

# **Simulazione delle chiusure delle barriere mobili per gli anni 2000, 2001 e 2002 nella situazione attuale e ipotizzando l'innalzamento del livello medio del mare**

*Georg Umgiesser  
Bruno Matticchio*

## **Introduzione**

Le progettate barriere mobili della Laguna di Venezia (MOSE) sono state ideate per proteggere Venezia dalle acque alte. Esse dovranno essere sollevate ogni volta che il livello della marea supererà una quota predefinita, separando idraulicamente la laguna dal mare Adriatico. Di conseguenza il livello in laguna si manterrà ad una quota più bassa rispetto a quello del mare Adriatico, e gli allagamenti della città di Venezia potranno essere evitati.

Il MOSE è stato progettato quando le stime di innalzamento dei livelli marini erano inferiori a quelle attuali. Le più recenti stime indicano una crescita media del livello marino di circa 30 cm nei prossimi 100 anni, con un'incertezza che, secondo alcuni modelli climatologici, può variare fra 8 cm e 90 cm (IPCC 1990, 1995, 2001).

In questo lavoro il funzionamento del MOSE è simulato sia considerando l'attuale livello medio del mare, sia ipotizzando una crescita del livello stesso pari a 30 cm e a 50 cm, in accordo con le suddette previsioni climatologiche. Lo studio si avvale di un modello idrodinamico sviluppato all'ISDGM-CNR con cui vengono simulate sia la propagazione della marea nella laguna sia le chiusure delle barriere mobili. Sono presi in esame tre anni (2000, 2001 e 2002) per i quali sono disponibili tutti i dati necessari. I parametri indagati sono:

- Il possibile superamento del livello di salvaguardia a Punta della Salute;
- L'eventualità di falsi allarmi e di false chiusure
- L'interferenza tra le chiusure delle bocche di porto e il transito delle navi.

## **Metodi**

### ***I dati disponibili***

Sono stati utilizzati i dati di marea misurati a Diga Sud Lido e a Punta Salute, messi a disposizione dal Centro previsioni e segnalazioni Maree del Comune di Venezia. I dati consistono in livelli orari per tutto il 2000, 2001 e 2002. Dallo stesso Centro Maree sono stati anche forniti i dati di previsione di marea a Punta Salute (il cui metodo di calcolo è descritto in Canestrelli, 1999). Per ogni ora è stata messa a disposizione la previsione del livello per un periodo che varia tra 2 e 5 giorni. Nei pochi casi in cui le previsioni non sono risultate disponibili, è stato utilizzato il livello osservato a Punta Salute.

I dati di vento sono stati registrati alla piattaforma oceanografica del CNR nel mare Adriatico. Si tratta sempre di dati orari di velocità (nodi) e direzione (gradi rispetto al nord). I dati di pioggia giornaliera provengono dall'istituto Cavanis di Venezia.

### ***La procedura di chiusura delle barriere mobili***

Per la valutazione parametri oggetto dello studio, la procedura seguita per la decisione, sulla base delle previsioni, dell'istante a cui dare inizio alla manovra di chiusura delle paratoie mobili, riveste un ruolo fondamentale.

Per implementare tale procedura si è fatto riferimento a quanto riportato nel documento del Magistrato alle Acque: “Interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea – Studio di impatto ambientale del progetto di massima – Allegato 6 – Tema 5 (1997)”. Tale procedura, illustrata nel dettaglio nel capitolo 7 del volume citato, è qui riassunta in modo sintetico, perché importante per la comprensione dei risultati ottenuti.

Il dato più importante è la previsione del livello della marea a Punta Salute, effettuata ad intervalli regolari. Quando la previsione indica, con un anticipo di 24 ore, il superamento del livello di salvaguardia la fase di monitoraggio dell'evento ha inizio.

Nel citato documento del Magistrato alle Acque del 1997, il livello di salvaguardia è fissato in 100 cm rispetto allo zero di Punta della Salute, ed è pertanto a tale quota che si è fatto riferimento per i calcoli svolti nel presente studio.

Come descritto nel seguito, tuttavia, le simulazioni sono state ripetute anche ipotizzando che il livello di salvaguardia sia pari a 110 cm, in modo da adeguare la

soglia di riferimento alle più recenti indicazioni in materia di difesa della città dalle acque alte.

Secondo la procedura, nelle ore successive il monitoraggio prosegue con l'acquisizione delle misure e delle previsioni dei parametri di interesse (livello, vento, pioggia, apporti dal bacino scolante), per affinare la caratterizzazione dell'evento di acqua alta previsto.

A sei ore dall'istante in cui è previsto il superamento della quota di salvaguardia (chiamato t100) viene effettuata la prima classificazione definitiva dell'evento. Gli eventi il cui tempo di ritorno è superiore a 10 anni (eventi che superano la quota di 150 cm o che superano la quota di salvaguardia per una durata maggiore di 11 ore) sono classificati come di tipo 2. Per essi la decisione sulla strategia di chiusura viene presa a questo istante (a 6 ore da t100) e prevede che il sollevamento delle paratoie abbia inizio quando il livello a Punta della Salute raggiunge i 55 cm.

Gli eventi rimanenti sono classificati di tipo 1, e per essi il monitoraggio prosegue.

A 4 ore dal tempo t100 la procedura prevede una ulteriore classificazione dell'evento. Allo scopo si utilizzano i dati di pioggia in base ai quali si decide se inserire l'evento nella classe 1A (pioggia debole, meno di 1 mm/ora) o nella classe 1B (pioggia forte, più di 1 mm/ora). In verità la procedura prevedrebbe di considerare anche la portata del bacino scolante, ma non essendo attualmente disponibili i dati giornalieri, si è deciso, ai fini della classificazione, di tenere conto solo del dato di pioggia.

Sempre a 4 ore dal tempo t100 (si veda a questo riguardo lo schema di Fig 7.2 nel capitolo 7 del citato documento del Magistrato alle Acque), gli eventi delle classi 1A e 1B vengono ancora suddivisi in base al monitoraggio della velocità del vento. Se il vento è forte (più di 15 m/s) allora l'evento è ri-classificato come 1AV o 1BV. A questo punto la quota a cui inizia la chiusura delle paratoie è definitivamente stabilita: per la classe 1A, la chiusura inizia quando il livello a Punta Salute raggiunge i 90 cm, mentre per la classe 1AV essa inizia ad un livello di 70 cm. Analogamente, per la classe 1B le paratoie vengono chiuse al livello di 80 cm (1B) e a 65 cm (1BV), sempre con riferimento al mareografo di Punta Salute.

È importante notare, dunque, che la classificazione dell'evento si basa sulle previsioni di livello, pioggia e vento, mentre il momento esatto di inizio chiusura va deciso utilizzando esclusivamente il dato misurato del livello a Punta Salute.

Nelle simulazioni eseguite in questo studio, invece delle previsioni di vento e pioggia, non disponibili, si è utilizzato il dato vero, fino a 4 ore in avanti. Così facendo si è trascurata l'incertezza dovuta alla previsione meteorologica. Per il livello, invece, sono state utilizzate le reali previsioni prodotte dal Centro Maree del Comune di Venezia. Nei calcoli permane pertanto l'incertezza della previsione di marea e sono così simulati anche i cosiddetti “falsi allarmi” e “false chiusure” dovuti agli errori di tale previsione. Per valutarne gli effetti, le simulazioni sono state ripetute anche considerando un possibile errore nella previsione. In tale caso, il valore di livello previsto è stato incrementato sistematicamente di 10 cm. Nel succitato rapporto del Magistrato alle Acque, la procedura di ri-apertura delle paratoie non è descritta nel dettaglio, anche se si desume che l'apertura debba iniziare quando il livello in mare si trovi ad essere inferiore a quello misurato a Punta della Salute. Pur assumendo, come sembra ovvio, che la riapertura debba essere effettuata solo in condizioni di marea calante, la scelta dell'istante di inizio della manovra di riapertura pone alcune questioni.

In primo luogo, mentre è chiaro che se la previsione indica una marea calante con livelli di molto al di sotto del livello di salvaguardia, le paratoie debbano essere aperte, non è chiaro come si debba procedere se la marea prevista scende di poco al disotto di tale livello, per poi superarlo nuovamente nella successiva fase di crescita. O, più in generale, se il massimo di marea successivo alla riapertura si prevede anch'esso oltre il livello di salvaguardia. Probabilmente in tali casi l'apertura delle paratoie non dovrebbe essere effettuata.

In secondo luogo, la procedura non specifica come si debba procedere nei casi in cui, per effetto del vento, i livelli in corrispondenza delle tre bocche siano sensibilmente diversi tra loro. In tali casi può accadere che, mentre in base al confronto tra il livello a Punta della Salute e la marea misurata in mare si dovrebbe procedere alla riapertura, le condizioni locali presso qualcuna delle bocche porterebbero ad una scelta diversa.

Infine, non è chiaro come si debba procedere nel caso in cui, al momento della riapertura, il livello in laguna sia ancora superiore alla quota di salvaguardia. Ciò potrebbe avvenire per una qualche fallanza del sistema, come ad esempio per una ritardata chiusura delle paratoie per errori di previsione, o per variazioni del livello in laguna dopo la chiusura delle paratoie (dovute alla pioggia, alla portata dal bacino scolante, all'ingresso d'acqua tra le paratoie, o al vento, come descritto nel paragrafo

successivo). In tale caso la procedura indicherebbe, immediatamente dopo, una nuova chiusura.

Non essendo disponibili le informazioni necessarie per risolvere le suddette questioni, nelle simulazioni si è assunto che la ri-apertura delle paratoie avvenga quando sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- La marea prevista è in fase decrescente;
- Il livello misurato in mare è inferiore a quello in laguna;
- Non è previsto il superamento del livello di salvaguardia nelle 4 ore successive.

Si deve considerare, peraltro, che i succitati problemi si verificano molto raramente nella situazione attuale dei livelli marini. Le simulazioni hanno tuttavia evidenziato che essi sono molto più frequenti negli scenari che prevedono l'innalzamento del livello del mare di 30 o di 50 cm, e non possono perciò essere trascurati.

### ***Possibili cause di aumento del livello in laguna a barriere chiuse***

La variazione del livello in laguna, una volta chiuse le barriere, è determinata dagli apporti della pioggia e del bacino scolante, nonché dall'eventuale passaggio d'acqua tra le paratoie (traferri). L'effetto principale è però quello dovuto al vento, che è in grado di ridistribuire le masse d'acqua, che non sono più influenzate dalla marea, e generare dislivelli anche considerevoli tra le diverse parti della laguna (Zecchetto et al., 1997).

Il problema dell'innalzamento del livello d'acqua in laguna a barriere chiuse è già stato argomento di un altro lavoro (Pirazzoli, 2002, Pirazzoli e Umgiesser, 2003, vedi anche Bras et al., 2002) nel quale si è messo in evidenza che, con chiusure prolungate, è possibile che il livello d'acqua in laguna, a barriere chiuse, possa crescere anche fino a superare il livello di salvaguardia.

Poiché nel caso in esame sono disponibili solo i dati di pioggia giornaliera; e non quelli degli apporti del bacino scolante, si è assunto che l'innalzamento dovuto a pioggia e bacino scolante sia pari al doppio di quello dovuto alla sola pioggia (Dazzi et al., 1984).

Per stimare l'effetto del passaggio d'acqua attraverso i traferri si è fatto riferimento al documento del Collegio degli Esperti (1998), in cui l'innalzamento dell'acqua in

laguna è valutato in 2.7 mm/ora a paratoie ferme, in 4.5 mm/ora se le paratoie oscillano per effetto del moto ondoso e in 21 mm/ora se tali oscillazioni sono molto accentuate per effetto di mareggiate gravose. Non potendo disporre dei dati sul moto ondoso, nelle simulazioni l'intensità di oscillazione delle paratoie è stata stimata in base alla velocità del vento.

In pratica, è stata effettuata un'interpolazione non-lineare fra i dati di velocità del vento, assumendo che l'oscillazione sia nulla per venti al di sotto di 5 m/s, e sia forte per venti che superano i 25 m/s. In base a tale interpolazione, illustrata graficamente in figura 2, il valore di 4.5 mm/ora si raggiunge con velocità del vento attorno a 17.5 m/s.

Per quanto concerne, infine, le variazioni di livello dovute al vento, tale effetto è valutato con le simulazioni, poiché il modello matematico considera, tra le forzanti della circolazione mareale, anche il vento.

Con il modello stesso si tiene conto del possibile innalzamento del livello in laguna durante le manovre di chiusura. Le chiusure stesse sono, infatti, simulate attraverso la diminuzione lineare, fino all'annullamento, dei flussi alle bocche, in un intervallo di tempo pari mezz'ora, ossia pari al previsto tempo necessario per sollevare le paratoie.

### ***Le simulazioni***

Il modello idrodinamico impiegato è stato sviluppato all'ISDGM-CNR (Umgiesser e Bergamasco, 1993, 1995) per risolvere le equazioni idrodinamiche nella laguna di Venezia. Lo stesso modello è già stato utilizzato in altri studi su questo tema (Umgiesser, 1997, 1999, 2000).

Il modello è stato applicato con un passo temporale di 300 s. Per la simulazione di un anno impiega 4 ore su un PC Pentium 4. Per l'intero periodo di tre anni considerato (2000, 2001 e 2002) è stato simulato l'andamento della marea all'interno della laguna, sia nella situazione attuale che nei previsti scenari di eustatismo (+30 e +50 cm). Il livello di salvaguardia è stato fissato in +100 cm rispetto allo zero mareografico di Punta della Salute, come indicato nel già ricordato documento del Magistrato alle Acque (1997).

Le condizioni al contorno del modello idrodinamico consistono nei dati di livello registrati a Diga Sud Lido. Lo stress del vento è stato applicato con un coefficiente di drag pari a  $1.5 \cdot 10^{-3}$ .

Le variabili calcolate dal modello ad ogni passo di calcolo sono la velocità di corrente e il livello d'acqua in tutta la laguna, oltre che i flussi attraverso le bocche. Ai fini dello studio è poi stata implementata una procedura per elaborare le previsioni e simulare la chiusura delle paratoie secondo lo schema logico illustrato in Fig. 1, e altre procedure per calcolare i parametri di interesse (superamento dei livelli di salvaguardia, durata delle chiusure, interferenza con la navigazione)

### ***Terminologia adottata***

Vengono brevemente descritti i termini tecnici utilizzati della discussione:

- **Livello di salvaguardia:** Livello di marea che si intende non superare attraverso la chiusura delle barriere mobili. In questo caso tale livello è stato assunto pari a 100 cm, per attenersi a quanto riportato nello studio Magistrato alle Acque, 1997. Le simulazioni sono state ripetute anche considerando un livello di 110 cm, in accordo con le più recenti indicazioni in materia di difesa della città dalle alte maree.
- **Livello di chiusura:** Livello di marea, misurato a Punta della Salute, al cui superamento si inizia la chiusura delle barriere mobili. Esso dipende dai fattori astronomici e meteorologici e può variare tra 90 cm, in situazioni normali, e 55 cm per eventi meteorologici particolarmente gravosi.
- **Franco di previsione:** incremento del livello fornito dalla previsione per compensare all'incertezza della previsione stessa ed evitare mancati allarmi. In questo caso è stato considerato sia un valore del franco pari a 0 (assenza di errore) sia un valore pari a 10 cm.
- **Allarme:** Annuncio del previsto superamento del livello di salvaguardia. In questa condizione le barriere mobili vengono approntate per le chiusure e viene fissato il livello di chiusura. Durante lo stato di allarme il traffico navale viene fermato. Lo stato di allarme cessa quando inizia la riapertura delle paratoie.

- **Falso allarme:** Annuncio del previsto superamento del livello di salvaguardia (allarme) che, a causa di un errore delle previsioni, non è seguito dal superamento del livello di chiusura. Lo stato di allarme cessa quando è trascorso il tempo entro cui avrebbe dovuto verificarsi il superamento del livello di salvaguardia. In base a quanto riportato nello studio del Magistrato alle Acque del 1997, il periodo minimo di allarme, che è ovviamente quello di un falso allarme, è pari 4 ore.
- **Falsa chiusura:** Chiusura delle paratoie senza che si verifichi il superamento del livello di salvaguardia a Punta Salute. In caso di eventi non eccezionali ciò può accadere se la previsione indica il superamento del livello di salvaguardia (allarme), ma la marea supera solo la soglia che impone la chiusura (ad esempio i 90 cm), senza raggiungere il livello di salvaguardia.
- **Mancata chiusura:** Una situazione in cui, contrariamente da quanto indicato dalle previsioni, il livello di salvaguardia in laguna è superato. In questo caso le barriere mobili non vengono chiuse.

## **Risultati e Discussione**

Per analizzare i risultati delle simulazioni sono si è preferito considerare tutti i 3 anni nel loro insieme, e non ciascuno di essi preso singolarmente, come nel precedente studio (Umgiesser e Matticchio, 2003). In questo modo, infatti, la statistica sugli eventi risulta senz'altro più robusta.

Le simulazioni sono state effettuate assumendo per il livello di salvaguardia la quota di + 100 cm, in accordo con le indicazioni riportate nel più volte citato documento del Magistrato alle Acque (1997). Le simulazioni sono state ripetute anche considerando un livello pari a 110 cm, per adeguarsi alle più recenti indicazioni in merito.

### ***Livello di salvaguardia a 100 cm***

#### **Superamento del livello a Punta Salute**

Il dato di maggiore interesse che si ottiene dai calcoli riguarda la frequenza in cui il livello di salvaguardia a Punta Salute è superato, nonostante la presenza delle paratoie mobili. Infatti, applicando la strategia di chiusura descritta nel documento del Magistrato alle Acque (1997), schematizzato come indicato in figura 1, e senza adottare un franco che tenga conto dell'incertezza della previsione, e nella situazione

attuale del livello medio del mare si contano 21 casi nei tre anni. La somma delle ore in cui il livello di salvaguardia è superato è pari a circa 35 (tabella 1).

Se si ipotizza una crescita del livello del mare pari a 30 cm, allora i casi in cui il livello di salvaguardia è superato salgono a 115, per un totale di 184 ore. Invece, se si considera la situazione peggiore, che consiste in un innalzamento di 50 cm nei prossimi 100 anni, allora il livello di salvaguardia risulta superato in 149 casi, per 357 ore complessive.

Come si vede, nelle ipotesi assunte, applicando la strategia di chiusura senza considerare un franco sulla previsione, alcuni casi (21) di superamento della quota di salvaguardia, si sarebbero verificati anche per la situazione attuale del livello medio del mare. La maggior parte di questi allagamenti sarebbe stata di minima entità (qualche centimetro sopra la soglia). Tuttavia, come è evidente in base alla figura 3, per alcuni di questi casi il superamento della soglia sarebbe stato più consistente. In due casi, infatti, il massimo livello calcolato supera i 110 cm (112 e 113 cm durante i periodi del 5-6.4.2000 e del 3.1.2001). In questi casi le paratoie non entrano in funzione a causa della errata previsione che non prevede il superamento del livello di salvaguardia (per esempio la previsione si ferma a 99 cm).

Nel caso in cui si consideri un innalzamento del livello marino pari a 30 cm si verificano 3 casi in cui il livello supera i 115 cm; nel caso in cui l'eustatismo sia pari a 50 cm si verificano 2 casi di superamento della quota 115 cm, e uno con più di 125 cm. È chiaro che in questo caso le procedure di chiusura non sono più adeguate e sarebbe necessaria una loro revisione.

Come accennato in precedenza, è stato simulato anche il caso in cui ai livelli previsti si aggiunga un franco di 10 cm per tener conto della possibilità che queste previsioni siano inferiori ai livelli veri. Ovviamente, in questo caso, il numero delle chiusure si incrementerà apprezzabilmente e, in particolare, il numero di false chiusure, cioè i casi in cui le paratoie vengono chiuse senza che si verifichi il superamento del livello di salvaguardia. I risultati relativi a questo caso sono raccolti nella tabella 2.

I risultati ottenuti mostrano che, adottando un franco di 10 cm sulla previsione, il superamento del livello di salvaguardia può essere evitato del tutto. Se, tuttavia, si ipotizza una crescita del livello marino, in alcuni casi tale superamento può verificarsi egualmente. Con una crescita di 30 cm, tale circostanza si verifica in 5 casi, per un

totale di 17 ore (un caso supera i 108 cm e uno, durante il 10.10.2002, arriva a 119 cm); con 50 cm di eustatismo, i casi di fallanza sono 20, per un totale di 100 ore (due casi superano i 110 cm).

### *Durata degli allarmi, delle chiusure e dei tempi di preavviso*

In questo caso si analizzano gli allarmi reali e quelli falsi, essendo questi ultimi quelli che portano a una situazione di pre-allerta ma non alla chiusura delle paratoie, perché, alla fine, il livello non raggiunge nemmeno la quota di chiusura. I risultati relativi a questi aspetti sono illustrati anch'essi nelle tabelle 1 e 2.

Nel caso in cui la previsione non sia incrementata con un franco, nella situazioni attuale si verificherebbero 48 casi di allarme (per una durata complessiva di 356 ore), di cui solo 3 falsi.

Assumendo una crescita del livello del mare di 30 cm il numero degli allarmi è pari a 540 per un totale di 4182 ore; nel caso di crescita di 50 cm gli allarmi divengono 1282 (11803 ore). È interessante notare come in questi due casi si verifica un unico falso allarme.

Se si applica alla previsione un franco di 10 cm, allora il numero di allarmi, nel loro complesso, cresce. Nella situazione attuale sono 127 casi di allarme con un totale di 842 ore). Di questi, 30 sono falsi allarmi che non portano a una chiusura delle barriere mobili. Con un eustatismo di 30 cm gli allarmi salgono a 917 casi (6922 ore) e con 50 cm essi diventano 1556, per un totale di 15085 ore. Anche in questo caso si nota che il numero dei falsi allarmi si riduce rispetto alla situazione attuale: con 30 cm i falsi allarmi sono 65, mentre con 50 cm essi si riducono a 35.

La distribuzione temporale degli allarmi è rappresentata graficamente nella figura 4. In figura 4a si possono vedere i 127 allarmi simulati nei tre anni 2000-2002. E' evidente come gli allarmi siano più frequenti verso la fine del 2000 e all'inizio del 2001 e verso la fine 2002. In figura 4b, sono invece evidenziati i 917 allarmi che caratterizzano la situazione con una crescita di 30 cm. Il grafico relativo al caso in cui si abbia una crescita di 50 cm non è significativo perché la situazione di allarme si estende praticamente a tutto il periodo considerato, e per tale ragione non è stato rappresentato.

Si deve ricordare, peraltro, che se il numero delle chiusure corrisponde al numero degli allarmi veri, le ore di chiusura sono inferiori a quelle degli allarmi veri, visto che fra annuncio dell'allarme e inizio della chiusura possono passare anche alcune ore.

Nel caso senza franco, nella situazione attuale si verificano 45 chiusure per un totale di 214 ore. Con una crescita del livello marino di 30 cm, le chiusure aumentano a 539 (2641 ore) e con una crescita di 50 cm esse salgono a 1282 (8216 ore). Applicando il franco di 10 cm le chiusure diventano 97 (376 ore) nella situazione attuale, 852 (3580 ore) con 30 cm di sovrizzo e 1521 (9319 ore) con 50 cm. Da notare, in quest'ultimo caso, che la durata delle chiusure supera un anno intero (8760 ore) ovvero più di un terzo del periodo preso in esame.

In figura 5a è riportata graficamente la distribuzione delle durate del preavviso, cioè dell'intervallo di tempo che intercorre fra l'allarme e l'inizio della chiusura. Si può osservare che, nella situazione attuale, la maggior parte dei casi è caratterizzata da un preavviso contenuto fra le 3 e le 4 ore, anche se per alcuni di essi il preavviso si riduce a pochi minuti. Questi ultimi sono i casi in cui si prevede il superamento del livello di salvaguardia con 4 ore di anticipo, ma a tale istante il livello a Punta Salute risulta già superiore a quello di chiusura. Questo può succedere quando, ad esempio a causa della pioggia e del vento, il livello di chiusura non è di 90 cm ma di 80, 70 o di 65 cm.

In figura 5b sono mostrati altresì i risultati ottenuti ipotizzando un innalzamento del livello marino di 30 cm. Anche in questo caso la maggior parte dei preavvisi ha durata compresa fra le 3 e le 4 ore. Una situazione analoga caratterizza anche il caso in cui la crescita prevista è di 50 cm.

### *Interruzione del transito delle navi*

L'indagine ha preso in esame anche la durata dei periodi in cui il transito delle navi è impedito dalle paratoie in azione. Ciò riguarda sia i periodi in cui le barriere sono effettivamente sollevate, sia quelli in cui è attivato lo stato di allarme in attesa del raggiungimento del livello di chiusura. Si è ipotizzato, infatti, che durante tutta la durata dell'allarme le navi non siano più autorizzate a transitare attraverso le bocche.

La durata dei periodi di transito impedito (e il numero di casi), è perciò identico alla durata degli allarmi totali (quelli veri e quelli falsi). Nel caso in cui si assuma un franco di 10 cm nella previsione, si ottengono 842 ore per la situazione attuale (3%

del totale), 6922 ore per una crescita del livello marino di 30 cm (26% del totale) e 15085 ore in caso di crescita di 50 cm (57% del totale). La figura 6a mostra la distribuzione dei periodi di transito impedito durante la giornata. Come si può vedere ci sono due massimi, uno più alto durante la mattinata e uno inferiore durante la sera. Ciò dipende dal fatto che il superamento del livello di salvaguardia è più frequente al mattino, e ciò si traduce in una maggiore interferenza con il traffico navale. Nella situazione attuale, complessivamente, si può concludere che le ore del giorno più penalizzate sono quelle del mattino, la penalizzazione massima si verifica al mattino (attorno alle ore 9) seguite da quelle della sera (attorno alle ore 21). Risulta quasi franco da penalizzazione il periodo del pomeriggio attorno alle ore 16.

Se si analizza, invece, la stessa distribuzione per il livello marino di più 30 cm, è interessante notare come i due massimi siano scambiati (figure 6b). La massima penalizzazione si verifica durante la sera, sempre attorno alle ore 21, e il periodo meno influenzato è quello durante il primo mattino (attorno alle ore 3). Ciò dipende, evidentemente, dalla diversa distribuzione dei casi critici che si ottiene al variare del livello medio del mare. In pratica, con l'innalzamento del livello del mare vengono ad essere conteggiati un gran numero di massimi di marea pomeridiani che invece, allo stato attuale, non superano il livello di salvaguardia, mentre l'incremento dei massimi mattutini risulta più contenuto.

Un'altra statistica interessante si può ottenere analizzando la distribuzione della durata dei periodi di transito impedito, cioè dei periodi di tempo in cui lo stato di allarme (vero o falso che sia) è attivo. In figura 7a è riportato, per tale parametro, il grafico relativo alla situazione attuale. Si può osservare che, nella maggior parte dei casi, il traffico navale risulta bloccato per 4 ore, ovvero per il tempo minimo di un allarme. Ciò è legato, evidentemente, alle modalità scelte per simulare la procedura di chiusura. Una volta che un allarme viene annunciato, esso viene mantenuto per un minimo di 4 ore, e solo se dopo non si verificano le condizioni per effettuare o prolungare la chiusura esso rientra.

Se si considera una crescita del livello marino di +30 cm, allora è la figura 7b che fa vedere la distribuzione della durata dei periodi in cui il traffico navale è impedito. Come si può vedere, la maggior parte dei casi ha tempi di transito impedito di durata superiore a 8 ore. E' evidente anche in questo caso che il minimo dei tempi di attesa è di 4 ore e che si verificano alcuni massimi isolati che corrispondono a durate pari ad

un numero intero di ore. Questo si può spiegare ricordando che la procedura adottata aggiorna la previsione ad ogni ora, e questo può portare a una nuova classificazione dell'evento in corso. Perciò, è molto probabile che dopo un'altra ora di attesa la previsione non indichi più un'acqua alta e l'allarme sia fatto rientrare.

Come ultima elaborazione si sono voluti incrociare i dati del traffico navale con le chiusure ipotetiche. In questa maniera è stato possibile valutare l'interferenza delle chiusure con il traffico navale. Il database disponibile del traffico navale si riferisce solo alle due bocche di Lido e Malamocco. Per ogni passaggio navale è noto il nome della nave, l'ora (con una accuratezza di 5 minuti), il verso (entrata o uscita), la bocca di porto. In questo caso sono stati presi in considerazione i dati relativi all'ora e alla bocca di porto impegnata. Si è trascurato anche il fatto che una nave impiega del tempo per il transito, e perciò un passaggio alle 15:30 in verità si prolunga per esempio dalle 15:20 alle 15:40. In questo modo la penalizzazione sul traffico navale è stata sottostimata, perché è, ovviamente, più probabile che una nave incorra nelle barriere chiuse durante un periodo di tempo prolungato per, ad esempio, 20 minuti invece che ad un istante preciso.

I passaggi totali noti delle navi durante i tre anni sono stati 30028, di cui 8636 al Lido e i restanti 21392 a Malamocco. Nella situazione attuale, con le chiusure ipotetiche delle barriere mobili, 1041 navi sarebbero state bloccate per tutte e due le bocche, 229 al Lido e 812 a Malamocco. Se invece si ipotizza un innalzamento del mare di 30 cm, allora l'interruzione avrebbe riguardato 9266 passaggi (2862 al Lido e 6404 a Malamocco); con un innalzamento di 50 cm i passaggi bloccati sarebbero stati in totale 19004, di cui 5871 al Lido e 13133 a Malamocco.

È interessante notare come le percentuali dei passaggi impediti rispetto a quelli totali siano quantitativamente confrontabili, anche se leggermente più alte, di quelle delle ore di allarme. I numeri sono riassunti in tabella 3. Nel caso della situazione attuale si osserva che gli allarmi sono 3.2% del tempo complessivo mentre i passaggi bloccati sono 3.5% del totale. Con 30 cm di innalzamento si trova il 26.3% del tempo occupato da allarmi e 30.9% di passaggi vietati; tali valori salgono a 57.4% per gli allarmi e 63.3% per il blocco dei passaggi ipotizzando una crescita di 50 cm.

Questo risultato si può spiegare se ci si riferisce alla distribuzione dei passaggi delle navi, ed è illustrato graficamente in Figura 8. Come si può osservare, la maggior parte

delle navi transita attraverso le bocche durante il mattino fra le 6 e le 10 e poi, con minore frequenza fra le 17 e le 20. Durante la notte e le prime ore del mattino i passaggi sono molto rari. Questa distribuzione dei transiti mostra un'elevata correlazione con la distribuzione dei tempi di transito impedito (figura 6). Ciò significa che la maggior parte delle navi attualmente transita attraverso le bocche quando la probabilità che si verifichi un evento di acqua alta è più elevata. Per questo motivo i passaggi vietati risultano percentualmente maggiori rispetto agli allarmi.

Le tabelle 4 e 5, a loro volta, riportano i risultati del calcolo per quel che concerne il numero di ore/nave in attesa, dovuto all'interruzione del traffico durante i periodi di allarme. Si osserva, nel caso senza il franco sulla previsione (Tabella 4), che le ore di attesa sono circa 1800 nella situazione attuale, circa 24000 in caso di eustatismo di 30 cm, e quasi 90000 per innalzamento del livello di 50 cm. Si tratta di durate ben superiori a quelle dei tempi di non transito indicati in Tabella 3, e ciò si riconduce al fatto che ogni chiusura (o allarme) interferisce con più di un passaggio (la tabella riporta anche il numero massimo di navi che sono fermate simultaneamente) e quindi i tempi di sosta vanno cumulati. Nel caso con il franco sulla previsione la durata dei tempi di attesa si incrementa apprezzabilmente (Tabella 5), essendo pari a quasi 4000 ore/nave già nella situazione attuale dei livelli marini.

### ***Livello di salvaguardia a 110 cm***

A completamento delle indagini si è anche analizzata la situazione in cui il livello di salvaguardia sia diverso da quello, pari a +100 cm, indicato in MAGISTRATO ALLE ACQUE, 1997. Questa necessità si è presentata dal momento che, allo stato attuale, la quota prevista di difesa del Centro Storico è fissata in +110 cm.

La procedura applicata è la medesima del caso precedente, ad eccezione del fatto che, come è ovvio, tutte le quote di chiusura sono state incrementate di 10 cm (ad esempio la quota di chiusura per gli eventi 1A passa da 90 cm a 100 cm).

In generale, i risultati dei calcoli indicano, ovviamente, una riduzione del numero delle chiusure, dato che in questo caso tutti i livelli di chiusura si alzano di 10 cm. Le Tabelle 6-8 illustrano nel dettaglio questa circostanza.

Come anche per il livello di salvaguardia di 100 cm, anche in questo caso si sono esaminate due situazioni, con e senza il franco di 10 cm sulla previsione di marea.

Sebbene il numero delle chiusure si riduca, lo stesso non accade per il numero delle ore in cui il livello di salvaguardia risulta superato. Ad esempio, nel caso di un innalzamento del livello del mare di 50 cm, si verificano 385.6 ore (194 casi) in cui il livello di salvaguardia viene superato. Anche applicando il franco di 10 cm, le cifre sono molto simili a quelle con il livello di salvaguardia di 100 cm. Questo fatto è un po' sorprendente, visto che in totale ci sono meno eventi che superano il livello di salvaguardia. Tutte le cifre si possono trovare nelle Tabelle 6 e 7. La riduzione delle ore di allarme sono più evidenti nel caso senza franco, dove si passa da 356 ore di allarme a 123 ore nel caso di livello di salvaguardia a 110 cm. Con il franco di 10 cm, le ore di allarme passano da 842 a 329.

Allo stesso modo le ore di chiusura vera passano, nel caso in cui non c'è franco, da 214 a 71, e, nel caso dell'applicazione di un franco di 10 cm, da 376 a 152 ore. Nelle stesse tabelle sono riportati i risultati relativi alle situazioni con innalzamento del livello marino.

Per quanto concerne i passaggi delle navi, elevando a 110 cm il livello di salvaguardia, il numero dei passaggi impediti scende da 1041 a 421 nel caso attuale. Con un eustatismo di 30 cm i passaggi impediti si portano a 5014 (erano 9266), mentre con + 50 cm si registrano 14236 passaggi bloccati (invece di 19004 quando il livello di salvaguardia era a 100 cm). Come già nel caso precedente, i passaggi impediti percentualmente sono superiori rispetto ai tempi di non transito. Anche in questo caso, tale circostanza dipende dal fatto che i passaggi delle navi tendono a coincidere con i periodi in cui è più alta la probabilità che si verifichi un evento di acqua alta.

Il calcolo delle durate, in termini di ore/nave, dei periodi in cui le navi devono sostare per attendere il cessato allarme, porta a valori inferiori al caso precedente (Tabelle 9 e 10). Nel caso della situazione attuale, ad esempio, le ore/nave in attesa sono meno di 700, se non si adotta il franco di 10 cm sulla previsione, e circa 1600 in caso contrario.

Anche se i calcoli non aggiungono niente di nuovo dal punto di vista della distribuzione degli allarmi (a parte le differenze numeriche evidenziate nelle tabelle), è comunque interessante analizzare i casi in cui il livello di salvaguardia viene

superato. Il superamento del livello di 110 cm è da considerarsi, infatti, un evento notevolmente critico.

In base al calcolo, nel caso in cui si applichi un franco di 10 cm alla previsione, nella situazione attuale, si verificano solo 2 superamenti, entrambi per pochi cm. Ma nel caso di crescita del livello marino di 30 cm, si registrano 8 eventi in cui il livello di salvaguardia è superato, uno dei quali con un massimo di 128 cm. Nel caso di crescita di 50 cm, si riscontrano due casi, tra i 16 che eccedono il livello di salvaguardia di 110 cm, in cui sono superati i 120 cm (123 e 125 cm).

Ancora più interessante è il caso in cui non sia applicato alla previsione un franco di 10 cm. In questo caso si verificano, nella situazione attuale, 11 eventi in cui la soglia di 110 cm è superata. Due di questi casi superano i 120 cm, e uno di questi due raggiunge i 144 cm. Questo caso è particolare e si riferisce all'evento del novembre 2000 in cui si è verificato il livello di 144 cm. Questo fu un evento molto particolare e fuori della norma, per il quale la previsione non ha funzionato a dovere. Il massimo della previsione è stato, infatti, di 105 cm, e mentre il livello stava salendo oltre i 120 cm la previsione addirittura stava scendendo al di sotto di 100 cm. Questa situazione non è emersa tra i casi considerati finora. Con un livello di salvaguardia a 100 cm, la chiusura delle paratoie avviene puntualmente (forse leggermente in ritardo) perché l'allarme risulta comunque attivato. Lo stesso accade con il livello di salvaguardia di 110 cm e un franco di 10 cm (che porta la previsione a 115 cm). Ma nel caso in cui il livello di salvaguardia è fissato in 110 cm senza franco di previsione, l'allarme non viene attivato, e le barriere sono lasciate aperte.

Nel caso di un eustatismo di 30 cm si verificano 71 eventi che superano il livello di 110 cm, e fra questi 3 superano i 120 cm, di cui uno raggiunge i 128 cm. Infine, con un innalzamento di 50 cm si verificano in totale 194 casi in cui il livello di 110 cm risulta superato. Di questi casi, 10 avrebbero superato 120 cm, con il massimo che avrebbe raggiunto 140 cm durante l'evento del 10 ottobre 2002 con una durata di più di 6 ore.

E' interessante, infine, valutare quanto frequentemente possa accadere, nel caso in cui il livello di salvaguardia sia fissato in 110 cm, che si verifichi il superamento di quote inferiori ma sufficienti ad allagare alcune aree cittadine. Tale circostanza è rilevante dal momento che, come è noto, esistono zone del Centro Storico, come ad esempio

Piazza San Marco, che sono allagate già per maree dell'ordine di 80 cm, ed è evidente che, fissando il livello di protezione a 110, tali allagamenti potrebbero essere evitati solo parzialmente. Dalla Tabella 11, ad esempio, si evince che il numero di volte in cui il livello 100 (che corrisponde alla cosiddetta quota di salvaguardia di Piazza San Marco) sarebbe superato è pari a 59 nella situazione attuale (circa 120 ore), a 686 (circa 1300 ore) in quella che assume 30 cm di eustatismo, e a quasi 2000 (quasi 4500 ore) in caso di eustatismo di 50 cm. I risultati non si modificano di molto considerando un franco di 10 cm sulla previsione anche se, come è logico attendersi, i suddetti valori si riducono.

Come accennato precedentemente, nel caso di un livello di salvaguardia di 110 è oltremodo importante evitare il superamento di tale livello. In base ai calcoli effettuati, risulta in definitiva che ciò non sempre è garantito dalla procedura di chiusura e dall'affidabilità attualmente raggiunta dalla previsione dell'acqua alta.

A titolo di esempio si vuole infine illustrare come si svolge la procedura di chiusura in un caso reale. A tale scopo è stato considerato l'evento del 16 novembre 2002, che rappresenta un caso particolarmente gravoso essendosi raggiunto il livello di 141 cm. La Tabella 12 si riferisce alla simulazione con livello di salvaguardia 110 cm adottando il franco di 10 cm sulla previsione. La durata dell'evento è di 21 ore, dalle 2 del mattino, in cui scatta il primo allarme, fino alle ore 23, quando l'allarme rientra definitivamente. Durante questo periodo lo stato di allarme, in realtà, si interrompe, ma la bocca di Lido non viene aperta per il livello sostenuto in laguna. A questo punto sopraggiunge un secondo allarme e il traffico navale viene nuovamente bloccato.

Le navi che vengono bloccate sono elencate in Tabella 13 (Malamocco) e 14 (Lido). Si può notare che (specialmente per Lido) alcune navi bloccate in mattinata in arrivo, risultano anche bloccate al pomeriggio in partenza. In questo caso, in cui un evento dura tutta una giornata, il calcolo porta perciò ad una sovrastima delle ore di sospensione del traffico.

## **Conclusioni**

In questo lavoro si è voluto indagare sulla frequenza e sulla durata delle chiusure delle barriere mobili (MOSE) previste sulle bocche della laguna di Venezia, e sull'effetto dell'innalzamento del livello del mare indicato dalle più recenti stime climatologiche

sulla funzionalità delle barriere stesse. E' stata analizzata, inoltre, l'interferenza delle chiusure con la navigazione, considerando la situazione attuale del traffico marittimo.

Sono stati presi in esame tre anni, dal 2000 al 2002. Per questi tre anni è stato simulato l'andamento del livello d'acqua nella laguna, ipotizzando le manovre di chiusura delle barriere secondo la procedura prevista nel progetto di massima. Le simulazioni non tengono conto del moto ondoso e del suo effetto sul superamento della quota di salvaguardia. Tale quota è stata fissata in 100 cm in accordo con quanto riportato nello studio del MAGISTRATO ALLE ACQUE, 1997, in cui è descritta la procedura di chiusura. Le simulazioni, peraltro, sono state ripetute anche considerando la quota di salvaguardia di 110 cm.

Considerando la quota di salvaguardia pari a 100 cm, i risultati indicano che, nei tre anni considerati, il MOSE avrebbe protetto efficacemente la città di Venezia dall'acqua alta, se la previsione del livello di marea fosse stata incrementata con un franco di 10 cm per compensare le incertezze nella previsione. In tali ipotesi non si sarebbe verificato nessun caso di superamento del livello di salvaguardia. Senza adottare tale franco, tuttavia, si sarebbero verificati 21 casi di allagamento, la maggior parte di pochi centimetri, ma in due casi la marea avrebbe raggiunto 112 e 113 centimetri.

La situazione è diversa se ci si riferisce a scenari che prevedono un innalzamento del livello medio marino. Con un innalzamento di 30 cm dai calcoli risultano, pur considerando un franco di 10 cm sulla previsione, 5 casi in cui si sarebbero superati i 100 cm. Particolarmente grave è un caso nel 2002 in cui si sarebbero raggiunti i 119 cm a Punta Salute. Con un innalzamento di 50 cm dai calcoli risultano 20 casi di acqua alta. La procedura di chiusura seguita non è perciò risultata adeguata per evitare l'acqua alta a Venezia.

È evidente, inoltre, che la durata delle chiusure delle paratoie, quasi trascurabile nella situazione attuale, aumenta sensibilmente quando si ipotizzi un innalzamento del livello marino. Ipotizzando una crescita del livello medio mare di 50 cm, nei tre anni le ore di chiusura totali sarebbero state 9319 (35.5%).

Il traffico navale risulta penalizzato in particolare dalla necessità di dover mettere in allarme le barriere più frequentemente del necessario a causa del franco assunto sulla previsione. Si è visto così che le chiusure non consentirebbero il transito a circa il

3.5% del traffico navale nelle condizioni attuali. Ipotizzando l'eustatismo la situazione peggiora fino a che quasi i 2/3 del traffico navale risulta bloccato considerando un innalzamento del livello marino di 50 cm.

Con riferimento, infine, alle simulazioni effettuate fissando in 110 cm il livello di salvaguardia, i calcoli indicano che il numero delle chiusure, com'è ovvio, si riduce rispetto al caso precedente. La riduzione della durata complessiva delle chiusure, peraltro, è relativamente modesta. Permangono, inoltre, numerosi casi in cui il livello di salvaguardia risulta superato, e ciò è da ricondursi prevalentemente, anche in questo caso, agli errori della previsione della marea.

La procedura si è dimostrata in alcuni casi poco chiara. In particolare non è chiaro come si debba procedere nel caso di situazioni particolari in cui si susseguano più eventi di acqua alta, o nel caso in cui, soprattutto per effetto del vento, la distribuzione dei livelli in laguna sia disuniforme, e caratterizzi le condizioni di "acqua alta" in modo assai diverso tra una bocca e l'altra. Inoltre, incertezze sussistono su quale sia la durata minima dell'allarme rispetto all'inizio della chiusura, con riferimento all'interferenza con la navigazione. Si può aggiungere che le durate calcolate per le chiusure, nei casi in cui si abbia un incremento del livello del mare, sono destinate ad incrementarsi se si volesse adeguare la classificazione degli eventi estremi rispetto a tali scenari. In questo caso le chiusure dovrebbero, infatti, iniziare a livelli più bassi per evitare il superamento del livello di salvaguardia. Nel presente studio, in mancanza di altre indicazioni, la classificazione degli eventi è stata mantenuta la medesima della situazione attuale. Se si renderanno disponibili nuove indicazioni a questo riguardo, sarà possibile ripetere i calcoli per vedere gli effetti sui parametri indagati.

## **Ringraziamenti**

Si desiderano ringraziare l'Ing. Afro Massaro, il Prof. Alberto Tomasin e il Dr. Paolo Pirazzoli per utili informazioni rese disponibili durante la preparazione della presente nota. Si ringrazia infine l'Ing. Paolo Canestrelli e i suoi collaboratori per i dati forniti per questo studio.

## Bibliografia

- BRAS R. L., HARLEMAN D. R. F., RINALDO A. e RIZZOLI P., 2002. Obsolete? No. Necessary? Yes. The gates will save Venice. *Eos*, 83 (20), pp. 217-224.
- CANESTRELLI P., 1999. Il sistema statistico del Comune di Venezia per la previsione del livello della marea in città. Risultati teorici e in fase operativa. Centro Previsioni e Segnalazioni maree, Venezia, pp. 17, 10 fig.
- COLLEGIO DI ESPERTI DI LIVELLO INTERNAZIONALE, 1998. Report on the mobile gates project for the tidal flow regulation at the Venice lagoon inlets. June, pp. 48.
- DAZZI R., ROSSI G., RUSCONI A., e TOMASIN A., 1984. Meteorologia e laguna: l'ammonimento delle più recenti bufere per l'efficacia degli interventi di difesa. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Rapporti e Studi, vol. X, pp. 103-127.
- IPCC, 1990. *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 365.
- IPCC, 1995. *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 572.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001 – The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 881.
- MAGISTRATO ALLE ACQUE, 1997. Interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea – Studio di impatto ambientale del progetto di massima, Allegato 6, Tema 5, pp. 163.
- PIRAZZOLI P. A., 2002. Did the Italian government approve an obsolete project to save Venice? *Eos*, 83 (20), pp. 217-223.
- PIRAZZOLI P. A., e UMGIESSER G., 2003. E se il progetto “MOSE” fosse già obsoleto?, Technical Report ISDGM-CNR 256, pp. 21.
- UMGIESSER G. e BERGAMASCO A. 1993. A staggered grid finite element model of the Venice Lagoon. In: K.Morgan, E. Ofiate, J. Periaux, & O. C. Zienkiewicz, eds, *Finite Elements in Fluids*. Pineridge Press.

- UMGIESSER G. e BERGAMASCO A., 1995. Outline of a primitive equation finite element model. Rapporto e Studi, XII, Istituto Veneto S.L.A., Venezia, pp. 291-320.
- UMGIESSER G., 1997. Modelling the Venice Lagoon. International Journal of Salt Lake Research 6: pp. 175-199, Kluwer Academic Publishers. (The Netherlands).
- UMGIESSER G., 1999. Valutazione degli effetti degli interventi morbidi e diffusi sulla riduzione delle punte di marea a Venezia, Chioggia e Burano. Atti Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, 157, pp. 231-286.
- UMGIESSER G., 2000. Modeling residual currents in the Venice Lagoon, in Interactions between estuaries, coastal seas and shelf seas, Ed. T. Yanagi, pp. 107-124.
- UMGIESSER G. e Matticchio B., 2000. Simulazione delle chiusure delle barriere mobili per gli anni 2000 e 2001 con un innalzamento del livello marino. Rapporto per il Comune di Venezia, pp. 29.
- ZECCHETTO S., UMGIESSER G. e BROCCINI M., 1997. Hindcast of a storm surge induced by local real wind fields in the Venice lagoon. Continental Shelf Research, 17 (12), pp. 1513-1538.

## Tabelle

	innalzamento 0 cm		innalzamento 30 cm		innalzamento 50 cm	
	ore	numero	ore	numero	ore	numero
Superamento livello di salvaguardia	34.75	21	183.92	115	356.75	149
Allarmi	355.58	48	4182.25	540	11803.5	1282
Allarmi veri	340.58	45	4177.25	539	11803.5	1282
Allarmi falsi	15	3	5	1	0	0
Tempi non transito	355.58	48	4182.25	540	11803.5	1282
Chiusure	213.75	45	2641.5	539	8216.33	1282

Tabella 1: Statistiche per la simulazione con livello di salvaguardia pari a 100 cm senza franco per la previsione.

	innalzamento 0 cm		innalzamento 30 cm		innalzamento 50 cm	
	ore	numero	ore	numero	ore	numero
Superamento livello di salvaguardia	0	0	17.42	5	99.83	20
Allarmi	842.42	127	6921.75	917	15084.75	1556
Allarmi veri	703.42	97	6629.75	852	14915.75	1521
Allarmi falsi	139	30	292	65	169	35
Tempi non transito	842.42	127	6921.75	917	15084.75	1556
Chiusure	375.58	97	3558.58	852	9319.42	1521

Tabella 2: Statistiche per la simulazione con livello di salvaguardia pari a 100 cm con franco di 10 cm per la previsione.

	Passaggi impediti		Tempi non transito	
	numero	percentuale	ore	percentuale
innalzamento 0 cm	1041	3.5	842	3.2
innalzamento 30 cm	9266	30.9	6922	26.3
innalzamento 50 cm	19004	63.3	15085	57.4

Tabella 3: Statistiche per i passaggi impediti e i tempi di non transito con livello di salvaguardia pari a 100 cm. Le percentuali sono state calcolate su un totale di 30028 passaggi e tre anni (26280 ore)

		totale	Lido Malamocco	
attuale	ore/nave in attesa	1798	363	1435
	max navi simultanee	22	7	16
innalzamento 30 cm	ore/nave in attesa	24382	7240	17142
	max navi simultanee	33	13	27
innalzamento 50 cm	ore/nave in attesa	88528	26405	62123
	max navi simultanee	85	20	72

Tabella 4: Tempi di attesa (ore/nave) e massimo numero di navi simultaneamente in attesa con livello di salvaguardia pari a 100 cm ed applicando la procedura senza franco sulla previsione.

		totale	Lido Malamocco	
attuale	ore/nave in attesa	3882	880	3002
	max navi simultanee	23	7	22
innalzamento 30 cm	ore/nave in attesa	40390	12544	27846
	max navi simultanee	45	15	37
innalzamento 50 cm	ore/nave in attesa	119475	35227	84248
	max navi simultanee	85	24	72

Tabella 5: Tempi di attesa (ore/nave) e massimo numero di navi simultaneamente in attesa con livello di salvaguardia pari a 100 cm ed applicando la procedura con franco di 10 cm sulla previsione.

	innalzamento 0 cm		innalzamento 30 cm		innalzamento 50 cm	
	ore	numero	ore	numero	ore	numero
Superamento livello di salvaguardia	23.92	11	116.50	71	385.58	194
Allarmi	123.17	18	1861.92	252	7101.25	853
Allarmi veri	110.17	15	1844.92	248	7101.25	853
Allarmi falsi	13	3	17	4	0	0
Tempi non transito	123.17	18	1861.92	252	7101.25	853
Chiusure	71.42	15	1164.58	248	4777.50	853

Tabella 6: Statistiche per la simulazione con livello di salvaguardia pari a 110 cm senza franco per la previsione.

	innalzamento 0 cm		innalzamento 30 cm		innalzamento 50 cm	
	ore	numero	ore	numero	ore	numero
Superamento livello di salvaguardia	2.58	2	15.67	8	75.25	16
Allarmi	329.50	48	3801.17	548	10863.33	1307
Allarmi veri	272.50	36	3552.17	492	10636.33	1257
Allarmi falsi	57	12	249	56	227	50
Tempi non transito	329.50	48	3801.17	548	10863.33	1307
Chiusure	152.00	36	1780.58	492	6092.92	1257

Tabella 7: Statistiche per la simulazione con livello di salvaguardia pari a 110 cm con franco di 10 cm per la previsione.

	Passaggi impediti		Tempi non transito	
	numero	percentuale	ore	percentuale
innalzamento 0 cm	421	1.4	329	1.3
innalzamento 30 cm	5014	16.7	3801	14.5
innalzamento 50 cm	14236	47.4	10863	41.3

Tabella 8: Statistiche per i passaggi impediti e i tempi di non transito con livello di salvaguardia pari a 110 cm e franco di 10 cm sulla previsione. Le percentuali sono state calcolate su un totale di 30028 passaggi in tre anni (26280 ore).

		totale	Lido Malamocco	
attuale	ore/nave in attesa	689	153	536
	max navi simultanee	21	6	15
innalzamento 30 cm	ore/nave in attesa	9460	2544	6915
	max navi simultanee	26	10	24
innalzamento 50 cm	ore/nave in attesa	45656	13849	31808
	max navi simultanee	48	13	42

Tabella 9: Tempi di attesa (ore/nave) e massimo numero di navi simultaneamente in attesa con livello di salvaguardia pari a 110 cm ed applicando la procedura senza franco per la previsione.

		totale	Lido Malamocco	
attuale	ore/nave in attesa	1593	327	1266
	max navi simultanee	22	6	16
innalzamento 30 cm	ore/nave in attesa	19925	6123	13802
	max navi simultanee	33	12	26
innalzamento 50 cm	ore/nave in attesa	72177	22036	50141
	max navi simultanee	78	20	70

Tabella 10: Tempi di attesa (ore/nave) e massimo numero di navi simultaneamente in attesa con livello di salvaguardia pari a 110 cm ed applicando la procedura con franco di 10 cm sulla previsione.

	franco=0		franco=10 cm	
	ore	casi	ore	casi
attuale	119.33	59	82.5	59
innalzamento 30 cm	1353.58	686	1006.08	712
innalzamento 50 cm	4482.33	1951	3850.17	2097

Tabella 11: Ore di superamento della quota 100 cm (quota di salvaguardia di Piazza San Marco) avendo fissato il livello di salvaguardia a 110 cm.

ora	allarme	bocche chiuse	PS previsione	PS calcolato	DSL (dentro)	DSL (fuori)	Livello chiusura	commento
02:00	1A	0	114	61	62	62	100	inizio allarme
05:20	1A	3	141	103	110	111	100	inizio chiusura
11:55	1A	3	89	105	101	106	100	cessato allarme
12:00	-	3	92	105	101	105	999	bocche chiuse
12:25	-	2	92	105	101	101	999	Chioggia aperto
12:45	-	1	92	105	97	97	999	Malamocco aperto
14:00	1AV	1	116	98	85	85	80	nuovo allarme
15:30	1AV	2	126	96	94	94	80	Malamocco chiuso
16:15	1AV	3	132	97	97	98	80	Chioggia chiuso
19:00	1A	3	112	96	98	123	100	cambio allarme
21:20	1A	2	69	97	98	97	100	Chioggia aperto
21:35	1A	1	69	96	91	91	100	Malamocco aperto
21:45	1A	0	69	95	86	86	100	Lido aperto
22:55	1A	0	54	82	73	73	100	cessato allarme
23:00	-	0	54	81	72	72	999	apertura per navi

Tabella 12: Esempio del 16 novembre 2002 con chiusura prolungata. Le colonne mostrano il tipo di allarme, il numero totale delle bocche chiuse, il livello a Punta Salute (PS) previsto (a 4 ore) e calcolato, il livello a Diga Sud Lido (DSL) dentro e fuori la laguna (che è diverso a causa della chiusura delle barriere mobili) e il livello di chiusura (999 indica nessuna chiusura prevista). Il livello massimo a Diga Sud Lido di questo evento è stato di 141 cm al mattino e di 123 cm durante al pomeriggio.

ora	Direzione	nave (pescaggio in piedi)
06:10	arrivo	GERDIA (21)
06:15	arrivo	KAPITAN VASILYEV (14)
09:45	partenza	MERIOM HOPE (23)
09:50	partenza	CALITEA (18)
09:55	partenza	RUBY STAR (22)
10:20	partenza	MONT BLANC (25_4)
10:40	arrivo	CIELOTRAILER (24)
10:45	arrivo	VALPADANA (28_9)
14:10	partenza	SONG (20)
14:25	partenza	GERDIA (21)
15:00	arrivo	ZIM ITALIA (27)
15:15	arrivo	CAPO NOLI (29)
18:15	partenza	SKANDERBORG (17)
20:50	partenza	CIELOTRAILER (24)
22:00	partenza	TINSDAL (15_10)
22:30	partenza	MSC MICHELE (26_3)

Tabella 13: Navi in arrivo e partenza a Malamocco durante il 16 novembre 2002. Le navi GERDIA e CIELOTRAILER sono sia in arrivo che in partenza durante lo stesso periodo.

ora	Direzione	nave (pescaggio in piedi)
06:40	arrivo	IKARUS PALACE (20_8)
07:10	arrivo	THE AZUR (22)
07:30	arrivo	BLUE HORIZON (21)
12:55	partenza	BLUE HORIZON (22_4)
16:05	partenza	IKARUS PALACE (20_8)
17:00	partenza	THE AZUR (22)

Tabella 14: Navi in arrivo e partenza al Lido durante il 16 novembre 2002. Tutte e tre le navi sono sia in arrivo che in partenza durante lo stesso periodo.

Figure

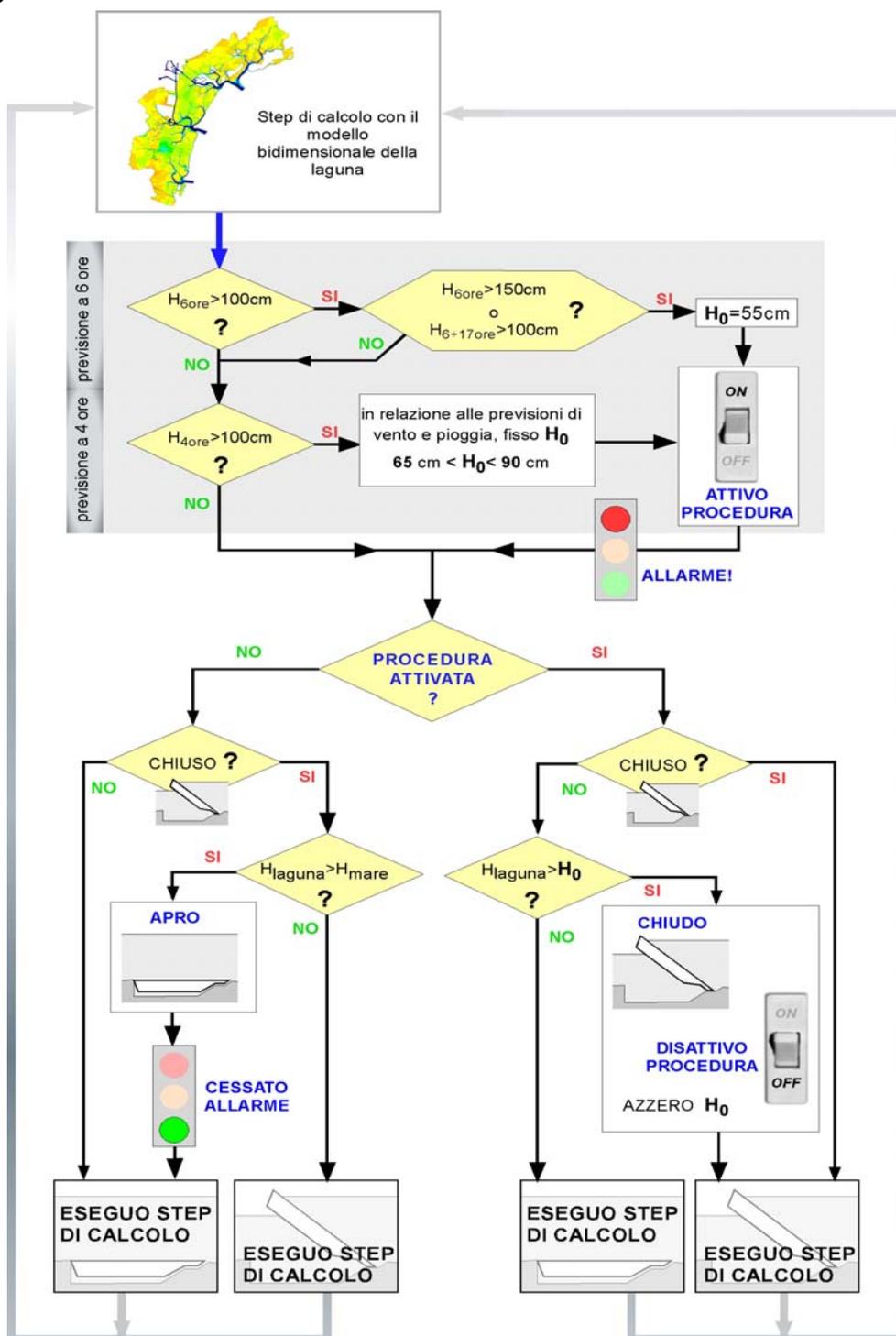


Figura 1: Schema logico adottato per implementare la procedura di chiusura delle paratoie mobili descritta in [MAGISTRATO ALLE ACQUE, 1997]. Legenda:  $H_0$ =livello di inizio manovra di chiusura;  $H_{Nore}$ =previsione del superamento del livello di salvaguardia con  $N$  ore di anticipo. In figura il livello di salvaguardia è pari a 100 cm. Le simulazioni sono state ripetute anche per livello pari a 110 cm.

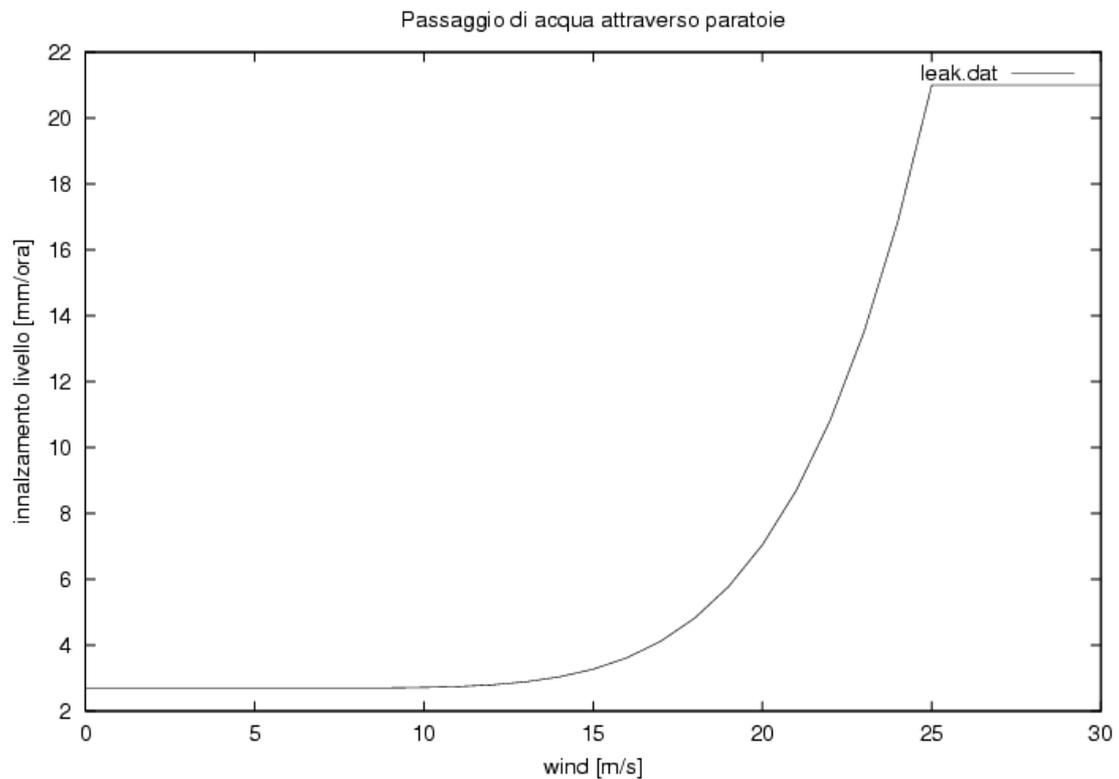


Figura 2: Calcolo dell'innalzamento del livello d'acqua in laguna a paratoie chiuse dovuto al passaggio d'acqua attraverso i traferri. Si ipotizza che le oscillazioni delle paratoie dipendano dalla velocità del vento. Il minimo di 2.7 mm/ora si verifica a paratoie ferme, e il massimo di 21 mm/ora per le massime oscillazioni prevedibili, che corrispondono a velocità del vento superiori a 25 m/s.

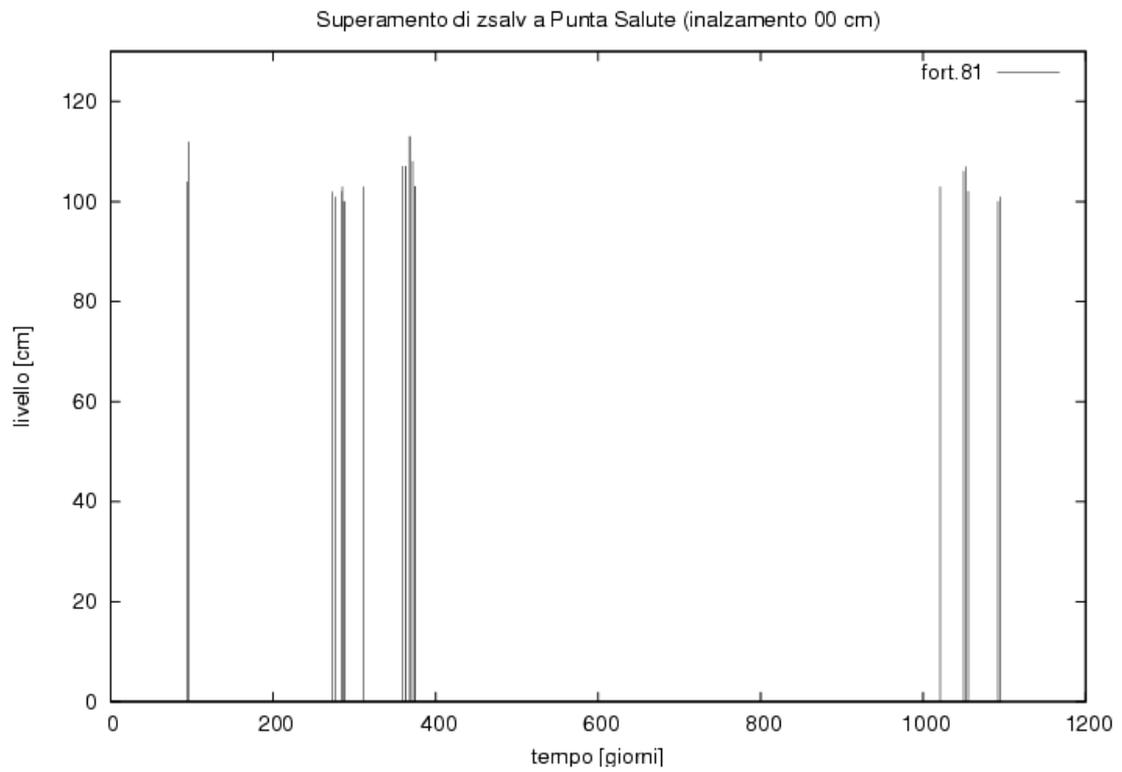


Figura 3: Superamento del livello di salvaguardia (fissato pari a 100 cm) nella situazione attuale del livello medio del mare e con le barriere mobili in funzione.

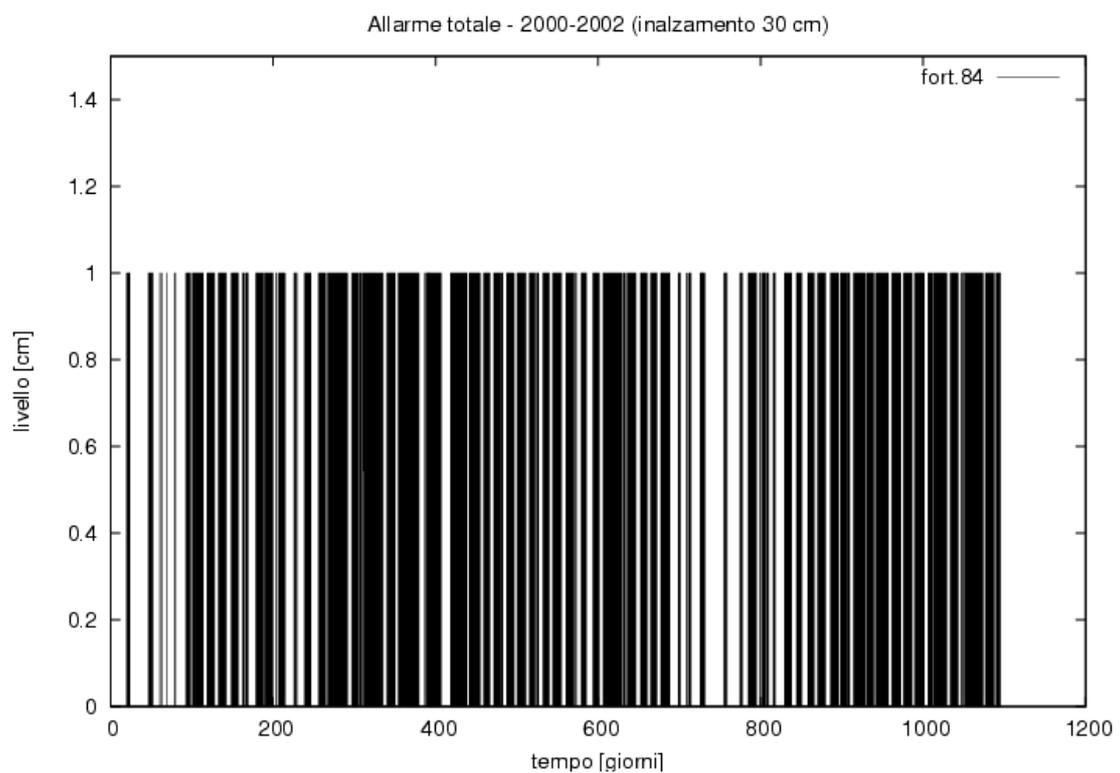
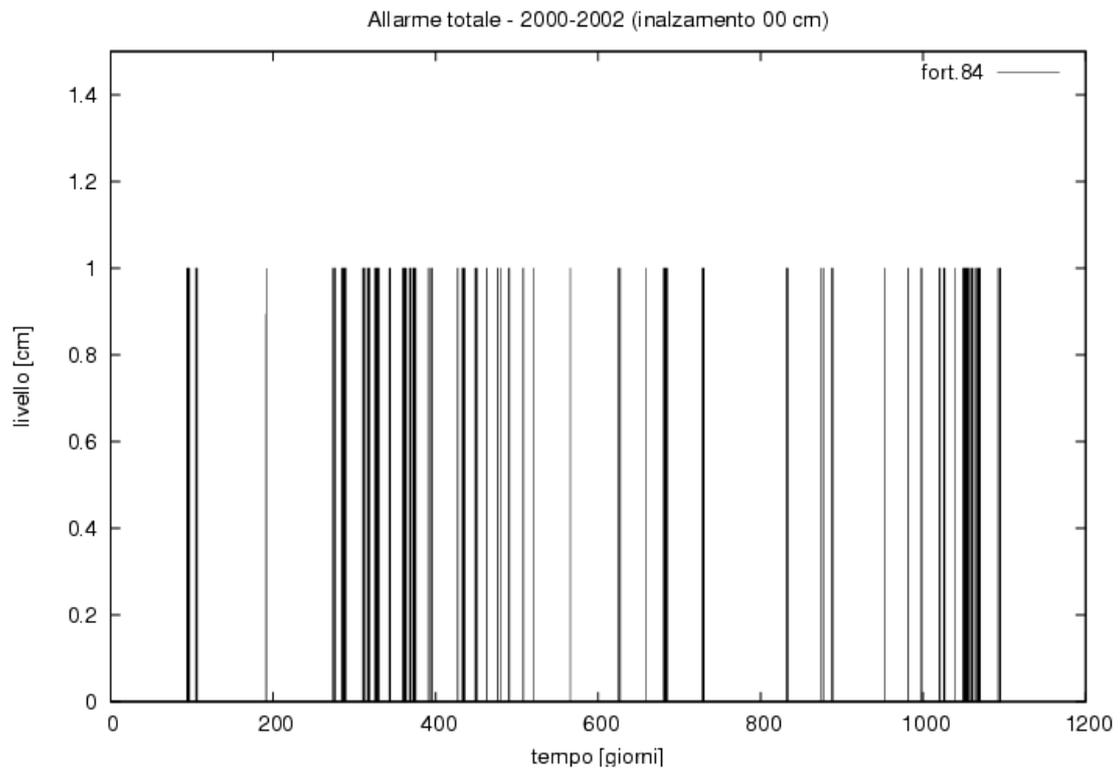


Figura 4: Distribuzione degli allarmi considerando il franco sulle previsioni. Situazione attuale (a, sopra) e con crescita di 30 cm del livello marino (b, sotto).

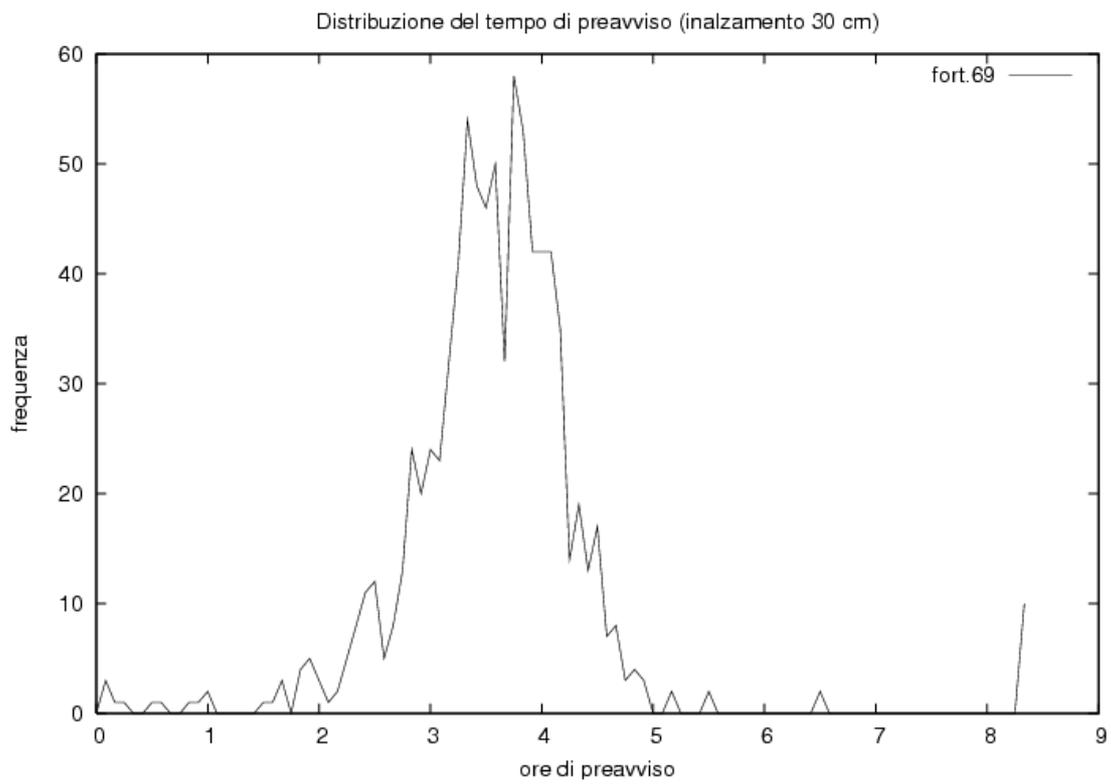
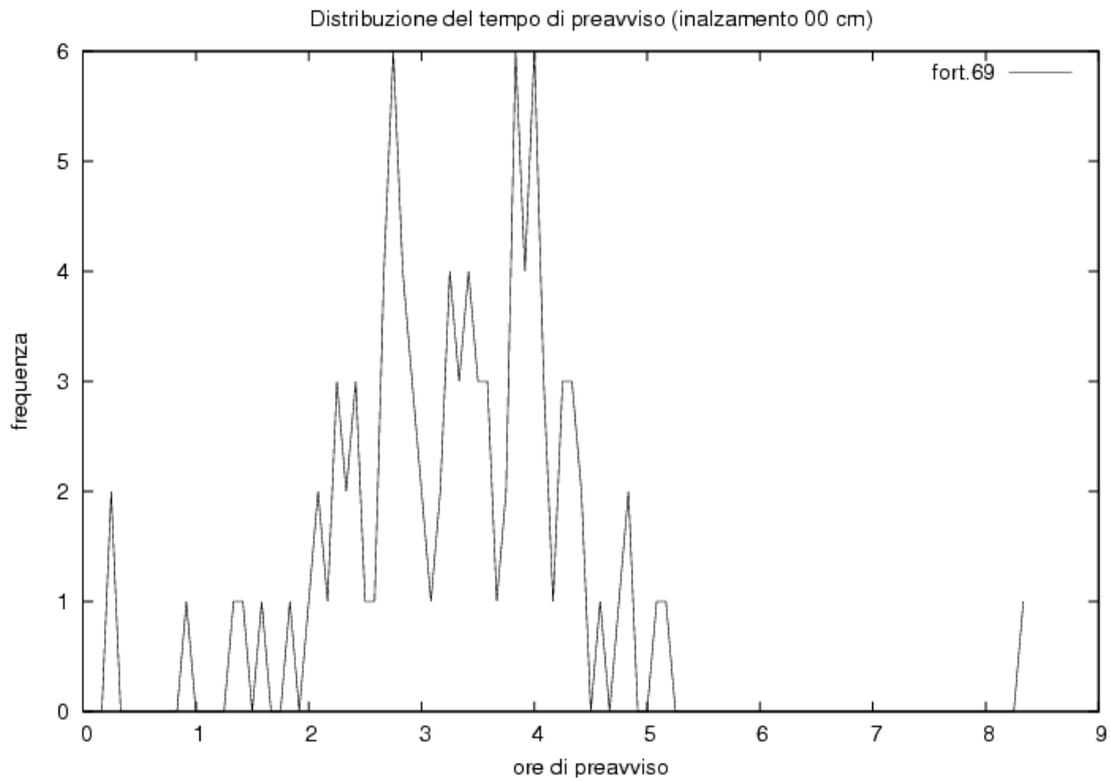


Figura 5: Distribuzione dei tempi di preavviso. Sopra (a) situazione attuale e sotto (b) con crescita di 30 cm.

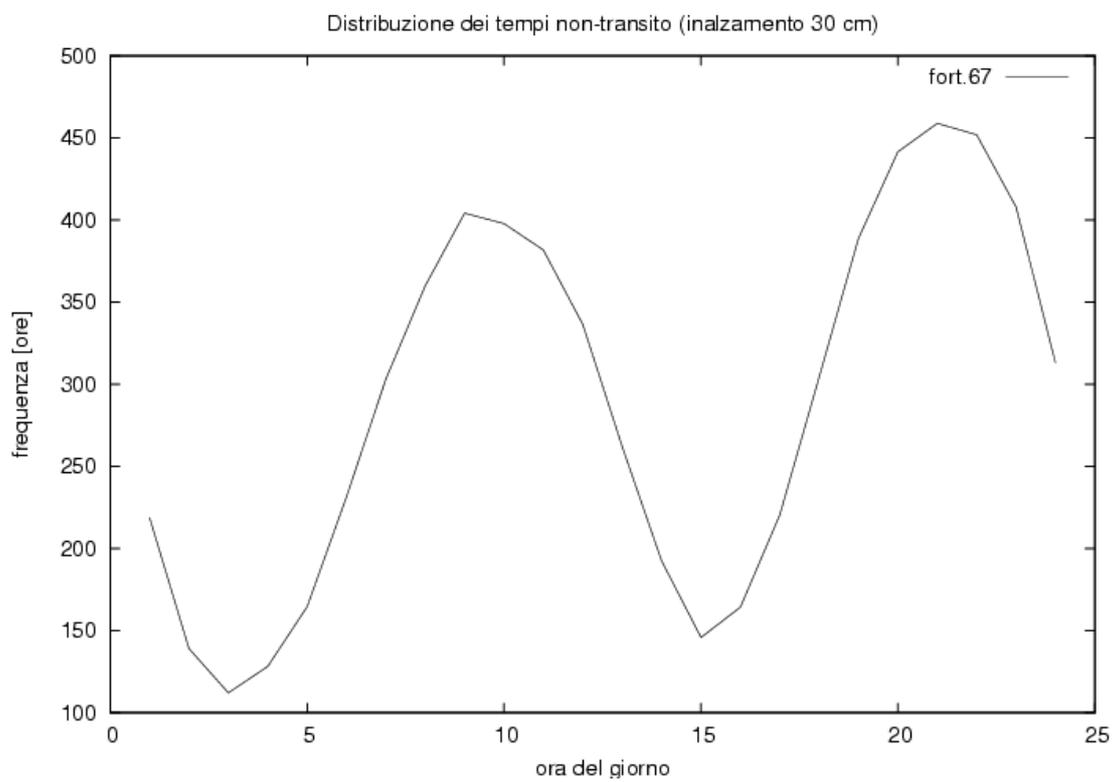
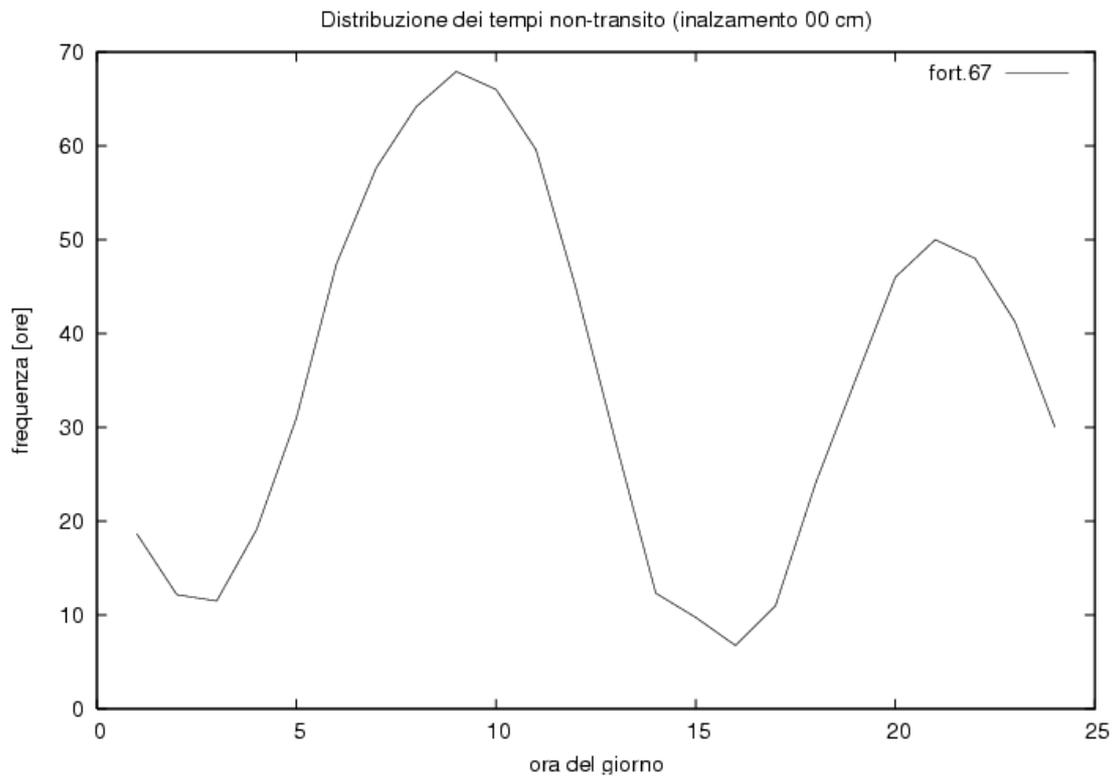


Figura 6: Distribuzione dei tempi di non transito durante la giornata. Sopra (a) situazione attuale e sotto (b) con crescita di 30 cm.

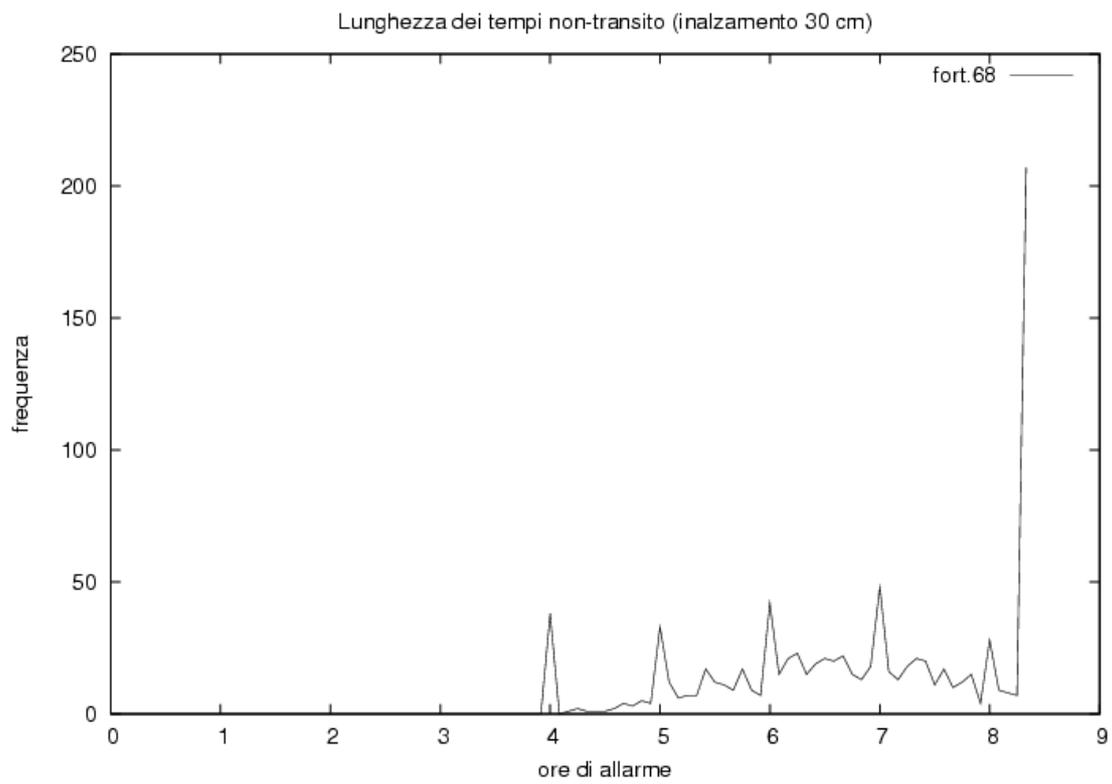
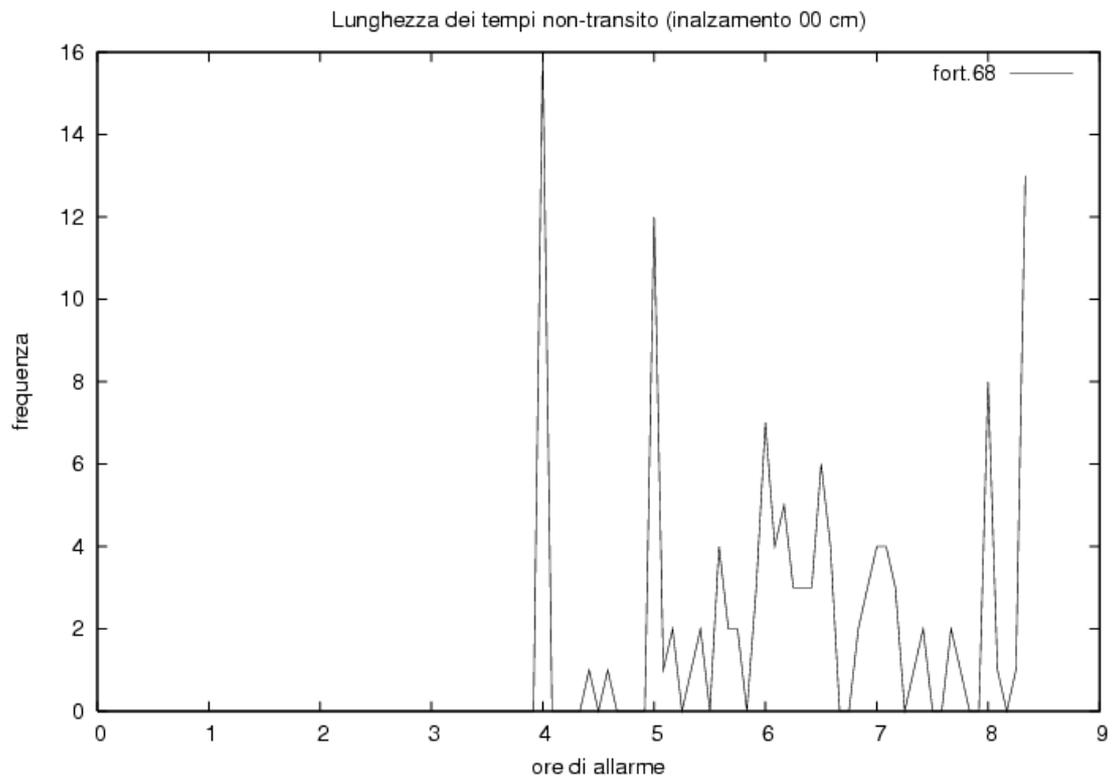


Figura 7: Distribuzione della durata dei tempi di non transito. Sopra (a) situazione attuale e sotto (b) con crescita di 30 cm.

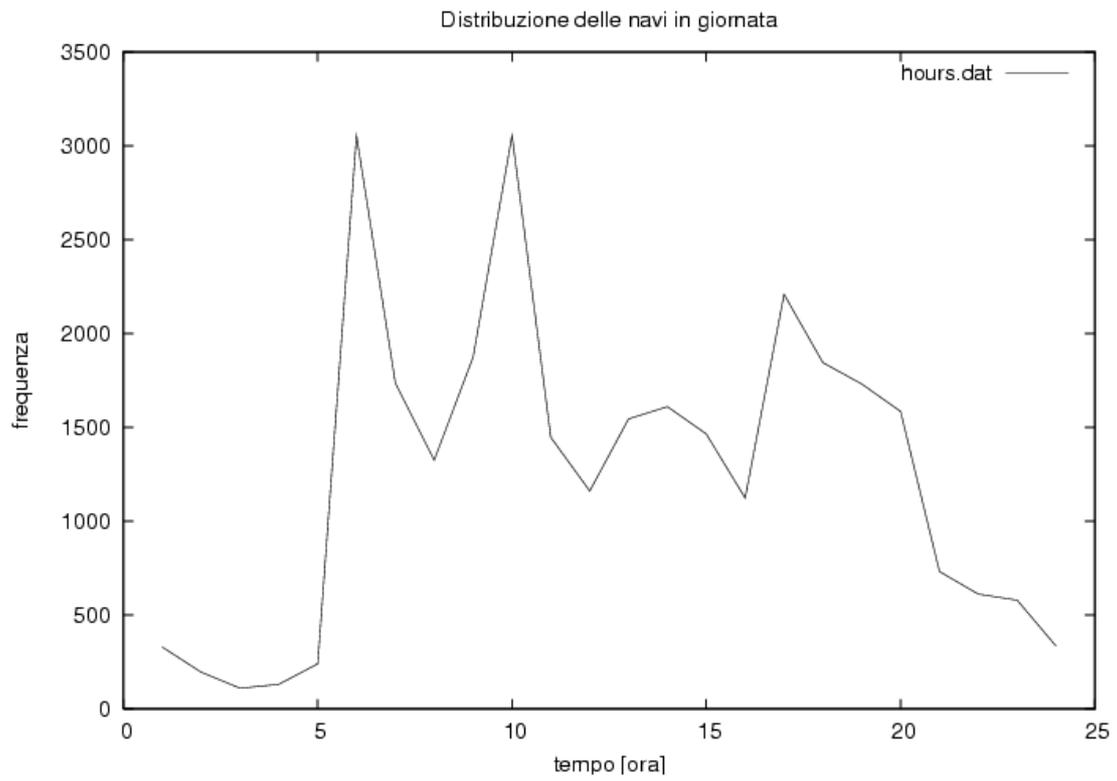


Figura 8: Distribuzione dei transiti delle navi durante la giornata.