

MISURARE IL LIVELLO DEL MARE NEL NORD DELL'ADRIATICO

IL SISTEMA OSSERVATIVO GESTITO DA ISPRA È UNA FONDAMENTALE SORGENTE DI DATI SIA DI INTERESSE LOCALE SIA SU LARGA SCALA, UTILI ANCHE PER LE ANALISI DELLE VARIAZIONI DI LUNGO PERIODO DEL LIVELLO MEDIO DEL MARE IN RELAZIONE AI CAMBIAMENTI CLIMATICI. LA RETE È COMPOSTA DA STAZIONI DI MISURA DISTRIBUITE LUNGO TUTTA LA COSTA.

Il sistema osservativo del livello del mare gestito da Ispra è composto da due reti di misura: la Rete mareografica nazionale (Rmn) e la Rete mareografica della Laguna di Venezia e dell'arco costiero Alto Adriatico (Rmlv). Queste reti rappresentano una fondamentale sorgente di informazioni puntuali relativamente alle misure del livello del mare e dei principali parametri meteorologici. L'utilizzo dei dati osservati è utile per l'analisi e lo studio di tematiche sia di interesse locale, come la difesa della Città di Venezia dalle alte maree, sia su larga scala, come le variazioni di lungo periodo del

livello medio del mare in relazione ai cambiamenti climatici.

La Rmn è composta da 36 stazioni di misura uniformemente distribuite lungo tutta la costa nazionale e situate prevalentemente all'interno di strutture portuali (www.mareografico.it). Molte di queste stazioni sono attive dagli anni '70 e sono tutte dotate di un doppio strumento per la misurazione del livello del mare (radar e galleggiante), nonché di sensori per la rilevazione dei parametri meteorologici. I dati di livello sono riferiti al piano nazionale Igm Genova 1942 e le stazioni sono periodicamente sottoposte

al controllo e alla verifica della quota di riferimento, pratica fondamentale per rendere confrontabili le misure nel tempo e nello spazio, oltre che garantirne l'affidabilità.

In Alto Adriatico, la Rmlv è attualmente composta da 29 stazioni meteo-mareografiche distribuite lungo l'arco costiero, all'interno della Laguna di Venezia, di quella di Marano-Grado e in tre lagune del delta del Po (comunemente dette "sacche"). Questa rete costituisce lo strumento essenziale per le attività di osservazione, segnalazione e previsione degli eventi meteo-marini che interessano

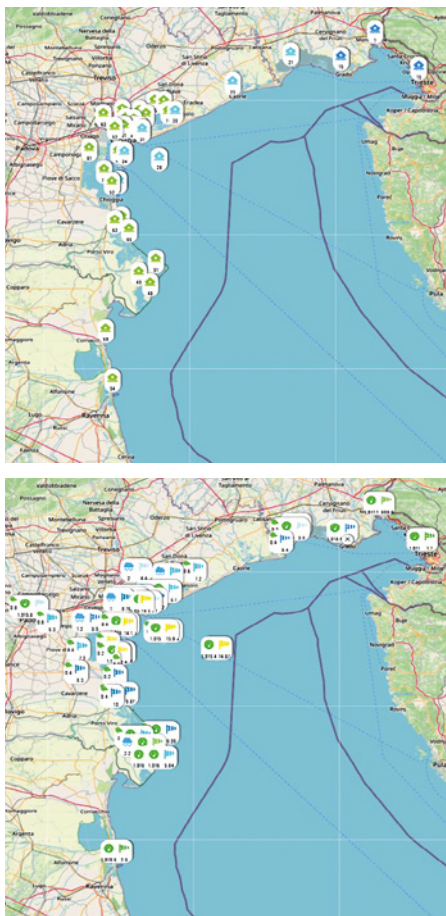


FIG. 1 RETE MAREOGRAFICA
Mappa della rete meteo-mareografica integrata in alto Adriatico (mareografia in alto a sinistra e meteorologia in basso a sinistra) e della Rete mareografica nazionale (destra).

le lagune e l'arco costiero Nord Adriatico, e in generale per la gestione del sistema idraulico lagunare veneziano (www.venezia.isprambiente.it).

Le misure del livello del mare della Rmlv sono riferite allo zero mareografico di Punta della Salute (Zmps), convenzionalmente istituito sulla base dei rilievi mareografici misurati nel centro storico veneziano tra il 1885 e il 1909. In altre parole, i livelli di marea della Rmlv si riferiscono allo Zmps 1897, dove il 1897 rappresenta l'anno centrale del periodo mediato. Questo "zero" è considerato solidale rispetto al centro storico di Venezia anche a fronte di fenomeni di subsidenza. Infatti, riferendosi allo Zmps 1897, due "acque alte" dello stesso livello, pur presentandosi a distanza di anni, allagano approssimativamente la medesima area complessiva del centro storico veneziano. Nella primavera del 2023, nell'ambito del progetto Interreg Adriacim, è stato eseguito un rilievo di alta precisione per quotare i capisaldi rappresentativi dell'area di Punta della Salute (espressione storica dell'altimetria della Città di Venezia) e del piano di riferimento locale. Il rilievo ha consentito di aggiornare per via topografica le informazioni sul movimento verticale del piano di riferimento Zmps 1897 rispetto al piano di riferimento Igm Genova 1942, in considerazione della nota subsidenza che caratterizza Venezia. Lungo la costa Adriatica, un sottoinsieme di 7 stazioni (3 afferenti alla Rmlv e 4 alla Rmn) è attualmente dotato di strumenti Gns (global navigation satellite system), co-localizzati con i mareografi, tra le quali Venezia - Punta della Salute, Lido Diga Sud e Grado da ormai più di un decennio. La co-localizzazione mareografo-Gns consente di seguire contemporaneamente sia la variazione del livello medio del mare relativo (mareografo) sia il movimento verticale del territorio per il quale la stazione mareografica risulta essere rappresentativa (Gns).

Le procedure di trattamento dei dati mareografici sono state mantenute nel tempo e sono in linea con le prescrizioni dell'Ioc. Inoltre, nel 2015 l'intero processo di validazione dei dati mareografici della Rmlv è stato standardizzato e inserito nel dominio di certificazione Ispra UNI EN ISO 9001:2015.

La rete di Ispra è predisposta per scambiare dati in tempo reale con altre istituzioni che operano in ambito territoriale sia per fini ambientali sia per fini di protezione civile. Tra queste, il Provveditorato alle Opere pubbliche

del Veneto, il Centro Previsioni e segnalazioni maree del Comune di Venezia, la Protezione civile Fvg, Arpa Veneto, Arpa Fvg e Arpa Emilia-Romagna, costituendo un quadro completo del monitoraggio idrologico di tutta la fascia costiera alto adriatica (figura 1).

I dati raccolti e condivisi risultano fondamentali sia per le attività operative in tempo reale di monitoraggio e previsione delle maree eccezionali, sia per l'elaborazione e l'analisi dei dati con finalità climatologiche, con riferimento principalmente alla crescita del livello medio del mare e all'analisi degli eventi estremi.

L'implementazione delle reti Ispra nell'ambito dei progetti Adriacim e Pnrr Mer

Nell'ambito del progetto Interreg Italia-Croazia Adriacim, nella seconda metà del 2022 sono state installate tre nuove stazioni meteo-marine all'interno di tre lagune del delta del Po. La scelta degli specchi lagunari è stata eseguita considerando i mareografi già disponibili nell'area (gestiti da Ispra e Arpa Veneto) allo scopo di ottimizzare l'integrazione delle reti di monitoraggio e la loro funzionalità operativa. L'obiettivo è stato principalmente quello di acquisire informazioni sui sovralti differenziali interni ai tre ambienti lagunari e sull'altezza d'onda in occasione di eventi meteomarinari intensi, con particolare riferimento alle aree perimetrali in prossimità degli argini di difesa. Le tre stazioni sono dotate di idrometri radar con tempo di acquisizione di 4 Hz (utili alla registrazione dei parametri di onda e di livello) e anche di strumentazione meteorologica, tutta conforme alle raccomandazioni del Wmo. I parametri meteo-marini sono acquisiti con campionamento temporale di 5 minuti e sono disponibili sia sul portale Ispra dedicato alla Rmlv (www.venezia.isprambiente.it) sia sul geoportale Adriacim.

Sempre nel corso del 2022, è stata potenziata la rete di stazioni co-localizzate in Adriatico, con l'installazione di quattro nuove antenne Gns accoppiate ai mareografi della Rmn di Trieste, Ortona, Bari e Otranto. Le elaborazioni e le analisi provenienti da questi sensori e dall'accoppiata mareografo-Gns necessitano di almeno un triennio/quadriennio di misure.

Un ulteriore potenziamento del sistema osservativo fisico del mare è in corso nell'ambito del progetto Pnrr Mer (*Marine ecosystem restoration*), finanziato

dall'Unione europea (*Next generation EU*), che include diversi interventi tra i quali la realizzazione di una rete di boe d'altura, l'installazione di antenne radar Hf costiere per il monitoraggio da remoto della circolazione marina, il completo ripristino della Rete ondometrica nazionale (Ron). Il Pnrr Mer include inoltre un ulteriore incremento del numero di stazioni della Rmn co-localizzate Gns-mareografo e dei mareografi e idrometri radar alta frequenza nelle lagune di Marano Grado e Venezia.

L'importanza di una rete di monitoraggio capillare

Il perché sia così fondamentale una rete di monitoraggio integrata nel Nord Adriatico e nella laguna di Venezia è spiegabile considerando la specificità territoriale e i fenomeni fisici che caratterizzano l'area. È noto che il Nord Adriatico sperimenta condizioni mareali più estreme rispetto al resto delle coste italiane, sia per la conformazione geografica della costa e la batimetria dei fondali, sia per le particolari condizioni meteorologiche che intervengono a influenzare e amplificare questo fenomeno. Inoltre, la crescita del livello medio del mare, come principale conseguenza dei cambiamenti climatici, esercita un ulteriore contributo all'aumento dei fenomeni estremi sia in termini di intensità sia di frequenza. Per poter monitorare e intervenire in tempo reale in caso di fenomeni di *storm surge*, diviene fondamentale una rete di misura capillare capace di rappresentare e quantificare dettagliatamente il fenomeno in corso nelle diverse zone dell'area interessata. È doveroso sottolineare come uno stesso fenomeno di *storm surge* possa infatti manifestarsi con caratteristiche e tempi profondamente diversi anche in zone limitrofe, rendendo indispensabili misure continue, in tempo reale e ad alta risoluzione spaziale. Infine, anche nelle zone lagunari del delta del Po, grazie alle tre nuove stazioni (due anni di misure), è stato possibile osservare i diversi effetti nel corso di uno stesso evento di *storm surge*, sia tra una laguna e l'altra sia all'interno della stessa laguna, sperimentando forti variazioni dei valori massimi di livello del mare. Più in generale, lungo la costa e negli ambienti lagunari dell'Alto Adriatico, l'escursione di marea rappresenta il motore dei principali processi idrodinamici, di trasporto e ecologici, e la cui conoscenza è imprescindibile per l'analisi e gestione del territorio costiero, anche nel quadro dell'implementazione dalla direttiva per

la Gestione del rischio alluvioni 2007/60/CE e della direttiva quadro Acque 2000/60/CE.

Analisi della variazione del livello medio del mare

Come noto, l'innalzamento del livello medio del mare a scala globale (eustatismo) rappresenta uno dei principali effetti dovuti ai cambiamenti climatici.

Il monitoraggio della variazione del livello del mare è di grande rilievo in Alto Adriatico, particolarmente esposto al rischio alluvione per la morfologia e l'antropizzazione delle aree costiere. La crescita del "medio mare" e della frequenza di eventi estremi può infatti determinare un aumento delle aree potenzialmente soggette a inondazione, maggiore erosione costiera e intrusione salina.

Le variazioni del livello del mare, talvolta lente e non direttamente apprezzabili dall'occhio umano, sono oggetto di attenzione e monitorate grazie a serie storiche di diversi decenni, che permettono di distinguere le fluttuazioni interannuali da tendenze di medio-lungo periodo. Nelle lagune e nelle pianure costiere alto adriatiche, all'innalzamento del livello medio mare assoluto dovuto all'eustatismo, si somma la perdita di quota locale dovuta al compattamento degli strati argillosi e sabbiosi del sottosuolo (subsidenza). Confrontando le misure raccolte con continuità per oltre un secolo presso la stazione di Venezia - Punta della Salute da fine '800 con la serie mareografica di Trieste - Molo Sartorio (Cnr-Ismar), si nota come la Città di Venezia sperimenti il fenomeno dell'innalzamento del livello medio mare con andamenti simili a Trieste, ma con una pendenza maggiore, cioè con una più marcata velocità di crescita (figura 2). Considerando l'area di Trieste geologicamente stabile e assumendo la stima dell'eustatismo sul medio-lungo periodo paragonabile tra Venezia e Trieste, ne consegue che la differenza tra le due curve di crescita rappresenta la subsidenza di Venezia.

Analizzando nel dettaglio la serie mareografica di Venezia, il livello medio del mare è in tendenziale aumento sin dall'inizio delle rilevazioni (1872). Nel corso dell'intero periodo la curva non ha però mostrato sempre una pendenza costante: si evidenziano fasi caratterizzate da relativa stabilità o addirittura controtendenza (approssimativamente tra il 1915 e il 1925 e tra il 1965 e il 1995) e altre caratterizzate invece da una forte pendenza (tra gli anni '30/'60

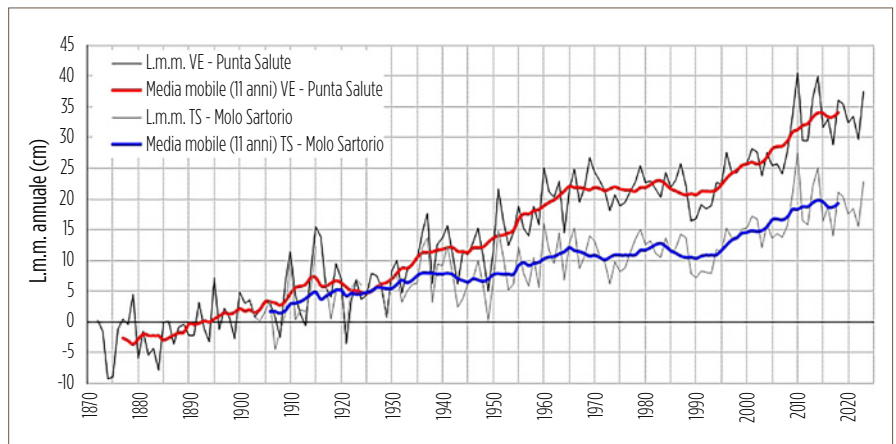


FIG. 2 LIVELLO MEDIO MARE ANNUALE A VENEZIA E TRIESTE
Dati riferiti a Venezia - Punta Salute e Trieste - Molo Sartorio (1872-2023). Fonte: Ispra e CNR-ISMAR.

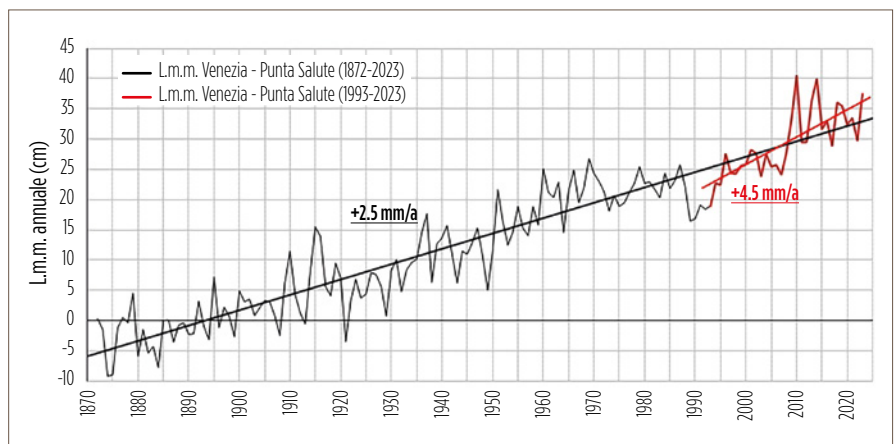


FIG. 3 LIVELLO MEDIO MARE ANNUALE A VENEZIA
Dati riferiti a Venezia - Punta della Salute (1872-2023). Fonte: Ispra.

e il periodo che va da metà anni '90 a oggi). Se nel lungo periodo (1872-2023) il tasso di innalzamento del medio mare si attesta mediamente sui 2,5 mm/anno, si ritiene opportuno porre in evidenza il tasso quasi raddoppiato riferito all'ultimo periodo, cioè quello più rappresentativo del fenomeno a oggi in atto. Tra il 1993 e il 2023 l'innalzamento del livello medio mare si è infatti attestato sui 4,5 mm/anno (figura 3). Negli ultimi 15 anni i dati risultano i più alti misurati dall'inizio delle registrazioni, con una media pari a +34 cm sullo Zmps e valori record assoluti riconducibili al 2010 (40,5 cm) e al 2014 (40 cm).

Gli eventi estremi del livello del mare nel Nord Adriatico

Gli eventi estremi di livello del mare, o *storm surge*, ancora meglio noti come acque alte, sono oggetto di studio e di interesse soprattutto nel Nord Adriatico sia in termini di intensità sia di frequenza.

Per l'analisi degli eventi estremi, ci si riferisce in particolare al concetto di "tempo di ritorno", che fornisce un'indicazione del tempo medio in cui

un valore di determinata intensità viene uguagliato o superato almeno una volta. Nel caso degli *storm surge*, due eventi sono considerati tra loro indipendenti se il superamento di una determinata soglia (*Peak over threshold*) avviene a una distanza temporale di almeno 78 ore. La serie temporale centenaria di Punta della Salute permette valutazioni robuste del tempo di ritorno e della relazione con l'innalzamento del livello del medio mare. Le analisi condotte confrontando i più diffusi metodi statistici e tenendo in conto la non stazionarietà del fenomeno, evidenziano come i tempi di ritorno degli eventi estremi si stiano riducendo a causa dell'aumento del livello medio del mare. Ad esempio, un livello del mare di 150 cm (Zmps) mostra un tempo di ritorno di oltre 100 anni a fine '800 (con un Msl pari a 0 cm Zmps), 10 anni negli anni '60 (Msl 25 cm) fino agli attuali 3 anni (figura 4 a). Con gli scenari di innalzamento del livello medio del mare derivati dalle stime dell'Ipcc (valore atteso di +51 cm Zmps nel 2050, con scenario Ssp2-4.5), tali eventi avranno un tempo di ritorno inferiore all'anno. A seconda dei modelli utilizzati, questi

valori possono parzialmente differire (figura 4b), ma la riduzione dei tempi di ritorno degli eventi estremi, dovuta all'innalzamento del livello medio mare, è tuttavia chiaramente confermata ed è di fatto un fenomeno che si sta già manifestando con evidenza (figura 5). La frequenza di eventi estremi lungo la costa dell'Alto Adriatico, analizzata selezionando stazioni con un minimo di 25 anni di misure, presenta un *pattern* spaziale con livelli estremi più elevati per la stazione di Porto Caleri (delta del Po) (tabella 1) per tutti i periodi di ritorno superiori a 2 anni, e più bassi per la stazione Piattaforma Acqua Alta. Tali differenze sui livelli estremi possono essere ricondotte a:

- la posizione offshore della stazione Piattaforma Acqua Alta (15 km dalla costa veneziana), che sperimenta un effetto ridotto del set up da vento
- la tipica configurazione meteorologica con vento di scirocco (SE) nel Mare Adriatico e del vento di bora (ENE) nell'Alto Adriatico, che determina un gradiente di livello crescente con massimi valori lungo la costa nord-orientale del delta del Po.

In generale, tutte le stazioni dell'Alto Adriatico hanno registrato, negli ultimi anni (dal 2018), valori estremi di livello del mare molto frequenti e tra i più alti delle intere serie temporali disponibili, modificando sensibilmente la statistica dei tempi di ritorno. Questo significa che per il futuro ci possiamo aspettare eventi più frequenti, più intensi e in tempi molto più brevi.

Sara Morucci, Franco Crosato, Elisa Coraci, Gabriele Nardone, Saverio Devoti, Riccardo Alvise Mel, Devis Canesso, Michele Cornello, Paolo Gyssels, Damiano Baldan, Andrea Bonometto

Istituto superiore per la protezione e ricerca ambientale - Ispra, Centro nazionale per la caratterizzazione ambientale e la protezione della fascia costiera e l'oceanografia operativa

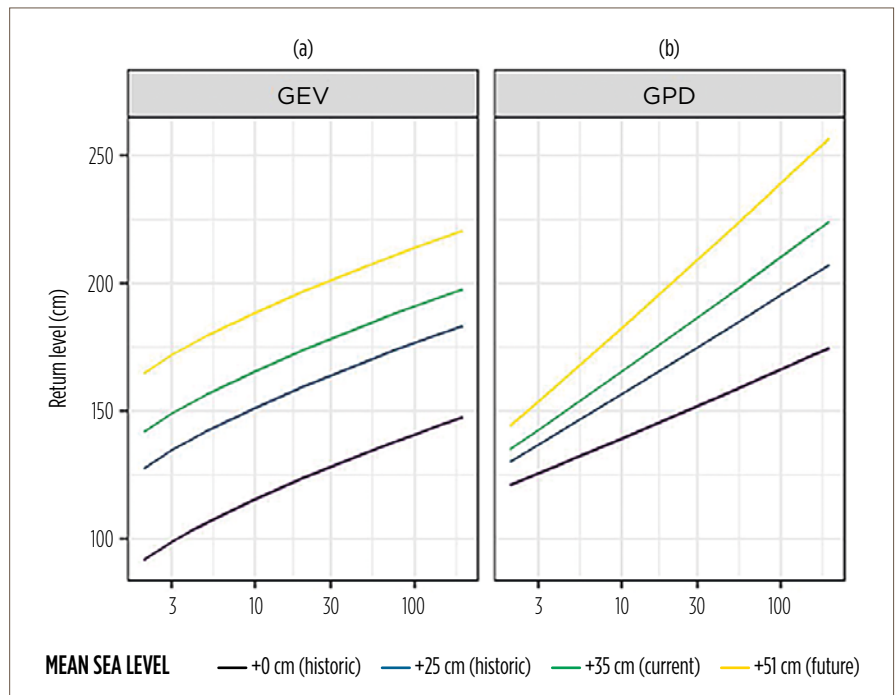


FIG.4 TEMPI DI RITORNO CALCOLATI SUI DATI NON DETRENDIZZATI PER LA STAZIONE DI PUNTA DELLA SALUTE. Tempi di ritorno calcolati sui dati non detrendizzati per la stazione di Venezia - Punta della Salute. Confronto tra i risultati ottenuti con Generalized extreme value distribution - Gev (4a) e la Generalized Pareto distribution - Gpd (4b), utilizzando il livello medio del mare come covariata.

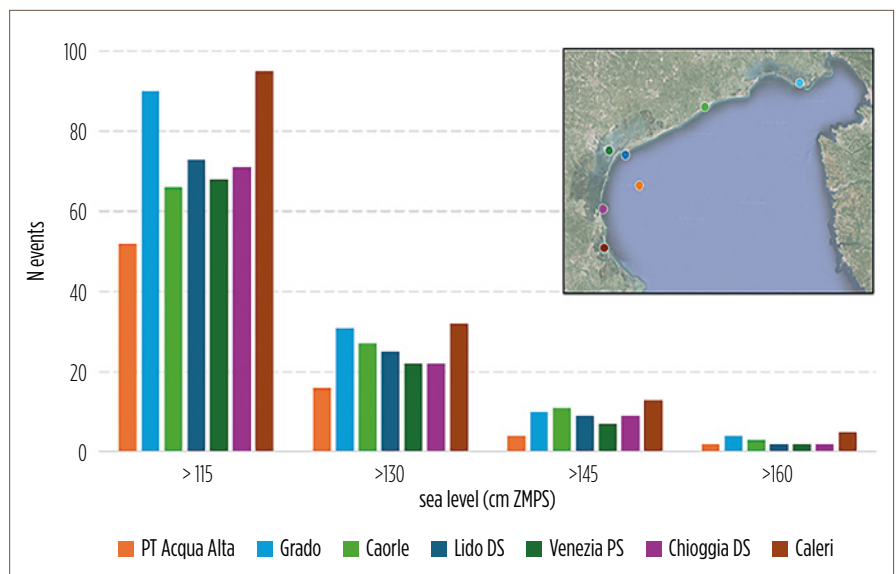


FIG. 5 DISTRIBUZIONE DEI PICCHI OSSERVATI NEL PERIODO 2000-2023 NEI DIVERSI SITI. Numero di eventi indipendenti superiori alle soglie di livello del mare di 115, 130, 145, 160 cm sullo Zmps.

	2 anni		10 anni		20 anni		50 anni	
Grado	147	(140-154)	167	(155-178)	174	(159-190)	183	(162-205)
Caorle	142	(135-150)	164	(150-177)	172	(154-190)	182	(157-207)
PT Acqua Alta	136	(130-142)	156	(114-169)	165	(148-183)	177	(150-203)
Venice PS	143	(135-151)	164	(151-176)	171	(156-186)	180	(160-200)
Lido DS	140	(134-145)	162	(144-177)	172	(152-192)	184	(156-212)
Chioggia DS	141	(134-147)	162	(149-176)	171	(154-189)	183	(157-209)
Porto Caleri	146	(139-153)	170	(156-183)	179	(161-198)	192	(166-218)

TAB.1 EVENTI ESTREMI LUNGO LA COSTA DELL'ALTO ADRIATICO. Periodo di ritorno a 2, 10, 20, 50 anni per gli eventi estremi in sette stazioni e il relativo intervallo di confidenza. Valori di livello in cm, sullo Zmps 1897.