

VARIAZIONI DI LUNGO PERIODO DEL LIVELLO DEL MARE E DEL REGIME DI MAREA NELLA LAGUNA DI VENEZIA¹

FERLA M.†, CORDELLA M.†, MICHIELLI L.†, RUSCONI A.‡

†Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT),
Servizio Laguna di Venezia, S.Polo, 50 – 30125 Venezia.

‡Università IUAV Venezia Facoltà di Pianificazione del Territorio,
S. Croce 1957 - 30120 Venezia
maurizio.ferla@apatvenezia.it

Abstract

The National Agency for Environmental Protection and Technical Services (APAT) manages the Real Time tidal gauge system in the Lagoon of Venice and Northern Adriatic Sea (RTLTV). The principal matter is the analysis of historical time series to investigate subsidence and eustatism, storm surges and hydrodynamics in the transitional environment of the coastal areas in the North-western Adriatic regions. Results on the analysis of time series of mean sea level in Venice are illustrated. It is also focused the analysis on the astronomical tides in the lagoon of Venice. The main differences among the hydrodynamics of the lagoon in the early 20th century and the nowadays lagoon are pointed out confirming a meaningful decay from a transitional to a marine environment.

Keywords: Tide gauge, mean sea level, astronomical tide.

Riassunto

L'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (A.P.A.T.) gestisce la rete mareografica in tempo reale della Laguna di Venezia e della costa Nord Adriatica (RLTV). L'argomento principale è l'analisi delle serie storiche finalizzata all'analisi della subsidenza e dell'eustatismo, delle acque alte eccezionali e dell'idrodinamica negli ambienti di transizione delle aree costiere dell'Adriatico Nord-Occidentale. In questo lavoro sono presentati i risultati di alcune analisi sulle serie temporali del livello medio mare a Venezia. Particolare attenzione è rivolta inoltre all'analisi della marea astronomica in Laguna di Venezia. Vengono evidenziate le differenze più rilevanti tra l'idrodinamica della laguna degli inizi del XX secolo e quella attuale, confermando un chiaro decadimento da area di transizione ad ambiente marino.

Parole chiave: mareografo, livello medio del mare, marea astronomica.

¹ Raccomandato per un'edizione speciale della rivista "Coastal Shelf Science" (Atti del 41^{mo} convegno ECSA, Venezia 15-20 ottobre 2006).

1. INTRODUZIONE

L'area costiera adriatica nord occidentale è caratterizzata da circa 2.400 km² di superfici che giacciono al di sotto del livello medio del mare e che sono delimitate da circa 300 km di litorali compresi tra il delta del Po e la foce del fiume Isonzo. Si tratta di una delle aree del Mediterraneo a più alto rischio di inondazione per una molteplicità di fattori: la presenza dei tronchi terminali dei grandi corsi d'acqua dell'Italia settentrionale (Po, Adige, Piave, Tagliamento); la ricorrenza di violente mareggiate associate ad eventi di *alta marea eccezionale* (storm surges); la crescita relativa del livello medio del mare dovuta all'effetto combinato dei fenomeni di eustatismo generale e di subsidenza locale, questi ultimi assai differenziati da punto a punto del litorale (Bondesan et al., 1995; Tosi et al., 2000).

Qui, in condizioni normali, le escursioni di marea sono tra le più elevate del Mediterraneo e raggiungono valori intorno al metro. Tuttavia, a causa della conformazione semichiusa dell'Adriatico e dei suoi fondali relativamente bassi nella parte settentrionale (circa 20 m), i livelli della marea si possono innalzare ben al di sopra dei normali valori di alta marea a causa delle forzanti meteorologiche associate al passaggio di forti campi depressionari di origine atlantica. Tali fenomeni, noti localmente con il termine *acque alte*, danno luogo ad allagamenti, talvolta cospicui e persistenti, dei centri abitati lagunari e, nello stesso tempo, accrescono la forza aggressiva delle mareggiate che si abbattono lungo le difese costiere (Ferla, 2003).

Lo studio delle variazioni del livello medio marino (LMM) in quest'area è quindi importante, perché consente di valutare come si trasforma il rapporto altimetrico tra questo ambiente di transizione, di per sé molto vasto, ed il mare Adriatico. Recenti aggiornamenti sulle variazioni del LMM a Venezia sono stati proposti dall'Ufficio Idrografico e Mareografico (Bonato et al., 2001), dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT, 2006_a) e dal Centro Previsione e Segnalazione Maree del Comune di Venezia (Battistin et al., 2006). Contributi significativi sono anche quelli relativi alle variazioni del LMM a Trieste in quanto basate su una lunga ed abbastanza omogenea serie di osservazioni mareografiche non affette dal disturbo dovuto alla subsidenza proprio della parte occidentale del litorale Nord Adriatico (Ferraro, et al., 2001).

Le aree lagunari sono la componente principale di tutto l'ambiente di transizione dell'area nord adriatica. La più estesa è la laguna di Venezia con i suoi 550 km². E' anche la più importante per il suo patrimonio storico, socio-economico ed ambientale, e per questo motivo è sottoposta ad un particolare regime di tutela stabilito da leggi speciali emanate dallo Stato italiano.

Nel corso dei secoli la laguna di Venezia è stata sottoposta a processi di trasformazione accentuate da cause antropiche che ne hanno mutato profondamente i caratteri idrodinamici e morfologici. Gli studi basati su un approccio di tipo concettuale che simula il comportamento idrodinamico della laguna mediante modelli matematici hanno evidenziato un progressivo approfondimento dei fondali interni, soprattutto nella parte centrale, e quindi un decadimento dei caratteri propri dell'ambiente di transizione verso un ambiente di tipo marino (D'Alpaos, 2003).

Lo studio delle variazioni dei caratteri propagatori della marea all'interno della laguna attraverso l'analisi delle registrazioni mareografiche è quindi un passaggio significativo che consente di verificare sperimentalmente tempi e grado di evoluzione dei processi in atto in rapporto alle trasformazioni indotte. In questo senso, un importante punto di riferimento sono gli studi condotti da Polli negli anni '50. Raccogliendo le valutazioni delle costanti di marea astronomica eseguite per alcune stazioni mareografiche in esercizio per brevi periodi del primo '900 ed elaborando i dati disponibili di mareografi della Laguna a cavallo tra gli anni 1912 e 1940, Polli elaborò alcune mappe tematiche sui tempi di propagazione e le riduzioni di ampiezza subite dall'onda di marea penetrando dall'Adriatico verso le aree più interne della laguna di Venezia (Polli, 1951; Polli, 1952; Polli, 1961). Gli studi di Polli, basati su registrazioni mareografiche di 16 stazioni lagunari, ci hanno consegnato una immagine di come "funzionava" la laguna nei primi decenni del '900, quando ancora non erano stati realizzati quei massicci interventi di espansione del polo industriale di Porto Marghera, eseguiti nei primi decenni del 2^a dopoguerra, tra cui lo scavo del grande canale di navigazione Malamocco-Marghera.

Partendo dall'attività di monitoraggio mareografico condotta dall'APAT, la presente memoria descrive alcuni singolari aspetti posti in luce dai recenti aggiornamenti riguardanti la crescita del valore medio annuale del LMM a Venezia. Nel contempo vengono proposti alcuni preliminari risultati sull'analisi della odierna capacità di attenuazione delle correnti di marea da parte del bacino lagunare basate sull'aggiornamento delle costanti armoniche calcolate mediante un più esteso e completo bagaglio di registrazioni mareografiche raccolte negli anni 2002, 2003 e 2004. Ne deriva un'immagine che, confrontata con la situazione descritta da Polli per i primi decenni del '900, mette in luce quegli aspetti evolutivi che oggi caratterizzano il bacino lagunare sempre più simile ad una baia.

2. LA RETE MAREOGRAFICA E LE ELABORAZIONI DEI DATI

L'APAT gestisce la Rete Mareografica della Laguna di Venezia e del Nord Adriatico (RTLTV) composta da 52 stazioni meteo-mareografiche distribuite all'interno degli specchi lagunari, alle bocche portuali, e lungo il litorale compreso tra il delta del Po e Trieste.

Ognuna di queste stazioni è dotata di uno strumento a galleggiante per la misura e la registrazione del livello di marea su supporto elettronico. La frequenza di campionamento è regolata su un dato ogni 10 minuti. L'affidabilità della misura in ogni stazione è altresì assicurata dalla compresenza di un secondo strumento, anch'esso a galleggiante, ma a funzionamento meccanico, che registra su un diagramma cartaceo la curva di marea rilevata. Il personale di APAT sovrintende alla continuità delle registrazioni attraverso sistematici controlli periodicamente eseguiti su ciascuna stazione della rete.

Alcune stazioni, in ragione della loro posizione, sia all'interno della laguna di Venezia che lungo il litorale nord adriatico, sono dotate anche di strumenti per la misura di parametri meteo quali la pressione atmosferica, le precipitazioni e la direzione/velocità del vento.

Circa la metà delle stazioni di osservazione della rete è dotata di apparecchiatura per la trasmissione in tempo reale dei dati via radio. I dati vengono quindi visualizzati presso una centrale di acquisizione installata presso gli Uffici di Venezia di APAT con frequenza di aggiornamento regolata sui 10 minuti (Fig. 1). La centrale di acquisizione provvede inoltre a scambiare i dati rilevati con le centrali di acquisizione dei Centri Operativi di Protezione Civile delle regioni nord orientali (Veneto, Friuli V.G. e Trentino-Alto Adige) e quindi con il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile.

L'operatività in tempo reale di questa rete è finalizzata a vari scopi tra cui l'emissione del Bollettino Giornaliero della Marea per Venezia, la segnalazione e la previsione degli eventi di marea eccezionale e il conseguente allertamento degli organi di protezione civile, l'assistenza ai piloti del porto di Venezia per la navigazione alle bocche portuali e lungo i grandi canali interni, l'attivazione di difese idrauliche nell'immediato entroterra lagunare, ecc. In tali occasioni il Centro Segnalazione e Previsione Maree del Comune di Venezia (CSPM) provvede inoltre ad allertare i cittadini attraverso il suono di sirene posizionate in vari punti della città.

I dati così raccolti vengono quindi sottoposti ad un processo di controllo e di validazione secondo i protocolli stabiliti dagli organismi scientifici

internazionali (IOC, 1985; IOC, 1994; IOC, 2001; WMO, 1983) e successivamente divulgati tramite appositi reports dell'APAT. Gran parte dell'informazione mareografica, soprattutto quella antecedente gli anni '90, risulta tuttavia di difficile consultazione, perché non ancora disponibile in formato elettronico. L'APAT aggiorna periodicamente la serie delle elaborazioni del valore medio annuale del livello del mare calcolato per alcune delle stazioni della RTLTV che presentano le più lunghe serie di osservazione. Le misure dei livelli di marea sono riferiti allo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS) identificato da un apposito cippo posto sulla riva lungo il Canal della Giudecca. Tale riferimento, solidale con il suolo veneziano ed in prossimità della omonima stazione mareografica istituita nel 1923, coincideva nel 1897 con il LMM. Tale riferimento è utilizzato per le rilevazioni della altezze di marea effettuate nella città sin dal 1872.

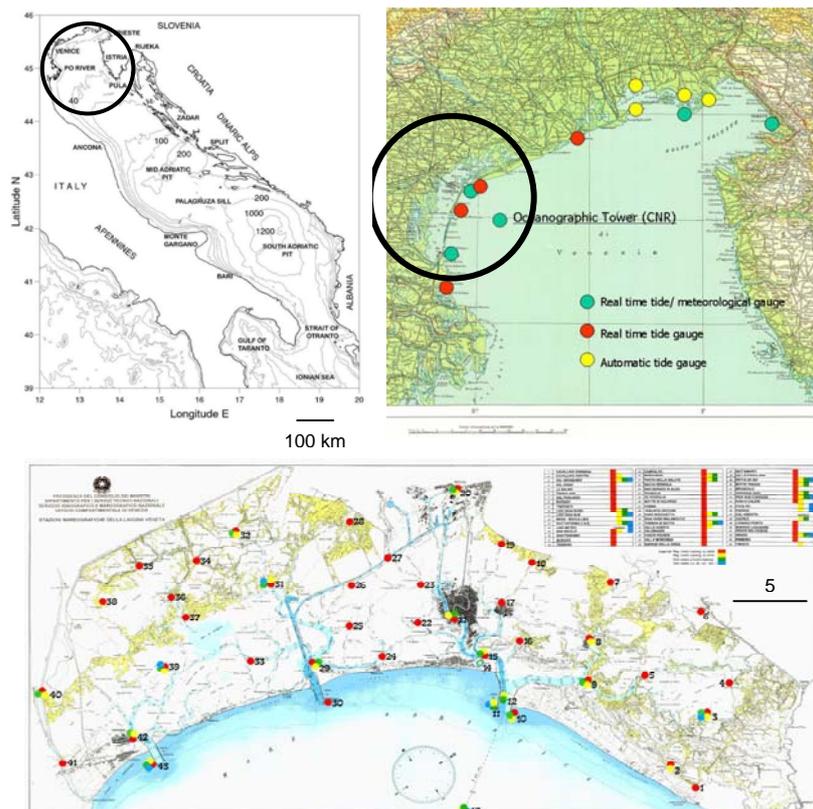


Figura 1 – Rete mareografica della laguna di Venezia e dell'arco costiero Nord Adriatico

3. VARIAZIONI DEL LIVELLO MEDIO MARINO A VENEZIA

Il grafico di figura 2 riproduce l'andamento dei valori medi annuali del LMM a Venezia riportati nell'Annuario dei Dati Ambientali dell'APAT edizione 2006 (APAT, 2006_b). Il grafico si riferisce ad oltre 130 anni di osservazione e i dati sono riferiti ad un piano di riferimento posto a 150 cm al di sotto dello ZMPS.

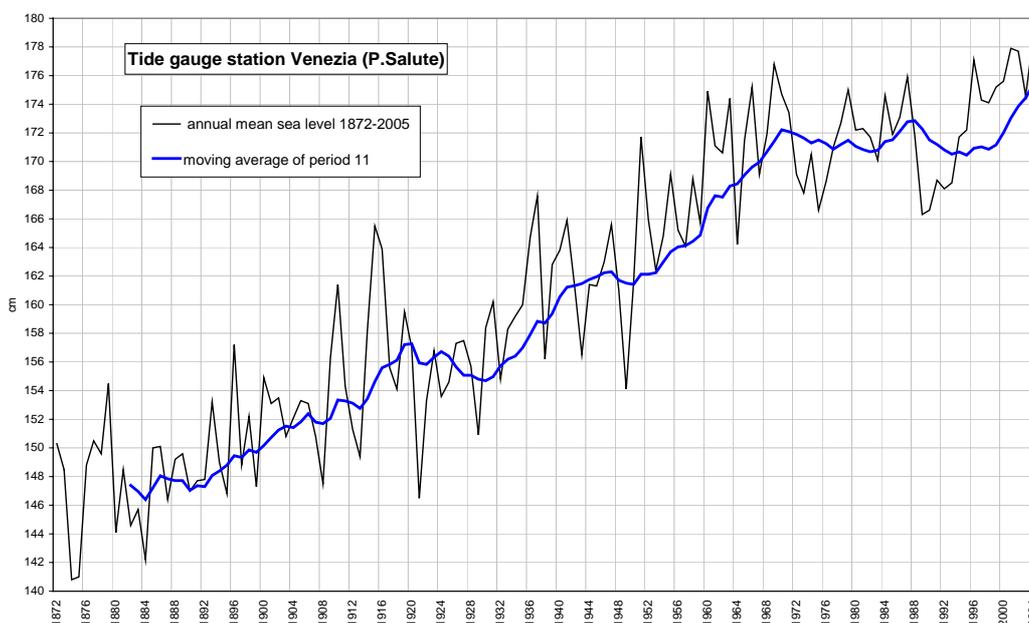


Figura 2 – Stazione mareografica di Venezia Punta della Salute. Andamento del LMM del periodo 1872-2005 e media mobile a passo 11.

L'osservazione del grafico evidenzia il tipico andamento fluttuante del LMM annuale osservato anche in altre località dell'Adriatico ove sono presenti stazioni mareografiche con regolari registrazioni per molti decenni (Trieste, Rovigno, Spalato). Le oscillazioni annuali del LMM sono state oggetto di numerosi studi che, insieme alla dipendenza da fattori climatici, hanno posto in luce singolari periodicità undecennali correlate all'attività solare (Mosetti, 1989; Zanchettin et al., 2006).

L'andamento tendenziale medio dell'intera serie, rappresentato dalla media mobile a passo 11 anni, si presenta in crescita ancorchè non uniforme. Il brusco aumento della media mobile tra gli anni '30 e la fine degli anni '60

testimonia l'exasperazione dei processi di subsidenza registrata a causa di diffusi e massicci prelievi d'acqua dalle falde dell'entroterra lagunare per le esigenze industriali di Porto Marghera. Dettagliati studi sulla subsidenza veneziana sono stati condotti a partire dagli anni '70 mettendo principalmente in luce una perdita di quota di poco più di 23 cm del suolo veneziano in circa 100 anni per gli effetti combinati di eustatismo e subsidenza.

Per separare gli effetti della subsidenza antropica da quelli dovuti alla subsidenza naturale e all'eustatismo, alcuni autori hanno proposto la suddivisione della serie delle osservazioni del LMM annuale di Venezia fino al 2002 in quattro periodi:

- il primo periodo (1908-1925) caratterizzato da un andamento tendenziale in crescita attribuibile all'eustatismo e alla subsidenza naturale (*natural*);
- il secondo periodo (1925-1970), che ai precedenti due effetti somma il contributo della subsidenza antropica dovuta ai prelievi di acque sotterranee per gli usi industriali (*induced*);
- il terzo periodo (1970-1975), successivo alla chiusura dei pozzi di P. Marghera, mostra un significativo recupero di quota circa 2 cm (*rebound*);
- il quarto periodo (1975-2002) mostra un ripresa della tendenza in crescita (*present*).

Nel complesso i 23 cm di perdita di quota del suolo veneziano calcolati per 100 anni sono stati ripartiti in tre componenti: 3 cm dovuti alla subsidenza naturale (geologica); 9 cm dovuti alla subsidenza antropica; 11 cm dovuti all'eustatismo (Carbognin et al. 2005).

L'analisi riferita all'intero periodo 1872-2005, prescindendo quindi dalla non stazionarietà della serie temporale, mostra una linea di tendenza complessiva senza significativi scostamenti rispetto alle precedenti valutazioni. Le registrazioni strumentali danno quindi un tasso medio di crescita relativa del LMM a Venezia stimabile in 2.4 mm/anno (APAT, 2006_a). Quindi, complessivamente, la perdita di quota del suolo veneziano attribuibile al periodo 1872-2005 è di circa 31 cm.

Recentemente Camuffo et al. hanno proposto alcune analisi sulle variazioni di lungo periodo del LMM a Venezia prendendo in considerazione alcuni dipinti della scuola di Antonio Canal, detto il Canaletto (1697-1768). I quadri ritraggono alcune vedute della città lagunare tra il 1727 e il 1758 ove è possibile scorgere lungo i canali il limite superiore del segno verde lasciato dalla fioritura algale sulle pareti degli edifici veneziani, grosso modo coincidente con la media delle alte maree. Quindi, confrontando la

differenza dell'attuale posizione di tale segnale visibile sui medesimi edifici storici ritratti dal Canaletto, e la posizione rilevata nei dipinti, Camuffo ha ipotizzato quale doveva essere la quota del LMM a Venezia nel 18^o secolo valutando così in circa 60 cm la perdita di quota del suolo veneziano tra il 1727 e il 2000, e il tasso di crescita relativa del LMM in 2.3 ± 0.4 mm/anno. Quest'ultimo valore, risultando quindi in buon accordo con il tasso di crescita di 2.4 mm/anno stimato tramite le registrazioni mareografiche del periodo 1872-2005, lascia supporre che una qualche forma di subsidenza antropica doveva interessare Venezia sin dai tempi del Canaletto, presumibilmente correlata all'effetto al peso degli edifici che via via si andavano realizzando nella città (Camuffo et al., 2003; Camuffo et al. 2005).

Un altro approccio di analisi della serie storica del LMM a Venezia è quello che si concentra soprattutto sulla fase successiva all'esaurimento dei fenomeni di subsidenza antropica legata all'estrazione di acque sotterranee nell'area di P. Marghera. A partire dall'inizio degli anni '70, per circa un ventennio, la linea di tendenza mostrava una pendenza leggermente negativa (Rusconi et al. 1993). Una nuova decisa fase di crescita sembra invece essersi instaurata a partire dal 1994. In particolare la retta di tendenza relativa al periodo 1994-2005 mostra una inclinazione positiva che indica un sorprendente tasso medio di crescita di 4.2 mm/anno. La linea di tendenza relativa al LMM della stazione di Trieste relativa al medesimo periodo 1994-2005 mostra invece una pendenza minore che comunque indica un tasso di crescita di 2.2 mm/anno (fig. 3).

L'esame in corso delle osservazioni mareografiche raccolte presso le stazioni della RTLV localizzate lungo il litorale Nord Adriatico, di prossima pubblicazione, offrirà maggiori dettagli sulla natura di tale differenza.

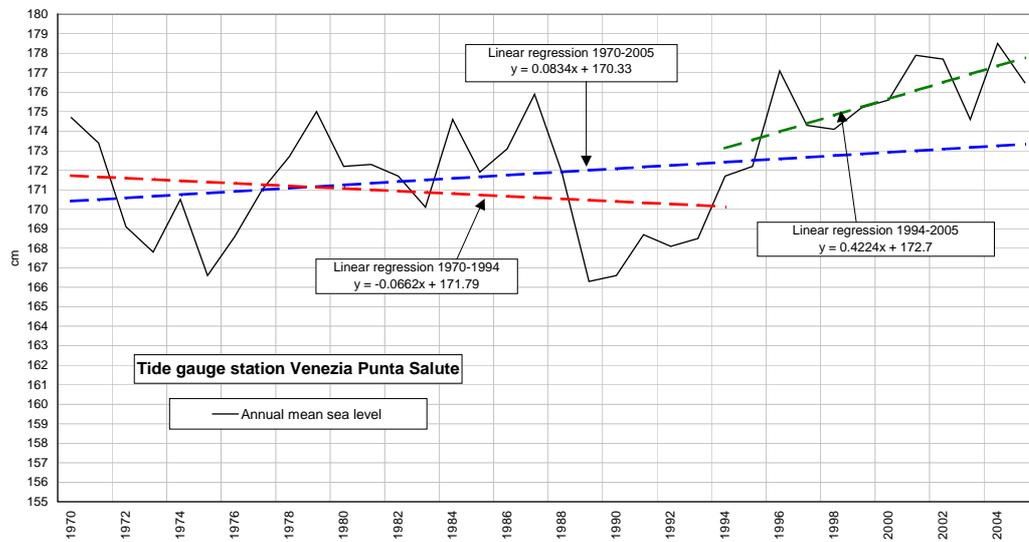


Figura 3a - Livello medio mare a Venezia e linee di tendenza per i periodi: 1970-2005;1970-1994;1994-2005.

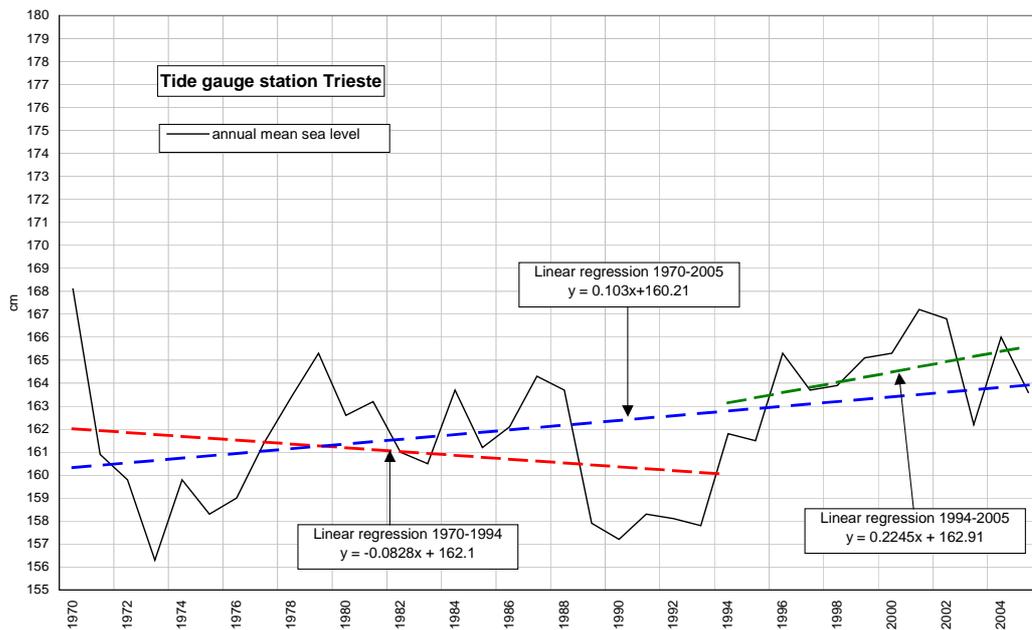


Figura 3b - Livello medio mare a Trieste e linee di tendenza per i periodi: 1970-2005;1970-1994;1994-2005.

4. ALTEZZE E RITARDI DI PROPAGAZIONE DELLA MAREA NELLA LAGUNA DI VENEZIA

Il confronto delle caratteristiche astronomiche della marea nei diversi siti interni lagunari, ove sono ubicate le stazioni mareografiche, consente di conoscerne il *ritardo* e lo *smorzamento delle ampiezze* rispetto al mare aperto. La ripetizione di questo procedimento nelle stesse località dopo alcuni decenni, consente di evidenziare le differenze del comportamento idrodinamico della laguna nel tempo, dovuto principalmente alla variazione della sua morfologia.

La Laguna di Venezia può essere considerata come l'insieme di tre bacini che, dal punto di vista idrodinamico, possono considerarsi indipendenti. In condizioni atmosferiche non perturbate essi possono essere immaginati come separati da due linee di spartiacque ideali. Le bocche di porto che mettono in contatto diretto la laguna con il mare Adriatico alimentano i tre rispettivi bacini in maniera indipendente: la laguna settentrionale, la più ampia, è alimentata dalla bocca di Lido; la laguna centrale è alimentata dalla bocca di Malamocco; la laguna meridionale da quella di Chioggia. Quanto a dimensioni, la bocca più ridotta è quella di Chioggia, con profondità massima pari a 8 metri e larghezza pari a 400 metri; la bocca di Lido è la più ampia (900 metri); la bocca di Malamocco è la più profonda, ove localmente si raggiungono anche i 20 metri. I lavori attualmente in corso per la costruzione delle barriere mobili ("Mo.s.e.") ovviamente stanno variando radicalmente le caratteristiche delle tre bocche.

Le caratteristiche della marea variano sensibilmente all'interno della laguna; in particolare la propagazione dell'onda di marea viene frenata dalla conformazione dei canali, dalla presenza di barene e di bassi fondali. Ciascun bacino di espansione si modifica al variare del livello della marea e ciò contribuisce a produrre differenze in termini di ampiezza e di ritardi di propagazione dell'onda presso i diversi mareografi come già osservato in epoche diverse (Dorigo, 1961; Gottardo, 1975).

Occorre ricordare che la Laguna ha subito nel tempo importanti modifiche morfologiche, individuate mediante diverse rilevazioni batimetriche effettuate a diverse riprese (Magistrato alle Acque, 1934; Magistrato alle Acque, 1939; Ministero dei LL.PP, 1970; Rusconi, 1987).

Conoscere la marea astronomica nei vari siti permette di fissare le condizioni di riferimento della Laguna non influenzate dagli effetti delle forzanti meteorologiche che, come è noto, sono in grado di modificare significativamente i comportamenti idrodinamici. Infatti possono essere rilevanti gli effetti della pressione, del vento e delle oscillazioni libere

dell'Adriatico (sesse) sul sovrizzo della marea osservata, al punto che in condizione perturbate la Laguna può comportarsi come un bacino unico, con scambio di volumi d'acqua tra i tre bacini (Melaku Canu, et al. 2002; Ferla, et al. 2005).

Come già ricordato nell'introduzione, Polli ha condotto un'importante indagine relativamente alla prima metà del '900. I dati allora utilizzati per il calcolo della costanti armoniche furono quelli relativi a 16 stazioni lagunari: 2 alle bocche di porto (Lido DS, Malamocco DN), 8 in laguna settentrionale (Val Dogà, Cavallino, Pagliaga, Torcello, S.Nicolò, Punta Salute, S.Giuliano, Marghera), 3 in laguna centrale (Torson di sotto, Faro Rocchetta, Millecampi), 3 in laguna meridionale (Chioggia S.Felice, Botte Trezze, Conche).

In questo studio, per calcolare le costanti armoniche dell'anno 2004, sono considerati i dati mareografici di tutte le stazioni, relativi agli anni 2002, 2003, 2004, sottoposti preventivamente a diversi controlli di qualità al fine di garantirne la maggior correttezza possibile. Per gran parte delle stazioni la disponibilità dei dati raggiunge i 12 mesi per ciascun anno. Stazioni con eventuali dati mancanti di una certa consistenza sono stati inseriti solo dopo verifiche di coerenza con le stazioni contermini. Le elaborazioni hanno portato a produrre il calcolo delle costanti armoniche per 39 stazioni ripartite per differenti aree della Laguna e riportate in tabella I.

Per la determinazione della marea astronomica si ricorre tradizionalmente all'analisi di Fourier. Tale approccio analitico permette di scomporre una funzione continua complessa, qual è la marea astronomica, in una somma di funzioni periodiche, seno e coseno, più semplici da trattare singolarmente, che hanno una relazione con le condizioni astronomiche. La marea così calcolata risulta essere centrata sull'origine del sistema di riferimento cartesiano a cui bisogna pertanto aggiungere il livello medio mare di riferimento H_0 .

L'altezza di marea astronomica al tempo t in una generica stazione mareografica può quindi essere espressa da una relazione del tipo:

$$H_t = H_0 + \sum A_i * \cos(\omega_i t - \varphi_i) \quad (1)$$

dove A_i rappresenta la semiampiezza di marea in centimetri, ω_i la velocità angolare in gradi/ora, φ_i il ritardo di fase in gradi sessagesimali, mentre t indica il tempo in ore².

² In letteratura anglosassone la *semiampiezza* di marea è indicata con il termine *amplitude* e rappresenta la metà della differenza, in altezza, tra una alta e una bassa marea consecutive.

Ciascuna delle funzioni $A_i * \cos(\omega_i t - \varphi_i)$ è una componente della marea astronomica mentre i parametri A_i e φ_i rappresentano le due componenti delle costanti armoniche e si calcolano sulla base dei dati osservati. La velocità angolare ω_i è dedotta sulla base di parametri astronomici ed è indipendente dalla località ove è ubicata la stazione (Schureman, 1958). Una volta ottenute le costanti armoniche si può, quindi, facilmente calcolare l'ampiezza della marea astronomica e determinarne il ritardo di propagazione rispetto ad un punto/istante arbitrario.

Nel Nord Adriatico sono sufficienti sette di queste curve per determinare con accettabile approssimazione l'altezza della marea astronomica. Le componenti sono caratterizzate da una sigla, legata all'origine astronomica: 4 hanno periodicità semidiurna (M2, S2, N2, K2), le restanti (K1, O1, P1) periodicità diurna.

L'analisi di Fourier è stata utilizzata da Polli per la determinazione delle costanti armoniche delle 16 stazioni considerate, applicando il metodo dell'Ammiragliato Britannico (Doodson, 1936). La qualità dei dati utilizzati da Polli era tuttavia molto eterogenea; la copertura temporale andava dai 3 ai 12 mesi continui.

Nell'ambito di questo lavoro le costanti armoniche sono state invece calcolate attraverso il metodo dei minimi quadrati, che stima i parametri A_i e φ_i minimizzando il quadrato della somma degli errori valutati secondo l'espressione (Bloomsfield, 2000):

$$\sum_i^n [y_i - f(x_i)]^2 = \min \quad (2)$$

dove:

- y_i rappresenta il livello di marea misurato al tempo t ;
- $f(x_i) = A_i * \cos(\omega_i t - \varphi_i)$.

Rispetto al metodo utilizzato da Polli, quello dei minimi quadrati ha il vantaggio di produrre delle stime anche in presenza di dati mancanti (Sposito, 1988). Le altezze e le fasi delle 7 componenti di marea astronomica calcolate per il periodo 2002-2004 sono riportate, per ciascuna della 39 stazioni, in tabella I.

La valutazione dell'altezza della marea astronomica di ciascuna stazione è riportata nella colonna "Altezza(M2+S2)" della tabella. In analogia al criterio seguito da Polli, sono state sommate le altezze delle due componenti principali M2 e S2 in quanto sono quelle che danno il maggiore contributo.

Per la determinazione dei ritardi in *minuti* dei colmi di marea in ciascuna stazione rispetto al colmo di marea alla bocca di Lido, si sono elaborati i singoli ritardi di fase in *gradi* delle 7 componenti.

Mediante l'utilizzo delle velocità angolari di ciascuna componente, i ritardi di fase sono stati trasformati da *gradi* sessagesimali in *minuti* e quindi, per differenza, da ritardi assoluti in ritardi relativi rispetto alla bocca di Lido. Si è infine determinato il ritardo complessivo di ogni stazione rispetto al Lido con un procedimento di media ponderata (secondo le altezze) del ritardo in minuti di ogni componente; i dati così ottenuti sono riportati nell'ultima colonna della tabella I.

Nelle figure 4a e 4b sono riportate le linee di eguale ritardo di marea relative, rispettivamente, alla prima metà del '900 e agli anni 2002-2003-2004. Analogamente nelle figure 5a e 5b sono indicate rispettivamente le linee di eguale altezza di marea relative ai due periodi considerati.

Dall'analisi delle mappe della propagazione della marea, si desume che il potere di smorzamento dell'onda di marea in Laguna rispetto alle bocche di porto si verifica con maggior forza nei punti più interni, raggiunti da canali caratterizzati da bassa profondità e tracciato tortuoso. Questa capacità di smorzamento sembra tuttavia essersi sensibilmente ridotta dalla prima metà del '900 ad oggi.

L'analisi delle figure conferma l'importante riduzione dei ritardi di propagazione della marea. Per esempio, l'isolinea relativa al ritardo di *60 min* che all'inizio del secolo scorso era a ridosso dell'isola di Lido, oggi si protende verso l'interno, fino a toccare l'area di P. Marghera, aprendosi in due rami. Inoltre è da rilevare che le isolinee relative ai *200* e *220 min*, che all'inizio del secolo scorso si trovavano all'estremità settentrionale della laguna, sono oggi scomparse. L'isolinea relativa al ritardo massimo è oggi quella dei *180 min* localizzata sempre nella parte più settentrionale della Laguna.

Per quanto riguarda le linee di eguale altezza, si rileva che all'estremità nord della laguna l'isolinea 18 cm è stata sostituita dall'isolinea 26 cm. L'area centrale della Laguna è passata da un campo di altezze di 34-36 cm ad un campo indifferenziato di 38-40 cm. Infine la laguna meridionale, tra le bocche di Malamocco e Chioggia, da un campo differenziato tra i 26 e i 34 cm, si è oggi passati ad un campo uniforme compreso tra i 36 e i 38 cm.

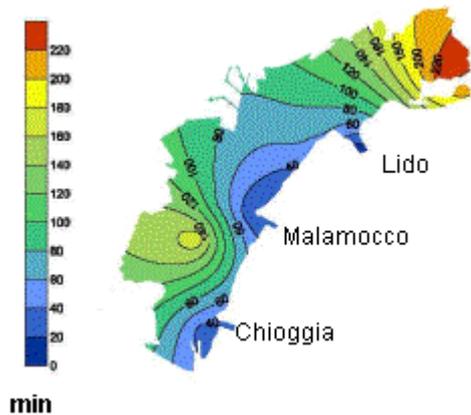


Fig. 4a. Laguna di Venezia. Linee di eguale ritardo di marea relative alla prima metà del '900 (S. Polli).

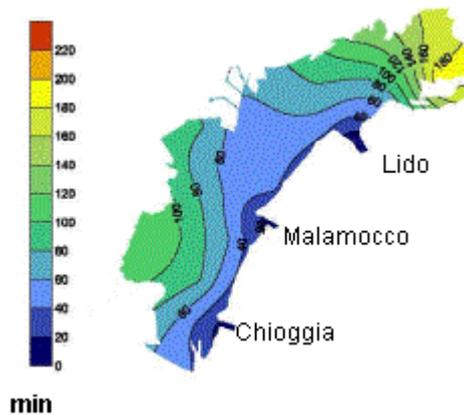


Fig. 4b Laguna di Venezia. Linee di eguale ritardo di marea per il periodo 2002-2003- 2004.

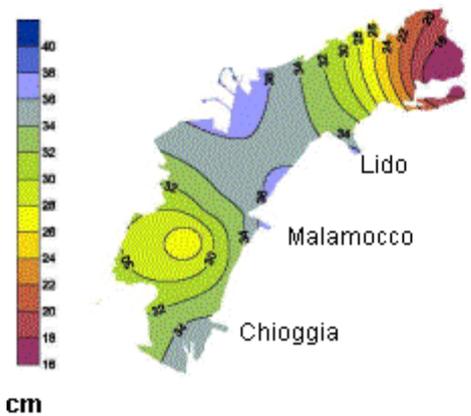


Fig. 5a. - Laguna di Venezia. Linee di eguale altezza di marea relative alla prima metà del '900 (S. Polli)

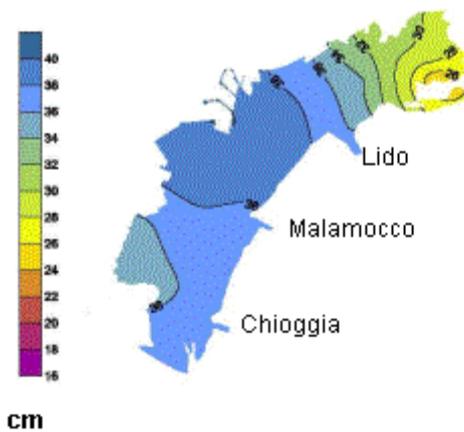


Fig. 5b. - Laguna di Venezia. Linee di eguale altezza di marea per il periodo 2002-2003-2004..

5. CONCLUSIONI

Le valutazioni sugli effetti dei cambiamenti climatici recentemente aggiornate dall'IPCC hanno riaperto, anche in Italia, il dibattito sull'aumento del rischio di inondazione nelle aree costiere maggiormente esposte. Ci si interroga, quindi, anche sul futuro delle lagune e degli estuari veneti alla luce di nuovi scenari che indicano, al 2100, previsioni di crescita del LMM su scala globale su una forchetta variabile mediamente tra i circa 30 e i 50 cm, cui localmente vanno aggiunti eventuali ulteriori contributi di origine geologica e/o tettonica.

L'aggiornamento al 2005 della serie storica del LMM a Venezia conferma l'esistenza di una nuova fase di crescita a partire dal 1994 con un tasso medio annuo che tuttavia è quasi doppio rispetto a quello valutato nello stesso periodo per Trieste, distante circa 200 km e situata su una formazione geologica non soggetta a fenomeni di subsidenza paragonabili a quelli della Laguna di Venezia. Troppo breve è tuttavia questo periodo per poter trarre indicazioni sulla stabilità di tali approssimative tendenze. Ulteriori analisi sono peraltro ancora in corso, sulla variabilità stagionale del LMM e, soprattutto, sulle serie storiche delle registrazioni mareografiche raccolte presso le stazioni della RTLTV localizzate lungo il litorale Nord Adriatico comprese tra Venezia e Trieste.

L'aggiornamento delle costanti armoniche effettuato con i dati mareografici degli anni 2002, 2003 e 2004 evidenzia che il tempo medio impiegato dalla marea per raggiungere le parti più periferiche è sensibilmente ridotto rispetto a quanto veniva registrato durante i primi decenni del secolo scorso. In alcuni punti perimetrali della Laguna centro-settentrionale, il colmo di marea giunge oggi in meno di 60 minuti, come nel caso di Porto Marghera dove, 60 anni fa, ne occorre almeno 80.

Analogamente, il confronto relativo alle altezze di marea evidenzia sensibili differenze rilevate tra la laguna della prima metà del '900 e quella odierna ove, nella parte meridionale e in quella centrale, le caratteristiche dell'onda di marea sono ormai assai simili a quelle proprie dell'Adriatico settentrionale. Solo la Laguna settentrionale mantiene una residua capacità di smorzamento.

	sigla	Stazioni	M2		S2		N2		K2		K1		O1		P1		Altezza		Ritardo	
			A	f	A	f	A	f	A	f	A	f	A	f	A	f	A	f	A(M2)+A(S2)	rispetto DS
Laguna settentrionale	CV	CAVALLINO C (*)	15.8	223	8.4	31	2.4	359	3.3	198	15.9	123	4.4	325	4.4	143	24.2	198		
	CN	CANAL ANCORA	19.0	204	10.7	12	2.7	345	3.9	178	17.4	111	5.2	318	5.0	129	29.7	156		
	GB	GRASSABO'	18.8	211	10.2	19	2.9	350	4.4	182	17.0	115	4.7	324	4.8	133	29.0	171		
	LS	LE SALINE	18.9	193	10.4	358	3.0	330	4.0	165	17.2	104	4.8	309	4.8	120	29.3	128		
	PG	PAGLIAGA (*)	20.7	190	11.6	357	3.3	329	5.1	159	17.8	102	5.2	312	5.4	120	32.3	123		
	BU	BURANO	21.6	172	12.5	336	3.6	309	5.0	141	18.4	92	5.4	297	5.4	107	34.1	81		
	TR	TREPORTI	20.2	166	11.6	329	3.4	302	4.6	134	18.3	89	5.8	292	5.5	104	31.8	68		
	DN	LIDO DN	23.5	137	14.4	298	4.1	273	5.5	103	19.6	73	6.5	277	5.9	84	37.9	4		
	DS	LIDO DS (*)	23.3	135	14.4	296	4.0	272	5.6	103	19.5	72	6.5	275	5.9	82	37.7	0		
	ME	MEDA	22.4	141	13.8	302	3.9	277	5.1	111	19.2	76	6.9	275	5.9	82	36.2	11		
	SN	S. NICOLO' (*)	23.2	151	14.0	314	3.9	288	5.1	121	19.3	80	6.3	282	5.8	90	37.2	33		
	SE	SANT'ERASMO	22.8	158	13.6	321	3.9	296	5.1	126	18.9	84	6.0	286	5.6	98	36.4	49		
	MU	MURANO	23.6	169	13.9	334	3.9	308	5.5	136	19.2	90	6.0	295	5.7	104	37.5	74		
	TE	TESSERA	23.2	175	13.7	341	3.9	316	5.6	142	18.9	94	6.0	301	5.6	106	36.9	89		
	CM	CAMPALTO	23.2	172	13.7	337	3.9	311	5.6	138	18.9	92	5.9	298	5.8	105	36.9	81		
	PS	P.SALUTE (*)	24.4	158	14.7	322	4.1	295	5.5	126	19.6	84	6.2	287	5.9	96	39.1	49		
SS	SACCA SESSOLA	24.5	158	14.8	321	4.2	295	5.4	124	19.5	84	6.1	287	5.7	97	39.3	49			
SG	S.GIORGIO IN ALGA	24.9	160	15.0	324	4.2	297	5.6	128	19.7	85	6.1	288	5.8	96	39.9	53			
MA	MARGHERA (*)	25.0	162	15.0	326	4.2	300	5.4	131	19.5	86	5.8	291	5.7	99	40.0	59			
Laguna centrale	FU	FUSINA	24.9	160	15.0	324	4.2	297	5.6	127	19.7	85	6.1	288	5.8	97	39.9	53		
	MV	MOTTE DI VOLPEGO	24.5	160	14.7	323	4.2	297	5.6	128	19.5	85	6.1	288	5.7	96	39.2	53		
	TO	TORSON DI SOTTO (*)	23.8	163	14.1	327	4.0	302	5.3	132	19.3	87	6.0	291	5.5	99	37.9	61		
	EP	EX POVEGLIA	24.3	158	14.7	321	4.1	295	5.4	126	19.6	84	6.1	287	5.6	95	39.0	49		
	PO	POVEGLIA	24.5	156	14.8	319	4.1	293	5.1	123	19.5	83	6.1	286	5.8	95	39.3	45		
	TV	TAGLIATA VECCHIA	24.9	173	14.9	339	4.2	311	5.3	145	19.5	92	5.8	294	5.6	104	39.8	82		
	VA	VALLE AVERTO	24.0	176	14.3	342	4.0	315	5.5	144	19.3	93	5.9	300	5.6	108	38.3	89		
	NM	MALAMOCCO DN (*)	23.2	135	14.3	296	4.0	270	5.5	102	19.5	72	6.3	275	5.9	82	37.5	0		
	FR	FARO ROCCHETTA (*)	23.0	150	13.9	312	3.9	287	5.4	121	19.5	80	6.7	280	5.9	87	36.9	30		
	VG	VALGRANDE	23.4	166	14.0	329	3.9	304	5.4	134	19.3	88	6.0	293	5.5	101	37.4	66		
	ST	SETTEMORTI (*)	23.5	173	14.0	338	3.9	314	5.6	141	19.0	92	6.0	300	5.5	108	37.5	84		
	BG	BARENE DELLA GRISA	23.2	181	13.5	350	3.4	327	5.1	149	20.0	96	6.0	299	6.2	116	36.7	102		
	CF	CASON FIGHERI	23.6	181	13.9	348	3.9	320	5.8	150	19.3	96	6.1	303	5.8	113	37.5	101		
Laguna meridionale	PB	PETTA DE BO'	22.6	173	13.6	337	3.8	313	5.8	141	18.7	92	5.9	299	5.5	107	36.2	83		
	BR	BRONDOLO	23.2	158	14.1	322	3.9	295	5.1	126	19.2	84	5.9	289	5.3	99	37.3	51		
	CH	CHIOGGIA V (*)	22.7	149	13.8	311	3.9	285	5.1	118	19.3	79	6.1	283	5.6	90	36.5	30		
	BT	BOTTE TREZZE (*)	23.4	164	14.1	329	4.0	301	5.1	133	19.2	87	5.9	292	5.5	101	37.5	63		
	VM	VAL MOROSINA	22.2	183	13.1	351	3.5	322	5.8	157	18.0	98	5.4	307	5.5	121	35.3	110		
	VF	VAL FOGOLANA	21.4	183	13.0	347	3.6	319	5.5	157	16.5	95	4.3	316	4.4	127	34.4	109		
SC	CHIOGGIA DIGA SUD	22.6	136	13.9	297	3.9	272	5.4	102	19.4	73	6.2	276	5.7	84	36.5	3			

Nota: (*) stazioni per cui sono state calcolate le costanti armoniche anche da S.Polli (1952)

A: altezza dell'onda di marea (cm); f: ritardo di fase dell'onda di marea (gradi)

Stime basate su dati di marea degli anni 2002, 2003, 2004

Fonte: elaborazioni APAT

Tabella I - Altezza dell'onda e ritardo di fase per le singole componenti di marea astronomica (anno 2004). Altezza delle componenti M2 e S2, ritardo di propagazione rispetto la bocca di Lido

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano sentitamente il Prof. Alberto Tomasin del CNR-ISMAR per averci fornito il programma di calcolo delle costanti armoniche, nonché per i suoi fondamentali consigli, la Dott.ssa Marcella Sbavaglia di APAT per il suo supporto alla traduzione del documento e il personale dell'ufficio A.P.A.T. – Servizio Laguna di Venezia per l'assistenza durante tutte le fasi di raccolta ed elaborazione dei dati.

BIBLIOGRAFIA

APAT, 2006_a. Aggiornamento sulle osservazioni dei livelli di marea nella laguna di Venezia. Rapporto n° 69/2006

APAT, 2006_b. Annuario dei dati ambientali 2005-2006. Cap. 8 – Idrosfera, par. 8.5 - La laguna di Venezia, pp. 721-731.

Battistin D, Canestrelli P., 2006. 1872 –2004: La serie storica delle maree a Venezia. Comune di Venezia. Istituzione Centro Segnalazione e Previsione Maree.

Bloomfield, P. (2000), *Fourier Analysis of Time Series*, New York, Wiley

Bonato N., Egiatti G., Ferla M., Filippi M., 2001 - Tidal Observations in the Venetian Lagoon. Update on sea level change from 1872 to 2000. Proceedings of final workshop on Sea level in Europe: Observation, Interpretation and Exploitation. Dubrovnik (HR).

Bondesan M., Castiglioni G.B., Elmi C., Gabbianelli G., Marocco R., Pirazzoli P.A. and Tomasin A., 1995. Coastal areas at risk from storm surges and sea-level rise in Northeastern Italy. *Journal of Coastal Research*, 11, 4 pp. 1354-1379.

Camuffo D., Sturaro G., 2003. Sixty-cm submersion of Venice discovered thanks to Canaletto's paintings. *Klimatic Change* 58, pp. 333-343, 2003 Kluwer Academic Publisher (NL).

Camuffo D., Pagan E., Sturaro G., 2005. The extraction of Venetian sea-level change from paintings by Canaletto and Bellotto. *Flooding and Environmental Challenges for Venice and its Lagoon: State of Knowledge*, pp. 129-140 ed. by C.A. Fletcher and T. Spencer, Cambridge University Press.

Carbognin L., Teatini P., Tosi L., 2005. Land subsidence in the Venetian area: known and recent aspects. *Giornale di Geologia Applicata* 1 (2005) 5, pp. 5-11.

D'Alpaos L. (2003). "Conoscere il comportamento idrodinamico della laguna del passato per progettare la laguna del futuro", *Atti dell'Istituto Veneto di LL. SS. AA. Tomo CLXII (2003-2004) Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali*.

Doodson A. T. Warburg H. D., *The Admiralty Tides Tables. Part III, Instruc. And Tables*, Hydrogr. Departm. London 1936.

Dorigo L. (1961), "Le osservazioni mareografiche in Laguna di Venezia", Istituto Veneto di LL. SS. AA. Estratto dal volume I "Rapporti preliminari della Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia", Venezia.

Ferla M., 2003. Monitoraggio e previsione dell'acqua alta a Venezia. *Atti della 7^a Conferenza Nazionale delle Agenzie Ambientali*. Milano 18-22 novembre 2003

Ferla, M, Castagna, M., Cordella, M., Umgiesser, G. 2005. Discussions on the exceptional tide level in the Venice lagoon in November 2002. *WAVES 2005 - Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis - Madrid, Spain, 3rd – 7th July 2005*;

Ferraro S. Crisciani F., 2001. *La mareografia a Trieste: aspetti scientifici e teorici*. L. Partendone, Roma, 102 pp.

Gottardo D., (1975) *Propagazione della marea nella Laguna di Venezia*, pers. comm.

Magistrato alle Acque di Venezia - Ufficio Idrografico (1934), “Carta della Laguna di Venezia”, pubblicazione n. 134, Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.

Magistrato alle Acque di Venezia - Ufficio Idrografico (1939), “Superfici che compongono la Laguna”, pubblicazione n. 134 bis, Istituto Poligrafico dello Stato.

Ministero dei Lavori Pubblici (1970), *L'influenza di variazioni recenti di superficie e profondità su la marea lagunare di Venezia*, Ministero dei Lavori Pubblici, Comitato per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali, Roma, Istituto tipografico dello Stato.

Melaku Canu, D., Umgiesser, G., Bonato, N., and Ferla, M. 2002. Analysis of the circulation of the lagoon of Venice under scirocco wind conditions. Scientific research and safeguarding of Venice, CORILA Research Program 2001, Vol. I results, IVSSLLAA-CORILA, 515-530.

Mosetti F., 1989. Sea level variations and related hypotheses. *Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata*, Vol. VII, N. 4, pp. 273-284.

Polli S. (1951) “Le maree a Porto Marghera”. *Annali di Geofisica*, vol. IV, n° 3, pp. 387-398.

Polli S. (1952) “Propagazione della marea nella laguna di Venezia”. *Annali di Geofisica*, vol. V, n° 2, pp. 273-292.

Polli S. (1961) “*La propagazione della marea nel golfo di Venezia*”. Rapporti preliminari della comm. di studio per la conservazione della Laguna e della città di Venezia. Vol. 1 - Istituto Veneto di Lettere Scienze ed Arti, Venezia.

Rusconi A, Ferla M., Filippi M., 1993. Tidal Observations in the Venice Lagoon. The Variations in sea level observed in the last 120 years. Seachange '93 – International Workshop on Sea Level Changes and their Consequences for Hydrology and Water Management. A contribution to the UNESCO IHP-IV Project H-2-2. Noordwijkerhout (The Netherlands), 19-23 April 1993, pp. 115-132.

Rusconi, A. (1987), “Variazioni delle superfici componenti il bacino lagunare”, Venezia, Pubbl. n.160 Ministero LL.PP. Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque.

Schureman, P. (1958) *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. U.S. Department of Commerce. Coast and Geodetic Survey. U.S. Government Printing Office, Washington.

Sposito A., Vultaggio M., “Analisi armonica e previsione della marea”, Napoli, Giannini Editore

Tosi L., Carbognin L., Teatini P., Rosselli, R., Gasparetto-Stori G., 2000. The ISES Project subsidence monitoring of the catchment basin south of the Venice Lagoon (Italy). Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Ravenna (I), 24-29 September 2000, Vol. II, pp.113-126. SISOLS, Ravenna (Italy).

UNESCO - Intergovernmental Oceanographic Commission, 1985. *Manual on sea level measurements and interpretations, vol. I – Basic procedures*.

UNESCO - Intergovernmental Oceanographic Commission 2002. *Manual on sea level measurements and interpretations, vol. III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000*.

UNESCO - Intergovernmental Oceanographic Commission, 1994. *Manual on sea level measurements and interpretations, vol. II, Emerging technologies*.

WMO, 1983. Guide to meteorological instruments and methods of observation. Fifth edition, Geneva, Switzerland, 1983.

Zanchettin D., Traverso P., Tomasino M., 2006. Discussion on sea level fluctuations along the Adriatic coasts coupling to climate indices forced by solar activity: Insight into the future of Venice. *Global and Planetary Change*, 50 (2006), pp. 226-234.

MC20070416