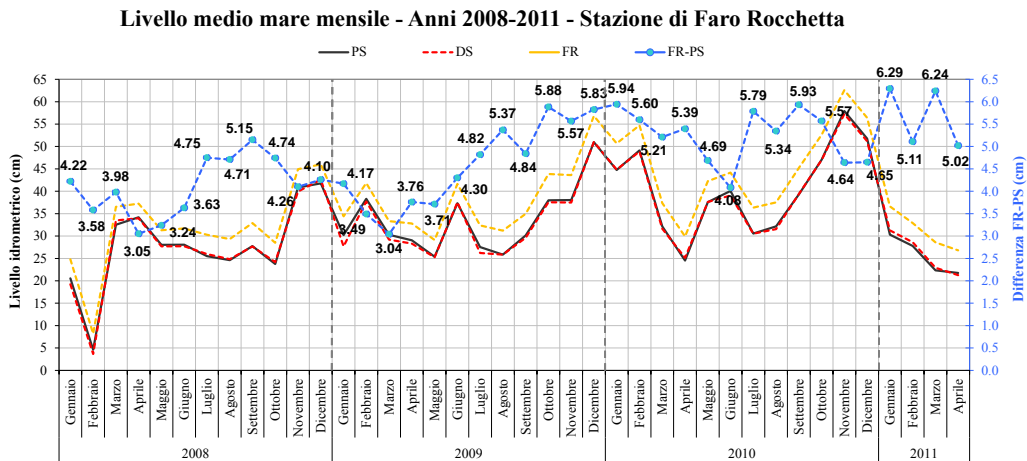
**Livello medio mare mensile - Anni 2008-2011 - Stazione di Malamocco diga nord**



**Figura 3.19** – Andamento del livello medio mare mensile nella stazione di Malamocco diga nord e della sua differenza rispetto a Punta della Salute da Gennaio 2008 ad Aprile 2011. Fonte dei dati: ISPRA - Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del litorale Nord-Adriatico.

### Stazione di Faro Rocchetta

Nel 2008 a Faro Rocchetta si è registrata una differenza di livello medio mare annuale di +4.12 cm rispetto a Punta della Salute e di +4.22 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2009 tale differenza è salita rispettivamente a +4.57 cm e +5.21 cm, mentre nel 2010 è salita ulteriormente a +5.24 cm rispetto a Punta della Salute e a +5.48 cm rispetto a Lido diga sud, mantenendosi su questi valori anche all'inizio del 2011 (figura 3.20).



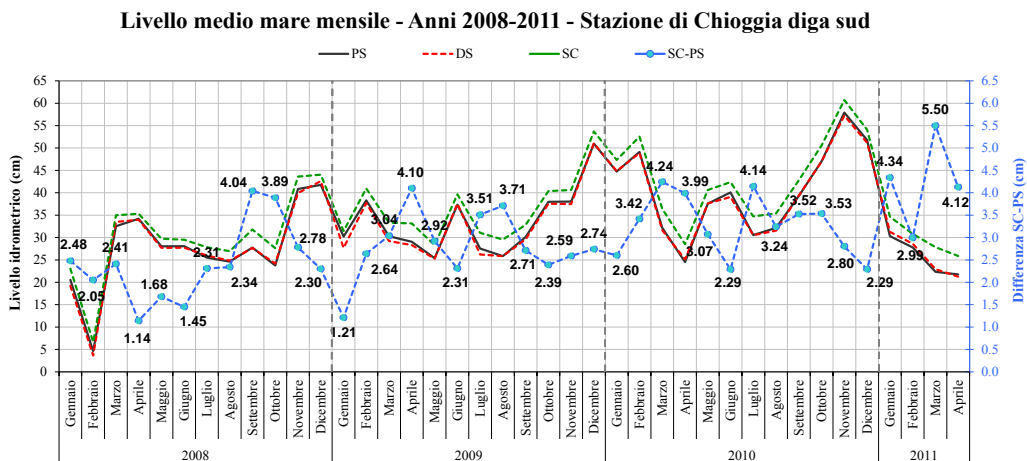
**Figura 3.20** – Andamento del livello medio mare mensile nella stazione di Faro Rocchetta e della sua differenza rispetto a Punta della Salute da Gennaio 2008 ad Aprile 2011. Fonte dei dati: ISPRA - RMLV.

Si fa presente che i dati provenienti da questa stazione, anche se scremati da eventuali errori grossolani, sono da considerarsi provvisori per gli anni 2009, 2010 e 2011, in quanto non ancora validati.

Negli ultimi tre anni, pertanto, la differenza di livello medio mare tra la stazione di Faro Rocchetta e le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud è stata mediamente di +5 cm.

### Stazione di Chioggia diga sud

Nel 2008 a Chioggia diga sud si è registrata una differenza di livello medio mare annuale di +2.41 cm rispetto a Punta della Salute e di +2.51 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2009 la differenza è stata di +2.82 cm rispetto a Punta della Salute e di +3.46 cm rispetto a Lido diga sud. Nel 2010 tale differenza è salita rispettivamente a +3.26 cm e +3.51 cm, aumentando ancora nei primi mesi del 2011 (figura 3.21).



**Figura 3.21** – Andamento del livello medio mare mensile nella stazione di Chioggia diga sud e della sua differenza rispetto a Punta della Salute da Gennaio 2008 ad Aprile 2011. Fonte dei dati: ISPRA - RMLV.

Negli ultimi tre anni, pertanto, la differenza di livello medio mare tra la stazione di Chioggia diga sud e le stazioni di Punta della Salute e Lido diga sud è stata mediamente di +3 cm.

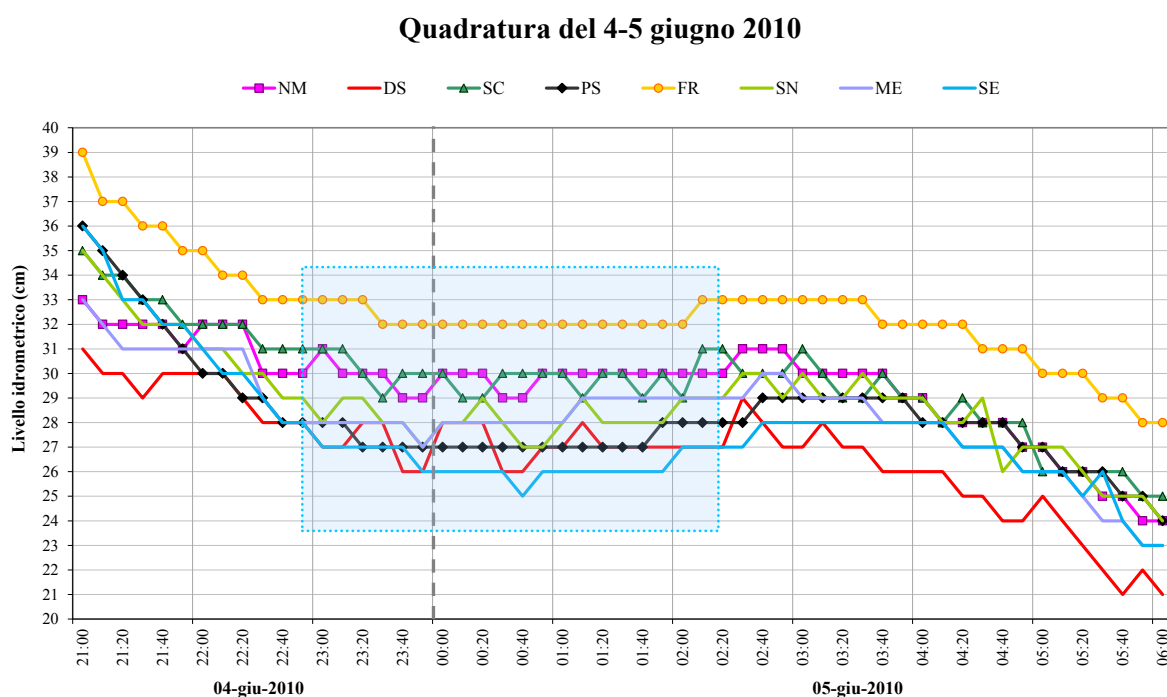
Alla luce di queste considerazioni sull'andamento del livello medio mare, si ritiene opportuno apportare una modifica stimabile in **-5 cm** ai livelli misurati dalla stazione di Faro Rocchetta, ed una modifica quantificabile in **-3 cm** ai livelli misurati a Malamocco diga nord e Chioggia diga sud nel corso del 2010.

### Analisi del fenomeno delle quadrature: 4-5 giugno 2010

Il tipo di correzione proposta viene inoltre confermato dall'analisi di una quadratura verificatasi nel corso del 2010, in particolare quella tra il 4 e il 5 giugno 2010. Si è deciso di analizzare questa quadratura in quanto la sua durata è superiore alle 3 ore (essa si mantiene infatti per 3 ore e 40 minuti), in presenza di un vento con intensità inferiore ai 6 m/s: in Piattaforma Acqua Alta (CNR-ISMAR) il vento misurato non ha mai superato i 5.8 m/s. È lecito ipotizzare che in questa situazione si verifichi un livello di marea quasi costante per alcune ore in tutta la Laguna di Venezia.

Durante la quadratura, il livello medio misurato nella stazione di Malamocco diga nord è stato di 29.87 cm, a Chioggia diga sud è stato di 30.00 cm e a Faro Rocchetta di 32.30 cm, mentre a Punta della Salute il livello medio è stato di 27.35 cm e a Lido diga sud di 27.17 cm.

La differenza di livello medio rispetto a Punta della Salute risulta quindi di +2.52 cm per Malamocco diga nord, +2.65 cm per Chioggia diga sud e +4.96 cm per Faro Rocchetta. La differenza di livello medio rispetto a Lido diga sud si attesta su +2.70 cm per Malamocco diga nord, +2.83 cm per Chioggia diga sud e +5.13 cm per Faro Rocchetta (figura 3.22).



**Figura 3.22** – Andamento del livello idrometrico registrato durante la quadratura del 4-5 giugno 2010 presso alcune stazioni ISPRA - RMLV. Legenda delle sigle: NM = Malamocco diga nord, DS = Lido diga sud, SC = Chioggia diga sud, PS = Punta della Salute, FR = Faro Rocchetta, SN = San Nicolò, ME = Meda, SE = Sant'Erasmus.

Anche l'analisi di questa quadratura conferma il fatto che i livelli misurati a Malamocco diga nord, Chioggia diga sud e Faro Rocchetta sono costantemente superiori a quelli registrati a Lido diga sud,



Punta della Salute e in altre stazioni presenti in laguna. In base a questa analisi si ritiene opportuno apportare una modifica stimabile in **-5 cm** ai livelli misurati dalla stazione di Faro Rocchetta, ed una correzione di **-3 cm** ai livelli misurati a Malamocco diga nord e Chioggia diga sud nel corso del 2010.

### Proposta di variazione della quota dei capisaldi

La causa di questi scostamenti nei livelli di marea registrati in queste stazioni sembra essere un problema di abbassamento della quota dei capisaldi, dovuto presumibilmente ai lavori in corso d'opera alle bocche di porto per la costruzione del Mose. La stazione di Faro Rocchetta infatti, essendo situata all'imboccatura della bocca di Malamocco, può aver risentito degli effetti dei lavori per la realizzazione della spalla, elemento di raccordo tra le paratoie mobili ed il litorale degli Alberoni. Le stazioni di Malamocco diga nord e Chioggia diga sud inoltre, essendo posizionate su moli foranei a protezione dei rispettivi canali di porto, sono esposte anche all'aggressività del moto ondoso sottocosta, che può indurre le dighe stesse a degli assestamenti strutturali.

Pertanto, in base alle considerazioni sopra esposte, si propone una correzione sui dati di livello di marea a partire dal 01/01/2010 (fino all'istante del cambio della quota del caposaldo) di una quantità stimata in **-3 cm** per le stazioni di Malamocco diga nord e Chioggia diga sud, e di **-5 cm** per la stazione di Faro Rocchetta. Questa modifica dovrà essere introdotta con gradualità anche negli anni precedenti secondo le prescrizioni contenute nelle tabelle sottostanti, tenendo presente che le variazioni di 3 cm vengono spalmate nell'ultimo triennio (2008-2010) mentre quella di 5 cm viene distribuita nell'ultimo quinquennio (2006-2010). Per quanto riguarda la stazione di Faro Rocchetta infatti, si registra mediamente una differenza di circa 5 cm rispetto a Punta della Salute a partire dal 2006, pertanto per migliorare progressivamente l'allineamento delle serie si richiede una correzione che coinvolga i dati dell'ultimo quinquennio.

Correzioni da apportare ai livelli misurati a <b>Malamocco diga nord</b>					
Anno	Correzione	Dati mancanti (%)		LMM(NM)-LMM(PS) con c.s. attuale (207 cm)	LMM(NM)-LMM(PS) con correzione proposta
		NM	PS		
2007	0 cm	0.00%	0.00%	+1.94 cm	+1.94 cm
2008	-1 cm	0.00%	0.00%	+3.16 cm	+2.16 cm
2009	-2 cm	0.14%	0.05%	+1.88 cm	-0.12 cm
2010	-3 cm	0.00%	0.04%	+2.98 cm	-0.02 cm

Legenda: LMM = livello medio mare NM = Malamocco diga nord PS = Punta della Salute

Correzioni da apportare ai livelli misurati a <b>Faro Rocchetta</b>					
Anno	Correzione	Dati mancanti (%)		LMM(FR)-LMM(PS) con c.s. attuale (250 cm)	LMM(FR)-LMM(PS) con correzione proposta
		FR	PS		
2005	0 cm	2.22%	0.00%	+2.95 cm	+2.95 cm
2006	-1 cm	0.40%	0.00%	+3.49 cm	+2.49 cm
2007	-2 cm	0.33%	0.00%	+5.59 cm	+3.59 cm
2008	-3 cm	0.00%	0.00%	+4.12 cm	+1.12 cm
2009	-4 cm	0.00%	0.05%	+4.57 cm	+0.57 cm
2010	-5 cm	0.00%	0.04%	+5.24 cm	+0.24 cm

Legenda: LMM = livello medio mare FR = Faro Rocchetta PS = Punta della Salute

Correzioni da apportare ai livelli misurati a <b>Chioggia diga sud</b>					
Anno	Correzione	Dati mancanti (%)		LMM(SC)-LMM(PS) con c.s. attuale (257 cm)	LMM(SC)-LMM(PS) con correzione proposta
		SC	PS		
2007	0 cm	0.00%	0.00%	+1.96 cm	+1.96 cm
2008	-1 cm	0.00%	0.00%	+2.41 cm	+1.41 cm
2009	-2 cm	0.00%	0.05%	+2.82 cm	+0.82 cm
2010	-3 cm	0.01%	0.04%	+3.26 cm	+0.26 cm
Legenda: LMM = livello medio mare SC = Chioggia diga sud PS = Punta della Salute					

### Sintesi conclusiva

In base ai risultati emersi dalle analisi sopra esposte, per correggere il tipo di problematica evidenziato si suggerisce per le future misurazioni di marea un abbassamento della quota dei tre capisaldi, da effettuarsi in data prossima, di una quantità stimata in **-3 cm** per le stazioni posizionate alle dighe e in **-5 cm** per la stazione di Faro Rocchetta. Le quote dei nuovi capisaldi saranno pertanto di **204 cm** per Malamocco diga nord (attualmente 207 cm), di **254 cm** per Chioggia diga sud (attualmente 257 cm) e di **245 cm** per Faro Rocchetta (attualmente 250 cm).

---

## 4. ELABORAZIONI MAREOGRAFICHE IN USO PRESSO LA RETE MAREOGRAFICA NAZIONALE (RMN)

Anche gli esperti più smaliziati rimangono sempre affascinati da quanta conoscenza del mondo fisico che ci circonda è contenuta nel “semplice” segnale costituito dalle serie storiche di registrazioni del livello del mare.

Tramite un procedimento di estrazioni successive le elaborazioni mareografiche permettono di riconoscere le componenti del segnale via via riconducibili a fenomeni noti (marea astronomica), a caratterizzare le componenti correlate ai siti di misura e alle loro caratteristiche morfologiche (sesse di bacini e sottobacini, naturali e artificiali), a rilevare l'effetto dei fenomeni meteorologici (perturbazioni e venti dominanti, marrobbio) nonché l'insorgere di eventuali onde anomale, legate agli eventi sismici che accadono nelle profondità del mare (tsunami).

Riguardo a questi ultimi fenomeni, giova ricordare che ISPRA rappresenta un centro regionale del “Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North Eastern Atlantic” (NEAMTWS).

Oltre ai compiti istituzionali nazionali, nell'ambito di tale collaborazione svolge un compito primario per la raccolta dei dati mareografici finalizzati alla verifica delle eventuali fra eventi sismici marini e loro effetti in termini di onde anomale .

Attualmente contribuisce alle attività del Tsunami Warning System (TWS) redigendo i report nazionali sulla situazione e sulle attività italiane riguardo alle reti mareografiche ed ai dati disponibili.

Vengono messi a disposizione via FTP i dati di tutte le stazioni (la cadenza di acquisizione dei dati di livello è di 1 un minuto eccetto per Trieste dove è di 1 minuto). L'invio di tali dati avviene ogni 10 minuti.

Ritornando alle elaborazioni mareografiche più in generale, esse possono essere distinte in quattro principali categorie, a seconda del tipo di informazione che da esse si vuole estrarre.

- 1) Analisi di marea
- 2) Calcolo del livello medio del mare
- 3) Analisi dei residui
- 4) Studio delle onde anomale (tsunami)

Per quanto riguarda l'analisi dei residui, lo studio delle onde anomale e la caratterizzazione degli eventi di tsunami ISPRA ha sviluppato procedure, anche allo scopo determinare scenari preelaborati di pericolosità e di danno che consentano di operare immediatamente al verificarsi di un evento.

Risulta evidente che tale aspetto rappresenta un valido contributo di ISPRA al TWS ed alla protezione civile italiana in quanto ISPRA stessa, fra l'altro, opera in qualità di centro di competenza del Dipartimento della Protezione Civile in ambito marino costiero.

### 4.1 Analisi di marea

L'analisi delle serie di livello marino finalizzata alla risoluzione delle componenti astronomiche di marea (ampiezza e fase) è effettuata, come già nei precedenti anni, tramite l' utilizzo del software SLDP (Sea Level Data Processing) di cui segue una breve descrizione. Una descrizione più approfondita delle tecniche di calcolo del programma è presentata nel successivo paragrafo.

L' UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center) in collaborazione con il NODC (National Oceanographic Data Center – USA) ha predisposto il suddetto SLDP per un suo utilizzo tramite PC sotto ambiente DOS.

---

Il software in sostanza risponde a tre principali obiettivi :

- l'analisi di marea e la sua previsione
- il controllo di qualità delle serie rilevate
- il filtraggio delle serie

Il software deriva da varie routine che in principio erano utilizzate comunemente per l'elaborazione di dati di livello marino al Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) Sea Level Center (TSLC) sotto la direzione di Klaus Wyrski. Le prime versioni di questo programma furono scritte da Bernie Kilonsky e Shikiko Nakahara sulla base del software approntato dal dr. Foremann nell'ambito del NORPAX ( North Pacific Experiment ) e risalgono ai primi anni 70.

Nell'ambito del programma TOGA le varie subroutine furono ottimizzate, assemblate e testate approfonditamente da un team di esperti del NODC coordinati da Patrick Caldwell. La prima versione del pacchetto fu reso pubblico nel 1988. Nel 1990 gli esperti del IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) nell'ambito del GLOSS (Global Sea Level Observing System) suggerirono una serie di integrazioni/miglioramenti alla prima versione : sotto la guida dell'UHSLC (Patrick Caldwell) fu approntata la seconda versione nel 1991 che in sostanza , salvo revisioni marginali nel corso degli anni successivi, è ad oggi quella usata.

Con la collaborazione diretta di Patrick Caldwell SIAP ha nel 1998 assemblato le principali subroutine del pacchetto al fine di ottenere una procedura di analisi quanto più possibile automatizzata. Patrick Caldwell, invitato da SIAP, è anche stato a Roma per tenere un corso finalizzato all'ottimale utilizzo del software.

Attualmente il SLDP è senza dubbio il più usato software scientifico al mondo per l'analisi di marea : istituzioni pubbliche e private in oltre settanta nazioni distribuite sui cinque continenti lo utilizzano e i risultati di tale utilizzo costituiscono la principale sorgente di informazioni scientifiche sul livello marino attualmente disponibile (Joint Archive for Sea Level – JASL NODC).

In estrema sintesi il software analizza serie temporali di livello campionate su base oraria (ai fini della marea astronomica non si hanno sostanziali vantaggi con un campionamento più frequente) per la risoluzione di tutte le principali componenti periodiche (ampiezza e fase) del fenomeno astronomico. Le tecniche di calcolo utilizzate e quelle di controllo di qualità del dato sono ben descritte in *Caldwell, P., and B.Kilonsky, 1992 Data processing and quality control at the TOGA Sea Level Center –IOC Workshop Report n. 81, UNESCO* e in *Kilonsky, B. and P. Caldwell, 1991 In pursuit of high-quality sea level data-IEEE Oceans Proceedings Vol. 2.*

In sintesi il metodo di analisi di marea si basa su tecniche di fit ai minimi quadrati per specifici costituenti armonici (“astronomical arguments”) relativi a terra, luna e configurazioni astronomiche solari. I metodi di controllo di qualità fanno riferimento all'analisi dei residui e sostanzialmente sono strutturati al fine di controllare i tre più importanti aspetti per la validazione dei dati :

- presenza di spikes
- controllo di stabilità del livello di riferimento
- controllo di eventuali derive temporali degli orologi di sistema

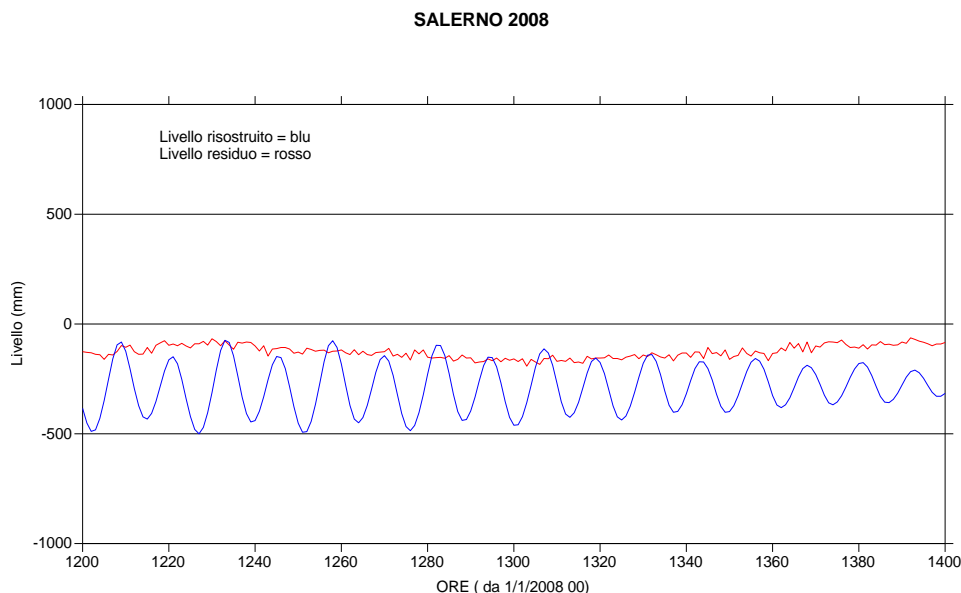
Un tipico output numerico relativo all'estrazione delle componenti armoniche è presentato nella tabella seguente.

SALERNO 2008

<b>NOME</b>	<b>FREQ (1/h)</b>	<b>AMP (cm)</b>	<b>FASE (Gr)</b>	<b>NOME</b>	<b>FREQ (1/h)</b>	<b>AMP (cm)</b>	<b>FASE (Gr)</b>
SA	0,000114	7,8779	224,30	H1	0,080397	0,0813	18,59
SSA	0,000228	5,6127	114,58	M2	0,080511	11,9014	229,48
MSM	0,001310	0,8428	261,63	H2	0,080625	0,0826	258,70
MM	0,001512	0,9588	219,78	MKS2	0,080740	0,2515	241,63
MSF	0,002822	0,8905	60,55	LDA2	0,081821	0,1015	208,61
MF	0,003050	1,6517	174,84	L2	0,082024	0,2697	224,84
ALP1	0,034397	0,0749	271,18	T2	0,083219	0,2816	232,88
2Q1	0,035706	0,0100	55,48	S2	0,083333	4,3576	249,82
SIG1	0,035909	0,1219	342,77	R2	0,083447	0,0887	181,80
Q1	0,037219	0,2186	38,00	K2	0,083561	1,3026	245,39
RHO1	0,037421	0,0240	34,46	MSN2	0,084845	0,0646	298,42
O1	0,038731	0,8401	110,34	ETA2	0,085074	0,0352	231,75
TAU1	0,038959	0,1596	213,67	MO3	0,119242	0,3476	359,28
BET1	0,040040	0,1046	35,68	M3	0,120767	0,4929	349,14
NO1	0,040269	0,2435	195,35	SO3	0,122064	0,0300	84,12
CHI1	0,040471	0,0528	79,53	MK3	0,122292	0,0497	311,70
PI1	0,041439	0,1161	104,97	SK3	0,125114	0,1172	310,31
P1	0,041553	0,9438	181,83	MN4	0,159511	0,1455	101,08
S1	0,041667	0,8176	281,68	M4	0,161023	0,3484	131,88
K1	0,041781	2,7731	195,66	SN4	0,162333	0,0201	222,50
PSI1	0,041895	0,1131	274,46	MS4	0,163845	0,1785	184,13
PHI1	0,042009	0,1883	148,50	MK4	0,164073	0,0698	210,80
THE1	0,043091	0,1234	266,38	S4	0,166667	0,0732	100,47
J1	0,043293	0,1389	185,17	SK4	0,166895	0,0311	240,38
SO1	0,044603	0,0896	110,45	2MK5	0,202804	0,0125	73,71
OO1	0,044831	0,0451	151,90	2SK5	0,208447	0,0308	316,64
UPS1	0,046343	0,1053	237,34	2MN6	0,240022	0,0279	335,14
OQ2	0,075975	0,0347	230,86	M6	0,241534	0,0706	146,22
EPS2	0,076177	0,1412	169,53	2MS6	0,244356	0,0522	14,75
2N2	0,077487	0,2576	223,68	2MK6	0,244584	0,0397	235,91
MU2	0,077689	0,3660	201,97	2SM6	0,247178	0,0526	270,31
N2	0,078999	2,5133	216,13	MSK6	0,247406	0,0712	326,41
NU2	0,079202	0,3884	226,14	3MK7	0,283315	0,0340	141,75
				M8	0,322046	0,0447	77,30

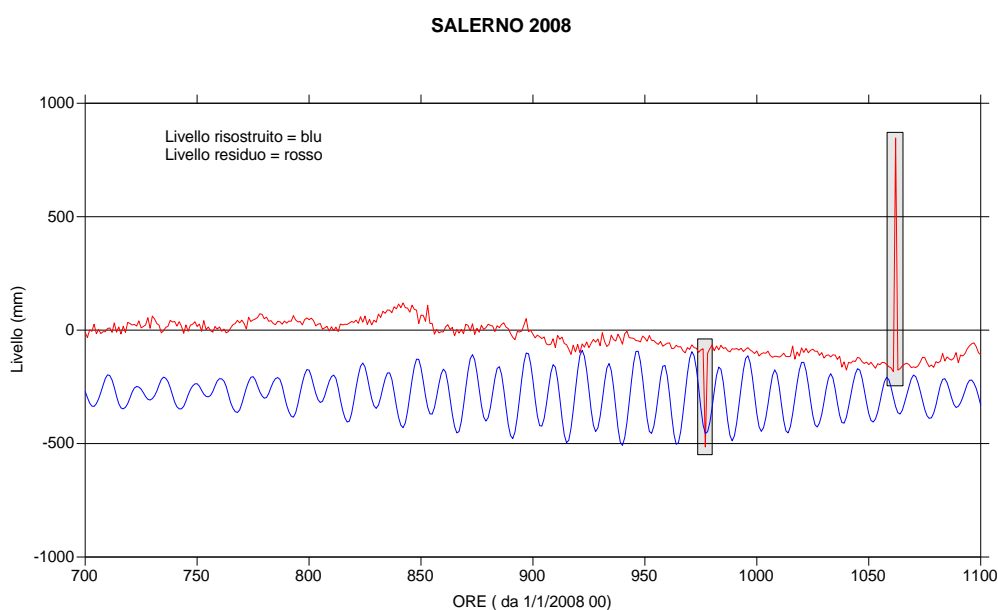
In essa sono presenti le frequenze in cicli per ora, le ampiezze in cm e le fasi in gradi delle componenti relative all' analisi da noi effettuata sulla serie di livello misurata a Salerno nel 2008 .

Nella **Figura 4.1** è invece presentato il grafico sovrapposto della marea ricostruita sulla base delle suddette componenti e il relativo grafico dei residui.



**Figura 4.1**

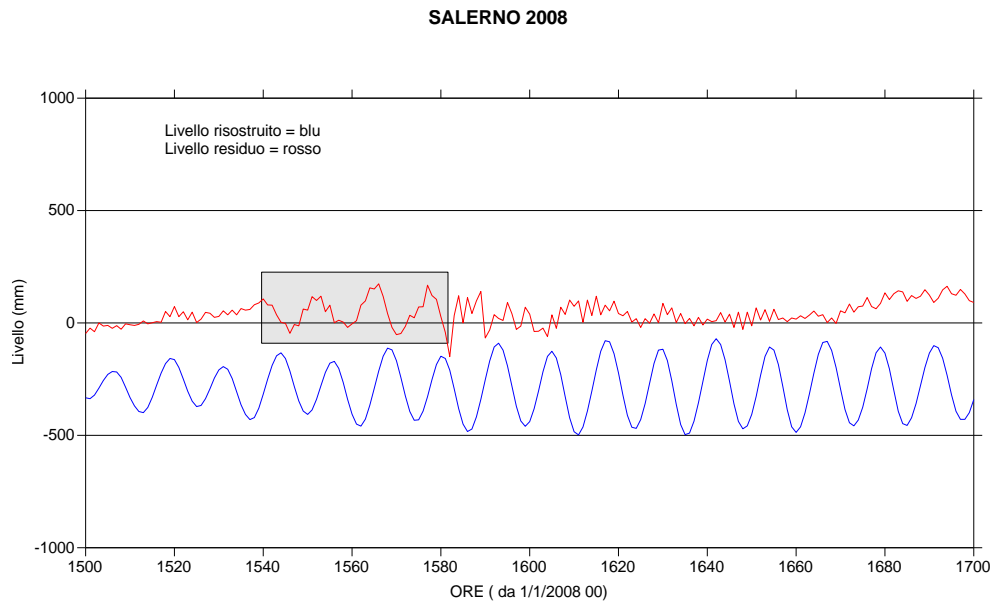
Si nota che il residuo non presenta particolari problematiche specie se confrontato con i grafici di cui alla **Figura 4.2** e alla **Figura 4.3** in cui sono stati riportati i risultati, in termini di serie ricostruite e residui, di analisi effettuate “truccando” ad arte la serie originale di valori misurati sempre a Salerno nel 2008. In particolare in **Figura 4.2** è evidente la presenza di due spike (nei rettangoli grigi) relativamente al residuo così come è evidente che tali spike non incidono sulla serie ricostruita che conserva il suo andamento perfettamente periodico.



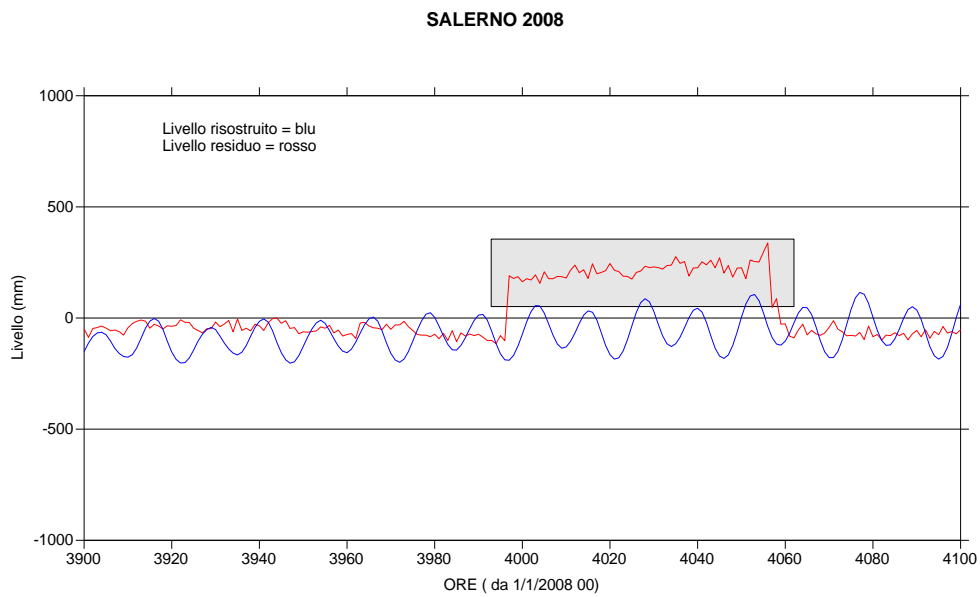
**Figura 4.2**



Abbiamo anche simulato uno shift temporale (deriva oraria) di una sola ora per un dato periodo e il chiarissimo effetto sui residui è verificabile in **Figura 4.3** in cui si nota un andamento periodico dei residui tipico di problematiche legate a derive temporali.



Infine in **Figura 4.4** si evidenzia l' effetto di un eventuale shift posizionale del livello di riferimento (datum). Ancora una volta è chiaro uno spostamento verso l' alto ( abbiamo ad arte spostato di 30 cm. i valori misurati ) del pattern dei residui ( area compresa nel rettangolo grigio).



---

In località ove le ampiezze delle onde di marea siano di dimensioni paragonabili alla profondità del bacino di misura, gli inevitabili effetti non lineari causati dall'interazione delle onde col fondale causano senz'altro risultati non soddisfacenti per cui si raccomanda di scegliere postazioni di misura in aree a profondità non troppo bassa. Problematiche simili possono sorgere inoltre in aree troppo vicine a foci di fiumi o in bacini di configurazione molto complessa.

In generale il software è strutturato per risolvere solo le armoniche di derivazione astronomica quindi eventuali fenomeni periodici derivanti da cause diverse (oscillazioni, naturali di bacini chiusi o semichiusi, sesse di porti o golfi ecc.) non potranno essere evidenziati da tale software. Inoltre il software permette l'analisi al massimo di un anno per volta e quindi riesce a risolvere solo quelle armoniche la cui frequenza sia compatibile con tale durata: tali armoniche sono al massimo 68.

Il software permette il calcolo della previsione di marea per l'anno successivo a quello di misura. L'output può essere strutturato sia come tabella di ore di accadimento giornaliero di massimi e minimi oppure come serie temporale di livello. Attualmente esso è strutturato con output tabellare di massimi e minimi giornalieri.

Come già affermato, si rimanda al successivo paragrafo per una più particolareggiata descrizione degli algoritmi adottati.

## 4.2 Livello medio del mare

Il concetto di Livello Medio Mare (MSL) è di per se stesso piuttosto "artificiale" in quanto non è possibile definire il livello medio mare per l'intero pianeta: ciò è dovuto al fatto che il mare è in continuo movimento causato da zone di alta e bassa pressione, maree, differenze gravitazionali locali etc. Inoltre anche il riferimento a terra del livello può non essere affatto fisso se l'area in cui esso è stato posto è soggetta a fenomeni di subsidenza.

A titolo di esempio si noti che la Ordnance Survey (agenzia del governo inglese) che è la maggior produttrice al mondo di carte e mappe marine, utilizza, per le carte della Gran Bretagna, un "datum" basato sul livello medio marino calcolato a partire da misure effettuate dal mareografo di Newlin (Cornovaglia) dal 1915 al 1921. Attualmente tale "datum" è in media 80 centimetri diverso dal livello medio marino ottenuto dalla lettura dei mareografi posizionati in altre aree della Gran Bretagna!

Una valutazione accurata del Mean Sea level dovrebbe basarsi in linea teorica su:

- Misure di livello per periodi superiori al ciclo metonico (228 mesi) cioè il periodo di tempo entro cui si possa considerare terminata una oscillazione di marea che tenga conto di tutte le costituenti astronomiche
- Un datum di riferimento a terra che sia considerabile realmente "fisso" cioè non soggetto a fenomeni di variazione in verticale dovuti a subsidenza o altro.

In ogni caso le due condizioni permetterebbero la definizione di un valore medio del livello marino "locale" o "regionale" ma non certo mondiale: di nuovo a titolo di esempio si ricorda che il livello medio del mare all'ingresso del canale di Panama dalla parte dell'oceano Pacifico è 20 centimetri maggiore del livello medio calcolato dalla parte dell'oceano Atlantico.

Il livello di riferimento della RMN ISPRA è fissato sullo zero IGM derivato sulla base di livellazione di precisione a partire da capisaldi principali IGM.

E' noto che la rete IGM può non essere del tutto accurata sul territorio nazionale a causa di problematiche varie.

La disponibilità attuale di vari anni di livello misurato in molte stazioni costiere italiane permette di effettuare una analisi del livello "medio" della superficie marina consentendo quindi di avere un termine di paragone significativo. Ad arte sono state usate le virgolette per la parola "medio". In effetti qualsiasi analisi delle serie di livello misurate, per quanto accurata, non potrà essere finalizzata

---

attualmente alla valutazione oggettiva del livello medio mare. I principali motivi di tale affermazione sono :

- l' impossibilità di tener conto di eventuali fenomeni di subsidenza che, se presenti, risulterebbero nel nostro caso in un innalzamento del livello marino
- l' impossibilità di valutare le componenti astronomiche di periodo lunghissimo. E' noto infatti che un ciclo completo di marea astronomica è dell' ordine dei 19 anni per cui, attualmente, non si hanno a disposizione dati sufficienti per tener conto di ciò.

Cionondimeno l' analisi del livello medio della superficie marina basata sui dati attualmente a disposizione ha senza dubbio una importante valenza conoscitiva sia perché tramite tale analisi è possibile avere una stima ragionevole se non perfetta del livello medio mare, sia perché i risultati possono evidenziare eventuali significative difformità con le stime basate sullo 0 IGM e quindi attivare eventuali approfondimenti di livellazione topografica nelle aree in cui tali difformità si presentassero. Inoltre l' analisi può eventualmente evidenziare trend di variazione della superficie marina nel corso degli anni che saranno di stimolo ad approfondire l' argomento per la comprensione di tale fenomeno che potrebbe essere legato sia a fenomeni di subsidenza sia a fenomeni di vero e proprio innalzamento medio del livello marino.

In ogni caso l' analisi permette di stabilizzare il quadro di riferimento in cui si opera e i risultati possono essere posti a base di una strategia nazionale di normalizzazione tesa a identificare un "datum" nazionale di maggiore affidabilità di quanto possa essere attualmente lo 0 IGM.

ISPRA ha effettuato uno studio finalizzato all' analisi dei rilievi di livello marino nelle 26 stazioni mareografiche che da oltre 10 anni hanno monitorato il livello, allo scopo di definire il livello medio marino per ognuna delle stazioni.

A seguire la descrizione delle metodologie utilizzate per la suddetta analisi e i risultati ottenuti.

## **BASE DATI**

I dati di base analizzati si riferiscono ai rilievi di livello marino nelle seguenti 26 stazioni mareografiche italiane prima del potenziamento avvenuto nel 2010:

- 01-Imperia
- 02-Cagliari
- 03-Catania
- 04-Carloforte
- 05-Bari
- 06-Otranto
- 07-Palermo
- 08-Crotone
- 09-Reggio Calabria
- 10-Ravenna
- 11-Livorno
- 12-Vieste
- 13-Messina
- 14-Palinuro
- 15-Ancona
- 16-Salerno
- 17-Porto Torres

---

18-Taranto  
19-Napoli  
20-Civitavecchia  
21-Porto Empedocle  
22-Venezia  
23-Lampedusa  
24-Ortona  
25-Genova  
26-Trieste

La Base Dati è costituita da files TXT (ASCII ) contenenti per ogni stazione e per ogni passo temporale a intervallo di 10 minuti la data ( anno, mese, giorno, ora e minuto ) e il livello marino in metri rispetto allo Zero IGM.

L'informazione temporale è sempre riferita al Meridiano di Greenwich (GMT).

L'informazione di livello è espressa in metri con due cifre decimali quindi con accuratezza al centimetro.

La base dati termina temporalmente al 30 Novembre 2009 per tutte le stazioni sopra indicate mentre inizia a date variabili in funzione del fatto che i rilievi sono stati attivati in date differenti per le varie stazioni.

## **ANALISI DI VALIDAZIONE**

Prima della vera e propria analisi oggetto dello studio tutte le informazioni digitali ricevute (temporali e di livello) sono state sottoposte a vari test finalizzati alla loro validazione.

I test effettuati hanno riguardato:

- La congruità temporale delle date di registrazione
- La congruità dimensionale dei valori di livello
- La presenza di valori di livello consecutivi che, pur se accettabili dimensionalmente, si ripetono in un numero di volte non giustificabile
- La presenza di traslazioni verticali di livello

Al termine dei quattro test sopra elencati le serie temporali risultanti sono state analizzate per individuare la presenza :

- di valori di livello accettati che siano preceduti e seguiti da valori "buco" : in tal caso il valore di livello è stato sostituito con il codice di valore "buco"
- di valori di livello codificati come "buco" ma preceduti e seguiti da valori di livello accettati : in tal caso il valore "buco" è stato sostituito con un valore pari alla media del precedente e del seguente.

## **CONGRUITA' TEMPORALE DELLE DATE DI REGISTRAZIONE**

Per ogni stazione i valori di data sono stati letti per verificare la presenza di eventuali incongruità temporali.

I record sono stati ordinati temporalmente tramite software appositamente scritto.

---

L'analisi ha riguardato anche la verifica della presenza di tutti i record temporali attesi.

Ove ciò non accadesse i record temporali assenti sono stati automaticamente aggiunti (anno, mese, giorno, ora e minuto) associando ad essi un valore di livello identificativo di dato mancante.

Tale valore "buco" è stato scelto sempre pari a -99.99.

### **CONGRUITA' DIMENSIONALE DEI VALORI DI LIVELLO**

I dati di livello sono stati analizzati ai fini di evidenziare eventuali presenze di valori non accettabili. I criteri di non accettabilità scelti si basano sulle seguenti considerazioni:

- a- Impossibilità di avere valori di livello al di sopra o al di sotto di soglie preliminarmente scelte
- b- Impossibilità di avere valori consecutivi con variazioni di livello superiori a soglie preliminarmente scelte

Le soglie per l'eliminazione di valori di cui al punto a- sono state scelte sulla base di una preliminare analisi di tutte le serie temporali finalizzata alla individuazione della deviazione standard del valore di livello per ogni stazione.

Le soglie, diverse da stazione a stazione, sono state scelte pari a sei volte la deviazione standard ottenuta.

Ogni valore di livello risultante superiore al valore medio più 6 volte la deviazione standard ottenuta o inferiore al valore medio meno 6 volte la deviazione standard ottenuta è stato eliminato e sostituito con un valore identificativo di codice buco (-99.99).

Le soglie per l'eliminazione di valori consecutivi con variazioni di livello non accettabili (punto b-) sono state scelte analizzando i valori medi e le deviazioni standard su tutte le serie temporali delle variazioni di livello fra una registrazione e la seguente.

Tutte le registrazioni che presentano una variazione di livello pari a tre volte la relativa deviazione standard sono state eliminate e sostituite con un valore identificativo di codice buco (-99.99).

I valori medi e le deviazioni standard sopra citati sono stati calcolati secondo la seguente formulazione:

$$MED = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$
$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - MED)^2}{(n-1)}}$$

dove

- MED = Valore medio
- STD = Deviazione standard
- n = numero totale di valori validati
- V<sub>i</sub> = Valore di livello nel caso a, Valore di variazione di livello nel caso b

---

## **RIPETIZIONE DI VALORI IDENTICI**

Questa analisi è stata effettuata individuando per ogni stazione gli spezzoni di serie temporale che presentano valori consecutivi di livello identici .

I manuali dell' Intergovernmental Oceanographic Commission ( IOC ) raccomandano l' eliminazione di valori consecutivi identici se essi sono in numero maggiore o uguale a tre per registrazioni a passo temporale orario [rif.1].

Nel nostro caso le registrazioni hanno passo temporale pari a 10 minuti e il criterio di eliminazione scelto in questo studio è tale per cui sono stati eliminati e sostituiti con codici di valore buco tutti i valori ripetuti per 6 o più volte.

## **TRASLAZIONI VERTICALI DI LIVELLO**

Tutte le serie temporali di livello sono state graficate ed analizzate visualmente per evidenziare la presenza di periodi temporali durante i quali il segnale di livello ha subito una improvvisa traslazione verso l' alto o verso il basso rispetto al trend precedente.

Una volta individuati tali periodi sono stati isolati numericamente, analizzati in termini di durata e di valori medi di livello e successivamente riallacciati alla serie temporale di origine avendo cura di riposizionare il livello medio in modo da essere del tutto congruente a quello della serie originale.

## **FILTRI DI CONVOLUZIONE ED ANALISI DI MAREA**

La base dati validata è stata analizzata preliminarmente tramite applicazione del filtro X0 di Doodson e del filtro di Bloomfield.

Essa è stata inoltre sottoposta ad analisi di marea per l' estrazione di tutte le componenti astronomiche risolvibili.

### **FILTRO X0 DI DOODSON**

Il filtro X0 di Doodson [rif.2] è un filtro simmetrico a 19 pesi che permette di eliminare l' energia del segnale attribuibile alle componenti diurne e semidiurne della marea astronomica.

Esso si applica a dati orari ed è centrato alle ore 12 di ogni giorno considerato.

Il livello medio giornaliero (L) è calcolato secondo la seguente formulazione:

$$L = \frac{\sum_{i=-19}^{i=19} L_h \cdot X0(i)}{\sum_{i=-19}^{i=19} X0(i)}$$

dove

$L_h$  = Livello orario

$X0(i)$  = (2,1,1,2,0,1,1,0,2,0,1,1,0,1,0,0,1,0,1) = pesi del filtro

$X0(-i) = X0(i)$

$X(0) = 0$



---

## FILTRO DI BLOOMFIELD

Il filtro Bloomfield è un filtro a 119 pesi che permette di eliminare le componenti di alta frequenza del segnale ed evita il fenomeno di aliasing.

Esso si applica a dati orari ed è centrato alle ore 12 di ogni giorno considerato.

Il livello medio giornaliero (L) è calcolato secondo la seguente formulazione:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^{i=119} L_h \cdot D(i)}{\sum_{i=1}^{i=119} D(i)}$$

dove

$L_h$  = Livello orario

D(i) con  $i=1,119$  sono i pesi del filtro **[rif.3]** i cui valori sono di seguito elencati

D(001)=-0.0000047279 D(002)=-0.0000291659 D(003)=-0.0000746666 D(004)=-0.0001421497  
D(005)=-0.0002320484 D(006)=-0.0003442611 D(007)=-0.0004781109 D(008)=-0.0006323141  
D(009)=-0.0008049580 D(010)=-0.0009934887 D(011)=-0.0011947113 D(012)=-0.0014048003  
D(013)=-0.0016193235 D(014)=-0.0018332767 D(015)=-0.0020411314 D(016)=-0.0022368938  
D(017)=-0.0024141749 D(018)=-0.0025662712 D(019)=-0.0026862551 D(020)=-0.0027670723  
D(021)=-0.0028016483 D(022)=-0.0027829980 D(023)=-0.0027043406 D(024)=-0.0025592159  
D(025)=-0.0023416006 D(026)=-0.0020460230 D(027)=-0.0016676741 D(028)=-0.0012025125  
D(029)=-0.0006473619 D(030)= 0.0000000000 D(031)= 0.0007407651 D(032)= 0.0015750299  
D(033)= 0.0025017454 D(034)= 0.0035186813 D(035)= 0.0046224078 D(036)= 0.0058082927  
D(037)= 0.0070705168 D(038)= 0.0084021072 D(039)= 0.0097949871 D(040)= 0.0112400432  
D(041)= 0.0127272100 D(042)= 0.0142455688 D(043)= 0.0157834614 D(044)= 0.0173286170  
D(045)= 0.0188682896 D(046)= 0.0203894055 D(047)= 0.0218787177 D(048)= 0.0233229654  
D(049)= 0.0247090362 D(050)= 0.0260241296 D(051)= 0.0272559173 D(052)= 0.0283927003  
D(053)= 0.0294235587 D(054)= 0.0303384929 D(055)= 0.0311285535 D(056)= 0.0317859586  
D(057)= 0.0323041959 D(058)= 0.0326781084 D(059)= 0.0329039632 D(060)= 0.0329795004  
D(061)= 0.0329039632 D(062)= 0.0326781084 D(063)= 0.0323041959 D(064)= 0.0317859586  
D(065)= 0.0311285535 D(066)= 0.0303384929 D(067)= 0.0294235587 D(068)= 0.0283927003  
D(069)= 0.0272559173 D(070)= 0.0260241296 D(071)= 0.0247090362 D(072)= 0.0233229654  
D(073)= 0.0218787177 D(074)= 0.0203894055 D(075)= 0.0188682896 D(076)= 0.0173286170  
D(077)= 0.0157834614 D(078)= 0.0142455688 D(079)= 0.0127272100 D(080)= 0.0112400432  
D(081)= 0.0097949871 D(082)= 0.0084021072 D(083)= 0.0070705168 D(084)= 0.0058082927  
D(085)= 0.0046224078 D(086)= 0.0035186813 D(087)= 0.0025017454 D(088)= 0.0015750299  
D(089)= 0.0007407651 D(090)= 0.0000000000 D(091)=-0.0006473619 D(092)=-0.0012025125  
D(093)=-0.0016676741 D(094)=-0.0020460230 D(095)=-0.0023416006 D(096)=-0.0025592159  
D(097)=-0.0027043406 D(098)=-0.0027829980 D(099)=-0.0028016483 D(100)=-0.0027670723  
D(101)=-0.0026862551 D(102)=-0.0025662712 D(103)=-0.0024141749 D(104)=-0.0022368938  
D(105)=-0.0020411314 D(106)=-0.0018332767 D(107)=-0.0016193235 D(108)=-0.0014048003  
D(109)=-0.0011947113 D(110)=-0.0009934887 D(111)=-0.0008049580 D(112)=-0.0006323141  
D(113)=-0.0004781109 D(114)=-0.0003442611 D(115)=-0.0002320484 D(116)=-0.0001421497  
D(117)=-0.0000746666 D(118)=-0.0000291659 D(119)=-0.0000047279

---

Il livello medio mensile è calcolato come media aritmetica dei livelli medi giornalieri, il livello medio annuale come media mensile e il livello medio totale come media annuale.

### **ANALISI DI MAREA**

I rilievi di livello della Rete Nazionale Mareografica sono stati analizzati annualmente ai fini dell'individuazione delle principali componenti marea utilizzando il Software Sea Level Data Processing del NODC ( National Oceanographic Data Center ) dipartimento del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) USA.

Tale software utilizza le routine di analisi e previsione di marea scritte dal Dr. M. Foreman (Institute of Ocean Sciences, Victoria, British Columbia). La prima versione di tale software fu scritta dal Dr. Foreman nel 1977 [rif.4] e poi successivamente il software fu revisionato fino alla versione 3.0 che è appunto quella utilizzata da ISPRA per le analisi annuali dei rilievi.

Il Dr. Foreman nel 2007/2008 ha scritto un nuovo codice software per l' analisi di marea descritto nell' articolo **rif.5**.

Tale software permette una maggiore versatilità nell' analisi armonica di serie temporali di marea.

In sintesi i vantaggi nell'utilizzo di tale software sono:

- Possibilità di analizzare serie temporali acquisite a intervalli inferiori a 1 ora
- Possibilità di analizzare serie temporali di lunghezza superiore a un anno
- Possibilità di analizzare serie temporali acquisite a intervalli non costanti
- Non necessità di strutturare la serie in modo da codificare con codici di dato mancante le misure assenti
- Miglioramento delle tecniche numeriche di analisi
- Maggiore velocità di esecuzione

L'analisi quindi è stata effettuata utilizzando il suddetto codice.

La possibilità di analizzare serie temporali decennali ovviamente permette la risoluzione di costituenti di marea non risolvibili sulla base di serie annuali. Per ogni stazione sono state risolte 69 componenti di marea con frequenze corrispondenti a periodi compresi fra 3 ore e 8766 ore.

Si sottolinea che l' analisi è stata effettuata cumulativamente sulla totalità dei 10 anni a disposizione al solo scopo di risolvere il maggior numero di costituenti armonici possibili.

In termini assoluti i costituenti armonici risolvibili analizzando le serie decennali e invece non risolvibili analizzando serie di lunghezza annuale hanno ampiezze dell' ordine di decimi di millimetro o anche meno : quindi per le finalità generali dalla rete mareografica nazionale, i risultati ottenibili tramite analisi annuale sono da considerarsi del tutto validi.

---

## VALORI MEDI DI LIVELLO E TREND DI LUNGO TERMINE

A partire dalla Base Dati validata sono stati calcolati i valori medi di livello per ogni stazione secondo vari criteri di seguito elencati :

1. Media ottenuta applicando ai valori di livello il filtro Doodson X0 come sopra descritto
2. Media ottenuta applicando ai valori di livello il filtro di Bloomfield come sopra descritto
3. Media come ottenuta dall'analisi di marea eseguita col software Foreman sopra indicato

In **TAB. 4.1** sono elencati i risultati per ogni stazione.

Le serie temporali ottenute applicando i filtri di cui sopra e quella ricostruita sulla base dei costituenti di marea risolti sono state analizzate al fine di individuare la presenza di trend di lungo termine del livello.

L'analisi è stata fatta effettuando una regressione lineare di best fit ai minimi quadrati per ognuna delle serie decennali rappresentativa delle 26 stazioni.

In **TAB. 4.2** sono elencati i risultati per ogni stazione.

	<b>DOODSON</b>	<b>BLOOMFIELD</b>	<b>FOREMAN</b>
<b>01 Imperia</b>	0.0406	0.0405	0.0407
<b>02 Cagliari</b>	0.1543	0.1543	0.1540
<b>03 Catania</b>	0.0114	0.0114	0.0115
<b>04 Carloforte</b>	0.1174	0.1175	0.1173
<b>05 Bari</b>	-0.1760	-0.1760	-0.1758
<b>06 Otranto</b>	-0.2448	-0.2449	-0.2462
<b>07 Palermo</b>	0.0802	0.0802	0.0803
<b>08 Crotone</b>	-0.1926	-0.1926	-0.1927
<b>09 Reggio Calabria</b>	-0.2123	-0.2124	-0.2123
<b>10 Ravenna</b>	0.0499	0.0499	0.0502
<b>11 Livorno</b>	-0.0379	-0.0378	-0.0377
<b>12 Vieste</b>	-0.1297	-0.1299	-0.1303
<b>13 Messina</b>	0.1070	0.1070	0.1069
<b>14 Palinuro</b>	-0.1451	-0.1450	-0.1452
<b>15 Ancona</b>	-0.0407	-0.0406	-0.0404
<b>16 Salerno</b>	-0.1724	-0.1723	-0.1726
<b>17 Porto Torres</b>	0.1394	0.1395	0.1403
<b>18 Taranto</b>	-0.2560	-0.2559	-0.2562
<b>19 Napoli</b>	-0.1377	-0.1376	-0.1378
<b>20 Civitavecchia</b>	-0.0550	-0.0549	-0.0545
<b>21 Porto Empedocle</b>	-0.0585	-0.0585	-0.0587
<b>22 Venezia</b>	0.0995	0.0994	0.0985
<b>23 Lampedusa</b>	0.0566	0.0566	0.0566
<b>24 Ortona</b>	-0.0815	-0.0813	-0.0813
<b>25 Genova</b>	0.0636	0.0636	0.0627
<b>26 Trieste</b>	0.0837	0.0836	0.0829

**TAB. 4.1 - LIVELLO MEDIO MARE (m) NEL PERIODO 2000-2009 RIFERITO AL DATO IGM=0. I RISULTATI SI RIFERISCONO ALLA BASE DATI FILTRATA COL FILTRO DI DOODSON, COL FILTRO DI BLOOMFIELD E DOPO LA RISOLUZIONE DI 69 COSTITUENTI DI MAREA SECONDO IL METODO DI FOREMAN**

	<b>DOODSON</b>	<b>BLOOMFIELD</b>	<b>FOREMAN</b>
<b>01 Imperia</b>	0.0035	0.0035	0.0012
<b>02 Cagliari</b>	0.0045	0.0045	0.0016
<b>03 Catania</b>	0.0039	0.0039	0.0014
<b>04 Carloforte</b>	0.0037	0.0036	0.0016
<b>05 Bari</b>	0.0038	0.0038	0.0011
<b>06 Otranto</b>	-0.0001	-0.0001	0.0002
<b>07 Palermo</b>	0.0040	0.0040	0.0010
<b>08 Crotone</b>	0.0040	0.0040	0.0014
<b>09 Reggio Calabria</b>	0.0034	0.0034	0.0012
<b>10 Ravenna</b>	0.0056	0.0056	0.0012
<b>11 Livorno</b>	0.0046	0.0046	0.0012
<b>12 Vieste</b>	0.0038	0.0038	0.0008
<b>13 Messina</b>	0.0000	0.0000	0.0006
<b>14 Palinuro</b>	0.0035	0.0035	0.0010
<b>15 Ancona</b>	0.0009	0.0009	0.0010
<b>16 Salerno</b>	0.0034	0.0035	0.0015
<b>17 Porto Torres</b>	0.0035	0.0035	0.0024
<b>18 Taranto</b>	0.0039	0.0039	0.0014
<b>19 Napoli</b>	0.0035	0.0035	0.0008
<b>20 Civitavecchia</b>	0.0038	0.0038	0.0008
<b>21 Porto Empedocle</b>	0.0044	0.0044	0.0010
<b>22 Venezia</b>	0.0060	0.0060	0.0009
<b>23 Lampedusa</b>	0.0048	0.0048	0.0012
<b>24 Ortona</b>	0.0034	0.0034	0.0010
<b>25 Genova</b>	0.0041	0.0041	0.0010
<b>26 Trieste</b>	0.0066	0.0067	0.0009

**TAB. 4.2 - TREND ANNUALE (m) DEL LIVELLO MARINO NEL PERIODO 2000-2009 . I RISULTATI SI RIFERISCONO ALLA BASE DATI FILTRATA COL FILTRO DI DOODSON, COL FILTRO DI BLOOMFIELD E DOPO LA RISOLUZIONE DI 69 COSTITUENTI DI MAREA SECONDO IL METODO DI FOREMAN**

<b>STAZIONE</b>	<b>LIVELLO MEDIO RISPETTO ALLO 0 IGM (m)</b>	<b>TREND DI VARIAZIONE DEL LIVELLO (cm/secolo)</b>
<b>01 Imperia</b>	<b>0.0407</b>	<b>23</b>
<b>02 Cagliari</b>	<b>0.1540</b>	<b>29</b>
<b>03 Catania</b>	<b>0.0115</b>	<b>25</b>
<b>04 Carloforte</b>	<b>0.1173</b>	<b>20</b>
<b>05 Bari</b>	<b>-0.1758</b>	<b>27</b>
<b>06 Otranto</b>	<b>-0.2462</b>	<b>-3</b>
<b>07 Palermo</b>	<b>0.0803</b>	<b>30</b>
<b>08 Crotone</b>	<b>-0.1927</b>	<b>26</b>
<b>09 Reggio Calabria</b>	<b>-0.2123</b>	<b>22</b>
<b>10 Ravenna</b>	<b>0.0502</b>	<b>44</b>
<b>11 Livorno</b>	<b>-0.0377</b>	<b>34</b>
<b>12 Vieste</b>	<b>-0.1303</b>	<b>30</b>
<b>13 Messina</b>	<b>0.1069</b>	<b>-6</b>
<b>14 Palinuro</b>	<b>-0.1452</b>	<b>25</b>
<b>15 Ancona</b>	<b>-0.0404</b>	<b>-1</b>
<b>16 Salerno</b>	<b>-0.1726</b>	<b>20</b>
<b>17 Porto Torres</b>	<b>0.1403</b>	<b>11</b>
<b>18 Taranto</b>	<b>-0.2562</b>	<b>25</b>
<b>19 Napoli</b>	<b>-0.1378</b>	<b>27</b>
<b>20 Civitavecchia</b>	<b>-0.0545</b>	<b>30</b>
<b>21 Porto Empedocle</b>	<b>-0.0587</b>	<b>34</b>
<b>22 Venezia</b>	<b>0.0985</b>	<b>51</b>
<b>23 Lampedusa</b>	<b>0.0566</b>	<b>36</b>
<b>24 Ortona</b>	<b>-0.0813</b>	<b>24</b>
<b>25 Genova</b>	<b>0.0627</b>	<b>31</b>
<b>26 Trieste</b>	<b>0.0829</b>	<b>58</b>

**TAB. 4.3 - LIVELLO MEDIO (m) RISPETTO ALLO 0 IGM E TREND DI VARIAZIONE DEL LIVELLO (cm/secolo). ANALISI BASATA SUI LIVELLI MISURATI NEL PERIODO 2000-2009**



---

## CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Lo studio è stato effettuato, per ognuno delle 26 stazioni mareografiche italiane, prendendo in considerazione i livelli misurati a intervallo temporale di 10 minuti nel periodo compreso fra il primo Gennaio 2000 e il 30 Novembre 2009.

**Dopo il processo di validazione dei dati il data-set risulta essere statisticamente molto significativo raggiungendo praticamente sempre livelli percentuali di validità superiori al 90%**

**Il processo di validazione dei dati ha evidenziato una sostanziale ottima risposta della strumentazione elettronica di misura.**

**Non sono presenti in quantità statisticamente significativa spikes nè problematiche relative a derive temporali.**

Da un punto di vista della risposta elettronica si evidenzia che il maggior contributo (per quanto statisticamente basso) alla eliminazione di dati acquisiti è dato dalla presenza di ripetizioni consecutive di valori.

Per quanto riguarda la stima dei livelli medi marini le analisi effettuate sia tramite filtri di convoluzione (X0 di Doodson e Bloomfield) sia tramite analisi armonica di marea secondo le metodiche più aggiornate, evidenziano una sostanziale identità di risultati.

Per quanto riguarda la stima dei trend di lungo termine di variazione del livello le analisi effettuate tramite i due filtri di convoluzione usati mostrano una sostanziale identità di risposta.

L'analisi invece effettuata sul campione ricostruito sulla base dei costituenti risolti tramite il software di Foreman presenta un bassissimo trend interpretabile come mancata risoluzione delle componenti di marea di lunghissimo periodo: è noto che un ciclo di marea completo richiede oltre 19 anni di registrazioni.

Sulla base di ciò il trend risultante dal campione di marea ricostruito è stato sottratto da quello evidenziato dalle analisi fatte tramite i filtri di convoluzione.

**La TAB. 4.3 presenta i risultati finali dello studio in termini di livello medio marino (m) e in termini di trend di variazione di livello di lungo termine (cm/secolo).**

E' necessario sottolineare alcune considerazioni nell'interpretare i risultati in **TAB. 4.3**.

Per quanto riguarda i livelli medi essi appaiono oscillare da circa -26 centimetri di Taranto a circa 15 centimetri di Cagliari. **Si ribadisce che tali valori sono riferiti allo 0 IGM.**

Ove il livello 0 IGM sia inequivocabilmente identico in termini assoluti in tutte le stazioni mareografiche ciò significherebbe che il livello medio marino a Taranto è ben 41 centimetri più basso di quello di Cagliari.

Ovviamente i risultati di differenza di livello medio mare fra una stazione e l'altra sono da prendere con le molle ove vi siano dubbi sull'effettiva validità in termini assoluti della quota 0 IGM.

Per quanto riguarda invece i trend di lunga durata dei livelli, la quota 0 IGM non pone problemi (accurata o meno che sia) in quanto il trend è calcolato col data-set ridotto a media 0.

---

Esiste però un'ulteriore considerazione da fare.

Il trend di livello marino calcolato presuppone che la quota di riferimento (livello 0 IGM) sia stabile nel tempo: è ovvio che qualsiasi abbassamento del livello "terrestre" al quale è in solido collegato lo 0 IGM risulterebbe in un equivalente aumento del corrispondente livello marino misurato.

L'analisi dei valori di trend in **TAB. 4.3** evidenzia una generale tendenza all'aumento del livello marino dell'ordine di grandezza di 30 cm/secolo con le eccezioni di Ancona, Messina e Otranto che praticamente non presentano trend e di Ravenna, Venezia e Trieste che invece presentano trend in aumento sostanzialmente maggiori (nell'ordine 44, 51 e 58 cm/secolo).

Per quanto detto sopra, non è possibile essere certi che tale trend rappresenti per le varie stazioni l'effettiva tendenza all'aumento di livello marino: esso potrebbe anche essere il risultato (totale o parziale) di fenomeni di abbassamento della crosta terrestre nei 10 anni (2000-2009) oggetto dell'analisi.

Riteniamo di concludere lo studio con alcune raccomandazioni finalizzate alla ottimizzazione nel tempo della rete mareografica sia in termini di accuratezza dei risultati sia in termini di contenuto informativo:

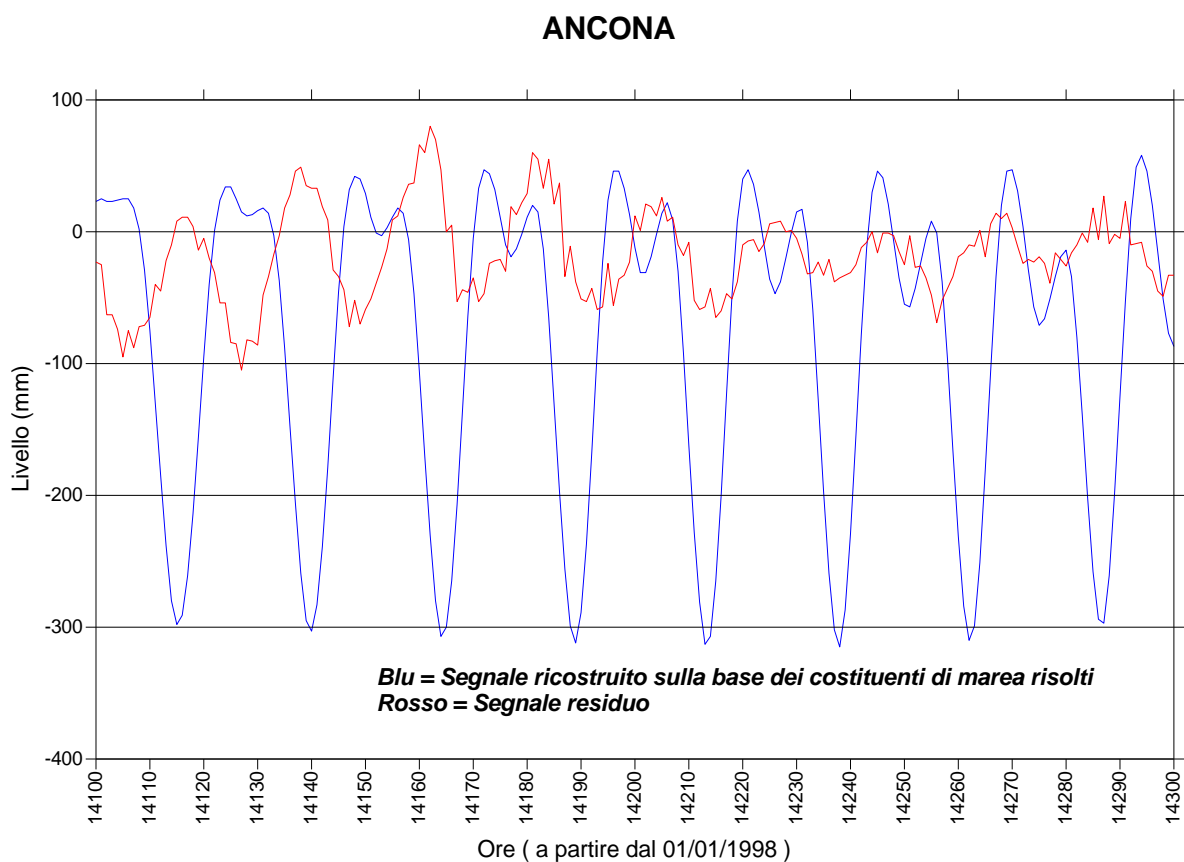
1. La quota di riferimento deve essere tale da garantire la maggior stabilità verticale nel tempo. E' più importante che tale riferimento non subisca variazioni verticali di quota che esso sia accuratamente riferita allo 0 IGM. Nel caso in cui la struttura mareografica debba per qualche ragione essere spostata rispetto alla sua posizione di origine, **il livello di riferimento deve essere assolutamente identico a quello precedente.**
2. Nei limiti del possibile bisogna capire il motivo delle registrazioni con valori di livello identicamente ripetuti per tentare di diminuire al massimo tale tipo di casistica.
3. E' auspicabile che in tutte le stazioni (o per lo meno in alcune accuratamente scelte) sia installato anche un sistema GPS. In tal modo sarà possibile, nel lungo termine, capire il trend di variazione di livello del riferimento terrestre e quindi interpretare accuratamente i risultati dei trend di livello marino misurato.

### 4.3 Analisi dei residui

Come accennato sopra in bacini caratterizzati da fenomeni periodici dovuti a cause non astronomiche, una volta eliminate dalla serie temporale di livello le componenti di marea si otterrà una serie residua che potrà presentare andamenti oscillatori per tutta la sua estensione.

La presenza di tale fenomeno nella serie residua può essere studiato allo scopo di individuare eventuali oscillazioni naturali causate dalla morfologia del bacino di misura. A titolo di esempio abbiamo analizzato tutta la serie temporale di livello misurata ad Ancona e, dopo aver eseguito l'analisi di marea, abbiamo graficato la serie ricostruita e la serie residua.

In **Figura 4.5** è possibile vedere un pezzo di tale serie. Si nota come la serie residua presenti un andamento periodico, segno inequivocabile della presenza di fenomeni diversi da quelli astronomici.



**Figura 4.5**

E' stata quindi effettuata una analisi spettrale della serie residua ( utilizzando la finestra spettrale di Bartlett a 240 ritardi ) e il risultato è evidenziato in **Figura 4.6**.

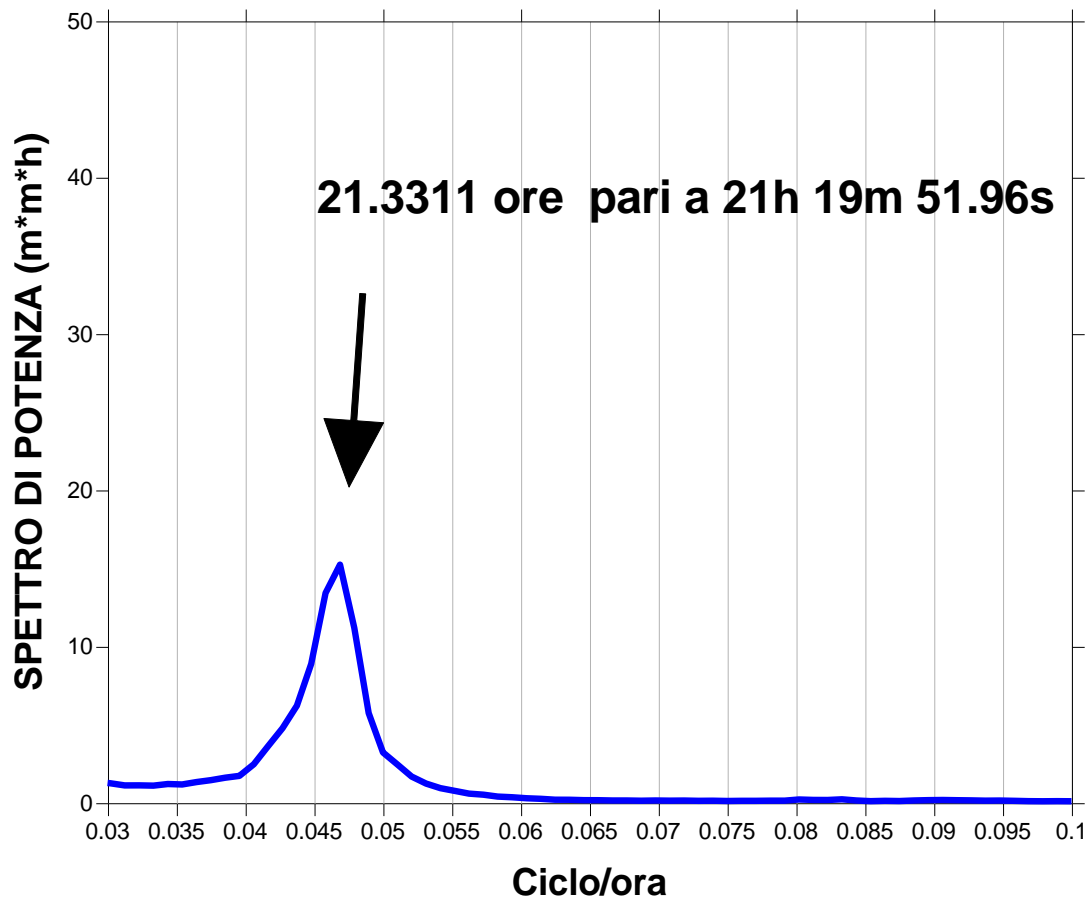


Figura 4.6

E' evidente la presenza di un picco di potenza alla frequenza corrispondente a circa 21 ore e 20 minuti che è proprio il periodo di oscillazione naturale del Mare Adriatico lungo l'asse SE-NW. Una successiva analisi armonica del residuo per la ricerca dell'ampiezza di tale oscillazione e la sua fase permetterebbe di "togliere" tale oscillazione dalla serie residua preliminare per ottenerne un'altra che a questo punto potrebbe rappresentare solo gli effetti atmosferici sul livello.

E' ovvio che tale tipo di analisi è stata possibile perché è noto a priori che le oscillazioni longitudinali dell'Adriatico sono di periodo dell'ordine delle 21 ore cioè un intervallo di tempo abbondantemente superiore all'intervallo di campionamento della serie sperimentale pari a 10 minuti. E' altrettanto ovvio che qualsiasi fenomeno periodico il cui periodo di oscillazione sia dell'ordine del 10-20 minuti o inferiore non può essere evidenziato a partire dalle serie attualmente disponibili. Purtroppo le seste dei porti, golfi etc. hanno periodi propri dell'ordine dei minuti quindi per poterle risolvere è necessario avere serie campionate a intervalli di tempo molto inferiori agli attuali 10 minuti.

Tale tipo di analisi prevede la necessità di utilizzare metodologie spettrali e giacché diverse finestre spettrali possono comportare risultati diversi e ISPRA utilizza per tale analisi per ogni campione indagato le 6 principali finestre spettrali di norma usate:

- Finestra di Bartlett modificata
- Finestra di Daniell
- Finestra di Tukey-Hamming
- Finestra di Tukey-Hanning
- Finestra di Parzen
- Finestra di Bartlett-Priestley

al fine di individuare con la maggior accuratezza possibile i picchi di frequenza cercati.

---

## 4.4 Onde anomale

L'onda emotiva derivata dal disastroso tsunami del 26 dicembre 2004 nelle acque di Sumatra ha prodotto nella comunità scientifica internazionale un "risveglio" della consapevolezza che tali tipi di fenomeno sono in fondo poco conosciuti in termini del loro potenziale impatto.

E' noto che anche il Mar Mediterraneo è "a rischio" da questo punto di vista : senza fare riferimento alle testimonianze di antica data da parte degli storici di origine romana o medievale, basti ricordare lo tsunami che ha seguito il terremoto di Messina nel dicembre 1908 !!

La RMN ISPRA può e deve, a nostro parere, essere una fonte informativa fondamentale nel processo di costruzione di una strategia finalizzata alla conoscenza/previsione degli effetti tsunamici nei nostri mari.

La disponibilità di serie temporali di livello in varie stazioni costiere consente infatti la possibilità di acquisire fondamentali conoscenze sulle dinamiche effettuali a costa di fenomeni sismici marini. Un'accurata analisi di serie misurate di livello che tenga conto :

- delle oscillazioni di bassa frequenza relative a maree di origine astronomica
- delle oscillazioni proprie dei bacini di misura (modi naturali, sesse ecc)
- delle variazioni di livello riconducibili a fenomeni perturbativi meteorologici (setup ecc)

consentirebbe l'ottenimento di serie residue filtrate da tutti gli effetti di cui sopra. L' eventuale presenza di oscillazioni "anomale" in tali serie residue potrebbe essere riconducibile a effetti di tipo tsunamico. L'analisi in termini di ampiezza, periodo, tempo di accadimento di tali "oscillazioni anomale" costituirebbe senz' altro un contributo fondamentale al difficile processo di "conoscenza" delle dinamiche conseguenti a sismi marini. Inoltre eventuali analisi contemporanee su varie stazioni mareografiche più o meno contigue permetterebbe anche la possibilità di studiare i tempi di propagazione di tali effetti e il loro decadimento in termini energetici.

Attualmente la RMN è strutturata con intervalli di campionamento del livello pari a 10 minuti. Come già detto precedentemente, tale intervallo di tempo è adatto all' analisi delle serie dal punto di vista della estrazione delle componenti periodiche di origine astronomica e anche eventualmente per l'analisi di periodi di oscillazione propri di bacini abbastanza grandi. Ove però si tratti di fenomeni che causino oscillazioni dell' ordine dei minuti, l' intervallo temporale di acquisizione non è più adeguato e quindi la nuova RMN prevede correttamente un intervallo di campionamento molto più breve (15 secondi).

Nonostante ciò a titolo di esempio abbiamo analizzato per tre stazioni mareografiche le serie di livello disponibili (intervallo 10 minuti) al fine di individuare gli eventuali effetti dello tsunami del 21 maggio 2003 avvenuto al largo dell' Algeria. Le tre stazioni scelte per l' analisi sono Carloforte, Cagliari e Imperia.

In **Figura 4.7** sono presentati sinteticamente i risultati dell' analisi. Da essa è chiarissimo l' effetto dello tsunami sulle tre aree costiere.

Si nota come tale effetto sia decrescente in termini di ampiezza (la scala in figura è identica per le tre stazioni) andando da Carloforte a Cagliari e poi a Imperia.

Si nota anche lo shift temporale del momento di inizio delle oscillazioni "anomale": a Carloforte l'onda è arrivata appena prima che a Cagliari mentre a Imperia l'effetto è ritardato.

Per quanto riguarda la valutazione delle ampiezze e periodi di tale effetto, essa può essere stimata solo a un livello di massima proprio perché l'intervallo di campionamento dei 10 minuti non permette analisi approfondite.

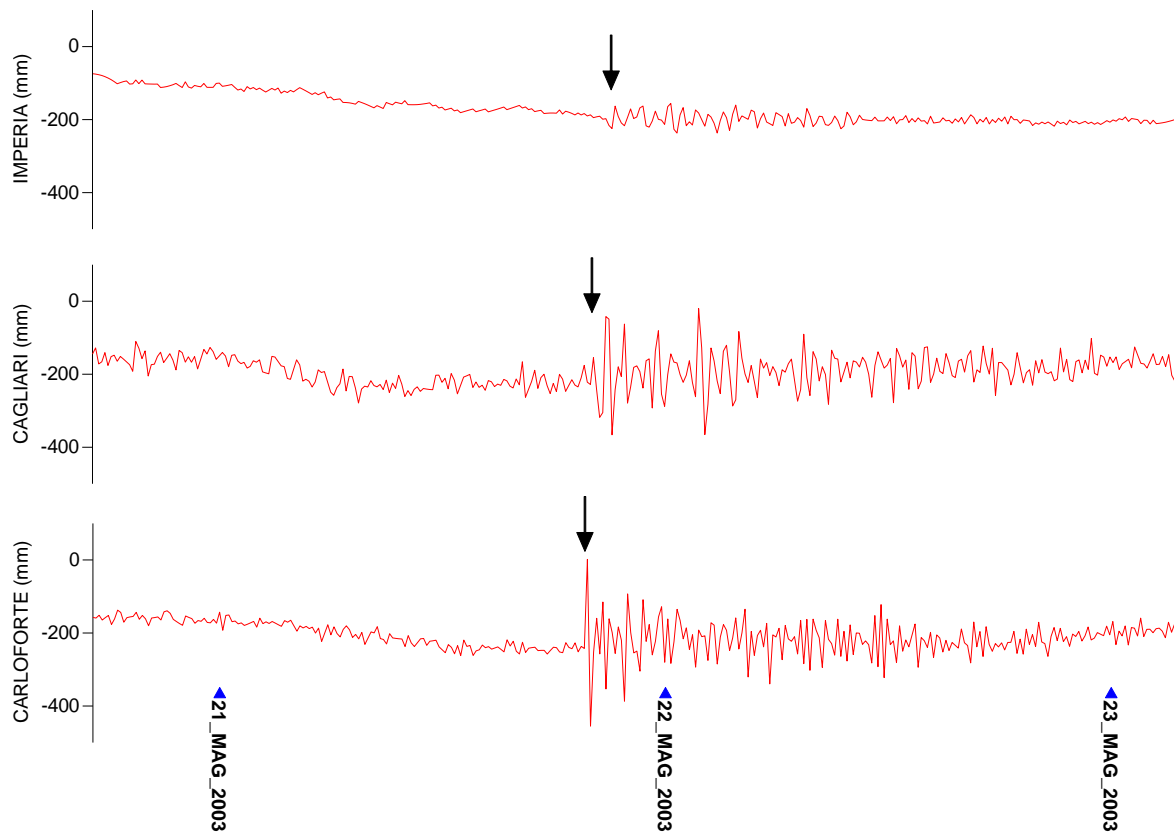


Figura 4.7

Il 17 dicembre 2008 è stato registrato dall' Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia un sisma di magnitudo 5. L'epicentro del sisma è stato individuato a 220 Km di profondità in un tratto di mare a 40 Km al largo di Paola nel cosentino.

La profondità del sisma (220 Km) suggerisce, secondo le attuali conoscenze scientifiche, la non significatività di fenomeni del genere ai fini della creazione di onde di tsunami.

Cionondimeno abbiamo effettuato la stessa analisi di cui sopra per tutte le stazioni mareografiche attualmente disponibili e contigue all' area dell' epicentro. L' analisi è stata effettuata per le stazioni di:

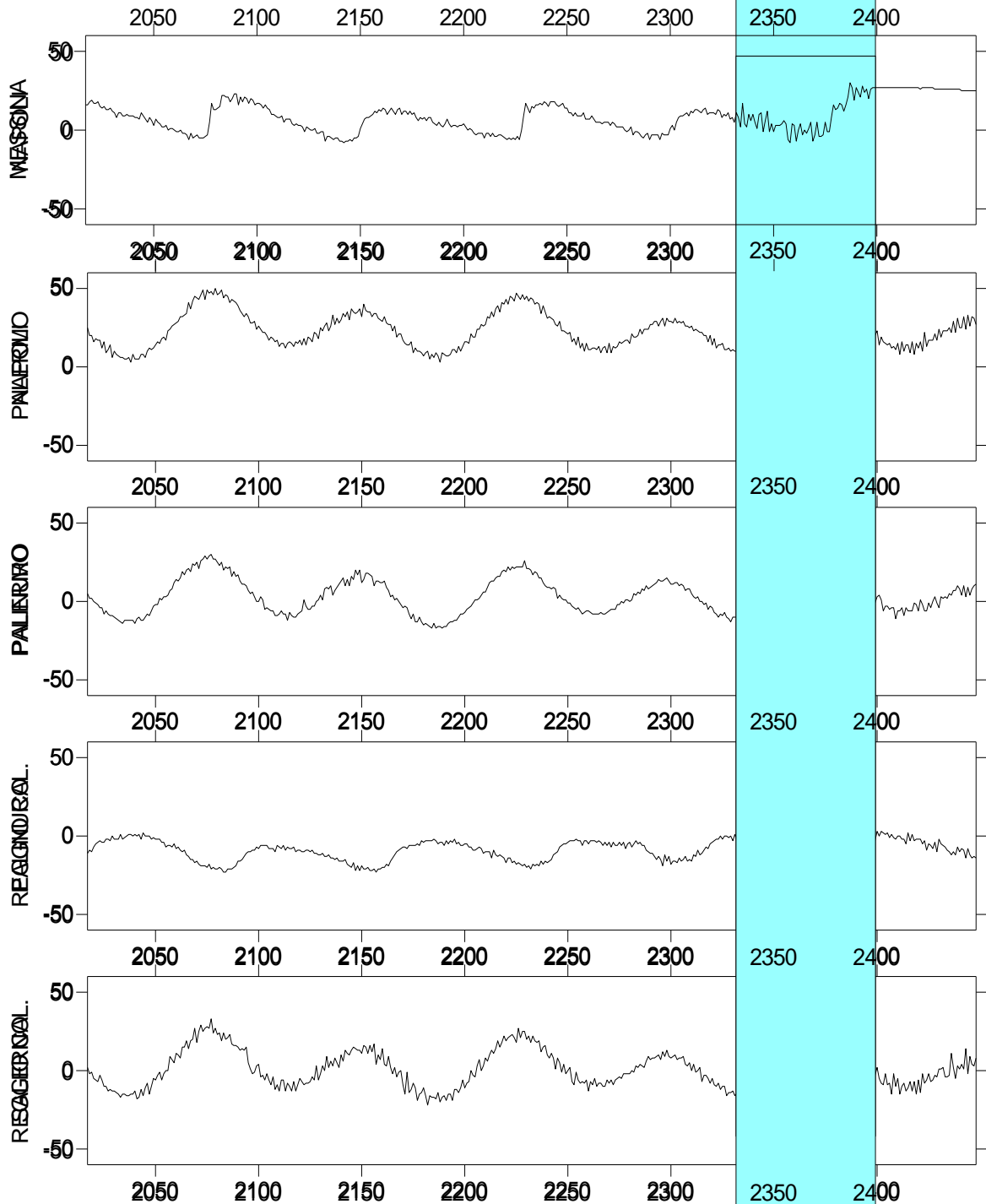
- Salerno
- Reggio Calabria
- Palinuro
- Palermo
- Messina

e ha confermato la non significatività in termini energetici delle oscillazioni anomale, pur in parte evidenziabili, riconducibili al sisma accaduto.

50

Forniamo la graficazione dei risultati da cui si possono vedere le perturbazioni intorno alla data del 17 dicembre 2008.

Analizzandola si può notare la propagazione del fenomeno. La perturbazione è chiaramente ritardata sulle stazioni di Palinuro e Salerno.



Asse Y = Livello misurato in millimetri

Asse X = Tempo in decine di minuti a partire dal 01/12/2008 00:00

Il periodo coperto in figura va dal 15/12/2008 alle 00:00 : 17/12/2008 alle 23:50

-50

2050 2100 2150 2200 2250 2300 2350 2400

~~Asse Y = Livello misurato in millimetri~~

~~Asse X = Tempo in decine di minuti a partire dal 01/12/2008 00:00~~

~~Il periodo coperto in figura va dal 15/12/2008 alle 00:00 al 17/12/2008 alle 23:50~~



---

Le analisi sopra citate sono state effettuate utilizzando metodologie di filtraggio standard mentre è possibile anche ottimizzare la scelta di tali metodologie al fine di ottenere risultati quanto più accurati possibile.

SIAP+MICROS dichiara la propria disponibilità ad approfondire l' argomento effettuando le analisi per il riconoscimento di onde anomale. Tali studi potranno essere effettuati a due diversi livelli di approfondimento in funzione degli obiettivi voluti.

Un primo livello potrebbe essere quello di studiare gli effetti di sismi di volta in volta registrati per la valutazione in termini di ampiezza, periodi, tempi di accadimento, correlazioni fra stazioni contigue, ecc. utilizzando le metodologie allo stato dell' arte.

Un secondo livello potrebbe essere quello finalizzato a strutturare un software di riconoscimento in tempo reale di oscillazioni "anomale": tale algoritmo di riconoscimento potrebbe in futuro essere inglobato in un auspicabile Sistema di Pronto Allarme Tsunami di cui ISPRA potrebbe e dovrebbe essere parte integrante.

I due livelli di cui sopra sono tipologicamente diversi.

Il primo risponde a esigenze prettamente scientifiche e certamente a fronte di maggiore accuratezza di analisi, richiede tempi non brevissimi in quanto vero e proprio studio.

Il secondo livello risponde a esigenze pratiche (allarme in tempo reale) ma, almeno nelle fasi iniziali, dovrà essere soggetto ad aggiornamenti periodici al fine di evitare l'avverarsi di "allarmi" troppo frequenti. Infatti non è ragionevolmente sperabile che ogni presenza di oscillazioni anomale nelle serie di livello siano con certezza imputabili a fenomeni tsunamici per cui sarà necessario avere una casistica statisticamente significativa prima di poter essere confidenti di "riconoscere" con buon livello di affidabilità la origine tsunamica delle suddette oscillazioni anomale.

---

## CONCLUSIONI

In questo documento sono state presentate le tecniche necessarie alla validazione dei dati mareografici di livello di marea. L'operazione di validazione è stata scomposta in tutte le fasi che la costituiscono, analizzando e descrivendo i problemi che si possono presentare in sede di controllo della qualità dei dati, proponendo diverse modalità per la correzione degli errori.

Il valore del lavoro svolto consiste nell'aver organizzato, assemblato ed applicato i protocolli di varie istituzioni internazionali che si occupano a vario titolo di raccolta e analisi di dati mareografici ed oceanografici, nonché le tecniche pratiche maturate dall'esperienza di quegli istituti che hanno storicamente registrato i dati di marea, come l'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, le cui competenze sono ora in capo ad ISPRA.

La ripetibilità delle procedure illustrate in questo documento è assicurata dall'essenza stessa della validazione dei dati mareografici: essa, infatti, deve essere continuamente applicata ai nuovi dati che ogni giorno vengono raccolti, ma può essere utilizzata anche per la revisione di dati già validati in passato, specialmente in quei casi in cui si abbiano a disposizione conoscenze recenti non disponibili al momento della validazione originaria.

In quest'ottica, il presente lavoro si configura come una guida pratica da applicare ogni qual volta si intenda portare a termine una validazione su dati mareografici, con l'obiettivo di divulgare al pubblico solamente dati affidabili e di qualità, quindi adatti ad essere utilizzati in ambito tecnico-scientifico.

---

## BIBLIOGRAFIA

APAT, 2003, *La Rete Mareografica Italiana. Analisi delle serie storiche*, a cura di Rodolfo Lama e Stefano Corsini, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 224 pp.

ARGO, 2012, *Argo data management - User's manual, Version 2.7*, Disponibile on-line al sito <<http://www.argodatamgt.org/content/download/341/2650/file/argo-quality-control-manual-2.7.pdf>>, 47 pp., 03/08/2012.

Bell, C., Vassie, J.M., e Woodworth, P.L., 1999, *POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000 (TASK-2000)*, Permanent Service for Mean Sea Level, CCMS Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead, U.K., 20 pp.

Berrelli, G., 2004, *Influenza delle condizioni meteorologiche sui sovralti differenziati dei livelli di marea nella Laguna di Venezia*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Roma.

Bingley, R., Dodson, A., Penna, N., e Booth, S., 2000, *Using a combination of continuous and episodic GPS data to separate crustal movements and sea level changes at tide gauges in the U.K.*, Proceedings of the tenth general assembly of the WEGENER project, San Fernando, Spain, September 18-20.

Bingley, R., Dodson, A., Penna, N., Teferle, N., e Baker, T., 2001, *Monitoring the vertical land movement component of changes in mean sea level using GPS: Results*, Coordinates, Volume VII, Issue 11, November 2011.

Bloomfield, P., 1976, *Fourier analysis of time series: An introduction*, John Wiley and Sons, New York, 274 pp., [rif. 3].

BODC, <[http://www.bodc.ac.uk/data/codes\\_and\\_formats/request\\_format/](http://www.bodc.ac.uk/data/codes_and_formats/request_format/)>, 03/08/2012.

Caldwell, P., e Kilonsky, B., 1992, *Data Processing and Quality Control at the TOGA Sea Level Center*, Joint IAPSO-IOC Workshop on Sea Level Measurements and Quality Control, Paris, 12-13 October, 1992, IOC Workshop Report No. 81, UNESCO, 122-135 pp.

Caldwell, P., 1998, *Sea Level Data Processing On IBM-PC Compatible Computers Version 3.0 (Year 2000 Compliant)*, JIMAR Contribution No. 98-319, 79 pp.

Caterini, E., Colucci, R.R., Crisciani, F., Raicich, F., 2011, *Previsioni di marea 2011 per il Golfo di Trieste con le costanti armoniche aggiornate*, CNR-ISMAR, Trieste.

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

De Angelis, F.G., 1987, *Il servizio mareografico*, Giornata di studio, 6 novembre 1987, Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti, Venezia.

Defant, A., 1960, *Physical oceanography*, Pergamon Press, New York, 598 pp.

---

Dietrich, G., 1963, *General Oceanography*, Interscience Publishers, New York.

Doodson, A.T., 1922, *Harmonic development of the tide-generating potential*, Proceedings of the Royal Society of London, A 100, 305-329 pp., [rif. 2].

Doodson, A.T., e Warburg, H.D., 1941, *Admiralty Manual of Tides*, Hydrographic Department, U.K. Admiralty, 270 pp.

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.

ESEAS, 2002, *Quality Control of Sea Level Observations – Version 1.0*, European Sea Level Service – Research Infrastructure, 22 pp.

EuroGOOS, 2010, *Recommendations for in-situ data near real time quality control*, European Global Ocean Observing System, 23 pp.

Foreman, M.G.G., 1977, *Manual for tidal heights analysis and prediction*, Canadian Pacific Marine Science Report No. 77-10, 10pp.

Foreman, M.G.G., 1996, *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*, Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sydney, [rif. 4].

Foreman, M.G.G., Cherniawsky, J.Y., Ballantyne, V.A., 2009, *Versatile Harmonic Tidal Analysis: Improvements and Applications*, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 26, Issue 4, 806-817 pp., [rif. 5].

Giordani Soika, A., 1976, *Venezia e il problema delle acque alte*, Supplemento al vol. XXVII del bollettino del Museo di Storia Naturale di Venezia, Venezia.

Godin, G., 1972, *The Analysis of Tides*, Liverpool University Press, 264 pp., [rif. 6]

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

Guerzoni, S., e Tagliapietra, D., 2006, (a cura di), *Atlante della Laguna: Venezia tra terra e mare*, Marsilio, Venezia.

IGM, <<http://www.igmi.org/>>, 04/07/2012.

ISPRA, 2012a, <[http://www.idromare.it/rmn\\_cennistorici.php](http://www.idromare.it/rmn_cennistorici.php)>, 23/08/2012.

ISPRA, 2012b, <<http://www.ispravenezia.it/ispra/>>, 23/08/2012.

IOC, 1985, *Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume I: Basic Procedures*, IOC Manuals and Guides No. 14, UNESCO, 83 pp.

IOC, 1992, *Joint IAPSO-IOC Workshop on Sea Level Measurements and Quality Control*, Workshop Report No.81, Paris, 12-13 October, 1992, 171 pp., [rif. 1].

---

IOC, 1994, *Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume II: Emerging Technologies*, IOC Manuals and Guides No. 14, UNESCO, 52 pp.

IOC, 2002, *Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume III: Reappraisals and Recommendations as of the year 2000*, IOC Manuals and Guides No. 14, UNESCO, 55 pp.

IOC, 2006, *Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume IV: An Update to 2006*, IOC Manuals and Guides No. 14, UNESCO, 88 pp.

ISO 8601:2004, *Data elements and interchange formats – Information interchange – Representation of dates and times*.

ISO 9000:2005, *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*.

ISO 19115:2003, *Geographic information – Metadata*.

Kilonsky, B., e Caldwell, P., 1991, *In pursuit of high-quality sea level data*, IEEE Oceans Proceedings Vol. 2, 1-3 October 1991.

Matteotti, G., 1999, *Lineamenti di costruzioni marittime*, S.G.E., Padova.

Murray, M.T., 1964, *A general method for the analysis of hourly heights of the tide*, International Hydrographic Review, 41(2), 91-101 pp.

NODC, <[http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr\\_wod.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html)>, 03/08/2012.

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

Polli, S., 1961a, *La propagazione delle maree nell'Adriatico*, Istituto Talassografico Sperimentale, Pubblicazione n. 370, Trieste.

Polli, S., 1961b, *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.

Pugh, D.T., 1987, *Tides, Surges and Mean Sea-Level (reprinted with corrections)*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, U.K., 486 pp. Disponibile on-line al sito <<http://eprints.soton.ac.uk/19157/>>, 04/07/2012.

Periáñez, R., 2005, *Modelling the Dispersion of Radionuclides in the Marine Environment: An Introduction*, Springer, 202 pp.

Raicich, F., 2002, *Review of current quality control applied to tide gauge data*, CNR, Istituto Sperimentale Talassografico, Trieste, 5 pp.

Rickards, L., e Kilonsky, B., 1997, *WOCE "Delayed-mode" Sea Level Data Assembly Centre (DAC)*, <<http://www.bodc.ac.uk/projects/international/woce/documents/odspaper.pdf>>, 12 pp., 04/07/2012.

---

RMLV, <[www.ispravenezia.it/ispra/](http://www.ispravenezia.it/ispra/)>, 03/08/2012.

RMN, <[www.mareografico.it](http://www.mareografico.it)>, 03/08/2012.

SeaDataNet, <<http://www.seadatanet.org/Standards-Software/Data-Quality-Control>>, 03/08/2012.

Shaker, A.A., Alnaggar, D., Saad, A.A., e Faisal, H., 2011, *Absolute Sea Level Rise Estimation at Alexandria Using Tide Records and GPS Observations*, FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011.

Sposito, A., e Vultaggio, M., 1988, *Analisi armonica e previsione della marea*, Giannini Editore, Napoli, 109 pp.

Teferle, N., 2000, *Continuous GPS measurements at UK tide gauge sites, 1997-2000*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION-GPS 2000, Utah, USA, September 19-22.

Tomasin, A., 2005, *The software Polifemo for tidal analysis*, Technical Note 202, CNR-ISMAR, Venezia.

## ALLEGATO A

(tratto dall'Appendice 3 di IOC, 1985)

### Applicazione del filtro $X_0$ per il calcolo del livello medio del mare giornaliero

Lo scopo di questo filtro passa basso è quello di rimuovere dalle misure di livello del mare l'energia dell'onda di marea su frequenze superiori a quella diurna. L'applicazione del filtro fornisce il livello medio giornaliero, riferito a mezzogiorno, partendo da osservazioni registrate ad intervallo orario, utilizzando 39 misure per ogni valore calcolato.

Il filtro è definito come segue, per  $1 < t < 19$ :

$$F(t) = (2, 1, 1, 2, 0, 1, 1, 0, 2, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1).$$

Il filtro è simmetrico, quindi  $F(t) = F(-t)$ , ed il livello medio giornaliero  $X_T$  viene calcolato in base alla seguente formula:

$$X_T = \frac{1}{30} \cdot \sum_{d=-19}^{d=19} F(d) \cdot H(T+d) \quad d \neq 0$$

dove  $H(t)$  sono i livelli orari registrati al tempo  $t$ ,  $F(d)$  sono i pesi da applicare e  $T$  l'orario di riferimento (ore 12:00).

#### Esempio di applicazione del filtro $X_0$

In questo esempio si vuole calcolare il livello medio giornaliero per il giorno 2 gennaio, riferito alle ore 12:00. Nel calcolo sono utilizzati i dati orari di 3 giorni di osservazioni. Il tempo è espresso in ore mentre i livelli sono in metri.

##### 1 GENNAIO

Tempo	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
Livello	3.819	5.286	6.004	6.051	5.735	5.077	4.159	3.217	2.422	1.872	1.699	2.037
						* 1		* 1			* 1	
					<u>5.077</u>	+	<u>3.217</u>	+		<u>1.699</u>		

##### 2 GENNAIO

Tempo	0000	0100	0200	0300	0400	0500	0600	0700	0800	0900	1000	1100
Livello	3.070	4.611	5.825	6.167	5.895	5.267	4.395	3.496	2.663	1.979	1.648	1.774
	* 1	* 1		* 2		* 1	* 1		* 2	* 1	* 1	* 2
	+ <u>3.070</u>	+ <u>4.611</u>	+	<u>12.334</u>	+	<u>5.267</u>	+ <u>4.395</u>	+	<u>5.326</u>	+ <u>1.979</u>	+ <u>1.648</u>	+ <u>3.548</u>

Tempo	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
Livello	2.513	3.855	5.088	5.670	5.668	5.347	4.730	3.888	2.998	2.249	1.804	1.760
		* 2	* 1	* 1	* 2		* 1	* 1		* 2		* 1
	+	<u>7.710</u>	+ <u>5.088</u>	+ <u>5.670</u>	+ <u>11.336</u>	+	<u>4.730</u>	+ <u>3.888</u>	+	<u>4.498</u>	+	<u>1.760</u>

##### 3 GENNAIO

Tempo	0000	0100	0200	0300	0400	0500	0600	0700	0800	0900	1000	1100
Livello	2.256	3.418	4.805	5.676	5.851	5.579	4.987	4.187	3.351	2.578	1.975	1.703
	* 1		* 1			* 1		* 1				
	+ <u>2.256</u>	+	<u>4.805</u>	+	<u>5.579</u>	+	<u>4.487</u>					

Somma = 113.978 m, da cui si ricava il l.m.m. per il 2 gennaio:  $113.978/30 = 3.799$  m



## ALLEGATO B

### Siti web di interesse

ORGANISMI E PROGETTI INTERNAZIONALI		
Sigla	Descrizione	Sito web
ARGO	Argo Project - Homepage	<a href="http://www.argo.net/">http://www.argo.net/</a>
ARGO-AIC	Argo – Information Center	<a href="http://wo.jcommops.org/cgi-bin/WebObjects/Argo">http://wo.jcommops.org/cgi-bin/WebObjects/Argo</a>
ARGO-DM	Argo – Data Management	<a href="http://www.argodatamgt.org/">http://www.argodatamgt.org/</a>
BOM-NTC	Australian Government- Bureau of Meteorology – National Tidal Centre - Homepage	<a href="http://www.bom.gov.au/oceanography/projects/ntc/ntc.shtml">http://www.bom.gov.au/oceanography/projects/ntc/ntc.shtml</a>
BOM-NTC	Australian Government- Bureau of Meteorology – National Tidal Centre - Tidal Predictions	<a href="http://www.bom.gov.au/oceanography/tides/">http://www.bom.gov.au/oceanography/tides/</a>
CO-OPS	NOAA – Center for Operational Oceanographic Products and Services	<a href="http://www.tidesandcurrents.noaa.gov/pub.html">http://www.tidesandcurrents.noaa.gov/pub.html</a>
CSC	NOAA – Coastal Services Center	<a href="http://www.csc.noaa.gov/">http://www.csc.noaa.gov/</a>
GLOSS	Global Sea Level Observing System	<a href="http://www.gloss-sealevel.org/">http://www.gloss-sealevel.org/</a>
ICSM	International Committee on Surveying and Mapping	<a href="http://www.icsm.gov.au/icsm/tides/index.html">http://www.icsm.gov.au/icsm/tides/index.html</a>
ICTP	International Centre for Theoretical Physics	<a href="http://www.ictp.it/">http://www.ictp.it/</a>
IMCS	Institute of Marine and Coastal Science – Rutgers Ocean Modeling Group	<a href="http://marine.rutgers.edu/po/index.php?id=1">http://marine.rutgers.edu/po/index.php?id=1</a>
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission - Homepage	<a href="http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/ioc-oceans/">http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/ioc-oceans/</a>
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission - Manuals	<a href="http://www.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&amp;view=article&amp;id=22&amp;Itemid=69">http://www.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&amp;view=article&amp;id=22&amp;Itemid=69</a>
IODE	International Oceanographic Data and Information Exchange	<a href="http://www.iode.org/">http://www.iode.org/</a>
IOOS	NOAA – Integrated Ocean Observing System	<a href="http://www.ioos.gov/">http://www.ioos.gov/</a>
JASL	Joint Archive for Sea Level	<a href="http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhslc/jasl.html">http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhslc/jasl.html</a>
JCOMM	WMO-IOC Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology	<a href="http://www.jcomm.info/">http://www.jcomm.info/</a>
JODC	Japan Oceanographic Data Center	<a href="http://www.jodc.go.jp/">http://www.jodc.go.jp/</a>
NCCOS	NOAA – National Centers for Coastal Ocean Science	<a href="http://coastalscience.noaa.gov/default.aspx">http://coastalscience.noaa.gov/default.aspx</a>
NGS	NOAA – National Geodetic Survey	<a href="http://geodesy.noaa.gov/">http://geodesy.noaa.gov/</a>
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration - Homepage	<a href="http://oceanservice.noaa.gov/welcome.html">http://oceanservice.noaa.gov/welcome.html</a>
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration – Central Library	<a href="http://www.lib.noaa.gov">http://www.lib.noaa.gov</a>

NODC	NOAA – National Oceanographic Data Center	<a href="http://www.nodc.noaa.gov/">http://www.nodc.noaa.gov/</a>
OceanDOCS	E-Repository of Ocean Publications	<a href="http://www.oceandocs.org/">http://www.oceandocs.org/</a>
OceanEXPERT	Directory of Marine and Freshwater Professionals	<a href="http://www.oceanexpert.net/">http://www.oceanexpert.net/</a>
OceanSITES	Worldwide system of long-term, deepwater reference stations	<a href="http://www.oceansites.org/">http://www.oceansites.org/</a>
OceanTeacher	Documenti su oceanografia e meteorologia marina	<a href="http://library.oceanteacher.org/OTMediawiki/index.php/OceanTeacher">http://library.oceanteacher.org/OTMediawiki/index.php/OceanTeacher</a>
OCRM	NOAA – Ocean and Coastal Resource Management	<a href="http://coastalmanagement.noaa.gov/">http://coastalmanagement.noaa.gov/</a>
ODS	The Ocean Data Standards Pilot Project	<a href="http://www.oceandatastandards.org/index.php?option=com_frontpage&amp;Itemid=1">http://www.oceandatastandards.org/index.php?option=com_frontpage&amp;Itemid=1</a>
ONR	Office of Naval Research – Ocean Modeling	<a href="http://www.ocean-modeling.org/index.php">http://www.ocean-modeling.org/index.php</a>
OSU	Oregon State University Tidal Data Inversion	<a href="http://volkov.oce.orst.edu/tides/">http://volkov.oce.orst.edu/tides/</a>
PAC	Pêches et Océans Canada – IOS Tidal Package	<a href="http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/science/oceans/tidal-marees/index-eng.htm">http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/science/oceans/tidal-marees/index-eng.htm</a>
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level	<a href="http://www.psmsl.org/">http://www.psmsl.org/</a>
UHSLC	University of Hawaii Sea Level Center	<a href="http://uhslc.soest.hawaii.edu/">http://uhslc.soest.hawaii.edu/</a>
WHYCOS	World Hydrological Cycle Observing System	<a href="http://www.whycos.org/cms/">http://www.whycos.org/cms/</a>
WMO	World Meteorological Organization - Homepage	<a href="http://www.wmo.int/pages/index_en.html">http://www.wmo.int/pages/index_en.html</a>
WMO	World Meteorological Organization - Guides	<a href="http://www.wmo.int/pages/themes/wmoprod/guides.html">http://www.wmo.int/pages/themes/wmoprod/guides.html</a>
WMO	World Meteorological Organization - Manuals	<a href="http://www.wmo.int/pages/themes/wmoprod/manuals.html">http://www.wmo.int/pages/themes/wmoprod/manuals.html</a>
WOCE	NOAA – World Ocean Circulation Experiment	<a href="http://www.nodc.noaa.gov/WOCE/">http://www.nodc.noaa.gov/WOCE/</a>

#### ORGANISMI E PROGETTI EUROPEI

Sigla	Descrizione	Sito web
AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data	<a href="http://www.aviso.oceanobs.com/fr/accueil/index.html">http://www.aviso.oceanobs.com/fr/accueil/index.html</a>
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau	<a href="http://www.baw.de/en/index.php.html">http://www.baw.de/en/index.php.html</a>
BODC	British Oceanographic Data Centre	<a href="http://www.bodc.ac.uk/">http://www.bodc.ac.uk/</a>
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	<a href="http://www.cnrs.fr/">http://www.cnrs.fr/</a>
Coriolis	Coriolis Operational Oceanography	<a href="http://www.coriolis.eu.org/">http://www.coriolis.eu.org/</a>
EasyTIDE	Admiralty EasyTIDE – Worldwide Tidal Predictions	<a href="http://easytide.ukho.gov.uk/EASYTIDE/EasyTide/index.aspx">http://easytide.ukho.gov.uk/EASYTIDE/EasyTide/index.aspx</a>
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	<a href="http://www.ecmwf.int/">http://www.ecmwf.int/</a>
ESEAS	European Sea Level Service	<a href="http://www.es eas.org/">http://www.es eas.org/</a>
EuroGOOS	European Global Ocean Observing System	<a href="http://www.eurogoos.org/">http://www.eurogoos.org/</a>

EuroSITES	FP7 Collaborative Project	<a href="http://www.eurosites.info/index.php">http://www.eurosites.info/index.php</a>
GFZ	Dipartimento di geofisica della Repubblica Croata	<a href="http://www.gfz.hr/eng/">http://www.gfz.hr/eng/</a>
HHI	Hrvatski Hidrografski Institut	<a href="http://www.hhi.hr/en">http://www.hhi.hr/en</a>
ICES	International Council for the Exploration of the Sea	<a href="http://www.ices.dk/indexfla.asp">http://www.ices.dk/indexfla.asp</a>
IZOR	Institute of Oceanography and Fisheries – Repubblica Croata	<a href="http://www.izor.hr/eng/intro.html">http://www.izor.hr/eng/intro.html</a>
KNMI	Royal Netherlands Meteorological Institute	<a href="http://www.knmi.nl/index_en.html">http://www.knmi.nl/index_en.html</a>
LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales	<a href="http://www.legos.obs-mip.fr/">http://www.legos.obs-mip.fr/</a>
MARBEF	Marine Biodiversity and Ecosystem Functioning	<a href="http://www.marbef.org/index.php">http://www.marbef.org/index.php</a>
MOON	Mediterranean Operational Oceanography Network	<a href="http://www.moon-oceanforecasting.eu/">http://www.moon-oceanforecasting.eu/</a>
MyOcean	Ocean Monitoring and Forecasting	<a href="http://www.myocean.eu/">http://www.myocean.eu/</a>
POL	National Oceanography Centre – Proudman Oceanographic Laboratory - Homepage	<a href="http://www.pol.ac.uk/">http://www.pol.ac.uk/</a>
POL-NTSLF	National Tidal and Sea Level Facility - UK & Irish Tidal Predictions	<a href="http://www.pol.ac.uk/ntslf/tidalp.html">http://www.pol.ac.uk/ntslf/tidalp.html</a>
SeaDataNet	SeaDataNet Project - Homepage	<a href="http://www.seadatanet.org">http://www.seadatanet.org</a>
SeaSearch	Oceanographic and Marine Data & Information in Europe	<a href="http://www.sea-search.net/">http://www.sea-search.net/</a>
SHOM	Service hydrographique et océanographique de la marine	<a href="http://www.shom.fr/">http://www.shom.fr/</a>
SLEAC	Sea Levels along the European Atlantic Coastline	<a href="http://www.sleac.org/">http://www.sleac.org/</a>

#### ENTI E PROGETTI NAZIONALI ITALIANI

Sigla	Descrizione	Sito web
ADRIAMET	Progetto Adriamet: meteorologia per la nautica nel mare Adriatico	<a href="http://85.42.129.76/adriamet/index.html">http://85.42.129.76/adriamet/index.html</a>
ARCHIMEDE	Archivio dati meteo-marini	<a href="http://archimede.caspur.it/Default.aspx">http://archimede.caspur.it/Default.aspx</a>
CNR-ISMAR	Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze Marine	<a href="http://www.ismar.cnr.it/">http://www.ismar.cnr.it/</a>
GNOO	Gruppo Nazionale di Oceanografia Operativa	<a href="http://gnoo.bo.ingv.it/">http://gnoo.bo.ingv.it/</a>
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale	<a href="http://www.isprambiente.gov.it/it">http://www.isprambiente.gov.it/it</a>
ISPRA	ISPRA – Previsioni meteo per la modellistica meteomarina	<a href="http://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/">http://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/</a>
KASSANDRA	Kassandra Storm Surge Modelling System – CNR-ISMAR	<a href="http://kassandra.ve.ismar.cnr.it:8080/kassandra/homepage">http://kassandra.ve.ismar.cnr.it:8080/kassandra/homepage</a>
LaguNET	Rete italiana per la ricerca ecologica in zone costiere ed aree di transizione	<a href="http://www.dsa.unipr.it/lagunet/">http://www.dsa.unipr.it/lagunet/</a>
LaguNET	Italian Network for Lagoon Research - Homepage	<a href="http://www.lagunet.it/">http://www.lagunet.it/</a>

OGS	Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale	<a href="http://www.ogs.trieste.it/">http://www.ogs.trieste.it/</a>
RMN	ISPRA – Rete Mareografica Nazionale	<a href="http://www.mareografico.it/">http://www.mareografico.it/</a>
RON	ISPRA – Rete Ondametrica Nazionale	<a href="http://www.telemisura.it/">http://www.telemisura.it/</a>
SHYFEM	Shallow water Hydrodynamic Finite Element Model – CNR-ISMAR	<a href="https://sites.google.com/site/shyfem/">https://sites.google.com/site/shyfem/</a>
SIMN	Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale – Cenni storici	<a href="http://193.206.192.243/dacq/mare.htm">http://193.206.192.243/dacq/mare.htm</a>
SMN	ISPRA – Servizio Mareografico Nazionale	<a href="http://www.idromare.it/">http://www.idromare.it/</a>

### LAGUNA DI VENEZIA

Sigla	Descrizione	Sito web
IAES	International Academy of Environmental Sciences	<a href="http://www.iaes.info/">http://www.iaes.info/</a>
ICPSM	Istituzione Centro Previsione e Segnalazione Maree	<a href="http://www.comune.venezia.it/maree/">http://www.comune.venezia.it/maree/</a>
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale – Servizio Laguna di Venezia	<a href="http://www.ispravenezia.it/isptra/">http://www.ispravenezia.it/isptra/</a>
IVSLA	Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti – Homepage	<a href="http://www.istitutoveneto.it/">http://www.istitutoveneto.it/</a>
IVSLA	IVSLA – Banca dati ambientale sulla Laguna di Venezia	<a href="http://extra.istitutoveneto.it/venezia/home_bda.htm">http://extra.istitutoveneto.it/venezia/home_bda.htm</a>
RAMSES	Progetto Ramses – Insula, Venezia	<a href="http://www.ramses.it/">http://www.ramses.it/</a>
SALVE	Attività per la salvaguardia di Venezia e della sua laguna	<a href="http://salve.it/it/default.htm">http://salve.it/it/default.htm</a>

