

**Università di Trieste
Istituto di Geodesia e
Geofisica
Sezione di Oceanografia e
Meteorologia**

**Rapporto Interno
N. 93/2**

Franco Stravisi

**Rischio di intrusione marina sull'arco
costiero regionale a seguito di acque alte
eccezionali e loro concomitanza con le piene
fluviali**

*Relazione presentata al
Comitato Tecnico-scientifico per la Protezione Civile
della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia
(Trieste, 30 marzo 1993)*

Trieste, 1993

INDICE

RIASSUNTO	3
1. IL LIVELLO DEL MARE	3
2. LE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO	4
3. RISCHIO RELATIVO ALL'ACQUA ALTA	4
4. LE PRECIPITAZIONI ECCEZIONALI	9
5. CONCLUSIONI	12
RACCOMANDAZIONI	13
RIFERIMENTI	14

Rischio di intrusione marina sull'arco costiero regionale a seguito di acque alte eccezionali e loro concomitanza con le piene fluviali

Franco Stravisi

RIASSUNTO. In questa relazione vengono presentate le caratteristiche oceanografiche del bacino Adriatico che concorrono alla formazione dell'acqua alta nella sua parte settentrionale. Si discutono alcuni dati statistici elaborati in base alle serie mareografiche registrate a Trieste per stabilire la probabilità di occorrenza dell'acqua alta lungo l'arco costiero della regione. Vengono infine esaminati alcuni aspetti statistici delle serie pluviometriche di Trieste, in modo da ottenere una valutazione della probabilità di piene fluviali.

1. IL LIVELLO DEL MARE

Definizione. Il livello del mare, in un punto prefissato ed in un dato istante, è definito come la differenza di altezza tra la superficie marina ed una quota convenzionale riferita alla rete altimetrica nazionale. Le variazioni temporali del livello marino presentano uno spettro molto ampio, che comprende periodi dell'ordine del secondo (onde capillari), del minuto (onde gravitazionali corte), di ore (onde lunghe: sesse, marea astronomica) e periodi di giorni od anni legati alle variazioni climatiche. Tradizionalmente in oceanografia lo studio del moto ondoso si occupa dei periodi più brevi, mentre la *mareografia* studia i periodi di maggiore durata.

Misura del livello marino. Il livello del mare viene comunemente misurato nella cabina mareografica, in un pozzetto comunicante con il mare tramite un foro di piccolo diametro posto ad alcuni metri di profondità; in questa maniera si realizza un filtro idraulico che elimina il moto ondoso di superficie. Strumenti registratori provvedono a misurare il livello nel pozzetto con continuità. Tradizionalmente i dati vengono archiviati con un intervallo di campionamento di un'ora. In base ai dati orari vengono calcolati i livelli medi giornalieri, mensili ed annuali.

Le serie mareografiche a Trieste. Il porto di Trieste (Molo Sartorio) è stato dotato di un mareografo sin dal secolo scorso. I valori medi annuali e mensili sono disponibili a partire dal 1890. La serie mareografica dei valori orari è disponibile su archivi magnetici dal 1939. Attualmente il mareografo di Trieste è gestito dall'Istituto Sperimentale Talassografico del CNR (Ferraro, 1972).

Il livello medio. Il termine "livello medio del mare" comunemente denota la media aritmetica dei livelli orari calcolata su un periodo di parecchi anni. Nel seguito il periodo di riferimento è quello dell'ultimo trentennio, che si trova all'incirca 115 cm al di sotto dell'orlo del molo Sartorio.

Rappresentatività del mareografo di Trieste. Per quanto riguarda le variazioni aventi periodi superiori ad un'ora, i dati del mareografo di Trieste sono rappresentativi di tutto l'arco costiero regionale.

2. LE VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

La marea astronomica. Detta anche *lunisolare*, è causata dalle forze gravitazionali e centrifughe caratteristiche del moto relativo della terra, della luna e del sole. Le sue caratteristiche di periodicità sono ben note, per cui *può essere calcolata con grande accuratezza* (Stravisi, 1989, 1992) come somma di maree costituenti semidiurne e diurne. Nel suo complesso, la marea astronomica nell'Adriatico settentrionale ha un periodo medio di poco superiore alle 12 ore, ed un'ampiezza media di circa 40 cm, che aumenta in prossimità della luna nuova e piena e diminuisce in prossimità delle quadrature.

La marea meteorologica. E' l'insieme delle variazioni del livello marino causate dall'azione dell'atmosfera (vento e gradiente di pressione atmosferica) sul mare. Può essere prevista in linea di massima usando le previsioni meteorologiche e modelli oceanografici di calcolo numerico. La marea meteorologica è essenzialmente costituita da variazioni impulsive (ingorghi) e da oscillazioni periodiche della superficie marina (sesse). La sessa principale del mare Adriatico ha un periodo caratteristico di 21.5 ore.

Il fenomeno dell'acqua alta. La concomitanza di un livello medio del mare elevato per effetto della bassa pressione atmosferica, di un ingorgo causato da venti meridionali sul bacino Adriatico, della massima elevazione della sessa adriatica fondamentale e dell'alta marea astronomica ha come risultato un innalzamento complessivo del livello marino che nelle acque regionali costiere può raggiungere in casi eccezionali i 2 m ("acqua alta"). Le situazioni meteorologiche che determinano l'acqua alta o "storm surge" sono inoltre spesso accompagnate da un intenso moto ondoso che aumenta la capacità di invasione marina costiera. L'accresciuto apporto fluviale determina inoltre, soprattutto nelle zone lagunari, un ulteriore aumento del livello marino.

Per quanto riguarda la possibilità di intrusioni marine sull'arco costiero regionale, consideriamo nel seguito separatamente la situazione del livello marino ed il verificarsi di precipitazioni di notevole intensità, capaci di causare ondate di piena nei corsi fluviali regionali.

3. RISCHIO RELATIVO ALL'ACQUA ALTA

Tendenza dei livelli medi annuali. Il livello medio del mare a Trieste è aumentato di circa 14 cm nel corso dell'ultimo secolo. Lo stesso aumento si è verificato mediamente in tutti gli oceani della terra. La **Fig. 1** riporta i livelli annuali a Trieste dal 1939; la situazione degli ultimi trent'anni appare stazionaria.

Livello di guardia. Consideriamo come livello di guardia per un rischio di intrusione marina lungo l'arco costiero regionale l'elevazione di **un metro** sopra il livello medio del mare, registrato al mareografo di Trieste. Questo livello di guardia si trova quindi a circa 10-20 cm al di sotto dell'orlo dei moli e delle rive della città. Nel seguito, presentiamo alcuni dati statistici ricavati dall'analisi delle serie mareografiche di Trieste (dati orari dal 1939 al 1991).

Statistica delle situazioni a rischio. I dati statistici sono stati ricavati sulla base della serie dei livelli orari registrati al mareografo di Trieste dal 1939 al 1991. Sono state considerati i casi di elevazione superiore ad 1 m rispetto al livello medio; questi sono rappresentati, anno per anno, nella **Fig. 2**. Il numero annuale di ore con livello superiore al livello di guardia è riportato nella **Fig. 3**, mentre la **Fig. 4** rappresenta il valore medio, anno per anno, delle elevazioni orarie a rischio. Il numero maggiore di casi si è manifestato nel 1966 e nel 1979; le maggiori elevazioni medie si sono avute nel 1969 e nel 1980. Il livello più alto è stato raggiunto il 26 novembre 1969, con 2.0 m sopra il livello medio.

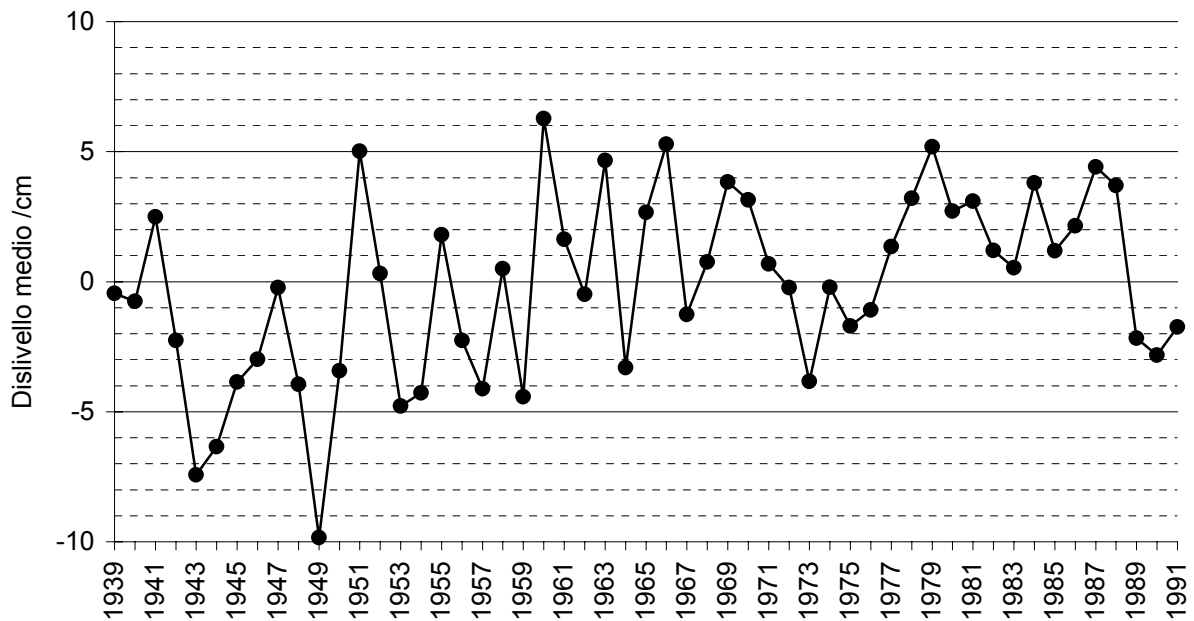


Fig. 1.- Serie temporale (1939-1991) dei livelli medi annuali del mare a Trieste riferiti al livello medio. Dislivelli in centimetri.

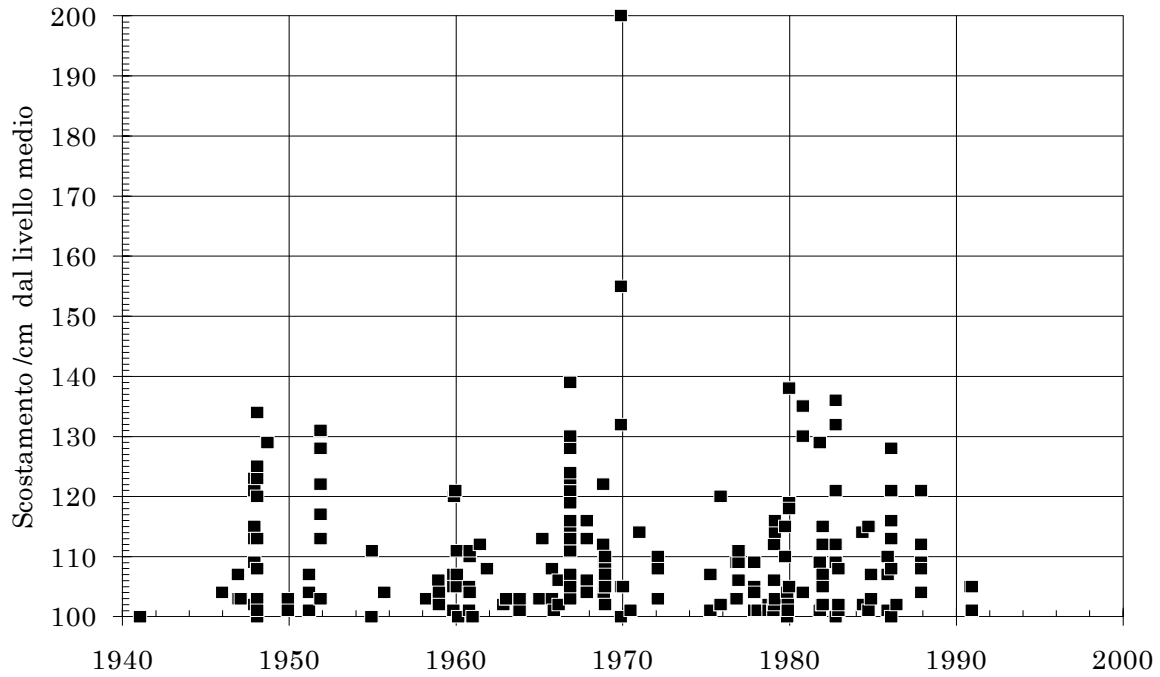


Fig. 2.- Livelli orari del mare a Trieste superiori ad 1 m rispetto al livello medio nel periodo 1939-1991.

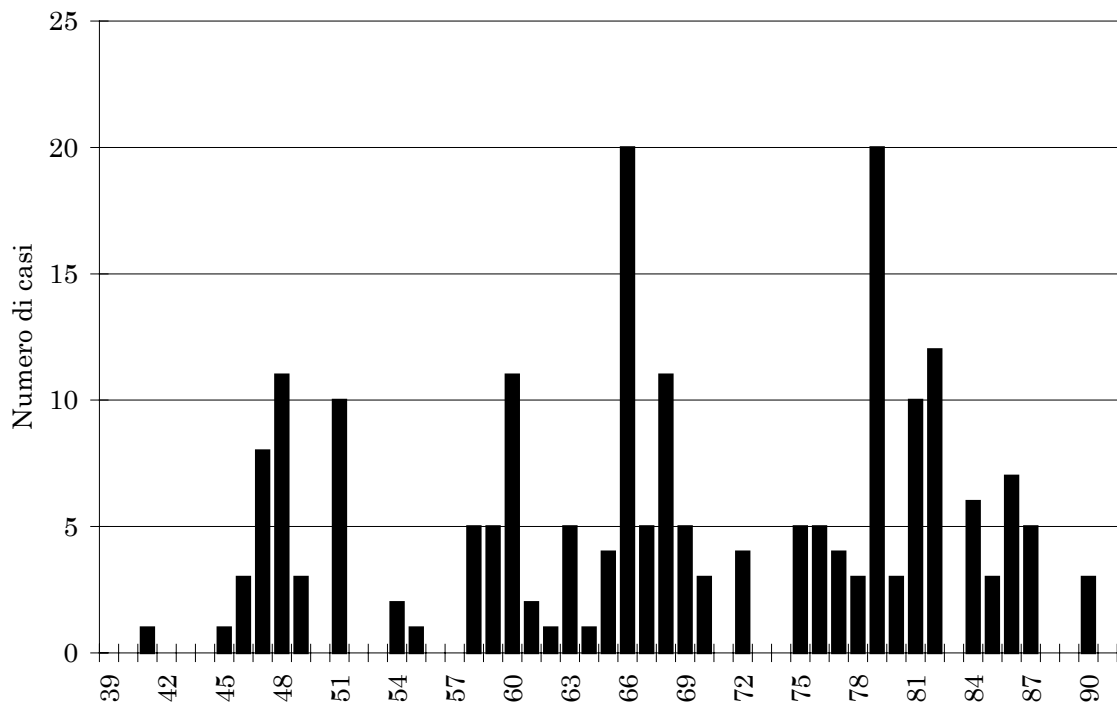


Fig. 3.- Numero di ore per anno con livello del mare a Trieste superiore ad 1 m rispetto al livello medio (1939-1991).

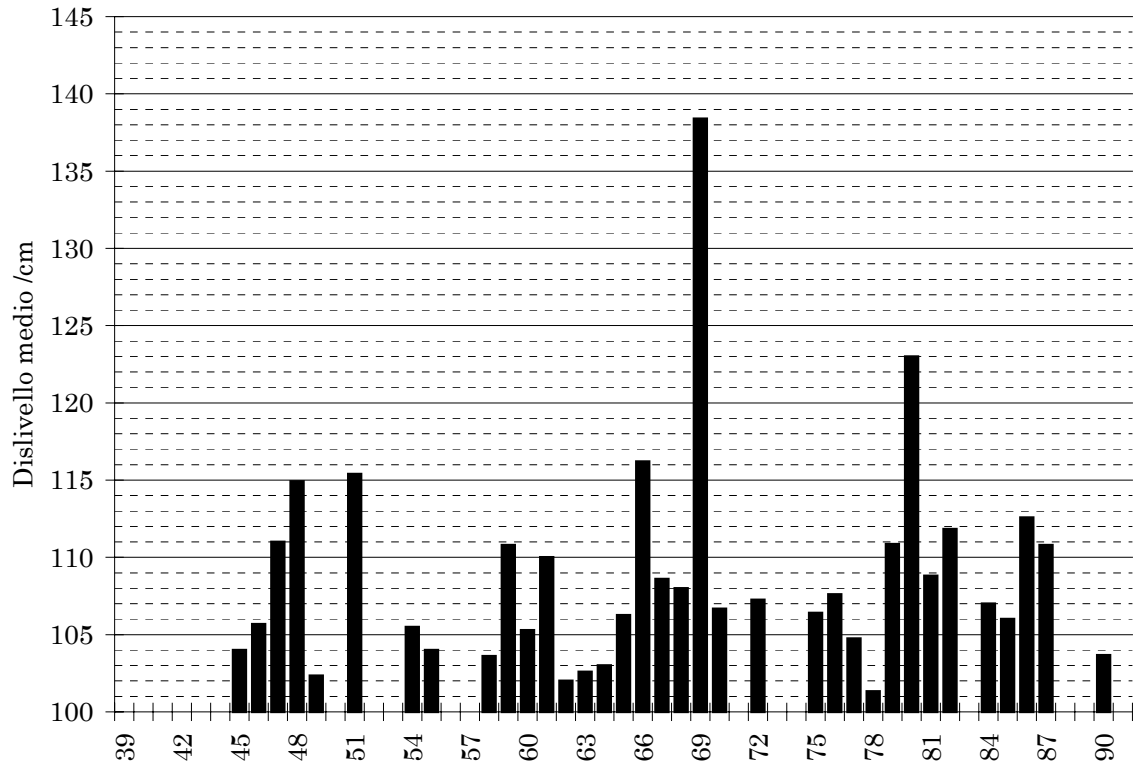


Fig. 4.- Valore medio dei livelli orari del mare a Trieste superiori ad 1 m rispetto al livello medio (1939-1991).

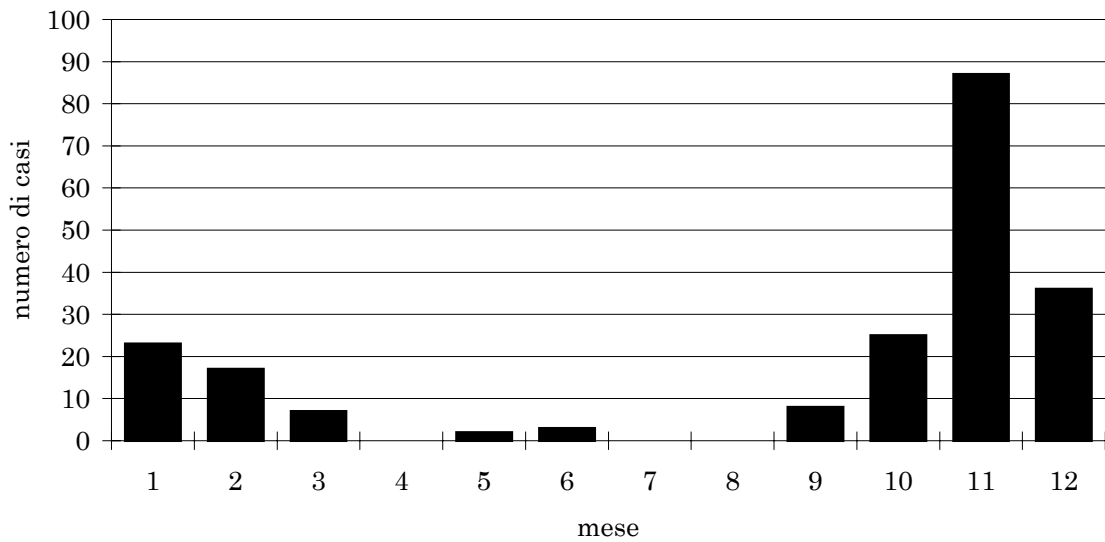


Fig. 5.- Numero mensile di ore con livello del mare a Trieste superiore ad 1 m rispetto al livello medio (1939-1991).

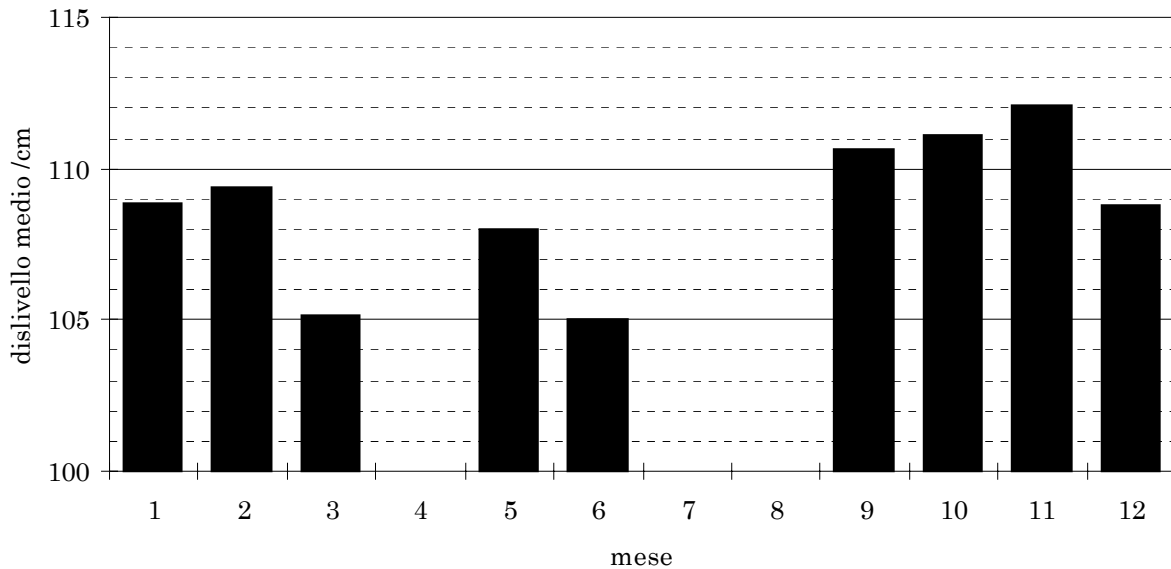


Fig. 6.- *Valore medio mensile dei livelli del mare a Trieste superiori ad 1 m rispetto al livello medio (1939-1991).*

Distribuzione mensile dell'acqua alta. Il numero dei livelli orari superiori al metro ed il loro valore medio sono riportati, mese per mese, nelle **Fig. 5 e 6**. Si nota che nessun caso dal 1939 si è verificato nei mesi di aprile, luglio ed agosto. Il fenomeno è tipicamente concentrato nei mesi da settembre a marzo, con un massimo nel mese di novembre. Ricordiamo che due delle più famose acque alte si sono infatti verificate il 26/11/69 (Ferraro, 1975) ed il 4/11/66 (Stravisi, 1973).

Frequenza e tempi di ritorno. I casi di superamento del livello di guardia sono stati 208 in 53 anni, con una frequenza media di *3.9 ore per anno*. Il corrispondente dislivello medio è stato di 110 cm. Considerando ora la distribuzione dei valori estremi annuali (GEV distribution) con il metodo di Gumbel si ottengono i seguenti tempi di ritorno:

livello superiore a 110 cm:	1.5 anni.
livello superiore a 150 cm:	30 anni,
livello superiore a 200 cm:	70 anni.

Con diverse considerazioni, Mazzarella e Palumbo (1991) hanno calcolato i tempi di ritorno per i due principali fenomeni di acqua alta registrati nell'Adriatico settentrionale: il 26 novembre 1969 a Trieste ed il 4 novembre 1966 a Venezia. I valori ottenuti sono compresi tra 113 e 195 anni per il primo evento e tra 29 e 66 anni per il secondo.

In conclusione, possiamo ragionevolmente considerare che il tempo medio di ritorno per un'acqua alta eccezionale, che superi cioè il livello medio del mare di 1.5 m lungo le coste regionali, sia dell'ordine di 50 anni.

4. LE PRECIPITAZIONI ECCEZIONALI

Le serie pluviometriche. Nella Regione Friuli-Venezia Giulia esistono molte serie pluviometriche. La raccolta che meglio copre il territorio è quella eseguita dall'Ufficio Idrografico del MLP, con una serie di stazioni termopluviometriche messe in opera a partire dal 1926. La stazione meteorologica di Trieste (Accademia di Commercio e Nautica, Istituto Talassografico, Istituto Nautico-Laboratorio di Climatologia) dispone della serie più lunga (dal 1817; esistono anche dati del 1700). In questa relazione preliminare ci siamo limitati a considerare, per brevità, la sola serie pluviometrica di Trieste. I dati sono i totali giornalieri di precipitazione registrati dal 1921 al 1991, ricavati dalla serie dei dati orari archiviati su supporto magnetico dal Laboratorio di Climatologia.

Rappresentatività della stazione di Trieste. Il numero medio dei giorni piovosi (totale giornaliero ore 0-24 ≥ 0.1 mm) a Trieste è di 122 giorni all'anno (33.3 %): questo valore è da ritenersi rappresentativo per tutta la regione. La precipitazione totale annuale a Trieste è prossima a 1000 mm; questa quantità aumenta notevolmente procedendo dalla zona costiera verso l'interno e verso le zone montuose. Il massimo è raggiunto nella zona dei monti Musi, con 3000 mm all'anno e più. Possiamo quindi considerare che i dati di Trieste siano mediamente rappresentativi della realtà regionale per quanto riguarda la durata delle precipitazioni, mentre per quanto riguarda le altezze debbano essere corretti con un coefficiente compreso tra 1.5 e 2.

Correlazione tra precipitazioni e portata dei fiumi. Le serie disponibili relative alla portata giornaliera dei corsi d'acqua regionali dovrebbero essere studiate statisticamente e correlate ai dati pluviometrici raccolti su tutto il bacino idrografico interessante il bacino Adriatico settentrionale. Dato che il tempo di arrivo medio al mare dell'acqua precipitata sul bacino idrografico è dell'ordine di un giorno, si può ritenere al fine di queste considerazioni preliminari che gli eventi di pioggia più intensi siano seguiti, con il ritardo specificato, da un corrispondente aumento della portata media dei fiumi. E' quindi utile per il calcolo della probabilità di occorrenza delle piene fluviali considerare alcuni dati statistici relativi alle precipitazioni, usando i dati di Trieste come rappresentativi della loro durata sul territorio regionale.

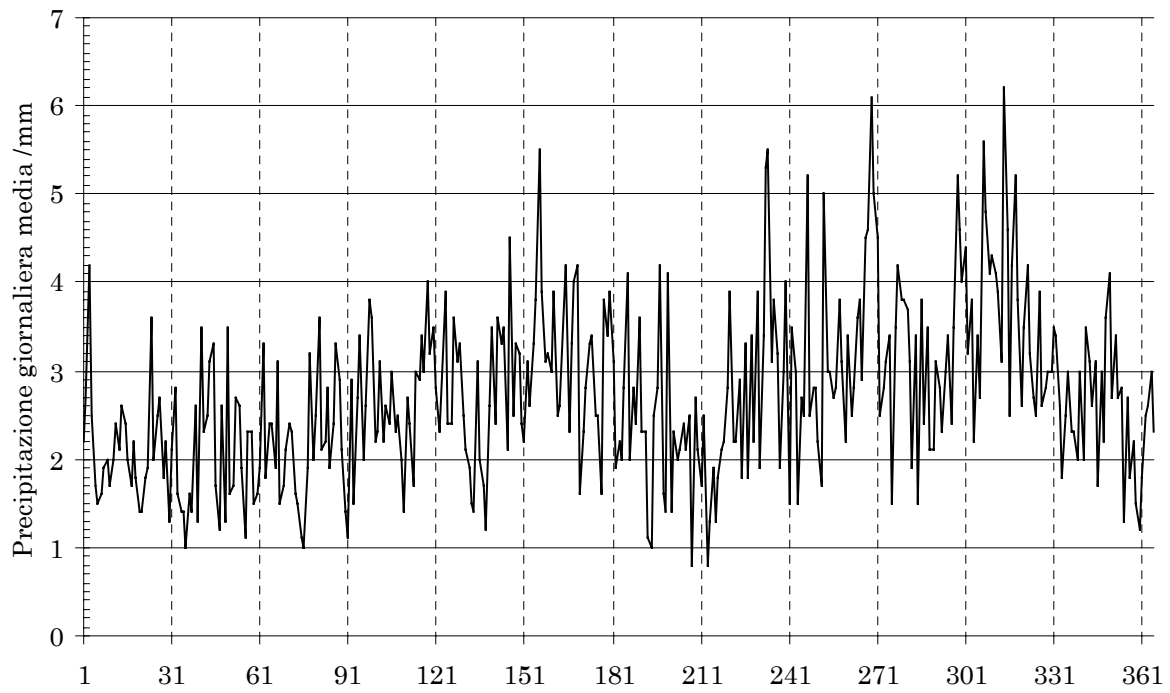


Fig. 7.- *Precipitazioni giornaliere medie (1921-1991) a Trieste per ogni giorno dell'anno.*

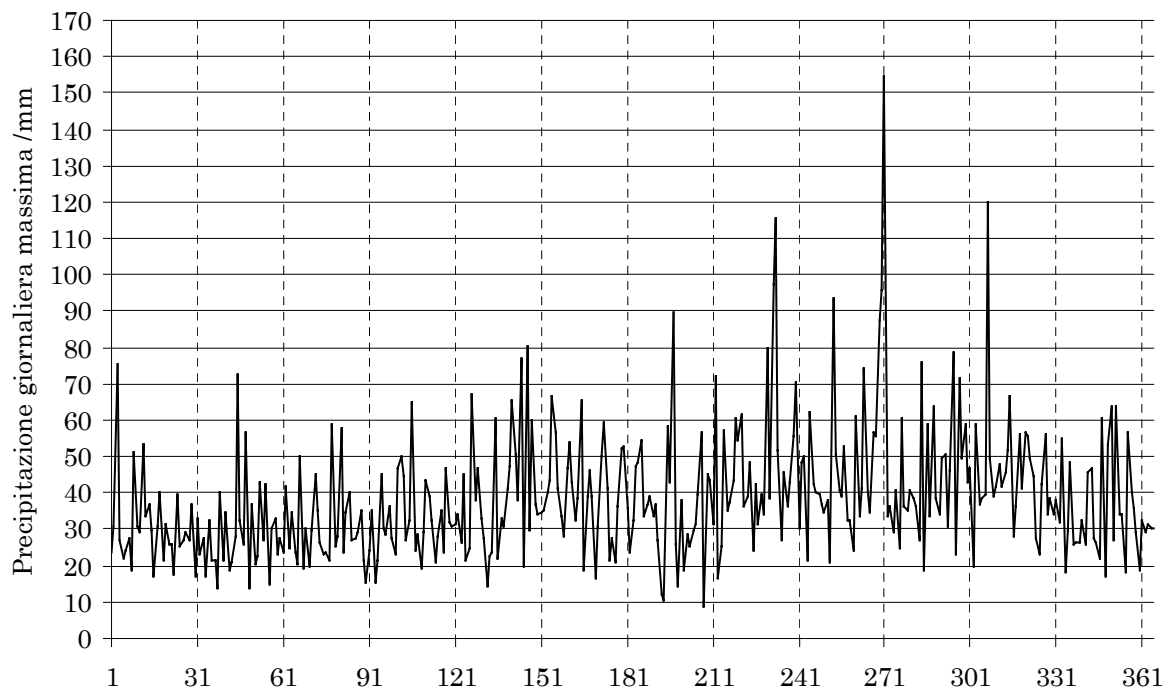


Fig. 8.- *Precipitazioni giornaliere massime (1921-1991) a Trieste per ogni giorno dell'anno.*

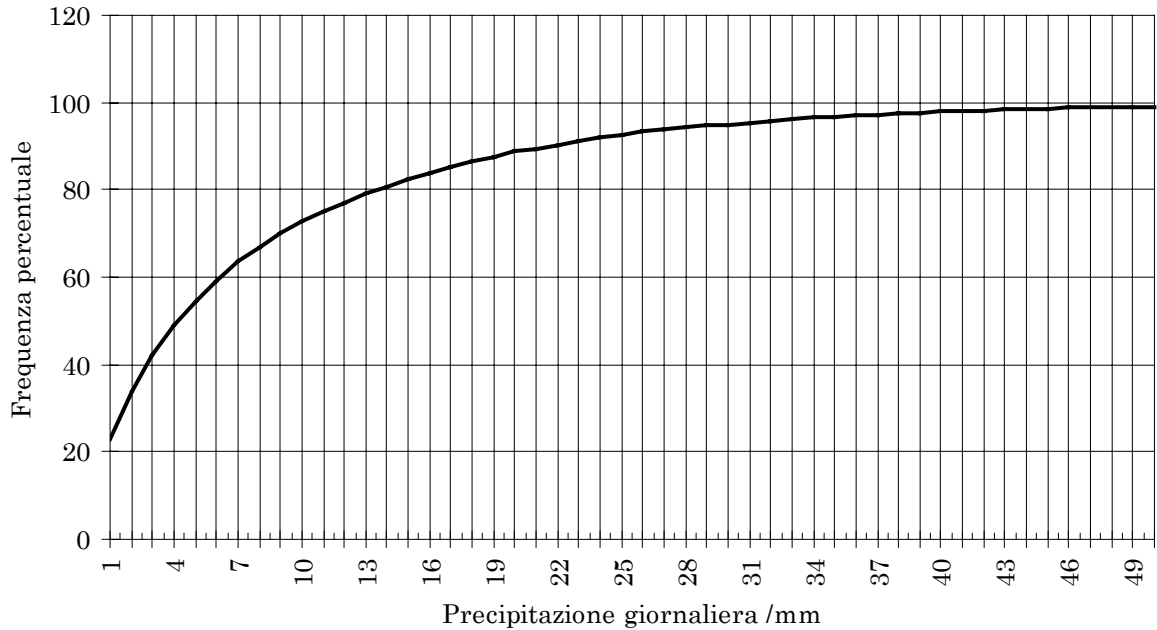


Fig. 9.- *Istogramma cumulativo delle precipitazioni giornaliere a Trieste (1921-1991).*

Dati statistici delle precipitazioni a Trieste. Le Fig. 7 ed 8 illustrano l'andamento dell'anno medio (1921-1991) per le precipitazioni giornaliere (ore 0-24 TMEC) medie e massime a Trieste. Il massimo giornaliero è stato di 154.8 mm il 28 settembre 1926. La Fig. 9 riporta, sempre per Trieste, l'istogramma cumulativo delle precipitazioni totali giornaliere, dal quale si possono calcolare la mediana ed i quantili seguenti:

50 %	4.2 mm/giorno
10 %	21.4 mm/giorno
1 %	49.7 mm/giorno
0.1 %	87.6 mm/giorno

La probabilità di un totale giornaliero superiore a 4.2 mm è quindi del 50 %; superiore a 21.4 mm 10 %, e così via.

Al fine di poter prevedere le piene fluviali sono interessanti i periodi ed i totali di precipitazione nel corso di più giorni consecutivi; questi dati, sempre relativi a Trieste, sono riportati nella **Tab. 1**. Per esempio, la massima quantità di pioggia, 289.8 mm, è caduta in 7 giorni (18-24 agosto 1977); il periodo più lungo è stato di 16 giorni piovosi (5-20 novembre 1962) con 158.4 mm. Precipitazioni con durata compresa tra 2 e 10 giorni si verificano con una probabilità del 27.2 %; coprono 81.6 % dei giorni piovosi totali, con una quantità di pioggia complessiva compresa tra 8 e 10 mm.

Per quanto riguarda i due fenomeni di acqua alta già considerati, sono precipitati 28.5 mm dal 3 al 6/11/66; si erano però avuti 190.9 mm dal 29/9 al 30/10. Dal 21 al 26/11/69 sono caduti 66.6 mm (109.5 mm dal 7 al 18 dello stesso mese).

Durata in giorni	Numero di casi 1921-1991	Numero medio di casi all'anno	Precipitazione totale media /mm	Precipitazione totale massima /mm
1	1505	21.197	6.7	93.8
2	945	13.310	8.1	105.4
3	461	6.493	8.0	102.8
4	300	4.225	8.8	122.4
5	165	2.324	9.0	269.0
6	118	1.662	8.6	114.0
7	74	1.042	8.5	289.8
8	32	0.451	8.8	133.3
9	17	0.239	9.9	134.9
10	11	0.155	10.0	137.9
11	4	0.056	5.8	71.2
12	2	0.028	6.9	99.3
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	1	0.014	9.9	158.4

Tab. 1.- *Periodi ed altezze medie e massime delle precipitazioni a Trieste (1921-1991).*

5. CONCLUSIONI

Il problema del rischio da piene fluviali deve essere considerato indipendentemente dal rischio da intrusione marina lungo la costa per effetto dell'acqua alta.

L'onda di piena in un corso d'acqua, funzione dell'intensità e della durata delle precipitazioni su tutto il suo bacino idrografico, rappresenta una situazione di pericolo lungo l'intero percorso. L'effetto in prossimità della foce può essere più o meno accentuato a seconda dell'altezza del mare del momento. L'uso di modelli idrodinamici aiuta a comprendere meglio l'evoluzione del fenomeno; una rete di sensori idrometrici e pluviometrici opportunamente realizzata e gestita permette sia di prevedere che di seguire in tempo reale tali eventi.

I fenomeni di *acqua alta* possono essere calcolati usando i modelli idrodinamici marini da tempo esistenti e ben collaudati. Le possibilità di previsione dipendono

però dalla disponibilità delle corrispondenti previsioni meteorologiche sul bacino Adriatico e dalla capacità operativa di utilizzarle in tempi rapidi assieme al modello marino. Le precipitazioni e le conseguenti piene fluviali non sono la causa, ma un fenomeno solitamente contemporaneo all'acqua alta, capaci però di aumentarne i danni quando lo sversamento avviene in una zona lagunare ristretta e con scarsa possibilità di sfogo verso il mare.

Il tempo di ritorno di un'acqua alta eccezionale può essere stimato in circa 50 anni. Annualmente però, specie nel mese di novembre, si verificano acque alte capaci di creare disagio nei punti costieri più depressi.

RACCOMANDAZIONI

Lo studio e la prevenzione delle piene fluviali e delle acque alte, oltre a richiedere programmi di ricerca finalizzati, sono strettamente connessi ad altre problematiche territoriali di interesse generale (quali opere civili ed idrauliche, agricoltura, previsioni del tempo, assistenza alla nautica da diporto, programmazione di interventi diversi) o particolare ai fini della protezione civile (monitoraggio in tempo reale delle condizioni meteorologiche in situazioni di emergenza, dati climatici relativi a zone e situazioni a rischio).

La soluzione scientifica ed operativa delle problematiche suddette richiede necessariamente la disponibilità di un moderno ed adeguato **Servizio Meteorologico Regionale**, che dovrà comunque farsi carico anche di quei compiti istituzionali attualmente propri dell'Aeronautica Militare e non strettamente connessi con l'assistenza al volo, che l'arma sembra intenzionata ad abbandonare.

Proponiamo quindi di:

(1) Avviare con urgenza lo studio di fattibilità per un **Servizio Meteorologico Regionale**, comprendente in particolare una adeguata **rete idrografica** per il controllo delle portate dei fiumi e delle falde e di una **rete mareografica** per il controllo del livello marino lungo l'arco costiero.

(2) Organizzare una **Banca Regionale di Dati Climatici**, con il compito principale di raccolta, conservazione e validazione scientifica del materiale esistente, della sua valorizzazione e diffusione agli enti pubblici e privati interessati.

(3) Predisporre uno studio dettagliato sulla formazione, sulla propagazione e sulla probabilità di occorrenza dell'acqua alta nell'Adriatico settentrionale ed in particolare nelle zone lagunari costiere mediante l'uso di modelli dinamici numerici e di modelli statistici.

(4) Predisporre uno studio dettagliato sulla formazione, sulla propagazione e sulla probabilità di occorrenza delle piene nei fiumi regionali in relazione al livello del mare alla foce.

RIFERIMENTI

FERRARO S. (1972): *Dati del mareografo di Trieste*, I.S.T., 477.

FERRARO S. (1975): *Le perturbazioni meteorologiche e le acque alte a Trieste*, Atti Acc. Ligure Sc. Lett., XXXI, 123-137.

MAZZARELLA A., PALUMBO A. (1991): *Effect of sea level time variations on the occurrence of extreme storm surges: an application to the Northern Adriatic Sea*, Boll Oceanol. Teor. Appl., IX, 1, 33-38.

STRAVISI F. (1973): *Analysis of a storm surge in the Adriatic sea by means of a two-dimensional linear model*, Acc. Naz. Lincei, LIV, 2, 243-260.

STRAVISI F. (1989): *Fortran and BASIC programs for computing and plotting the astronomic tide*, rapp. Lab. Climatologia Univ. Trieste, LC 89/4, 23 pag.

STRAVISI F. (1992): *Previsioni di marea per il Golfo di Trieste - 1993*, LC 92/3, 36 pag.