

# PIANO REGOLATORE PORTUALE DEL PORTO DI LIVORNO 2012

Titolo elaborato:

## STUDIO METEOMARINO

Scala:

1
0
0
1
0
R
R
0
1
0
-
0
M
A
R

Committente:

AUTORITA' PORTUALE  
DI LIVORNO

Progettisti:

MODIMAR S.r.l.  
Prof. Ing. Alberto NOLI  
TECHNITAL S.p.A.  
SCIRO BUREAU VERITAS S.p.A.  
ACQUATECNO S.r.l.

	marzo 2013	0	EMISSIONE	A. SANZONE	A. NOLI	M. TARTAGLINI
Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:

Dimensioni foglio: A4

Visto del Committente:

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

**NUOVO PIANO REGOLATORE PORTUALE  
DEL PORTO DI LIVORNO  
2012**

**STUDIO METEOMARINO**

**INDICE**

<b>1</b>	<b>PREMESSE</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>UBICAZIONE ED ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO AL MOTO ONDOSI</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>REGIME DEL MOTO ONDOSI</b>	<b>3</b>
3.1	Caratteristiche del moto ondoso al largo	4
3.2	Trasposizione geografica della serie di misure ondometriche al largo di Livorno	6
3.3	Analisi statistiche degli eventi estremi di moto ondoso	8
3.4	Analisi del clima di moto ondoso: onda morfologica	11
3.5	Propagazione sotto costa della serie di misure ondometriche	13
3.6	Analisi del moto ondoso sotto costa con il modello numerico SWAN	16
<b>4</b>	<b>VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO</b>	<b>19</b>
4.1	Marea astronomica	20
4.2	Marea meteorologica	21
4.3	Variazioni di livello attese	22
<b>5</b>	<b>REGIME DEI VENTI</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>CORRENTI</b>	<b>24</b>
	<b>APPENDICE A - FIGURE</b>	<b>25</b>
	<b>APPENDICE B - TABELLE</b>	<b>52</b>
	<b>APPENDICE C - CALCOLO DEI "FETCH EFFICACI" E DELLA RELAZIONE TRA DIREZIONE DEL VENTO E QUELLA DEL MOTO ONDOSI – MODELLO ENIF</b>	<b>69</b>
	<b>APPENDICE D - DESCRIZIONE DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE INVERSA SPETTRALE MEROPE</b>	<b>70</b>

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

## 1 PREMESSE

La presente relazione descrive lo studio meteomarino redatto nell'ambito del nuovo Piano Regolatore Portuale del porto di Livorno.

L'obiettivo primario del presente studio è stato quello di valutare le caratteristiche di esposizione meteo marine che contraddistinguono il paraggio in esame, sia al largo, sia sottocosta.

Lo studio ha avuto come obiettivi principali:

- la definizione delle caratteristiche del moto ondoso, al largo e in prossimità del sito di progetto, in modo da valutare le condizioni medie di esposizione, che influenzano sia le opere che l'operatività del porto stesso;
- La definizione, su base statistica, della legge di distribuzione dei valori estremi di moto ondoso in modo da poter definire gli eventi di progetto con cui svolgere le opportune verifiche strutturali, idrauliche e di agitazione interna del porto;
- l'analisi del regime dei venti e le loro principali caratteristiche in termini di direzione e intensità;
- la valutazione delle variazioni del livello del mare;
- lo studio delle correnti.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciuro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

## 2 UBICAZIONE ED ESPOSIZIONE DEL PARAGGIO AL MOTO ONDOSO

Nel punto di coordinate 10.0° E – 43.5° N, su fondali di circa –100 m, ad una distanza di circa 24 km al largo della costa di Livorno si ha un settore di traversia esposto al mare aperto molto così delimitato (Figura 1): da Nord ad Ovest dalla costa ligure e dalla costa meridionale della Francia; a Sud-Ovest dalla Corsica, a Sud dalla Sardegna ed a Sud-SudEst dall’Isola d’Elba e dalla costa toscana (P.ta Falcone).

La Figura 2 mostra l’esposizione (in termini di fetch geografici ed efficaci) al largo di Livorno nel punto di coordinate 10.0°E 43.5°N . Per un’analisi del settore di traversia, più propriamente mirata alla valutazione delle condizioni di possibile esposizione agli stati di mare, è ormai prassi consolidata fare riferimento, in luogo dei settori di traversia geografica, al cosiddetto **fetch efficace** (porzione di mare che contribuisce al fenomeno di generazione delle onde di vento).

A tal proposito si è proceduto secondo il metodo descritto in appendice che consente di valutare le porzioni di mare (fetch efficaci) effettivamente coinvolte dal fenomeno di generazione del moto ondoso. Tale metodo tiene conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento, ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla sua direzione media di azione: pertanto ai fini della valutazione delle caratteristiche del moto ondoso occorre tenere conto non solo della lunghezza del fetch corrispondente alla direzione principale, ma anche (in modo opportuno) delle lunghezze corrispondenti a tutte le altre direzioni comprese nel settore di traversia del paraggio in esame. Considerato che nel Mar Mediterraneo le perturbazioni cicloniche hanno estensioni massime dell’ordine dei 500 km, i fetch geografici sono stati limitati a tale dimensione. Per l’elaborazione dei dati si è utilizzato il modello matematico ENIF per il calcolo automatico dei fetch efficaci.

L’applicazione di ENIF consente inoltre di definire la legge di deviazione tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso generato. Nel grafico di Figura 3 sono inoltre riportati i valori dei fetch geografici ed efficaci calcolati per ciascuna direzione, riportati in forma numerica in Tabella 1. Dall’analisi dei risultati ottenuti si evince che nel caso in esame il fetch efficace massimo per il paraggio in oggetto, pari a circa 300 km, è si ottiene in corrispondenza della direzione 250°N, appartenente al settore di ponente-libeccio.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

### 3 REGIME DEL MOTO ONDOSO

Elemento indispensabile sia per una corretta valutazione degli eventi estremi e dei loro tempi di ritorno che per la definizione dell'onda morfologica finalizzata allo studio del litorale, è il regime del moto ondoso che contraddistingue il sito in esame. La conoscenza "climatica" del moto ondoso, ovvero la definizione in termini di frequenze annuali delle grandezze che ne definiscono il regime, quali l'altezza d'onda significativa  $H_s$ , il periodo d'onda  $T$  e la direzione media di provenienza  $\theta$ , è stata ricostruita utilizzando la seguente metodologia:

- acquisizione di misure ondametriche condotte in aree prossime e rappresentative del sito in esame, nel caso di Livorno l'ondametro di La Spezia ÷ RON;
- ricostruzione del moto ondoso al largo di Livorno a partire dalla serie storica dell'ondametro di La Spezia con il metodo di trasposizione geografica;
- trasferimento sottocosta attraverso un modello di rifrazione inversa spettrale degli stati di mare al largo di Livorno per un punto caratteristico, localizzato alla profondità approssimativa di 10.5 m in prossimità delle opere di difesa del porto di Livorno ;
- trasferimento sottocosta degli eventi estremi di moto ondoso attraverso un modello di rifrazione diretta spettrale.

Come già sottolineato, la corretta determinazione della distribuzione in frequenza delle onde risponde ai seguenti obiettivi esaminati in dettaglio nei capitoli seguenti:

- definizione delle probabilità di occorrenza degli eventi ondosi estremi per il dimensionamento delle opere foranee;
- definizione del clima d'onda per l'analisi delle condizioni di evoluzione dei fenomeni di dinamica costiera.

Si noti che le fonti dei dati utilizzati risultano le più attendibili e precise, pur disponendo anche di altri dati (osservazioni di navi in transito, modelli previsionali) che peraltro confermano i risultati generali trovati.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

### 3.1 CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO

#### 3.1.1 Regime ondoso registrato dalla boa accelerometrica RON

Per la determinazione del moto ondoso al largo del litorale in esame si è reso necessario reperire una serie di misure ondometriche che offrissero un quadro esaustivo dell'esposizione del sito in esame all'azione del moto ondoso. A tal scopo si è potuto fare riferimento alle misure effettuate dalla stazione ondometrica di La Spezia (boa accelerometrica direzionale; coordinate: 43°55' °N; 09°49' °E), in esercizio dal 1 luglio 1989 ed ancorata su fondali di circa 90 m; attualmente è gestita dall'ISPRA (ex APAT) e ricade all'interno dell'area climatica di generazione degli stati di mare che interessano il sito in esame. Il rendimento medio della stazione è pari al 84.40%, la durata di registrazione effettiva è di  $17 \times 0.844 = 14.34$  anni (periodo 1-luglio 1989 – 30 giugno 2006 = 17 anni).

Il grafico del rendimento dell'ondametro riportato in Figura 4 evidenzia lo scarso rendimento che ha avuto la boa successivamente al 2001. Il rendimento medio della boa nell'ultimo quinquennio di registrazione è stato rispettivamente 72.0%, 88.95%, 54.2%, 49.3% e 37.25%.

L'anno 2002 che apparentemente presenta un rendimento medio annuale conforme al rendimento medio delle registrazioni precedenti al 2001 risulta quasi del tutto carente nella stagione autunnale. Il rendimento nel 2003 risulta buono ma considerando la serie nella sua interezza facendo riferimento al 2002 si introduce una discontinuità nel clima rappresentativo della stagione autunnale.

**Si ritiene pertanto del tutto inefficace ai fini della determinazione della forzante morfodinamica l'utilizzo dei dati successivi al 2001. Per la definizione del clima di moto ondoso medio si è pertanto fatto riferimento al clima di moto ondoso definito sulla base delle registrazioni comprese tra il 1-07-1989 e il giorno 30-06-2001.**

Nella Tabella 2 e nella Tabella 3 e nella Figura 5 sono riportate le distribuzioni annuali del numero di eventi di moto ondoso suddivisi per classi di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) e direzione di provenienza (°N), registrate dalla boa di La Spezia; nella Tabella 4 e nella Tabella 5 gli eventi sono suddivisi per classi di  $H_s$  e di periodo di picco ( $T_p$ ).

Dall'analisi di queste si nota che per eventi con  $H_s > 0.5$  m (escluse le calme):

- la maggiore frequenza di accadimento si ha per il settore di libeccio (240°N) con circa il 54.3% degli eventi;
- gli eventi aventi  $H_s$  superiore ai 3 m provengono dai settori compresi tra le direzioni Sud ed Ovest (III quadrante);

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

- dal settore 220-250°N provengono gli eventi di maggiore frequenza e intensità per tutte le stagioni dell'anno.
- agli eventi provenienti dal IV quadrante corrisponde una frequenza di accadimento pari a 3.91% (pari a circa 14 giorni/anno) con un valore di  $H_s$  massimo pari 2.5m registrato il giorno 18/11/1995 alle ore 12 e proveniente dalla direzione 272°N.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

### 3.2 TRASPOSIZIONE GEOGRAFICA DELLA SERIE DI MISURE ONDAMETRICHE AL LARGO DI LIVORNO

Il sito in esame è ubicato a circa 40 Km dalla stazione ondometrica di La Spezia; le registrazioni ondamiche in esame, pur essendo rappresentative dell'esposizione climatica del Mar Ligure, non tengono conto della distinta posizione geografica del sito di interesse. È necessario quindi applicare una metodologia di «trasposizione geografica» del clima d'onda da La Spezia al largo del litorale esame.

Il metodo di trasposizione consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relative al punto di misura e quelle nel punto di interesse. L'ipotesi di base della metodologia (P.Contini e P. De Girolamo, 1998) consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione), che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondametro di La Spezia, abbiano interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito di interesse.

Inoltre si ipotizza che le aree di generazione del moto ondoso possano essere determinate per ciascun punto utilizzando il concetto di "fetch efficace" (Seymour, 1977). Nel caso di fetch limitati, le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale  $H_{mo}$  e il periodo di picco spettrale  $T_m$  in funzione della lunghezza del fetch e della velocità del vento sono le seguenti (Vincent, 1984, Shore Protection Manual, 1984):

$$(1) \frac{gH_m}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left( \frac{gF}{U_A} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$(2) \frac{gT_m}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left( \frac{gF}{U_A} \right)^{\frac{1}{3}}$$

dove  $U_A$  è il fattore di velocità del vento ("wind stress factor"), dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m., ed  $F$  è il fetch efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Indicando con gli apici O e P rispettivamente le grandezze relative al punto di misura e al punto di trasposizione, e fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci  $F^P$  e  $F^O$ , le precedenti relazioni permettono di stabilire la ricercata corrispondenza tra le altezze ed i periodi delle onde relative al punto O e al punto P:

$$(3) \frac{H_{mo}^P}{H_{mo}^O} = \left( \frac{F^P}{F^O} \right)^{\frac{1}{2}}$$

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

$$(4) \frac{T_{mo}^P}{T_{mo}^O} = \left( \frac{F^P}{F^O} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Per ottenere le precedenti relazioni si è ovviamente supposto che il fattore di velocità del vento sia lo stesso nei due punti in esame. Tale assunzione deriva dall'aver ipotizzato che le aree di generazione dei due punti siano interessate dalla stessa perturbazione climatica e quindi dalla stessa velocità del vento.

Il metodo si completa utilizzando la legge di Leenknecht et al., 1992 (vedi anche ACES, 1992) che stabilisce il legame tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso da esso generato. L'applicazione del metodo impone la preliminare caratterizzazione dei fetch geografici ed efficaci per i due siti (punto al largo del litorale oggetto di studio ed ondometro di La Spezia).

Nella Figura 6 sono rappresentati i fetch geografici ed efficaci di La Spezia, necessari per la trasposizione geografica delle misure ondometriche dal punto di misura al largo del sito in esame. In Figura 7 è riportato il grafico che esprime la deviazione della direzione del vento del vento rispetto alla generica direzione del moto ondoso e i valori dei fetch efficaci calcolati per ciascuna direzione. Dall'analisi di quest'ultimo si evince che il fetch efficace massimo per il paraggio in oggetto è pari a circa 320 km ed è riferibile al settore di libeccio (230°N).

Note le caratteristiche del moto ondoso registrate dall'ondometro, sulla base della legge di correlazione tra la direzione dell'onda e quella del vento si determina la direzione dell'onda nel punto di interesse. Nel contempo si definiscono i coefficienti correttivi  $H^p/H^o$  e  $T^p/T^o$  per il calcolo dell'altezza e del periodo dell'onda risultante nel punto di trasposizione geografica.

Nelle Figura 8 e Figura 9 e dalla Tabella 6 alla Tabella 10 sono sintetizzati, nelle usuali forme grafica e tabellare, gli stati di mare ricostruiti sia su base annuale che stagionale. Da queste si evidenzia che:

- il 57.24% degli eventi (corrispondente ad una durata media annua di 6.8 mesi) ha una altezza significativa superiore ai 0.5 m (valore di soglia per la modellazione del litorale);
- gli eventi di maggior frequenza e intensità sono relativi al settore di libeccio;
- gli eventi con maggiore intensità ( $H_s > 3m$ ) provengono prevalentemente dal settore di libeccio (1.2% - 4 giorni/anno).

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

### 3.3 ANALISI STATISTICHE DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSO

Per la determinazione della cosiddetta "onda di progetto" in acqua profonda è necessario eseguire un'elaborazione statistica delle altezze d'onda maggiori relative alle serie storiche ricostruita al largo di Livorno. Mediante regolarizzazione della serie degli eventi estremi, secondo note funzioni probabilistiche, è possibile ricavare le caratteristiche del moto ondoso (definite in termini di altezza significativa e periodo) da associare ad assegnati tempi di ritorno (o probabilità di occorrenza). Nel caso di serie di dati relativi a misure di altezza d'onda è più affidabile l'analisi statistica di serie tronche, ottenute selezionando per i diversi settori direzionali di caratteristiche omogenee tutte le altezze d'onda significative, registrate al picco di mareggiate indipendenti, superiori ad una soglia prefissata. Infatti, il metodo delle serie tronche è da preferire sia al metodo dei massimi annuali (dati in numero limitato e per alcune "annate" ben poco estremi) sia a quello dell'analisi di tutta la serie di eventi di moto ondoso (sicuramente non indipendenti e poco omogenei).

L'individuazione di ciascuna mareggiata nell'ambito della serie storica viene effettuata introducendo una soglia di altezza d'onda e considerando che il singolo evento (mareggiata) abbia inizio quando l'altezza d'onda significativa superi per la prima volta il valore della soglia prestabilito. Similmente si ipotizza che l'evento termini quando l'altezza d'onda significativa assume per la prima volta un valore inferiore al valore di soglia. Selezionati gli "eventi di picco", l'omogeneità dei dati di solito viene assicurata raggruppando gli stessi dati in eventi caratterizzati da una simile genesi meteorologica. Ciò normalmente si traduce nel separare i valori massimi di altezze d'onda registrati in distinti settori di provenienza degli stati di mare. La scelta della soglia di troncamento deve essere effettuata al fine di garantire comunque una selezione di un numero di eventi estremi comparabile con il numero di anni di osservazione.

L'analisi del grafico polare degli eventi estremi di moto ondoso (Figura 10) ha consentito di individuare un settore di traversia principale ( $210^{\circ}\div 280^{\circ}$  °N) e due settori secondari, rispettivamente compresi tra le direzioni  $140^{\circ}\div 210^{\circ}$  °N (mezzogiorno) e  $280^{\circ}\div 360^{\circ}$  °N (maestrale). Nel settore principale sono state registrate 408 mareggiate con 38 eventi sopra la soglia di 4.00 m, nel settore secondario  $140^{\circ}\div 210^{\circ}$  °N sono risultate 19 mareggiate ciascuna delle quali presenta un valore massimo sopra la soglia di 2,00 m, mentre nel settore  $280^{\circ}\div 360^{\circ}$  °N sono state registrate 128 mareggiate con 40 eventi sopra la soglia di 2.00 m. Le serie tronche sono state elaborate effettuando dapprima una regolarizzazione di tipo statistico delle serie di valori riferita al periodo di misure e successivamente le serie "tronche" di dati sono state riferite alle usuali leggi di distribuzione probabilistica, al fine di determinare il valore "di progetto" con un prefissato tempo di ritorno, o la probabilità di non superamento durante la vita delle opere. Le

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) sono la legge di Weibull:

$$P(X \leq x) = 1 - e^{-\left[\frac{(x-B)}{A}\right]^\alpha}$$

e la legge di Gumbel (1988)

$$P_{X_{\max}}(x) = \exp\left[-e^{-\frac{(x-b)}{\alpha}}\right]$$

dove X è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento e  $\alpha$ , A, B, a, b sono i parametri delle distribuzioni. La stima dei parametri delle distribuzioni è stata eseguita sui valori dell'altezza d'onda significativa riportati per ciascun settore rispettivamente nelle Tabella 11, Tabella 12 e Tabella 13. Tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

$$Tr(X \leq x) = \frac{1}{[1 - P(X \leq x)]}$$

sono stati ricavati i grafici dell'altezza d'onda associata a ciascun tempo di ritorno per ciascuna serie e per ciascun settore di traversia (Figura 11, Figura 12, Figura 13). I risultati delle elaborazioni statistiche della serie storica indicano che:

- nel settore di traversia principale (210°÷280°N) gli eventi estremi contraddistinti da un tempo di ritorno di 5 anni presentano una altezza d'onda significativa pari a circa 6.1 m, mentre il valore dell'altezza d'onda cinquantennale risulta pari a circa 7.6 m;
- nel settore di traversia di mezzogiorno (140°÷210°N) gli eventi estremi contraddistinti da un tempo di ritorno di 5 anni presentano una altezza d'onda significativa pari a circa 3.2 m, mentre il valore dell'altezza d'onda cinquantennale risulta pari a circa 4.4;
- nel settore di traversia di maestrale (280°÷350°N) gli eventi estremi contraddistinti da un tempo di ritorno di 5 anni presentano una altezza d'onda significativa pari a circa 4.8 m, mentre il valore dell'altezza d'onda cinquantennale risulta pari a circa 7.2 m

Nella tabella seguente sono sintetizzati i valori delle caratteristiche del moto ondoso al largo di Livorno per il settore di traversia principale con  $T_R=50$  e  $T_R=100$  anni per la serie ondometrica trasposta al largo di Livorno. La definizione del periodo associato all'altezza d'onda di progetto è stata calcolata facendo ricorso alle recenti correlazioni tra altezza d'onda spettrale ( $H_{mo}$ ) e periodo di picco fornite dall' "Atlante delle onde dei mari italiani" (APAT- Università di Roma

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

Tre, 2004) nel quale si utilizza una regressione del tipo  $T_p = a(H_{m0})^b$  ; in particolare per il sito in esame sono stati utilizzati i seguenti parametri  $a=9.559$ ,  $b=0.090$ .

Tr (anni)	Settore di traversia (°N)	Altezza significativa al largo $H_{s0}$ (m)	Periodo di picco $T_p$ (s)
50	210-280°N	7.6	11.47
100	210-280°N	8.1	11.53

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

### 3.4 ANALISI DEL CLIMA DI MOTO ONDOSO: ONDA MORFOLOGICA

Nella conduzione di uno studio finalizzato all'inquadramento preliminare delle caratteristiche idraulico-marittime e morfodinamiche del sito in esame, un tema di indagine fondamentale è rappresentato dall'evoluzione della linea di costa in funzione dall'esposizione al moto ondoso del paraggio.

Per tal proposito si rende necessaria l'individuazione degli stati di mare rappresentativi dell'anno climatico (medio statistico) del sito in esame cui fare riferimento nel periodo considerato. In tale contesto non è necessario prendere in considerazione tutte le mareggiate reali caratterizzanti l'anno statistico medio, bensì è sufficiente definire stati di mare rappresentativi dell'energia totale che compete al clima di moto ondoso che interessa il settore di traversia del sito in esame. L'analisi dettagliata delle registrazioni ondometriche ed il trasferimento di queste sottocosta per il sito in esame, ha consentito di derivare utili indicazioni qualitative sulle caratteristiche del clima di moto ondoso responsabile dei fenomeni evolutivi della fascia costiera del sito in esame.

Utilizzando la totalità delle misure di moto ondoso classificate in funzione della direzione di propagazione in settori di 10° si è calcolata, per ciascuna direzione di provenienza, un'onda avente un'altezza  $H_e$  ed un periodo  $T_e$ , con un contenuto energetico ( $\cong H^2T$ ) ed una ripidità ( $\cong H/T^2$ ) rappresentative del contenuto energetico e della ripidità di tutte le onde provenienti dallo stesso settore. Sotto queste ipotesi si può associare ad una particolare direzione di provenienza (assumendo la direzione media come rappresentativa del singolo settore di 10° di ampiezza) un singolo evento contraddistinto da un'onda  $H_e$ ,  $T_e$ , definita nella letteratura specializzata come "onda di modellazione" o "onda morfologica", avente caratteristiche tali da indurre effetti sul litorale equivalenti a quelli indotti da tutte le onde provenienti da quella direzione in un anno statistico medio.

Dalla serie di misure ondometriche, assunta come rappresentativa del clima ondoso le coppie di valori  $H_i$  e  $T_i$  relative all'i-esimo tra gli N eventi di moto ondoso, provenienti dal settore di traversia, l'onda di modellazione che compete al settore è tale che:

$$N (H_e^2 T_e) = \sum (H_i^2 T_i)$$

$$N (H_e / T_e^2) = \sum (H_i / T_i^2)$$

La soluzione delle equazioni è stata calcolata per un punto al largo di Livorno (ricadente su un fondale di profondità pari a circa 100 m) determinando l'energia associata a ciascuna classe di altezza d'onda (Tabella 14) per ogni settore di provenienza sia su base annuale. Tali risultati sono stati riportati anche in forma grafica nelle figura 4.5.1 mediante la rappresentazione degli andamenti stagionale e complessivo annuale del flusso di energia lordo in funzione della

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

direzione di provenienza espressa in °N nel punto di rifrazione inversa considerato. Dall' analisi delle suddette tabelle e figure appare evidente che:

- i maggiori contributi energetici si hanno nella stagione invernale ed autunnale con un picco della direzione risultante in corrispondenza della direzione 240 °N;
- i contributi della stagione estiva e primaverile sono di minore intensità, ma con direzioni di massimo flusso simili (240°N);
- la direzione media della risultante energetica annuale (Hs>0.5m) è di circa 240 °N con una durata di 6.9 mesi.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

### 3.5 PROPAGAZIONE SOTTO COSTA DELLA SERIE DI MISURE ONDAMETRICHE

Per definire le condizioni di moto ondoso in prossimità dell'imboccatura portuale e delle opere foranee e per la definizione del clima ondometrico sotto costa, è stato eseguito uno studio di propagazione del moto ondoso da largo a riva. A tal fine è stato necessario in primo luogo scegliere il modello numerico più appropriato per lo studio in questione. La scelta del modello numerico viene normalmente effettuata a valle di un'analisi dei principali fenomeni fisici che condizionano l'evoluzione delle onde durante la propagazione. Tale analisi si basa fondamentalmente su una attenta lettura della conformazione batimetrica dei fondali e delle relative condizioni al contorno che per il sito in esame sono in funzione anche delle direzioni di provenienza del moto ondoso al largo.

Si può ragionevolmente ritenere che l'influenza in termini percentuali dei procedimenti generativi del moto ondoso ad opera del vento che intervengono nella propagazione largo-riva, possano essere, nel caso in esame, trascurati, poiché la zona di evoluzione del moto ondoso su bassi fondali risulta di estensione notevolmente inferiore rispetto a quella, posta in mare aperto, dove le onde vengono generate. Per quanto riguarda i meccanismi che influiscono nella propagazione delle onde sui fondali via via decrescenti che "collegano" il mare aperto alla zona di interesse, la presenza delle secche della Meloria caratterizzate da un andamento irregolare delle linee batimetriche (profondità minima di 2 m a circa 7 Km dalla costa), comporta che oltre ai fenomeni principali della rifrazione e dello shoaling, non possano essere ritenuti trascurabili per gli eventi di una certa importanza i processi dissipativi (attrito sul fondo e frangimento). Per questo motivo i risultati ottenuti con la propagazione sottocosta della serie di dati ondametrici inizialmente trasposta da La Spezia al largo del sito in esame, condotta tramite il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE, possono essere considerati validi unicamente per un'analisi climatica del moto ondoso, in quanto tale modello non consente di tener conto dei fenomeni dissipativi suddetti.

La serie di dati ondametrici della boa di La Spezia trasposta al largo del porto in esame è stata riportata sotto costa utilizzando il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE per la definizione di un database di riferimento utilizzato in una seconda fase dal programma PEGASO per la ricostruzione del clima di moto ondoso sotto costa. La prima fase dello studio della rifrazione richiede la digitalizzazione dei valori di profondità e la costruzione di un adeguato reticolo batimetrico che tenga conto della topografia sottomarina sui "bassi" fondali (profondità inferiori alla semi-lunghezza d'onda, cioè dell'ordine dei 100 m). I dati di profondità sono stati ricavati sia dalle carte nautiche che dai rilievi batimetrici appositamente eseguiti sulla zona più prossima alla spiaggia in esame. In particolare, sono state utilizzate la carta nautica n° 4 «Dal Gombo al Canale di Piombino» (scala 1:100.000), edita dall'Istituto Idrografico della Marina. Al fine di ottenere un quadro completo del regime di moto ondoso sottocosta è stata

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

condotta l'applicazione del modello MEROPE per un punto di rifrazione P posto ad una distanza di circa 1600 m dall'imboccatura portuale alla profondità di circa 10.5 m (vedi Figura 14).

Per il punto P sono stati calcolati 20 piani d'onda per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spazati di 0.5°, sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia. I risultati della rifrazione inversa-spettrale sono sintetizzati in forma grafica in Figura 15 dove sono rappresentate le corrispondenze tra le direzioni del moto ondoso incidente dal largo (ascisse) ed i relativi valori di direzione calcolati a riva per i 9 spettri più significativi. In particolare, esaminando i grafici di Figura 15 si osserva che:

- le onde di libeccio-mezzogiorno (200°N) non subiscono sostanziali rotazioni e mantengono una traiettoria pressoché rettilinea nell'avvicinamento a riva;
- le onde provenienti da ponente (270°N) subiscono mediamente una deviazione direzionale variabile da 1 a 5° a seconda della componente spettrale considerata (le deviazioni più consistenti corrispondono alle componenti dello spettro aventi i periodi maggiori);
- le onde provenienti da Sud-SudEst (150°N) subiscono una deviazione direzionale più consistente variabile dai 20° ai 40°.

La figura riporta (limitatamente ai 9 spettri presi ad esempio) la corrispondenza dell'altezza d'onda significativa sotto costa rispetto alla direzione di incidenza al largo espressa dal valore del coefficiente  $k$  ( $k = k_r \cdot k_s$  con  $k_r$  coefficiente di rifrazione e  $k_s$  coefficiente di shoaling). Da tale figura si osserva che nel punto considerato le componenti dello spettro provenienti dal settore 230 - 270°N associate ai periodi maggiori risultano schermate dalla presenza delle secche della Meloria in quanto presentano una riduzione variabile dal 22 al 25% del coefficiente  $k$ . Tale riduzione per le componenti con periodi minori risulta mediamente pari a circa il 15%. È doveroso osservare che nella propagazione verso riva degli eventi di moto ondoso in oggetto intervengono anche fenomeni dissipativi di frangimento di cui il modello matematico di rifrazione inversa impiegato non tiene conto. Gli stati di mare associati a periodi elevati provenienti da mezzogiorno (180°N) presentano i maggiori valori del coefficiente  $k$  (pari a circa al 90%).

Per completare l'analisi del clima sotto costa la serie ondometrica determinata al largo è stata propagata a riva nel punto P precedentemente definito. I risultati dei calcoli condotti con il programma MEROPE sono sintetizzati in Tabella 15, in cui sono riportate le frequenze di accadimento degli stati di moto ondoso, suddivisi per classi di altezza e direzione, ed in Figura 16 dove viene riportata la rosa di distribuzione degli eventi di moto ondoso aventi altezza d'onda superiore a 0.5 m.

Dall'analisi dei risultati si evince che:

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

- gli eventi con maggiore frequenza di accadimento sono relativi al settore di libeccio-ponente (il 64% degli eventi provengono dal settore 200°-290°N);
- gli eventi con maggiore intensità ( $H_s > 2.5$  m) provengono dai settori libeccio e ponente (200°-270°N), con una frequenza dell'1% , pari a circa 4 giorni/anno;
- il 50% degli eventi (corrispondente ad una durata di 6.0 mesi) ha una altezza significativa superiore ai 0.5 m (valore di soglia per la modellazione morfologica del litorale)

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

### 3.6 ANALISI DEL MOTO ONDO SOLO SOTTO COSTA CON IL MODELLO NUMERICO SWAN

Al fine di poter effettuare correttamente l'analisi della trasformazione delle caratteristiche del moto ondoso durante la propagazione dal largo a riva del sito in esame (dove la topografia fortemente irregolare dei fondali non consente di trascurare i processi dissipativi quali attrito sul fondo e frangimento), è stato applicato il modello matematico bidimensionale di rifrazione diretta spettrale SWAN vers. 40.11 (sviluppato dal Delft University of Technology).

Propagandosi su fondali via via decrescenti, le onde subiscono una serie di trasformazioni geometriche e perdite di energia che ne modificano le caratteristiche (in termini di altezza, lunghezza d'onda e direzione del fronte) indotte essenzialmente dai fenomeni di rifrazione e shoaling. Il primo fenomeno (rifrazione) consiste essenzialmente in una trasformazione tridimensionale del campo d'onda dovuta alle variazioni del fondale; tali variazioni comportano contestualmente la rotazione dei fronti d'onda per rallentamento differenziale e la variazione delle altezze, per effetto della conservazione del flusso di energia fra le "ortogonali" vicine. Il fenomeno dello shoaling è una trasformazione bidimensionale delle onde che ne provoca il progressivo accorciamento ed incremento in altezza durante l'avanzamento su profondità decrescenti, causata dalla variazione della celerità di gruppo indotta dal fondale.

Il modello SWAN è in grado di simulare i principali fenomeni fisici presenti nel processo propagativo, rappresentati da:

- rifrazione e shoaling dovuto alle interazioni del moto ondoso con il fondale
- dissipazioni energetiche indotte dal frangimento;
- dissipazioni energetiche indotte dall'attrito sul fondo;

Il modello inoltre è in grado di tener conto, anche se non in modo esatto, della diffrazione indotta dalla presenza di eventuali ostacoli, mediante l'eliminazione delle componenti spettrali che si propagano verso la cosiddetta "zona d'ombra energetica" (area geometricamente protetta dall'ostacolo la cui forma e le cui dimensioni dipendono dall'angolo di incidenza, dalla lunghezza dell'onda esterna, e dal potere riflettente dell'ostacolo).

L'applicazione del modello SWAN ha richiesto la preliminare digitalizzazione dei valori di profondità (ricavati dalla carta nautica n° 4 « Dal Gombo al Canale di Piombino» - scala 1:100.000, edita dall'Istituto Idrografico della Marina) per la costruzione di due adeguati reticoli batimetrici che consentano di tenere conto opportunamente della topografia del terreno. Considerata la particolare morfologia dei fondali ed avendo voluto simulare la presenza delle secche della Meloria e delle secche di Vada, la propagazione degli eventi di moto ondoso è stata effettuata a partire all'interno di un'area molto ampia (50.00 x 35.00 km, dalla foce del

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

fiume Cecina a sud a Gombo a nord), in seguito trasferita in un dominio più ristretto (13.80 x 9.375 km) relativo all'area oggetto di studio (Figura 14).

Le caratteristiche del moto ondoso simulate al largo dalla griglia esterna sono state propagate fino alla frontiera dell'area interna ed inserite come condizioni al contorno nelle simulazioni di dettaglio. Le griglie di calcolo sono state ricavate mediante un programma di interpolazione tridimensionale (SURFER) partendo da una discretizzazione planimetrica di base a maglia quadrata nei nodi della quale sono stati calcolati i valori della profondità del fondale.

Il dominio esterno presenta maglie quadrate di 250 m di lato per un totale di 28000 nodi di calcolo, mentre nella griglia interna (nested grid) sono stati utilizzati 23000 nodi di calcolo con una discretizzazione spaziale regolare di 75 m per lato: tale operazione assicura l'accuratezza necessaria nella ricerca della soluzione numerica delle variabili. Entrambe le griglie di calcolo presentano l'asse Y orientato a 260°N.

Le condizioni al contorno sono state definite applicando uno spettro tipo JONSWAP caratterizzato da un'altezza d'onda significativa  $H_s$ , un periodo di picco  $T_p$  ed una direzione di propagazione.

Sono stati scelti più eventi di moto ondoso per la comprensione dei processi di propagazione sottocosta che contraddistinguono il paraggio in esame. Particolare attenzione è stata posta per gli eventi estremi associati al tempo di ritorno di 50 anni. In particolare sono stati simulati i seguenti stati di mare ritenuti rappresentativi delle condizioni di tempesta estreme nello studio del campo d'onda del paraggio costiero in esame:

- $H_{s0}=1.75$  m,  $T_p=6.70$  s,  $Dir=250^\circ N$  - Figura 17
- $H_{s0}=2.50$  m,  $T_p=7.00$  s,  $Dir=190^\circ N$  - Figura 18
- $H_{s0}=4.5$  m,  $T_p=9.60$  s,  $Dir=230^\circ N$  - Figura 19
- $H_{s0}=5.4$  m,  $T_p=10.50$  s,  $Dir=190^\circ N$  - Figura 20
- $H_{s0}=7.60$  m,  $T_p=11.47$  s,  $Dir=230^\circ N$  - Figura 21
- $H_{s0}=7.60$  m,  $T_p=11.47$  s,  $Dir=240^\circ N$  - Figura 22
- $H_{s0}=7.60$  m,  $T_p=11.47$  s,  $Dir=250^\circ N$  - Figura 23

Dall'analisi delle elaborazioni effettuate appare evidente che la variazione della direzione di provenienza degli eventi estremi simulati non comporta variazioni significative nel campo d'onda risultante.

Le altezze d'onda significative ottenute in occasione delle mareggiate più intense risultano pari a circa 4 m a ridosso della diga foranea; in corrispondenza dell'attuale imboccatura nord (più protetta) le altezze d'onda si riducono a circa 2 m, mentre si rilevano valori prossimi ai 5 m nei

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

pressi dell'imboccatura sud dove gli stati di mare provenienti da libeccio non risentono dell'effetto schermo esercitato dalle secche. In particolare nel punto P, definito nel paragrafo precedente, si ottengono i seguenti valori delle caratteristiche del moto ondoso:

$H_{so}$ (m)	$Dir_o$ (°N)	$H_s$ (m)	$Dir$ (°N)
7.6	230	4.22	210.00
7.6	240	4.15	213.00
7.6	250	4.05	215.00

In definitiva nel punto P si osserva una riduzione media di circa il 55% dell'altezza d'onda: tale attenuazione è attribuibile principalmente all'effetto schermo esercitato dalle secche sui contributi spettrali provenienti da Ovest. Come era prevedibile la riduzione dell'altezza d'onda significativa calcolata con il modello SWAN (metodo della rifrazione diretta spettrale) risulta notevolmente maggiore a quella ottenuta con il modello Merope (circa il 22%) poiché quest'ultimo non tiene conto del frangimento dovuto al fondale.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

#### 4 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

La conoscenza delle massime variazioni quasi-statiche del livello marino, dovute principalmente alla marea astronomica e "meteorologica", è necessaria per la corretta progettazione delle quote da assegnare alle opere di difesa, delle profondità di dragaggio nei bacini portuali e nel caso di applicazioni alla dinamica costiera, per la determinazione dell'altezza limite di swash (quota della spiaggia emersa raggiunta dal mare). In generale per quanto riguarda le variazioni a breve termine, periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica da quelli della marea "meteorologica" (indotta essenzialmente dall'azione del vento e dalle variazioni di pressione atmosferica). Nella zona del Mar Tirreno ove ricade il paraggio costiero in esame le escursioni quasi statiche del livello del mare sono di fatto modeste. Nel porto di Livorno nel punto di coordinate 43.55 latitudine - 10.30 longitudine è installato da alcuni anni un mareografo modello SM3810 SIAP all'interno di un manufatto di protezione della stazione. L'analisi dei livelli forniti dalla stazione ha permesso di verificare l'ampiezza e la frequenza della marea astronomica e di determinare di conseguenza le massime variazioni di livello previste. A tali valori sono da sommare le variazioni dovute alle condizioni meteorologiche (sovrizzo di tempesta, pressioni atmosferica) e dovute alle variazioni di lungo termine provocate dall'innalzamento del livello medio marino.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

#### 4.1 MAREA ASTRONOMICA

Per lo studio della marea astronomica che contraddistingue il sito in esame si è fatto riferimento alle rilevazioni misurate nell'anno 2009, riportate in allegato in forma grafica. La serie storica dei livelli misurati è stata analizzata con l'applicazione T\_TIDE<sup>1</sup> al fine di determinare le costanti armoniche della marea e isolare in tal modo la componente astronomica. In allegato viene riportato il risultato dell'analisi armonica svolta sui dati registrati nei mesi di giugno e luglio 2009 che ha permesso di determinare le costanti armoniche con cui sono stati successivamente ricostruiti i livelli di marea astronomica. In Figura 24 sono riportati i livelli misurati dal mareografo di Livorno nei mesi di giugno e luglio del 2009 a seguito dell'analisi armonica di tali livelli è possibile ottenere la componente armonica e la componente residua.

L'andamento temporale della marea astronomica per il sito di Livorno è di tipo semidiurno (periodo 12 ore e 30 minuti) con due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza diversa (marea di tipo sinodico-declinazionale). Le escursioni di marea astronomica sono contraddistinte da una periodicità bimensile distinta nelle fasi di sizigie (luna piena e nuova) e di quadratura.

Nei periodi sizigiali si verificano i massimi dislivelli di oscillazione.

Il livello medio delle basse maree sigiziali risulta essere pari a -0.1764 m sul l.m.m. (valore corrispondente al valore di riferimento dei livelli misurati, z0).

Il livello medio delle alte maree sigiziali risulta pari a 0.1755 m rispetto al l.m.m.

Il massimo dislivello astronomico atteso risulta essere pari a circa +0.231 m e -0.236 m rispetto al livello medio marino. Nelle fasi di quadratura i massimi dislivelli di oscillazione raggiungono valori di circa  $\pm 0.13$  m rispetto al livello medio marino.

<sup>1</sup> Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, "Classical Tidal "Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE", Computers and Geosciences, 2002.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

#### 4.2 MAREA METEOROLOGICA

La marea meteorologica può essere valutata come somma di due differenti contributi: **sovralzo barico**  $S_b$ , dovuto a variazioni di pressione atmosferica; **sovralzo di vento**  $S_v$ , generato dal campo di vento.

**$S_b$  sovralzo barico:** considerata una condizione di minimo barico (legata al passaggio dei centri di bassa pressione caratterizzanti i cicloni) pari a 975 mb (plausibile come valore estremo per il paraggio in esame) rispetto ad una condizione media di 1013 mb ed ipotizzando 0.01 m/mb di variazione unitaria, ne consegue (da un punto di vista prettamente statico) un effetto di sovralzo marino massimo pari a 0.38m;

Allo stesso modo ipotizzando un massimo barico (legato allo stazionamento di alte pressioni sul nostro territorio) pari a 1030 mb si ottiene un abbassamento di livello pari al massimo a 0.17 m.

**$S_v$  sovralzo di vento:** l'effetto di innalzamento dei livelli sottocosta indotto dall'azione di venti foranei spiranti verso la costa è definito in funzione dell'estensione della piattaforma continentale. Il calcolo del sovralzo di vento può essere effettuato con la nota relazione implicita:

$$S_v = \frac{K_p L_p U^2}{g(D-d-S)} \ln\left(\left(\frac{D}{d+S}\right)\right)$$

che fornisce un valore di 0.11 m alla profondità (cautelativa)  $d=0.5$  m, essendo  $D=200$  m la profondità limite assunta per la piattaforma continentale;  $L_p=30000$  m l'estensione della piattaforma continentale;  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>;  $k_p=3 \times 10^{-6}$ ;  $U=20$  m/s la velocità del vento persistente in condizioni estremali.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

#### 4.3 VARIAZIONI DI LIVELLO ATTESE

In definitiva, è possibile calcolare i massimi dislivelli attesi sommando i diversi contributi dell'oscillazione del livello marino, tenendo comunque presente che in generale non si verifica la piena concomitanza dei sovralti di varia natura. Pertanto, ai fini progettuali, si può cautelativamente assumere una riduzione del 25% della somma dei contributi di sovralto meteorologico e astronomico:

$$S = 0.75 (S_{ma} + S_b + S_v) = 0.75 (0.23 + 0.38 + 0.11) = 0.54 \text{ m.}$$

Il minimo abbassamento del livello marino è pari alla somma dell'oscillazione di marea (23 cm) e dell'abbassamento barico (17 cm); anche in questo caso si può ammettere un abbattimento del 25% dell'oscillazione massima, pertanto il minimo livello da assumere per la progettazione delle opere è pari a:

$$S = 0.75 (S_{ma} + S_b) = 0.75 (-0.23 - 0.17) = 0.30 \text{ m.}$$

Infine, si devono considerare le variazioni a lungo termine dovute a fenomeni di eustatismo: le attuali proiezioni prevedono un progressivo innalzamento del livello marino dovuto all'incremento della temperatura terrestre (effetto serra) stimabile in circa 30 cm nei prossimi 50 anni. Valutazioni meno pessimistiche considerano possibili incrementi di livello di poco superiori a quelli registrati nell'ultimo millennio (dell'ordine di 10 cm al secolo).

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

## 5 REGIME DEI VENTI

In generale la conoscenza del “clima anemologico” locale, cioè della distribuzione in frequenza della velocità e direzione del vento, è di grande importanza in quanto influenza in maniera determinante la scelta dell’ubicazione, la configurazione planimetrica delle opere portuali, dell’imboccatura e dei pontili di ormeggio. E' noto infatti che le imbarcazioni rispondono meglio alle azioni di venti longitudinali (paralleli all'asse longitudinale delle imbarcazioni) piuttosto che trasversali, in particolar modo durante le delicate manovre negli spazi ristretti dei bacini portuali ed in fase di stazionamento.

Inoltre la conoscenza della forza del vento è necessaria per il dimensionamento di eventuali pontili di accosto ed altre strutture emergenti e per il calcolo degli effetti sulle variazioni del livello marino sottocosta.

Per lo studio del regime dei venti si è fatto riferimento alla serie sinottica completa delle registrazioni anemometriche relative alla stazione APAT ubicata presso il mareografo nel porto medico (periodo di riferimento: luglio 1998-giugno 2009) sulla base della quale è stata condotta una analisi statistica dei dati mediante il programma Pegaso, sviluppato dalla Modimar per ambiente Windows.

Nelle tabb. 5.1, 5.2 e nella figura 4.1.1 sono vengono riportate rispettivamente le distribuzioni annuali del numero di eventi e quella delle frequenze di accadimento (in %), suddivise per classi di velocità del vento (in m/s) e direzione di provenienza (°N); nella figura è rappresentato in forma grafica il regime anemologico locale risultante dalle elaborazioni condotte.

Sia i venti regnanti (più frequenti) che i venti dominanti (più intensi) risultano provenire principalmente dal settore di grecale ed, in maniera meno significativa, anche dal settore di libeccio. Infatti dal settore 20÷60°N provengono circa il 38% degli eventi, mentre dal settore 200÷250°N la frequenza di accadimento cumulata è pari circa al 14%. In definitiva la distribuzione spaziale delle frequenze di accadimento degli eventi risulta essere caratterizzata da un orientamento prevalente lungo la direzione NordEst-SudOvest.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

## 6 CORRENTI

L'analisi d'insieme (riferita alla rappresentazione grafica estratta da "Atlante Tematico d'Italia" TCI, CNR – Figura 26) mostra che, al largo della costa in esame, i flussi delle correnti di gradiente (o di densità) sono condizionati dal fenomeno di riflusso della circolazione d'insieme antioraria del Mar Tirreno e pertanto sono diretti da Sud verso Nord; in prossimità della costa lungo la zolla continentale l'effetto combinato della batigrafia e l'azione del vento più frequente determina un'inversione della direzione prevalente della corrente. In generale nel Tirreno centrale la velocità media delle correnti in superficie è piuttosto modesta, circa 5 cm/s, con punte massime comunque inferiori a 50 cm/s.

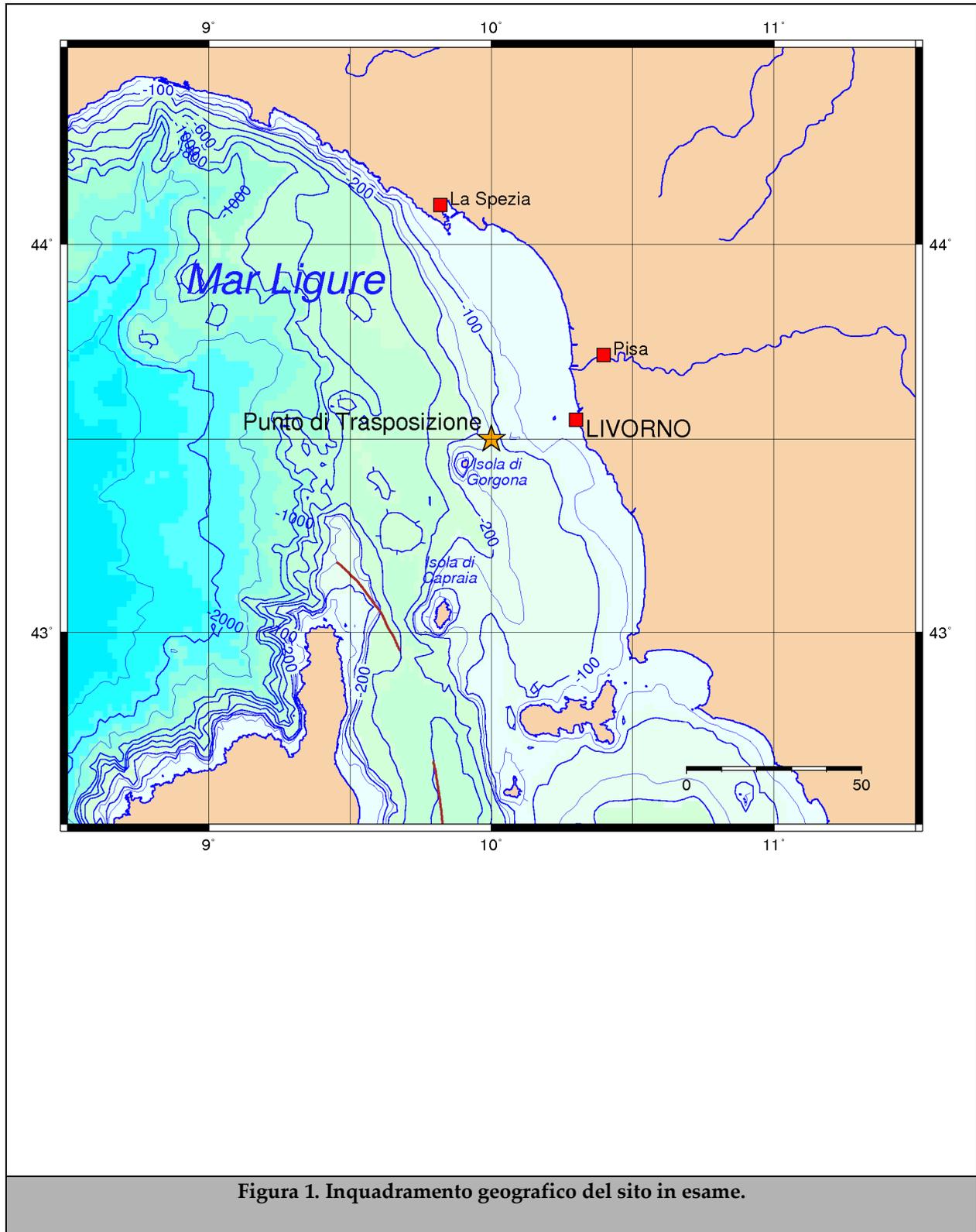
La conformazione batigrafica del sito in esame, associata alla limitata escursione dei livelli di marea astronomica, lascia prevedere valori trascurabili anche delle possibili correnti di marea.

In definitiva il regime delle correnti marine nel paraggio costiero in esame ha effetti irrilevanti sulla dinamica dei sedimenti costieri, dominata invece dalle correnti litoranee, comprese tra la linea dei frangenti e la riva, indotte dall'azione del moto ondoso frangente.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

## Appendice A - Figure

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
	<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0



**Figura 1. Inquadramento geografico del sito in esame.**



Autorità Portuale di Livorno

Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario

Data: marzo 2013

10

010

RR

010

-0

MAR

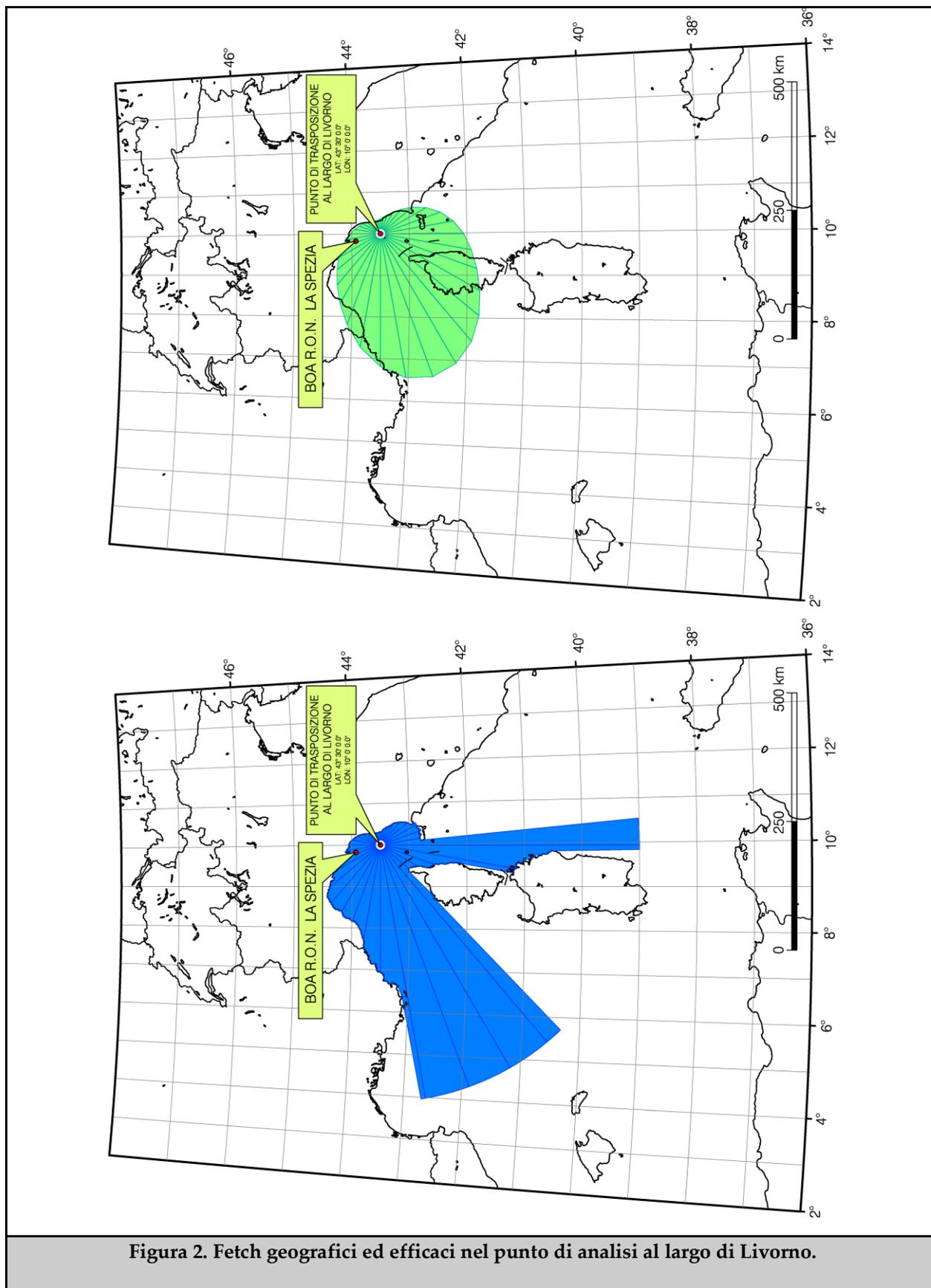
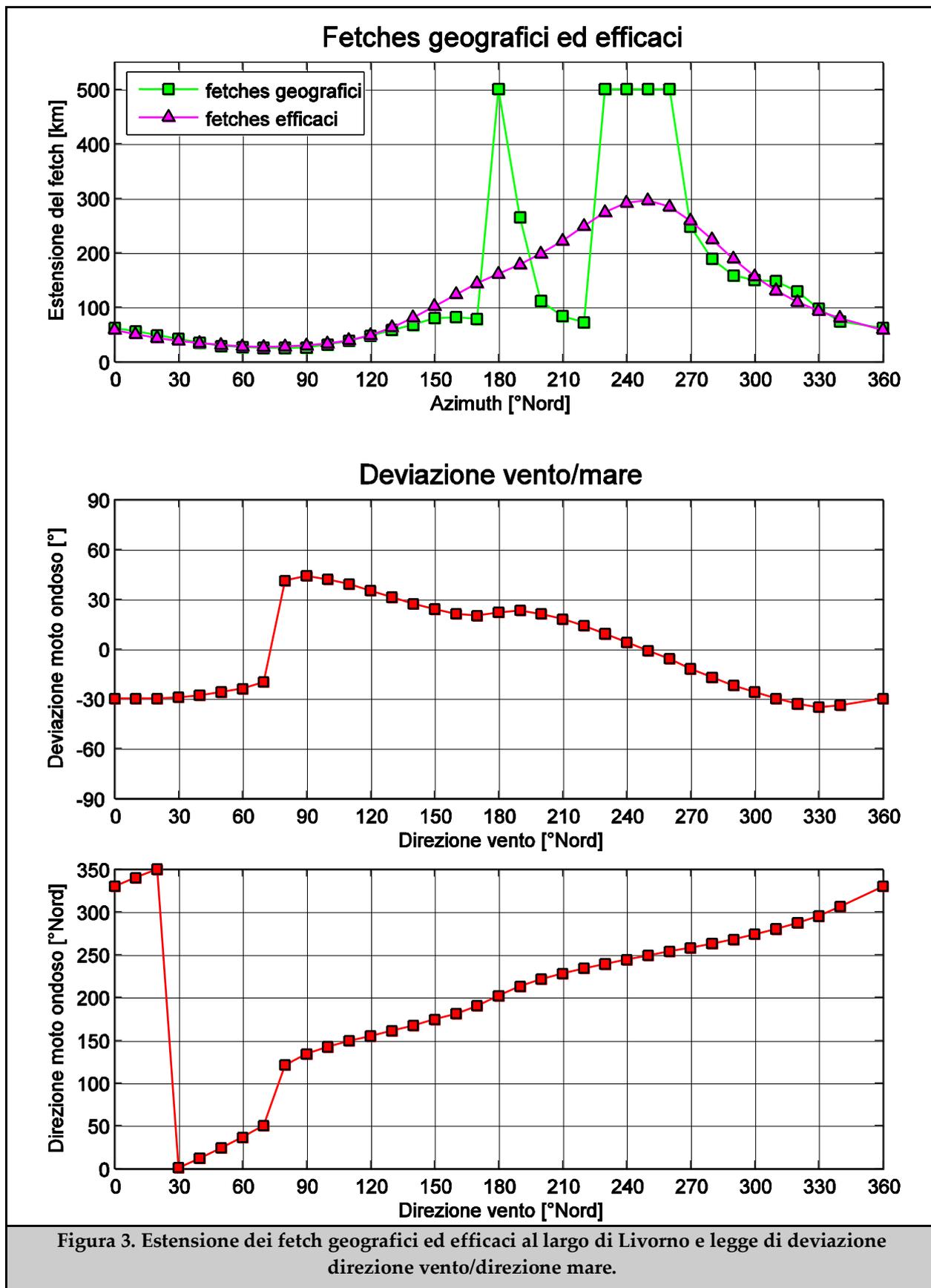


Figura 2. Fetch geografici ed efficaci nel punto di analisi al largo di Livorno.





Autorità Portuale di Livorno

Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò

Data: marzo 2013

10

010

RR

010

-0

MAR

Rendimento della boa ondometrica di La Spezia dal 1/07/1989 al 30/06/2006

1989		1990		1991		1992		1993		1994		1995		1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006	
anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi	anno	mesi		
1989	7	217	67.5	206	83.1	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8
	8	219	68.3	246	100.0	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8	248	99.8	247	99.8
	9	234	97.5	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0
	10	247	98.6	228	91.9	229	92.3	230	92.3	231	92.3	232	92.3	233	92.3	234	92.3	235	92.3	236	92.3	237	92.3	238	92.3	239	92.3	240	92.3	241	92.3	242	92.3	243	92.3
	11	240	100.0	221	85.1	222	86.2	223	87.2	224	88.2	225	89.2	226	90.2	227	91.2	228	92.2	229	93.2	230	94.2	231	95.2	232	96.2	233	97.2	234	98.2	235	99.2	236	100.0
	12	246	96.2	222	88.1	223	89.1	224	90.1	225	91.1	226	92.1	227	93.1	228	94.1	229	95.1	230	96.1	231	97.1	232	98.1	233	99.1	234	100.0	235	100.0	236	100.0	237	100.0
1990	1	242	97.6	221	85.1	222	86.2	223	87.2	224	88.2	225	89.2	226	90.2	227	91.2	228	92.2	229	93.2	230	94.2	231	95.2	232	96.2	233	97.2	234	98.2	235	99.2	236	100.0
	2	176	78.6	222	88.1	223	89.1	224	90.1	225	91.1	226	92.1	227	93.1	228	94.1	229	95.1	230	96.1	231	97.1	232	98.1	233	99.1	234	100.0	235	100.0	236	100.0	237	100.0
	3	200	80.6	223	89.1	224	90.1	225	91.1	226	92.1	227	93.1	228	94.1	229	95.1	230	96.1	231	97.1	232	98.1	233	99.1	234	100.0	235	100.0	236	100.0	237	100.0	238	100.0
	4	224	93.3	224	89.3	225	90.3	226	91.3	227	92.3	228	93.3	229	94.3	230	95.3	231	96.3	232	97.3	233	98.3	234	99.3	235	100.0	236	100.0	237	100.0	238	100.0	239	100.0
	5	248	100.0	225	89.3	226	90.3	227	91.3	228	92.3	229	93.3	230	94.3	231	95.3	232	96.3	233	97.3	234	98.3	235	99.3	236	100.0	237	100.0	238	100.0	239	100.0	240	100.0
	6	229	95.4	226	90.4	227	91.4	228	92.4	229	93.4	230	94.4	231	95.4	232	96.4	233	97.4	234	98.4	235	99.4	236	100.0	237	100.0	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0
	7	229	92.3	227	90.7	228	91.7	229	92.7	230	93.7	231	94.7	232	95.7	233	96.7	234	97.7	235	98.7	236	99.7	237	100.0	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0
	8	248	100.0	228	92.3	229	93.3	230	94.3	231	95.3	232	96.3	233	97.3	234	98.3	235	99.3	236	100.0	237	100.0	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0
	9	234	97.5	229	92.3	230	93.3	231	94.3	232	95.3	233	96.3	234	97.3	235	98.3	236	99.3	237	100.0	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0
	10	242	97.6	230	93.3	231	94.3	232	95.3	233	96.3	234	97.3	235	98.3	236	99.3	237	100.0	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0
	11	198	81.7	231	93.3	232	94.3	233	95.3	234	96.3	235	97.3	236	98.3	237	99.3	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0
	12	246	96.2	232	94.3	233	95.3	234	96.3	235	97.3	236	98.3	237	99.3	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0
1991	1	247	96.6	233	95.3	234	96.3	235	97.3	236	98.3	237	99.3	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0
	2	203	90.6	234	96.3	235	97.3	236	98.3	237	99.3	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0
	3	247	96.6	235	97.3	236	98.3	237	99.3	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0
	4	210	87.5	236	98.3	237	99.3	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0
	5	239	96.4	237	99.3	238	100.0	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0
	6	235	97.9	238	99.3	239	100.0	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0
	7	240	96.8	239	99.3	240	100.0	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0
	8	223	89.9	240	99.3	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0
	9	237	96.8	241	100.0	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0	256	100.0
	10	217	87.5	242	100.0	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0	256	100.0	257	100.0
	11	237	96.8	243	100.0	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0	256	100.0	257	100.0	258	100.0
	12	246	96.2	244	100.0	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0	256	100.0	257	100.0	258	100.0	259	100.0
1992	1	247	96.6	245	100.0	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0	256	100.0	257	100.0	258	100.0	259	100.0	260	100.0
	2	203	90.6	246	100.0	247	100.0	248	100.0	249	100.0	250	100.0	251	100.0	252	100.0	253	100.0	254	100.0	255	100.0	256	100.0	257	100.0	258	100.0	259	100.0	260	100.0	261	100.0
	3																																		

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
	<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0

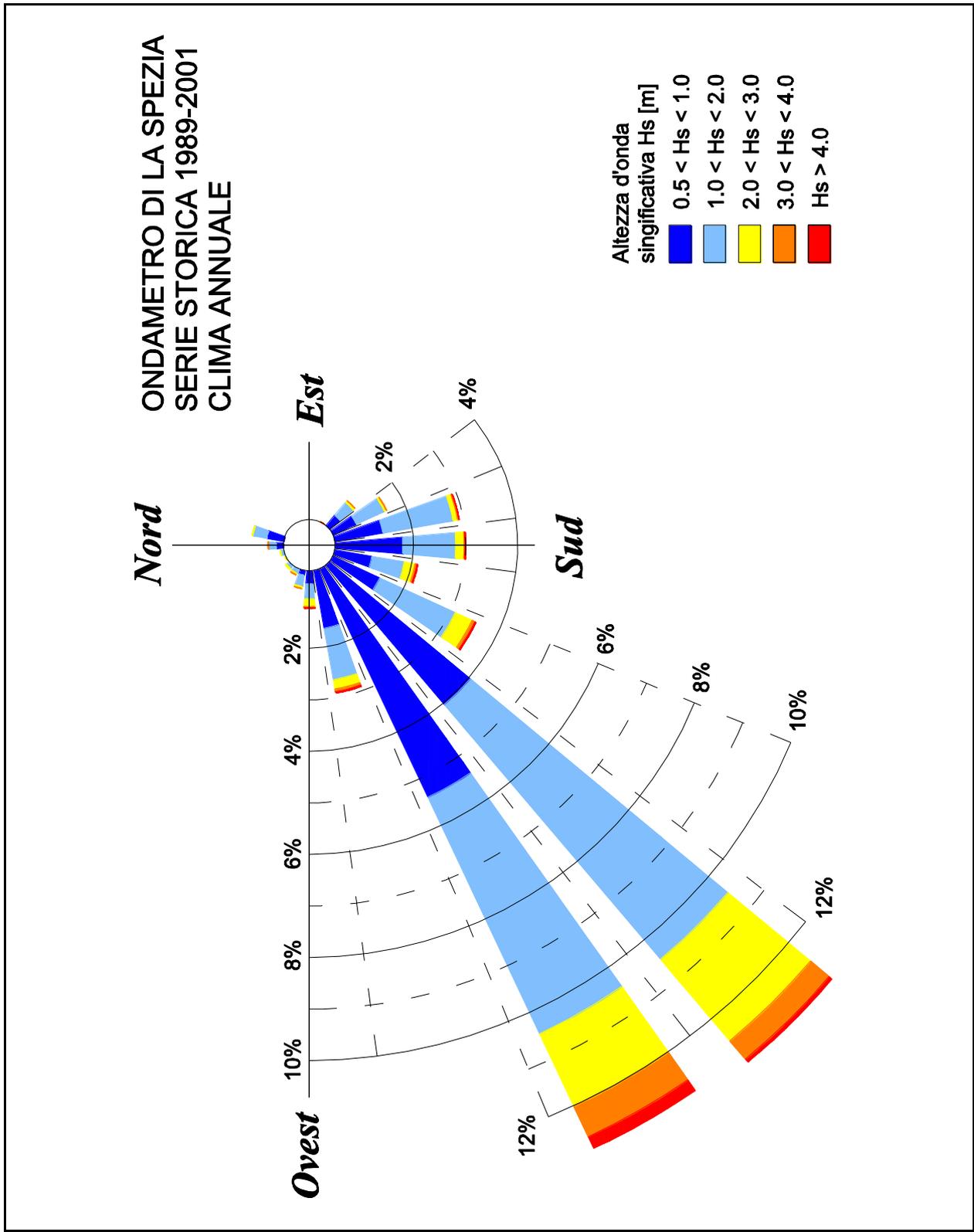


Figura 5. Rosa di distribuzione degli eventi registrati dalla boa ondometrica RON - La Spezia nel periodo luglio 1989- giugno 2001.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

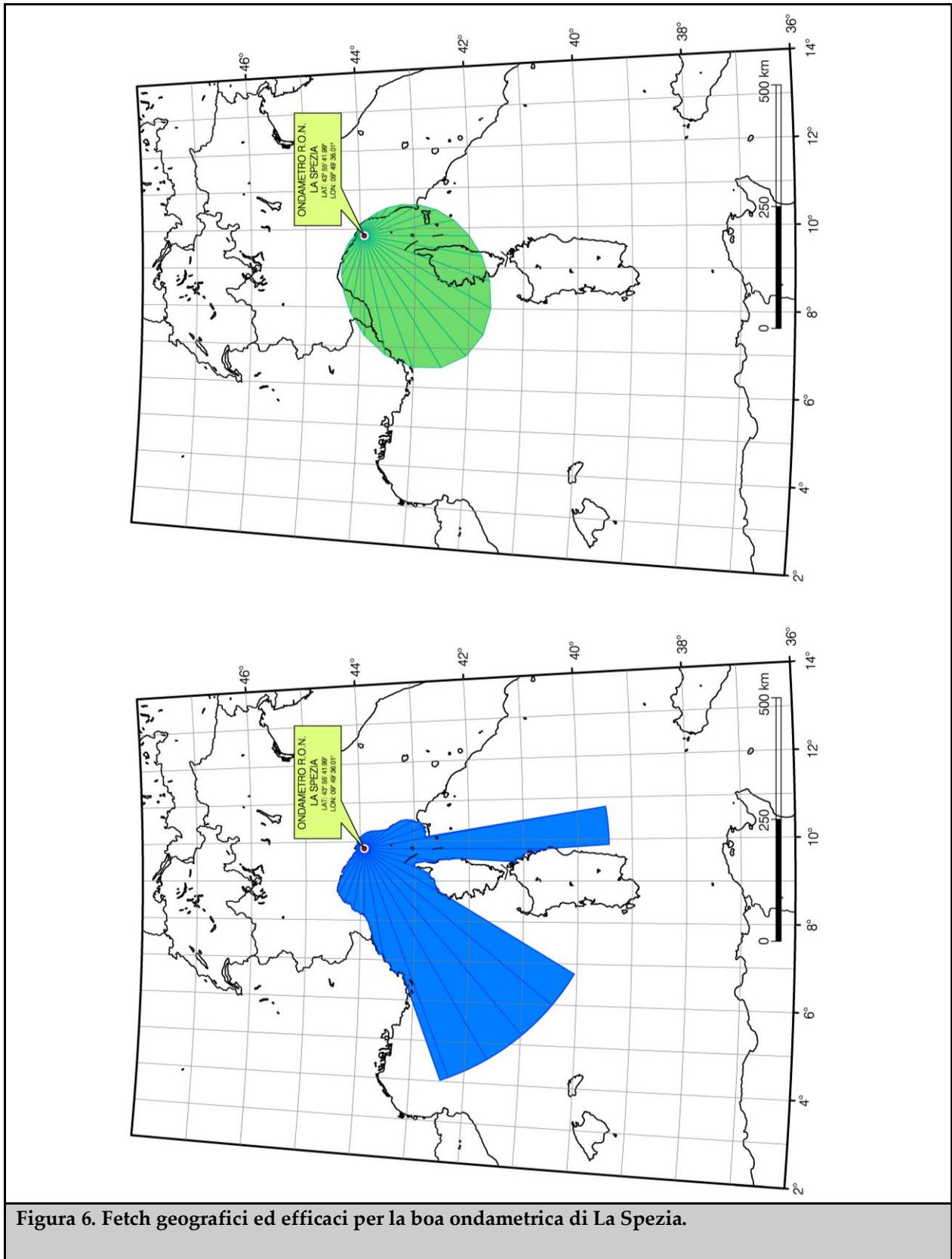
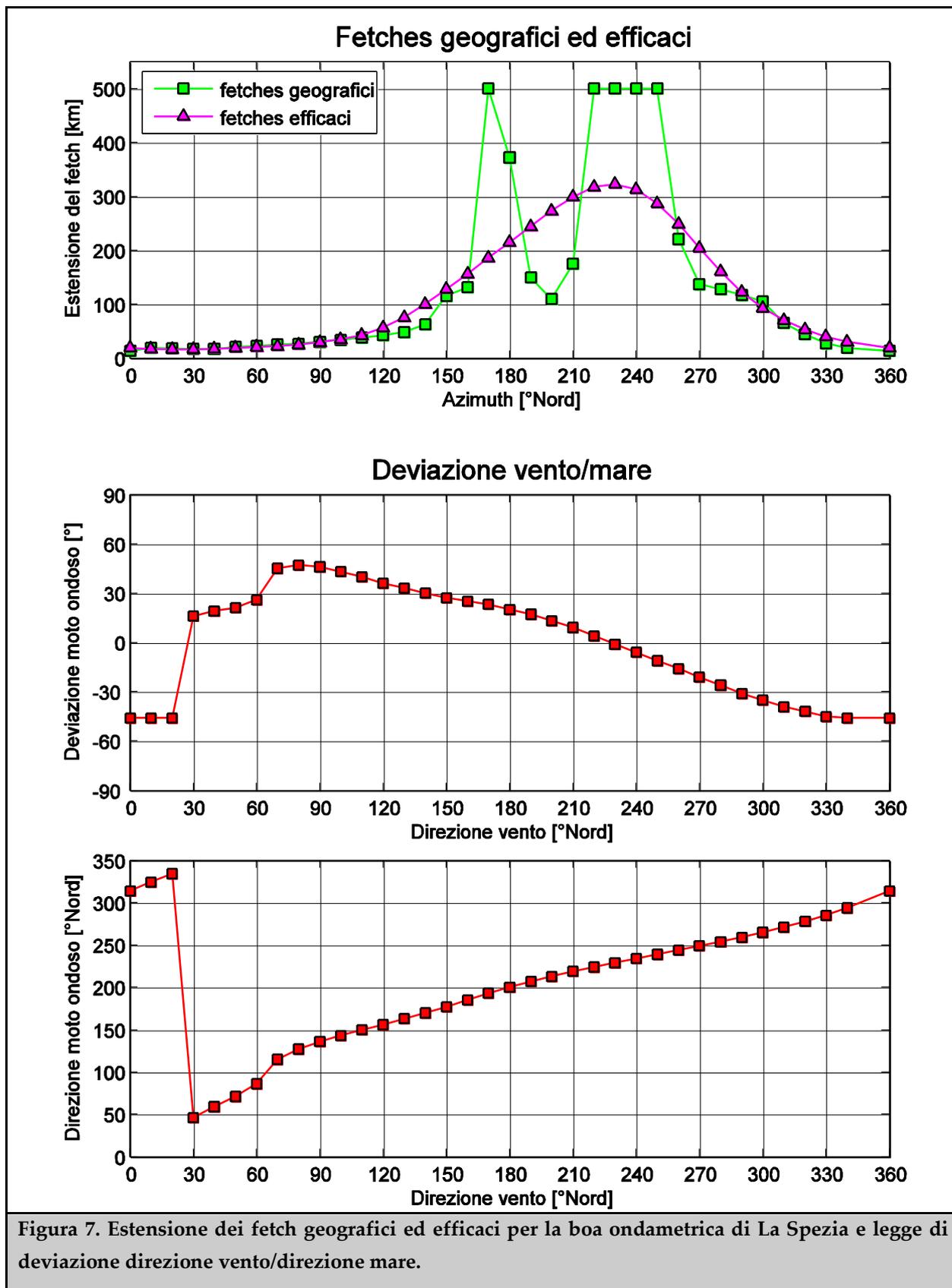


Figura 6. Fetch geografici ed efficaci per la boa ondometrica di La Spezia.



 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

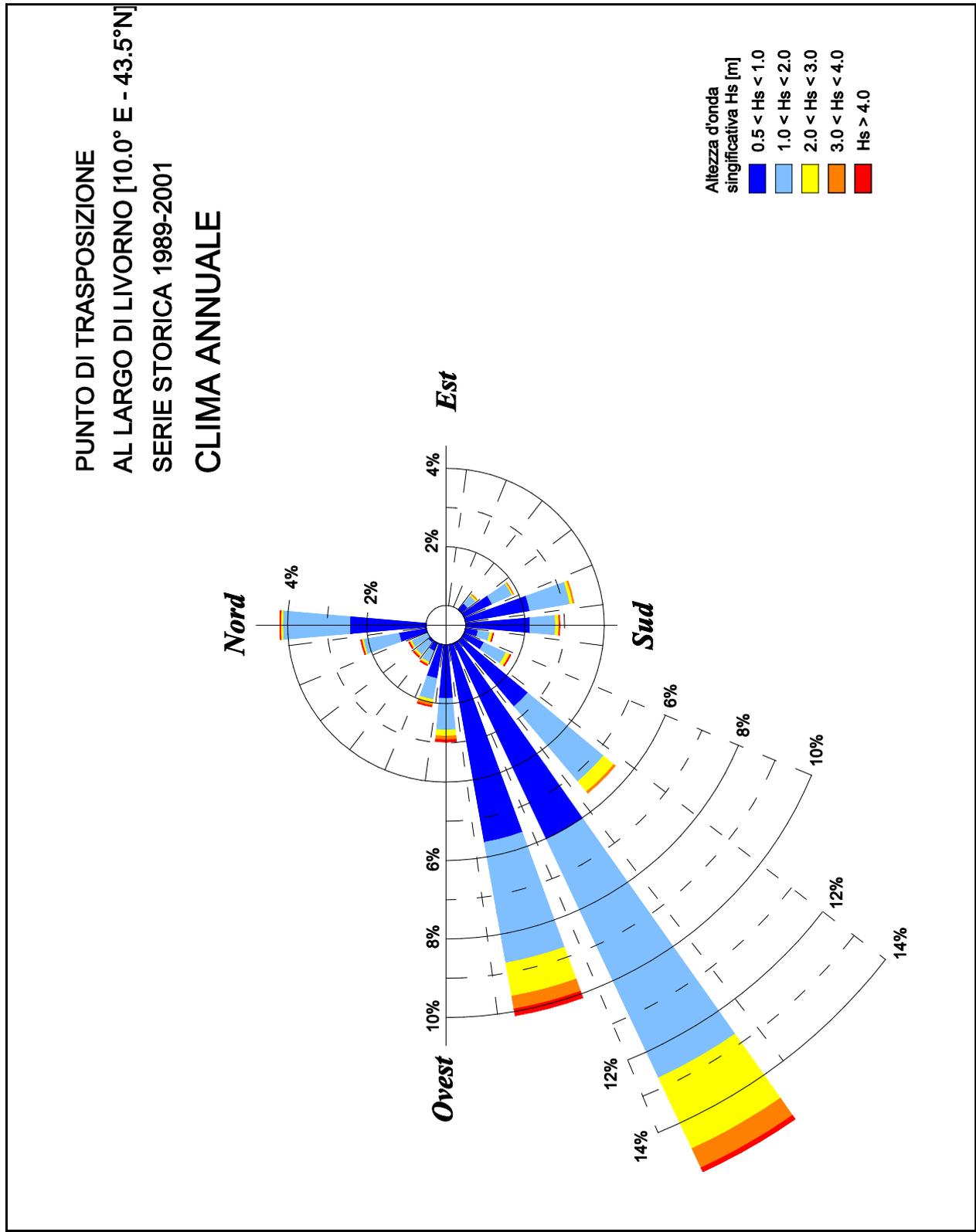


Figura 8. Rosa di distribuzione degli eventi di moto ondoso superiori a Hs=0.5 m su base annuale, per il punto di trasposizione al largo di Livorno - periodo luglio 1989- giugno 2001.



Autorità Portuale di Livorno

Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarino

Data: marzo 2013

10

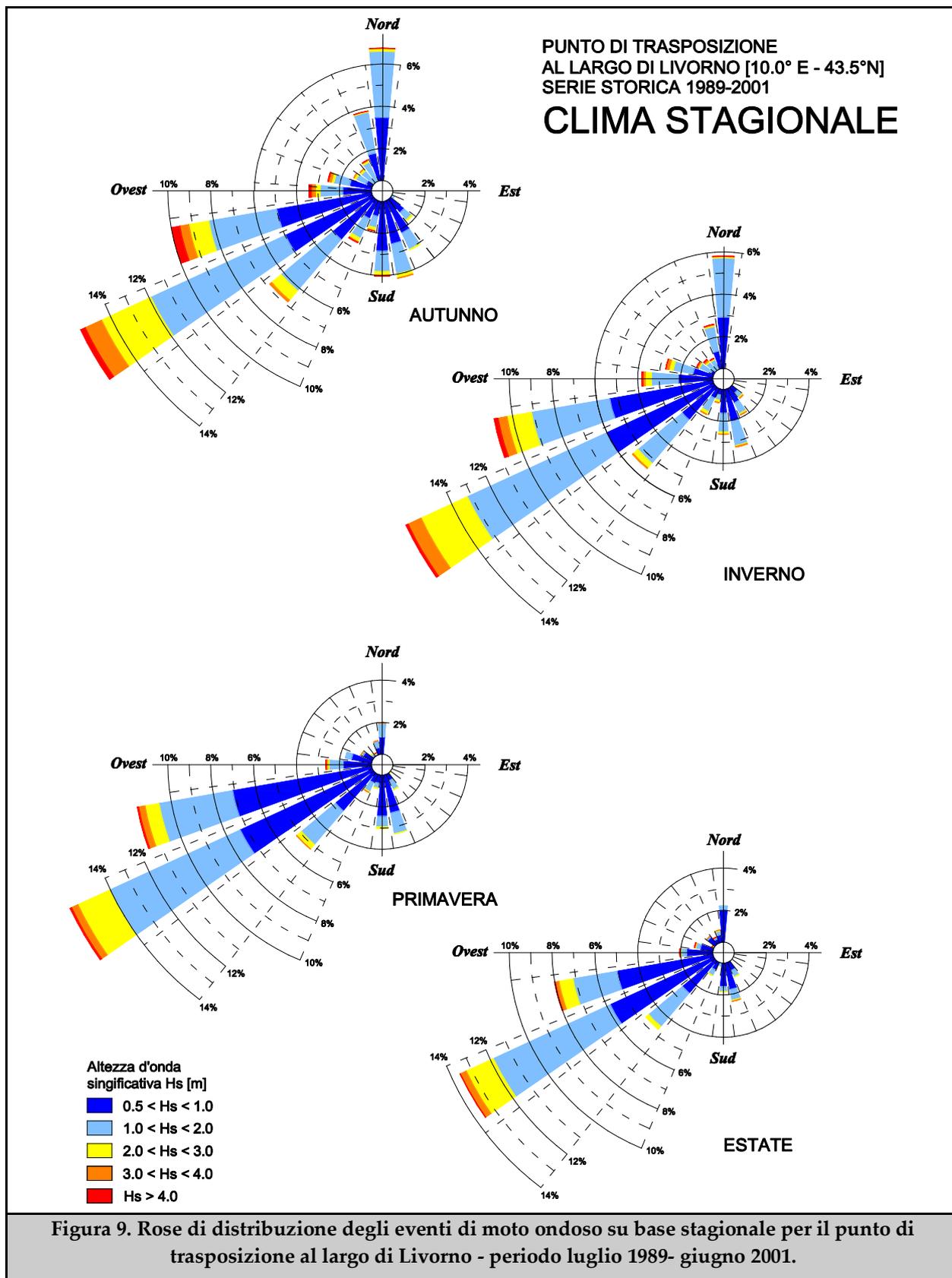
010

RR

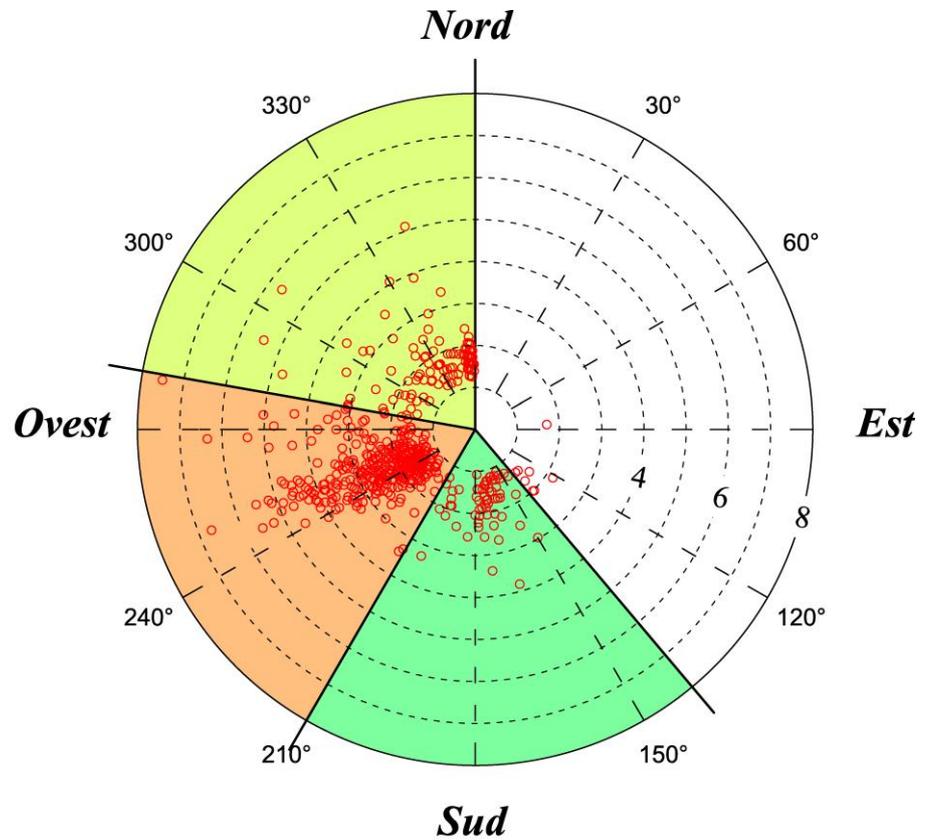
010

-0

MAR



 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR



SERIE TRASPOSTA AL LARGO DI LIVORNO  
SERIE STORICA 1989-2001  
SCATTER PLOT DEI COLMI DELLE MAREGGIATE

**Figura 10. Scatter plot dei colmi delle mareggiate al largo di Livorno  
periodo di riferimento luglio 1989 – giugno 2001**



Autorità Portuale di Livorno

Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarino

Data: marzo 2013

10

010

RR

010

-0

MAR

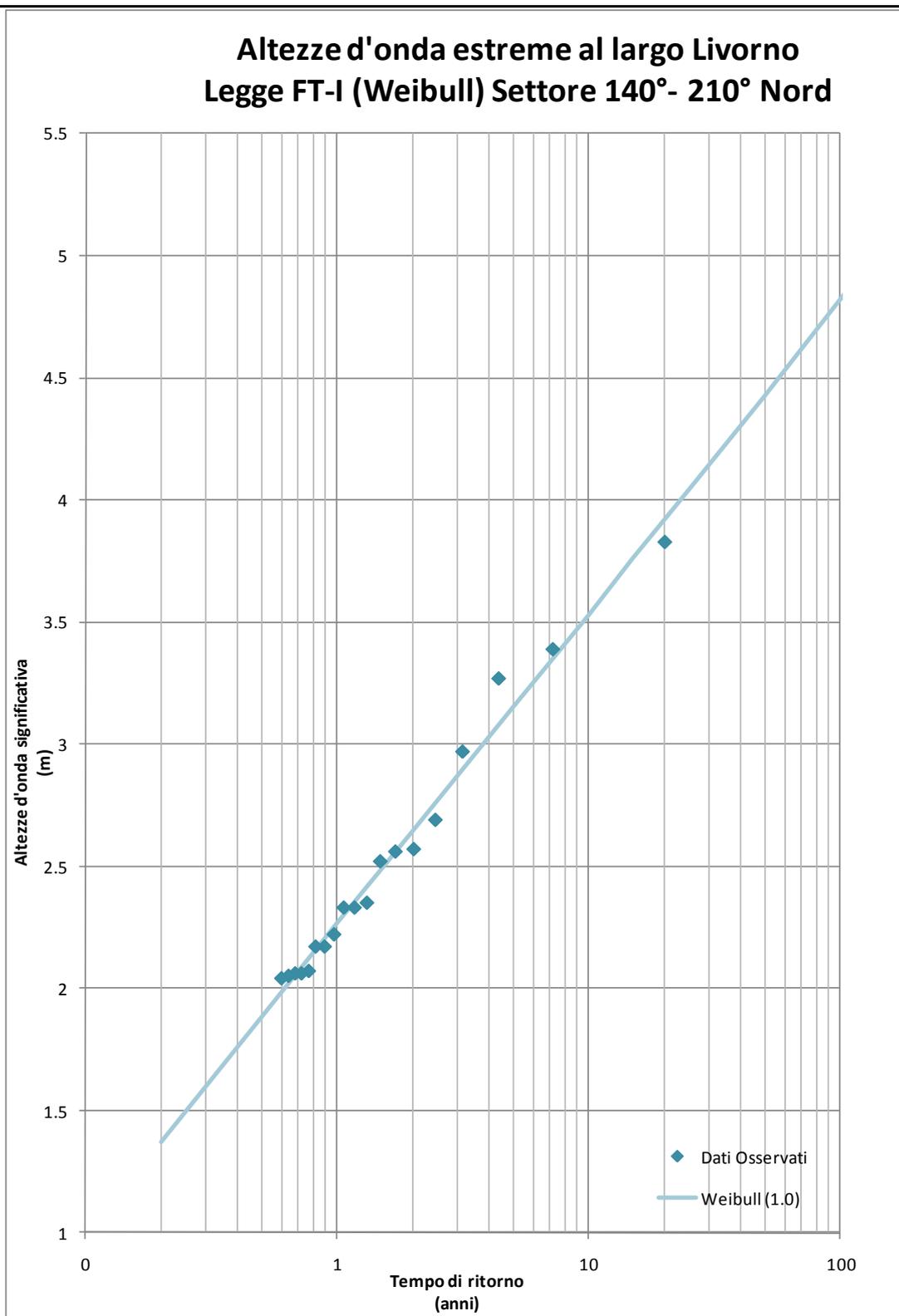


Figura 11. Legge di regolarizzazione degli eventi estremi di moto ondoso al largo di Livorno nel periodo 1989 – 2001. Settore di traversia 140°-210°N.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

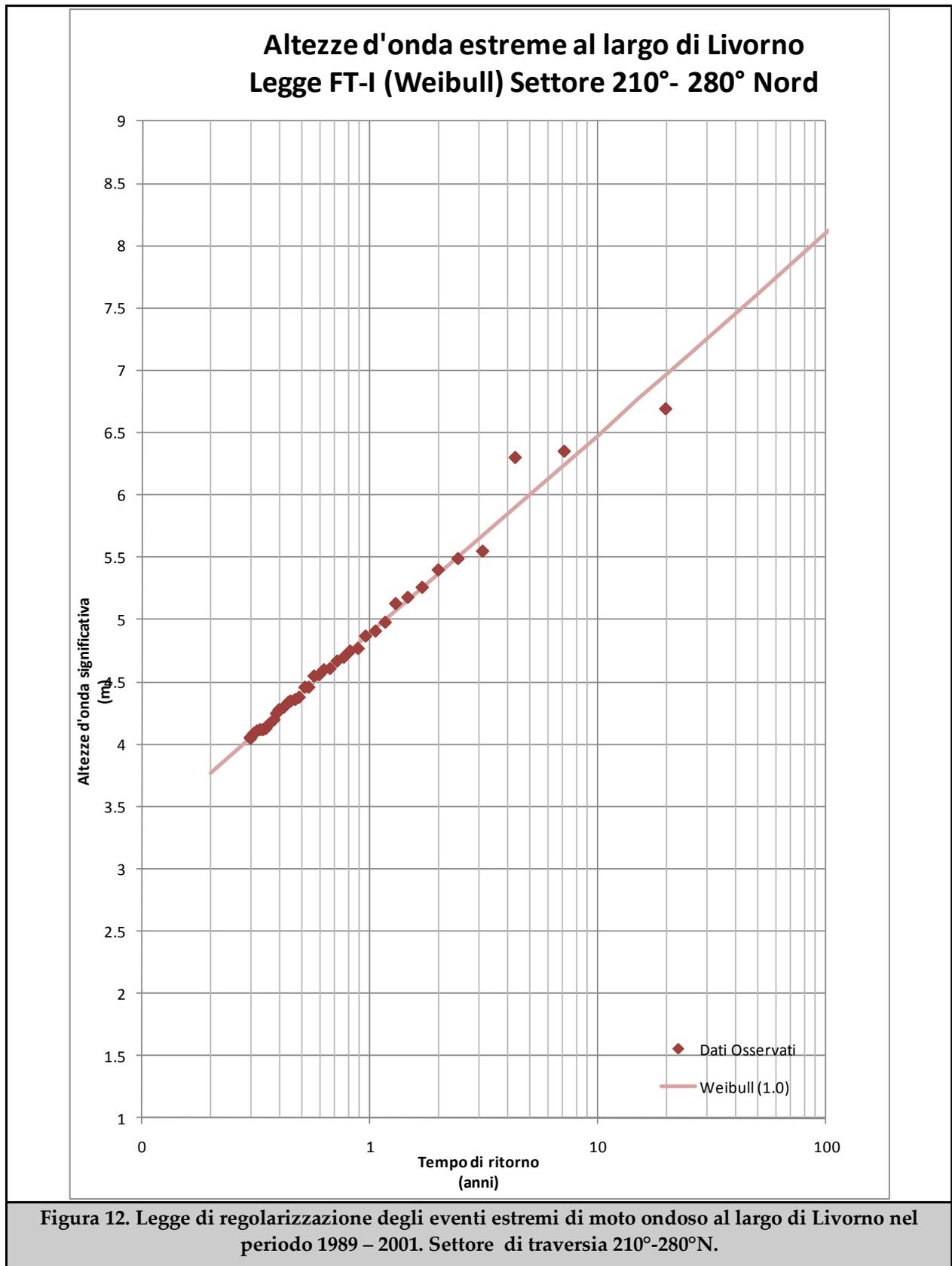
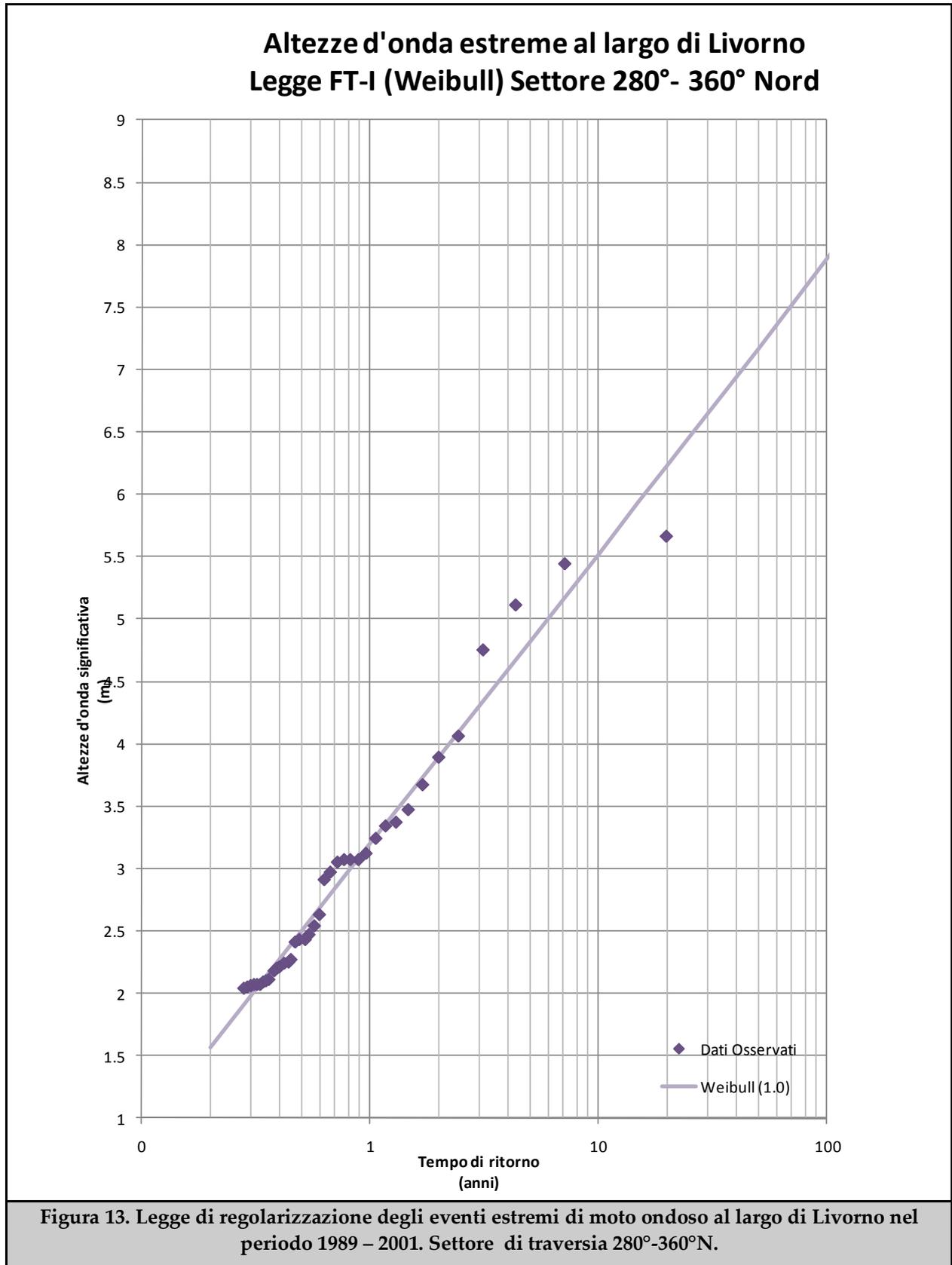
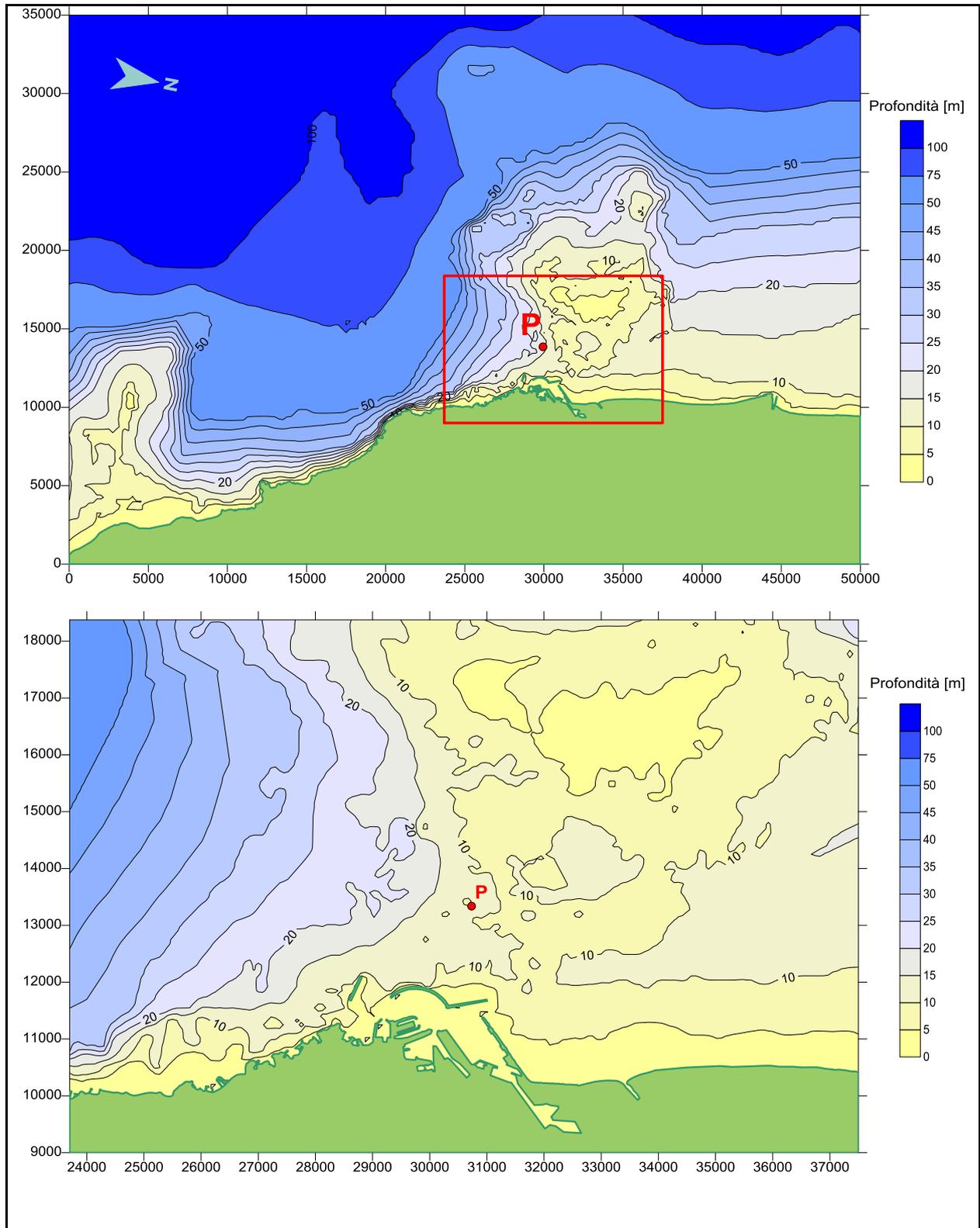


Figura 12. Legge di regolarizzazione degli eventi estremi di moto ondoso al largo di Livorno nel periodo 1989 – 2001. Settore di traversia 210°-280°N.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR



 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR



**Figura 14. Griglia di calcolo adottata per i modelli numerici di propagazione del moto ondoso MEROPE e SWAN. In alto griglia principale, in basso griglia nested.**

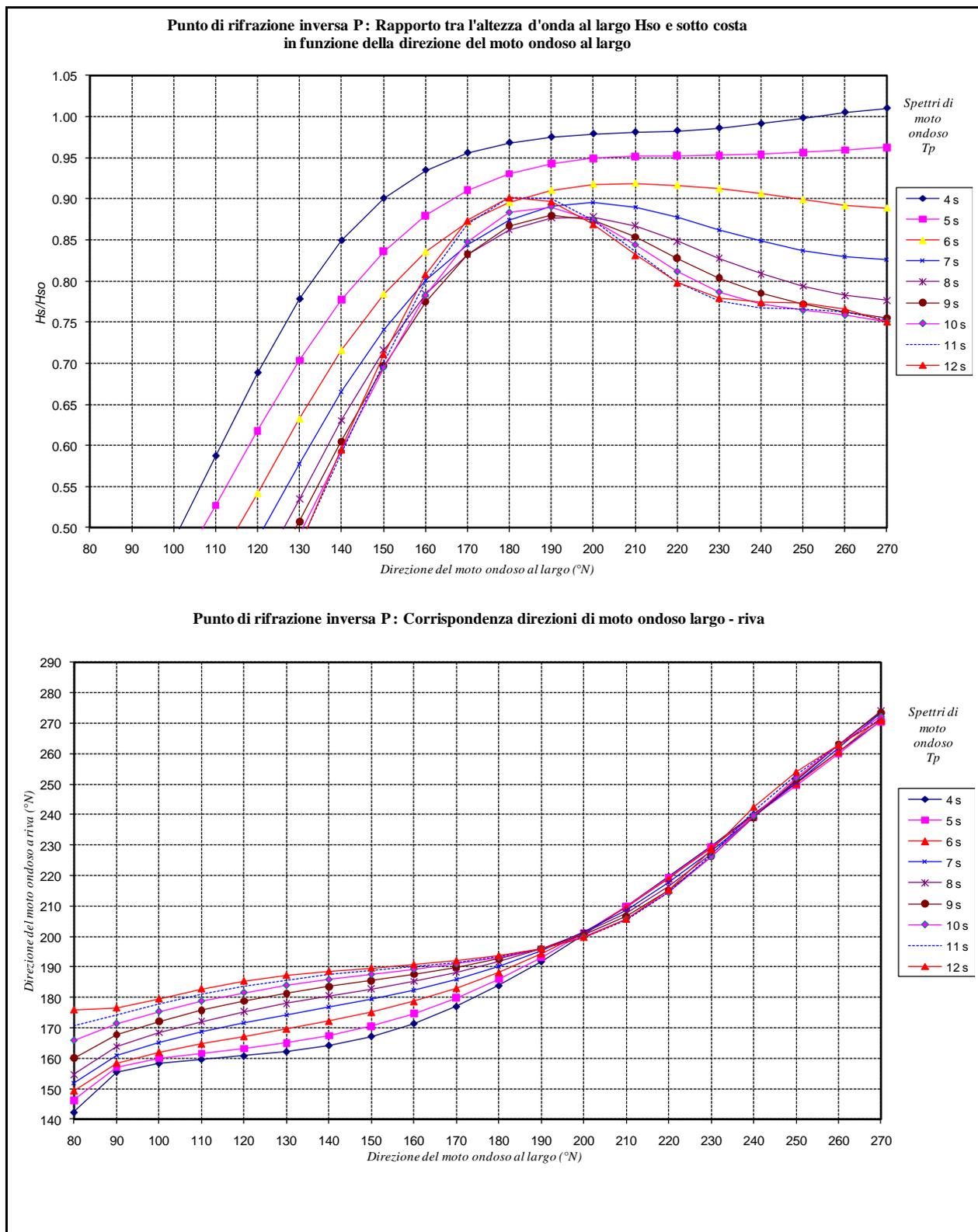
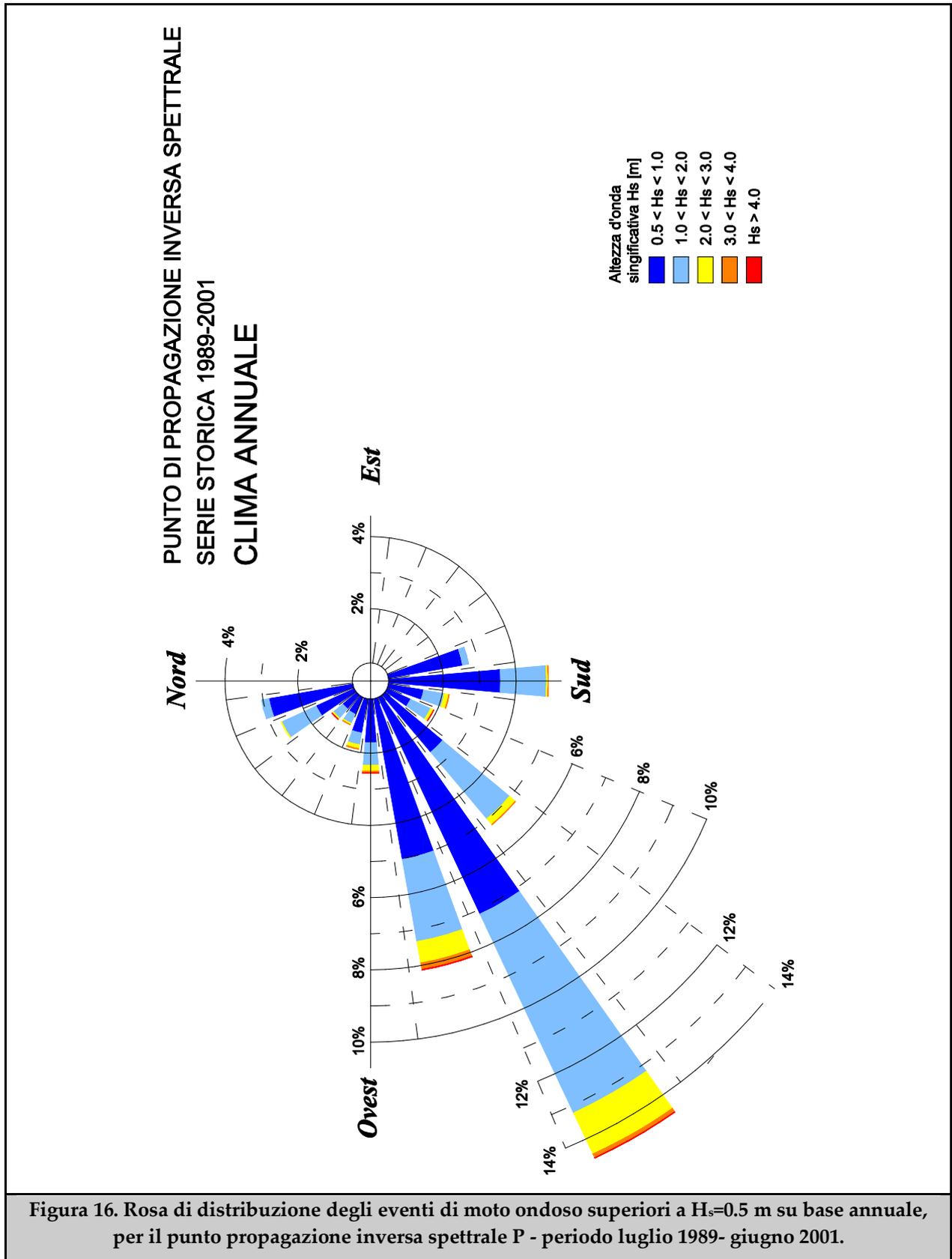


Figura 15. Diagrammi di trasformazione ottenuti nel punto P per gli spettri più rappresentativi.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR





**Autorità Portuale di Livorno**

**Piano Regolatore Portuale 2012**

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarino

Data: marzo 2013

10

010

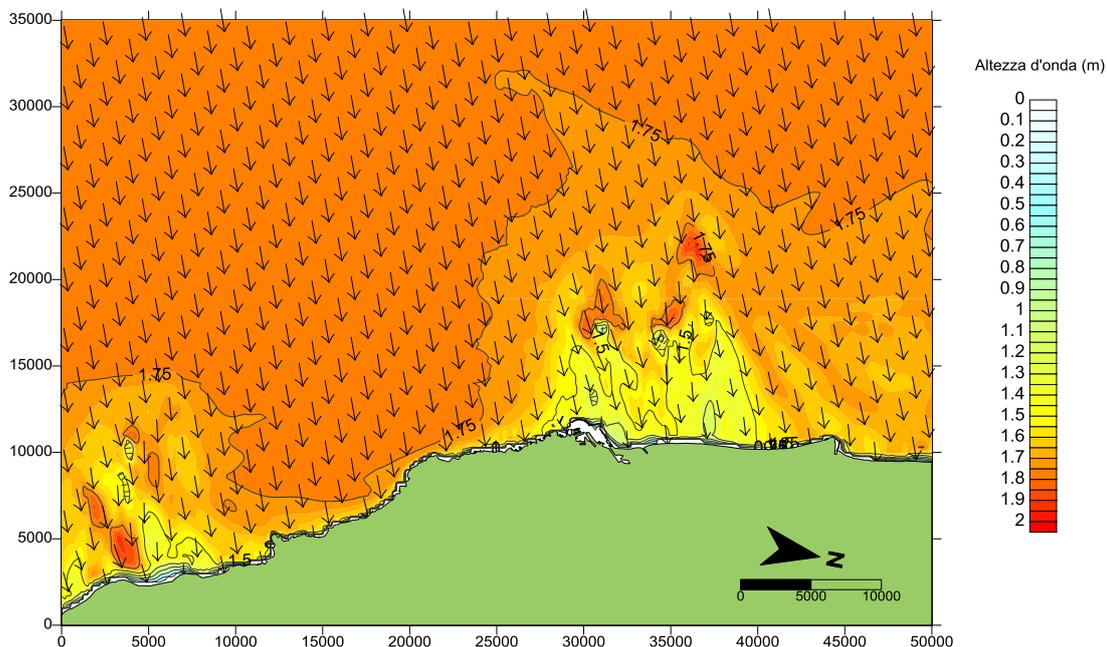
RR

010

-0

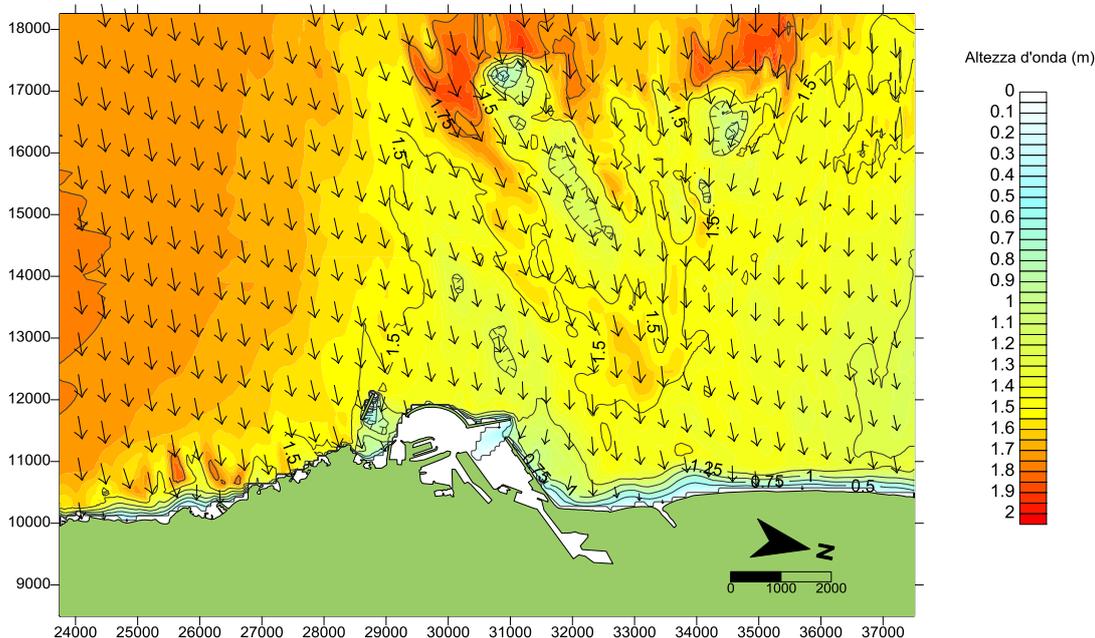
MAR

**Porto di Livorno** Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



Altezza significativa al largo:  $H_o=1.75$  m  
Periodo di picco al largo  $T_p: 6.70$  s  
Direzione al largo:  $250^\circ N$

**Porto di Livorno** Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa

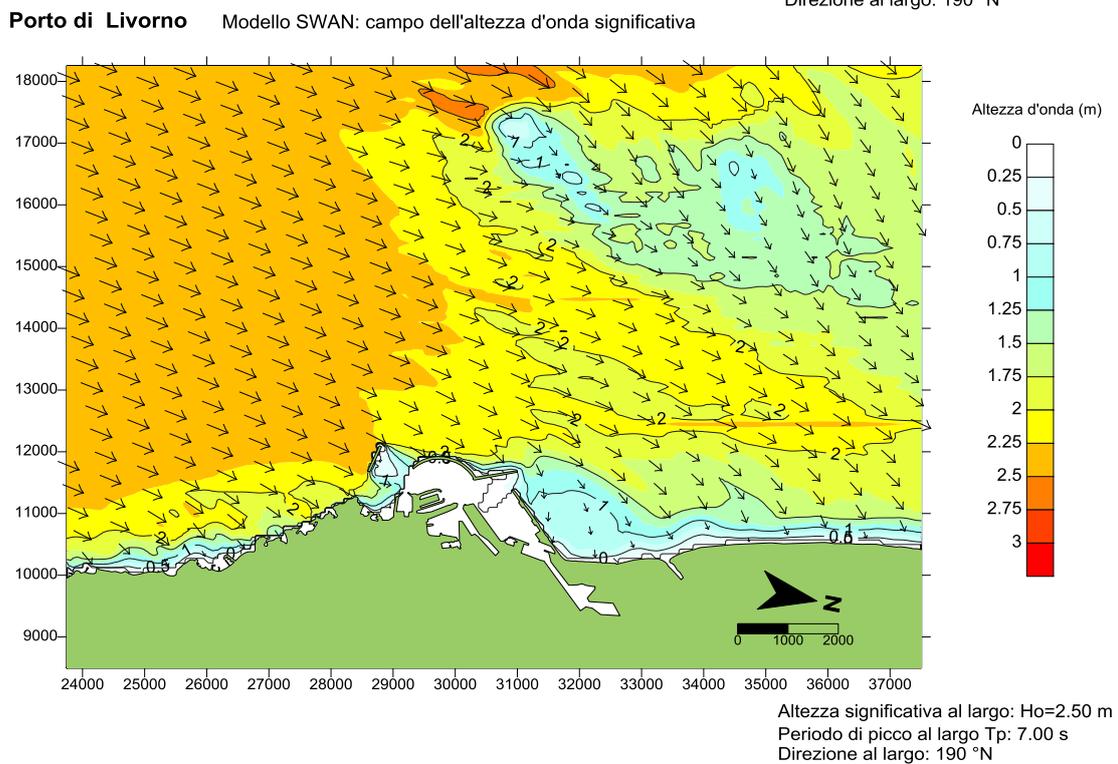
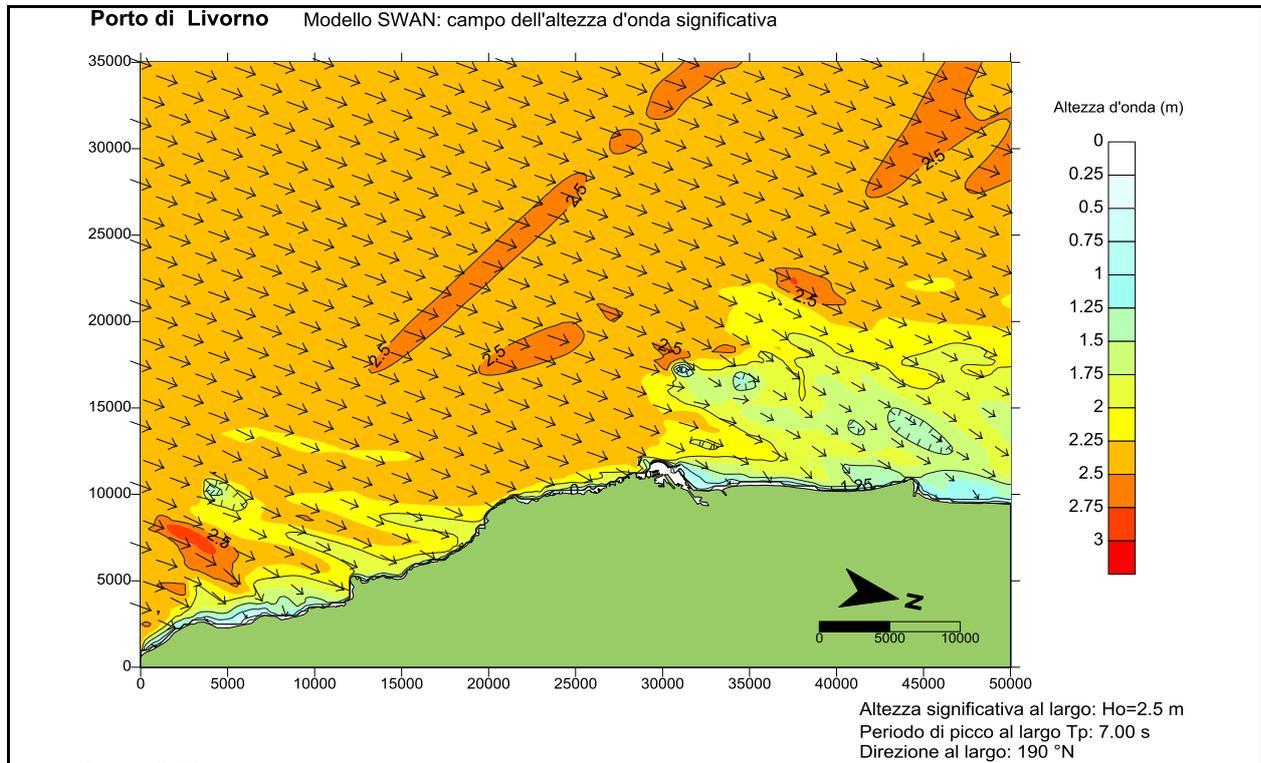


Altezza significativa al largo:  $H_o=1.75$  m  
Periodo di picco al largo  $T_p: 6.70$  s  
Direzione al largo:  $250^\circ N$

**Figura 17. Risultato della propagazione con il modello numerico SWAN per l'evento:**

**Hs: 1.75 m -  $T_p$ : 6.70 s - Dir:  $250^\circ N$**

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciuro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR



**Figura 18. Risultato della propagazione con il modello numerico SWAN per l'evento:**

**Hs: 2.50 m - Tp: 7.0 s - Dir: 190°N**



**Autorità Portuale di Livorno**

**Piano Regolatore Portuale 2012**

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarino

Data: marzo 2013

10

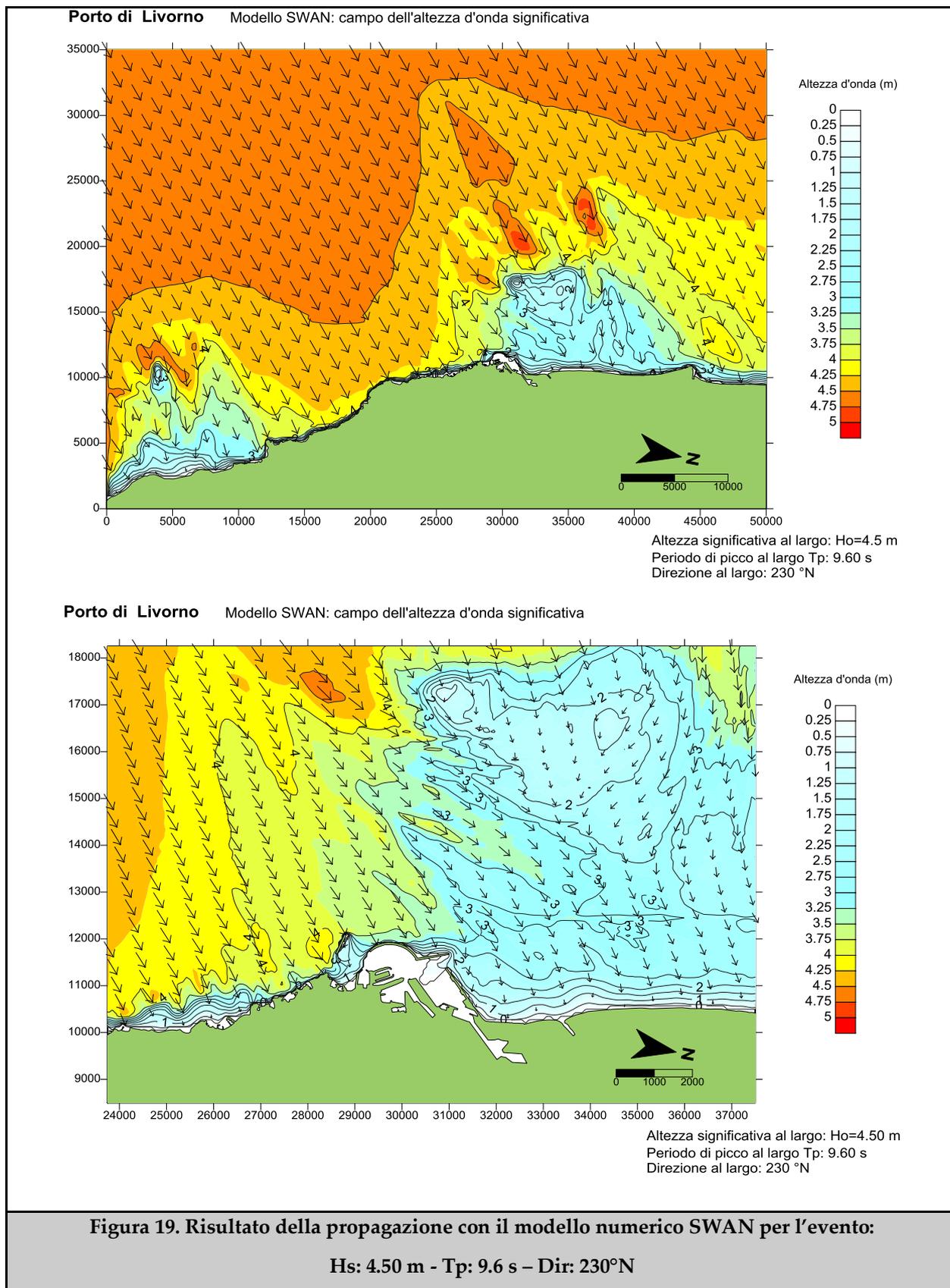
010

RR

010

-0

MAR





**Autorità Portuale di Livorno**

**Piano Regolatore Portuale 2012**

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarino

Data: marzo 2013

10

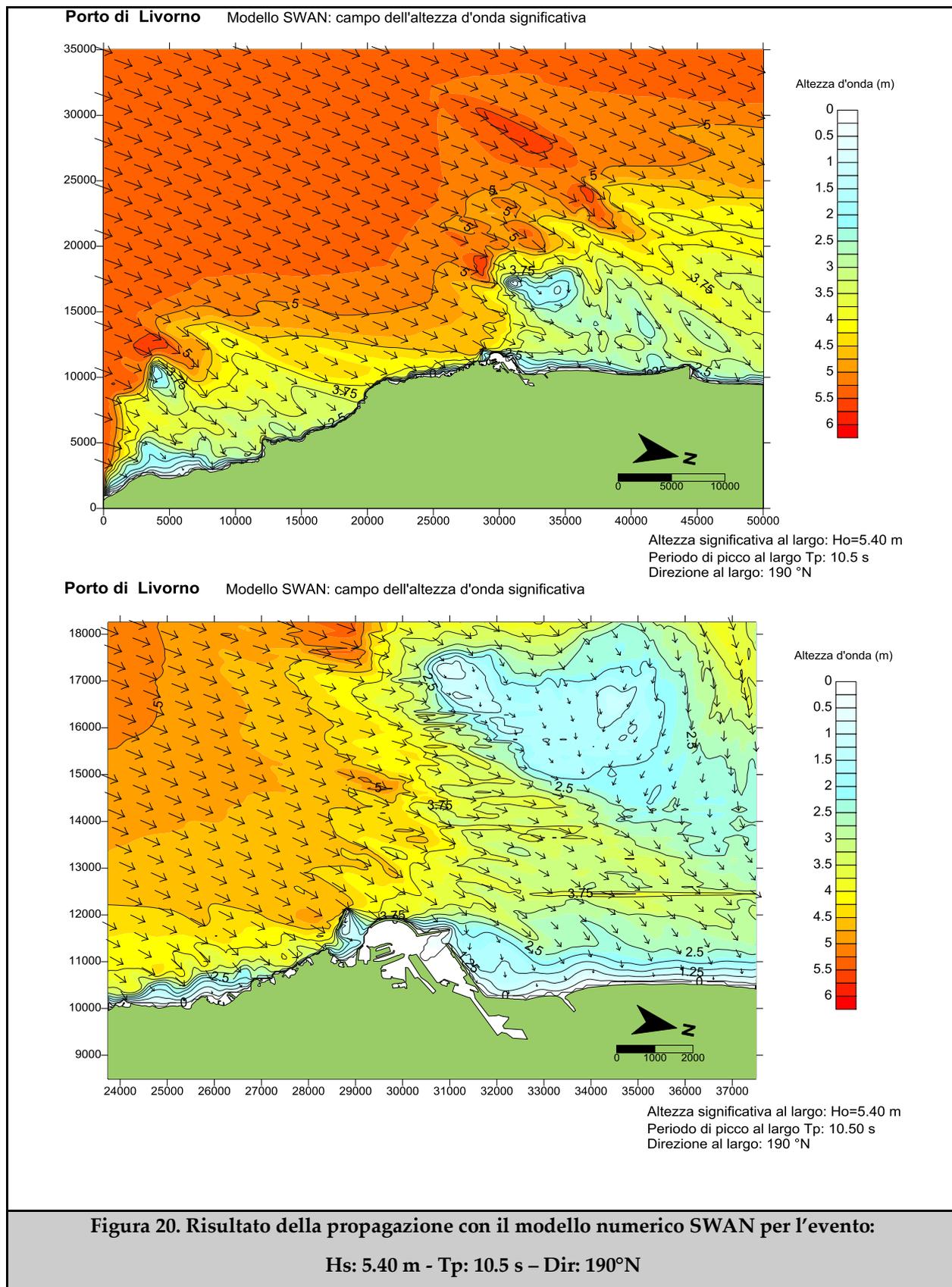
010

RR

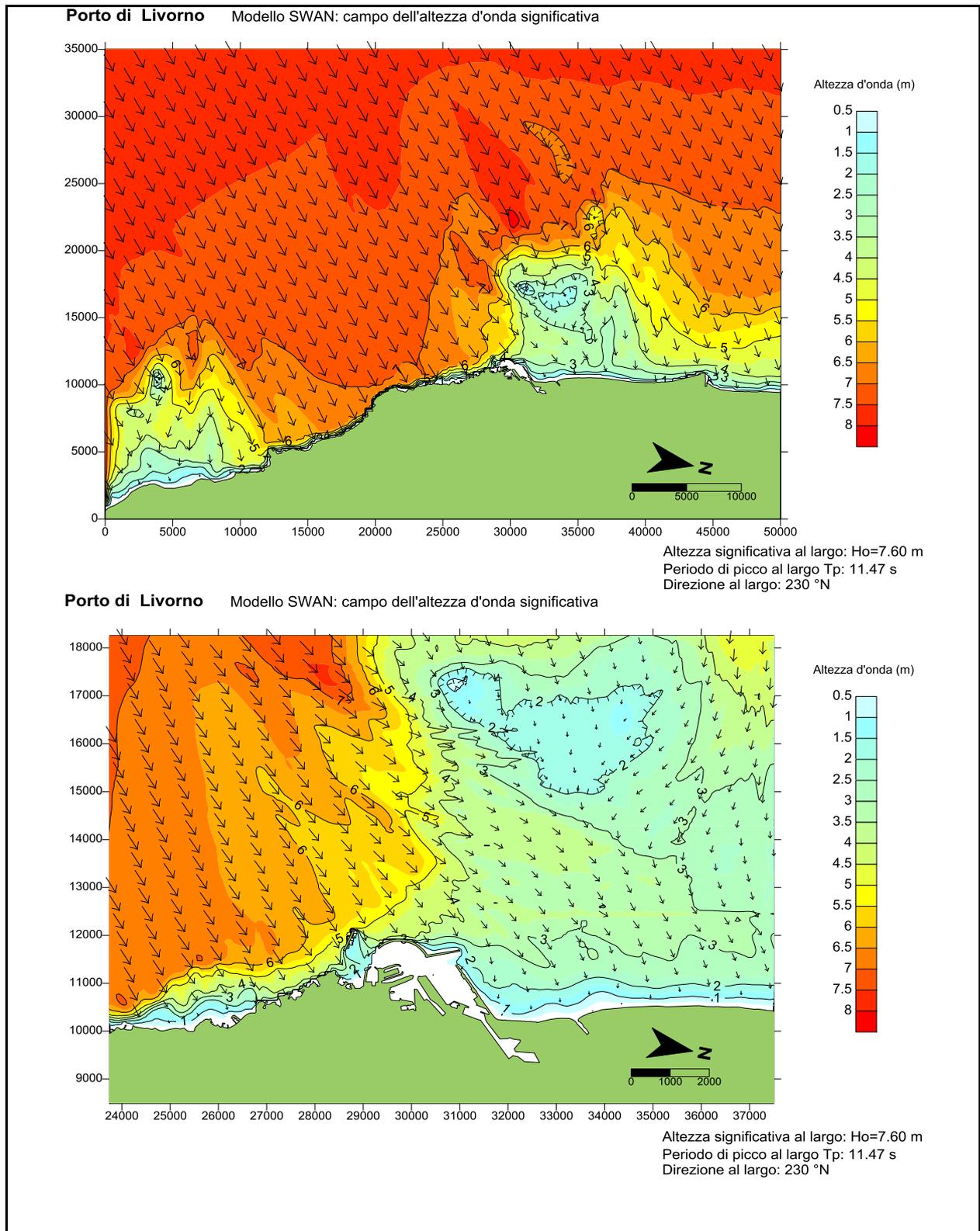
010

-0

MAR



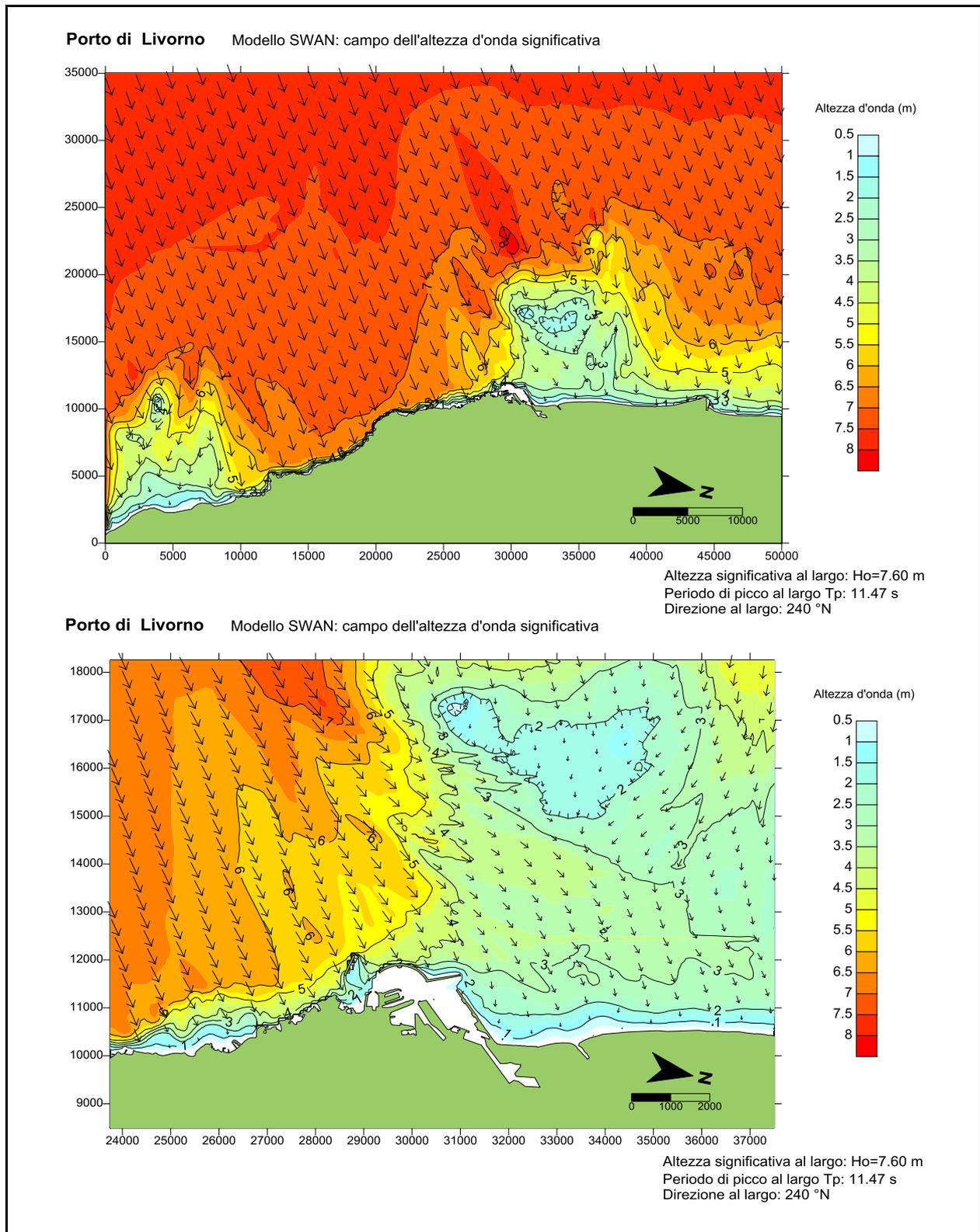
 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino				
	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0



**Figura 21. Risultato della propagazione con il modello numerico SWAN per l'evento:**

**$H_s: 7.60$  m -  $T_p: 11.47$  s - Dir:  $230^\circ N$**

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR



**Figura 22. Risultato della propagazione con il modello numerico SWAN per l'evento:**

**Hs: 7.60 m -  $T_p$ : 11.47 s - Dir:  $240^\circ$  N**



Autorità Portuale di Livorno

Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario

Data: marzo 2013

10

010

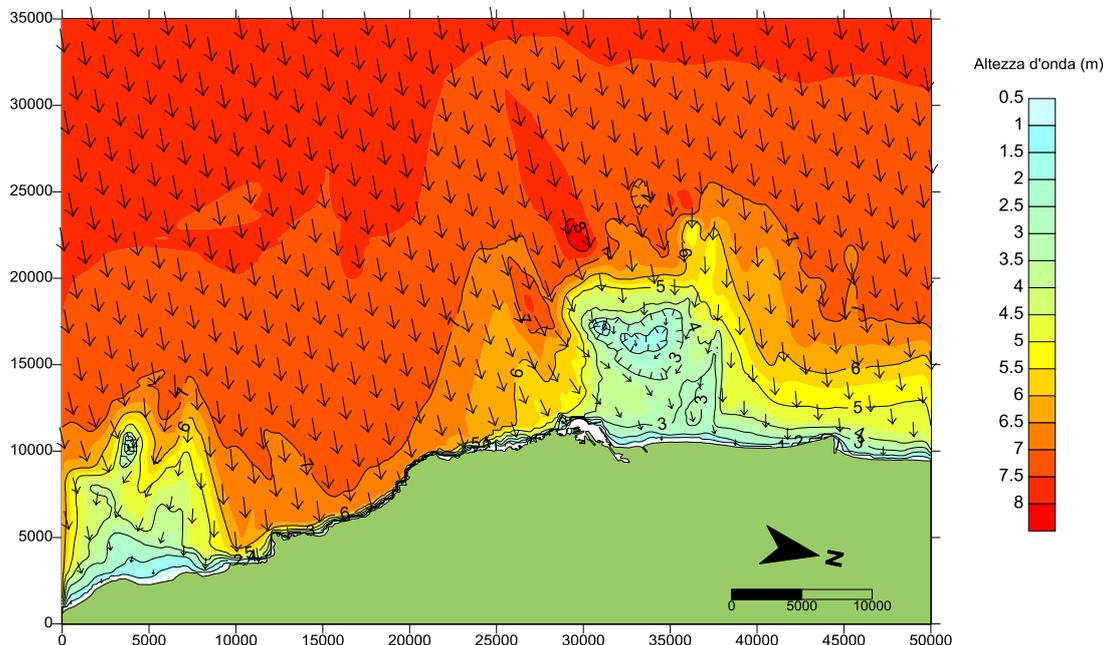
RR

010

-0

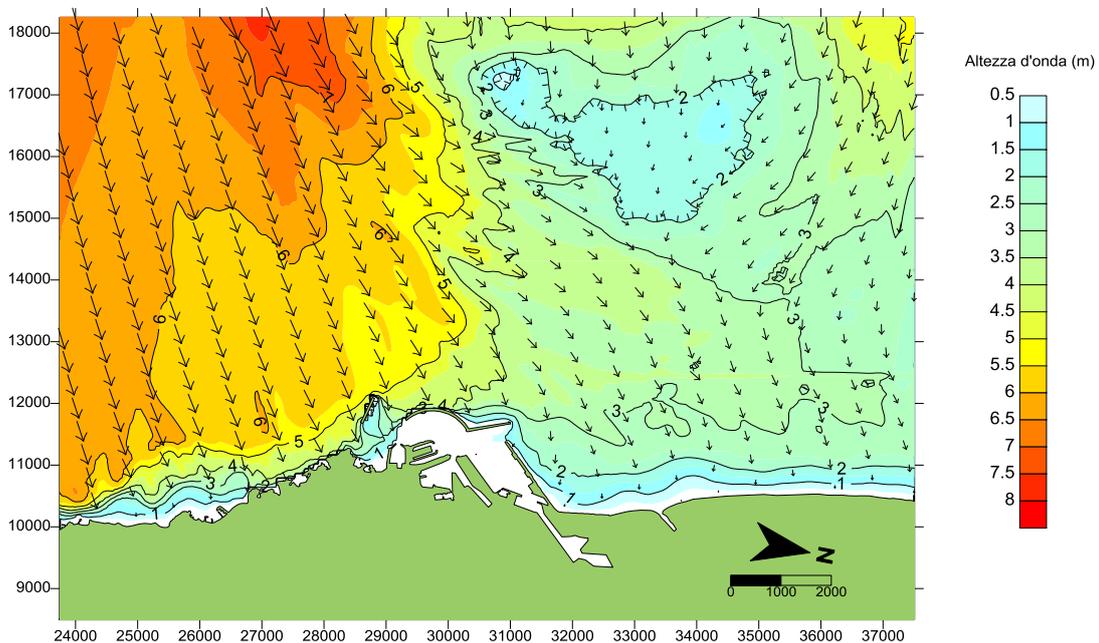
MAR

Porto di Livorno Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



Altezza significativa al largo:  $H_o=7.60$  m  
Periodo di picco al largo  $T_p: 11.47$  s  
Direzione al largo:  $250^\circ N$

Porto di Livorno Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa



Altezza significativa al largo:  $H_o=7.60$  m  
Periodo di picco al largo  $T_p: 11.47$  s  
Direzione al largo:  $250^\circ N$

Figura 23. Risultato della propagazione con il modello numerico SWAN per l'evento:

Hs: 7.60 m -  $T_p: 11.47$  s - Dir:  $250^\circ N$



**Autorità Portuale di Livorno**

**Piano Regolatore Portuale 2012**

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarino

Data: marzo 2013

10

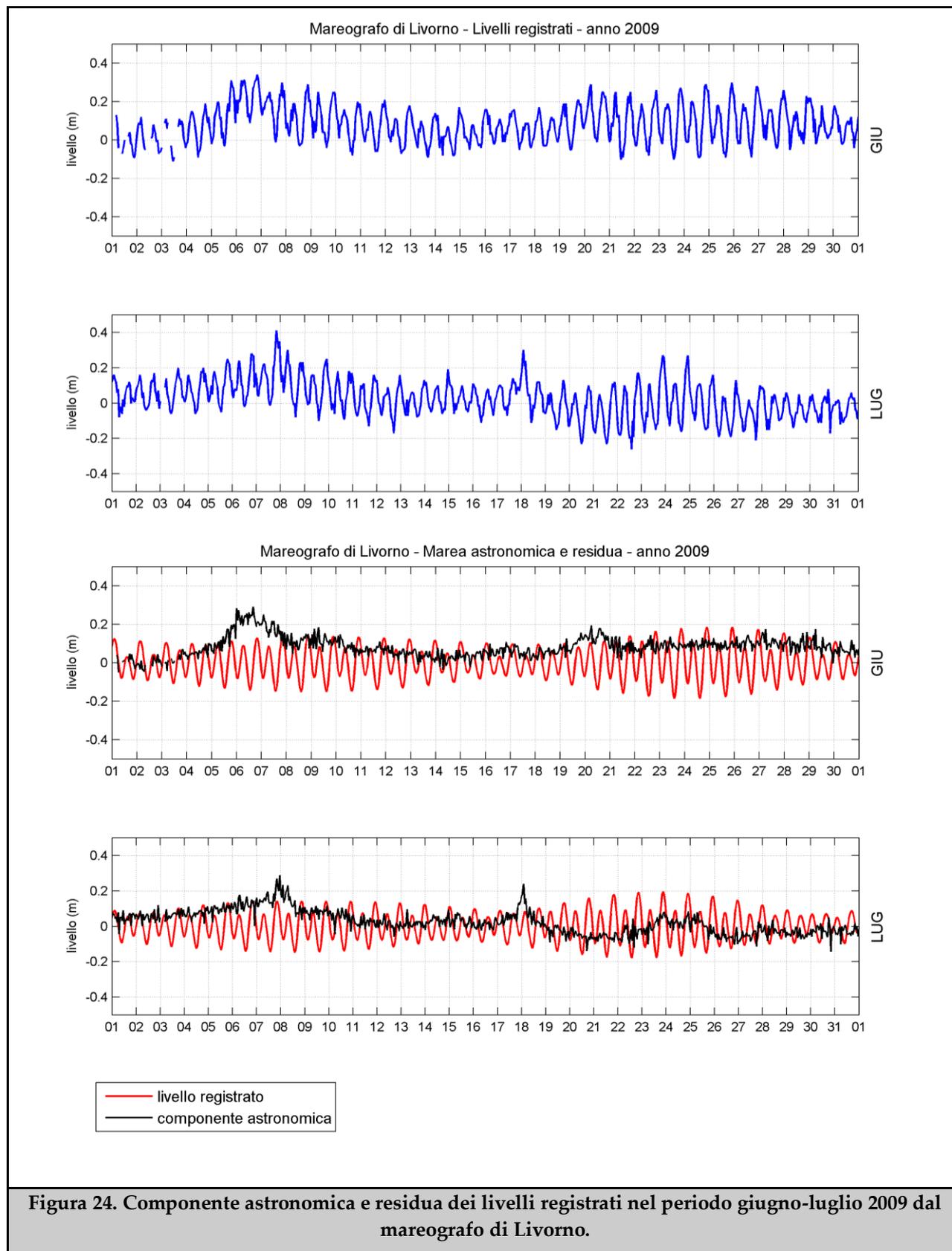
010

RR

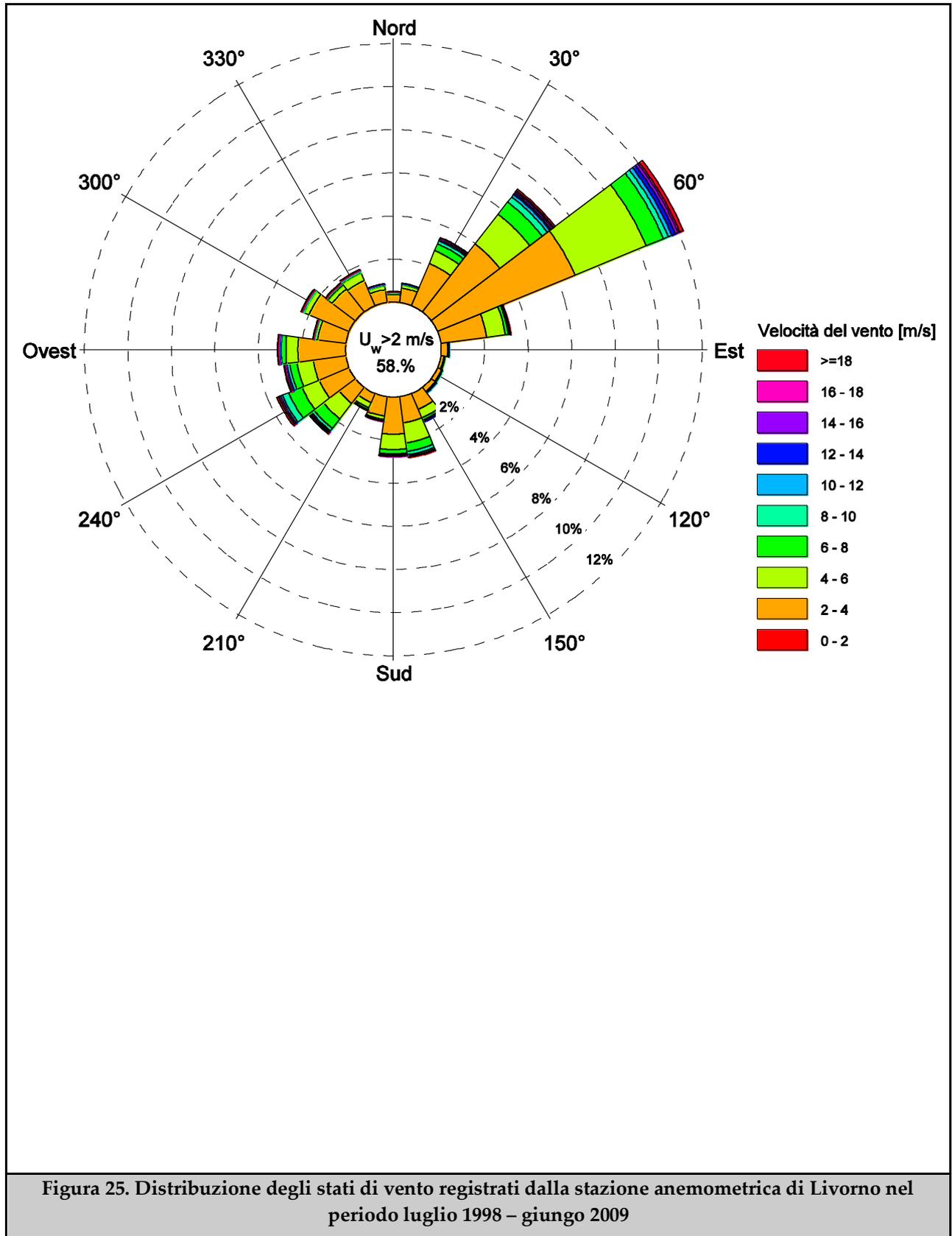
010

-0

MAR



 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
	<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0





Autorità Portuale di Livorno

Piano Regolatore Portuale 2012

Raggruppamento:  
Modimar s.r.l.  
Alberto Noli  
Technital s.p.a.  
Sciro Bureau Veritas s.p.a.  
Acquatecno s.r.l.

Titolo Elaborato: Studio Meteomarino

Data: marzo 2013

10

010

RR

010

-0

MAR

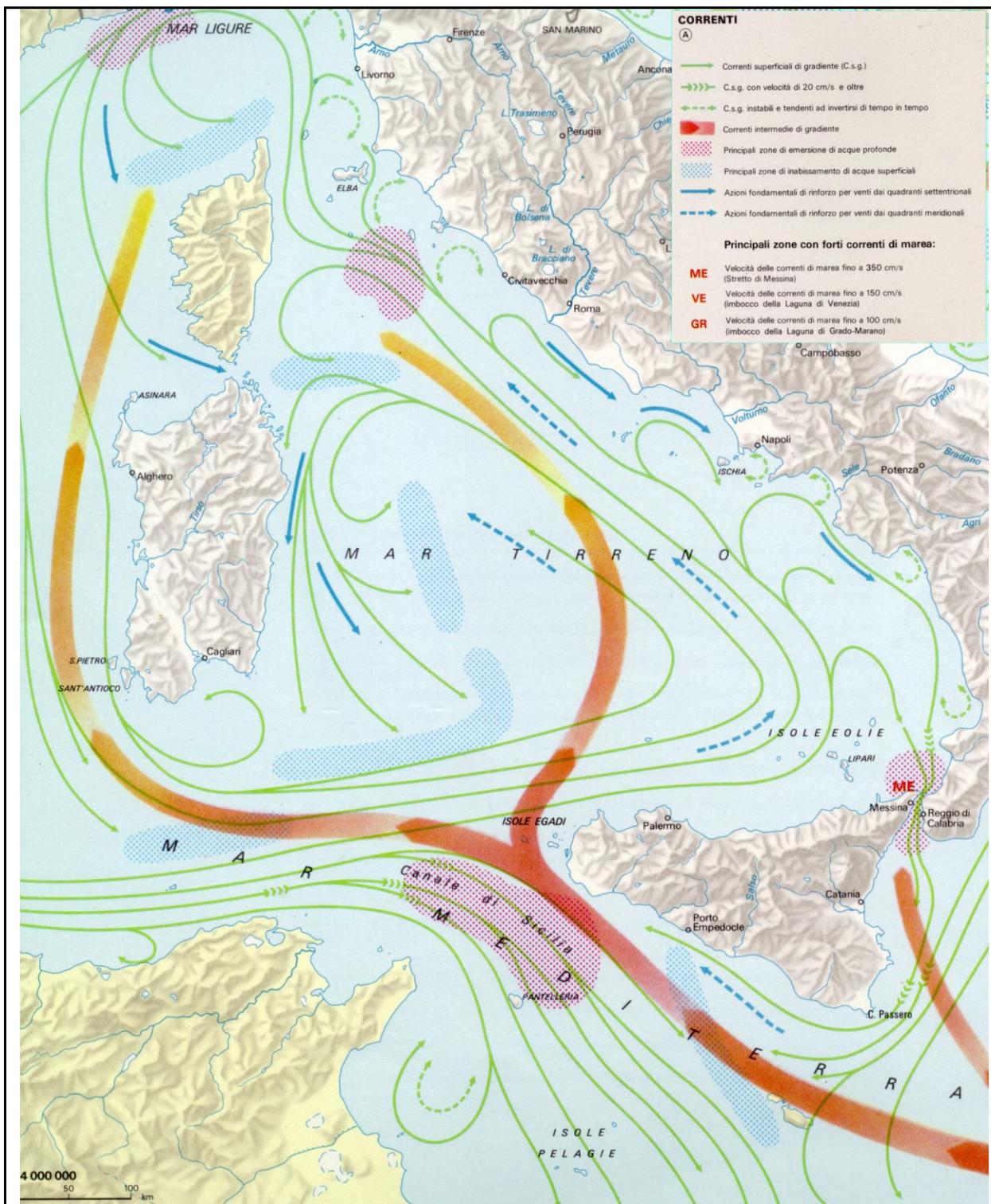


Figura 26. Distribuzione delle correnti nel mar Tirreno.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

## Appendice B - Tabelle

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 1. Estensione dei fetch geografici ed efficaci al largo di Livorno e deviazione direzione vento/mare.**

Direzione (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	61.14	58.25	-30.0	180	500.00	160.63	22.0
10	55.19	50.13	-30.0	190	264.61	177.97	23.0
20	48.41	43.47	-30.0	200	110.72	197.76	21.0
30	41.00	38.00	-29.0	210	82.97	221.60	18.0
40	33.97	33.54	-28.0	220	71.74	248.29	14.0
50	28.69	30.04	-26.0	230	500.00	273.49	9.0
60	26.33	27.66	-24.0	240	500.00	291.05	4.0
70	25.11	26.62	-20.0	250	500.00	295.38	-1.0
80	24.46	27.11	41.0	260	500.00	283.93	-6.0
90	25.63	29.20	44.0	270	247.86	258.37	-12.0
100	30.90	32.96	42.0	280	188.59	224.21	-17.0
110	37.51	38.88	39.0	290	158.08	188.29	-22.0
120	47.60	48.13	35.0	300	149.45	155.99	-26.0
130	58.01	61.86	31.0	310	147.77	129.75	-30.0
140	67.67	80.17	27.0	320	128.54	109.28	-33.0
150	80.03	101.51	24.0	330	96.77	93.03	-35.0
160	81.63	123.17	21.0	340	73.35	79.54	-34.0
170	77.53	142.98	20.0	350	66.65	68.03	-31.0

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario					
	Data: marzo 2013						
	10	010	RR	010	-0	MAR	

**Tabella 2. Distribuzione degli eventi di moto registrati dalla boa ondametrica RON –La Spezia nel periodo di riferimento luglio 1989 – giugno 2001**

Distribuzione annuale del numero di eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.

Boa Ondametrica RON - La Spezia - Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5	
10	76	252	176	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	562
20	94	293	168	46	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	603
30	70	164	83	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	332
40	49	79	25	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	155
50	23	57	27	4	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	115
60	22	56	18	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102
70	21	47	11	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	84
80	19	29	13	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64
90	14	34	11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	61
100	23	42	14	5	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89
110	12	54	22	6	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	99
120	27	71	53	33	3	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	192
130	20	108	145	47	13	6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	340
140	44	189	182	73	10	8	2	0	1	0	0	0	0	0	0	509
150	65	292	199	112	21	6	3	1	1	0	0	0	0	0	0	700
160	82	363	287	198	50	10	3	0	3	0	0	0	0	0	0	996
170	108	459	344	227	75	18	8	2	3	1	0	0	0	0	0	1245
180	140	574	382	158	62	29	9	3	1	0	1	0	0	0	0	1359
190	157	541	317	95	35	21	13	4	1	0	0	0	0	0	0	1184
200	198	452	251	132	32	41	10	4	5	0	1	1	1	0	0	1128
210	224	492	308	222	80	60	19	7	6	2	0	0	0	0	0	1420
220	226	636	585	549	366	163	64	20	10	2	1	0	0	0	0	2622
230	327	1193	1117	969	726	368	229	118	64	20	4	3	2	0	0	5140
240	349	1478	1231	781	389	200	146	84	56	34	14	8	2	1	1	4774
250	348	1038	571	218	111	43	25	13	9	3	2	0	0	0	0	2381
260	256	706	237	121	26	30	10	5	3	4	1	1	0	0	0	1400
270	221	496	172	45	14	27	11	2	3	1	0	0	1	0	0	993
280	173	384	161	42	9	11	1	1	1	0	0	0	0	0	0	783
290	156	261	92	41	6	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	563
300	124	203	95	26	5	8	0	0	2	0	0	0	0	0	0	463
310	91	130	101	29	4	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	362
320	78	116	86	20	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	305
330	57	131	94	25	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	311
340	51	129	81	24	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	288
350	64	151	119	16	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	352
360	53	172	132	34	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	393
TOT.	4062	11872	7910	4383	2046	1083	560	266	171	69	25	13	6	2	1	32469

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino				
		Data: marzo 2013				
	10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 3. Frequenza media di accadimento degli eventi di moto registrati dalla boa ondametria RON  
La Spezia nel periodo di riferimento luglio 1989 – giugno 2001**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.  
Boa Ondametria RON - La Spezia - Periodo di riferimento 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	>=6.5	
10	0.23	0.78	0.54	0.18												1.73
20	0.29	0.90	0.52	0.14	0.00	0.00										1.86
30	0.22	0.51	0.26	0.05												1.02
40	0.15	0.24	0.08	0.01												0.48
50	0.07	0.18	0.08	0.01	0.00	0.00		0.00		0.00						0.35
60	0.07	0.17	0.06	0.01		0.01										0.31
70	0.06	0.14	0.03	0.01		0.00	0.00									0.26
80	0.06	0.09	0.04	0.01												0.20
90	0.04	0.10	0.03			0.00								0.00		0.19
100	0.07	0.13	0.04	0.02	0.00	0.01										0.27
110	0.04	0.17	0.07	0.02	0.00	0.00	0.01			0.00						0.30
120	0.08	0.22	0.16	0.10	0.01	0.01					0.00					0.59
130	0.06	0.33	0.45	0.14	0.04	0.02			0.00							1.05
140	0.14	0.58	0.56	0.22	0.03	0.02	0.01		0.00							1.57
150	0.20	0.90	0.61	0.34	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00							2.16
160	0.25	1.12	0.88	0.61	0.15	0.03	0.01		0.01							3.07
170	0.33	1.41	1.06	0.70	0.23	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00						3.83
180	0.43	1.77	1.18	0.49	0.19	0.09	0.03	0.01	0.00		0.00					4.19
190	0.48	1.67	0.98	0.29	0.11	0.06	0.04	0.01	0.00							3.65
200	0.61	1.39	0.77	0.41	0.10	0.13	0.03	0.01	0.02		0.00	0.00	0.00			3.47
210	0.69	1.52	0.95	0.68	0.25	0.18	0.06	0.02	0.02	0.01						4.37
220	0.70	1.96	1.80	1.69	1.13	0.50	0.20	0.06	0.03	0.01	0.00					8.08
230	1.01	3.67	3.44	2.98	2.24	1.13	0.71	0.36	0.20	0.06	0.01	0.01	0.01			15.83
240	1.07	4.55	3.79	2.41	1.20	0.62	0.45	0.26	0.17	0.10	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	14.70
250	1.07	3.20	1.76	0.67	0.34	0.13	0.08	0.04	0.03	0.01	0.01					7.33
260	0.79	2.17	0.73	0.37	0.08	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00				4.31
270	0.68	1.53	0.53	0.14	0.04	0.08	0.03	0.01	0.01	0.00			0.00			3.06
280	0.53	1.18	0.50	0.13	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00							2.41
290	0.48	0.80	0.28	0.13	0.02	0.02	0.00	0.00								1.73
300	0.38	0.63	0.29	0.08	0.02	0.02			0.01							1.43
310	0.28	0.40	0.31	0.09	0.01	0.02										1.11
320	0.24	0.36	0.26	0.06	0.01	0.01	0.00									0.94
330	0.18	0.40	0.29	0.08		0.01	0.00									0.96
340	0.16	0.40	0.25	0.07	0.00	0.01										0.89
350	0.20	0.47	0.37	0.05			0.00		0.00							1.08
360	0.16	0.53	0.41	0.10	0.01											1.21
TOT.	12.51	36.56	24.36	13.50	6.30	3.34	1.72	0.82	0.53	0.21	0.08	0.04	0.02	0.01	0.00	100.00
Tot. cumul.	49.07	73.44	86.94	93.24	96.57	98.30	99.12	99.64	99.86	99.93	99.97	99.99	100.00	100.00		

Numero eventi validi : 32469

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 4. Distribuzione degli eventi di moto registrati dalla boa ondometrica RON –La Spezia nel periodo di riferimento luglio 1989 – giugno 2001 per classi di altezza d’onda e periodo di picco.**

Ripartizione per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco  
TABELLA DIREZIONALE ALTEZZA D'ONDA DEGLI EVENTI REGISTRATI

Hs (m)	CLASSI DI PERIODO DI PICCO Tp (s)							Tot
	Tp < 4	4 ≤ Tp < 6	6 ≤ Tp < 8	8 ≤ Tp < 10	10 ≤ Tp < 12	12 ≤ Tp < 14	Tp > 14	
0.25 <	3639	5781	3450	1617	438	7	1	14933
0.25 ÷ 0.75	6739	19269	15029	3183	757	62	21	45060
0.75 ÷ 1.25	200	6732	9015	2787	379	77	2	19192
1.25 ÷ 1.75	4	1419	3150	1829	101	8	1	6512
1.75 ÷ 2.25	0	145	1170	1091	68	2	0	2476
2.25 ÷ 2.75	0	5	467	556	95	1	0	1124
2.75 ÷ 3.25	0	0	140	220	81	1	0	442
3.25 ÷ 3.75	0	0	29	76	48	1	0	154
3.75 ÷ 4.25	0	0	3	21	20	2	0	46
4.25 ÷ 4.75	0	0	0	10	11	1	0	22
4.75 ÷ 5.25	0	0	0	0	1	1	0	2
> 5.25	0	0	0	0	0	0	0	
Tot.	10582	33351	32453	11390	1999	163	25	89963

**Tabella 5. Distribuzione percentuale degli eventi di moto registrati dalla boa ondometrica RON –La Spezia nel periodo di riferimento luglio 1989 – giugno 2001 per classi di altezza d’onda e periodo di picco.**

Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco  
TABELLA DIREZIONALE ALTEZZA D'ONDA DEGLI EVENTI REGISTRATI

Hs (m)	CLASSI DI PERIODO DI PICCO Tp (s)							Tot	Tot. cumul.
	Tp < 4	4 ≤ Tp < 6	6 ≤ Tp < 8	8 ≤ Tp < 10	10 ≤ Tp < 12	12 ≤ Tp < 14	Tp > 14		
0.25 <	4.04	6.43	3.83	1.80	0.49	0.01	0.00	16.60	16.60
0.25 ÷ 0.75	7.49	21.42	16.71	3.54	0.84	0.07	0.02	50.09	66.69
0.75 ÷ 1.25	0.22	7.48	10.02	3.10	0.42	0.09	0.00	21.33	88.02
1.25 ÷ 1.75	0.00	1.58	3.50	2.03	0.11	0.01	0.00	7.24	95.26
1.75 ÷ 2.25		0.16	1.30	1.21	0.08	0.00		2.75	98.01
2.25 ÷ 2.75		0.01	0.52	0.62	0.11	0.00		1.25	99.26
2.75 ÷ 3.25			0.16	0.24	0.09	0.00		0.49	99.75
3.25 ÷ 3.75			0.03	0.08	0.05	0.00		0.17	99.92
3.75 ÷ 4.25			0.00	0.02	0.02	0.00		0.05	99.97
4.25 ÷ 4.75				0.01	0.01	0.00		0.02	100.00
4.75 ÷ 5.25					0.00	0.00		0.00	100.00
>5.25								0.00	100.00
Tot.	11.76	37.07	36.07	12.66	2.22	0.18	0.03	100	
Tot. cumul.	11.76	48.83	84.91	97.57	99.79	99.97	100.00		

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino				
		Data: marzo 2013				
	10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 6. Punto di trasposizione al largo di Livorno. Distribuzione percentuale su base annuale degli eventi di moto ondoso per classi di altezza d'onda significativa Hs e direzione di provenienza.**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.

Punto di trasposizione al largo di Livorno [10.0°E-43.5°N] - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	.25÷.0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	>=6.5	
10	0.00	0.16	0.14	0.06	0.01	0.00		0.00				0.00		0.00		0.38
20	0.01	0.17	0.10	0.01	0.01		0.00	0.00								0.30
30	0.07	0.09	0.06	0.02					0.00							0.24
40	0.11	0.20	0.10	0.03		0.01	0.01									0.46
50	0.05	0.14	0.11	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00					0.34
60	0.01	0.02	0.03	0.02	0.00											0.07
70	0.01	0.03	0.06	0.03	0.00	0.00										0.13
80	0.00	0.03	0.02	0.01		0.00										0.07
90	0.04	0.03	0.06	0.02	0.00											0.14
100	0.01	0.05	0.05	0.02		0.01										0.14
110	0.01	0.02	0.05	0.01												0.08
120	0.02	0.09	0.20	0.08	0.01	0.01			0.00							0.41
130	0.05	0.22	0.41	0.09	0.03	0.02			0.00							0.83
140	0.14	0.56	0.59	0.19	0.03	0.02	0.01									1.53
150	0.20	0.89	0.71	0.26	0.05	0.02	0.01	0.00								2.15
160	0.31	1.41	1.34	0.62	0.13	0.02	0.01	0.01	0.01							3.85
170	0.40	1.75	1.68	0.49	0.14	0.05	0.01	0.01	0.00							4.53
180	0.49	1.78	1.34	0.30	0.10	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00						4.08
190	0.33	1.11	0.70	0.12	0.06	0.03	0.03									2.37
200	0.38	0.84	0.57	0.17	0.08	0.04	0.02	0.01		0.01						2.12
210	0.44	1.04	0.71	0.27	0.11	0.04	0.01	0.02			0.00					2.63
220	0.56	1.22	1.20	0.57	0.22	0.09	0.02	0.02	0.00							3.89
230	0.56	1.60	2.12	1.49	0.80	0.27	0.09	0.03	0.00	0.00						6.95
240	1.01	3.67	4.20	3.05	1.99	0.94	0.56	0.25	0.10	0.04	0.02	0.01				15.83
250	1.19	4.08	5.23	2.38	1.18	0.63	0.45	0.27	0.18	0.10	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00	15.79
260	1.05	2.23	2.14	0.69	0.31	0.13	0.09	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00		0.00		6.72
270	0.58	1.60	1.26	0.37	0.15	0.06	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01		0.01		4.20
280	0.09	1.33	1.07	0.26	0.07	0.03	0.02	0.06	0.02	0.00	0.00	0.01				2.97
290	0.06	0.88	0.75	0.31	0.07	0.02	0.02	0.02	0.00		0.00	0.00				2.14
300	0.07	0.71	0.52	0.14	0.09	0.04	0.01	0.01	0.01							1.58
310	0.07	0.43	0.28	0.14	0.05	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01			0.00			1.02
320	0.08	0.18	0.45	0.21	0.12	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00				0.01		1.11
330	0.08	0.19	0.31	0.24	0.07	0.02		0.00	0.01	0.01						0.95
340	0.04	0.15	0.41	0.24	0.10	0.01	0.01		0.00		0.00	0.00				0.96
350	0.05	1.29	1.55	0.84	0.27	0.03	0.00	0.01	0.01		0.00		0.00			4.06
360	0.05	1.93	1.74	0.87	0.34	0.03			0.01							4.97
TOT.	8.62	32.12	32.23	14.63	6.62	2.66	1.46	0.83	0.42	0.20	0.11	0.06	0.02	0.02	0.00	100.00
Tot. cumul.	40.74	72.97	87.60	94.22	96.88	98.34	99.17	99.59	99.79	99.90	99.96	99.98	100.00	100.00		

Numero eventi validi : 32467

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciuro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 7. Punto di trasposizione al largo di Livorno. Distribuzione percentuale su base invernale degli eventi di moto ondoso per classi di altezza d'onda significativa Hs e direzione di provenienza.**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. INVERNO  
Punto di trasposizione al largo di Livorno [10.0°E-43.5°N] - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	.25÷.0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	>=6.5	
10		0.07	0.19	0.07	0.01	0.01						0.01				0.37
20	0.01	0.20	0.09		0.01											0.31
30	0.01	0.07	0.07	0.01												0.17
40	0.12	0.20	0.11	0.05												0.48
50	0.04	0.14	0.12	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01			0.01					0.41
60	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01											0.09
70		0.02	0.09	0.04												0.15
80		0.04	0.04	0.02												0.10
90	0.02	0.02	0.06	0.01	0.01											0.14
100	0.01	0.06	0.05	0.02												0.15
110		0.01	0.07													0.09
120	0.01	0.05	0.20	0.11	0.02	0.01										0.41
130	0.02	0.24	0.58	0.09	0.02	0.02			0.01							0.99
140	0.06	0.62	0.58	0.19	0.05	0.02	0.01									1.54
150	0.16	1.00	0.77	0.31	0.05	0.02	0.04	0.01								2.37
160	0.26	1.46	1.19	0.59	0.21			0.01	0.02							3.75
170	0.37	1.80	1.54	0.52	0.20	0.02	0.01	0.02								4.49
180	0.47	1.59	0.94	0.41	0.17	0.04	0.04									3.66
190	0.35	1.20	0.61	0.11	0.07	0.04	0.06									2.44
200	0.16	0.99	0.53	0.19	0.06	0.05	0.04	0.02								2.04
210	0.33	1.14	0.66	0.25	0.16	0.05		0.02								2.61
220	0.35	1.49	1.24	0.66	0.22	0.10										4.05
230	0.43	1.29	1.85	1.44	0.95	0.27	0.06	0.06	0.01							6.37
240	0.67	3.23	4.00	3.26	2.06	1.08	0.68	0.30	0.10	0.04		0.01				15.43
250	0.85	3.77	5.46	2.75	1.35	0.77	0.61	0.32	0.28	0.11	0.07		0.01	0.01	0.01	16.39
260	0.95	1.76	1.90	0.92	0.40	0.21	0.16	0.06	0.01	0.04	0.01					6.42
270	0.55	1.12	1.41	0.53	0.30	0.12	0.10		0.05			0.01				4.19
280	0.07	1.02	1.24	0.42	0.15	0.11	0.06	0.10	0.05	0.01		0.01				3.25
290	0.07	0.61	0.67	0.52	0.11	0.02	0.05	0.06				0.01				2.13
300	0.05	0.33	0.48	0.21	0.19	0.06		0.01								1.34
310		0.11	0.24	0.20	0.07	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01			0.01			0.72
320	0.02	0.10	0.33	0.25	0.21	0.04	0.01	0.05	0.02	0.01				0.02		1.08
330	0.02	0.14	0.30	0.33	0.14	0.04			0.01							0.98
340		0.07	0.33	0.26	0.15	0.02			0.01							0.85
350	0.01	0.88	1.80	1.18	0.36	0.06		0.01	0.02		0.01					4.34
360	0.04	1.52	2.06	1.47	0.59	0.02			0.01							5.72
TOT.	6.54	28.39	31.81	17.47	8.34	3.27	1.96	1.12	0.64	0.22	0.11	0.06	0.02	0.04	0.01	100.00
Tot. cumul.		34.93	66.73	84.20	92.54	95.81	97.77	98.88	99.53	99.75	99.86	99.93	99.95	99.99	100.00	

Numero eventi invernali validi : 8071

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
	Data: marzo 2013						
	10	010	RR	010	-0	MAR	

**Tabella 8. Punto di trasposizione al largo di Livorno. Distribuzione percentuale su base primaverile degli eventi di moto ondoso per classi di altezza d'onda significativa Hs e direzione di provenienza.**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. PRIMAVERA

Punto di trasposizione al largo di Livorno [10.0°E-43.5°N] - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷.0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5		>=6.5
10		0.09	0.01	0.04										0.01		0.15
20	0.01	0.15	0.04	0.01	0.01			0.01								0.24
30	0.04	0.05	0.01						0.01							0.11
40	0.12	0.07	0.04			0.01										0.25
50	0.07	0.05	0.02		0.02											0.17
60	0.01		0.01													0.02
70			0.04	0.07	0.01											0.12
80		0.02	0.01													0.04
90	0.01	0.01	0.02	0.05												0.10
100			0.04	0.02												0.06
110			0.01													0.01
120	0.04	0.04	0.11	0.10	0.01				0.01							0.31
130	0.07	0.16	0.19	0.06	0.05	0.02										0.56
140	0.14	0.42	0.35	0.12	0.02	0.01										1.07
150	0.19	0.56	0.44	0.11	0.02	0.01										1.33
160	0.29	1.31	1.13	0.78	0.05	0.01	0.01									3.58
170	0.37	2.23	2.10	0.45	0.11	0.01										5.27
180	0.57	2.57	1.52	0.24	0.07	0.05										5.02
190	0.41	1.11	0.62	0.07	0.02		0.02									2.26
200	0.46	0.83	0.61	0.14	0.09	0.01										2.14
210	0.61	0.88	0.63	0.20	0.09	0.02		0.01								2.45
220	0.68	1.28	1.16	0.46	0.14	0.06	0.01	0.01								3.81
230	0.67	1.78	2.41	1.39	0.65	0.24	0.11									7.25
240	1.22	4.64	5.06	3.00	2.00	0.85	0.36	0.09	0.07	0.02	0.01					17.33
250	1.54	5.40	6.59	2.55	1.28	0.58	0.27	0.27	0.14	0.09						18.72
260	1.29	2.82	2.56	0.73	0.32	0.09	0.06	0.04	0.01		0.01					7.95
270	0.71	2.09	1.21	0.34	0.11		0.07	0.02	0.02	0.01						4.59
280	0.17	1.50	1.08	0.19	0.04				0.01							3.00
290	0.07	1.17	0.80	0.14	0.04											2.21
300	0.06	0.77	0.70	0.06		0.01		0.01								1.62
310	0.14	0.50	0.30	0.06	0.02											1.02
320	0.10	0.19	0.42	0.04	0.05	0.01										0.81
330	0.14	0.17	0.25	0.07	0.01	0.02			0.01							0.68
340	0.05	0.14	0.36	0.07	0.04											0.66
350	0.10	0.85	1.11	0.37	0.07			0.01								2.51
360	0.09	1.24	0.77	0.37	0.07	0.01										2.56
TOT.	10.46	35.10	32.74	12.33	5.45	2.05	0.93	0.49	0.29	0.14	0.02			0.01		100.00
Tot. cumul.		45.56	78.30	90.62	96.07	98.12	99.05	99.54	99.83	99.96	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	

Numero eventi primaverili validi : 8040

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò					
	Data: marzo 2013						
	10	010	RR	010	-0	MAR	

**Tabella 9. Punto di trasposizione al largo di Livorno. Distribuzione percentuale su base estiva degli eventi di moto ondoso per classi di altezza d'onda significativa Hs e direzione di provenienza.**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. ESTATE  
 Punto di trasposizione al largo di Livorno [10.0°E-43.5°N] - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)															TOT.
	<.25	25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	>=6.5	
10		0.37	0.17	0.01												0.55
20	0.02	0.20	0.09	0.01			0.01									0.33
30	0.18	0.11	0.02	0.01												0.33
40	0.16	0.26	0.10													0.51
50	0.09	0.23	0.05	0.01												0.38
60	0.01	0.02	0.02	0.01												0.07
70	0.02	0.05	0.02													0.10
80	0.01	0.04	0.01	0.01		0.01										0.09
90	0.11	0.02	0.05													0.18
100	0.02	0.05	0.02			0.01										0.11
110	0.02	0.02	0.02	0.01												0.09
120	0.02	0.11	0.16	0.02		0.01										0.33
130	0.11	0.27	0.27	0.04	0.01											0.69
140	0.30	0.55	0.27	0.12	0.04											1.28
150	0.39	0.85	0.40	0.15	0.05	0.01										1.85
160	0.54	1.18	1.07	0.30	0.07	0.01										3.18
170	0.66	1.58	1.40	0.18	0.11	0.04		0.01								3.99
180	0.67	1.67	1.10	0.09	0.01											3.53
190	0.49	1.28	0.48	0.06	0.05	0.01										2.36
200	0.69	0.94	0.32	0.10	0.06											2.11
210	0.65	1.16	0.59	0.15	0.04											2.57
220	0.82	1.23	1.02	0.34	0.20	0.06										3.67
230	0.91	2.02	2.04	1.34	0.56	0.16	0.01			0.01						7.06
240	1.51	4.61	4.06	2.66	1.96	0.72	0.30	0.18	0.04							16.04
250	1.79	5.01	4.57	2.08	0.71	0.57	0.37	0.12	0.12	0.02	0.01					15.38
260	1.65	3.12	2.13	0.37	0.12	0.05	0.02	0.01								7.47
270	0.91	2.39	1.16	0.10	0.01	0.01	0.01	0.02		0.01						4.63
280	0.10	2.30	0.79	0.15	0.04			0.02								3.40
290	0.10	1.45	0.62	0.10	0.02	0.01	0.01			0.01						2.33
300	0.16	1.38	0.37	0.04	0.02		0.01		0.01							1.99
310	0.13	0.94	0.28	0.01	0.01				0.01	0.01						1.40
320	0.17	0.41	0.80	0.02	0.02											1.44
330	0.15	0.40	0.44	0.05					0.01	0.01						1.06
340	0.11	0.33	0.48	0.04	0.02											0.98
350	0.06	2.41	0.96	0.15	0.04	0.02	0.01		0.01							3.67
360	0.07	3.05	1.57	0.13	0.04											4.86
TOT.	13.82	42.01	27.92	8.86	4.22	1.72	0.77	0.37	0.22	0.07	0.02					100.00
Tot. cumul.		55.83	83.75	92.61	96.83	98.55	99.32	99.68	99.90	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Numero eventi estivi validi : 8205

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino				
		Data: marzo 2013				
	10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 10. Punto di trasposizione al largo di Livorno. Distribuzione percentuale su base autunnale degli eventi di moto ondoso per classi di altezza d'onda significativa Hs e direzione di provenienza.**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. AUTUNNO  
 Punto di trasposizione al largo di Livorno [10.0°E-43.5°N] - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷.5	.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5		>=6.5
10	0.01	0.12	0.20	0.10	0.01			0.01								0.45
20		0.12	0.17	0.02	0.01											0.33
30	0.04	0.11	0.13	0.06												0.34
40	0.05	0.27	0.15	0.06		0.04	0.02									0.59
50		0.15	0.25						0.01							0.40
60		0.01	0.06	0.04												0.11
70	0.01	0.04	0.07	0.01		0.01										0.15
80		0.04	0.01													0.05
90		0.07	0.09													0.16
100	0.01	0.07	0.09	0.05		0.01										0.23
110		0.02	0.09	0.01												0.12
120	0.01	0.15	0.34	0.09	0.01											0.60
130		0.23	0.61	0.17	0.04	0.01										1.07
140	0.05	0.65	1.14	0.33	0.02	0.04	0.01									2.25
150	0.07	1.14	1.24	0.49	0.06	0.02										3.03
160	0.15	1.68	1.96	0.80	0.17	0.05	0.04	0.02								4.87
170	0.20	1.40	1.71	0.80	0.16	0.13	0.01									4.40
180	0.25	1.30	1.80	0.45	0.16	0.10	0.04	0.01	0.01	0.01						4.13
190	0.09	0.85	1.08	0.22	0.10	0.06	0.02									2.42
200	0.21	0.61	0.82	0.27	0.11	0.09	0.02	0.01		0.02						2.17
210	0.16	0.99	0.97	0.48	0.15	0.07	0.02	0.02			0.01					2.88
220	0.38	0.88	1.39	0.82	0.31	0.13	0.05	0.06	0.01							4.04
230	0.23	1.30	2.18	1.78	1.03	0.40	0.16	0.05								7.14
240	0.63	2.22	3.67	3.29	1.94	1.13	0.88	0.44	0.21	0.09	0.05	0.01				14.55
250	0.58	2.15	4.31	2.16	1.40	0.58	0.56	0.38	0.18	0.16	0.13	0.10	0.02			12.71
260	0.29	1.20	1.98	0.76	0.39	0.17	0.10	0.06	0.01	0.04	0.02	0.01		0.01		5.05
270	0.15	0.81	1.26	0.53	0.20	0.10	0.09	0.12	0.02	0.01	0.04	0.02		0.02		3.37
280	0.02	0.48	1.15	0.29	0.07	0.02	0.02	0.12	0.02		0.01	0.01				2.25
290		0.31	0.90	0.48	0.10	0.06	0.04	0.01	0.01							1.90
300		0.34	0.54	0.23	0.13	0.07	0.01		0.02							1.36
310		0.17	0.31	0.29	0.10	0.04			0.01							0.92
320	0.02	0.04	0.22	0.53	0.18	0.07	0.06									1.13
330		0.06	0.27	0.52	0.15	0.04		0.01		0.01						1.06
340		0.06	0.45	0.58	0.20	0.01	0.02				0.01	0.01				1.35
350	0.02	0.99	2.33	1.68	0.61	0.05						0.01				5.70
360		1.86	2.55	1.51	0.66	0.10		0.01								6.70
TOT.	3.63	22.92	36.49	19.90	8.48	3.62	2.20	1.35	0.54	0.36	0.28	0.17	0.04	0.04		100.00
Tot. cumul.		26.55	63.04	82.93	91.41	95.03	97.23	98.58	99.12	99.47	99.75	99.93	99.96	100.00	100.00	

Numero eventi autunnali validi : 8151

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario					
	<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0

**Tabella 11. Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo di Livorno nel periodo 1989 -2001 settore di traversia 140°-210° N**

Numero anni: 11.11 Numero delle mareggiate: 67 Soglia di riferimento (POT) m >2.00 Direzione minima 140 °N				Media (m): 2.508 Deviazione Standard (m): 0.515 Numero di eventi sopra POT 19 Direzione massima 210 °N			
H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)
3.83	19.96	2.06	0.68				
3.39	7.17	2.05	0.64				
3.27	4.37	2.04	0.60				
2.97	3.14						
2.69	2.45						
2.57	2.01						
2.56	1.70						
2.52	1.48						
2.35	1.31						
2.33	1.17						
2.33	1.06						
2.22	0.97						
2.17	0.89						
2.17	0.82						
2.07	0.77						
2.06	0.72						

T <sub>R</sub> (anni)	GUMBEL		WEI(.75)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)
5	3.3	0.6	3.1	0.4
10	3.7	0.9	3.4	0.6
25	4.2	1.2	3.9	0.9
50	4.6	1.5	4.3	1.2
100	5.0	1.8	4.6	1.5
<b>A</b>	0.528		0.284	
<b>B</b>	1.372		1.641	
<b>r</b>	0.992		0.986	

T <sub>R</sub> (anni)	WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)
5	3.2	0.6	3.3	0.6	3.4	0.7
10	3.5	0.8	3.6	0.8	3.8	0.9
25	4.0	1.1	4.2	1.1	4.3	1.2
50	4.4	1.3	4.5	1.4	4.7	1.5
100	4.8	1.7	4.9	1.7	5.1	1.9
<b>A</b>	0.546		1.025		1.8	
<b>B</b>	1.283		0.717		-0.128	
<b>r</b>	0.991		0.991		0.988	

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario					
	<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0

**Tabella 12. Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo di Livorno nel periodo 1989 -2001 settore di traversia 210°-280° N**

Numero anni: 11.11 Numero delle mareggiate: 407 Soglia di riferimento (POT) m >4.00 Direzione minima 210 °N	Media (m): 4.725 Deviazione Standard (m): 0.662 Numero di eventi sopra POT 38 Direzione massima 280 °N
--	---

H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)
6.69	19.90	4.61	0.67	4.12	0.34	7.16	1.36
6.35	7.14	4.60	0.63	4.12	0.33	7.64	1.65
6.30	4.35	4.56	0.60	4.11	0.32	8.12	1.95
5.55	3.13	4.55	0.57	4.09	0.31	8.40	2.14
5.49	2.44	4.46	0.54	4.06	0.30	8.75	2.39
5.40	2.00	4.46	0.52	4.05	0.30	9.23	2.75
5.26	1.70	4.38	0.49				
5.18	1.47	4.36	0.47				
5.13	1.30	4.35	0.45				
4.98	1.17	4.34	0.44				
4.91	1.06	4.30	0.42				
4.87	0.96	4.28	0.40				
4.77	0.89	4.25	0.39				
4.75	0.82	4.20	0.38				
4.70	0.77	4.16	0.36				
4.67	0.72	4.13	0.35				

T <sub>R</sub> (anni)	GUMBEL		WEI(.75)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)
5	6.0	0.8	5.9	0.5
10	6.5	1.0	6.3	0.7
25	7.2	1.4	6.9	1.1
50	7.6	1.6	7.3	1.4
100	8.1	2.0	7.7	1.7
<b>A</b>	0.68		0.316	
<b>B</b>	2.459		3.104	
<b>r</b>	0.992		0.986	

T <sub>R</sub> (anni)	WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)
5	6.0	0.7	6.1	0.7	6.2	0.6
10	6.5	0.9	6.6	0.9	6.6	0.8
25	7.1	1.3	7.2	1.2	7.2	1.0
50	7.6	1.6	7.7	1.5	7.7	1.2
100	8.1	1.9	8.2	1.8	8.1	1.4
<b>A</b>	0.684		1.429		2.738	
<b>B</b>	2.428		1.357		-0.242	
<b>r</b>	0.991		0.993		0.992	

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò					
	<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0

**Tabella 13. Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo di Livorno nel periodo 1989 -2001 settore di traversia 280°-360° N**

Numero anni: 11.11 Numero delle mareggiate: 128 Soglia di riferimento (POT) m >2.00 Direzione minima 210 °N	Media (m): 2.906 Deviazione Standard (m): 0.974 Numero di eventi sopra POT 40 Direzione massima 280 °N
--	---

H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)	H <sub>s</sub> (m)	Tempo di ritorno (anni)
5.66	19.90	2.97	0.67	2.09	0.34		
5.44	7.14	2.91	0.63	2.07	0.33		
5.11	4.35	2.63	0.60	2.07	0.32		
4.75	3.13	2.54	0.57	2.07	0.31		
4.06	2.44	2.47	0.54	2.06	0.30		
3.89	2.00	2.43	0.52	2.06	0.30		
3.67	1.70	2.43	0.49	2.05	0.29		
3.47	1.47	2.41	0.47	2.04	0.28		
3.37	1.30	2.27	0.45				
3.34	1.17	2.25	0.44				
3.24	1.06	2.24	0.42				
3.12	0.96	2.21	0.40				
3.07	0.89	2.20	0.39				
3.07	0.82	2.18	0.38				
3.07	0.77	2.11	0.36				
3.05	0.72	2.10	0.35				

T <sub>R</sub> (anni)	GUMBEL		WEI(.75)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)
5	4.9	1.1	4.6	0.9
10	5.5	1.4	5.3	1.2
25	6.4	1.9	6.2	1.6
50	7.1	2.3	6.8	2.0
100	7.8	2.8	7.5	2.5
<b>A</b>	0.96		0.519	
<b>B</b>	0.928		1.399	
<b>r</b>	0.987		0.977	

T <sub>R</sub> (anni)	WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)
5	4.8	1.0	5.0	1.1	5.1	1.1
10	5.5	1.3	5.7	1.4	5.8	1.4
25	6.5	1.8	6.6	1.9	6.7	1.9
50	7.2	2.3	7.2	2.3	7.3	2.3
100	7.9	2.7	7.9	2.7	7.9	2.7
<b>A</b>	0.999		1.864		3.253	
<b>B</b>	0.755		-0.258		-1.76	
<b>r</b>	0.986		0.987		0.984	

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciuro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinario					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 14. Onda di modellazione per il sito in esame - RISULTANTE ANNUALE**

**Punto di trasposizione al largo di Livorno [10.0°E-43.5°N] - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001**

Onda di modellazione per il sito in esame - RISULTANTE ANNUALE  
Punto di trasposizione al largo di Livorno [10.0°E-43.5°N] - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)										TOT.
	0.5±1.0	1.0±1.5	1.5±2.0	2.0±2.5	2.5±3.0	3.0±3.5	3.5±4.0	4.0±4.5	4.5±5.0	> 5.0	
10	73.80	111.70	26.60	19.00		73.80				513.60	818.50
20	45.60	23.80	22.70		51.30	77.00					220.40
30	43.00	30.70					86.80				160.50
40	54.50	61.70		123.10	93.10						332.40
50	66.80	27.70	30.60	26.30	40.20	53.10		163.70	167.80		576.20
60	10.40	25.60	14.10								50.10
70	31.00	49.50	17.20	35.10							132.80
80	12.30	24.50		23.10							59.90
90	29.50	24.30	9.50								63.30
100	22.00	39.20		60.80							122.00
110	25.60	6.30									31.90
120	100.00	113.30	46.80	33.20			93.60				386.90
130	187.90	144.60	121.80	133.20			100.80				688.30
140	316.90	312.90	141.40	143.80	91.50						1006.50
150	400.60	477.10	205.40	142.40	134.50	70.90					1430.90
160	806.90	1088.20	512.70	159.60	147.80	209.80	162.10				3087.10
170	1007.80	937.70	591.60	380.00	72.70	121.90	73.50				3185.20
180	835.90	597.60	467.20	359.90	221.90	45.90	80.60	101.10			2710.10
190	435.20	225.20	285.10	247.90	347.20						1540.60
200	350.80	332.10	403.90	279.70	200.00	207.10		224.60			1998.20
210	481.00	532.60	559.30	298.50	73.40	320.10			134.70		2399.60
220	797.80	1154.20	968.80	715.40	215.60	364.20	80.40				4296.40
230	1524.00	3343.90	3680.10	2165.80	1144.00	518.30	90.50	95.30			12561.90
240	3361.90	7339.90	9670.40	8396.40	7845.10	5217.90	2870.70	1336.00	857.60	443.20	47339.10
250	4690.80	6301.40	6534.70	6013.70	6754.10	6005.30	5418.80	3834.00	2761.50	2889.70	51204.00
260	1992.00	2040.00	1882.40	1331.00	1368.90	968.00	259.20	733.70	659.00	530.30	11764.50
270	1032.80	1143.70	952.30	659.40	1145.70	969.00	840.10	431.90	495.00	1300.60	8970.50
280	832.10	757.40	473.10	405.50	381.70	1488.80	721.10	121.50	169.50	424.00	5774.70
290	601.40	932.00	544.80	319.90	493.90	494.00	118.10		183.10	226.70	3913.90
300	527.70	459.70	534.60	445.00	120.50	168.90	323.60				2580.00
310	247.90	492.90	408.70	191.30	78.10	198.70	317.50	295.10		258.60	2488.80
320	276.30	634.60	826.20	368.80	350.20	430.70	221.30	156.70		700.80	3965.60
330	224.30	725.00	537.80	298.60		102.90	247.80	414.30			2550.70
340	309.40	652.60	671.90	104.20	139.70		140.00		217.50	202.90	2438.20
350	1317.70	1758.10	1413.80	309.20	52.10	136.40	354.60		230.40	344.30	5916.60
360	1126.70	1508.80	1274.80	256.30			227.80				4394.40
TOT.	24200.30	34430.50	33830.30	24446.10	21563.20	18242.70	12828.90	7907.90	5876.10	7834.70	191160.70

	Hs >		
	0.5	1.0	1.5
Flusso di energia risultante (kW/m):	145829	131022	108399
Direzione del vettore flusso di energia (°N):	251	252	252
Numero eventi sopra soglia:	19240	8776	4026
H equivalente (m):	1.28	1.68	2.13
Durata (mesi):	7.11	3.24	1.49

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò					
	Data: marzo 2013						
	10	010	RR	010	-0	MAR	

**Tabella 15. Punto di inversa spettrale P – tabella direzionale annuale del moto ondoso propagato sottocosta con il modello numerico MEROPE. Periodo di riferimento luglio 1989 – giugno 2001.**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.

Punto di propagazione inversa spettrale P - 1 luglio 1989 - 30 giugno 2001

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5		>=6.5
10	0.03	0.04														0.06
20	0.00															0.00
30																
40																
50	0.00															0.00
60	0.01	0.01														0.02
70		0.02														0.02
80	0.00	0.00														0.01
90	0.00															0.00
100		0.00														0.00
110	0.00															0.00
120	0.00	0.00														0.01
130																
140	0.03	0.01														0.04
150	0.08	0.04	0.01													0.12
160	0.36	1.19	0.94	0.04												2.53
170	0.60	2.20	2.18	0.21	0.00											5.19
180	0.89	2.44	2.43	0.85	0.11	0.02										6.74
190	1.07	1.80	1.51	0.38	0.17	0.06	0.03	0.01	0.00							5.03
200	0.70	0.94	0.71	0.17	0.14	0.05	0.01		0.01							2.72
210	0.76	0.97	0.75	0.29	0.12	0.03	0.03			0.00						2.95
220	0.81	1.29	1.20	0.60	0.22	0.06	0.02									4.21
230	0.93	1.77	2.49	1.85	0.65	0.18	0.05	0.00								7.92
240	1.24	3.80	4.84	2.94	1.42	0.63	0.23	0.05	0.01	0.01						15.17
250	1.25	4.51	4.61	1.76	0.75	0.52	0.25	0.13	0.05	0.01	0.00	0.00				13.85
260	1.03	2.78	2.14	0.63	0.25	0.12	0.05	0.03	0.02	0.00	0.01					7.05
270	0.57	1.92	1.17	0.33	0.08	0.09	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01					4.22
280	0.35	1.48	0.94	0.19	0.05	0.09	0.03	0.01	0.01							3.16
290	0.31	1.02	0.99	0.16	0.04	0.03	0.00		0.00							2.55
300	0.23	0.81	0.65	0.15	0.02	0.02	0.01		0.00							1.89
310	0.17	0.63	0.65	0.20	0.05	0.02	0.01			0.01						1.74
320	0.16	0.43	0.70	0.17	0.02	0.02	0.01									1.50
330	0.51	1.21	0.94	0.34	0.05	0.00	0.01									3.06
340	0.36	2.35	3.24	0.80	0.01		0.00									6.77
350	0.56	0.67	0.16													1.39
360	0.04	0.02	0.00													0.06
TOT.	13.08	34.33	33.26	12.06	4.16	1.94	0.75	0.25	0.12	0.03	0.02	0.00				100.00
Tot. cumul.	47.41	80.67	92.72	96.88	98.83	99.58	99.83	99.95	99.98	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00		

Numero eventi validi : 32467

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 16. Distribuzione degli stati di vento registrati dalla stazione anemometrica di Livorno nel periodo 1998-2009**

Anemometro di Livorno - ISPRA - serie storica luglio 1998- giugno 2009  
Eventi registrati suddivisi per classi di velocità  $U_{10}$  e direzione di provenienza.

DIR (°N)	CLASSI DI VELOCITÀ $U_{10}$ (m/s)																Totale
	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 12.00	12.00 14.00	14.00 16.00	16.00 18.00	18.00 20.00		
0	242	176	74	38	19	8	5	5	1	0	1	1	2	0	0	572	
15	138	259	140	76	35	14	6	2	4	5	3	3	0	0	0	685	
30	183	522	422	254	130	76	57	51	28	21	21	15	7	4	2	1793	
45	329	674	710	558	343	210	147	82	52	44	47	23	27	17	7	3270	
60	530	1108	1116	1063	743	386	195	79	50	26	57	56	44	27	24	5504	
75	469	760	376	303	186	90	25	21	8	7	6	2	6	1	1	2261	
90	425	245	62	34	10	7	2	0	1	0	1	0	0	0	0	787	
105	429	223	37	13	4	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	717	
120	476	218	49	16	8	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	775	
135	308	173	56	21	9	4	3	2	0	1	1	0	0	0	0	578	
150	159	196	150	104	78	58	19	18	3	6	12	1	0	0	0	804	
165	128	131	171	217	176	124	77	51	34	15	24	7	5	2	1	1163	
180	122	206	302	250	145	79	48	14	15	4	11	4	6	2	0	1208	
195	107	293	209	80	30	20	11	5	2	6	2	1	0	1	0	767	
210	112	233	88	55	56	32	20	8	4	1	2	2	2	3	0	618	
225	106	287	173	126	146	142	113	65	32	13	13	10	8	12	7	1253	
240	129	339	320	153	146	128	114	98	68	31	30	13	6	10	7	1592	
255	121	346	294	187	150	89	66	42	30	9	14	11	16	4	5	1384	
270	120	365	484	211	131	49	42	23	11	9	8	5	10	4	2	1474	
285	107	335	309	105	30	18	7	3	3	0	4	3	2	0	1	927	
300	125	333	431	205	61	24	7	6	9	5	3	3	1	2	1	1216	
315	117	276	253	173	64	15	18	12	4	3	2	1	1	0	1	940	
330	122	231	225	176	102	29	10	10	9	3	6	2	1	1	2	929	
345	96	153	111	80	51	13	7	7	2	2	4	1	1	0	0	528	
<b>Totale</b>	<b>5200</b>	<b>8082</b>	<b>6562</b>	<b>4498</b>	<b>2853</b>	<b>1625</b>	<b>1006</b>	<b>605</b>	<b>371</b>	<b>211</b>	<b>272</b>	<b>164</b>	<b>145</b>	<b>90</b>	<b>61</b>	<b>31745</b>	
Tot. cumul.	13282	19844	24342	27195	28820	29826	30431	30802	31013	31285	31449	31594	31684	31745			

Numero totale di osservazioni: 31745

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

**Tabella 17. Frequenza di accadimento annuale degli stati di vento registrati dalla stazione anemometrica di Livorno nel periodo 1998-2009**

Anemometro di Livorno - ISPRA - serie storica luglio 1998- giugno 2009

Distribuzione percentuale ANNUALE dei venti registrati per classi di velocità  $U_{10}$  e direzione di provenienza.

DIR (°N)	CLASSI DI VELOCITÀ $U_{10}$ (m/s)															Totale
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	
0	0.76	0.55	0.23	0.12	0.06	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.8
15	0.43	0.82	0.44	0.24	0.11	0.04	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	2.2
30	0.58	1.64	1.33	0.80	0.41	0.24	0.18	0.16	0.09	0.07	0.07	0.05	0.02	0.01	0.01	5.6
45	1.04	2.12	2.24	1.76	1.08	0.66	0.46	0.26	0.16	0.14	0.15	0.07	0.09	0.05	0.02	10.3
60	1.67	3.49	3.52	3.35	2.34	1.22	0.61	0.25	0.16	0.08	0.18	0.18	0.14	0.09	0.08	17.3
75	1.48	2.39	1.18	0.95	0.59	0.28	0.08	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	7.1
90	1.34	0.77	0.20	0.11	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.5
105	1.35	0.70	0.12	0.04	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.3
120	1.50	0.69	0.15	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.4
135	0.97	0.54	0.18	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.8
150	0.50	0.62	0.47	0.33	0.25	0.18	0.06	0.06	0.01	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	2.5
165	0.40	0.41	0.54	0.68	0.55	0.39	0.24	0.16	0.11	0.05	0.08	0.02	0.02	0.01	0.00	3.7
180	0.38	0.65	0.95	0.79	0.46	0.25	0.15	0.04	0.05	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	3.8
195	0.34	0.92	0.66	0.25	0.09	0.06	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.4
210	0.35	0.73	0.28	0.17	0.18	0.10	0.06	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	1.9
225	0.33	0.90	0.54	0.40	0.46	0.45	0.36	0.20	0.10	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	3.9
240	0.41	1.07	1.01	0.48	0.46	0.40	0.36	0.31	0.21	0.10	0.09	0.04	0.02	0.03	0.02	5.0
255	0.38	1.09	0.93	0.59	0.47	0.28	0.21	0.13	0.09	0.03	0.04	0.03	0.05	0.01	0.02	4.4
270	0.38	1.15	1.52	0.66	0.41	0.15	0.13	0.07	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	4.6
285	0.34	1.06	0.97	0.33	0.09	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	2.9
300	0.39	1.05	1.36	0.65	0.19	0.08	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	3.8
315	0.37	0.87	0.80	0.54	0.20	0.05	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	3.0
330	0.38	0.73	0.71	0.55	0.32	0.09	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	2.9
345	0.30	0.48	0.35	0.25	0.16	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.7
<b>Totale</b>	<b>16</b>	<b>25</b>	<b>21</b>	<b>14</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
Tot. cumul.	42	63	77	86	91	94	96	97	98	99	99	99	100	100	100	

Numero totale di osservazioni: 31745

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarinò					
	<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Data: marzo 2013	10	010	RR	010	-0

## Appendice C - Calcolo dei “fetch efficaci” e della relazione tra direzione del vento e quella del moto ondoso – modello ENIF

Per il calcolo dei fetch efficaci si fa riferimento ad una relazione, derivata dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991), di seguito riportata nella sua forma piú generale:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

dove:

$\phi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;

$\phi_i \leq \phi_w \pm \theta$  direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2\theta$  considerato direzione  $\phi_w$ . Il metodo classico di Saville prevede un valore di  $\theta=45^\circ$  mentre la metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta=90^\circ$ .

$F_{e,w}$  lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\phi_w$

$F_i$  lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima  $\phi_i$  (si fa riferimento alla lunghezza calcolata su base cartografica) eventualmente assunta come valore medio relativo ad un settore di  $15^\circ$  nell'intorno della direzione i-esima  $\phi_i$  (metodo proposto dal C.E.R.C. nel software package A.C.E.S.)

$n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n=2$ )

Per il calcolo della relazione esistente tra la direzione del vento e quella del moto ondoso generato, si fa riferimento al criterio introdotto da Donelan. Nell'ipotesi che:

la direzione media del moto ondoso corrisponde alla direzione della componente spettrale associata al periodo di picco;

il moto ondoso generato dal vento è ben definito e rappresentabile tramite le relazioni introdotte dalla campagna oceanografica JONSWAP (JOint North Sea WAve Project, Hasselmann 1976).

Si può affermare che la direzione media  $\beta$  del moto ondoso relativa alla direzione media di provenienza del vento  $\phi_w$  è individuata come il valore che rende massima la funzione:

$$f(\phi_w) = F_{e,\phi_w}^{0.28} \cdot (\cos \phi_w)^{0.44}$$

quindi per  $f'(\beta) = 0$  e  $f''(\beta) < 0$ .

Il programma ENIF sviluppato dalla Modimar effettua il calcolo dei fetch efficaci e della correlazione del vento e quella del moto ondoso generato.

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciuro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
<b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>		10	010	RR	010	-0	MAR

## Appendice D - Descrizione del modello di propagazione inversa spettrale MEROPE

Propagandosi verso "riva" su fondali via via decrescenti, le onde subiscono una serie di trasformazioni geometriche e perdite di energia che alla fine conducono al loro frangimento (ciò avviene quando l'onda, deformata, diviene molto alta rispetto alla sua lunghezza e perciò "instabile" o comunque intercetta fondali bassi «incompatibili» con la sua altezza). Prescindendo, perchè comunque trascurabili, dalle perdite di energia che (fuori dalla zona dei frangenti) sono dovute all'attrito del fondo e, per fondi permeabili, alla percolazione; nonché dagli effetti indotti dalle correnti, dal vento e dalle riflessioni del fondo, le modifiche delle caratteristiche ondose durante la propagazione verso riva sono indotte essenzialmente dai fenomeni di rifrazione e di shoaling.

Il primo fenomeno (rifrazione) consiste in una trasformazione tridimensionale dovuta a variazioni di fondale lungo i fronti d'onda che comportano variazioni planimetriche di questi e, conseguentemente, a variazioni delle altezze d'onda per effetto della conservazione del flusso di energia fra "ortogonali" vicine. Il secondo fenomeno (shoaling) è una trasformazione bidimensionale delle onde dovuta al solo effetto del fondale nella direzione di propagazione. L'effetto "fondale" modifica la celerità di gruppo e di conseguenza provoca dapprima una riduzione e poi un sostanziale aumento di altezza delle onde allorché queste avanzano su profondità di fondali decrescenti.

La simulazione di detti fenomeni può essere eseguita in modo efficace con il metodo della "rifrazione inversa spettrale". Tale metodo fornisce risultati quantitativi esattamente nel punto di interesse, al contrario del metodo classico della rifrazione diretta. Il relativo modello matematico è stato sviluppato seguendo le indicazioni di Abernety e Gilbert (1978). La differenza più appariscente rispetto al metodo tradizionale dei piani d'onda (rifrazione diretta) è rappresentata dalla costruzione dei raggi con un verso contrario a quello della propagazione delle onde. Tale impostazione fu introdotta da Dorrestein nel 1960: si costruisce un ventaglio di raggi relativi ad un dato periodo d'onda, che hanno tutti origine nel luogo della costa (o in prossimità) dove si desidera conoscere i risultati, partendo ognuno con una diversa direzione  $\phi$ . Si ricava quindi la direzione  $\Theta$  che i raggi possiedono quando raggiungono la regione di acque profonde.

Riportate in diagramma le molteplici coppie di valori  $\Theta$ - $\phi$  trovate, si ricava per ogni  $\Theta$  il gradiente  $\frac{\delta\phi}{\delta\Theta}$  da introdurre nella formula che conduce poi alle altezze sotto costa:

$$K_r = \sqrt{\frac{C_0}{C} \cdot \frac{\delta\phi}{\delta\Theta}}$$

Rispetto al metodo convenzionale, si ha il vantaggio che i risultati sono ottenuti direttamente per il luogo che interessa, sulla costa, senza il problema di dover interpolare tra raggi calcolati da una parte o dall'altra del punto. Inoltre, un unico diagramma di rifrazione (per ciascun periodo) rappresenta i raggi relativi a tutte le direzioni di provenienza del moto ondoso al largo.

Dal punto di vista pratico, la costruzione inversa dei raggi non presenta problemi e si applica la stessa equazione della traiettoria del raggio del metodo convenzionale, con lievi modifiche di segni. Con la tecnica della proiezione inversa, non sarebbe necessario neppure conoscere il percorso dei singoli raggi poiché basta avere il diagramma di rifrazione  $\Theta$ - $\phi$  definito con incrementi di frequenza e  $\Theta$  sufficientemente piccoli per riassumere tutti gli effetti della topografia sull'altezza e direzione delle onde nella loro propagazione verso un punto della costa. Si nota in genere che le curve  $\Theta$ - $\phi$  dolci per valori alti delle frequenze, presentano discontinuità notevoli per le frequenze minori con conseguenti singolarità nel valore di  $K_r$ . Ciò significa che questa tecnica (così come quella convenzionale) ha il difetto che la funzione altezza d'onda diventa indeterminata proprio in un campo di frequenze e direzioni di

 <b>Autorità Portuale di Livorno</b> <b>Piano Regolatore Portuale 2012</b>	Raggruppamento: Modimar s.r.l. Alberto Noli Technital s.p.a. Sciro Bureau Veritas s.p.a. Acquatecno s.r.l.	Titolo Elaborato: Studio Meteomarino					
		Data: marzo 2013					
		10	010	RR	010	-0	MAR

interesse non trascurabile. In pratica questo comporta che nel percorso dei raggi compaiono singolarità (caustiche) non giustificabili fisicamente, come per i piani d'onda tradizionali. Il fatto che usando spaziature sufficientemente grandi dei raggi questi difetti non siano evidenziati, non esclude l'insufficienza del metodo.

È stato mostrato che a queste difficoltà si può ovviare abbandonando l'ipotesi che al largo il fronte d'onda si presenti con direzione d'onda e frequenza ben precise ed uniformi (onde monocromatiche), e considerando funzioni spettrali sia per la direzione che per la frequenza. Va mantenuta invece l'ipotesi di uniformità di fase. L'importanza fondamentale dell'introduzione dello spettro d'energia bidimensionale associata a quello di proiezione inversa dei raggi, è che, a differenza del metodo tradizionale e di quello di Dorrestein, dà luogo a risultati univoci ed ovunque finiti, eliminando le singolarità già evidenziate.