n. 03

AUTORITA' PORTUALE DI GENOVA

Direzione Tecnica

PROGETTO PRELIMINARE N° 2931

PROTEZIONE PASSEGGIATA DI VOLTRI IN DESTRA IDRAULICA DEL TORRENTE LEIRA

STUDIO METEOMARINO

	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO:
Rev. 3	Novembre 2014	Aggiornamento post incontro Regione Liguria del 3/10/14	

Progettista interni: Geom. Ivano Dellepiane Geom. Augusto Narizzano	Progettisti esterni: Dott. Ing. Paolo Turbolente

Coordinatore di progetto:	VERIFICATO	VALIDATO	VISTO
Geom. Ivano Dellepiane	Il Direttore Tecnico: **Dott. Ing. Andrea Pieracci**	Il Responsabile Unico del Procedimento: **Dott. Ing. Marco Vaccari**	Il Il Direttore Tecnico: **Dott. Ing. Andrea Pieracci**

1. PREMESSA 1

1.1. Oggetto del presente rapporto 1

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO 3

3. CARATTERISTICHE METEOMARINE DEL SITO 6

3.1. Esposizione del paraggio, traversia efficace 8

3.1.1. Fetch geografici 10

3.1.2. Fetch efficaci 10

3.2. Fonte di dati meteomarini a disposizione 16

3.3. Definizione delle condizioni di moto ondoso in acqua profonda 26

3.3.1. Trasposizione dei dati ondametrici 26

3.4. Analisi statistica delle onde estreme al largo per le traversie principali 37

3.5. Profondità di chiusura della spiaggia attiva 46

3.6. Moto ondoso sottocosta 48

3.6.1. Il modello matematico di rifrazione diretto spettrale SWAN 49

3.6.2. Ricostruzione del clima ondoso in acque relativamente profonde davanti al litorale di Voltri 57

3.6.3. Ricostruzione del clima ondoso lungo il litorale di Voltri appena fuori la zona di frangimento 63

3.7. Flusso energetico del moto ondoso 76

3.7.1. Flusso energetico del moto ondoso in acque relativamente profonde 77

3.7.2. Onde morfologiche equivalenti 78

3.7.3. Flusso energetico del moto ondoso poco oltre la zona di frangimento 82

4. VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO 94

4.1. Analisi dei dati mareografici 96

4.1.1. Dati disponibili 96

4.1.2. Analisi dei dati 96

4.2. Livello medio del mare della stazione RMN di Genova 101

4.3. Livelli di marea 106

4.3.1. Analisi armonica dei livelli misurati 106

4.3.2. Componente deterministica dei livelli misurati: Marea Astronomica 109

4.3.3. Componente stocastica dei livelli misurati: Marea Meteorologica 109

4.4. Analisi statistica degli estremi di marea meteorologica 110

4.4.1. Selezione dei campioni 110

4.4.2. Leggi di distribuzione dei valori estremi 110

4.4.3. Analisi dei risultati 111

4.5. Conclusioni sull'analisi dei livelli di marea 114

4.6. Sovralzo d'onda 114

4.7. Massimi livelli in corrispondenza dell'opera 114

INDICE DELLE FIGURE 115

INDICE DELLE TABELLE 120

1. PREMESSA

L'Autorità Portuale di Genova ha affidato alla società Acquatecno S.r.l. l'incarico di eseguire la Modellazione numerica a supporto della "Progettazione passeggiata di Voltri in destra idraulica del Torrente Leira", ricadente nel territorio del Comune di Genova (GE) nella Regione Liguria. Nell'ambito di tale incarico sono state eseguite le modellazioni numeriche per la definizione delle forzanti meteo-marine e dell'onda di progetto.

1.1. Oggetto del presente rapporto

Scopo del presente rapporto è lo studio dei fattori meteo-marini di maggior interesse ingegneristico a supporto del progetto di modifica del pennello posto in sponda destra idraulica alla foce del Torrente Leira (Genova Voltri). Lo studio nel suo complesso è finalizzato all'esecuzione di uno studio modellistico numerico a supporto del progetto su detto.

Il presente rapporto affronta i seguenti aspetti specifici del "Capitolato speciale, descrittivo e prestazionale":

- Determinazione del clima ondoso al largo del sito in esame;
- Trasposizione sotto costa e determinazione del clima in corrispondenza delle opere;
- Determinazione degli eventi estremi di riferimento per la progettazione;
- Calcolo dei livelli di riferimento.

La caratterizzazione del clima ondoso al largo, in termini di altezza significativa, periodo e direzione, è stata condotta a partire dai dati di osservazione diretta della boa della stazione della rete R.O.N. di La Spezia, di cui si dispone di una serie storica di almeno 15 anni con un rendimento superiore al 89%.

La trasposizione del moto ondoso sotto costa è stata eseguita attraverso il modello SWAN di comprovata affidabilità, che consente di simulare gli effetti di rifrazione, diffrazione, attrito con il fondo, shoaling, frangimento e presenza di strutture (porto di Voltri), con riferimento a maglie di calcolo a risoluzione variabili in funzione della profondità del fondale.

Il modello ha consentito la trasposizione a riva dell'intero clima al largo e la determinazione del clima ondoso specifico in diversi punti di riferimento lungo l'intera unità fisiografica.

Nei punti di riferimento sopra indicati, al fine di determinare il trasporto solido longitudinale lordo lungo l'intera unità fisiografica, si è condotto lo studio per la determinazione del flusso di energia associata al moto ondoso incidente.

I livelli del mare da assumere quale riferimento per la progettazione sono stati calcolati sulla base delle osservazioni dirette della stazione mareografica di Genova del periodo 2000- 2013 mediante

individuazione delle escursioni di marea astronomica ed analisi statistica delle escursioni di livello residue dovute ai fenomeni di surge di vento e pressione.

In particolare il presente rapporto è stato articolato nel modo seguente:

- inquadramento geografico del paraggio;
- individuazione dei fetches geografici ed efficaci e dei settori di traversia;
- reperimento ed analisi dei dati di moto ondoso disponibili;
- definizione del clima del moto ondoso al largo;
- analisi statistica degli eventi estremi al largo;
- propagazione del moto ondoso sotto costa;
- determinazione del flusso di energia associata al moto ondoso e delle onde morfologiche equivalenti;
- determinazione delle variazioni del livello marino.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO

Il sito in esame si affaccia al centro del Golfo di Genova nel Mar Ligure, ad una distanza di circa 13 km chilometri ad ovest di Genova (vedi Figura 1). L'unità fisiografica del sito in esame è compresa tra la foce del torrente Cerusa che la delimita ad ovest ed il Porto di Voltri che la delimita ad est, per una lunghezza complessiva di circa 1 650 m (vedi Figura 2 tratta dalla carta I.M.M n.2).

Il litorale di Voltri è caratterizzato da un fondale ghiaioso con pendenze elevate, infatti presenta profondità inferiori di 10 m ad una distanza di circa 250 m dalla riva, gli alti fondali (profondità maggiori di 30 m) si presentano a circa 1,35 km dalla costa, vedi Figura 2. La forte ripidità dei profili di spiaggia conferiscono caratteristiche poco "dissipative" alla fascia costiera che beneficia poco di effetti di attenuazione del moto ondoso incidente.

Al largo di Voltri (in acqua relativamente profonda in corrispondenza dell'isobata –20 m, vedi Figura 3) si individua:

- un settore di traversia principale del III quadrante, compreso tra la visuale per Punta Muchillina (Corsica) 185° N e la visuale per Capo Noli 226°N, all'interno di tale settore in un angolo di circa 37° tra la visuale per Punta Muchillina 185° N e la visuale per Capo Mele 222°N vengono traguardate le coste della Libia, mentre tra la visuale per Capo Mele 222°N e la visuale per Capo Noli 226°N (in un angolo di circa 4°) vengono traguardate le coste della Liguria occidentale;
- un settore di traversia principale del II quadrante compreso tra la visuale Punta Muchillina (Corsica) 185° N e la visuale per la foce dell'Arno (Toscana) 124° N, all'interno di tale settore in un angolo di circa 46° tra la visuale per Punta Muchillina 185° N e la visuale per il promontorio dell'argentario 139°N vengono traguardate le coste della Corsica e dell'arcipelago toscano, mentre tra la visuale per il promontorio dell'argentario 139°N e la visuale per la foce dell'Arno 124°N (in un angolo di circa 15°) vengono traguardate le coste della Toscana meridionale;
- un settore di traversia secondario di levante in un angolo di circa 14° tra la visuale per la foce dell'Arno (Toscana) 124°N e la visuale per la Punta di Portofino 110° N; all'interno di tale settore in un angolo di circa 8° tra la visuale per la foce dell'Arno 124°N e la visuale per l'isola del Tino (La Spezia) 116°N vengono traguardate le coste della Toscana settentrionale, mentre tra la visuale per l'isola del Tino 116°N e la visuale per la Punta di Portofino 110° N (in un angolo di circa 6°) vengono traguardate le coste della Liguria orientale.

Le direzioni maggiori di 226° N e minori di 110° N traguardano le coste del Golfo di Genova.

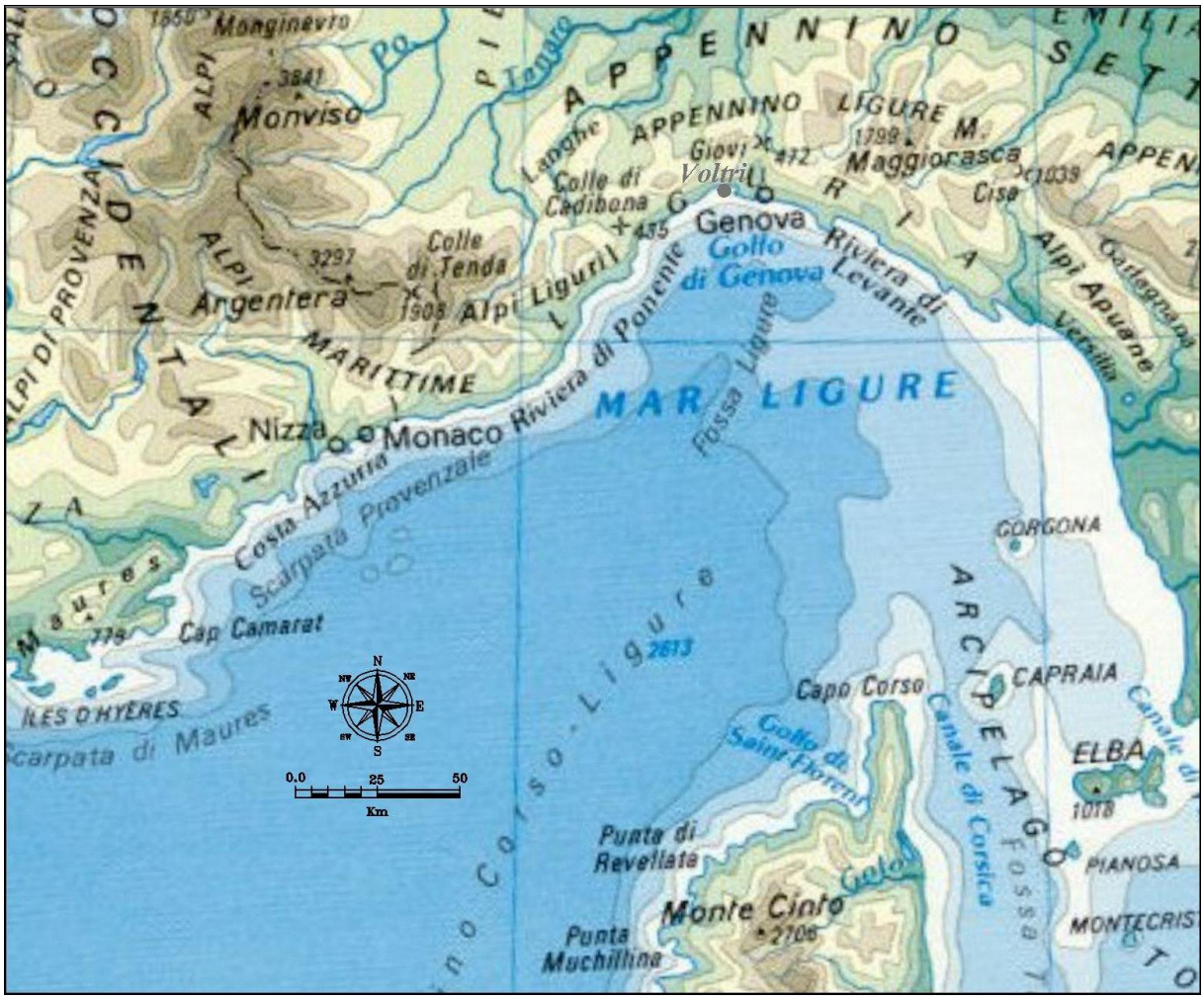


Figura 1. Corografia generale del litorale di Voltri

Fonte: "Atlante enciclopedico del touring" Vol. I Italia (1996)

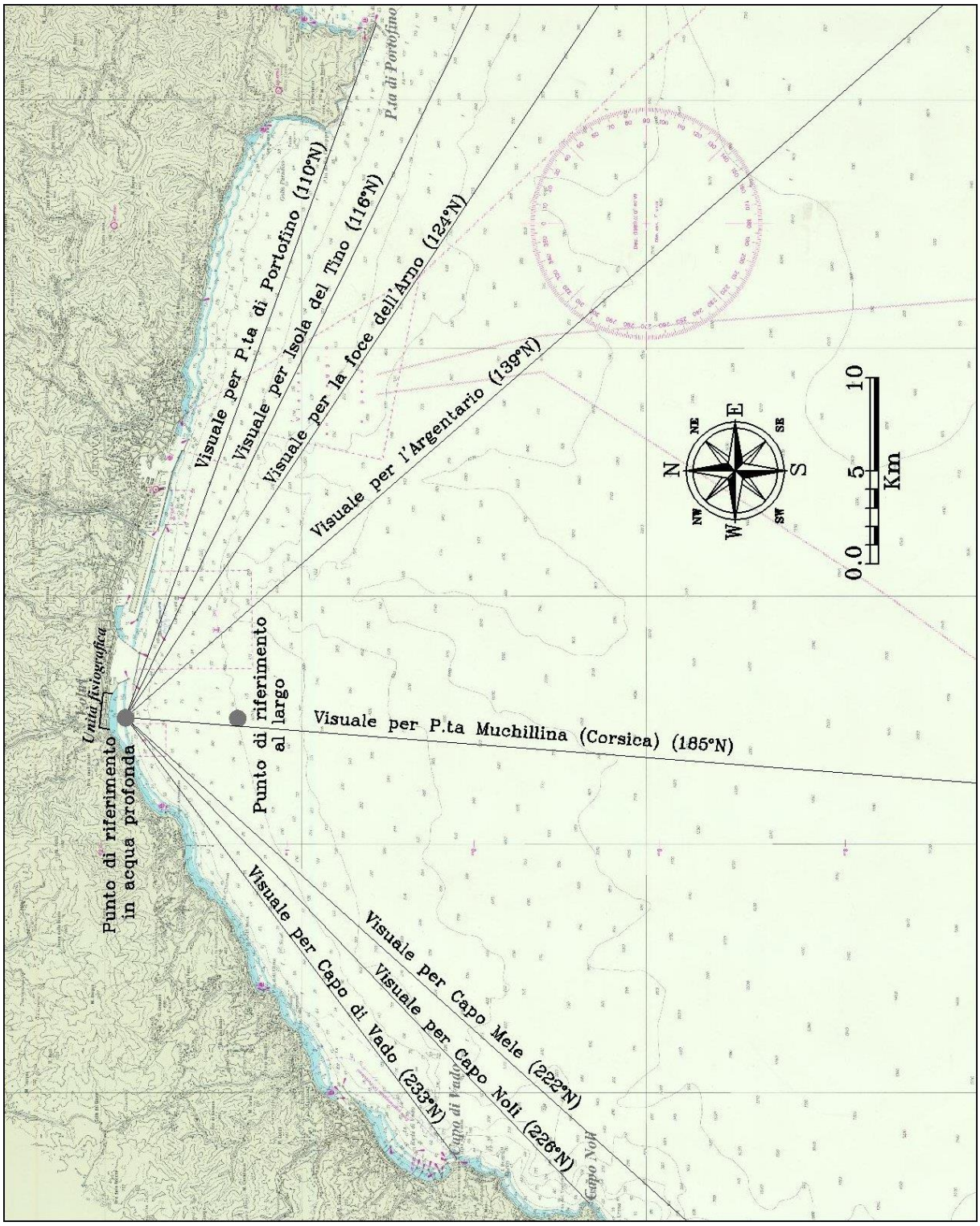


Figura 2. Unità fisiografica del litorale di Voltri e punti di riferimento al largo

Fonte: "Atlante enciclopedico del touring" Vol. I Italia (1996)

3. CARATTERISTICHE METEOMARINE DEL SITO

Scopo del presente capitolo è quello di definire le caratteristiche meteomarine (onde e correnti) che regolano l'idrodinamica del litorale di Voltri alla foce del torrente Leira ove ricadono le opere in progetto.

Particolare attenzione è stata posta nella determinazione delle caratteristiche (altezze significative e periodo di picco) delle onde estreme al largo ed in prossimità delle opere di progetto (profondità tra -4,0 m e -5,0 m sul l.m.m.), nella determinazione del clima ondametrico al largo (profondità di -20 m sul l.m.m.) utile per le applicazioni modellistiche di morfodinamica costiera e nella determinazione del clima ondametrico e del flusso di energia del moto ondoso poco oltre la linea di frangimento (profondità di -10,0 m sul l.m.m.) utile per il calcolo del trasporto solido lordo.

Si è inizialmente eseguita la raccolta, selezione ed organizzazione dei dati e delle informazioni disponibili, nonché l'analisi dei dati finalizzata alla determinazione delle caratteristiche meteomarine utili per i successivi studi.

La base informativa è costituita dalla serie di dati ondametrici registrati dalla boa direzionale della stazione ondametrica di La Spezia nel periodo 1989÷2007, gestita dall'ISPRA e facenti parte della Rete Ondametrica Nazionale (posta su fondali di circa 100 m). I dati registrati al largo della boa sono stati trasposti al largo di Voltri in un punto posto su fondali di circa 100 m ad una distanza di circa 7,1 km a sud dalla foce del torrente Leira (vedi Figura 2).

Per la definizione delle caratteristiche delle onde estreme al lago si è fatto riferimento ad elaborazioni statistiche delle serie di dati ondametrici triorari ricostruiti con il metodo della trasposizione al largo di Voltri in base ai dati della stazione ondametrica di La Spezia. Per quanto riguarda i valori del periodo di picco (T_p) da associare alle onde estreme si sono ricavate le relazioni funzionali:

$$T_p = c_p \, (H_s)^{mp} \qquad (1)$$

Per la determinazione delle caratteristiche delle onde estreme in corrispondenza delle opere è stato necessario prima propagare dal largo verso riva, fino alla profondità di circa -10 m sul l.m.m. poco oltre la linea dei frangenti, lo spettro energetico delle singole onde precedentemente ricostruite al largo tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dal fondale. A tal fine è stato utilizzato il modello di propagazione diretto STWAVE e costruita una griglia tridimensionale di calcolo del fondale di dimensioni 19.000m x 9.500m con passo 100 m sulla base delle quote della carta nautica dell'I.M.M. n 2 da Imperia e Portofino in scala 1:100.000, n 106 Litorale di Genova in scala 1:30.000, n 54 porto di Genova Foglio Ovest in scala 1:10.000 e dei rilievi batimetrici effettuati per il presente

progetto. All'interno della griglia principale sono state nidificate delle griglie a risoluzione maggiore in funzione della profondità del fondale con passo rispettivamente di 20 m e 5 m.

In particolare è stata costruita una griglia tridimensionale del fondale con passo 20 m di dimensioni 2.200m x 1.300m e una griglia tridimensionale del fondale con passo 5 m di dimensioni 2.200m x 550m.

Il modello di propagazione ha consentito di determinare in alcuni punti significativi della costa (posti a profondità di -20,0 m, -10,0 m sul l.m.m.) la correlazione lago riva delle onde per classi di direzione di provenienza e periodo di picco.

Successivamente sono state determinate le caratteristiche delle onde estreme sui bassi fondali a diverse profondità tenendo conto del fenomeno del frangimento indotto dal fondale.

Per determinare il clima d'onda al largo di Voltri alla profondità di -20 m sul l.m.m. e lungo l'isobata -10 m sul l.m.m. (vedi Figura 2) è stata propagata a riva la serie storica delle onde ricostruite al largo sulla base dei dati della stazione di La Spezia mediante le correlazioni largo riva precedentemente determinate.

Nel punto posto alla profondità di -20,0 m sul l.m.m. e lungo l'isobata -10 m sul l.m.m. è stata così determinata la frequenza media annua di accadimento per ogni classe di direzione ed altezza d'onda, ottenendo il clima ondoso medio annuale, utile per le applicazioni modellistiche di morfodinamica costiera.

Infine negli stessi punti è stato anche determinato il vettore flusso di energia del moto ondoso del clima ondametrico, utile per la determinazione della "componente motrice del trasporto solido" lungo il litorale.

3.1. Esposizione del paraggio, traversia efficace

L'individuazione dell'esposizione geografica del sito in esame è stata eseguita facendo riferimento al punto indicato nella Figura 2 localizzato al largo di Voltri ad una profondità di circa 100 m sul l.m.m..

Il punto di riferimento al largo è esposto alle onde provenienti dal II, III quadrante in un settore angolare compreso tra 101° e 243°N.

La costa del Golfo di Genova limita fortemente il settore di ponente (250°N-280°N) (fetch tra 9 km e 24 km).e quello di levante tra i settori 70°N e 100°N (fetch tra 12 km e 40 km).

Il settore di levante compreso tra 100°N e 120°N è limitato dalle coste della Riviera di Levante e della Toscana settentrionale e presenta fetch di una certa estensione (fetch tra 40 km e 140 km).

La Riviera di Ponente costituisce un efficace schermo dalle onde di libeccio comprese tra 240°N e 225°N (fetch tra i 25 km e i 65 km), mentre il settore di libeccio compreso tra 225°N e 210°N traguarda le coste libiche con fetch geografici superiori a 500 km.

Anche il settore di mezzogiorno compreso tra 200°N e 184°N traguarda le coste libiche e della Sardegna nord orientale con fetch geografici superiori a 500 km.

Il settore di mezzogiorno compreso tra 184°N e 160°N traguarda invece le coste della Corsica (fetch intorno ai 200 km).

Il settore di scirocco compreso tra 150°N e 120°N traguarda le coste dell'Isola d'Elba e della Toscana meridionale (fetch tra i 100 km e i 200 km).

Motivi geografici e meteorologici (limitata estensione delle perturbazioni cicloniche) suggeriscono di contenere i massimi fetch a 500 km.

In line generale si individuano pertanto al largo di Voltri:

- un settore principale del III quadrante compreso tra le direzioni 240°N e 184°N;
- un settore principale del II quadrante compreso tra le direzioni 184°N e 120°N;
- un settore secondario di levante compreso tra le direzioni 120°N e 100°N.



Figura 3. Settori di Traversia al largo di Voltri

Fonte: "Atlante enciclopedico del touring" Vol. I Italia (1996)

3.1.1. Fetch geografici

Si ricorda che per "fetch" si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento. In bacini semichiusi di estensione limitata, quale risulta essere il Mar Ligure, si accetta che l'individuazione dei fetches possa essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione. Tale assunzione risulta plausibile a causa delle dimensioni caratteristiche delle perturbazioni che normalmente interessano il Tirreno le cui estensioni massime sono dello stesso ordine di grandezza dei valori massimi che caratterizzano i fetches geografici (circa 400÷500 km).

Nel diagramma polare di Figura 4 sono indicati graficamente i valori dei fetches geografici relativi al punto di analisi (ricavati secondo una discretizzazione con passo radiale di 10°). La riporta gli stessi valori in forma numerica. Il settore di traversia nel punto al largo considerato è compreso tra la direzione di 70°N e 280° N, i fetch geografici maggiori si registrano a mezzogiorno e libeccio (settore direzionale compreso tra 190°N e 220°N) con dimensioni che superano i 500 km.

La distribuzione dei fetch geografici evidenzia:

- una marcata asimmetria, con lunghezze maggiori per i settori del III quadrante di scirocco e mezzogiorno rispetto a quelli del II quadrante di mezzogiorno e libeccio limitati dalla Corsica e dall'isola d'Elba;
- una lunghezze estremamente brevi per i settori di tramontana, grecale e maestrale limitati dalla costa del Golfo di Genova.

3.1.2. Fetch efficaci

Per completare l'inquadramento geografico preliminare del paraggio, sulla base dei valori dei fetches geografici individuati, sono stati calcolati i corrispondenti valori di fetches efficaci, cioè l'effettiva porzione di mare ove è "efficace" l'azione di generazione del moto ondoso ad opera del vento spirante lungo il fetch geografico.

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

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^{n}(\phi_i - \phi_w)} \qquad (2)$$

dove:

– ϕ_w è la direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;

– $\phi_i \leq \phi_w \pm \theta$ è la direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w. La metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di θ=90° il quale è stato adottato nei calcoli.

– $F_{e,w}$ è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w;

– F_i è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima ϕ_i, assunta nei calcoli come il valore medio relativo ad un settore di 15° nell'intorno della direzione i-esima ϕ_i (secondo quanto proposto dal C.E.R.C.)

– *n è il* termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame, assunto pari a 2, come consigliato da Saville e Seymour in accordo con i risultati ricavati nell'ambito della campagna oceanografica JONSWAP.

Inoltre per la ricostruzione indiretta del moto ondoso (vedi paragrafo successivo) si deve definire la correlazione esistente tra la direzione media del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso e la direzione media risultante dello stato di mare generato. In proposito si è fatto riferimento al criterio introdotto da Donelan ispirato dalle seguenti ipotesi:

- 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 quindi che la direzione media β del moto ondoso relativa alla direzione media di provenienza del vento ϕ_w è individuata come il valore che rende massima la funzione:

$$f(\phi_w) = F_{e,\phi_w}^{0.28} \cdot (\cos\phi_w)^{0.44} \qquad (3)$$

ovvero il valore di β per cui $f'(\beta) = 0$ e $f''(\beta) < 0$

I risultati del calcolo sono riportati nella Tabella 1 ed illustrati nel diagramma polare di Figura 5. Il litorale in esame è esposto alla forza di tutte le mareggiate che si generano nel Mar Ligure nel settore compreso tra la direzione 70°N (levante) e 280°N (ponente). La massima lunghezza di fetch efficace ottenuto al largo di Voltri compete alla direzione 190°N (mezzogiorno) con valore di 241 km.

In Figura 6 sono riportate graficamente le direzioni di provenienza del vento e quelle degli stati di moto ondoso da essi generati. Le deviazioni tra la direzione del vento e quella del moto ondoso sono riportate graficamente in Figura 7 ed in forma numerica nella Tabella 1.

Si osserva uno scostamento verso le direzioni foranee tra direzione del vento e direzione media del moto ondoso generato dai venti di mezzogiorno (160°N÷200°N) dell'ordine dei 10°. I venti che soffiano sul settore di scirocco (120°N÷150°N) presentano uno scostamento con la direzione del moto ondoso di 15°÷30°, mentre quelli che soffiano sul settore di libeccio (210°N÷240°N) di 10°÷25°.

Infine lo scostamento verso le direzioni foranee tra direzione del vento e direzione media del moto ondoso generato dai venti di ponente (250°N÷280°N) e levante (70°N÷110°N) risulta dell'ordine dei 30°÷40°. Peraltro la distribuzione dei moti ondosi dipende anche dal regime dei venti, che nel Mar Ligure sono più frequenti con provenienza dai settori di scirocco e libeccio.

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	6.76	5.59	52.0	180	198.38	240.27	3.0
10	6.85	5.96	53.0	190	500.00	241.38	-2.0
20	7.10	6.58	54.0	200	500.00	233.43	-6.0
30	7.46	7.66	52.0	210	500.00	217.08	-11.0
40	8.41	9.66	49.0	220	500.00	193.73	-15.0
50	9.68	13.13	46.0	230	54.66	165.39	-19.0
60	10.62	18.77	42.0	240	27.95	134.36	-24.0
70	12.85	27.21	40.0	250	25.07	103.08	-28.0
80	16.26	39.29	37.0	260	16.60	73.45	-32.0
90	29.41	54.70	35.0	270	10.88	47.92	-36.0
100	33.71	72.58	33.0	280	9.22	28.55	-40.0
110	75.38	92.45	30.0	290	7.57	16.01	-44.0
120	142.22	114.41	27.0	300	6.13	9.32	-49.0
130	186.96	138.39	24.0	310	6.40	6.69	-53.0
140	500.00	164.07	20.0	320	6.33	5.89	-56.0
150	170.24	189.85	16.0	330	6.15	5.50	-60.0
160	160.02	212.84	11.0	340	5.87	5.35	-63.0
170	184.29	230.34	7.0	350	6.34	5.40	-65.0

Levante
Libeccio
Scirocco
Ponente
Mezzogiorno

Tabella 1. Fetch geografici ed efficaci al largo di Voltri

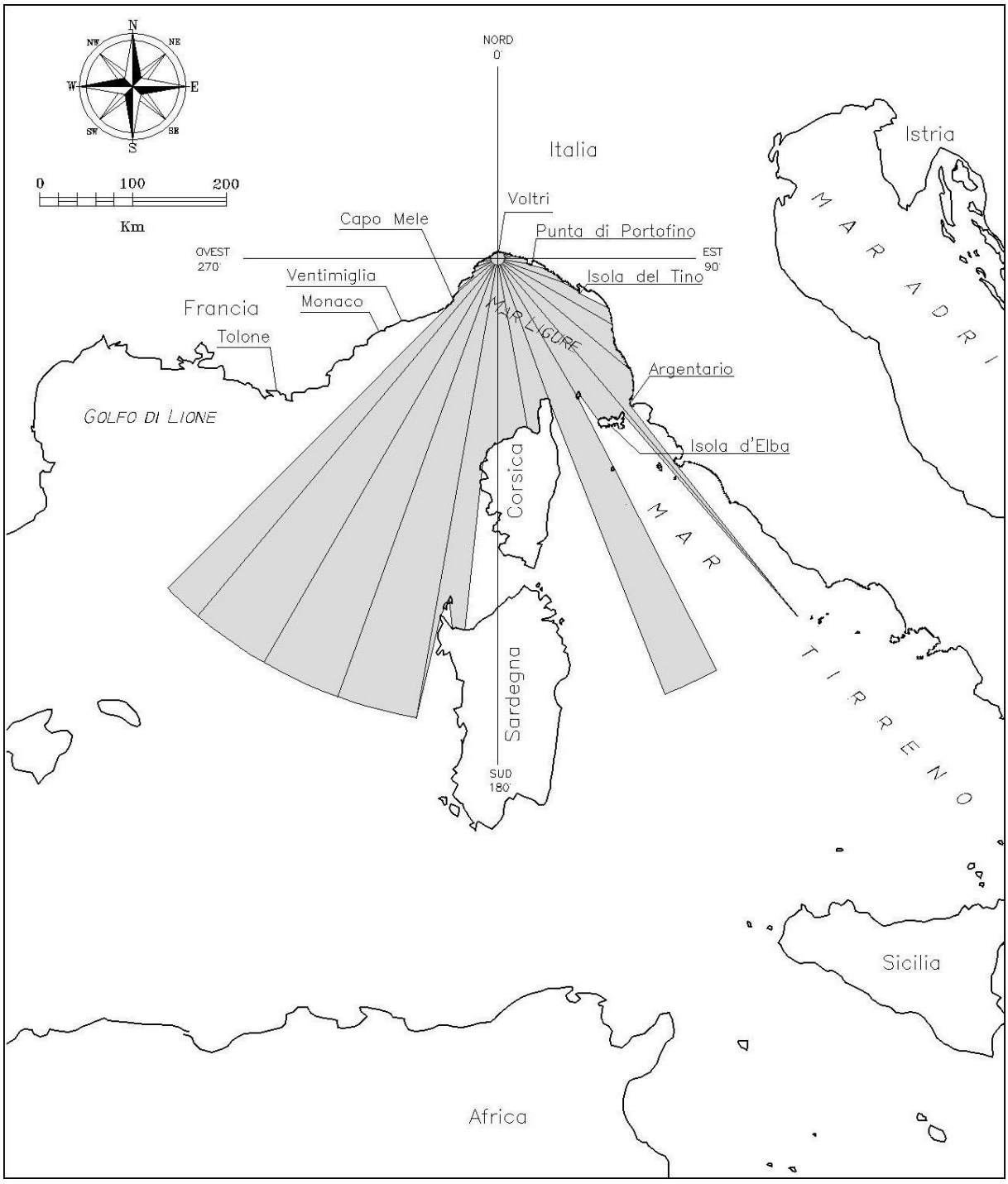


Figura 4. Fetch geografici al largo di Voltri

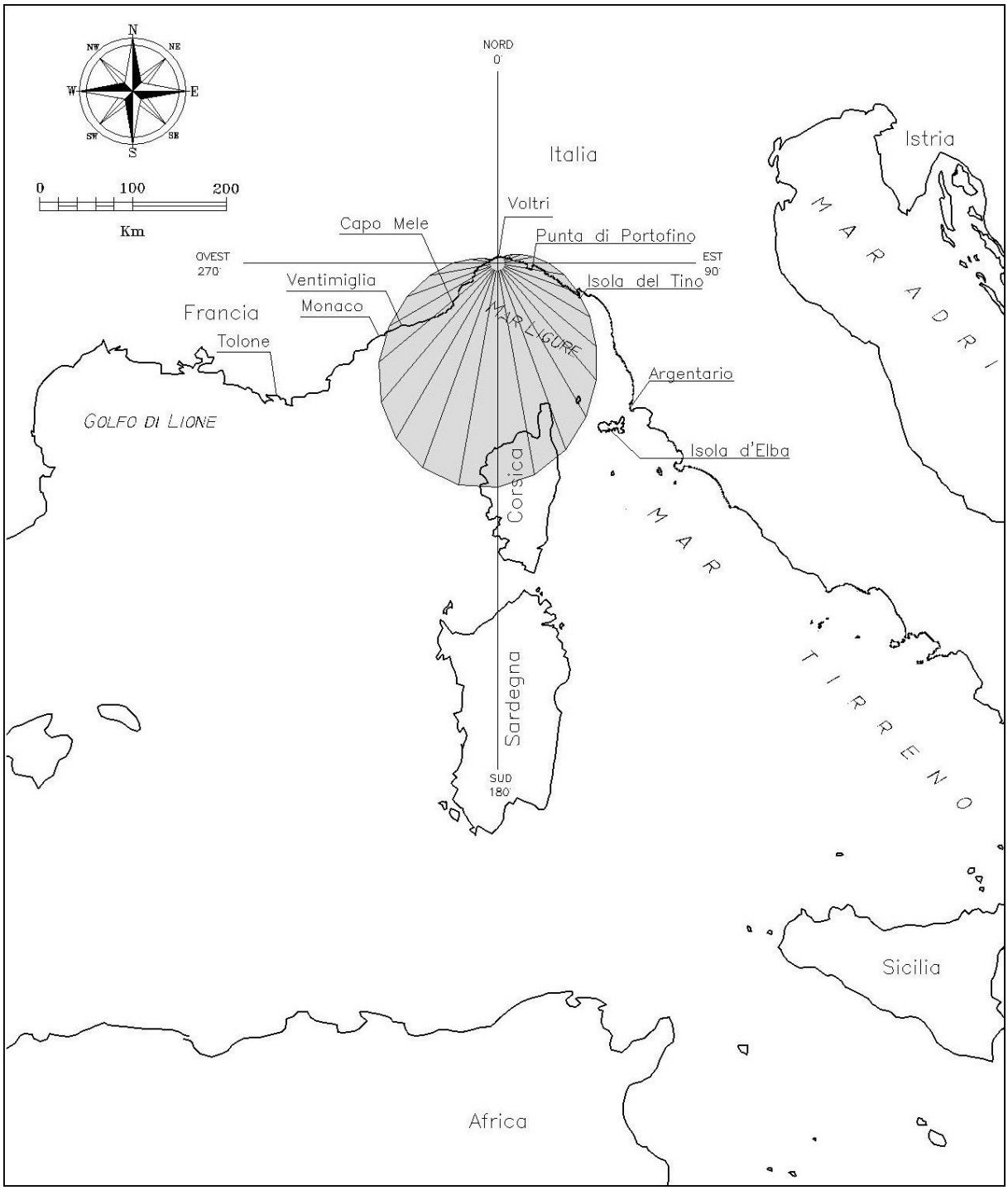


Figura 5. Fetch efficaci al largo di Voltri

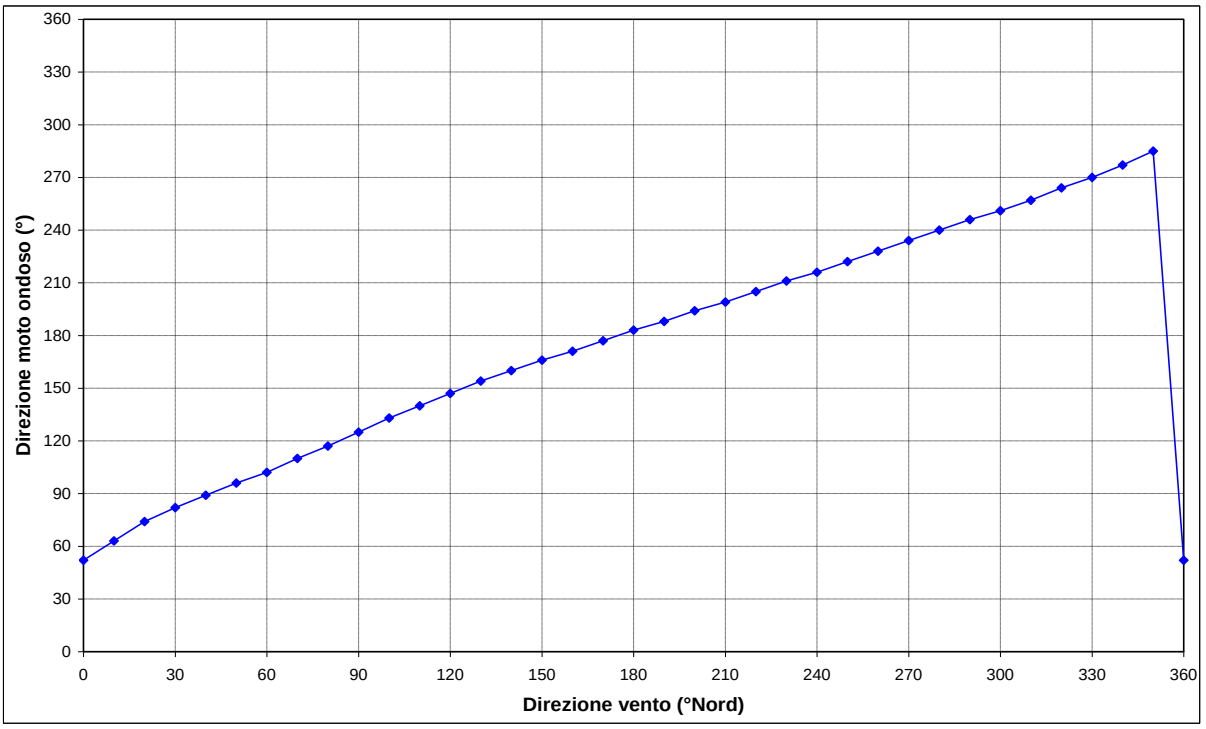


Figura 6. Direzione di provenienza del vento e degli stati di moto ondoso da esso generati al largo di Voltri

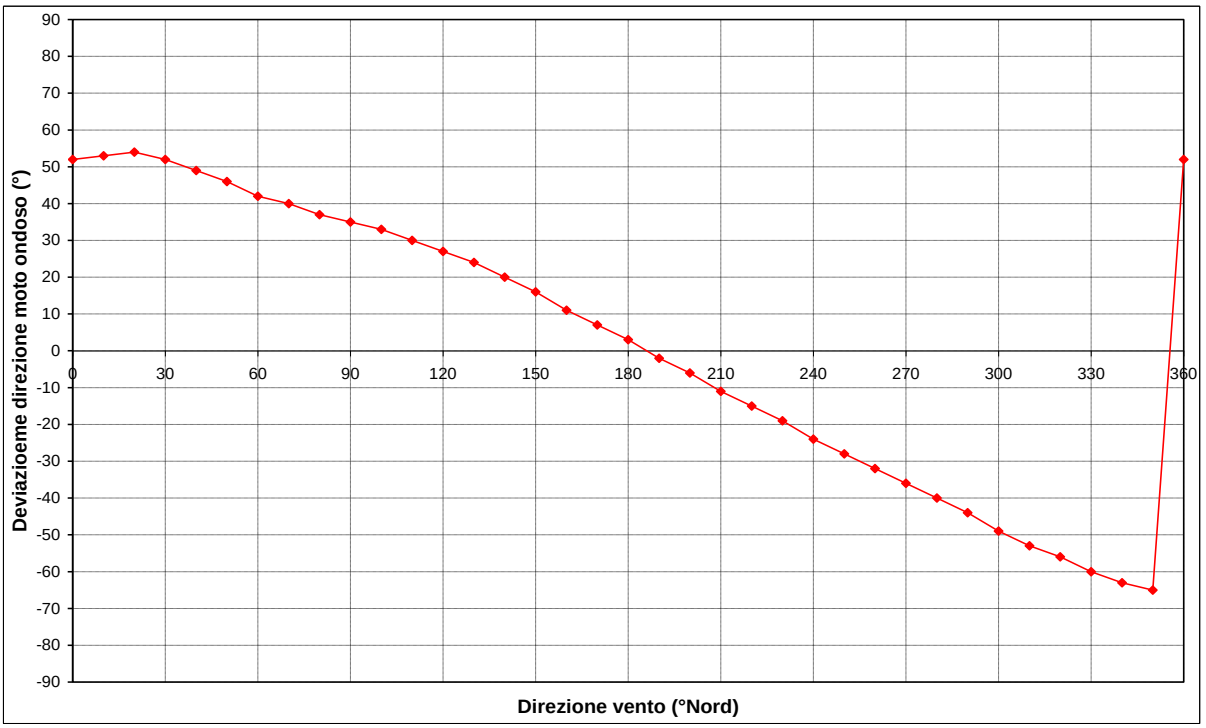


Figura 7. Deviazioni tra la direzione del vento e quella del moto ondoso al largo di Voltri

3.2. Fonte di dati meteomarini a disposizione

Per definire anche quantitativamente il regime ondoso (ossia la distribuzione di frequenza delle onde in altezza, periodo e direzione) è necessario raccogliere ed elaborare tutti i dati disponibili.

In ogni caso l'analisi del moto ondoso va basata su dati rilevati o ricostruiti per un periodo di tempo abbastanza lungo.

Le possibili fonti di dati sono costituite da:

A. misure strumentali dirette (le migliori se esistenti, fonte dati R.O.N.).

B. osservazioni a vista dalle navi al largo (fonte dati KNMI oppure UKMO);

C. osservazioni a vista da stazioni costiere (fonte dati M.M.);

D. ricostruzione indiretta con modelli matematici in funzione di serie storiche dei dati di vento registrate da stazioni costiere;

E. ricostruzione indiretta con modelli matematici in funzione di serie storiche dei dati meteorologici tarati con misure dirette satellitari;

Occorre peraltro osservare che le statistiche basate sulle osservazioni visuali delle onde (B o C) sia a riva che al largo sono di affidabilità limitata e forniscono indicazioni per lo più qualitative, non solo per l'approssimazione delle stime a vista, ma anche per la scarsa omogeneità spaziale e temporale delle rilevazioni.

Anche le ricostruzioni indirette basate sull'applicazione del metodo SMB (D) risultano comunque affette dalle imprecisioni del modello stesso e dalla imperfetta rappresentatività dei venti misurati da una stazione costiera nei riguardi del campo di vento globale sul fetch.

Nel caso in esame sono disponibili misure strumentali dirette, per un periodo abbastanza lungo non inferiore a 15 anni, rappresentate dalle registrazioni della boa accelerometrica direzionale posizionata al largo di La Spezia (43°55’41.99”N 9°49’36,01”E) della Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.), gestita attualmente dall’ISPRA dal 1 luglio 1989 al 31 marzo 2007 sul fondale di 100 m (vedi Figura 2). Si osserva che la boa direzionale di La Spezia risulta essere posizionata circa 100 km a sud-est del punto di riferimento al largo di Voltri (44°21’54”N 8°45’5,5”E) (vedi Figura 8 e Figura 9).

In Tabella 2 è riportato il calcolo del rendimento dell'ondametro della stazione ondametrica di La Spezia per il periodo tra il 1 luglio 1989 ed il 31 marzo 2007. Dall’esame della tabella si evince che il rendimento della boa di La Spezia del periodo 1 luglio 1989 ÷ 30 giugno 2004 è risultato buono circa 89,38%, mentre quello del periodo 1 luglio 2004 ÷ 31 marzo 2007 è risultato scarso ed inferiore al 50%. Per tale motivo nel seguito si è fatto riferimento solamente ai dati della stazione di La Spezia del periodo di 15 anni compreso tra il 1 luglio 1989 ed il 30 giugno 2004.

Nella Tabella 3, Tabella 4, Tabella 5e Tabella e nella Figura 9 e Figura 10 sono sintetizzati i dati ondametrici di La Spezia del periodo tra 1 luglio 1989 ed il 30 giugno 2004.

Nella Tabella 3 è riportata la distribuzione del numero di eventi ondosi per classi di Hs e direzione di provenienza, mentre nella Tabella 4 è riportata la distribuzione del numero di eventi ondosi per classi di Hs e periodo di picco Tp. Nella Tabella 5 è riportata la percentuale annuale degli eventi ondosi per classi di Hs e direzione di provenienza, infine nella Tabella 6 è riportata la distribuzione dei dati ondametrici per classi di altezze d'onda significativa e periodo di picco.

Dall'esame della Figura 10 e dalla Tabella 5 risulta che a La Spezia alla profondità di -100 m sul l.m.m. sono più frequenti (quasi il 40%) le mareggiate di libeccio (210°-240°N), frequenti sono anche quelle di mezzogiorno (160°-200°N) (quasi il 18%) e di ponente (250°-290°) (oltre il 18%), meno frequenti risultano essere le mareggiate di scirocco (120°-150°) (quasi il 6%) e quelle di maestrale (300°-330°) (appena il 5%).

Di una certa frequenza risultano anche le mareggiate di tramontana (340°-20°) (circa il 7,5%), scarsi gli altri mari.

Al largo di La Spezia le mareggiate più intense con altezze significative maggiori di 4,5 m si registrano principalmente con direzione di provenienza da mezzogiorno, libeccio e ponente comprese tra 180°N e 270°N.

Per quanto riguarda la distribuzione dei periodi di picco con le altezze d'onda dalla Figura 10 appare evidente che tale distribuzione presenta due massimi distinti per le onde con altezza significativa inferiore a 2,5 m. Per questo tipo di onde si registra un primo massimo per periodi di picco compresi tra 6 s e 8 s ed un secondo massimo per periodi di picco compresi tra 8 s e 10 s.

Le onde con altezza significativa maggiore di 2,5 m presentano invece una distribuzione con un massimo per periodi di picco compresi tra 9 s e 10 s.

Quanto rilevato denota la presenza di onde di mare morto (swell) caratterizzate da basse frequenze e basse altezze d'onda (Hs minore di 2,5 m).

Per quanto riguarda la correlazione tra il periodo medio Tm ed il periodo di picco Tp i dati del periodo medio registrato dalla boa di La Spezia risultano mediamente espressi dalla:

Tm=0,81 Tp (4)

La distribuzione del rapporto Tm/Tp in funzione dell'altezza d'onda per la boa di La Spezia è riportato nella figura



Figura 8. Boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia



Figura 9. Posizione della boa della rete R.O.N. di La Spezia e del punto di riferimento al largo di Voltri

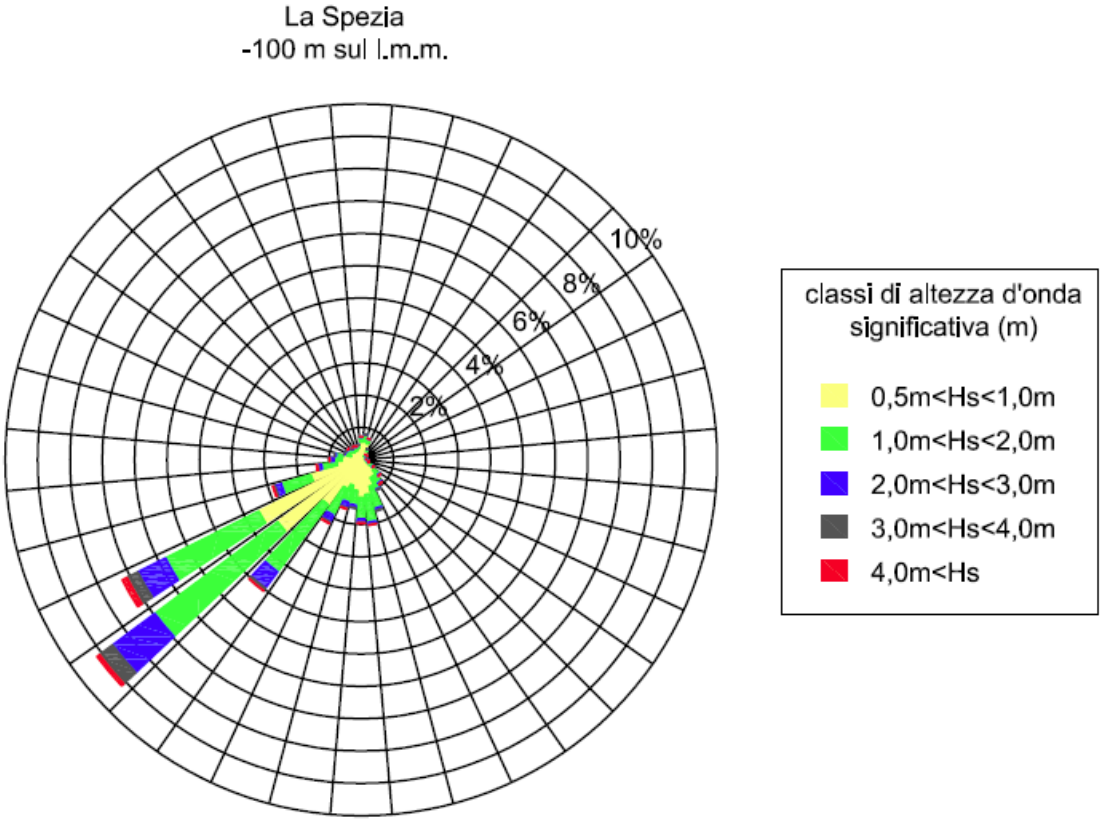


Figura 10. Diagramma polare del moto ondoso al largo di La Spezia, ricostruzione in base ai dati della boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia

Periodo di osservazione 01/07/1989-30/06/2004 - numero osservazioni utili 39 548

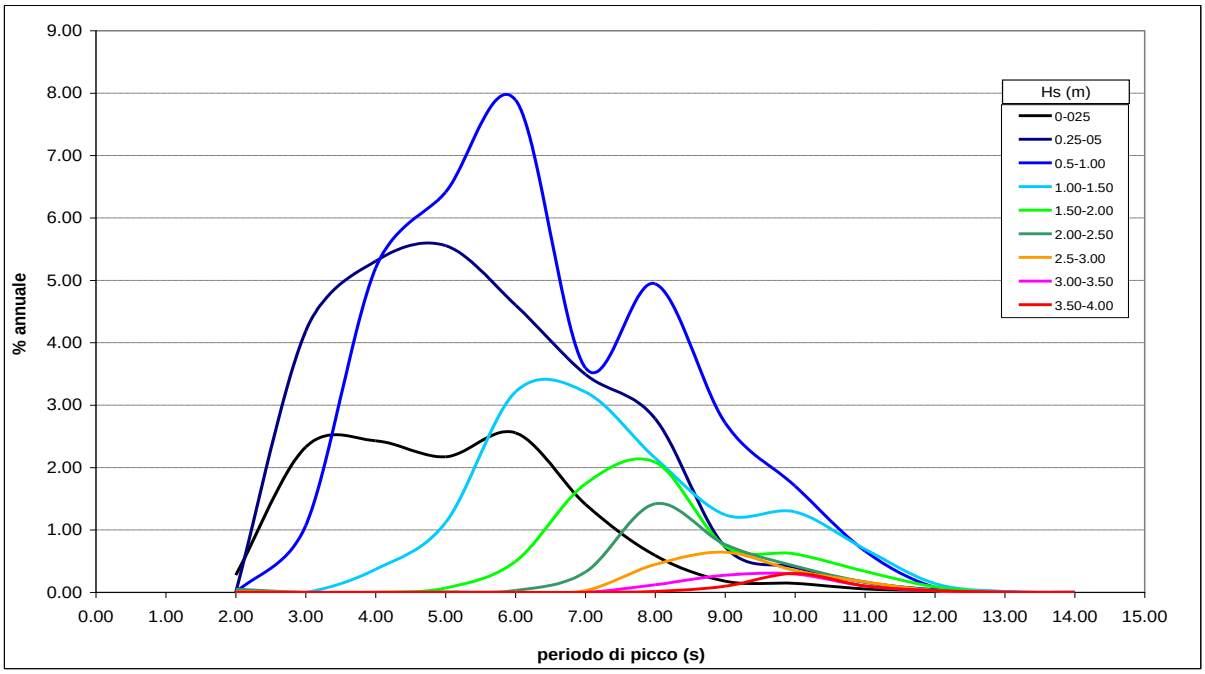


Figura 11. Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs al largo di La Spezia, ricostruzione in base ai dati della boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia

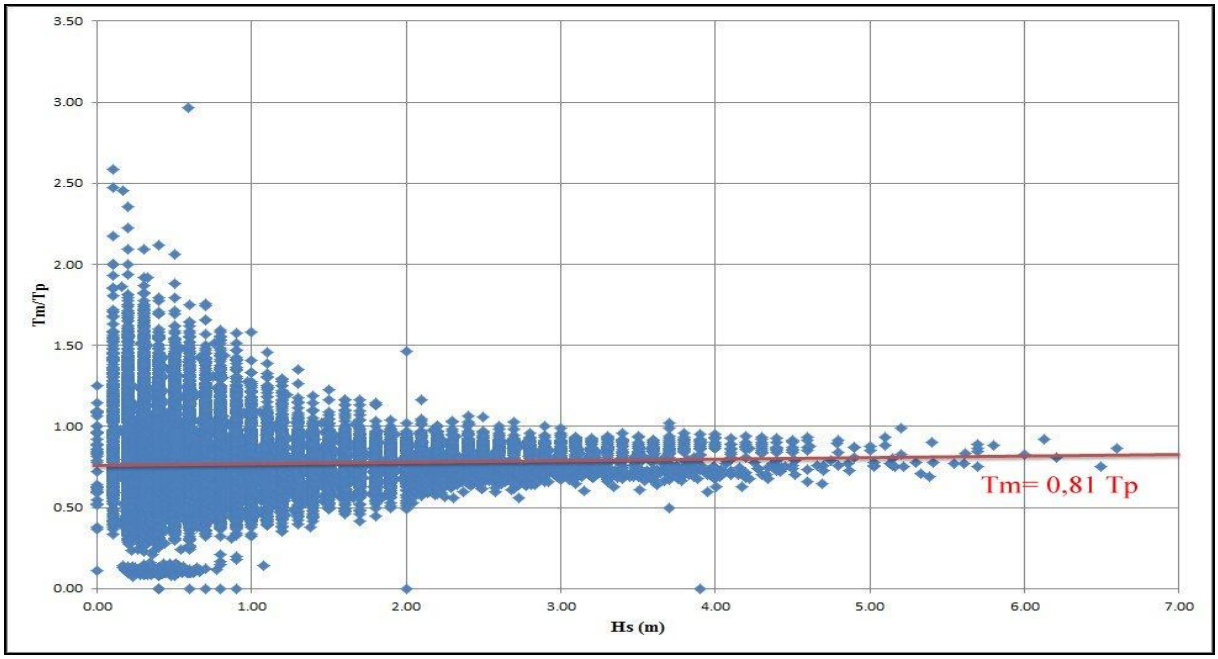


Figura 12. Distribuzione del rapporto Tm/Tp in funzione dell'altezza significativa Hs al largo di La Spezia, ricostruzione in base ai dati della boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia

Periodo di osservazione 01/07/1989 – 30/06/2004

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
1989	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7	218	87.90
	8	219	88.31
	9	234	97.50
	10	247	99.60
	11	240	100.00
	12	246	99.19
1990	1	242	97.58
	2	176	78.57
	3	200	80.65
	4	224	93.33
	5	248	100.00
	6	229	95.42
	7	229	92.34
	8	248	100.00
	9	234	97.50
	10	243	97.98
	11	196	81.67
	12	247	99.60
1991	1	248	100.00
	2	203	90.63
	3	247	99.60
	4	210	87.50
	5	240	96.77
	6	235	97.92
	7	240	96.77
	8	223	89.92
	9	238	99.17
	10	217	87.50
	11	237	98.75
	12	247	99.60
1992	1	206	83.07
	2	209	90.09
	3	248	100.00
	4	240	100.00
	5	206	83.07
	6	209	87.08
	7	233	93.95
	8	246	99.19
	9	235	97.92
	10	165	66.53
	11	237	98.75
	12	228	91.94

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
1993	1	221	89.11
	2	224	100.00
	3	247	99.60
	4	202	84.17
	5	222	89.52
	6	227	94.58
	7	225	90.73
	8	242	97.58
	9	239	99.58
	10	206	83.07
	11	239	99.58
	12	179	72.18
1994	1	165	66.53
	2	219	97.77
	3	247	99.60
	4	164	68.33
	5	229	92.34
	6	239	99.58
	7	237	95.57
	8	207	83.47
	9	189	78.75
	10	188	75.81
	11	234	97.50
	12	244	98.39
1995	1	247	99.60
	2	224	100.00
	3	239	96.37
	4	238	99.17
	5	248	100.00
	6	238	99.17
	7	248	100.00
	8	235	94.76
	9	231	96.25
	10	247	99.60
	11	211	87.92
	12	200	80.65
1996	1	194	78.23
	2	207	89.22
	3	210	84.68
	4	240	100.00
	5	240	96.77
	6	214	89.17
	7	238	95.97
	8	242	97.58
	9	227	94.58
	10	248	100.00
	11	226	94.17
	12	205	82.66

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
1997	1	209	84.27
	2	224	100.00
	3	247	99.60
	4	238	99.17
	5	246	99.19
	6	240	100.00
	7	228	91.94
	8	248	100.00
	9	239	99.58
	10	247	99.60
	11	240	100.00
	12	247	99.60
1998	1	248	100.00
	2	223	99.55
	3	246	99.19
	4	238	99.17
	5	248	100.00
	6	239	99.58
	7	247	99.60
	8	197	79.44
	9	235	97.92
	10	245	98.79
	11	240	100.00
	12	247	99.60
1999	1	246	99.19
	2	213	95.09
	3	241	97.18
	4	235	97.92
	5	241	97.18
	6	218	90.83
	7	190	76.61
	8	163	65.73
	9	208	86.67
	10	203	81.86
	11	234	97.50
	12	184	74.19
2000	1	172	69.36
	2	227	97.85
	3	247	99.60
	4	173	72.08
	5	127	51.21
	6	194	80.83
	7	247	99.60
	8	225	90.73
	9	238	99.17
	10	245	98.79
	11	239	99.58
	12	228	91.94

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
2001	1	247	99.60
	2	223	99.55
	3	244	98.39
	4	206	85.83
	5	225	90.73
	6	239	99.58
	7	248	100.00
	8	69	27.82
	9	152	63.33
	10	247	99.60
	11	236	98.33
	12	229	92.34
2002	1	228	91.94
	2	198	88.39
	3	238	95.97
	4	240	100.00
	5	248	100.00
	6	176	73.33
	7	248	100.00
	8	203	81.86
	9	118	49.17
	10	26	10.48
	11	58	24.17
	12	122	49.19
2003	1	248	100.00
	2	224	100.00
	3	245	98.79
	4	237	98.75
	5	190	76.61
	6	162	67.50
	7	213	85.89
	8	199	80.24
	9	238	99.17
	10	245	98.79
	11	237	98.75
	12	207	83.47
2004	1	0	0.00
	2	203	87.50
	3	33	13.31
	4	231	96.25
	5	245	98.79
	6	239	99.58
	7	233	93.95
	8	204	82.26
	9	40	16.67
	10	67	27.02
	11	86	35.83
	12	0	

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
2005	1	0	0.00
	2	0	0.00
	3	60	24.19
	4	232	96.67
	5	192	77.42
	6	107	44.58
	7	222	89.52
	8	191	77.02
	9	3	1.25
	10	126	50.81
	11	89	37.08
	12	234	94.36
2006	1	116	46.77
	2	4	1.79
	3	0	0.00
	4	0	0.00
	5	189	76.21
	6	237	98.75
	7	247	99.60
	8	245	98.79
	9	77	32.08
	10	0	0.00
	11	0	0.00
	12	25	10.08
2007	1	10	4.03
	2	33	14.73
	3	3	1.21
	4		
	5		
	6		
	7		
	8		
	9		
	10		
	11		
	12		

Periodo	Rend. (%)
lug/1989-dic/1989	95.42
1990	92.89
1991	95.34
1992	90.96
1993	91.64
1994	87.80
1995	96.12
1996	91.92
1997	97.75
1998	97.74
1999	88.33
2000	87.56
2001	87.93
2002	72.04
2003	90.66
gen/2004-giu/2004	65.90
lug/2004-dic/2004	42.62
2005	49.41
2006	38.67
2007	1.66
lug/1989-giu/2004	**89.38**

Tabella 2. Rendimento ondametro della stazione R.O.N. di La Spezia

	Hs (m)																
Dir. °N	*0.0÷0.25*	*0.25÷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*	*0.3÷4.0*	*4.0÷4.5*	*4.5÷5.0*	*5.0÷5.5*	*5.5÷6.0*	*6.0÷6.5*	*6.5÷7.0*	*>7.0*	*TOT*
0	75	210	280	56	4	2	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	632
10	95	241	312	78	6	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	736
20	106	280	281	57	2	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	731
30	85	179	165	23	5	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	461
40	63	104	68	17	4	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	261
50	37	76	80	19	4	2	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	222
60	32	75	71	14	4	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	200
70	31	80	59	11	5	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	190
80	32	66	56	17	5	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	182
90	25	62	57	9	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159
100	35	89	73	23	3	7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	231
110	27	72	82	19	6	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	214
120	45	90	119	54	10	6	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	329
130	34	116	229	67	22	11	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	484
140	69	168	322	89	17	10	7	3	3	0	1	0	0	0	0	0	689
150	80	262	348	130	28	6	5	3	3	0	0	0	0	0	0	0	865
160	103	301	481	221	57	19	9	3	6	0	0	0	0	0	0	0	1200
170	127	380	582	253	86	19	11	3	3	1	0	0	0	0	0	0	1465
180	167	455	659	190	78	34	8	5	2	2	1	0	0	0	0	0	1601
190	177	470	525	126	52	23	12	4	2	0	0	0	0	0	0	0	1391
200	223	420	455	171	43	54	20	5	6	1	2	2	1	0	0	0	1403
210	239	449	529	269	97	66	27	10	9	2	2	0	0	0	1	0	1700
220	258	523	907	624	399	178	73	22	14	4	0	0	0	0	0	0	3002
230	374	939	1679	1068	800	398	246	129	70	24	7	3	2	0	0	0	5739
240	390	1235	1821	842	430	225	155	88	61	33	16	9	3	1	1	0	5310
250	386	879	944	251	126	54	28	14	8	4	2	1	0	0	0	0	2697
260	284	661	465	152	35	34	11	6	4	5	2	1	0	0	0	0	1660
270	256	492	334	76	23	33	14	2	4	1	0	0	1	0	0	0	1236
280	193	355	315	65	17	17	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	969
290	164	242	185	64	16	9	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	685
300	146	215	185	41	12	8	3	1	4	0	0	0	0	0	0	0	615
310	116	161	166	41	9	12	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	510
320	100	118	162	38	6	8	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	435
330	74	144	165	41	3	4	4	2	1	1	0	1	0	0	0	0	440
340	69	133	164	39	3	5	0	3	2	1	1	0	0	1	0	0	421
350	90	147	209	28	5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	483
INCERTI	3732	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3732
TOT	8539	10889	13534	5283	2424	1268	658	322	216	84	34	17	8	2	2	0	43280

Tabella 3. Distribuzione annuale del numero di eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza

Località: La Spezia - periodo: 1 luglio 1989 - 30 giugno 2004

Ts (s)	Hs (m)															*Tot.*
	0.0÷0.25	*0.25÷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*	*0.3÷4.0*	*4.0÷4.5*	*4.5÷5.0*	*5.0÷5.5*	*5.5÷6.0*	*6.0÷6.5*	*> 6.5*	
0.0÷2.0	77	0	0	0	0	20	5	0	1	1	3	0	0	0	0	107
2.0÷3.0	32	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
3.0÷4.0	915	1645	420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2980
4.0÷5.0	954	2085	2041	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5225
5.0÷6.0	854	2183	2519	440	27	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6026
6.0÷7.0	1004	1809	3100	1263	195	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7383
7.0÷8.0	554	1373	1413	1261	683	128	11	0	0	0	0	0	0	0	0	5423
8.0÷9.0	232	1094	1943	845	819	558	176	48	6	0	0	0	0	0	0	5721
9.0÷10.0	70	286	1068	488	290	301	253	108	38	6	1	1	0	0	0	2910
10.0÷11.0	57	158	670	507	242	165	137	116	119	34	11	2	1	0	0	2219
11.0÷12.0	21	64	261	272	133	66	66	40	41	40	17	13	4	2	1	1041
12.0÷13.0	11	17	32	55	35	14	10	10	11	5	3	3	3	1	1	211
13.0÷14.0	0	2	1	6	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	12
>=14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOT	4781.00	10717.00	13468.00	5282.00	2424.00	1268.00	658.00	323.00	217.00	86.00	35.00	19.00	8.00	3.00	2.00	39291

Tabella 4. Distribuzione annuale del numero di eventi ondosi, per classi di Hs e periodo di picco Tp

Dir	*Hs (m)*															*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷0.25*	*0.25 ÷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*	
0	0.19	0.53	0.71	0.14	0.01	0.01		0.01	0.01	0.00						1.60
10	0.24	0.61	0.79	0.20	0.02	0.00	0.00		0.01							1.86
20	0.27	0.71	0.71	0.14	0.01	0.00	0.00		0.00	0.01						1.85
30	0.21	0.45	0.42	0.06	0.01	0.01	0.00		0.00							1.17
40	0.16	0.26	0.17	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00		0.00						0.66
50	0.09	0.19	0.20	0.05	0.01	0.01	0.00	0.01		0.00						0.56
60	0.08	0.19	0.18	0.04	0.01	0.01			0.00							0.51
70	0.08	0.20	0.15	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00								0.48
80	0.08	0.17	0.14	0.04	0.01	0.01		0.01								0.46
90	0.06	0.16	0.14	0.02	0.01	0.01	0.00									0.40
100	0.09	0.23	0.18	0.06	0.01	0.02			0.00							0.58
110	0.07	0.18	0.21	0.05	0.02	0.02	0.01									0.54
120	0.11	0.23	0.30	0.14	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00							0.83
130	0.09	0.29	0.58	0.17	0.06	0.03	0.01	0.01	0.00							1.22
140	0.17	0.42	0.81	0.23	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01		0.00					1.74
150	0.20	0.66	0.88	0.33	0.07	0.02	0.01	0.01	0.01							2.19
160	0.26	0.76	1.22	0.56	0.14	0.05	0.02	0.01	0.02							3.03
170	0.32	0.96	1.47	0.64	0.22	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00						3.70
180	0.42	1.15	1.67	0.48	0.20	0.09	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00					4.05
190	0.45	1.19	1.33	0.32	0.13	0.06	0.03	0.01	0.01							3.52
200	0.56	1.06	1.15	0.43	0.11	0.14	0.05	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00			3.55
210	0.60	1.14	1.34	0.68	0.25	0.17	0.07	0.03	0.02	0.01	0.01				0.00	4.30
220	0.65	1.32	2.29	1.58	1.01	0.45	0.18	0.06	0.04	0.01						7.59
230	0.95	2.37	4.25	2.70	2.02	1.01	0.62	0.33	0.18	0.06	0.02	0.01	0.01			14.51
240	0.99	3.12	4.60	2.13	1.09	0.57	0.39	0.22	0.15	0.08	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	13.43
250	0.98	2.22	2.39	0.63	0.32	0.14	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00				6.82
260	0.72	1.67	1.18	0.38	0.09	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00				4.20
270	0.65	1.24	0.84	0.19	0.06	0.08	0.04	0.01	0.01	0.00			0.00			3.13
280	0.49	0.90	0.80	0.16	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00							2.45
290	0.41	0.61	0.47	0.16	0.04	0.02	0.01	0.01								1.73
300	0.37	0.54	0.47	0.10	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01							1.56
310	0.29	0.41	0.42	0.10	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00				0.00			1.29
320	0.25	0.30	0.41	0.10	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00							1.10
330	0.19	0.36	0.42	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00		0.00				1.11
340	0.17	0.34	0.41	0.10	0.01	0.01		0.01	0.01	0.00	0.00			0.00		1.06
350	0.23	0.37	0.53	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00							1.22
Tot.	12.15	27.53	34.22	13.36	6.13	3.21	1.66	0.81	0.55	0.21	0.09	0.04	0.02	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	12.15	39.69	73.91	87.27	93.40	96.60	98.27	99.08	99.63	99.84	99.93	99.97	99.99	99.99	100.00	

Tabella 5. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza

Ts (s)	*Hs (m)*														*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷0.25	*0.25 ÷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*	*0.3 ÷4.0*	*4.0 ÷4.5*	*4.5 ÷5.0*	*5.0 ÷5.5*	*5.5 ÷6.0*	*6.0 ÷6.5*	*> 6.5*	*%*	*%*
0.0 ÷2.0	0.28	0.00				0.05	0.01		0.00	0.00	0.01					0.36	0.36
2.0 ÷3.0	2.33	4.19	1.07													7.58	7.94
3.0 ÷4.0	2.43	5.31	5.19	0.37												13.30	21.24
4.0 ÷5.0	2.17	5.56	6.41	1.12	0.07	0.01										15.34	36.58
5.0 ÷6.0	2.56	4.60	7.89	3.21	0.50	0.03										18.79	55.37
6.0 ÷7.0	1.41	3.49	3.60	3.21	1.74	0.33	0.03									13.80	69.17
7.0 ÷8.0	0.59	2.78	4.95	2.15	2.08	1.42	0.45	0.12	0.02							14.56	83.73
8.0 ÷9.0	0.18	0.73	2.72	1.24	0.74	0.77	0.64	0.27	0.10	0.02	0.00	0.00				7.41	91.14
9.0 ÷10.0	0.15	0.40	1.71	1.29	0.62	0.42	0.35	0.30	0.30	0.09	0.03	0.01	0.00			5.65	96.78
10.0 ÷11.0	0.05	0.16	0.66	0.69	0.34	0.17	0.17	0.10	0.10	0.10	0.04	0.03	0.01	0.01	0.00	2.65	99.43
11.0 ÷12.0	0.03	0.04	0.08	0.14	0.09	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.54	99.97
12.0 ÷13.0		0.01	0.00	0.02		0.00		0.00	0.00							0.03	100.00
13.0 ÷14.0																	100.00
>=14																	100.00
TOT	12.17	27.28	34.28	13.44	6.17	3.23	1.67	0.82	0.55	0.22	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01	100.00	
tot cumulato	12.17	39.44	73.72	87.16	93.33	96.56	98.24	99.06	99.61	99.83	99.92	99.97	99.99	99.99	100.00		

Tabella 6. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco

Località: La Spezia – periodo: 1 luglio 1989 - 30 giugno 2004

3.3. Definizione delle condizioni di moto ondoso in acqua profonda

La determinazione della distribuzione di frequenza delle onde, secondo l'altezza ed il periodo significativi e la direzione di provenienza, è necessaria per due obiettivi fondamentali:

a) la definizione del cosiddetto "clima d'onda", comprensivo di tutte le ondazioni nell'ambito del settore di traversia, per la valutazione dei fenomeni di dinamica costiera;
b) la definizione delle probabilità di occorrenza di eventi ondosi estremi per il dimensionamento delle opere esterne di difesa e la verifica di condizioni idrauliche eccezionali alla foce.

Per la determinazione degli eventi estremi alla profondità di 100 m al largo della foce del torrente Leira sono state eseguite le seguenti elaborazioni:

1. trasposizione dei dati ondametrici misurati al largo di La Spezia tra il 1 luglio 1989 ed il 30 giugno 2004 nel punto al largo di Voltri posto su fondali di 100 m (vedi Figura 2);
2. anali statistica della serie dei dati ricostruiti alla profondità di 100 m ed individuazione delle caratteristiche delle onde estreme.

Inoltre per associare ad ogni classe di altezza significativa degli eventi estremi alla profondità di 100 m un periodo di picco si sono determinate le correlazioni Tp=f(Hs) in base agli stessi dati utilizzati per la statistica degli eventi estremi.

3.3.1. Trasposizione dei dati ondametrici

Per la trasposizione dei dati ondamentrici dal punto di misura al punto al largo del litorale in esame si è impiegato un metodo che permette di ricostruire una serie storiche di moto ondoso in un punto di interesse a partire da quella rilevata nel punto di misura in funzione dei fetches efficaci e della correlazione tra la direzione del vento e quella del moto ondoso generato. L'ipotesi di base del metodo consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione), che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondametro, abbiano interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito di interesse. Inoltre si suppone che le aree di generazione del moto ondoso possano essere determinate per ciascun punto utilizzando il concetto di "fetch efficace" e che la direzione del moto ondoso è correlata alla direzione del vento che lo ha generato. 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 a quello di interesse.

Nel caso di fetches 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):

$$\frac{gH_{mo}}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{gF}{U_A} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

$$\frac{gT_m}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left(\frac{gF}{U_A} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{6}$$

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 interesse, e fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetches efficaci F^P ed 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:

$$\frac{H_{mo}^P}{H_{mo}^O} = \left(\frac{F^P}{F^O} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

$$\frac{H_{mo}^P}{H_{mo}^O} = \left(\frac{F^P}{F^O} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

Queste espressioni si ottengono ovviamente nell'ipotesi 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 caratterizzate dalla stessa velocità del vento; il metodo quindi si completa utilizzando la legge che stabilisce il legame tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso da esso generato viste in precedenza.

Affinché la trasposizione dei dati sia aderente alle caratteristiche del moto ondoso del sito in esame, è pertanto necessario che la direzione e velocità del vento sulle le aree di generazione del punto di misura e di quello di interesse siano uguali, ovvero che le due arre di generazione del moto ondoso siano esposte agli stessi venti. A tal proposito si segnala che sia il punto al largo di Voltri, relativo alla profondità di circa 100 m (vedi Figura 9) che l'ondametro di La Spezia presentano aree di generazione esposte ai venti che spirano sul Mar Ligure. In particolare il punto di riferimento al largo di Voltri risulta essere posto circa 100 km a nord-ovest della boa di La Spezia. Per quanto riguarda il settore secondario di scirocco il metodo presuppone che i venti che spirano lungo il litorale Versiliese e che determinano il moto ondoso a La Spezia possano essere considerati analoghi a quelli che spirano

lungo la Riviera di levante, che determinano il moto ondoso del settore secondario di scirocco al largo di Voltri.

In primo luogo ci si è serviti dei fetches efficaci calcolati al largo di Voltri e riportati nella Tabella 3 e nella Tabella 1. Necessariamente lo stesso lavoro è stato eseguito per la stazione ondametrica di La Spezia.

La Figura 13 – Figura 16 e la Tabella 7 riportano sia in forma grafica che in forma numerica i valori dei fetches geografici ed efficaci ottenuti per l'ondametro di La Spezia.

Il confronto tra i fetches efficaci al largo di La Spezia con quelli di Voltri è riportato in Figura 17. Questa ultima figura mostra che il punto di interesse al largo di Voltri presenta una distribuzione dei fetches efficaci abbastanza diversa da quella di La Spezia soprattutto per quanto riguarda ponente e maestrale. Va infatti ricordato che a Voltri, diversamente che al largo di La Spezia, tali direzioni sono schermate dalla costa del Golfo di Genova. Inoltre i fecht efficaci per le direzioni di libeccio al largo di Voltri risultano essere ridotti rispetto a quelli di La Spezia.

Per la direzione di mezzogiorno di 200°N i fetch efficaci delle due stazioni risultano essere uguali, ma per le direzioni di mezzogiorno con angolo minore 200°N come anche per le direzioni di scirocco i fetch efficaci al largo di Voltri risultano essere maggiori di quelli della boa di La Spezia.

Il metodo seguito ha permesso di trasferire al largo di Voltri l'intera serie storica di valori triorari di altezza d'onda significativa spettrale, direzione media di provenienza del moto ondoso e di periodo di picco registrata tra il luglio 1989 e il giugno 2004 dall'ondametro di La Spezia, sintetizzati nella Tabella 8eTabella 9. Nella Tabella 8 è riportata la distribuzione annuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza. In Tabella 9 è riportata la distribuzione per classi di altezze d'onda significativa e periodo di picco. Il grafico del regime annuale del moto ondoso "al largo" di Voltri ricavato dal modello della trasposizione dei dati di La Spezia è riportato in Figura 17 con classificazione in settori direzionali di soli 10 gradi. In Figura 19 è riportata invece la distribuzione percentuale dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs ricostruite in base ai dati dello stesso ondametro direzionale.

Si evidenziano la prevalenza in termini di frequenza dei moti ondosi da sud-ovest (libeccio 210°-240°N) circa 42% e da sud (mezzogiorno 160-200°N) circa il 23,5%, mentre i mari da ovest (ponente 250°-290N°) risultano meno frequenti circa il 9,7% come quelli da sud-est (scirocco 120°-150N°) circa il 8,0%. Le onde più intense (H_s>4,5) hanno direzione di provenienza prevalentemente da mezzogiorno 160°-190°N con valori massimi Hs=6,4m, intense anche se di minor entità (H_s=5,3) risultano anche le mareggiate da scirocco 120°-150N°.

Dal confronto tra la Figura 10 e la Figura 19 è evidente per il regime al largo di Voltri la rotazione di circa 20° in senso antiorario dei mari da sud-ovest e da sud e di circa 10° dei mari da sud-est.

La Figura 19 mette in evidenza che la distribuzione dei periodi di picco in funzione delle altezze d'onda dalla ricostruzione al largo di Voltri mostra un solo massimo con valore del periodo di picco crescente per classi di altezza d'onda crescente.

Ciò denota l'assenza di onde di mare morto (swell) riscontrata per la boa di La Spezia, dovuta all'utilizzo del modello di trasposizione che considera tutte le onde come onde di mare vivo.

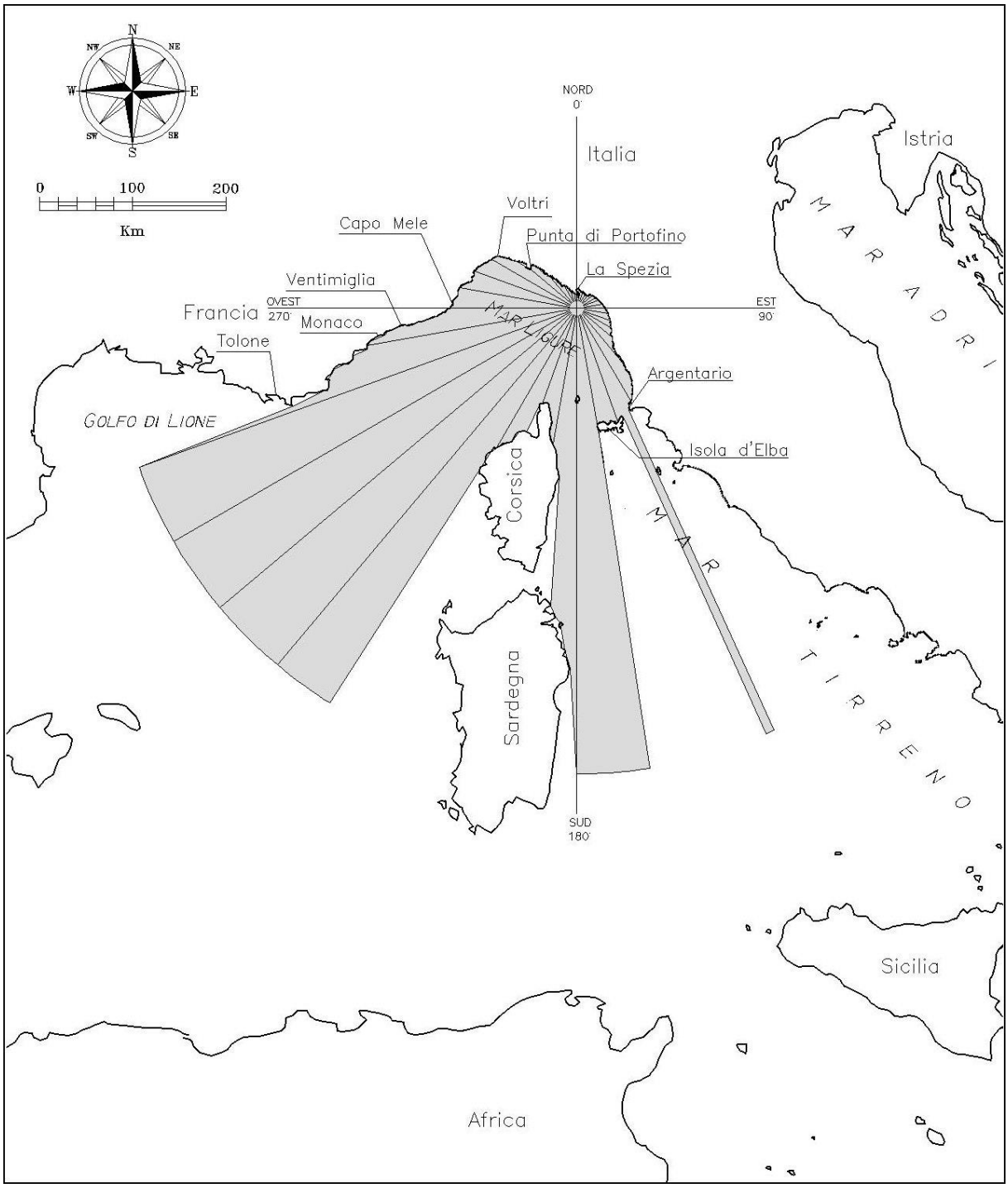


Figura 13. Fetch geografici al largo di La Spezia

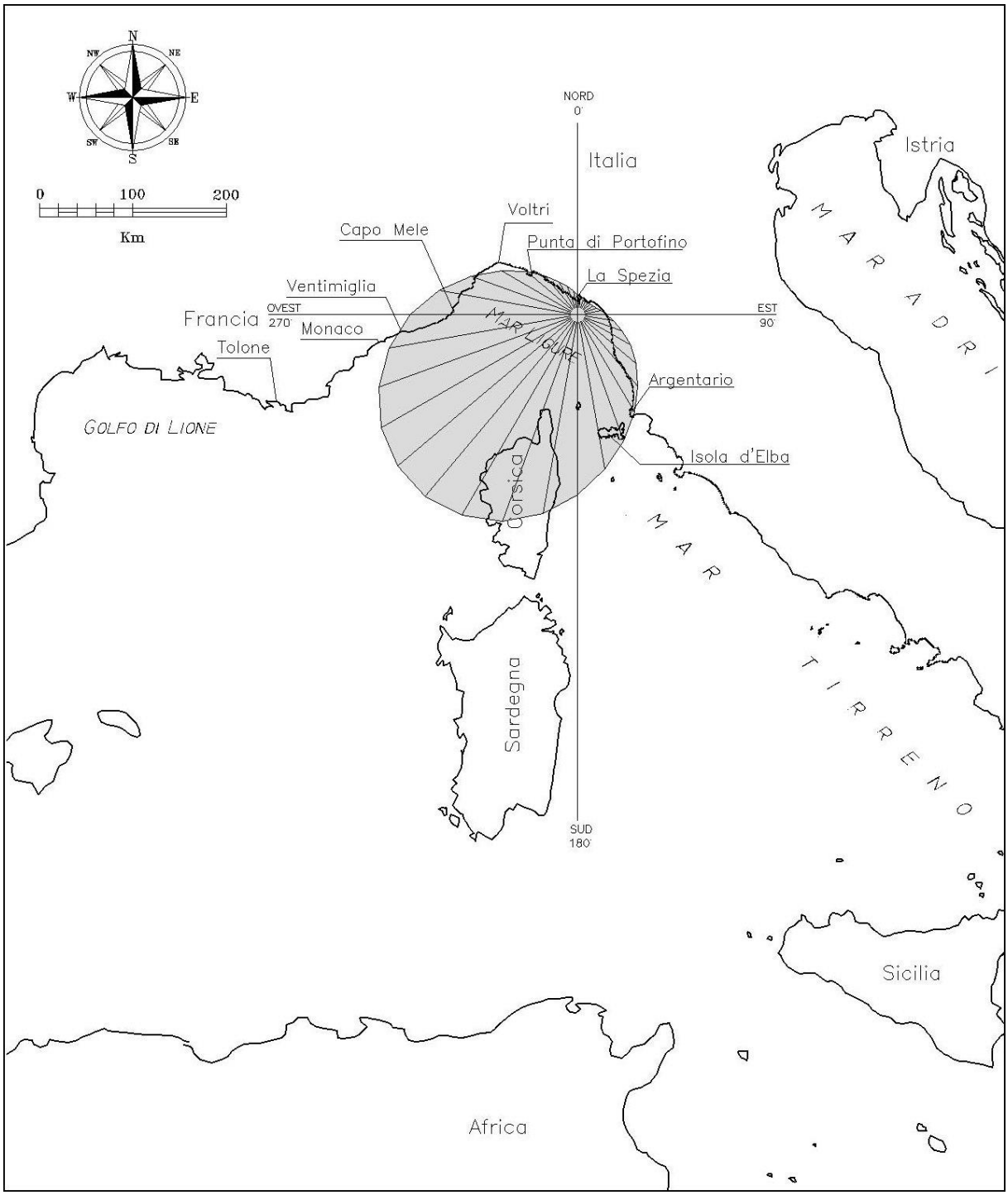


Figura 14. Fetch efficaci al largo di La Spezia

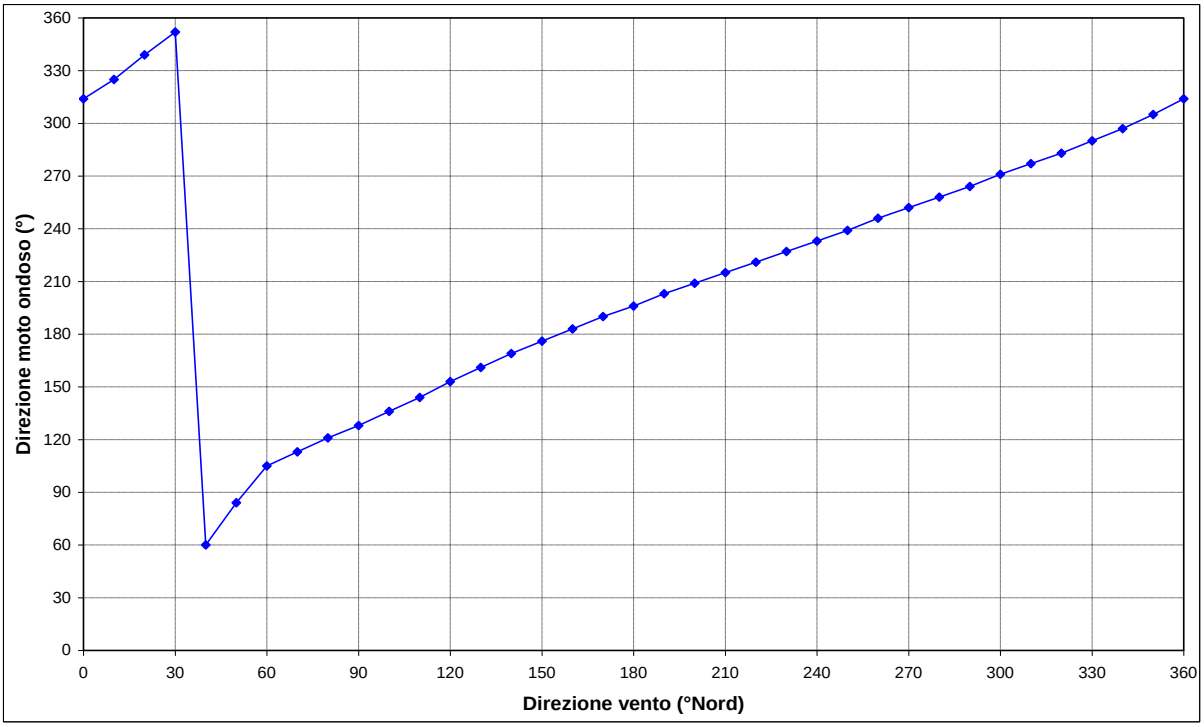


Figura 15. Direzione di provenienza del vento e degli stati di moto ondoso da esso generati a La Spezia

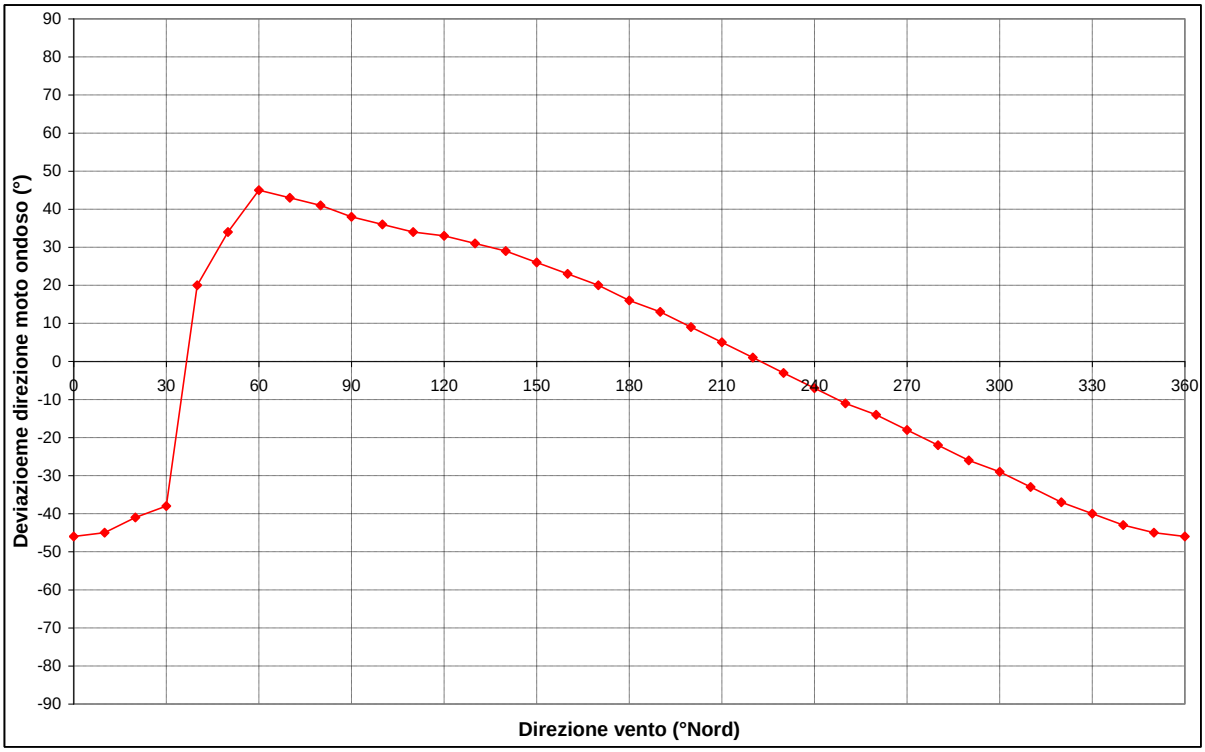


Figura 16. Deviazione tra la direzione del vento e quella del moto ondoso a La Spezia

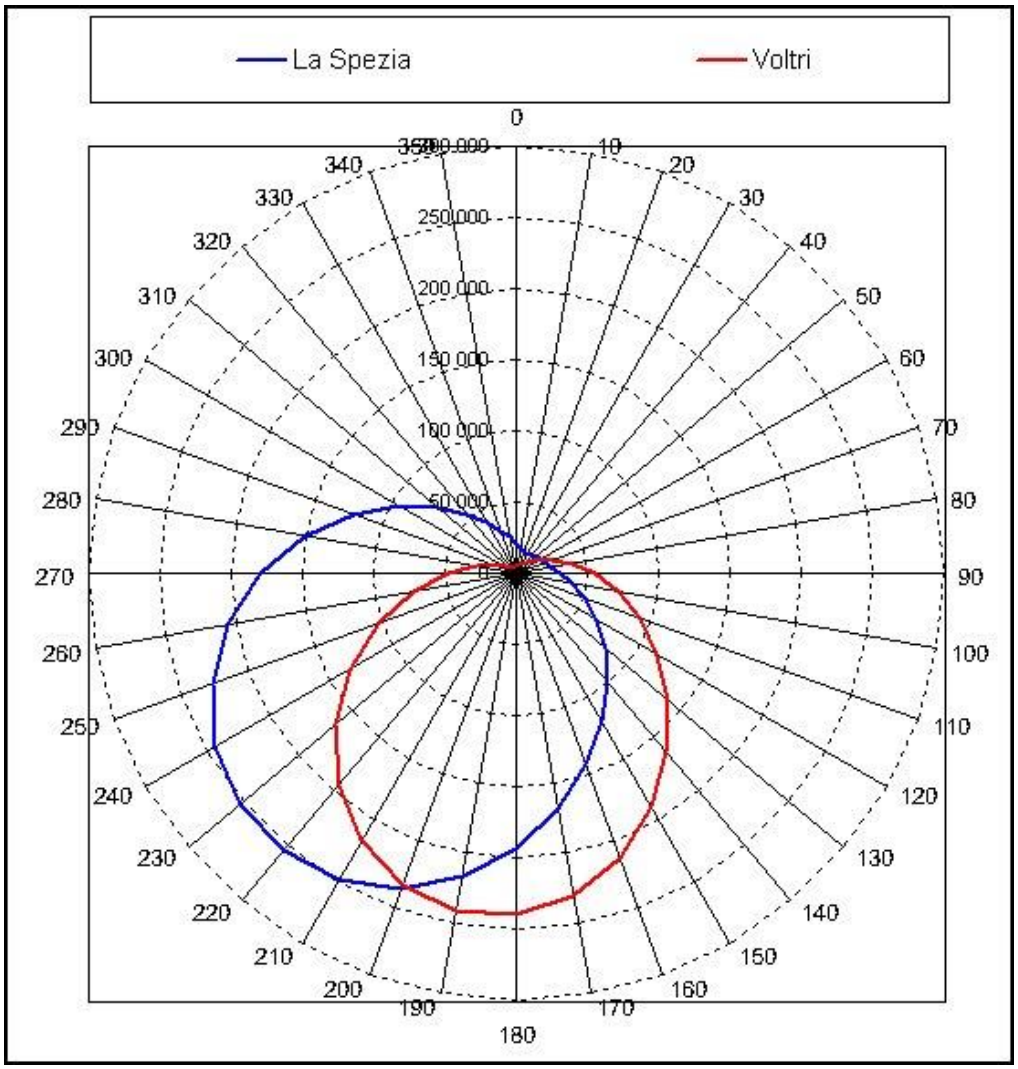


Figura 17. Confronto tra fetch efficaci a largo di La Spezia e Voltri

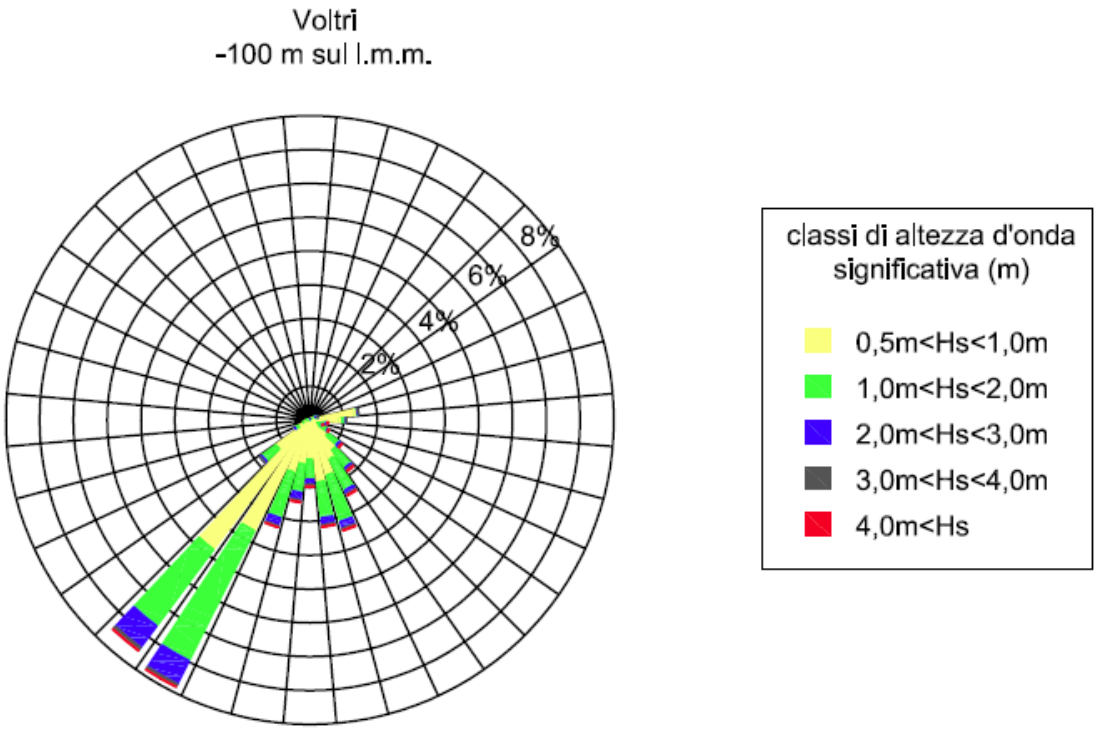


Figura 18. Diagramma polare del moto ondoso al largo di Voltri

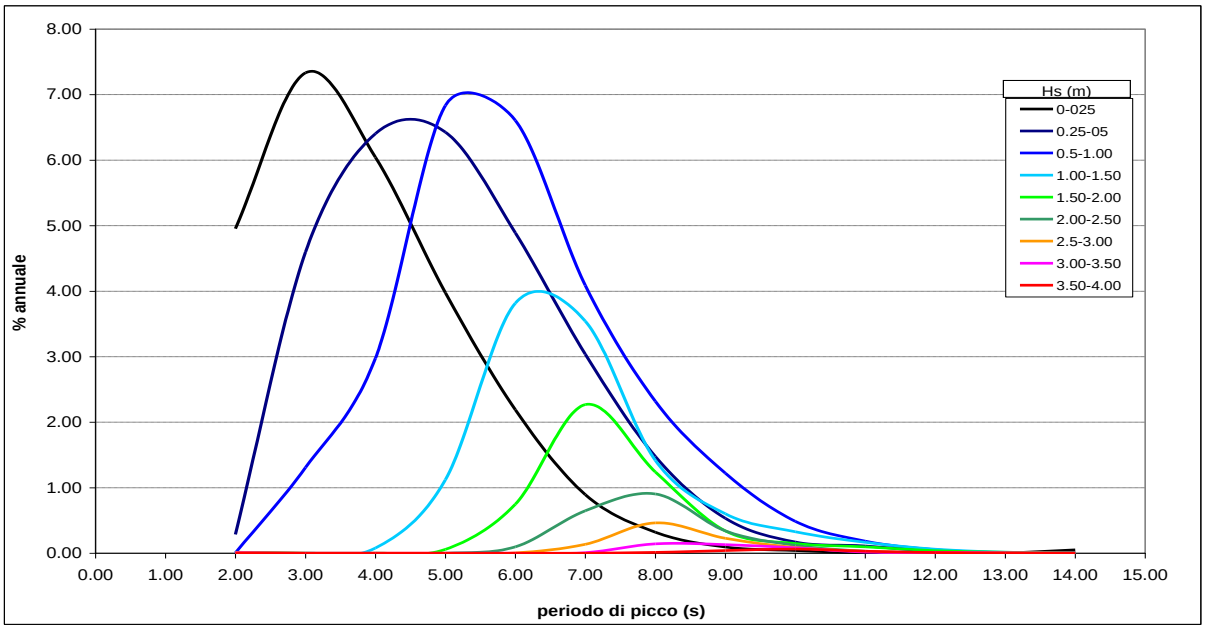


Figura 19. Moto ondoso al largo di Voltri - Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs (ricostruzione dai dati dell'ondametro direzionale di La Spezia)

Periodo di osservazione 1/7/1989 – 30/6/2004- numero osservazioni utili 39 546

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	14.51	20.91	-46.0	180	500.00	193.58	16.0
10	11.53	17.79	-45.0	190	147.58	216.72	13.0
20	18.62	16.16	-41.0	200	108.99	235.68	9.0
30	17.14	15.77	-38.0	210	173.38	248.62	5.0
40	16.90	16.29	20.0	220	500.00	254.34	1.0
50	20.84	17.44	34.0	230	500.00	252.39	-3.0
60	22.82	19.08	45.0	240	500.00	242.98	-7.0
70	24.73	21.40	43.0	250	500.00	226.89	-11.0
80	27.34	24.95	41.0	260	228.20	205.20	-14.0
90	30.51	30.21	38.0	270	135.84	179.62	-18.0
100	34.25	38.62	36.0	280	126.98	151.19	-22.0
110	38.02	50.58	34.0	290	116.75	121.89	-26.0
120	42.60	65.28	33.0	300	105.17	94.66	-29.0
130	49.65	81.78	31.0	310	64.12	71.91	-33.0
140	74.57	100.20	29.0	320	44.48	54.29	-37.0
150	115.70	120.86	26.0	330	28.07	41.40	-40.0
160	129.68	143.77	23.0	340	19.64	32.27	-43.0
170	127.37	168.52	20.0	350	16.40	25.66	-45.0

Tabella 7. Fetch geografici ed efficaci al largo di La Spezia

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷0.25*	*0.25 ÷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*	
0	0.07	0.06	0.02	0.00											0.15
10	0.07	0.04	0.01	0.00											0.12
20	0.06	0.06	0.01	0.00											0.13
30															0.00
40	0.09	0.03	0.01	0.00	0.01										0.13
50	0.16	0.11	0.04	0.01											0.32
60	0.60	0.46	0.16	0.02	0.01	0.01									1.26
70	0.60	0.55	0.23	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00						1.42
80	1.98	2.65	1.56	0.06	0.02	0.02	0.02	0.01							6.30
90	1.61	1.58	0.91	0.12	0.03	0.02	0.01	0.01							4.28
100	0.22	0.59	0.40	0.08	0.02	0.03	0.00	0.00							1.35
110	0.09	0.17	0.24	0.10	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00					0.67
120	0.02	0.21	0.36	0.19	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01			0.00			0.89
130	0.01	0.30	0.66	0.31	0.10	0.06	0.03	0.01		0.01	0.01	0.00			1.50
140	0.01	0.51	1.10	0.49	0.16	0.06	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01			2.40
150	0.04	0.70	1.29	0.73	0.29	0.09	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00			3.23
160	0.05	0.92	1.74	0.96	0.47	0.16	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01			4.42
170	0.27	1.44	2.14	0.74	0.32	0.13	0.08	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00		5.19
180	0.56	1.30	1.16	0.43	0.17	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01		0.00	0.00		3.83
190	0.66	1.34	1.39	0.65	0.20	0.17	0.06	0.04	0.02	0.01		0.00	0.01	0.00	4.53
200	0.64	1.66	1.61	0.94	0.47	0.18	0.06	0.03	0.01	0.01					5.61
210	1.50	3.02	3.82	2.81	1.48	0.55	0.22	0.08	0.01	0.00					13.49
220	2.76	4.73	4.92	1.90	0.91	0.54	0.26	0.08	0.03	0.01					16.13
230	3.11	2.82	1.38	0.38	0.14	0.03	0.03	0.00	0.00						7.90
240	3.00	1.01	0.39	0.09	0.03	0.01	0.00								4.54
250	3.06	0.56	0.20	0.02	0.01										3.85
260	1.98	0.38	0.08	0.01											2.45
270	1.33	0.30	0.09	0.01											1.73
280	1.05	0.40	0.08	0.01	0.01										1.56
290	0.10	0.03	0.01	0.01											0.15
300	0.08	0.04	0.01												0.12
310	0.10	0.05	0.01	0.00											0.16
320															0.00
330	0.07	0.04	0.01	0.00											0.12
340	0.05	0.03	0.02	0.01											0.10
350															0.00
Tot.	26.00	28.08	26.04	11.10	4.94	2.16	0.97	0.40	0.16	0.07	0.04	0.03	0.01	0.00	100.00
Tot cumul	26.00	54.08	80.12	91.23	96.17	98.32	99.29	99.69	99.85	99.92	99.96	99.99	100.00	100.00	

Tabella 8. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il metodo della trasposizione - dati di La Spezia

Ts (s)	*Hs (m)*														*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷0.25	*0.25 ÷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*	*0.3 ÷4.0*	*4.0 ÷4.5*	*4.5 ÷5.0*	*5.0 ÷5.5*	*5.5 ÷6.0*	*> 6.0*	*%*	*%*
0.0 ÷2.0	4.95	0.29	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01		0.00			5.32	5.32
2.0 ÷3.0	7.34	4.60	1.31												13.24	18.56
3.0 ÷4.0	6.04	6.40	2.98	0.08											15.50	34.06
4.0 ÷5.0	3.98	6.43	6.83	1.12	0.06										18.42	52.48
5.0 ÷6.0	2.19	4.89	6.61	3.82	0.75	0.10	0.01								18.36	70.84
6.0 ÷7.0	0.90	3.04	4.09	3.54	2.27	0.65	0.13	0.01							14.62	85.46
7.0 ÷8.0	0.32	1.48	2.32	1.42	1.24	0.91	0.46	0.14	0.01						8.29	93.75
8.0 ÷9.0	0.09	0.53	1.22	0.60	0.34	0.34	0.23	0.13	0.04	0.01			0.00		3.54	97.30
9.0 ÷10.0	0.04	0.17	0.49	0.33	0.15	0.12	0.09	0.08	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01		1.57	98.87
10.0 ÷11.0	0.01	0.11	0.19	0.17	0.10	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.74	99.60
11.0 ÷12.0	0.01	0.03	0.05	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00			0.26	99.86
12.0 ÷13.0	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00			0.00	0.07	99.93
13.0 ÷14.0	0.05	0.01	0.00		0.00		0.00					0.00			0.07	100.00
>=14																100.00
TOT	25.92	27.97	26.09	11.16	4.97	2.17	0.98	0.40	0.16	0.08	0.04	0.03	0.01	0.01	100.00	
tot cumulato	25.92	53.89	79.99	91.15	96.12	98.29	99.26	99.67	99.83	99.91	99.95	99.98	99.99	100.00		

Tabella 9. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il metodo della trasposizione - dati di La Spezia

Località: Voltri - periodo:1 luglio 1989 - 30 giugno 2004

3.4. Analisi statistica delle onde estreme al largo per le traversie principali

Per la determinazione della cosiddetta "onda di progetto" in acqua profonda, la cui conoscenza è indispensabile per le verifiche strutturali e funzionali, è necessario eseguire un'elaborazione statistica delle altezze d'onda maggiori relative alla serie storica di riferimento. Per il caso in esame l'analisi statistica delle onde estreme è stata effettuata sulla serie di dati ondametrici di La Spezia relativi al periodo 01/07/1989÷01/07/2004 trasposta al largo di Voltri alla profondità di –100 m sul l.m.m.

Mediante regolarizzazione della serie di 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). 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.

I valori delle soglie di troncamento utilizzati nell'ambito del presente studio sono pari a:

- 21 eventi (Hs ≥ 3,50 m – metodo POT) per il settore principale del III quadrante 184°-226°N;
- 23 eventi (Hs ≥ 3,70 m – metodo POT) per il settore principale del II quadrante 122°÷184°N;
- 22 eventi (Hs ≥ 1,73 m – metodo POT) per il settore secondario di levante 56°÷122°N;

Le serie tronche sono state elaborate effettuando dapprima una regolarizzazione di tipo statistico delle serie di valori riferita al periodo di misure e successivamente 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 leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) sono quella di Weibull:

$$P(X \le x) = 1 - e^{-\left[\frac{(x-B)}{A}\right]^{\alpha}} \qquad (9)$$

e la legge di Gumbel (1988):

$$P(X \le x) = \exp\left[-\exp\left[-(x-b)/a\right]\right] \qquad (10)$$

dove X è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento e α, 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 rispettivamente nella 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:

$$\mathrm{Tr}(X \le x) = \frac{1}{(1 - P(X \le x))} \tag{11}$$

sono stati ricavati i grafici dell'altezza d'onda associata a ciascun tempo di ritorno e per ciascun settore di traversia (vedi Figura 20÷ Figura 22). La legge di distribuzione di probabilità cumulata che presenta il miglior adattamento ai dati è risultata quella di Weibull (0.75) per il settore principale di ponente e per quello secondario di levante, comunque anche la legge di Weibull (1.00) ha un adattamento prossimo a quella di Weibull (0.75) e risulta più cautelativa, pertanto si è adottata tale legge per questi settori.

La legge di distribuzione di probabilità cumulata di Weibull (2.0) è risultata per il settore principale di levante quella che presenta il miglior adattamento e risulta essere quella più cautelativa, pertanto per questo settore si è adottata tale legge.

I risultati delle elaborazioni effettuate al largo di Voltri a partire dalla serie di registrazioni trasposte da La Spezia indicano che:

- nel settore di traversia principale del III quadrante 184°÷244°N, gli eventi estremi contraddistinti da un tempo di ritorno di 5 anni presentano una altezza d'onda significativa pari a circa 5,00 m, mentre il valore dell'altezza d'onda cinquantennale risulta pari a circa 6,90 m;
- nel settore di traversia principale del II quadrante 122°÷184°N, gli eventi estremi contraddistinti da un tempo di ritorno di 5 anni presentano una altezza d'onda significativa pari a circa 5,50 m, mentre il valore dell'altezza d'onda cinquantennale risulta pari a circa 6,80 m;
- nel settore di traversia secondario di levante 56°÷122°N, gli eventi estremi contraddistinti da un tempo di ritorno di 5 anni presentano una altezza d'onda significativa pari a circa 3,60 m, mentre il valore dell'altezza d'onda cinquantennale risulta pari a circa 5,60 m;

In Figura 23÷ Figura 25 per i tre settori di provenienza sono riportate le leggi di distribuzione del periodo di picco in funzione dell'altezza significativa che regolarizza i valori delle onde con altezze d'onda significative superiore alla soglia utilizzata nella statistica degli eventi estremi.

Risulta:

- per il settore di traversia principale del III quadrante 184°÷244°N $T_p = 6.02\ H_s^{0.2918}$
- per il settore di traversia principale del II quadrante 122°÷184°N $T_p = 8.03\ H_s^{0.1514}$
- per il settore di traversia secondario di levante 56°÷122°N $T_p = 5.72\ Hs^{0.3344}$

Nella tabella seguente sono sintetizzati i valori delle caratteristiche del moto ondoso al largo di Voltri per i due settore di traversia principale e per quello secondario di levante con T_r = 1, 5, 50 e 100 anni

Settore di Traversia (°N)	***Tr (anni)***	***Altezza significativa al largo Hso (m)***	***Periodo di Picco Tp (s)***
184-244	1	3.7	8.8
	5	5.0	9.6
	50	6.9	10.6
	100	7.4	10.8
122-184	1	4.5	10.5
	5	5.5	10.8
	50	6.8	11.1
	100	7.2	11.2
56-122	1	2.2	7.4
	5	3.6	8.8
	50	5.6	10.2
	100	6.3	10.6

Tabella 10. Riepilogo caratteristiche del moto ondoso al largo di Voltri per diversi tempi di ritorno

Numero anni di riferimento		13.54
Numero totale delle mareggiate		388
Numero episodi con altezza significativa > m	3.50	21
Direzione minima (°)		184
Direzione massima (°)		226
Altezza significativa di soglia (m)		3.5
Altezza significativa massima (m)		6.4

Media	3.511
Deviazione	0.661

Evento	Altezza significativa (m)	Tempo di ritorno (anni)
1	6.40	24.22
2	5.87	8.70
3	5.17	5.30
4	4.45	3.81
5	4.44	2.97
6	4.24	2.44
7	4.10	2.07
8	4.05	1.79
9	4.02	1.58
10	4.01	1.42
11	3.98	1.28
12	3.97	1.17
13	3.92	1.08
14	3.89	1.00
15	3.76	0.93
16	3.75	0.87
17	3.75	0.82
18	3.67	0.77
19	3.57	0.73
20	3.55	0.69
21	3.51	0.66

Tempo di ritorno (anni)	GUMBEL		WEI(.75)		WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.
0.1	1.9		2.3		1.9		1.9		2.0	
1	3.8		3.8		3.7		3.8		3.8	
2	4.4	0.3	4.3	1.8	4.3	0.2	4.4	0.3	4.4	0.3
5	5.2	0.5	5.0	0.2	5.0	0.4	5.2	0.4	5.2	0.4
10	5.7	0.6	5.5	0.3	5.6	0.5	5.7	0.5	5.8	0.4
15	6.1	0.7	5.8	0.4	5.9	0.6	6.0	0.6	6.1	0.5
20	6.3	0.8	6.0	0.5	6.1	0.7	6.3	0.7	6.3	0.6
25	6.5	0.9	6.1	0.6	6.3	0.7	6.5	0.7	6.5	0.6
50	7.1	1.1	6.6	0.8	6.9	0.9	7.0	0.9	7.1	0.7
100	7.7	1.3	7.1	1.0	7.4	1.1	7.6	1.1	7.6	0.9
150	8.0	1.5	7.3	1.1	7.7	1.3	7.9	1.2	7.9	1.0
250	8.4	1.6	7.6	1.3	8.1	1.5	8.3	1.3	8.3	1.1
500	9.0	1.9	8.1	1.5	8.7	1.7	8.9	1.6	8.8	1.3
1000	9.6	2.2	8.5	1.8	9.3	2.0	9.5	1.8	9.4	1.5

α	0.779	0.349	0.777	1.673	3.284
β	1.178	2.024	1.167	-0.196	-2.234
R	0.973	0.979	0.974	0.968	0.962

Tabella 11. Statistica delle altezze d'onda significative al largo di Voltri Settore di traversia principale del III quadrante 184°-244°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004)

Numero anni di riferimento		13.53
Numero totale delle mareggiate		265
Numero episodi con altezza significativa > m	3.70	23
Direzione minima (°)		122
Direzione massima (°)		184
Altezza significativa di soglia (m)		3.7
Altezza significativa massima (m)		5.67

Media	4.653
Deviazione	0.579

Evento	Altezza significativa (m)	Tempo di ritorno (anni)	Evento	Altezza significativa (m)	Tempo di ritorno (anni)
1	5.67	24.22	**23**	3.72	0.60
2	5.46	8.70			
3	5.41	5.30			
4	5.24	3.81			
5	5.05	2.97			
6	5.03	2.44			
7	5.00	2.07			
8	5.00	1.79			
9	4.97	1.58			
10	4.95	1.42			
11	4.77	1.28			
12	4.76	1.17			
13	4.73	1.08			
14	4.71	1.00			
15	4.43	0.93			
16	4.26	0.87			
17	4.21	0.82			
18	4.16	0.77			
19	4.07	0.73			
20	3.89	0.69			
21	3.82	0.66			
22	3.72	0.63			

Tempo di ritorno (anni)	GUMBEL		WEI(.75)		WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.
0.1	3.0		3.5		3.1		3.2		3.1	
1	4.4		4.5		4.4		4.5		4.5	
2	4.8	0.2	4.8	1.4	4.8	0.2	4.9	0.2	4.9	0.2
5	5.4	0.4	5.2	0.2	5.3	0.3	5.4	0.3	5.5	0.3
10	5.8	0.5	5.6	0.3	5.7	0.4	5.8	0.4	5.9	0.4
15	6.0	0.5	5.7	0.3	5.9	0.5	6.0	0.5	6.1	0.4
20	6.2	0.6	5.9	0.4	6.1	0.5	6.2	0.5	6.3	0.5
25	6.3	0.6	6.0	0.4	6.2	0.6	6.3	0.6	6.4	0.5
50	6.7	0.8	6.3	0.6	6.6	0.7	6.7	0.7	6.8	0.6
100	7.1	1.0	6.6	0.7	7.0	0.9	7.1	0.8	7.2	0.7
150	7.4	1.1	6.8	0.8	7.2	1.0	7.4	0.9	7.5	0.8
250	7.6	1.2	7.0	1.0	7.5	1.1	7.7	1.0	7.8	0.9
500	8.0	1.4	7.3	1.2	7.9	1.3	8.1	1.2	8.2	1.1
1000	8.5	1.6	7.5	1.4	8.3	1.5	8.5	1.4	8.6	1.2

α	0.545	0.245	0.544	1.163	2.268
β	2.802	3.363	2.791	1.875	0.500
R	0.891	0.863	0.887	0.904	0.917

Tabella 12. Statistica delle altezze d'onda significative al largo di Voltri Settore di traversia principale del II quadrante 122°-184°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004)

Numero anni di riferimento		13.53
Numero totale delle mareggiate		47
Numero episodi con altezza significativa > m	1.73	22
Direzione minima (°)		63
Direzione massima (°)		122
Altezza significativa di soglia (m)		1.73
Altezza significativa massima (m)		5.33

Media	2.658
Deviazione	0.822

Evento	Altezza significativa (m)	Tempo di ritorno (anni)
1	5.33	24.29
2	3.86	8.72
3	3.57	5.31
4	3.21	3.82
5	2.98	2.98
6	2.96	2.45
7	2.89	2.07
8	2.87	1.80
9	2.67	1.59
10	2.63	1.42
11	2.60	1.29
12	2.45	1.18
13	2.40	1.08
14	2.34	1.00
15	2.14	0.93
16	2.11	0.87
17	2.01	0.82
18	1.99	0.77
19	1.91	0.73
20	1.91	0.70
21	1.91	0.66
22	1.74	0.63

Tempo	GUMBEL		WEI(.75)		WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
di ritorno (anni)	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.
0.1	0.3		0.1		0.1		0.3		0.4	
1	2.3		2.1		2.2		2.3		2.5	
2	2.9	0.3	2.7	0.2	2.8	0.3	2.9	0.3	3.1	0.3
5	3.8	0.5	3.5	0.3	3.6	0.4	3.8	0.5	4.0	0.5
10	4.4	0.6	4.0	0.5	4.2	0.6	4.4	0.6	4.6	0.7
15	4.7	0.7	4.4	0.6	4.6	0.7	4.7	0.7	5.0	0.8
20	5.0	0.8	4.6	0.6	4.8	0.7	5.0	0.8	5.2	0.9
25	5.2	0.9	4.8	0.7	5.0	0.8	5.2	0.9	5.4	1.0
50	5.7	1.1	5.4	0.9	5.6	1.0	5.7	1.1	6.0	1.2
100	6.3	1.3	6.0	1.1	6.3	1.2	6.3	1.3	6.6	1.5
150	6.7	1.5	6.4	1.2	6.6	1.4	6.7	1.5	7.0	1.7
250	7.1	1.7	6.8	1.4	7.1	1.6	7.1	1.7	7.4	1.9
500	7.7	2.0	7.4	1.7	7.7	1.9	7.7	1.9	8.1	2.2
1000	8.3	2.3	8.0	1.9	8.3	2.2	8.3	2.2	8.7	2.6

α	0.803	0.481	0.863	1.508	2.496
β	1.377	1.581	1.152	0.476	-0.527
R	0.986	0.989	0.988	0.982	0.973

Tabella 13. Statistica delle altezze d'onda significative al largo di Voltri Settore di traversia secondario di levante 56°-122°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004)

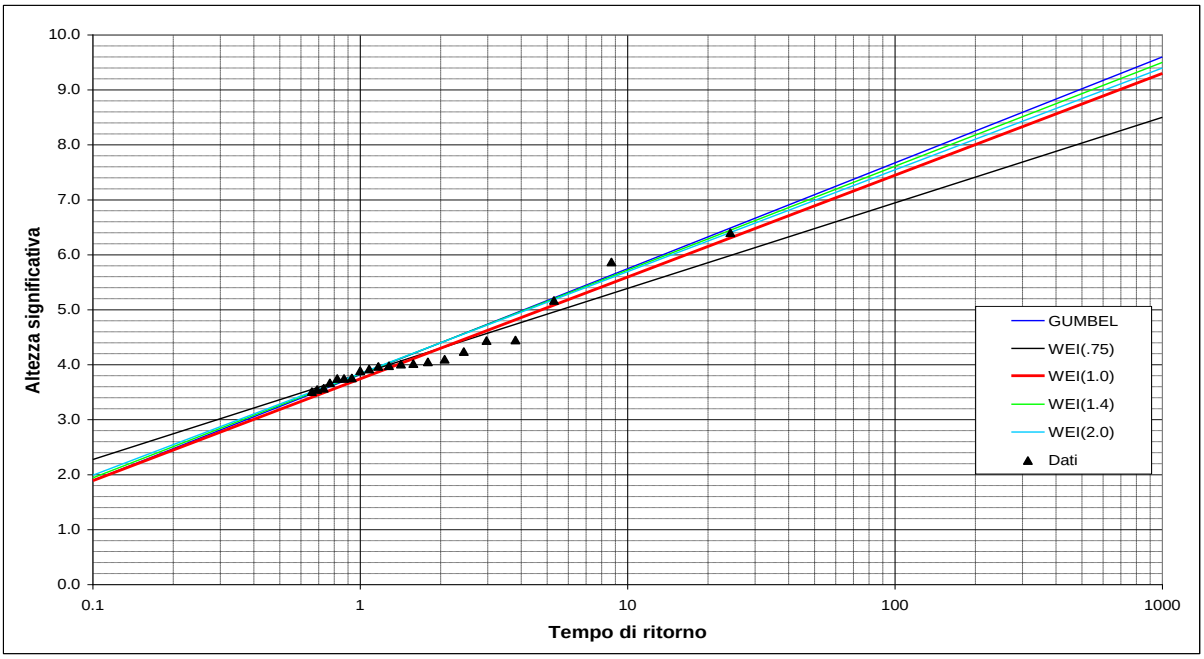


Figura 20. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dell'altezza d'onda significativa al largo di Voltri – Settore di traversia principale del III quadrante 184°-244°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004)

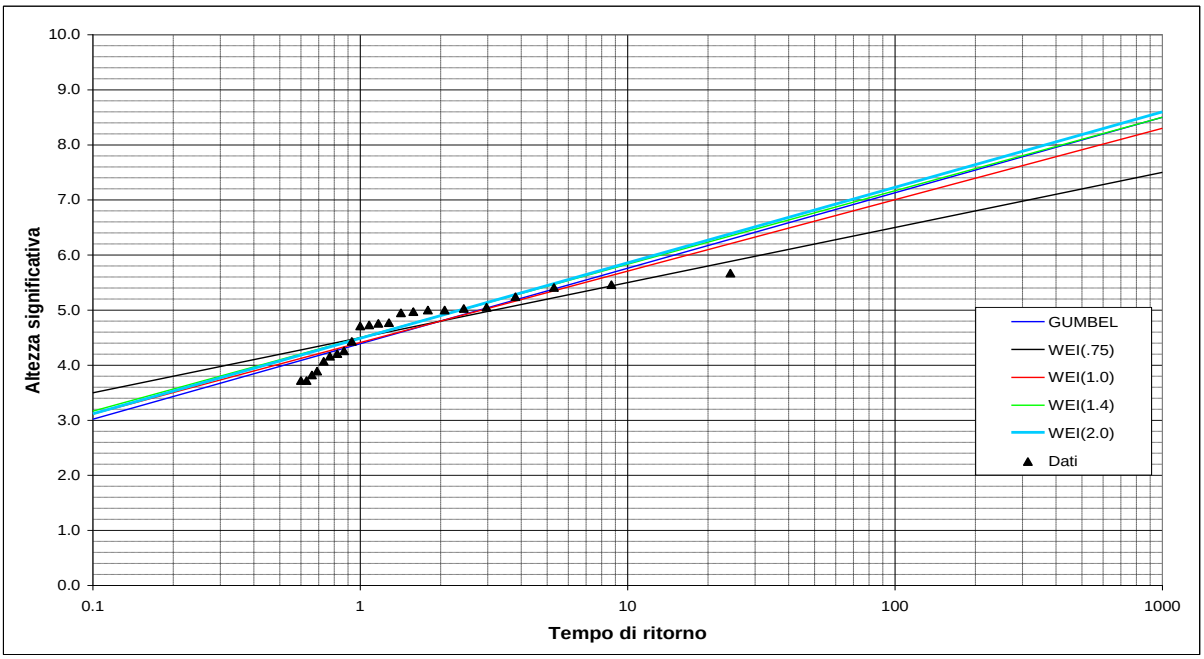


Figura 21. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dell'altezza d'onda significativa al largo di Voltri – Settore di traversia principale del II quadrante 122°-184°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004)

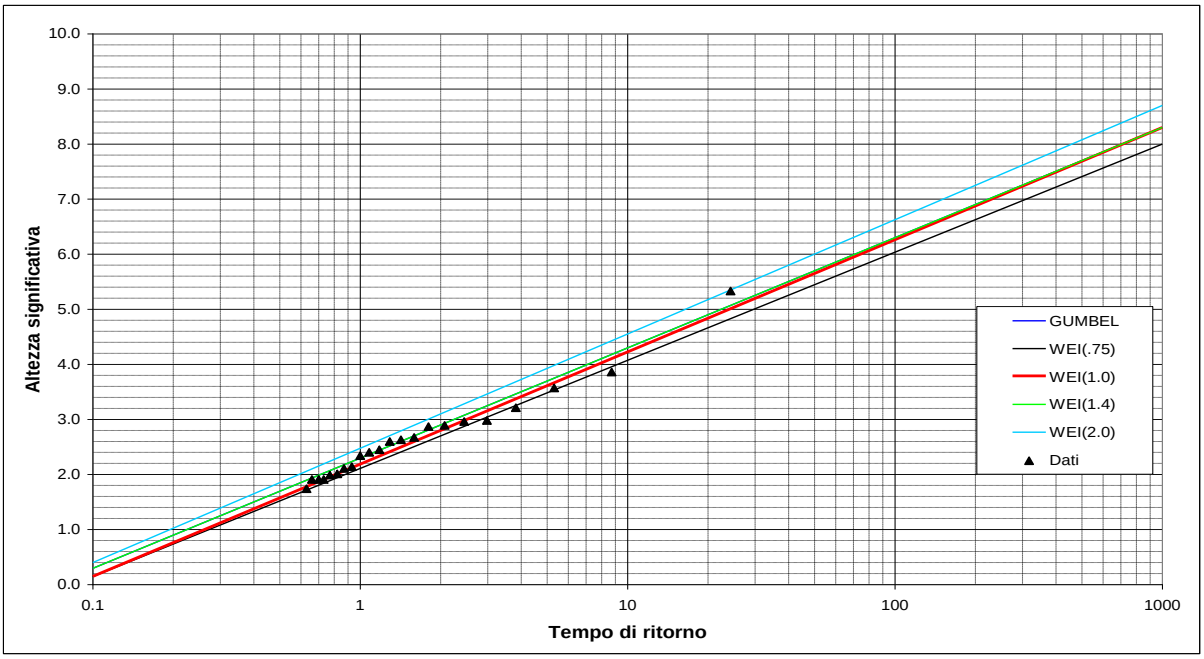


Figura 22. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dell'altezza d'onda significativa al largo di Voltri – Settore di traversia secondario di levante 56°-122°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004)

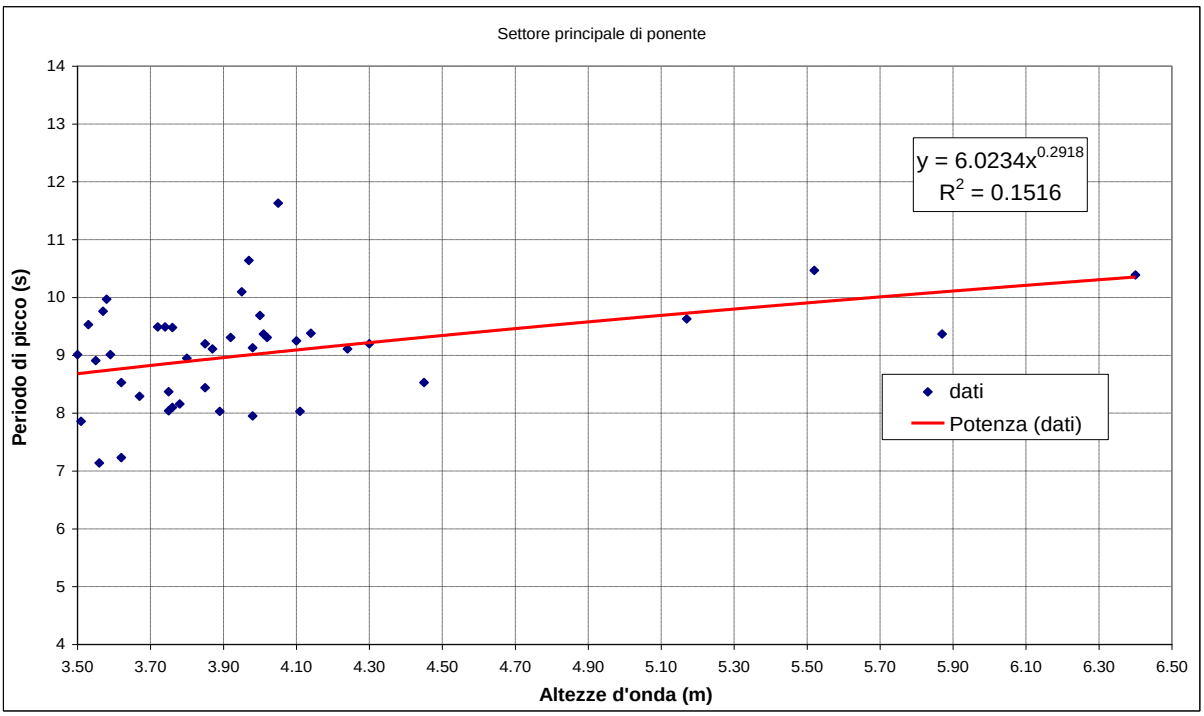


Figura 23. Relazione Periodo di picco - Altezza significativa al largo di Voltri - Settore di traversia principale del III quadrante 184°-244°N onde con Hs>3.50 m

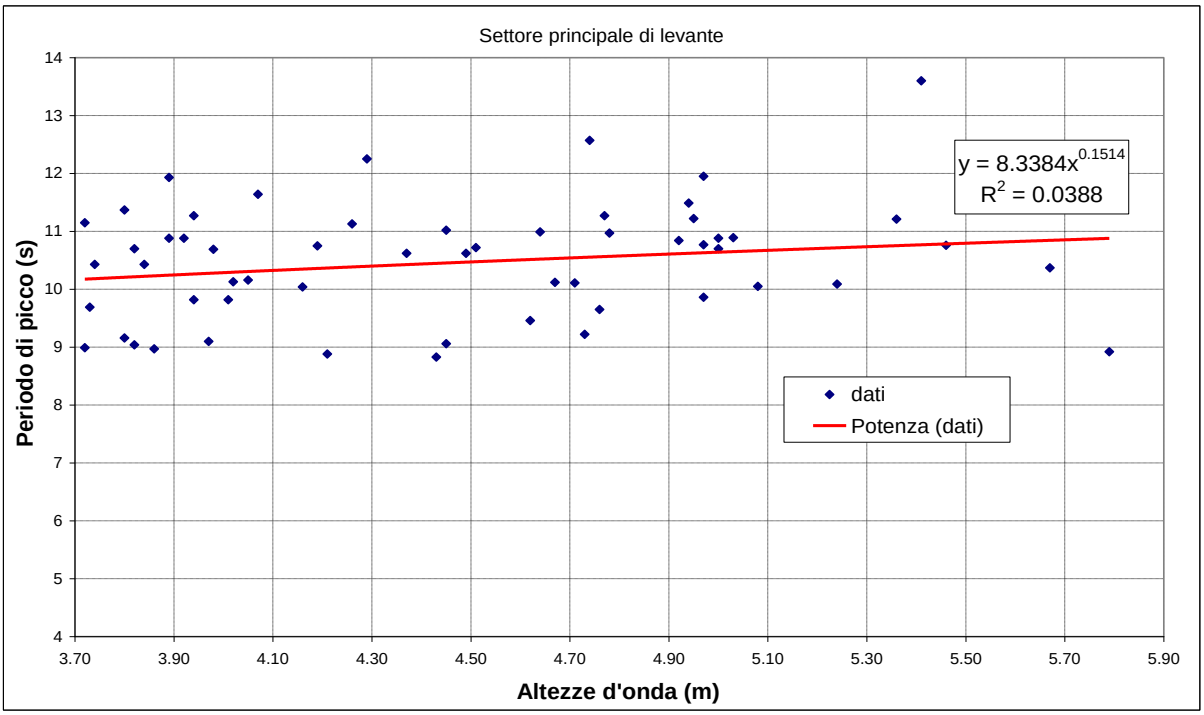


Figura 24. Relazione Periodo di picco - Altezza significativa al largo di Marina di Tarquinia - Settore di traversia principale del II quadrante 122°-184°N onde con Hs>3.70 m

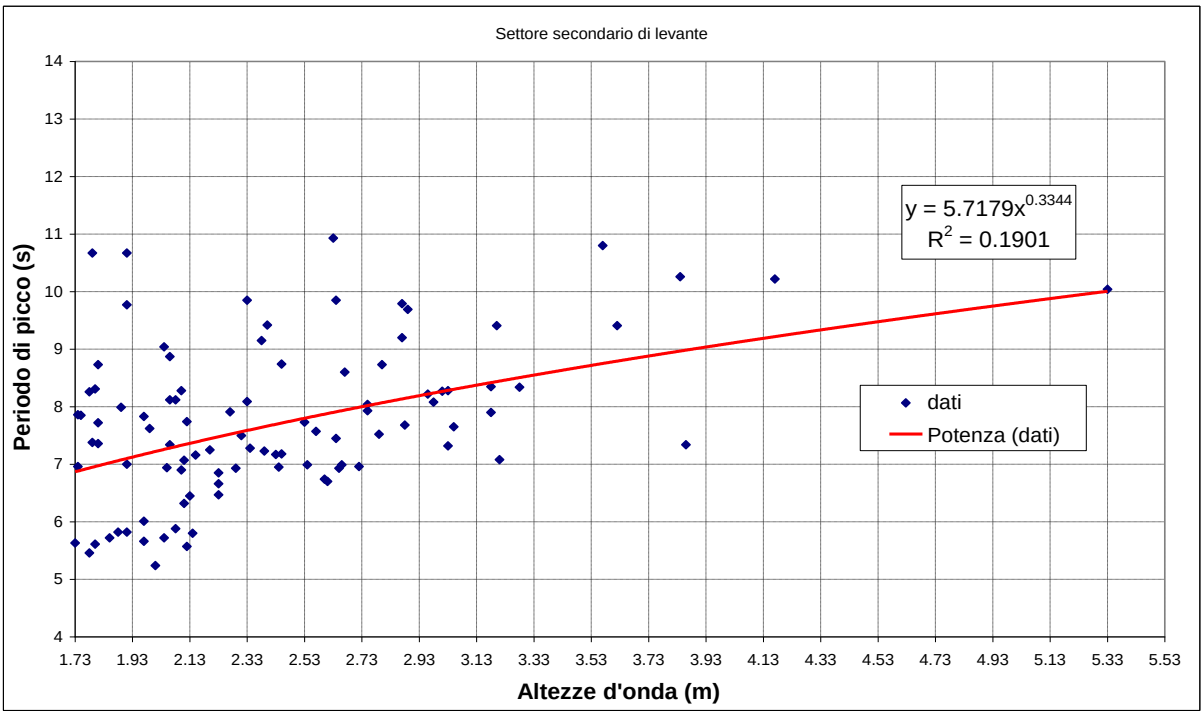


Figura 25. Relazione Periodo di picco - Altezza significativa al largo di Marina di Tarquinia - Settore di traversia secondario di levante 56°-122°N onde con Hs>1.73 m

3.5. Profondità di chiusura della spiaggia attiva

In base alle caratteristiche del moto ondoso in acqua profonda è stato eseguito il calcolo teorico della cosiddetta profondità di chiusura che delimita lato mare la fascia litoranea interessata dal trasporto solido e da apprezzabili modifiche dei fondali per effetto di fenomeni di deposito o erosione.

A tal fine è stata applicata la nota formula di Hallermaier (1987) che lega questa profondità al doppio dell'altezza d'onda significativa superata 12 ore all'anno:

$h_c = 2{,}28\ H_o - 10{,}9\ H_o^2/L_o$ (12)

dove:

- $H_{so} = 4.01$ m

è l'altezza d'onda significata al largo superata in media 12 ore/anno (vedi Figura 26)

- $T_o = 0.81\ T_p = 0.81 \times 11.6 = 9.4$ s

è il periodo dell'onda al largo superata in media 12 ore/anno (vedi Figura 26)

- $L_o = gT_o^2/2\pi = 137.84$ m

è la lunghezza dell'onda di altezza Ho.

Dalla relazione sopra riportata si ottiene una profondità di chiusura h_c (o di "moto attivo dei sedimenti") pari a circa **7,9 m** sul l.m.m.

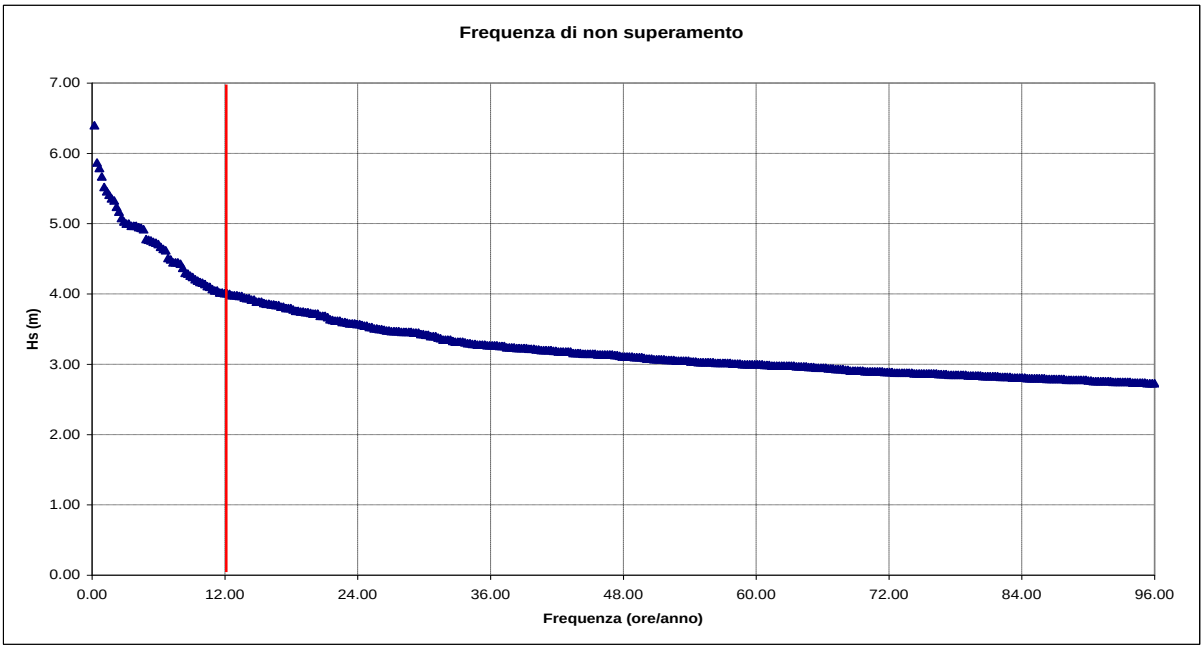
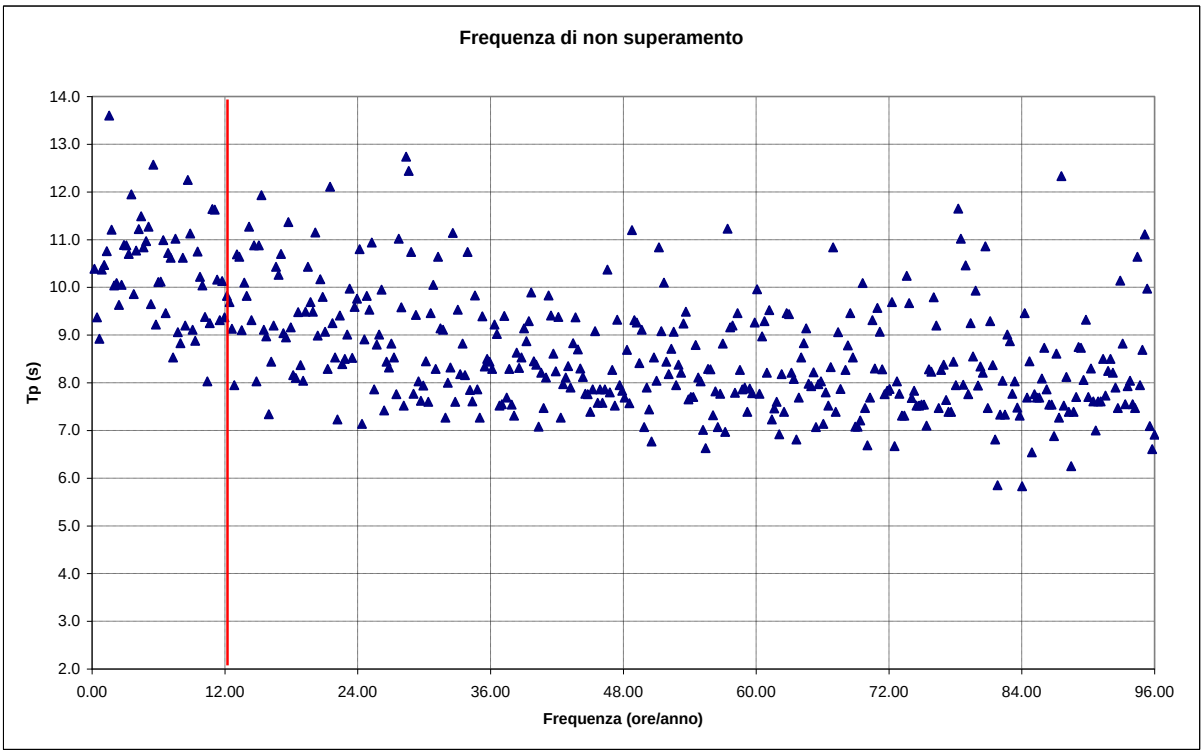


Figura 26. Frequenza di superamento delle altezze d'onde ricostruite al largo di Voltri in termini di altezza e periodo di picco



3.6. Moto ondoso sottocosta

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 (quando il rapporto tra l'altezza e al lunghezza dell'onda supera determinati valori).

Prescindendo, perché 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. Variando l'altezza del fluido su cui si propaga l'onda in acqua bassa si modifica la celerità di gruppo e di conseguenza si determina avanzano su fondali di profondità decrescente dapprima una riduzione e poi un sostanziale aumento di altezza delle onde.

Per ricavare le forzanti che determinano il movimento del materiale solido lungo il litorale di Voltri è stata eseguita la propagazione del clima ondoso alle profondità di circa -20 m e -10 m sul l.m.m.

Al fine di trasferire a riva l'intero clima ondoso ricostruito al largo alla profondità di circa -100 m sul l.m.m. nel periodo tra luglio 1989 e giugno 2004 (39.546 eventi) in base alla trasposizione delle registrazioni di La Spezia, è stata ricavata preliminarmente la correlazione largo riva dello spettro di energia in direzione e frequenza tra il punto al largo e i punti ritenuti significativi.

A tal fine è stato utilizzato il modello di propagazione diretta SWAN sviluppato dal Delft University of Technology (NL) e descritto nel successivo paragrafo.

Per l'applicazione del modello, fino alla profondità di 10 m, è stata da prima costruita una griglia regolare tridimensionale di calcolo del fondale di dimensioni 19.000m x 9.500m con passo 100mx100m in cui al suo interno è stata costruita una griglia regolare tridimensionale nidificata di dimensioni 2.200m x 1.300m con passo 20mx20m, sulla base delle quote delle carte nautiche dell'I.M.M. n 2 da Imperia e Portofino in scala 1:100.000, n 106 Litorale di Genova in scala 1:30.000, n 54 porto di Genova Foglio Ovest in scala 1:10.000 (vedi Figura 26 e Figura 28). La griglia di calcolo principale del fondale è riportata in Figura 29, mentre quella nidificata in Figura 30.

3.6.1. Il modello matematico di rifrazione diretto spettrale SWAN

Il modello SWAN, sviluppato dal Delft University of Technology (NL), è un modello di terza generazione del moto ondoso in grado di ottenere stime realistiche dei parametri d'onda nelle aree costiere, laghi ed estuari a partire da dati di vento, condizioni di fondo e correnti.

SWAN può essere utilizzato su capi di onde gravitazionali generate dal vento di superficie qualsiasi. Il modello si basa sull'equazione di bilancio dell'azione ondosa (o bilancio energetico in assenza di correnti) con sorgenti e pozzi di energia.

Il modello SWAN è in grado di simulare i seguenti processi di propagazione del moto ondoso:

- propagazione attraverso lo spazio geografico, a partire dal bordo del modello in cui sono note le caratteristiche del moto ondoso,
- rifrazione dovuto a variazioni spaziali del fondo e delle correnti
- shoaling dovuto a variazioni spaziali del fondo e delle correnti,
- sbarramento e riflessione del moto ondoso dovuto a correnti opposte;
- trasmissione, sbarramento o riflessione del moto ondoso dovuto alla presenza di ostacoli.

Nel modello Swan sono simulati i seguenti processi di generazione e dissipazione del moto ondoso:

- generazione del vento,
- dissipazione per schiuma sulle creste d'onda (*whitecapping*),
- dissipazione per frangimento indotta dal fondale;
- dissipazione per attrito di fondo;
- interazione onda-onda sia in acque profonde che in acque poco profonde.

Inoltre il modello SWAN può calcolare, il set-up indotto dall'onda sulla superficie media del mare. Le correnti indotte dall'onda non sono invece calcolate, pertanto nel caso bidimensionale il set-up indotto dall'onda è approssimato dal fatto che le correnti indotte dell'onda vengono ignorate.

Il modello SWAN è un modello stazionario ed opzionalmente non stazionario e può essere applicato in coordinate Cartesiane or curvilinee (raccomandate solo per grandi scale) o sferiche (per piccole e grandi scale). Per l'equazioni che governano i fenomeni sopra riportati si rimanda al manuale tecnico scientifico di SWAN.

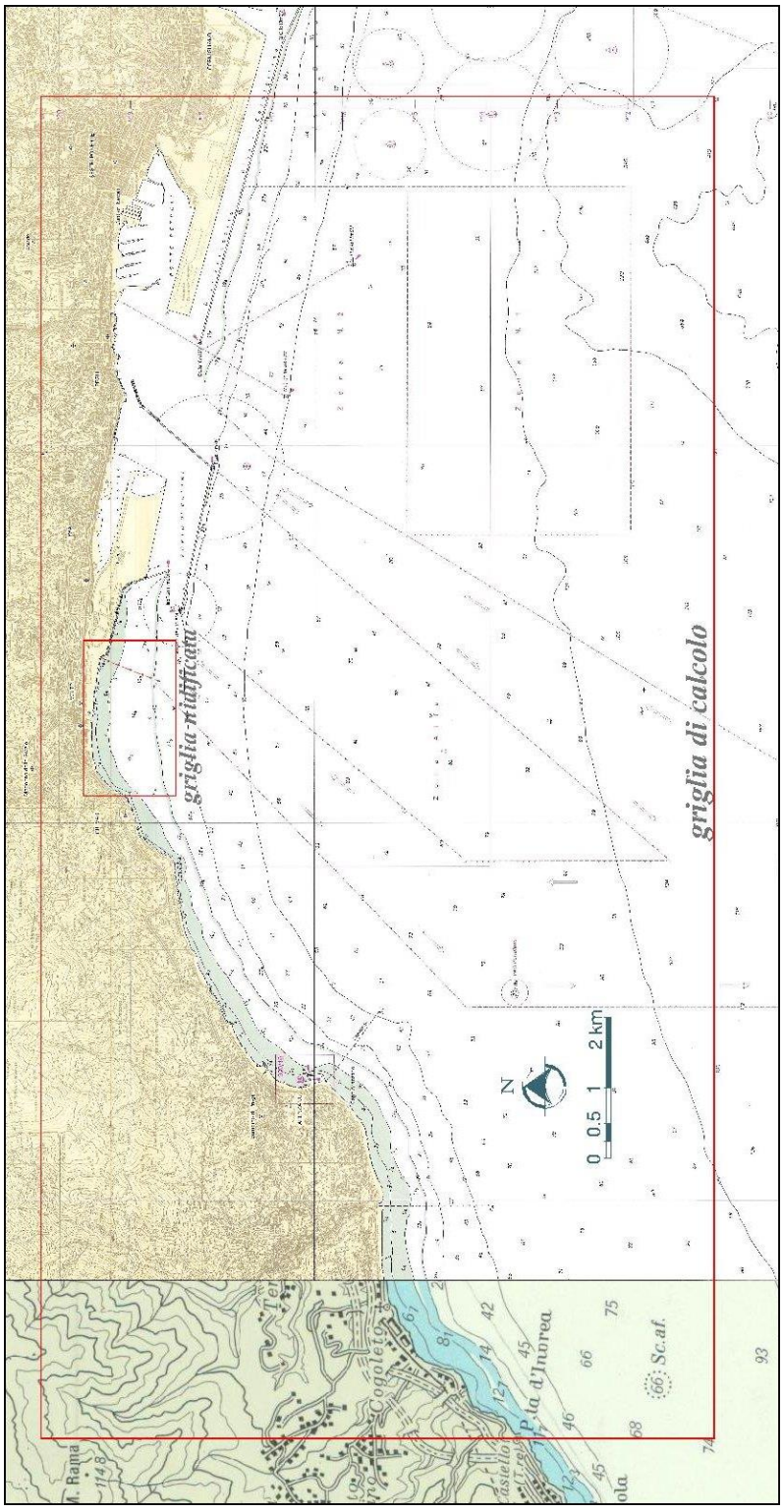


Figura 27. Carte nautiche e posizione delle griglie di calcolo

Fonte: Carta IIM n. 106 Litorale di Genova, scala 1:30.000

Carta IIM n. 2 da Imperia a Portofino, scala 1:100.000

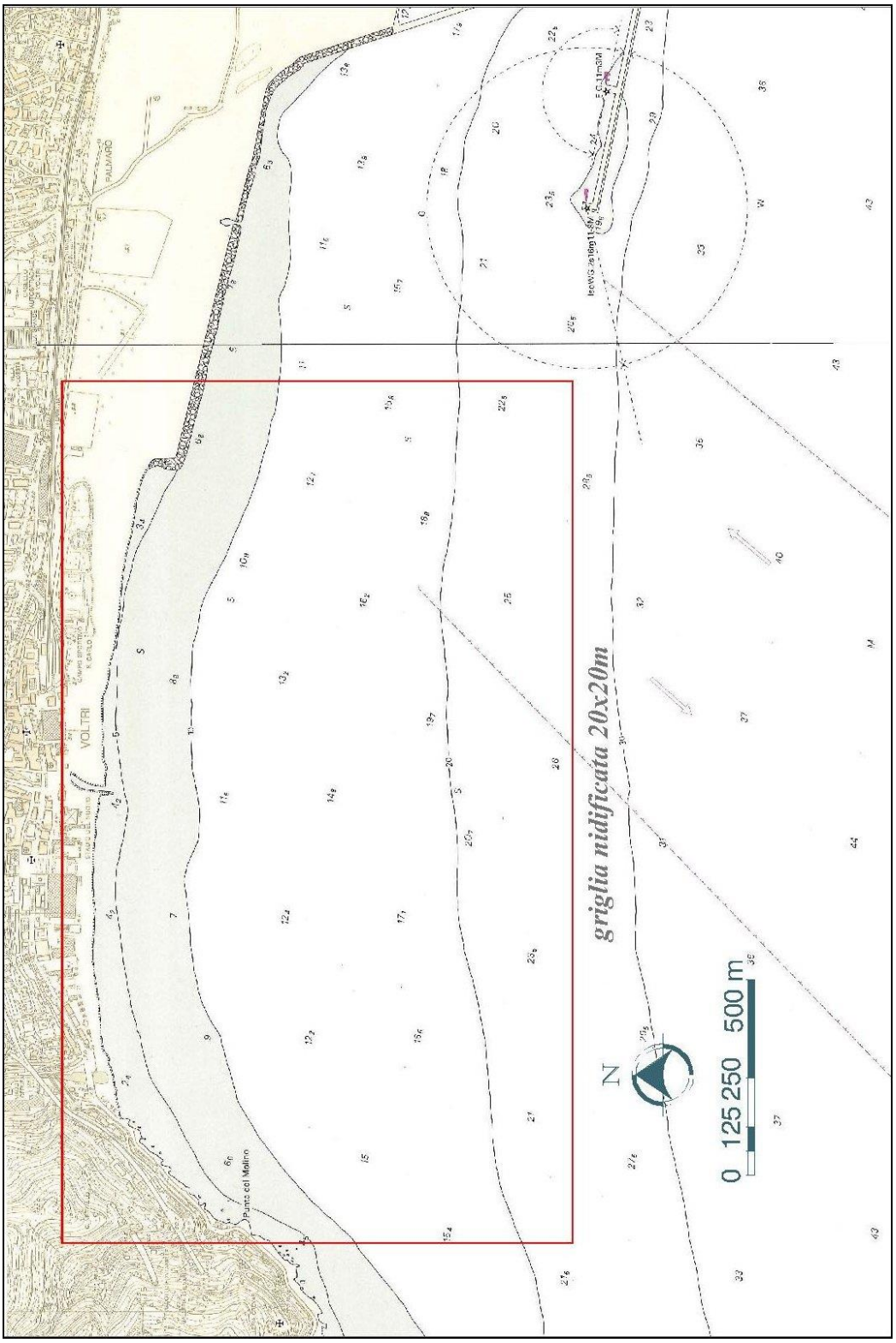


Figura 28. Carta nautica e posizione della griglia nidificata 20x20m

Fonte: Carta IIM n. 54 Porto di Genova – Foglio Ovest, scala 1:10.000

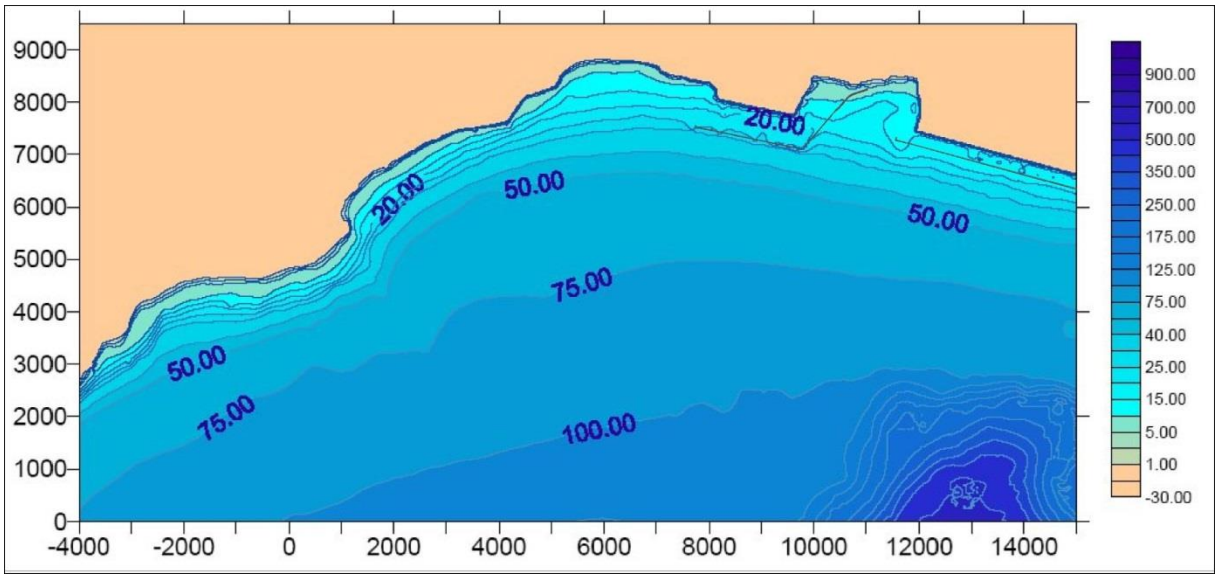


Figura 29. Griglia di calcolo del fondale del litorale di Voltri 100x100

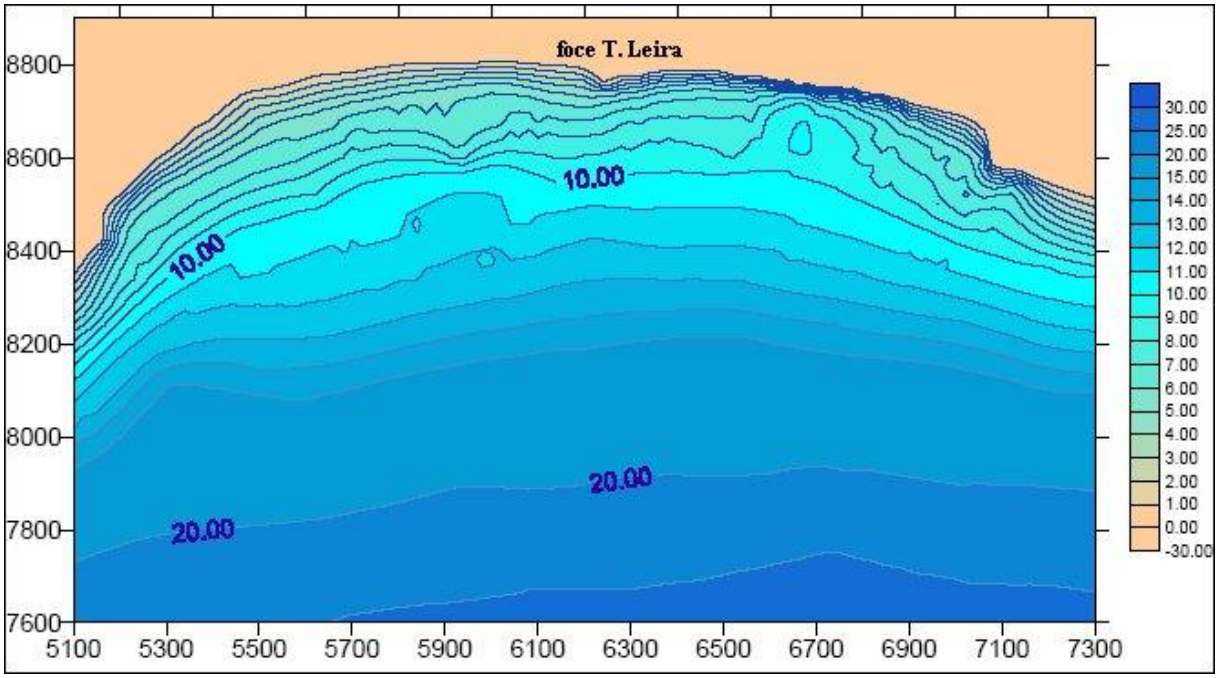


Figura 30. Griglia di calcolo nidificata del fondale di Voltri 20x20

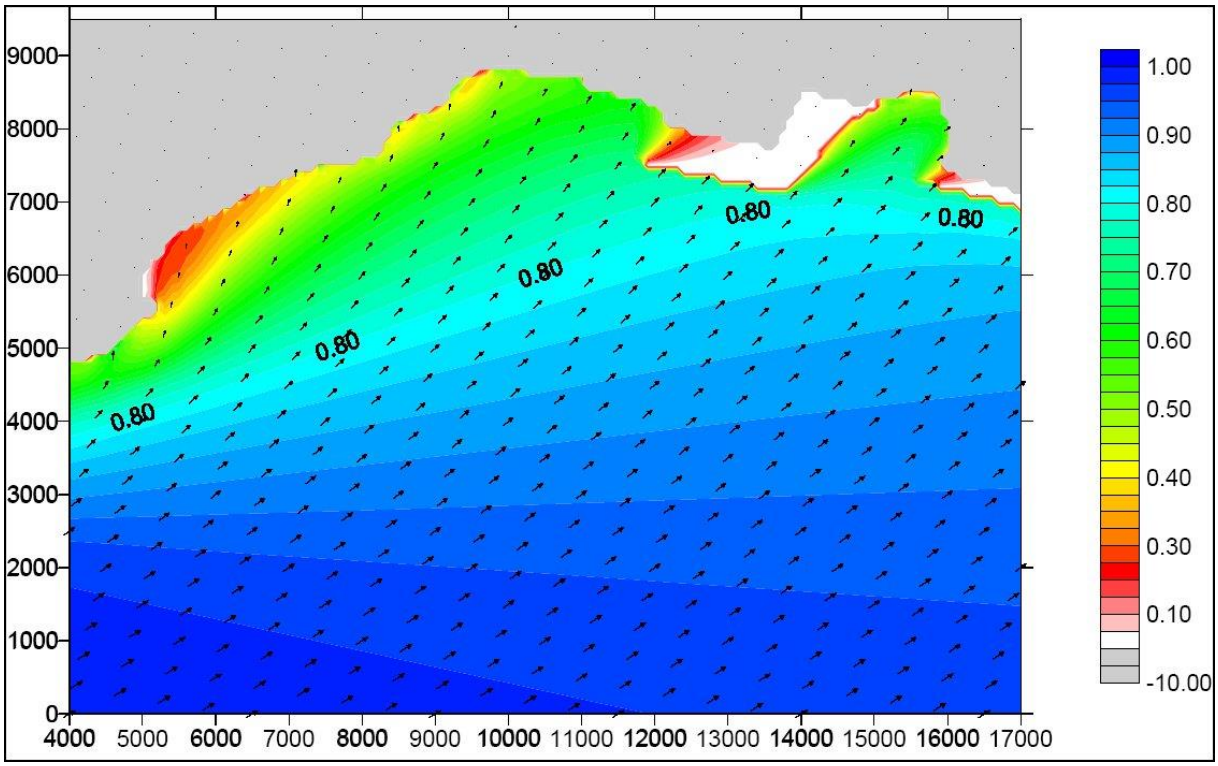


Figura 31. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 240°N

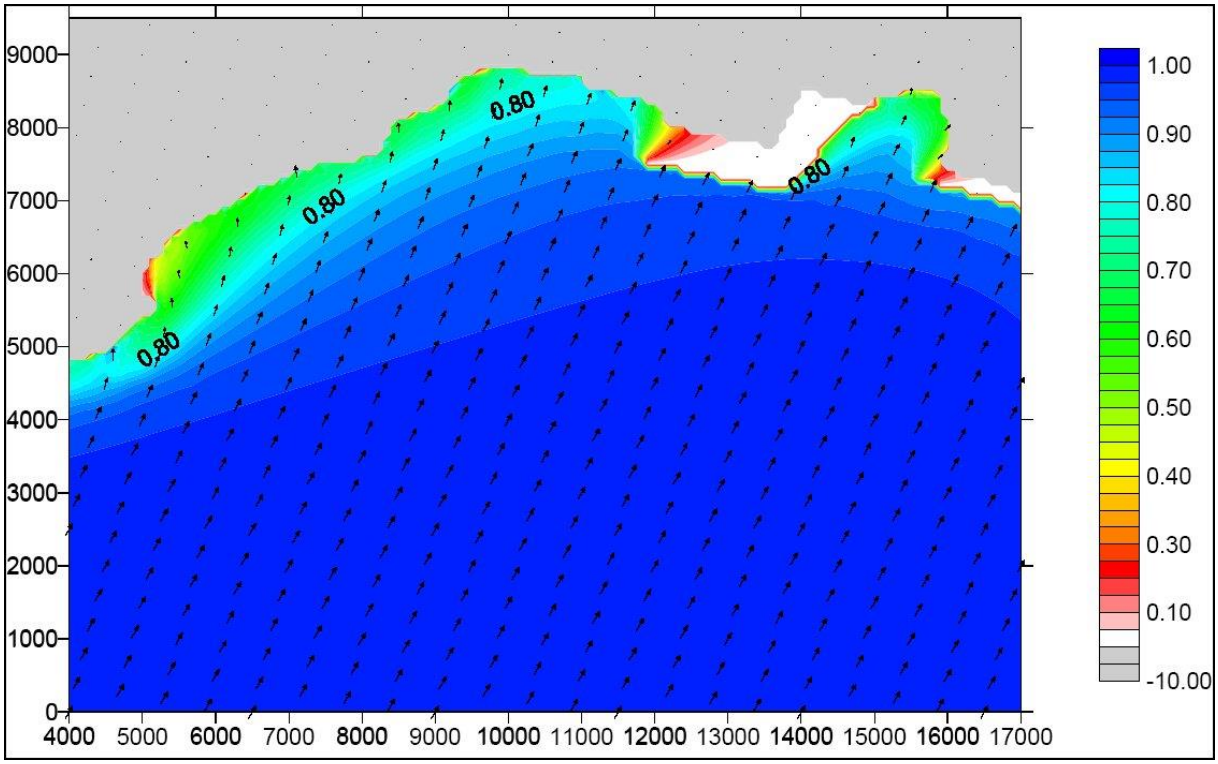


Figura 32. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 210°N

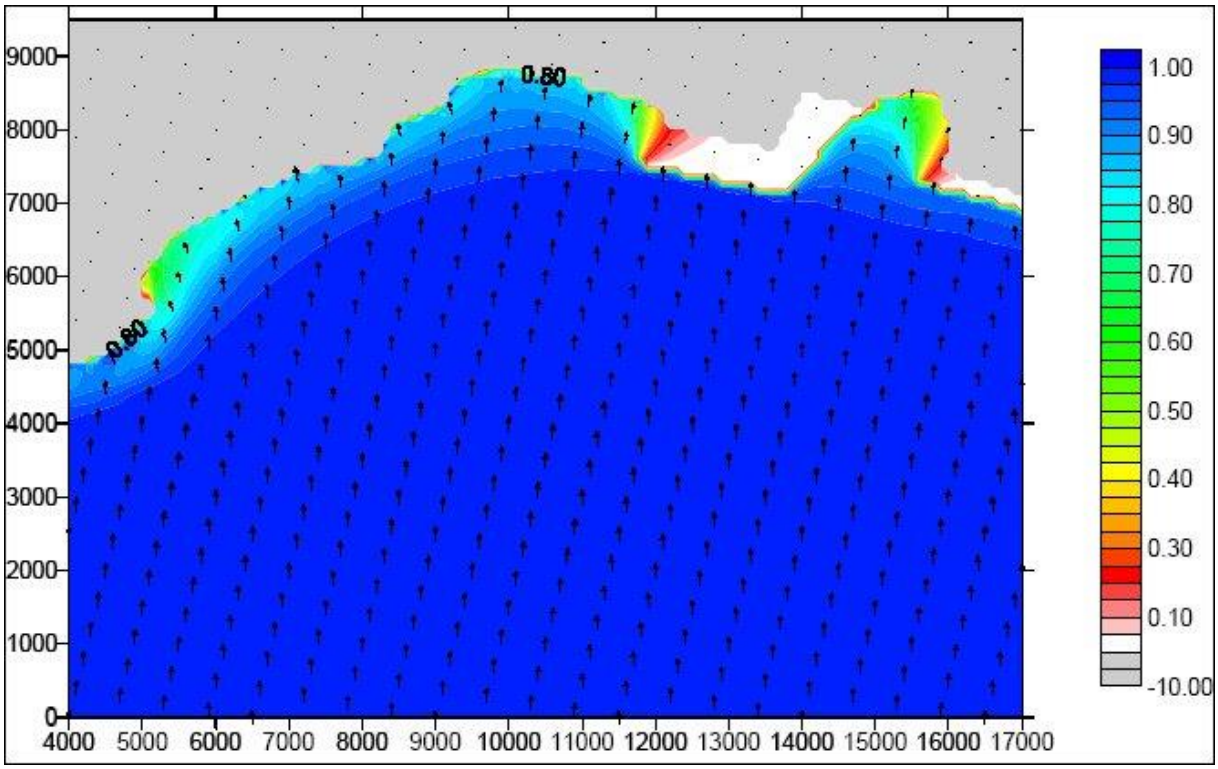


Figura 33. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 180°N

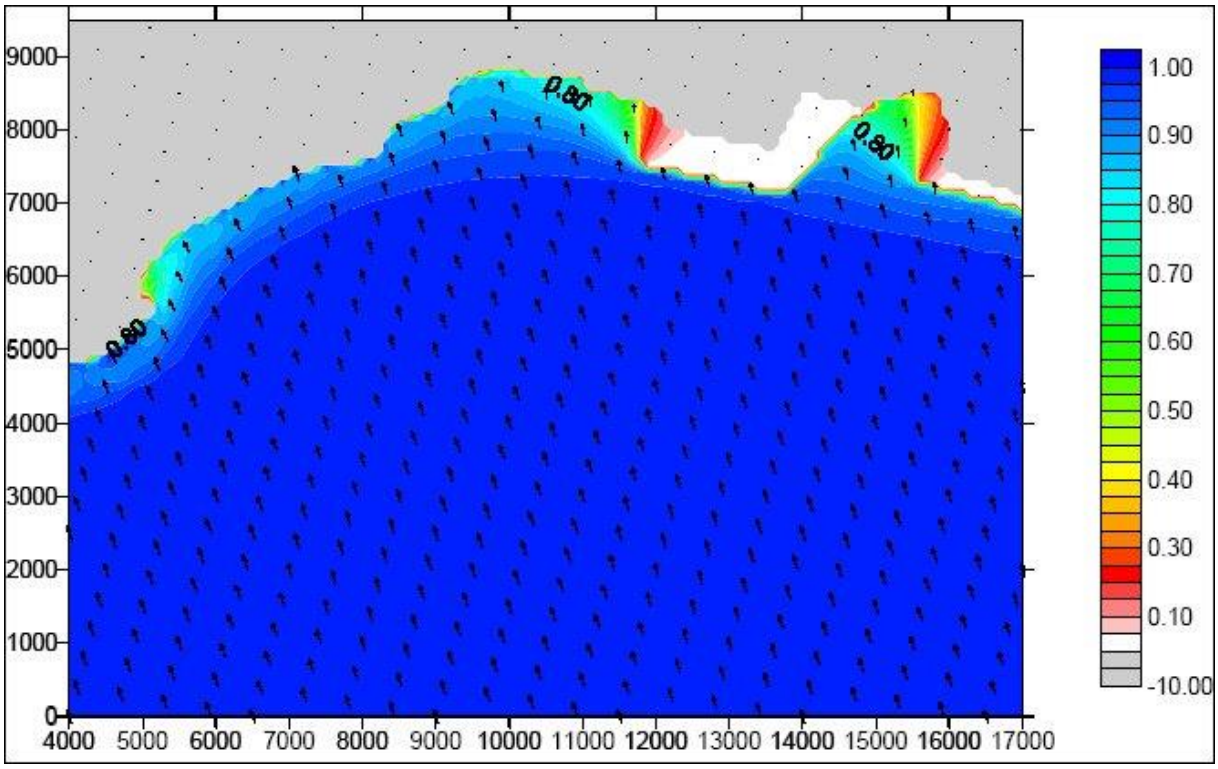


Figura 34. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 160°N

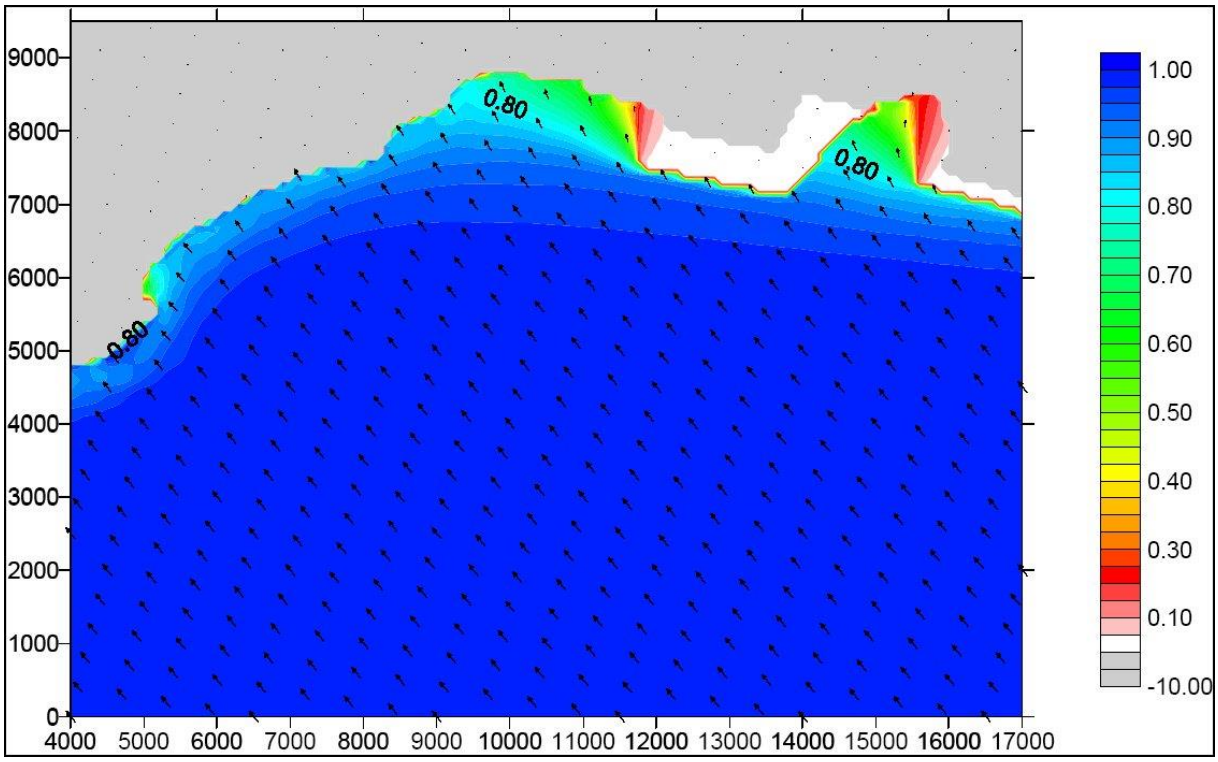


Figura 35. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 140°N

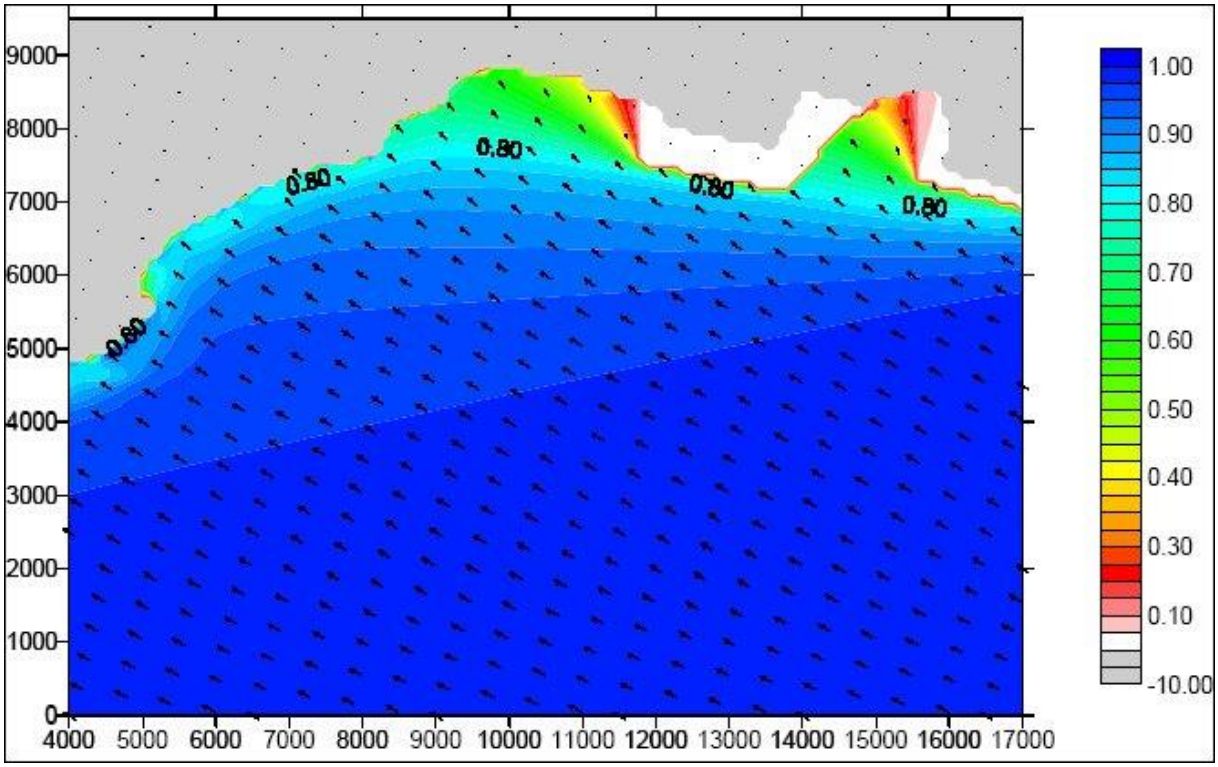


Figura 36. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 120°N

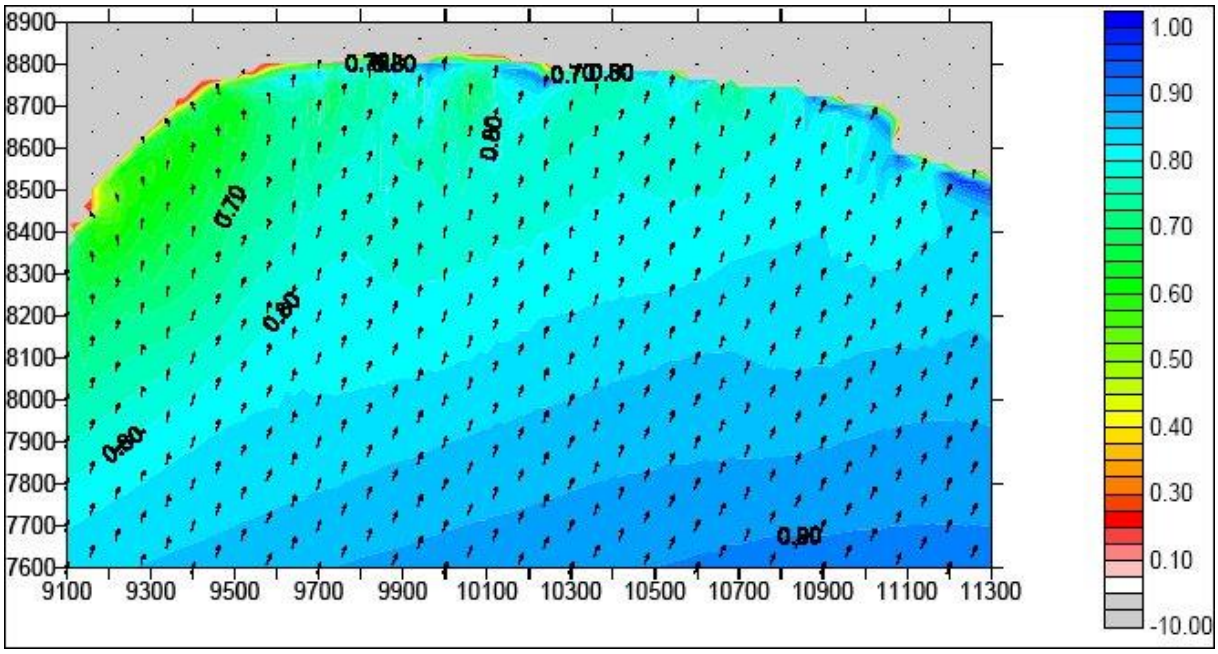


Figura 37. Rifrazione diretta Hs=1,0 m Tp=7s Dir 210°N griglia nidificata 20x20

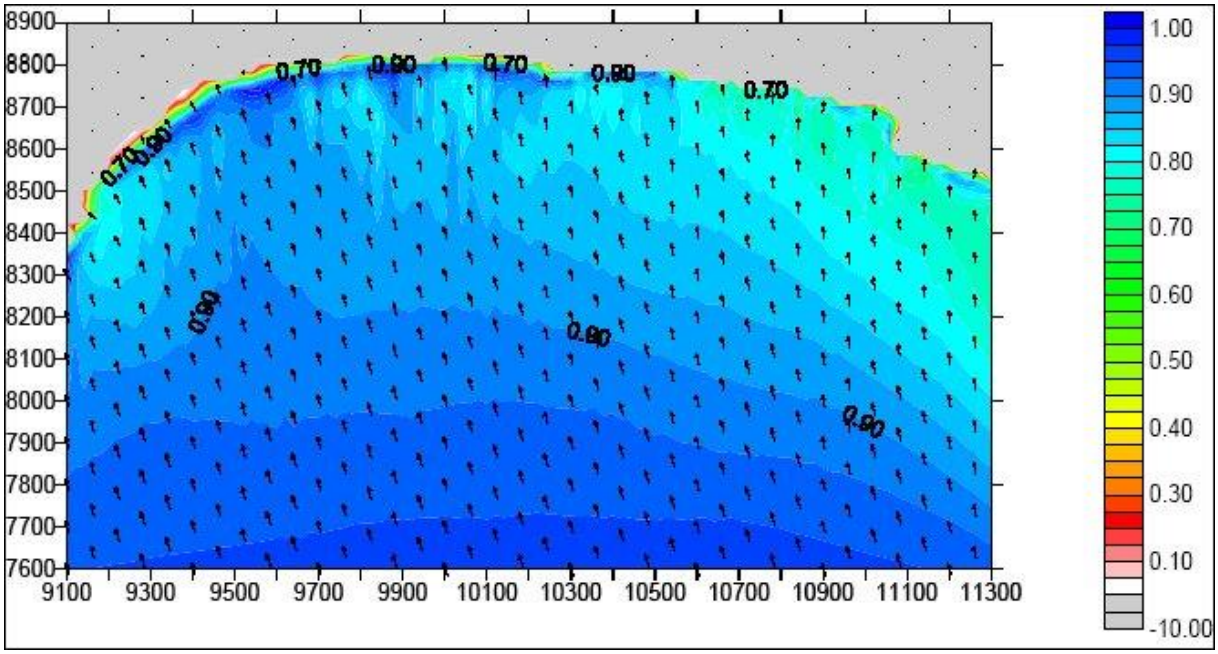


Figura 38. Rifrazione diretta Hs=1,0 m Tp=7s Dir 160°N griglia nidificata 20x20

3.6.2. Ricostruzione del clima ondoso in acque relativamente profonde davanti al litorale di Voltri

La ricostruzione del clima ondoso in acque relativamente profonde di fronte al litorale di Voltri, utile per le applicazioni di morfodinamica costiera, è stata effettuata nel punto P0 (vedi Figura 39) posto al centro del litorale, in corrispondenza della foce del torrente Leira, su fondali di circa -20,0 m sul l.m.m. Il punto è stato scelto in modo che la ricostruzione del clima ondoso davanti al litorale di Voltri tenga conto del riparo offerto dalle opere foranee della portualità di Sestri sulle onde provenienti dal settore di levante.

Diversamente i punti posti a profondità maggiori, come quelli posti a circa -30,0 m sul l.m.m. a cui in genere ci si riferisce per la determinazione del clima in acque relativamente profonde, già non risentono significativamente del riparo offerto dalle opere foranee della portualità di Sestri sulle onde provenienti dal su detto settore.

L'applicazione del modello matematico SWAN ha consentito la determinazione, nel punto P0 il rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e sotto costa e la corrispondenza tra la direzione del moto ondoso al largo e quello sotto costa per diverse direzioni di provenienza e periodi di picco del moto ondoso al largo, come specificato in precedenza.

In Figura 40 è riportato il rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e le altezze d'onda nel punto P0 in funzione della direzione del moto ondoso al largo. La figura è relativa agli spettri di moto ondoso con periodo di picco compresi tra 4s e 12s. La figura evidenzia che alla profondità di 20 m:

- per le direzioni di provenienza comprese tra 150° ÷210°N l'altezza d'onda si riduce poco, con valori compresi tra il 90% e il 100% di quella al largo;
- per le direzioni di provenienza comprese tra 130°÷140°N e tra 210°N÷220°N l'altezza d'onda si riduce con valori compresi tra il 80% e il 95% di quella al largo;
- per le direzioni di provenienza comprese tra 110°÷130°N l'altezza d'onda si riduce con valori compresi tra il 70% e il 90% di quella al largo;
- per le direzioni di provenienza comprese tra 220°÷240°N l'altezza d'onda si riduce con valori compresi tra il 75% e il 90% di quella al largo.

In Figura 41 per gli stessi spettri di moto ondoso è riportata la corrispondenza tra la direzione del moto ondoso largo-riva nel punto P0. La figura evidenzia che di fronte a Voltri le onde che si generano nel Mar Ligure giungono alla profondità di 20 m da un settore più ristretto rispetto al largo, compreso tra 130°÷240°N.. La deviazione rispetto alla direzione d'onda al largo del moto ondoso è inferiore a 5° per il settore compreso tra 160°÷190°N, è inferiore a 10° per la direzioni di provenienza compreso tra 150°÷160°N e tra 200°÷210°N, è inferiore a 20° per la direzioni di provenienza compreso tra

130°÷150°N e tra 210°÷220°N e inferiore a 35° per la direzioni di provenienza compreso tra 110°÷130°N e tra 220°÷240°N.

Il diagramma polare del moto ondoso nel punto P0 alla profondità di -20,0 m sul l.m.m. di fronte alla foce del Torrente Leira ricavato attraverso le correlazioni largo riva è riportato in Figura 42. Per lo stesso punto in Figura 43 è riportata la distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs.

Nella Tabella 14 è riportata la distribuzione annuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza del Punto P0 e nella Tabella 15 per lo stesso punto è riportata la ripartizione per classi di altezze d'onda significativa e periodo di picco.

Dal confronto della Figura 18 e della Figura 42 è evidente la rotazione di circa 10° in senso antiorario degli eventi ondosi provenienti da 210°N e quella in senso orario di circa 10° degli eventi ondosi provenienti dal settore 140°÷150°N.

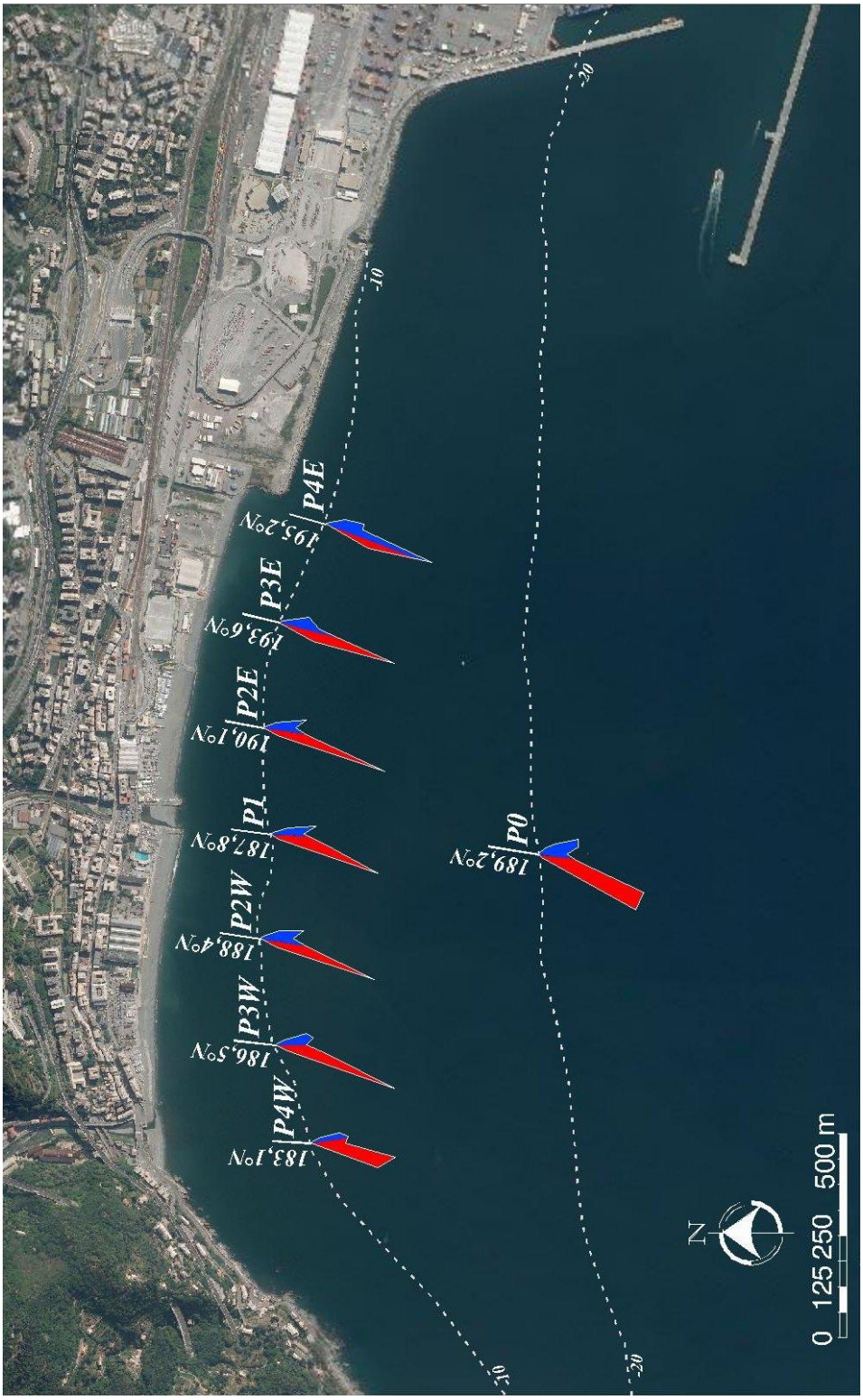


Figura 39. Punti significativi per il litorale di Voltri e risultante vettoriale del flusso di energia del moto ondoso

Fonte: Atlante Cartografico Italiano Aerofoto 2012

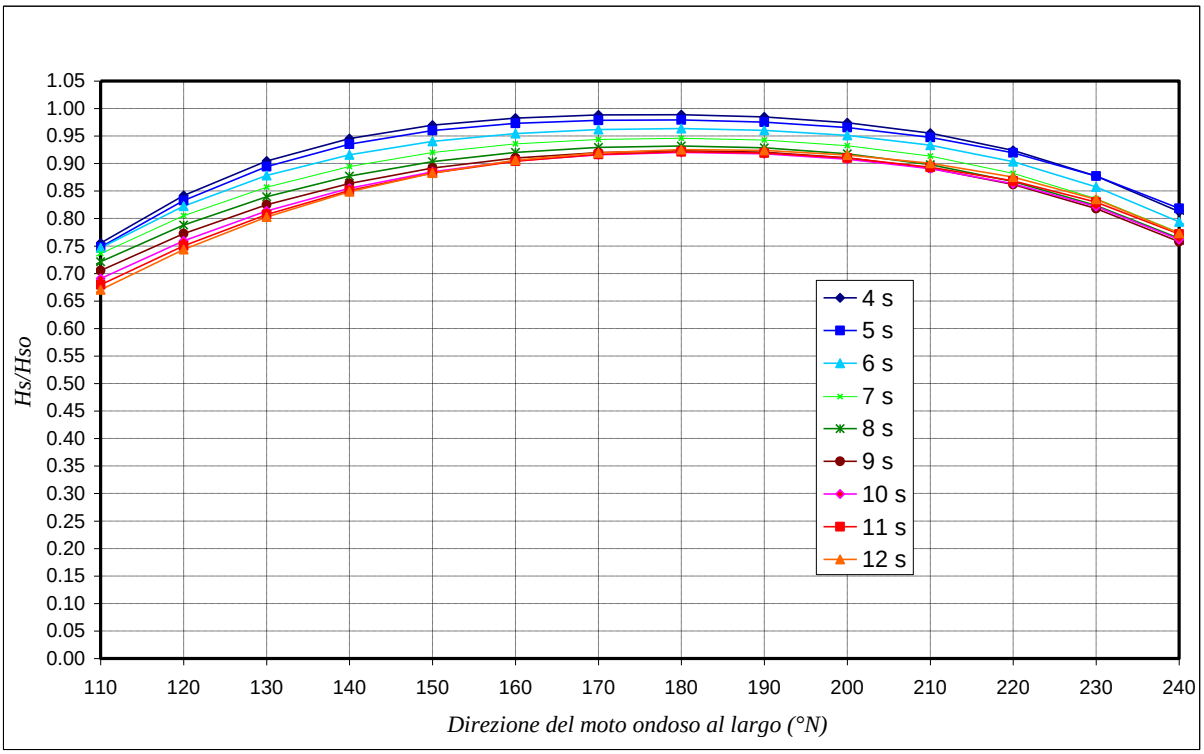


Figura 40. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) - Rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e sotto costa in funzione della direzione del moto ondoso al largo

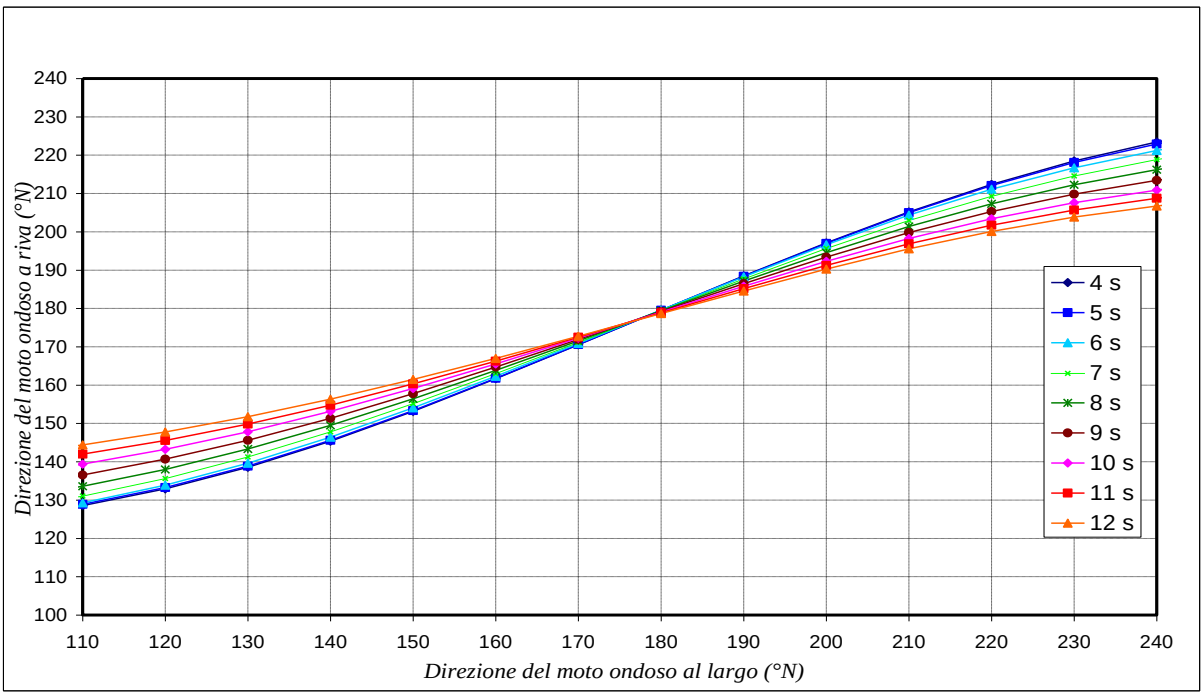


Figura 41. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) - Corrispondenza direzioni di moto ondoso largo–riva

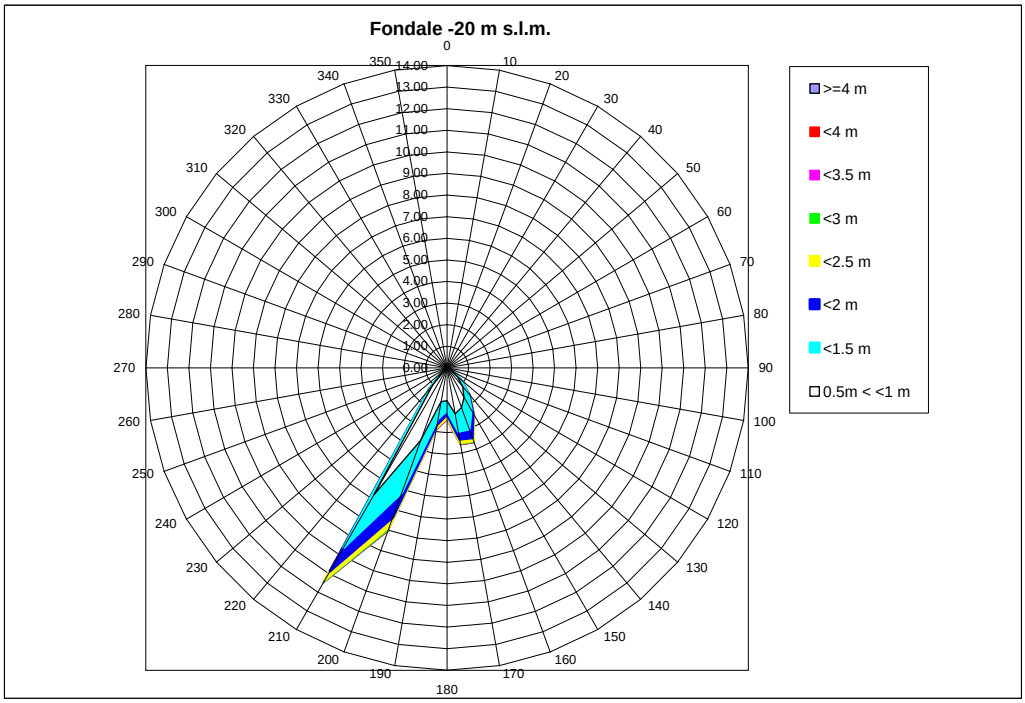


Figura 42. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso davanti alla foce del Torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

Dati al largo ricostruiti con il metodo della trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

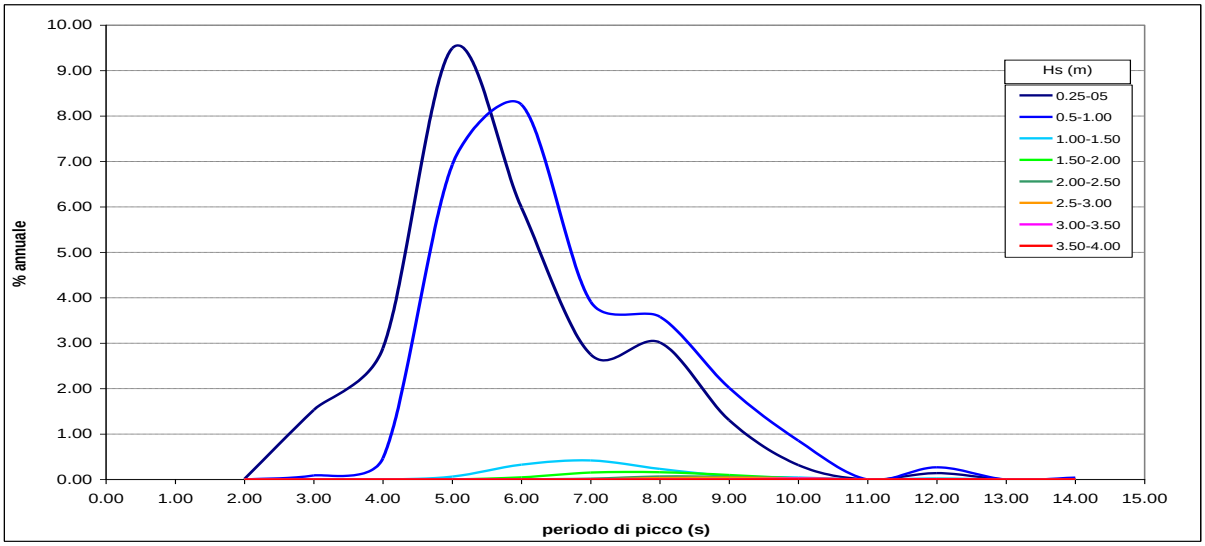


Figura 43. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs – Ricostruzione secondo il metodo SWAN

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷0.25*	*0.25 ÷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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.03														0.03
100															0.00
110	0.32														0.32
120	11.52	2.04	0.24	0.04	0.00										13.85
130	0.67	0.84	0.62	0.17	0.04	0.01									2.34
140	0.14	0.49	1.13	0.39	0.09	0.04	0.02								2.31
150	0.12	0.82	1.58	0.68	0.18	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00					3.47
160	0.24	1.11	1.96	1.06	0.44	0.14	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00				5.03
170	0.59	1.62	2.16	0.84	0.36	0.16	0.06	0.03	0.01	0.01					5.83
180	0.68	1.54	1.52	0.46	0.18	0.15	0.05	0.03	0.00		0.00	0.00			4.62
190	0.75	1.75	1.59	0.80	0.28	0.14	0.06	0.03	0.02			0.00			5.44
200	1.40	2.52	3.57	2.58	1.21	0.47	0.17	0.03	0.01						11.96
210	4.66	6.95	6.79	2.84	1.25	0.45	0.14	0.02	0.01						23.10
220	9.05	3.21	1.02	0.20	0.04	0.00									13.53
230	6.95	0.51	0.20	0.01											7.67
240	0.52														0.52
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	37.64	23.42	22.39	10.06	4.07	1.62	0.56	0.17	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	37.64	61.05	83.44	93.51	97.58	99.20	99.76	99.93	99.98	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 14. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P0 (–20,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷0.25	*0.25 ÷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*	*%*	*%*
0.0 ÷2.0	3.77	0.01													3.78	3.78
2.0 ÷3.0	14.54	1.53	0.09												16.17	19.95
3.0 ÷4.0	4.52	2.89	0.47												7.88	27.83
4.0 ÷5.0	10.67	9.49	6.93	0.06	0.00										27.16	54.98
5.0 ÷6.0	5.16	5.98	8.25	0.33	0.05	0.00									19.78	74.76
6.0 ÷7.0	2.98	2.75	3.91	0.42	0.15	0.02									10.23	84.99
7.0 ÷8.0	1.69	3.02	3.58	0.24	0.16	0.07	0.03								8.78	93.77
8.0 ÷9.0	0.42	1.30	2.02	0.08	0.10	0.06	0.04	0.00							4.02	97.79
9.0 ÷10.0	0.13	0.32	0.86	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00						1.45	99.24
10.0 ÷11.0																99.24
11.0 ÷12.0	0.08	0.14	0.27	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01					0.55	99.79
12.0 ÷13.0																99.79
13.0 ÷14.0	0.15	0.01	0.04	0.00		0.00			0.00						0.21	100.00
>=14																100.00
TOT	44.11	27.45	26.42	1.19	0.50	0.18	0.10	0.03	0.01	0.01					100.00	
tot cumulato	44.11	71.57	97.98	99.17	99.67	99.85	99.95	99.98	99.99	100.00						

Tabella 15. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P0 (–20,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

3.6.3. Ricostruzione del clima ondoso lungo il litorale di Voltri appena fuori la zona di frangimento

La ricostruzione del clima ondoso appena fuori la zona di frangimento lungo il litorale di Voltri, su fondali di circa -10,0 m sul l.m.m., utile per le determinazione del flusso di energia del moto ondoso incidente il litorale, è stata effettuata in 9 punti (vedi Figura 39). In particolare il punto P1 è posto al centro del litorale in corrispondenza della foce del torrente Leira, mentre i punti P2E, P3E e P4E sono posti ad est del punto P1 ad interasse di circa 260 m ed i punti P2W, P3W e P4W sono posti ad ovest del punto P1 ad interasse di circa 260 m.

L'applicazione del modello matematico SWAN ha consentito la determinazione, nei 9 punti posti alla profondità di -10 m sul l.m.m. il rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e sotto costa e la corrispondenza tra la direzione del moto ondoso al largo e quello sotto costa per diverse direzioni di provenienza e periodi di picco del moto ondoso al largo, come specificato in precedenza.

In Figura 44 è riportato a titolo di esempio il rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e le altezze d'onda nel punto P1 in funzione della direzione del moto ondoso al largo. La figura è relativa agli spettri di moto ondoso con periodo di picco compresi tra 4s e 12s. La figura evidenzia che a Voltri alla profondità di 10,0 m per le direzioni di provenienza comprese tra 170°÷200°N l'altezza d'onda si riduce poco, con valori compresi tra il 90% e il 95% di quella al largo;

In Figura 45 per gli stessi spettri di moto ondoso è riportata la corrispondenza tra la direzione del moto ondoso largo-riva nel punto P1. La figura evidenzia che a Voltri alla profondità di 10,0m le onde che si generano nel Mar Ligure giungono alla profondità di 10 m da un settore ristretto, compreso tra 145°N÷210°N. Inoltre le onde provenienti dalla direzione di circa 175°N giungono alla profondità di 10 m subendo una deviazione minima indipendente dal loro periodo.

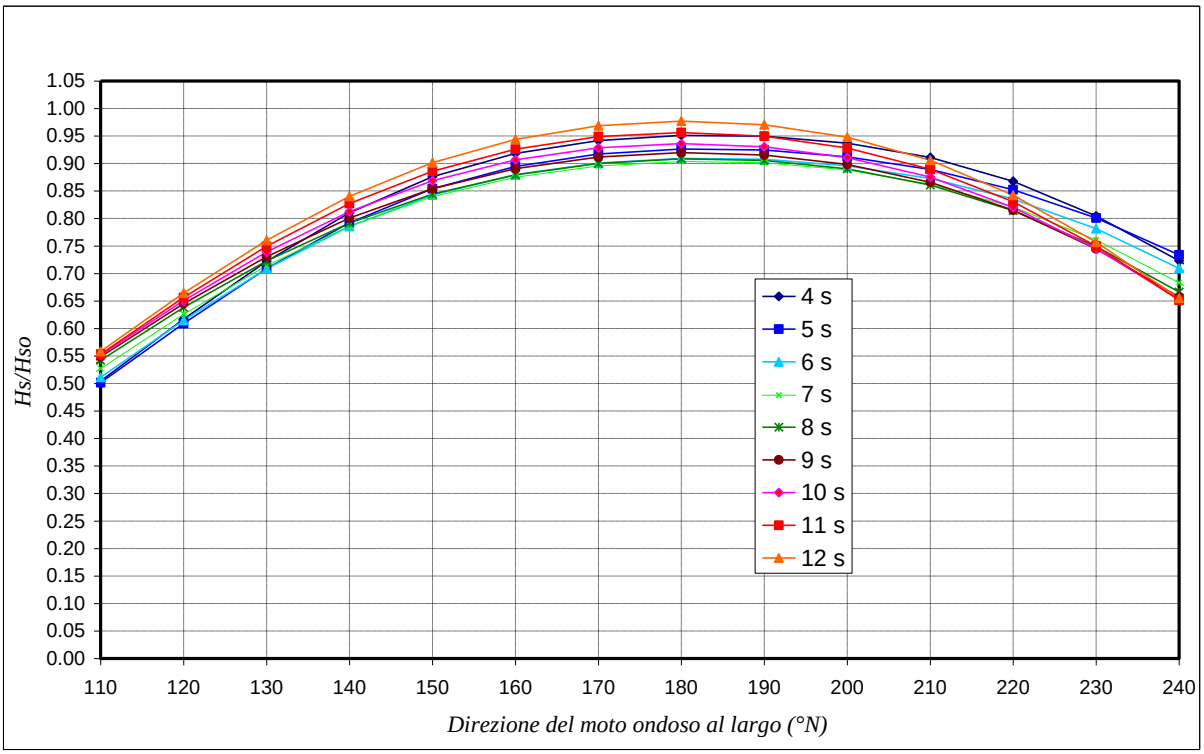


Figura 44. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) - Rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e sotto costa in funzione della direzione del moto ondoso al largo

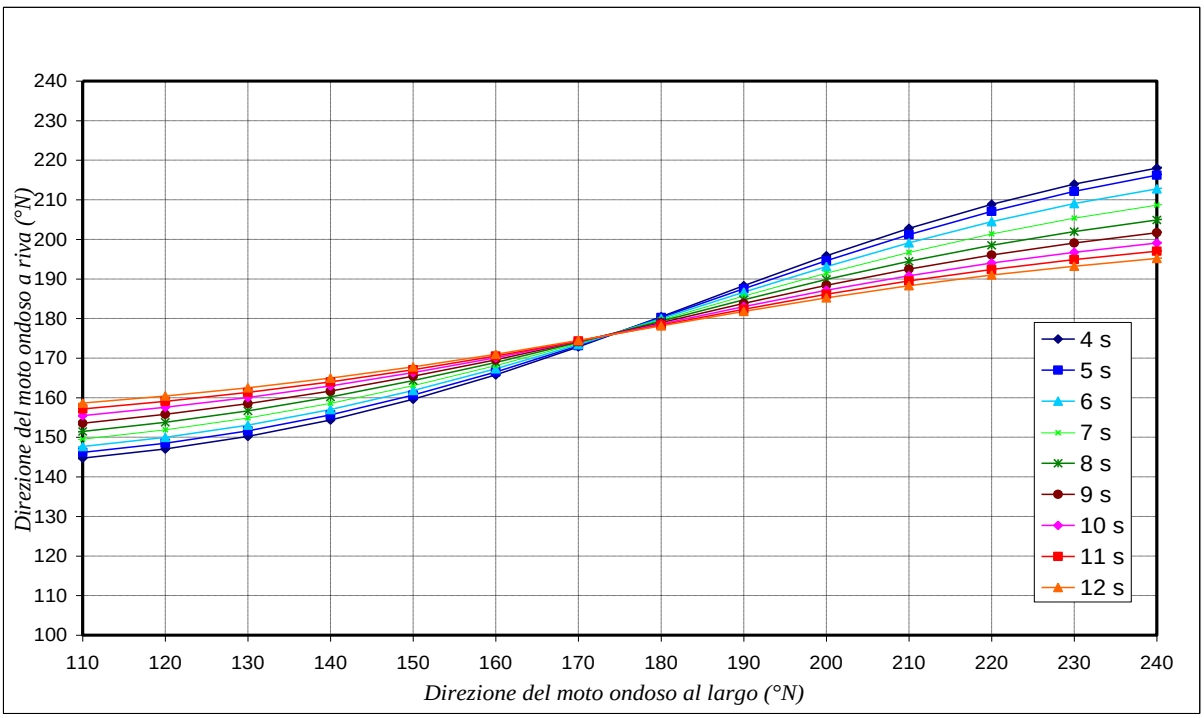


Figura 45. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) - Corrispondenza direzioni di moto ondoso largo–riva

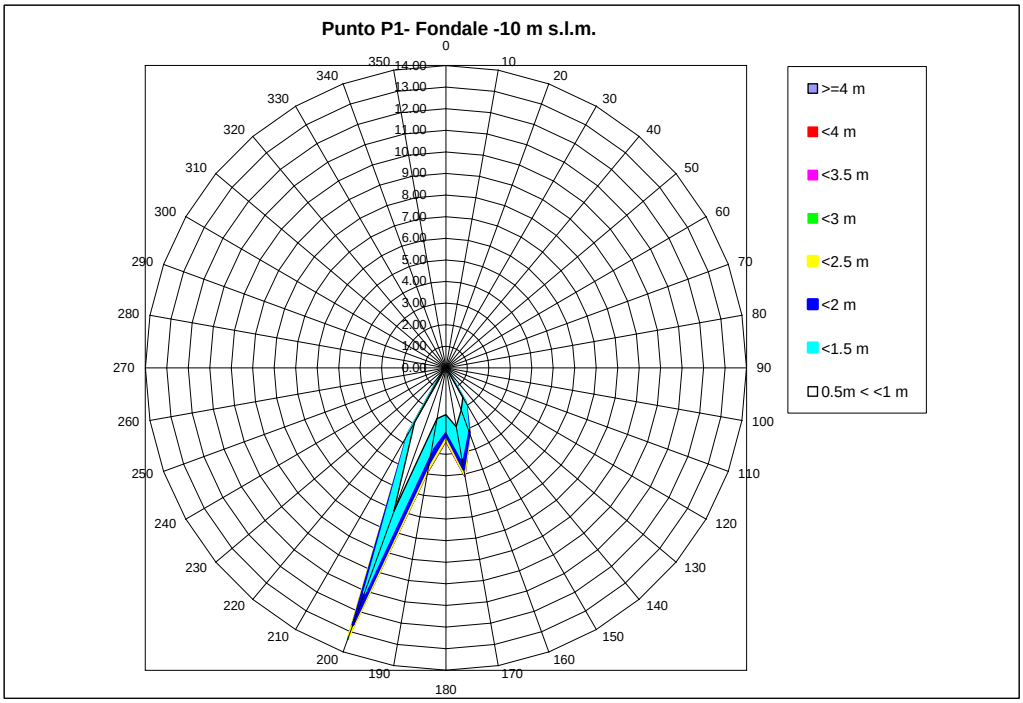


Figura 46. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

Dati al largo ricostruiti con il metodo della trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

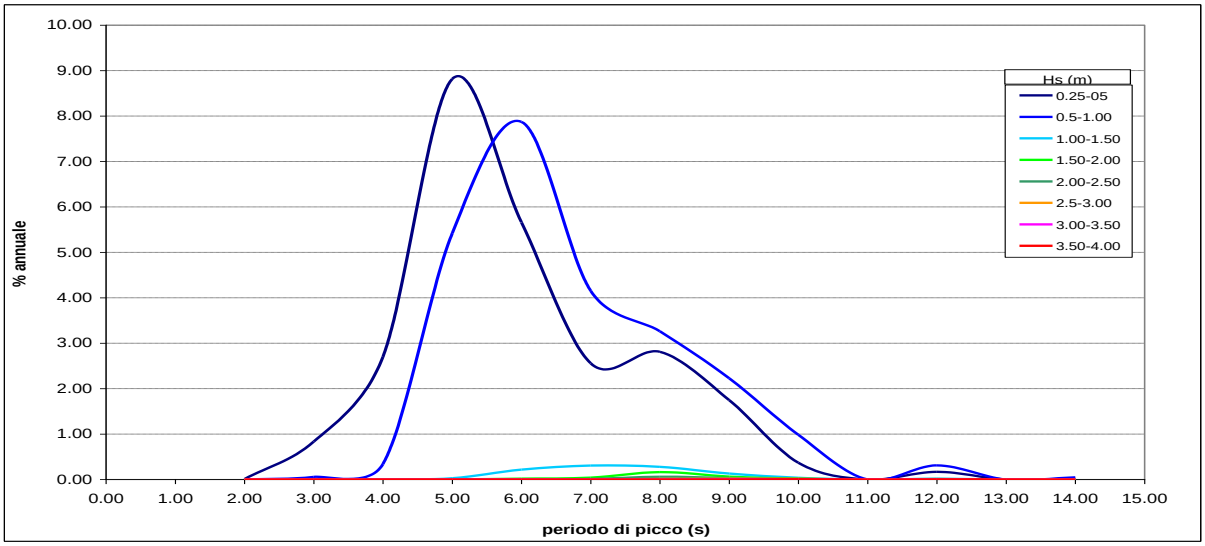


Figura 47. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) – Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs – Ricostruzione secondo il metodo SWAN

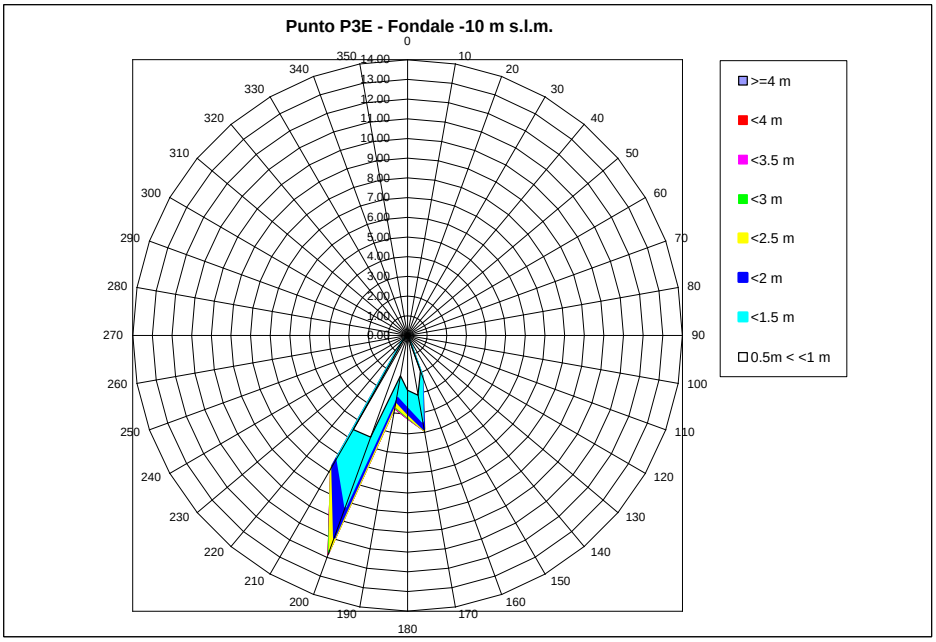


Figura 48. Punto P4E (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

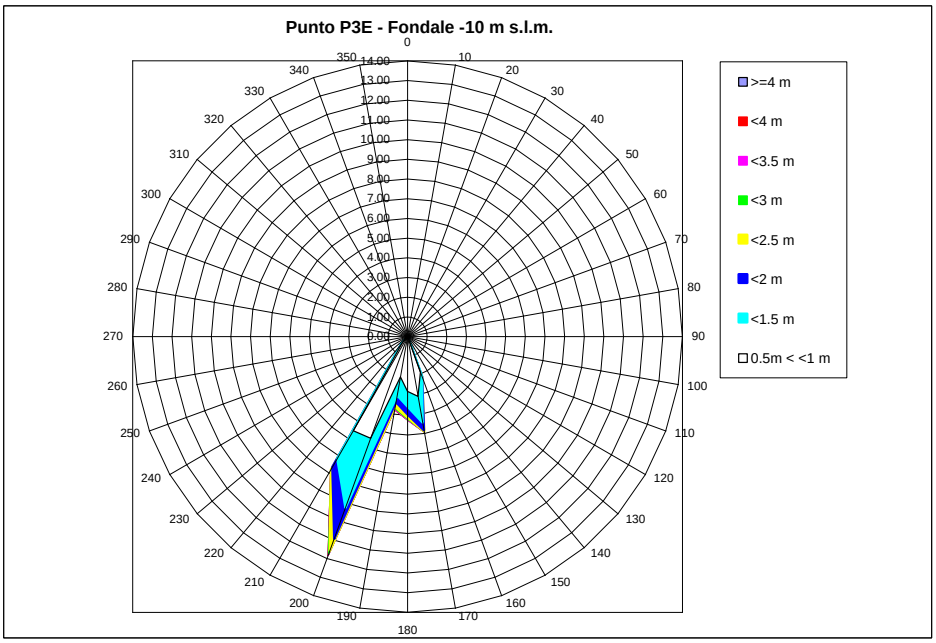


Figura 49. Punto P3E (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

Dati al largo ricostruiti con il metodo della trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

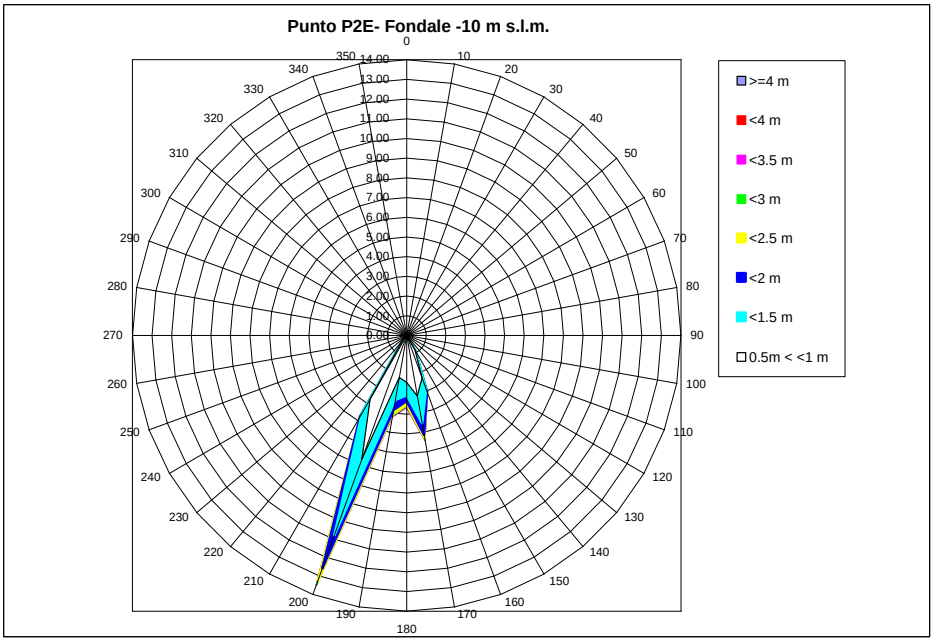


Figura 50. Punto P2E (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

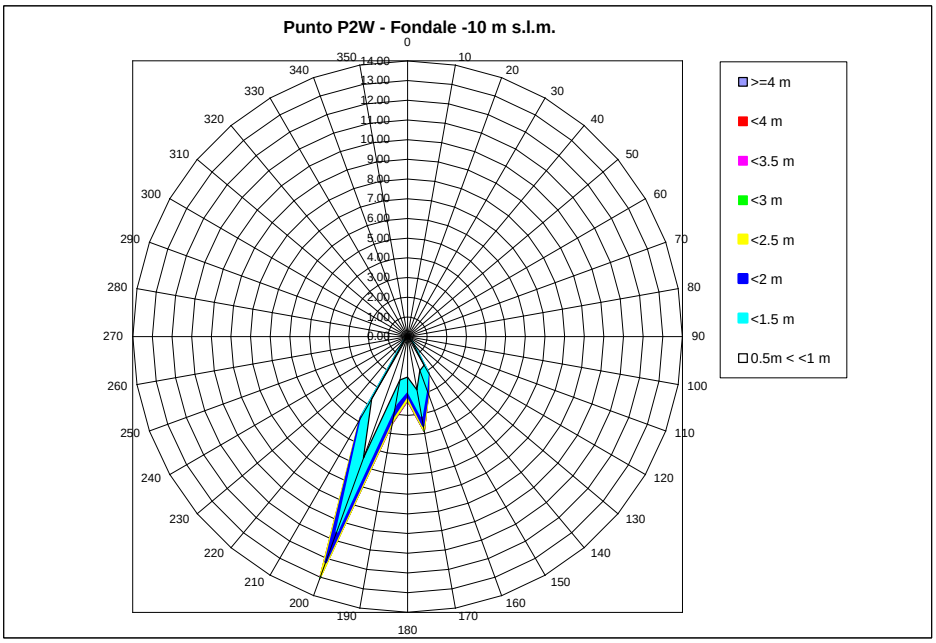


Figura 51. Punto P2W (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

Dati al largo ricostruiti con il metodo della trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

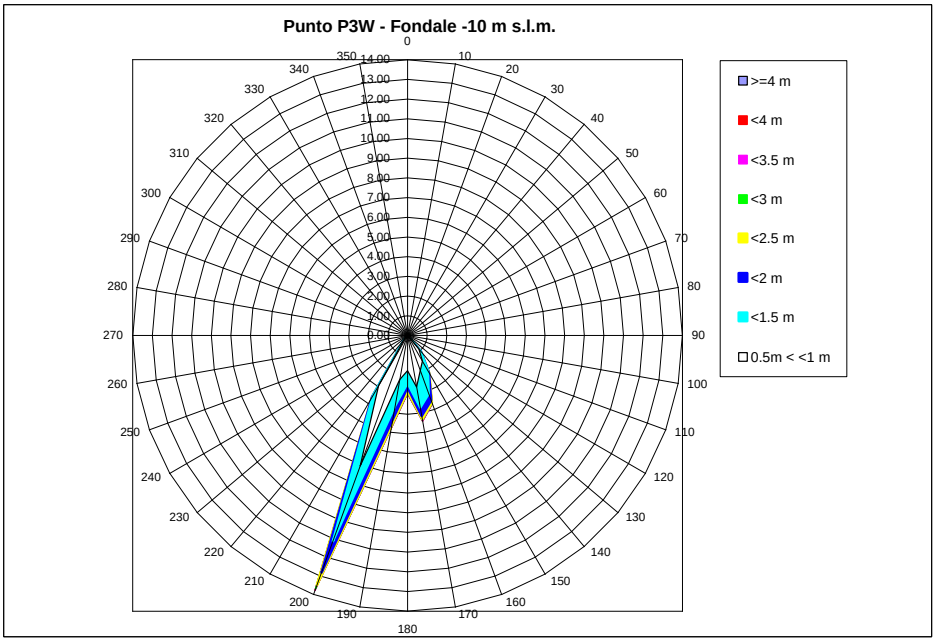


Figura 52. Punto P3W (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

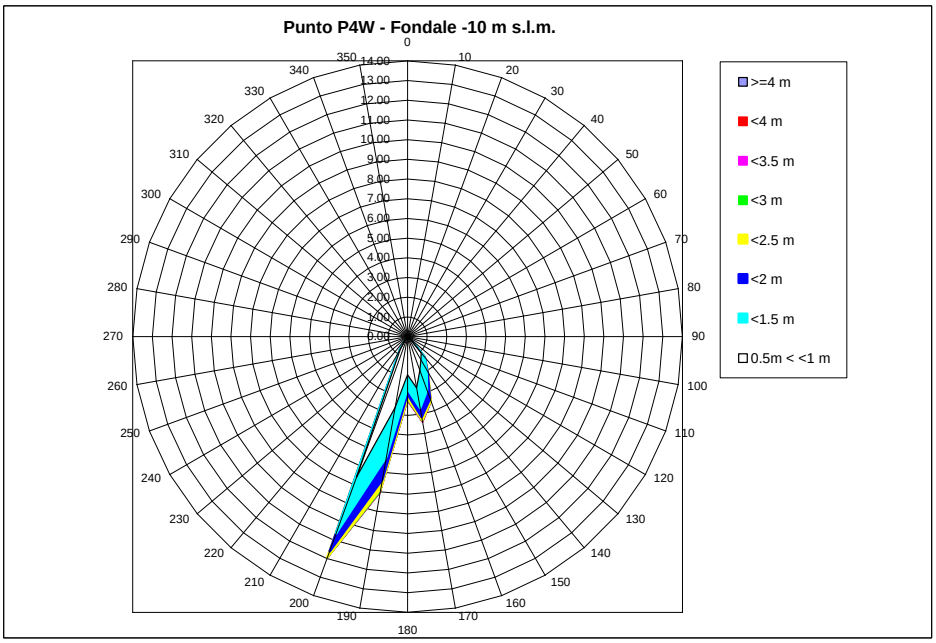


Figura 53. Punto P4W (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN

Dati al largo ricostruiti con il metodo della trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷ 0.25*	*0.25 ÷ 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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.15														0.15
100															0.00
110															0.00
120															0.00
130	0.73														0.73
140	13.33	0.51	0.04												13.88
150	0.97	1.28	1.58	0.24	0.02	0.00									4.09
160	0.50	1.52	2.09	0.88	0.23	0.05	0.00	0.01	0.00						5.29
170	0.72	2.06	2.76	1.47	0.55	0.20	0.09	0.02	0.01	0.01					7.88
180	0.79	2.02	2.17	0.66	0.27	0.18	0.07	0.05	0.01		0.00	0.01			6.23
190	1.09	2.42	2.40	1.38	0.70	0.27	0.13	0.04	0.01						8.44
200	2.77	5.26	7.06	4.03	1.58	0.58	0.11	0.02	0.00						21.41
210	7.29	6.13	2.91	0.53	0.08	0.02									16.96
220	10.97	0.98	0.24	0.02											12.21
230	2.38	0.09	0.01												2.47
240	0.26														0.26
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	41.94	22.29	21.25	9.20	3.43	1.30	0.40	0.13	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	41.94	64.22	85.48	94.68	98.11	99.41	99.81	99.94	99.98	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 16. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P1 (–10,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷ 0.25	*0.25 ÷ 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*	*%*	*%*
0.0 ÷ 2.0	2.95	0.01													2.96	2.96
2.0 ÷ 3.0	13.74	0.84	0.06												14.63	17.59
3.0 ÷ 4.0	10.21	2.70	0.34												13.25	30.84
4.0 ÷ 5.0	9.37	8.82	5.42	0.03	0.00										23.64	54.49
5.0 ÷ 6.0	5.24	5.66	7.87	0.22	0.02										19.01	73.50
6.0 ÷ 7.0	2.76	2.56	4.15	0.31	0.04	0.01									9.83	83.33
7.0 ÷ 8.0	2.04	2.81	3.26	0.28	0.16	0.06	0.01								8.62	91.95
8.0 ÷ 9.0	1.45	1.75	2.23	0.13	0.07	0.04	0.02	0.01							5.68	97.63
9.0 ÷ 10.0	0.23	0.37	0.99	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00					1.69	99.32
10.0 ÷ 11.0																99.32
11.0 ÷ 12.0	0.07	0.17	0.31	0.01		0.01			0.00		0.00				0.58	99.90
12.0 ÷ 13.0																99.90
13.0 ÷ 14.0	0.03	0.01	0.05							0.01					0.10	100.00
>=14																100.00
TOT	48.09	25.69	24.68	1.02	0.31	0.13	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00				100.00	
tot cumulato	48.09	73.78	98.46	99.48	99.79	99.92	99.97	99.98	99.99	100.00	100.00					

Tabella 17. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P1 (–10,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷0.25*	*0.25 ÷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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.32														0.32
100															0.00
110															0.00
120															0.00
130															0.00
140	0.32														0.32
150	10.70	0.01													10.70
160	4.73	1.72	0.93	0.05											7.44
170	0.77	2.56	3.10	1.05	0.22	0.03	0.01	0.01	0.00						7.74
180	0.91	2.33	3.30	1.10	0.48	0.17	0.06	0.03	0.01	0.01					8.39
190	1.02	2.47	2.09	0.90	0.31	0.22	0.10	0.04	0.02		0.00	0.01			7.17
200	1.95	3.34	4.89	3.43	1.55	0.62	0.18	0.04	0.01						16.01
210	6.34	8.17	6.18	2.06	0.69	0.19	0.04	0.01							23.69
220	9.74	1.84	0.55	0.07	0.01										12.21
230	5.51	0.17	0.02												5.71
240	0.30														0.30
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	42.62	22.61	21.06	8.65	3.26	1.23	0.39	0.13	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	42.62	65.22	86.28	94.94	98.20	99.43	99.82	99.95	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 18. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P4E (–10,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷0.25	*0.25 ÷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*	*0.3 ÷4.0*	*4.0 ÷4.5*	*4.5 ÷5.0*	*5.0 ÷5.5*	*5.5 ÷6.0*	*> 6.0*	*%*	*%*
0.0 ÷2.0	3.38	0.01													3.39	3.39
2.0 ÷3.0	13.09	0.85	0.06												14.00	17.39
3.0 ÷4.0	8.13	2.54	0.27												10.95	28.34
4.0 ÷5.0	10.39	9.11	4.81	0.03											24.34	52.67
5.0 ÷6.0	5.75	5.39	7.36	0.16	0.01										18.66	71.34
6.0 ÷7.0	2.70	2.85	4.63	0.29	0.05	0.00									10.54	81.87
7.0 ÷8.0	2.57	2.81	3.57	0.31	0.18	0.05	0.01								9.50	91.38
8.0 ÷9.0	1.45	1.44	1.99	0.09	0.10	0.07	0.01								5.15	96.52
9.0 ÷10.0	0.70	0.55	1.11	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01						2.49	99.02
10.0 ÷11.0																99.02
11.0 ÷12.0	0.15	0.23	0.35	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00		0.00				0.80	99.82
12.0 ÷13.0																99.82
13.0 ÷14.0	0.08	0.03	0.07	0.01											0.18	100.00
>=14																100.00
TOT	48.40	25.82	24.22	0.97	0.37	0.15	0.04	0.01	0.01		0.00				100.00	
tot cumulato	48.40	74.21	98.43	99.41	99.78	99.93	99.97	99.99	100.00		100.00					

Tabella 19. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P4E (–10,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷0.25*	*0.25 ÷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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.21														0.21
100															0.00
110															0.00
120															0.00
130															0.00
140	1.29														1.29
150	13.42	0.31	0.03												13.76
160	1.09	2.10	1.93	0.21	0.04	0.00									5.37
170	0.69	2.07	3.08	1.36	0.39	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00					7.69
180	0.82	2.15	2.79	0.76	0.40	0.16	0.08	0.04	0.01	0.00					7.20
190	1.03	2.42	2.09	0.95	0.34	0.24	0.09	0.04	0.02		0.00	0.01			7.23
200	2.10	3.70	5.50	3.74	1.69	0.65	0.20	0.04	0.01						17.63
210	6.93	7.90	5.52	1.62	0.51	0.14	0.02	0.00							22.64
220	10.27	1.52	0.40	0.06	0.01										12.26
230	4.53	0.14	0.02												4.68
240	0.05														0.05
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	42.40	22.30	21.36	8.71	3.37	1.26	0.41	0.14	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	42.40	64.70	86.06	94.77	98.14	99.40	99.81	99.95	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 20. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P3E (–10,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷0.25	*0.25 ÷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*	*%*	*%*
0.0 ÷2.0	3.08	0.01													3.09	3.09
2.0 ÷3.0	14.82	0.92	0.06												15.80	18.89
3.0 ÷4.0	5.23	1.96	0.24												7.42	26.31
4.0 ÷5.0	13.22	9.82	5.43	0.01	0.00										28.48	54.80
5.0 ÷6.0	4.52	4.85	7.13	0.16	0.01										16.66	71.46
6.0 ÷7.0	2.68	2.61	4.36	0.35	0.07										10.07	81.53
7.0 ÷8.0	2.76	3.07	3.82	0.23	0.18	0.04	0.01	0.00							10.12	91.65
8.0 ÷9.0	1.38	1.55	2.05	0.10	0.08	0.06	0.01	0.01							5.24	96.89
9.0 ÷10.0	0.42	0.49	1.13	0.04	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00			0.00			2.14	99.03
10.0 ÷11.0																99.03
11.0 ÷12.0	0.16	0.23	0.35	0.05		0.01	0.01								0.80	99.83
12.0 ÷13.0																99.83
13.0 ÷14.0	0.09	0.02	0.05	0.01											0.17	100.00
>=14																100.00
TOT	48.33	25.55	24.62	0.96	0.34	0.12	0.05	0.01	0.00			0.00			100.00	
tot cumulato	48.33	73.88	98.50	99.46	99.81	99.93	99.98	99.99	100.00			100.00				

Tabella 21. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P3E (–10,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷ 0.25*	*0.25 ÷ 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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.21														0.21
100															0.00
110															0.00
120															0.00
130															0.00
140	9.47	0.00													9.47
150	5.60	1.28	0.85	0.04	0.00										7.77
160	0.55	1.63	2.30	0.61	0.13	0.04		0.01	0.00						5.27
170	0.71	2.12	3.13	1.41	0.60	0.14	0.08	0.02	0.01	0.01					8.22
180	0.82	2.09	2.39	0.66	0.29	0.19	0.08	0.05	0.01		0.00	0.01			6.57
190	1.00	2.39	2.17	1.16	0.52	0.20	0.10	0.03	0.01						7.58
200	2.46	4.56	6.69	4.12	1.78	0.67	0.17	0.04	0.01						20.50
210	6.90	6.80	3.73	0.82	0.18	0.05	0.01								18.48
220	10.90	1.22	0.29	0.03											12.45
230	3.33	0.07	0.01												3.40
240	0.09														0.09
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	42.04	22.15	21.53	8.85	3.51	1.29	0.43	0.15	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	42.04	64.19	85.72	94.57	98.08	99.37	99.80	99.95	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 22. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P2E (–10,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷ 0.25	*0.25 ÷ 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*	*%*	*%*
0.0 ÷ 2.0	2.79	0.01													2.80	2.80
2.0 ÷ 3.0	14.31	0.85	0.06												15.23	18.02
3.0 ÷ 4.0	7.01	2.35	0.29												9.65	27.67
4.0 ÷ 5.0	10.88	9.13	5.50	0.03											25.54	53.22
5.0 ÷ 6.0	5.66	4.28	6.83	0.10	0.01										16.88	70.09
6.0 ÷ 7.0	3.29	4.16	5.65	0.33	0.07	0.00									13.51	83.60
7.0 ÷ 8.0	1.96	2.04	2.42	0.16	0.18	0.05	0.00								6.82	90.42
8.0 ÷ 9.0	1.94	2.11	2.90	0.15	0.12	0.09	0.03								7.33	97.75
9.0 ÷ 10.0	0.17	0.37	0.94	0.05	0.02	0.04	0.01								1.60	99.35
10.0 ÷ 11.0																99.35
11.0 ÷ 12.0	0.06	0.14	0.28	0.03	0.01										0.52	99.87
12.0 ÷ 13.0																99.87
13.0 ÷ 14.0	0.07	0.02	0.04	0.01	0.00										0.13	100.00
>=14																100.00
TOT	48.14	25.46	24.91	0.87	0.40	0.18	0.04								100.00	
tot cumulato	48.14	73.60	98.51	99.38	99.78	99.96	100.00									

Tabella 23. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P2E (–10,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷ 0.25*	*0.25 ÷ 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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.22														0.22
100															0.00
110															0.00
120	0.05														0.05
130	2.39														2.39
140	12.00	1.09	0.38	0.02											13.49
150	0.44	1.08	1.69	0.38	0.05	0.02									3.65
160	0.45	1.43	1.84	0.96	0.25	0.06	0.01	0.01	0.00						5.02
170	0.72	1.98	2.74	1.35	0.51	0.18	0.09	0.02	0.01	0.01					7.61
180	0.79	1.99	2.06	0.65	0.26	0.18	0.07	0.05	0.01		0.00	0.01			6.07
190	0.99	2.27	2.24	1.24	0.62	0.24	0.11	0.04	0.01						7.76
200	2.51	4.63	6.56	3.97	1.66	0.69	0.17	0.03	0.01						20.22
210	7.65	6.72	3.65	0.89	0.24	0.06	0.00								19.20
220	12.54	0.98	0.24	0.02											13.79
230	0.53														0.53
240	0.01														0.01
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	41.29	22.17	21.39	9.47	3.60	1.43	0.45	0.15	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	41.29	63.45	84.84	94.32	97.92	99.34	99.79	99.94	99.98	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 24. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P2W (–10,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷ 0.25	*0.25 ÷ 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*	*%*	*%*
0.0 ÷ 2.0	2.99	0.01													3.00	3.00
2.0 ÷ 3.0	14.29	0.84	0.06												15.18	18.18
3.0 ÷ 4.0	7.01	2.16	0.30												9.46	27.64
4.0 ÷ 5.0	10.91	9.17	5.70	0.04	0.00										25.82	53.46
5.0 ÷ 6.0	4.24	3.51	5.51	0.06	0.01										13.33	66.79
6.0 ÷ 7.0	4.84	6.25	8.44	0.64	0.22	0.06	0.01								20.46	87.25
7.0 ÷ 8.0	2.21	1.62	1.51	0.19	0.09	0.04									5.66	92.91
8.0 ÷ 9.0	0.81	1.59	2.15	0.15	0.06	0.06	0.02	0.01							4.85	97.76
9.0 ÷ 10.0	0.17	0.33	0.94	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01		0.00				1.53	99.29
10.0 ÷ 11.0																99.29
11.0 ÷ 12.0	0.08	0.17	0.32	0.01		0.00		0.00	0.01	0.00	0.00				0.61	99.90
12.0 ÷ 13.0																99.90
13.0 ÷ 14.0	0.03	0.02	0.04	0.00											0.10	100.00
>=14																100.00
TOT	47.58	25.67	24.95	1.12	0.40	0.18	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01				100.00	
tot cumulato	47.58	73.25	98.20	99.32	99.73	99.91	99.96	99.98	99.99	99.99	100.00					

Tabella 25. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P2W (–10,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷0.25*	*0.25 ÷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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.21														0.21
100															0.00
110															0.00
120	0.17														0.17
130	11.84	0.46	0.01												12.31
140	2.26	1.16	0.90	0.15	0.01										4.47
150	0.36	1.09	1.51	0.56	0.11	0.05	0.01								3.68
160	0.46	1.44	1.90	1.25	0.36	0.12	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00				5.60
170	0.68	1.94	2.66	1.06	0.44	0.15	0.08	0.03	0.01	0.01					7.04
180	0.76	1.84	1.80	0.63	0.22	0.18	0.08	0.04	0.02		0.00	0.01			5.57
190	1.03	2.24	2.28	1.36	0.72	0.26	0.12	0.04	0.01						8.06
200	2.63	4.96	7.05	4.07	1.69	0.68	0.22	0.04	0.01						21.36
210	7.34	6.15	2.94	0.57	0.10	0.03									17.13
220	12.00	1.04	0.25	0.01											13.30
230	1.10														1.10
240															0.00
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	40.84	22.33	21.30	9.65	3.65	1.46	0.54	0.17	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	40.84	63.17	84.46	94.12	97.77	99.23	99.76	99.93	99.98	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 26. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P3W (–10,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷0.25	*0.25 ÷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*	*%*	*%*
0.0 ÷2.0	2.87	0.01													2.88	2.88
2.0 ÷3.0	18.00	1.09	0.06												19.15	22.04
3.0 ÷4.0	3.79	1.83	0.26												5.88	27.92
4.0 ÷5.0	10.32	9.55	5.59	0.02											25.48	53.40
5.0 ÷6.0	5.75	5.42	7.71	0.28	0.01										19.18	72.58
6.0 ÷7.0	1.74	1.00	2.20	0.22	0.01										5.16	77.74
7.0 ÷8.0	3.61	5.11	6.43	0.59	0.33	0.11	0.04	0.00							16.24	93.98
8.0 ÷9.0	0.64	1.29	1.22	0.09	0.04	0.04	0.02	0.01							3.33	97.31
9.0 ÷10.0	0.36	0.43	1.07	0.03	0.04	0.03	0.01	0.01	0.00						1.97	99.28
10.0 ÷11.0																99.28
11.0 ÷12.0	0.07	0.17	0.31	0.02	0.01	0.01		0.00	0.00		0.00				0.60	99.88
12.0 ÷13.0																99.88
13.0 ÷14.0	0.04	0.02	0.04	0.01	0.00			0.00		0.00					0.12	100.00
>=14																100.00
TOT	47.19	25.92	24.90	1.25	0.45	0.19	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00				100.00	
tot cumulato	47.19	73.11	98.01	99.26	99.71	99.90	99.96	99.99	99.99	100.00	100.00					

Tabella 27. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P3W (–10,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

Dir	*Hs (m)*														*Tot.*
(° N)	*0.0 ÷ 0.25*	*0.25 ÷ 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*	
50															0.00
60															0.00
70															0.00
80															0.00
90	0.20														0.20
100															0.00
110	0.08														0.08
120	0.65														0.65
130	12.41	1.36	0.15	0.01											13.92
140	0.65	0.85	1.09	0.25	0.02	0.00									2.86
150	0.35	1.07	1.36	0.57	0.11	0.04	0.01								3.51
160	0.40	1.42	1.84	1.07	0.45	0.11	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00				5.34
170	0.68	1.90	2.64	1.05	0.46	0.15	0.08	0.03	0.01	0.01					7.00
180	0.86	2.09	1.94	0.72	0.26	0.20	0.08	0.04	0.02		0.00	0.01			6.22
190	1.43	2.76	3.68	2.53	1.16	0.48	0.15	0.04	0.01						12.23
200	4.67	7.95	7.59	3.04	0.98	0.30	0.06	0.01	0.00						24.60
210	8.69	3.07	0.72	0.06	0.00										12.54
220	10.36	0.30	0.01												10.66
230	0.19														0.19
240															0.00
250															0.00
260															0.00
270															0.00
280															0.00
290															0.00
300															0.00
Tot.	41.61	22.77	21.01	9.28	3.44	1.29	0.41	0.12	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	100.00
Tot cumul	41.61	64.38	85.39	94.68	98.12	99.40	99.81	99.94	99.98	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	

Tabella 28. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P4W (–10,0 m s.l.m.)

Ts (s)	*Hs (m)*													*Tot.*	*Tot. cumul.*
	0.0 ÷ 0.25	*0.25 ÷ 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*	*0.3 ÷ 4.0*	*4.0 ÷ 4.5*	*4.5 ÷ 5.0*	*5.0 ÷ 5.5*	*5.5 ÷ 6.0*	*> 6.0*	*%*	*%*
0.0 ÷ 2.0	3.09	0.01													3.09	3.09
2.0 ÷ 3.0	18.51	1.29	0.07												19.88	22.97
3.0 ÷ 4.0	5.35	2.78	0.35												8.48	31.45
4.0 ÷ 5.0	7.49	8.48	5.18	0.04											21.19	52.64
5.0 ÷ 6.0	5.75	4.19	6.33	0.16	0.01										16.44	69.08
6.0 ÷ 7.0	3.83	4.34	5.62	0.61	0.06	0.01									14.46	83.55
7.0 ÷ 8.0	2.10	2.92	3.58	0.34	0.28	0.06	0.01								9.30	92.85
8.0 ÷ 9.0	1.06	1.56	1.79	0.09	0.06	0.07	0.04	0.01							4.68	97.53
9.0 ÷ 10.0	0.24	0.40	1.03	0.05	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00					1.82	99.35
10.0 ÷ 11.0																99.35
11.0 ÷ 12.0	0.05	0.17	0.30	0.01	0.01	0.01	0.01		0.00	0.01			0.00		0.56	99.91
12.0 ÷ 13.0																99.91
13.0 ÷ 14.0	0.02	0.03	0.04		0.00										0.09	100.00
>=14																100.00
TOT	47.50	26.15	24.30	1.31	0.43	0.17	0.08	0.02	0.01	0.01			0.00		100.00	
tot cumulato	47.50	73.66	97.96	99.27	99.70	99.88	99.96	99.98	99.99	100.00			100.00			

Tabella 29. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P4W (–10,0 m s.l.m.)

Località: foce torrente Leira – periodo: 1 luglio 1989- 30 giugno 2004

3.7. Flusso energetico del moto ondoso

La ricostruzione del flusso energetico del moto ondoso in acqua relativamente profonda (-20 m sul l.m.m.) lungo il litorale di Voltri è utile per determinare le onde morfologiche "equivalenti" da utilizzare nelle applicazioni di morfodinamica costiera.

La ricostruzione del flusso energetico del moto ondoso poco oltre la zona di frangimento (-10 m sul l.m.m.) lungo il litorale di Voltri è utile per individuare:

- l'orientazione di equilibrio del litorale;
- la componente motrice del trasporto solido longitudinale ai fini del calcolo del trasporto solido lordo longitudinale.

Il calcolo del flusso di energia è stato eseguito con il programma di calcolo Shell. Il programma di calcolo utilizza la serie storica del moto ondoso ricostruita nel punto in cui si vuole determinare il flusso di energia.

Per ogni stato di mare viene determinato il valore del flusso energetico del moto ondoso:

$F=1/8\ \rho g H^2 nC.$ (12)

Per ogni classe di altezza *i* (passo di discretizzazione utilizzato di 0,5m) e direzione *j* (passo di discretizzazione utilizzato di 10°) viene determinato il valore del lavoro medio annuo compiuto dal moto ondoso per unità di fronte d'onda:

$$L_{mij} = \Sigma F_{ij} \Delta t/N \text{ essendo:} \quad (13)$$

- F_{ij} il flusso di energia del singolo evento di classe (*i,j);*
- Δt la durata del singolo evento di classe (*i,j);*
- N il numero degli anni della registrazione.

Nel calcolo in genere (ed anche in questo caso) sono esclusi gli eventi caratterizzati da un'altezza significativa inferiore ai 50 cm, in quanto dal punto di vista energetico si possono ritenere trascurabili.

Per ogni direzione di provenienza j viene determinato il valore del lavoro medio L_{mj} compiuto dal moto ondoso per unità di fronte d'onda ed il flusso energetico medio annuo del moto ondoso:

$$F_{mj} = L_{mj}/\Sigma\Delta t/N, \quad (14)$$

dove $\Sigma\Delta t/N$ è la durata media annua di eventi di moto ondoso che ricadono nel settore *j* (di 10°).

3.7.1. Flusso energetico del moto ondoso in acque relativamente profonde

Per il flusso di energia alla profondità di -20 m sul l.m.m. in corrispondenza della foce del Torrente Leira si è fatto riferimento alla serie storica di moto ondoso ricostruita nel punto P0 (vedi Figura 39). I risultati del calcolo della potenza del moto ondoso nel punto P0 sono sintetizzati in Figura 54 e in colonna 14 della Tabella 30 . Dall'esame della Figura 54 appare che le onde con potenza maggiore di 5,0 kW/m provengono dal settore compreso tra 180°N e 210°N, ma sono poco frequenti per la direzione di 180°N. Anche le onde che provengono dal settore tra 140°N e 180° N hanno una potenza superiore a 3,0 kW/m, ma sono ma sono poco frequenti per la direzione di 140°N.

I risultati del calcolo del lavoro medio annuale compiuto dal moto ondoso nel punto P0 sono sintetizzati in Figura 55 e in colonna 13 dellaTabella 30. In Figura 39 è riportato sulla aerofoto del 2012 dell'Atlante Cartografico Italiano 1:10.000 il vettore risultante del flusso energetico del punto P0.

Il flusso energetico del moto ondoso alla profondità di -20 m sul l.m.m. a Voltri ha una caratteristica bimodale asimmetrica. Si distinguono due settori, uno più intenso con direzione di provenienza tra 190°N e 210°N (III quadrante) e l'altro meno intenso con direzione di provenienza tra 150°N e 170°N (II quadrante). Considerando che la costa in corrispondenza del litorale di Voltri ha mediamente una normale alla linea di riva secondo la direzione di circa 187,2°N, i due settori di provenienza del flusso energetico del moto ondoso rispetto a tale direzione determinano una componente del vettore flusso di energia del moto ondoso diretta una verso ovest e l'altra verso est.

Nel punto P0 in acqua relativamente profonda la direzione media risultante del vettore flusso di energia del moto ondoso risulta diretta secondo la direzione di 189,2°N

(Lmj=12,6 MWora/anno).

3.7.2. Onde morfologiche equivalenti

Sulla base della ricostruzione del clima e del flusso energetico del moto ondoso alla profondità di circa -20 m s.l.m. sono state determinate per ogni classe di direzione di provenienza (passo di discretizzazione di 10°) le onde morfologiche equivalenti utili per le applicazioni di morfodinamica costiera.

Si è riconosciuto infatti che per valutazioni di morfodinamica costiera di carattere generale ed anche per l'applicazione di alcuni modelli è possibile sintetizzare i dati annuali del moto ondoso dei singoli settori di provenienza con un numero limitato di eventi (onde morfologiche equivalenti) che a lungo termine producono gli stessi effetti.

Tali onde possono essere determinate mediante le espressioni:

$$t_e = \sum_{i=1}^{n} \cdot t_i \qquad (15)$$

$$\beta\ H_{es}^{5} = P_m^{2}\ R_m \qquad (16)$$

$$\alpha\ T_{ep} = P_m / H_{es}^{2} \qquad (17)$$

con:

$$A = g \tanh(k_e\, d) / 2\pi \qquad (18)$$

$$\alpha = 1/8\ \rho_w\ g\ n_e\ A \qquad (19)$$

$$\beta = \alpha^2/A = (1/8\ \rho_w\ g\ n_e)^2\ A \qquad (20)$$

$$n_e = [1+2k_e\, d/\mathrm{senh}(2k_e\, d)] \qquad (21)$$

essendo:

- t_e la durata dell'onda morfologica equivalente;
- t_i la durata dell'onda iesima provenienti dal settore;
- H_{es} è l'altezza significativa dell'onda morfologica equivalente del settore;
- P_m, il valore medio annuo del flusso energetico del moto ondoso del settore per unità di fronte d'onda;
- $R_m = 1/N\ (\Sigma_N\ H_{is}/L_i)$ la ripidità media di tutte le N onde iesime provenienti dal settore;

L_i, la lunghezza d'onda dell'onda iesima proveniente dal settore;

ρ_w, la massa specifica dell'acqua;

g, l'accelerazione di gravità.

Il calcolo delle onde morfologiche equivalenti è stato condotto per il punto P0 posto in acque relativamente profonde al largo della foce del torrente Leira.

Nel calcolo si sono esclusi gli eventi caratterizzati da un'altezza significativa inferiore ai 50 cm, in quanto dal punto di vista energetico e quindi della capacità di modellazione della spiaggia si possono ritenere trascurabili.

Le onde morfologiche equivalenti per il punto P0 per i diversi periodi considerati sono riportate in Tabella 31.

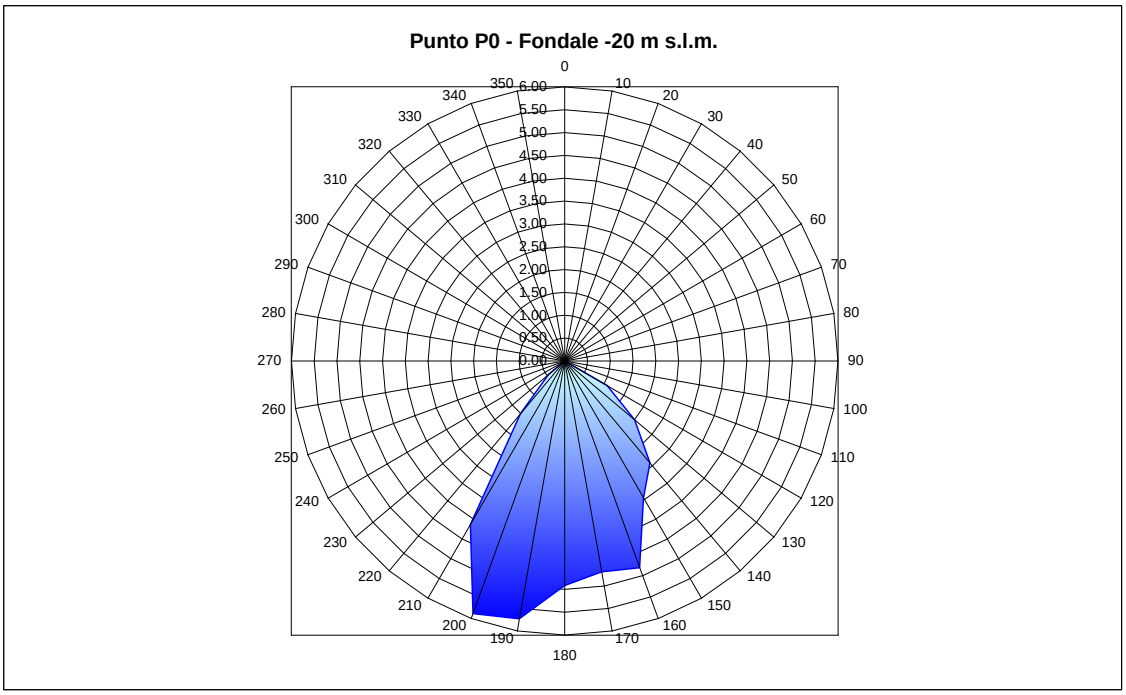


Figura 54. Punto P0 (–20,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) a Voltri

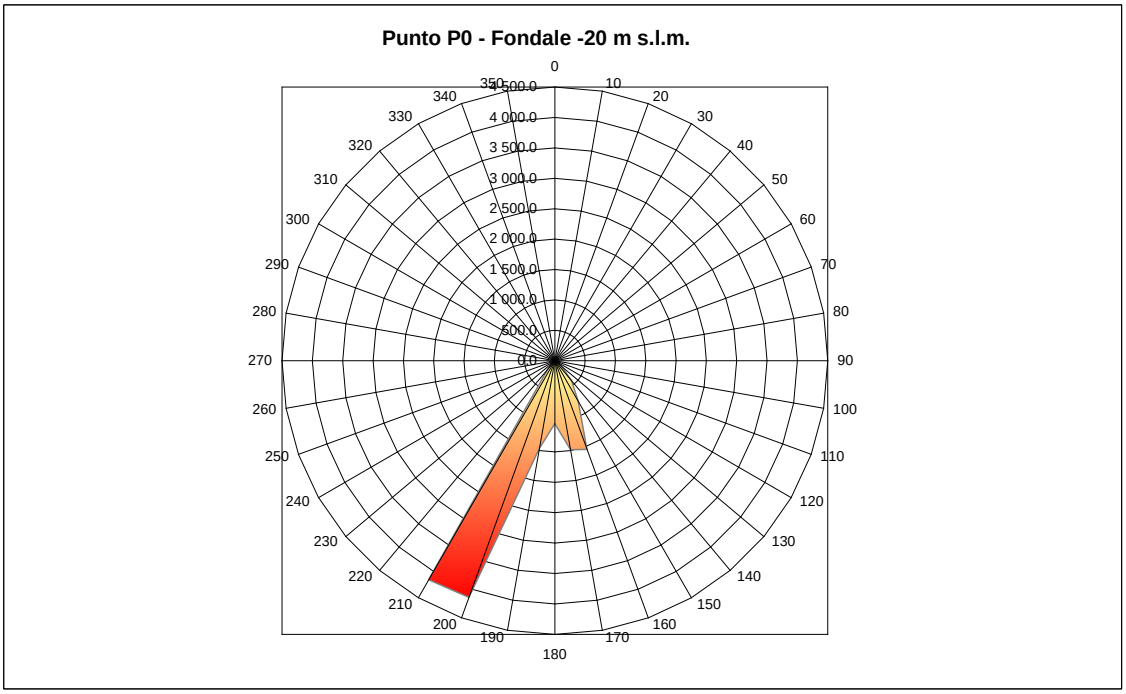


Figura 55. Punto P0 (–20,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) a Voltri

Dati al largo di trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

L_{mij}	Hs (m)											Lmj (Hs>0,5)	Pmj (Hs>0,5)	eventi
(kWh/m)	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	2.0 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.5	3.0 ÷ 4.0	4.0 ÷ 4.5	4.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 5.5	≥ 5.5	kWh/m	kW/m	n.
110												0.0	0.00	0
120	6.4	18.5	1.8									26.7	1.08	109
130	17.5	83.8	34.3	10.7								146.2	2.00	322
140	30.5	194.4	85.0	67.5	48.9							426.2	2.91	645
150	40.3	339.1	182.4	105.7	21.0	42.4	21.1	15.3				767.4	3.46	977
160	57.8	551.2	459.9	228.5	118.0	47.1	41.2	32.4	17.3			1 553.6	4.81	1423
170	73.3	432.4	377.8	288.3	166.5	103.5	20.2	24.4				1 486.4	4.69	1398
180	55.4	242.2	184.3	258.3	128.2	114.3	8.8		12.6	32.3		1 036.4	4.92	929
190	56.2	434.6	306.3	260.3	176.9	130.4	80.2			24.5		1 469.3	5.73	1131
200	127.5	1 383.1	1 275.0	818.6	413.4	96.2	28.6					4 142.4	5.88	3104
210	208.3	1 499.1	1 229.8	785.7	329.2	80.5	28.3					4 160.9	4.13	4440
220	23.4	102.2	38.0	2.8								166.3	1.50	488
230	3.4	5.2										8.6	0.46	82
240												0.0	0.00	0
Tot.	699.9	5 285.7	4 174.6	2 826.4	1 402.2	614.4	228.4	72.1	29.9	56.9	0.0	15 390.4	41.58	15048

Tabella 30. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

a	H_e	T_e	*durata*
(°N)	*(m)*	*(s)*	*mesi*
120.00	0.90	6.64	0.030
130.00	1.20	6.93	0.088
140.00	1.43	7.04	0.177
150.00	1.50	7.66	0.267
160.00	1.63	9.03	0.390
170.00	1.59	9.25	0.383
180.00	1.61	9.43	0.254
190.00	1.68	10.11	0.310
200.00	1.67	10.42	0.850
210.00	1.51	8.99	1.216
220.00	1.08	6.35	0.134
230.00	0.72	4.45	0.022

Tabella 31. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Onde morfologiche equivalenti

Periodo 01/07/1989-30/06/2004

3.7.3. Flusso energetico del moto ondoso poco oltre la zona di frangimento

Per il flusso di energia alla profondità di -10 m sul l.m.m. lungo il litorale di Voltri si è fatto riferimento alla serie storica di moto ondoso ricostruita nei punti P4E, P3E, P2E, P1, P2W, P3W e P4W (vedi Figura 39). I risultati del calcolo della potenza del moto ondoso nei 7 punti sopra indicati sono sintetizzati nella Figura 56 ÷ Figura 62 e in colonna 14 della Tabella 32 ÷ Tabella 38. I risultati del calcolo del lavoro medio annuale compiuto dal moto ondoso nei 7 punti sopra indicati sono sintetizzati nella Figura 63 ÷ Figura 69 e in colonna 13 della Tabella 32 ÷Tabella 38. In Figura 39 è riportato sulla aerofoto del 2012 dell'Atlante Cartografico Italiano 1:10.000 il vettore risultante del flusso energetico nei 7 punti scelti lungo l'isobata -10 m sul l.m.m..

Dall'esame della Figura 39 si evince che la direzione media risultante del vettore flusso di energia del moto ondoso lungo il litorale di Voltri subisce una rotazione in senso antiorario andando da est verso ovest di circa 12° presentandosi normale alla linea di riva lungo il litorale nella configurazione attuale.

Alla profondità di -10 m sul l.m.m. lungo il litorale di Voltri si distingue comunque una componete del flusso energetico del moto ondoso diretta verso est (campo rosso della Figura 39) ed una diretta verso ovest (campo blu della Figura 39).

Il valore del lavoro medio annuale compiuto dal moto ondoso risulta decrescente da ovest verso est per effetto del riparo offerto dalle opere portuali di Sestri passando dal valore di L_{mj}=10,53 MWora/anno nel punto P3W al valore di L_{mj}=9,23 MWora/anno nel punto P4E.

Il valore del lavoro medio annuale compiuto dal moto ondoso alla foce del torrente Cerusa punto P4W risulta ridotto al valore di L_{mj}=9,61 MWora/anno per effetto dell'orientamento della piattaforma continentale e quindi del fondale.

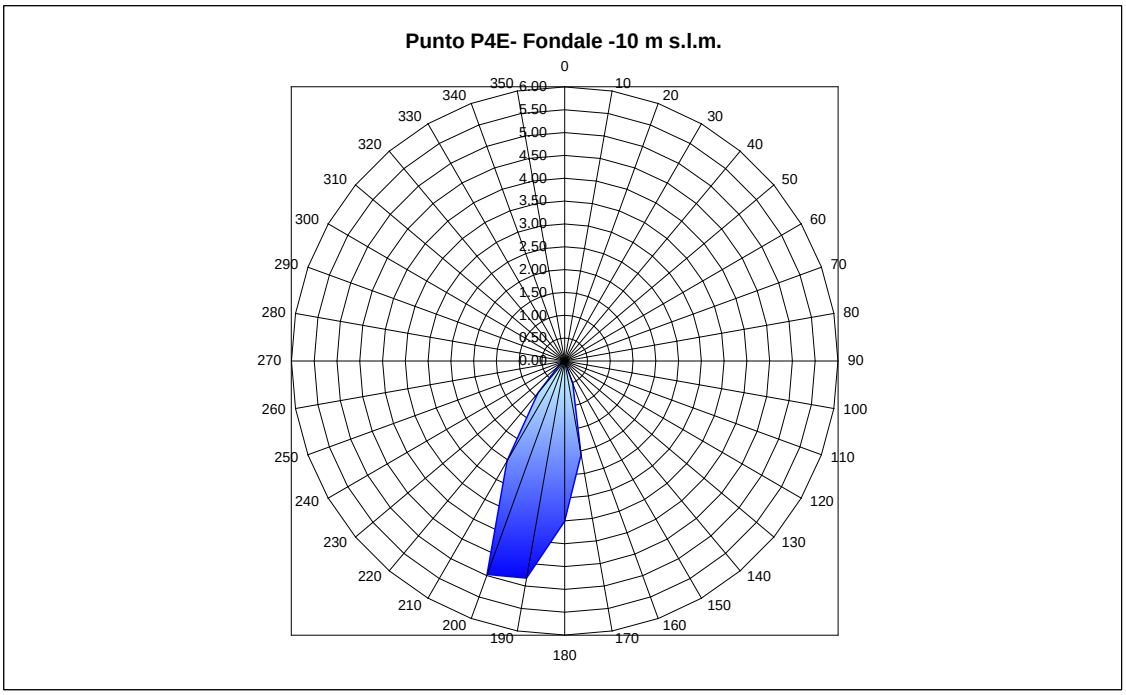


Figura 56. Punto P4E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)

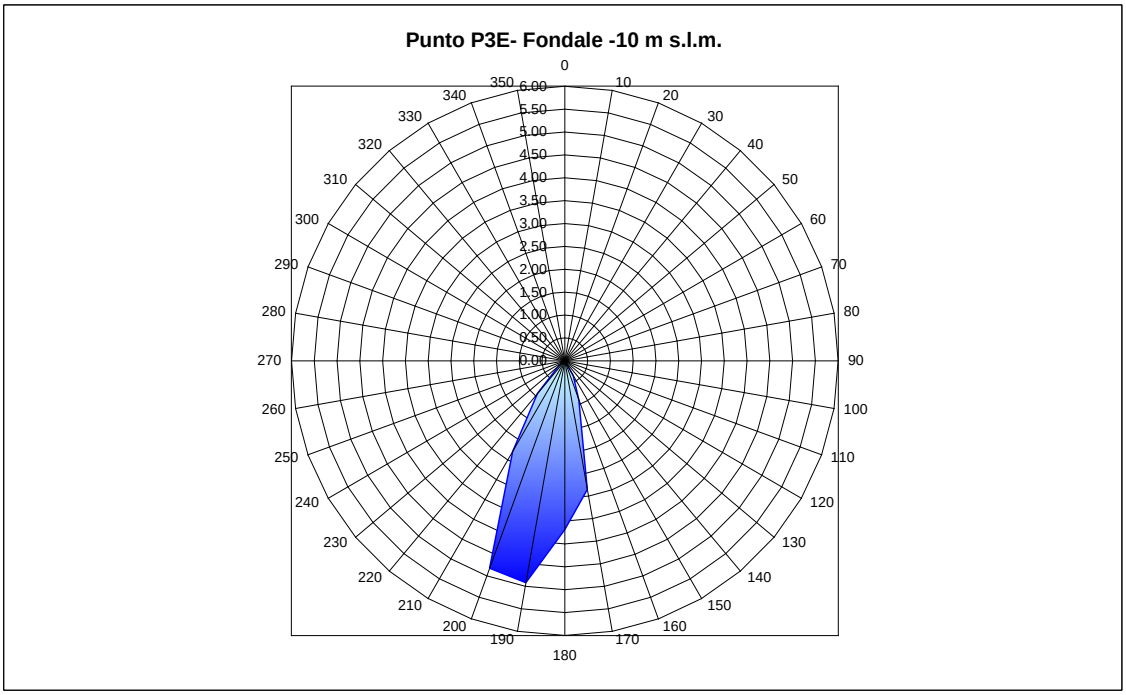


Figura 57. Punto P3E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)

Dati al largo di trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

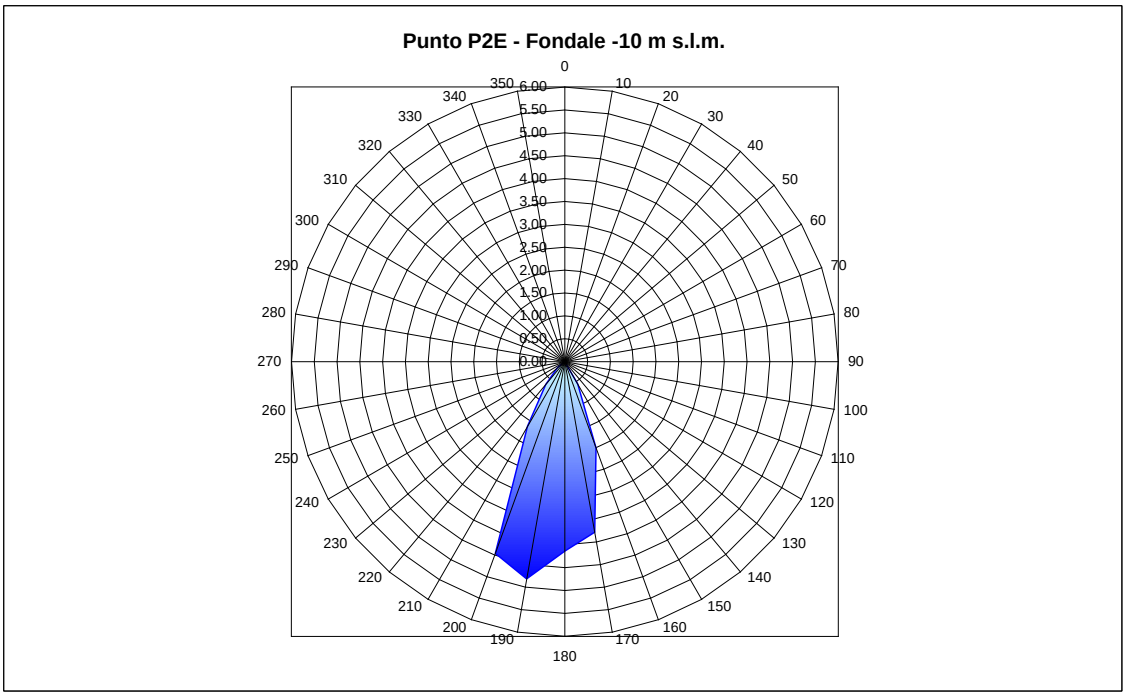


Figura 58. Punto P2E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)

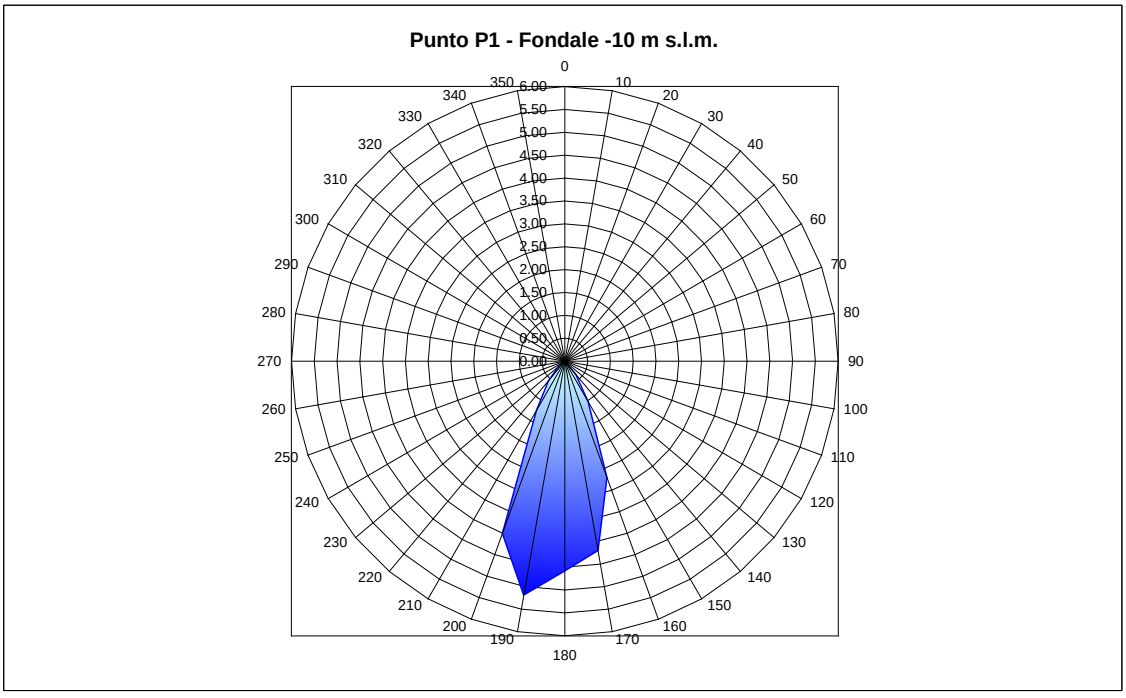


Figura 59. Punto P1 (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)

Dati al largo di trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

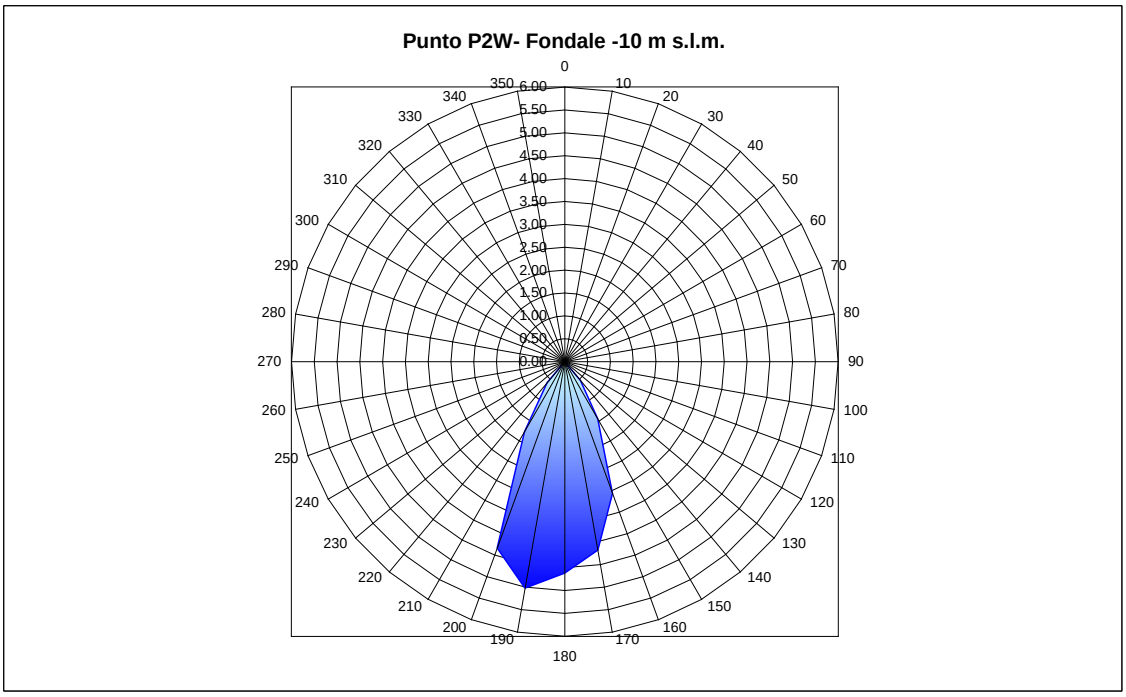


Figura 60. Punto P2W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)

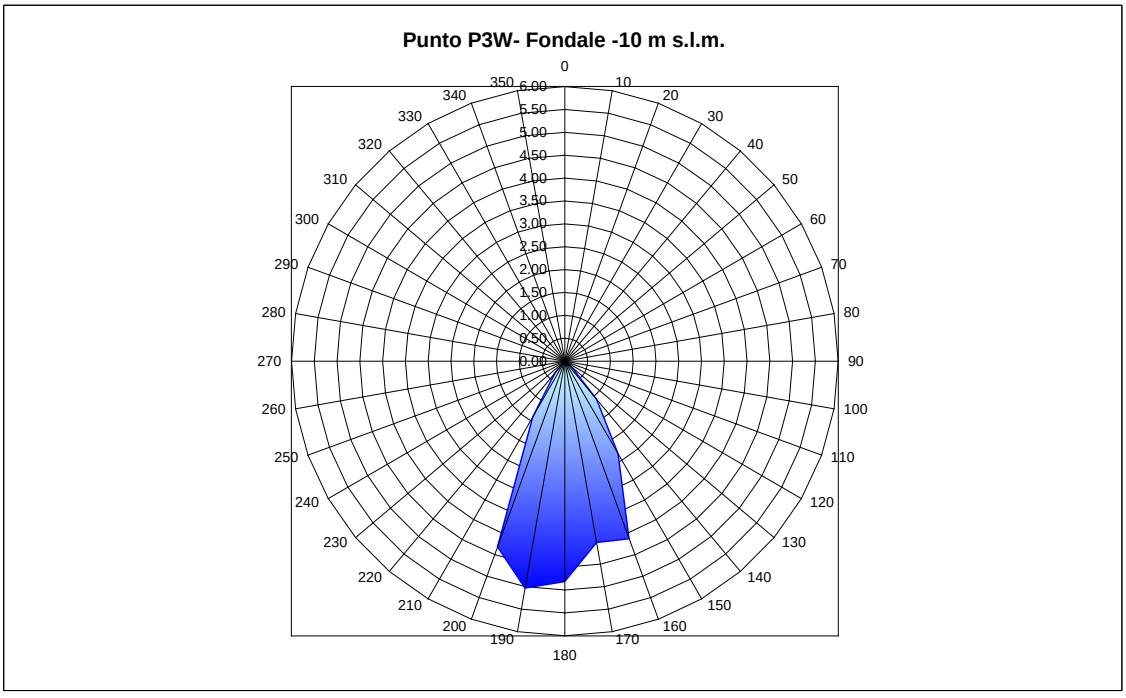


Figura 61. Punto P3W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)

Dati al largo di trasposizione (periodo 01/07/1989-30/06/2004) - numero osservazioni utili 38.636

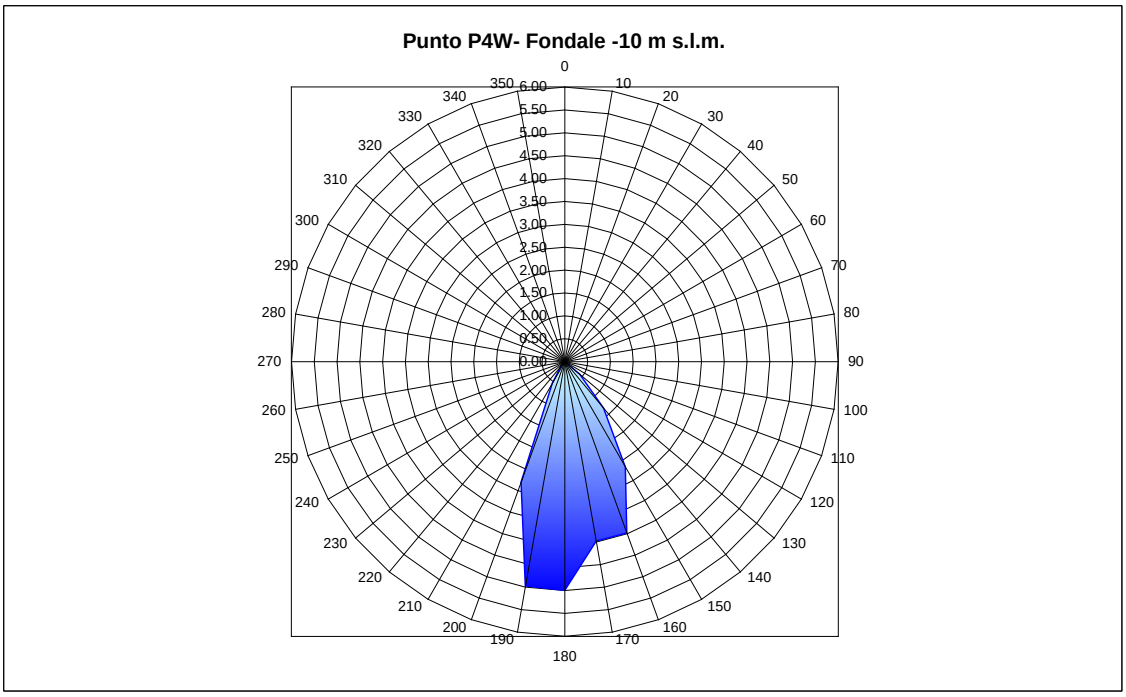


Figura 62. Punto P4W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)

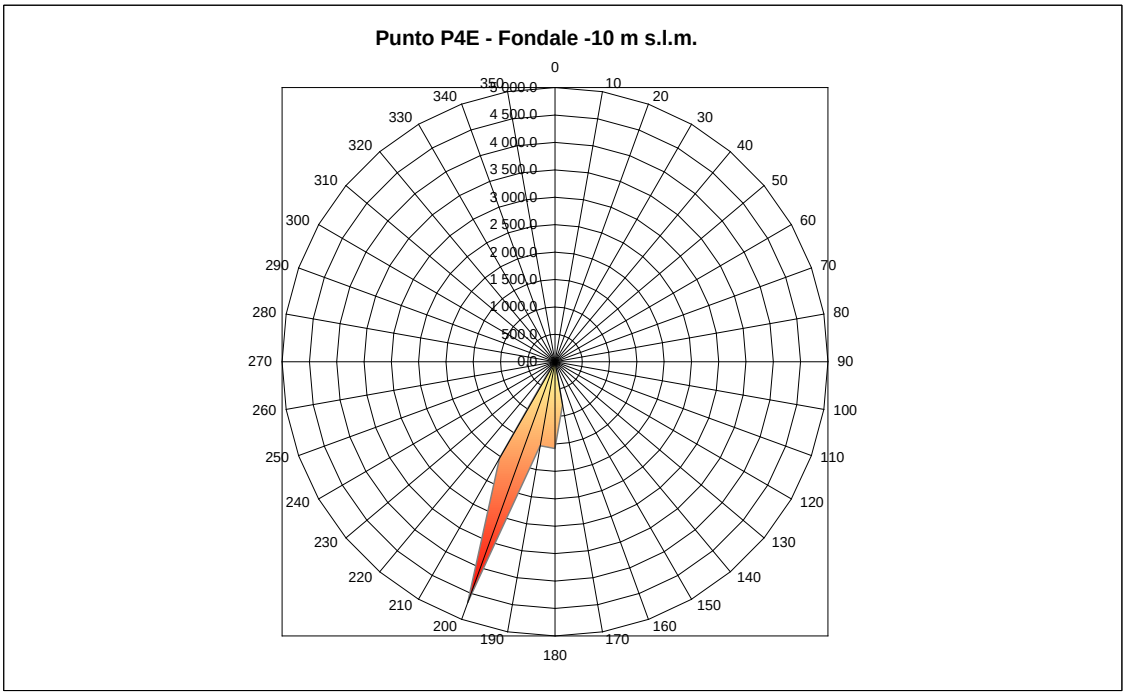


Figura 63. Punto P4E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m)

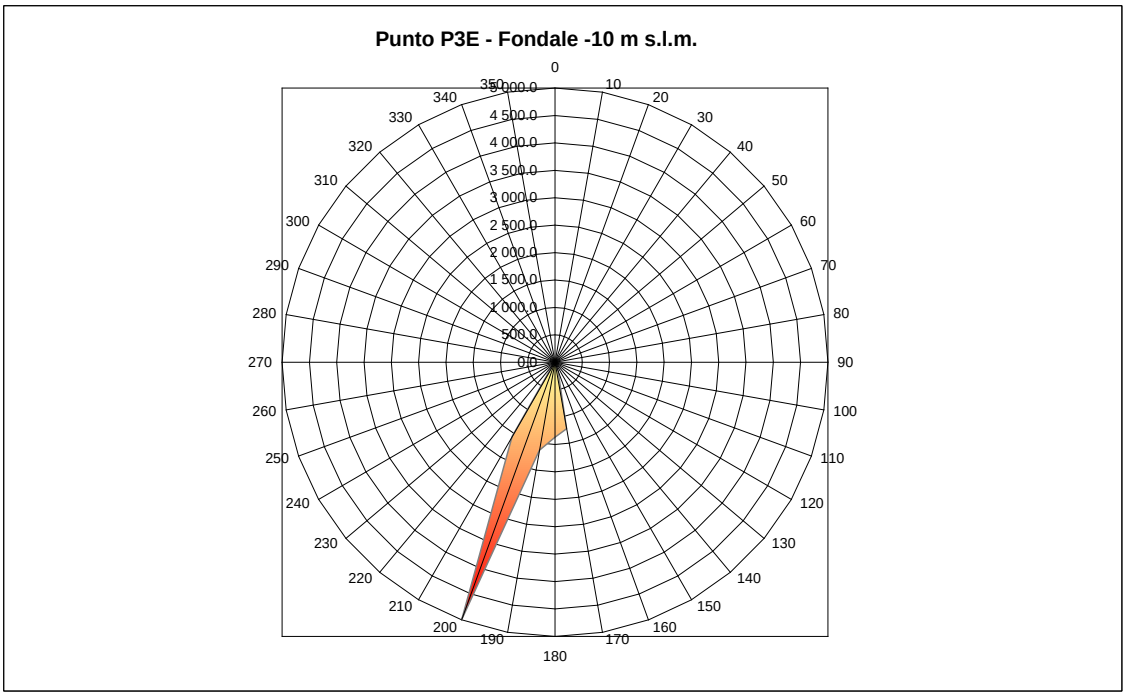


Figura 64. Punto P3E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m)

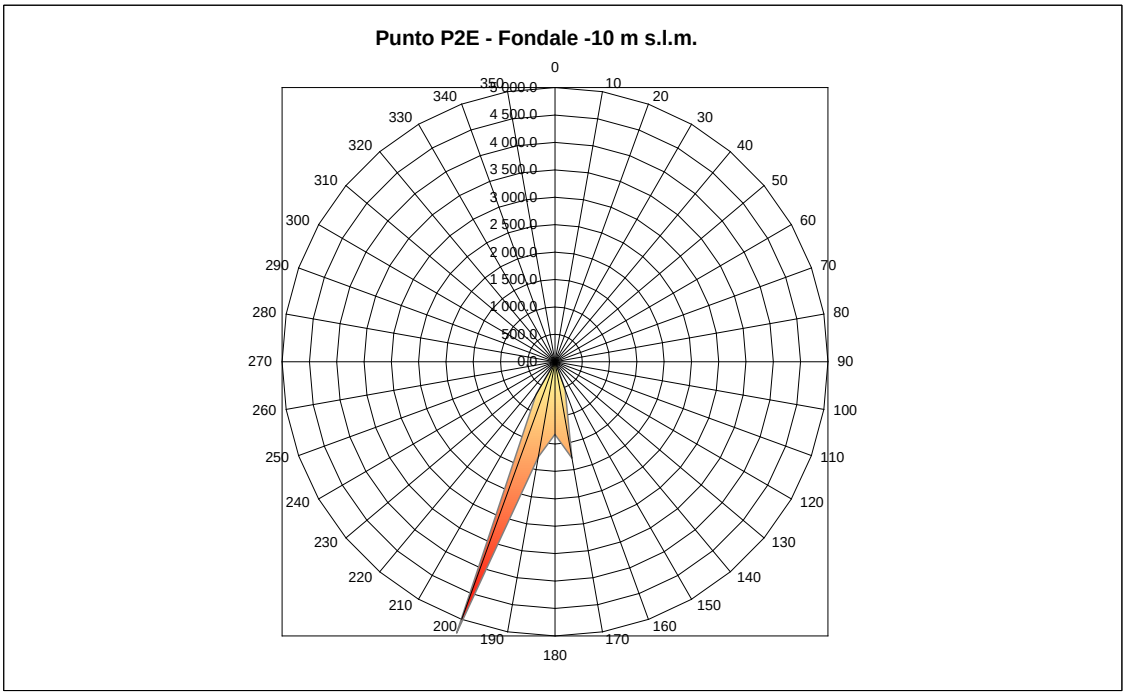


Figura 65. Punto P2E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m)

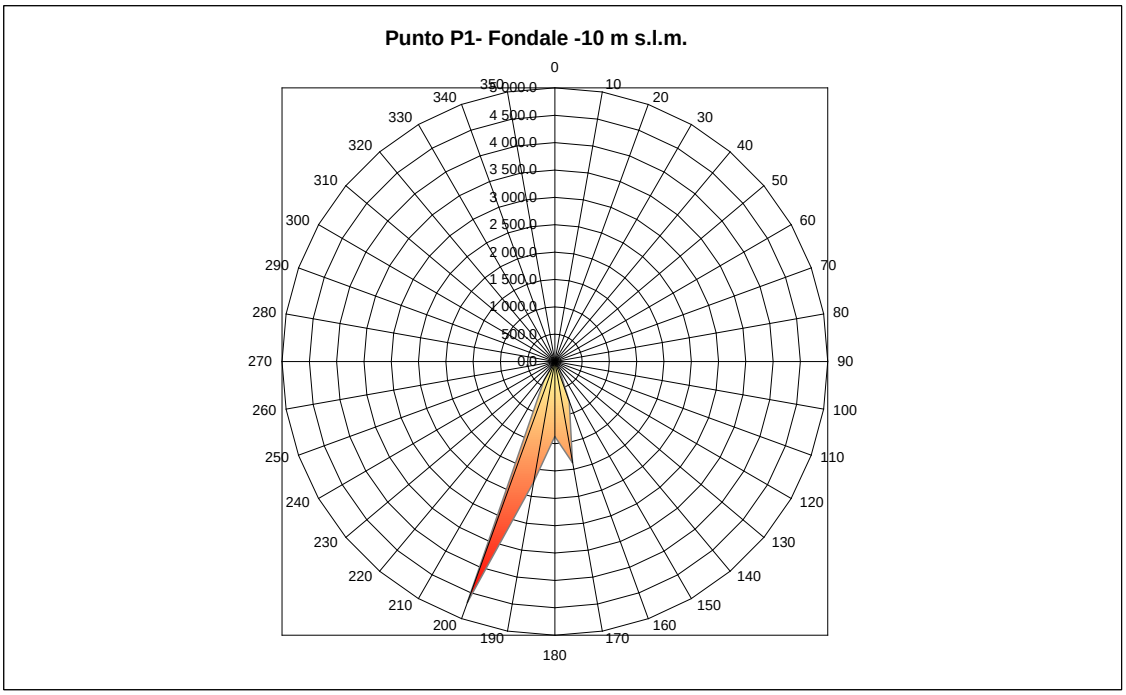


Figura 66. Punto P1 (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m

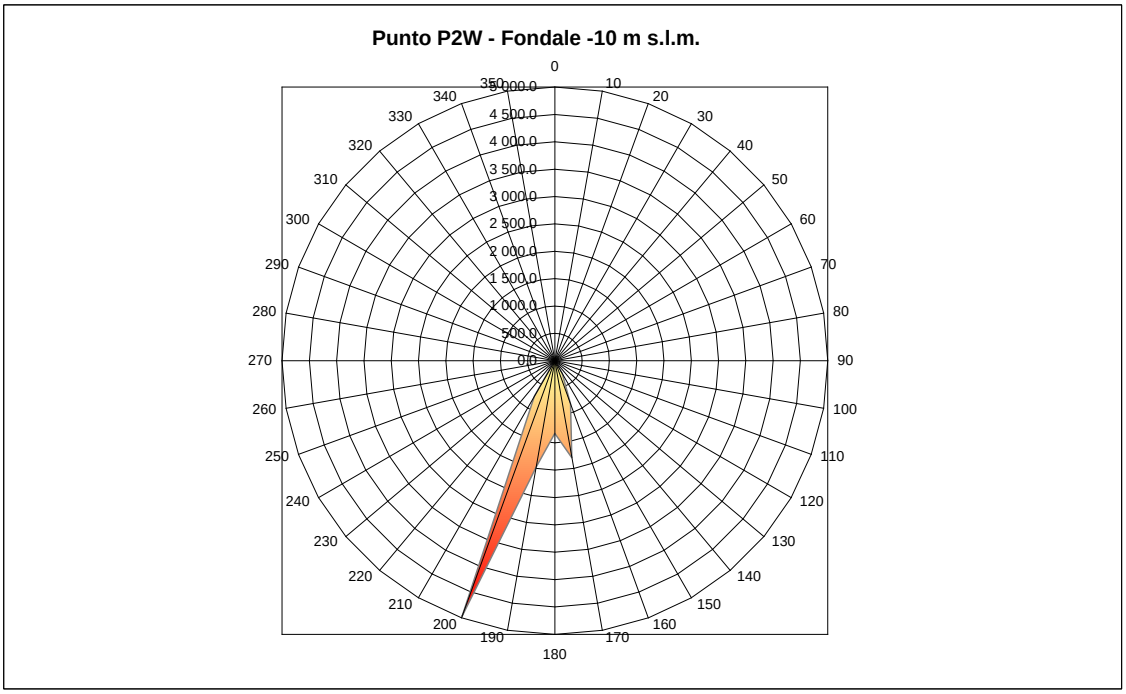


Figura 67. Punto P2W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m)

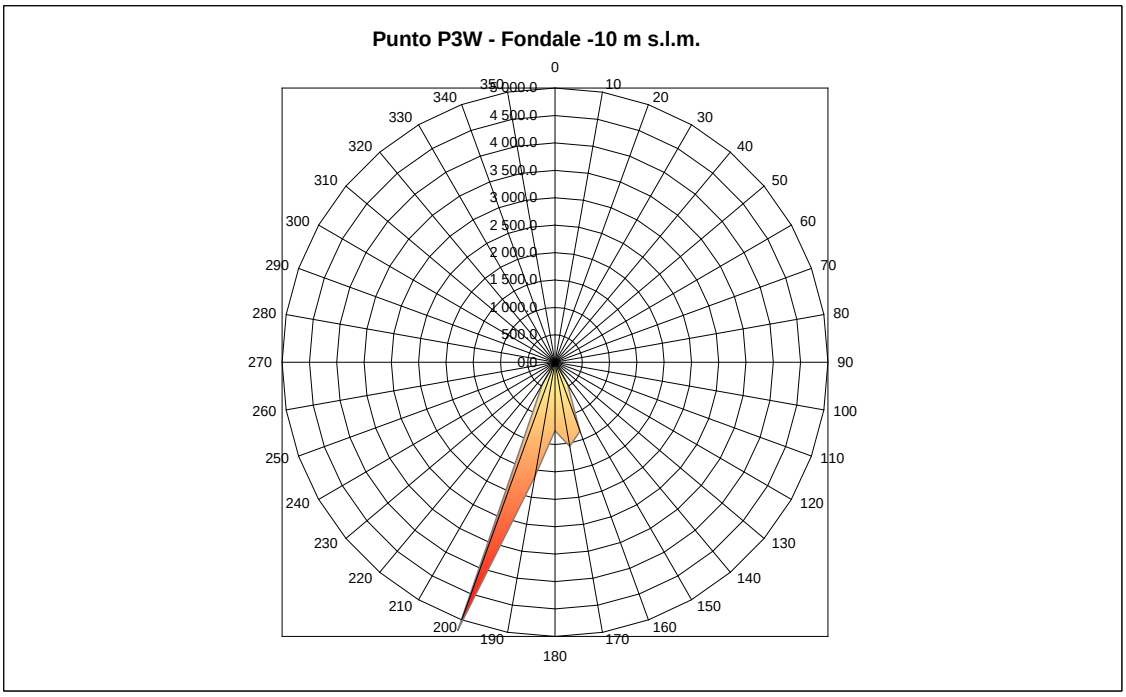


Figura 68. Punto P3W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m)

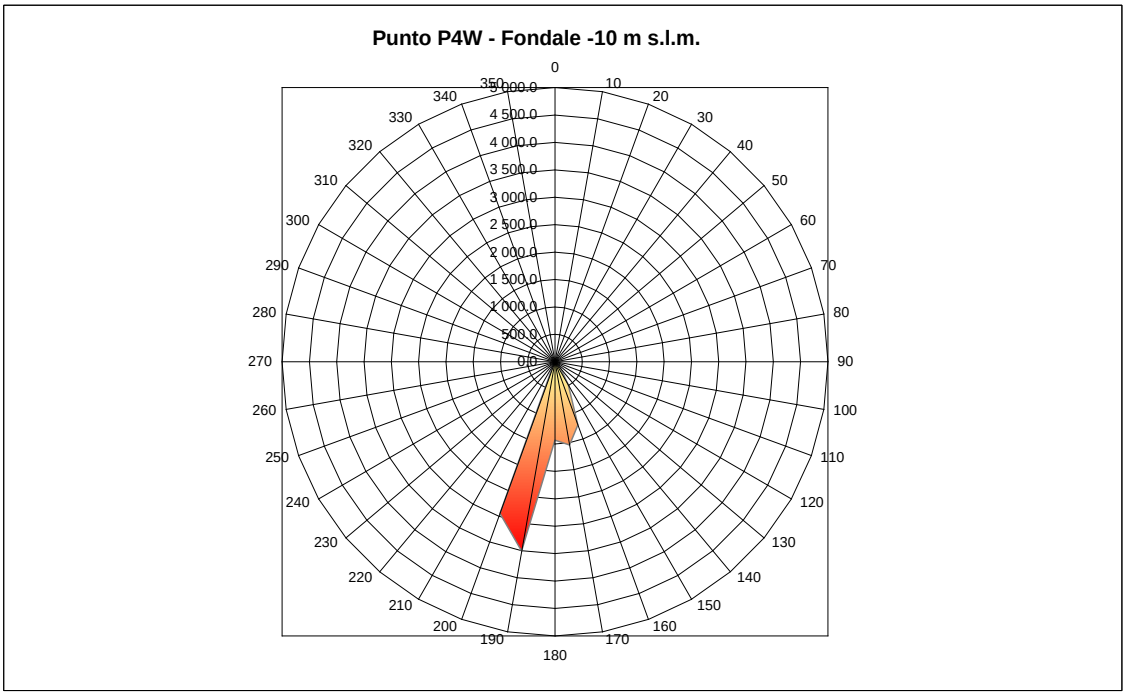


Figura 69. Punto P4W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m)

L_{mij}	Hs (m)											Lmj (Hs>0,5)	Pmj (Hs>0,5)	eventi
(kWh/m)	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	2.0 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.5	3.0 ÷ 4.0	4.0 ÷ 4.5	4.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 5.5	≥ 5.5	kWh/m	kW/m	n.
110												0.0	0.00	0
120												0.0	0.00	0
130												0.0	0.00	0
140												0.0	0.00	0
150												0.0	0.00	0
160	24.9	20.9										45.7	0.53	380
170	106.7	436.1	189.1	53.9	10.3	8.1	4.1					808.3	2.09	1701
180	123.0	496.4	424.6	252.5	134.2	98.4	23.7	32.4				1 585.3	3.51	1983
190	87.4	384.5	289.0	306.0	218.3	135.8	62.2		19.8	53.7		1 556.6	4.83	1417
200	206.7	1 570.4	1 393.8	921.5	407.3	137.9	34.7					4 672.3	4.97	4129
210	204.7	876.4	590.4	251.2	88.2	16.6						2 027.6	2.52	3530
220	12.8	31.9	5.2									49.9	0.91	242
230	0.3											0.3	0.18	8
240												0.0	0.00	0
Tot.	766.5	3 816.6	2 892.0	1 785.1	858.4	396.9	124.7	32.4	19.8	53.7	0.0	10 746.1	19.53	13390

Tabella 32. Punto P4E (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

L_{mij}	Hs (m)											Lmj (Hs>0,5)	Pmj (Hs>0,5)	eventi
(kWh/m)	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	2.0 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.5	3.0 ÷ 4.0	4.0 ÷ 4.5	4.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 5.5	≥ 5.5	kWh/m	kW/m	n.
110												0.0	0.00	0
120												0.0	0.00	0
130												0.0	0.00	0
140												0.0	0.00	0
150	1.1											1.1	0.37	13
160	54.8	85.0	29.5	3.9								173.2	0.91	840
170	109.0	584.6	339.8	95.7	50.5	13.9	26.2	14.3				1 234.0	2.86	1898
180	109.7	338.4	363.7	236.1	166.7	118.6	20.3	17.1				1 370.6	3.69	1632
190	87.5	423.0	317.3	360.7	189.4	130.4	74.4		14.0	34.2		1 630.9	4.92	1456
200	230.3	1 684.9	1 481.2	981.6	422.2	139.3	61.6					5 001.1	4.82	4557
210	179.6	688.7	430.6	212.1	49.5	2.5						1 563.0	2.28	3010
220	8.6	26.5	3.1									38.2	0.93	181
230	0.3											0.3	0.17	7
240												0.0	0.00	0
Tot.	780.9	3 831.2	2 965.2	1 890.1	878.3	404.7	182.5	31.4	14.0	34.2	0.0	11 012.5	20.95	13594

Tabella 33. Punto P3E (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

Periodo 01/07/1989-30/06/2004

L_{mij}	Hs (m)											Lmj (Hs>0,5)	Pmj (Hs>0,5)	eventi
(kWh/m)	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	2.0 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.5	3.0 ÷ 4.0	4.0 ÷ 4.5	4.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 5.5	≥ 5.5	kWh/m	kW/m	n.
110												0.0	0.00	0
120												0.0	0.00	0
130												0.0	0.00	0
140												0.0	0.00	0
150	24.8	17.9	1.3									44.1	0.56	344
160	71.7	268.5	121.6	47.4		21.9	11.7					542.9	2.01	1192
170	119.1	642.5	519.4	198.9	155.5	79.0	49.9	24.7				1 789.1	3.78	2084
180	97.5	297.6	263.8	271.4	170.2	141.9	22.1		21.9	41.1		1 327.5	4.14	1413
190	91.5	515.9	468.3	301.2	238.0	87.3	65.9					1 768.2	4.82	1617
200	269.6	1 864.3	1 551.6	1 002.4	379.4	149.2	52.9					5 269.3	4.46	5208
210	112.1	334.3	158.6	65.8	11.6							682.4	1.63	1848
220	6.1	11.9										18.1	0.65	123
230	0.1											0.1	0.20	2
240												0.0	0.00	0
Tot.	792.7	3 953.0	3 084.5	1 887.1	954.8	479.3	202.5	24.7	21.9	41.1	0.0	11 441.6	22.24	13831

Tabella 34. Punto P2E (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

L_{mij}	Hs (m)											Lmj (Hs>0,5)	Pmj (Hs>0,5)	eventi
(kWh/m)	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	2.0 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.5	3.0 ÷ 4.0	4.0 ÷ 4.5	4.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 5.5	≥ 5.5	kWh/m	kW/m	n.
110												0.0	0.00	0
120												0.0	0.00	0
130												0.0	0.00	0
140	1.4											1.4	0.37	17
150	45.1	96.7	21.1	1.9								164.7	1.02	710
160	70.7	378.3	202.4	82.1	6.7	24.6	10.5					775.5	2.71	1260
170	101.8	621.0	495.6	280.8	217.2	91.6	29.0	42.7				1 879.7	4.20	1968
180	85.6	293.6	222.1	298.3	178.7	136.5	72.4		22.1	62.4		1 371.7	4.58	1317
190	103.1	613.8	641.9	413.7	300.1	105.3	64.4					2 242.3	5.19	1901
200	274.6	1 833.6	1 419.1	857.9	235.3	53.8	14.5					4 688.8	4.00	5157
210	81.6	215.5	66.4	19.3								382.8	1.23	1364
220	5.1	7.6										12.7	0.55	101
230	0.1											0.1	0.17	2
240												0.0	0.00	0
Tot.	769.1	4 060.2	3 068.6	1 954.1	937.9	411.7	190.9	42.7	22.1	62.4	0.0	11 519.8	24.03	13797

Tabella 35. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

Periodo 01/07/1989-30/06/2004

L_{mij}	Hs (m)											Lmj (Hs>0,5)	Pmj (Hs>0,5)	eventi
(kWh/m)	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	2.0 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.5	3.0 ÷ 4.0	4.0 ÷ 4.5	4.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 5.5	≥ 5.5	kWh/m	kW/m	n.
110												0.0	0.00	0
120												0.0	0.00	0
130												0.0	0.00	0
140	11.9	6.8										18.7	0.54	153
150	48.2	149.7	53.7	17.9								269.5	1.44	822
160	62.2	418.0	221.2	81.6	25.6	20.9	11.9					841.5	3.06	1209
170	102.9	585.2	466.2	272.3	192.8	69.9	57.8	52.7				1 799.9	4.18	1895
180	82.2	294.5	234.0	291.2	168.5	152.0	45.8		6.9	56.2		1 331.4	4.62	1268
190	96.2	561.1	546.8	351.8	243.2	142.0	42.6					1 983.7	5.02	1737
200	255.2	1 785.9	1 452.8	992.9	370.0	88.8	24.0					4 969.4	4.33	5046
210	112.9	373.4	176.4	77.5	6.0							746.2	1.76	1862
220	5.3	8.7										14.0	0.60	102
230												0.0	0.00	0
240												0.0	0.00	0
Tot.	776.9	4 183.4	3 151.1	2 085.3	1 006.1	473.6	182.1	52.7	6.9	56.2	0.0	11 974.3	25.56	14094

Tabella 36. Punto P2W (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

L_{mij}	Hs (m)											Lmj (Hs>0,5)	Pmj (Hs>0,5)	eventi
(kWh/m)	0.5 ÷ 1.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	2.0 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.5	3.0 ÷ 4.0	4.0 ÷ 4.5	4.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 5.5	≥ 5.5	kWh/m	kW/m	n.
110												0.0	0.00	0
120												0.0	0.00	0
130	0.1											0.1	0.19	3
140	28.5	61.2	10.5									100.2	1.08	407
150	45.0	233.8	98.2	71.0	10.1							458.2	2.34	862
160	68.9	551.4	330.5	166.7	88.7	62.9	36.0	15.8	18.1			1 339.1	4.13	1428
170	99.6	465.8	384.3	258.4	183.0	111.4	27.2	29.8				1 559.6	4.02	1708
180	72.1	275.9	215.9	261.2	171.4	114.6	83.0		18.9	39.0		1 251.9	4.81	1145
190	97.0	614.6	625.3	358.6	258.6	110.8	47.5					2 112.3	5.03	1847
200	276.4	1 824.3	1 496.1	965.6	475.3	141.3	28.5					5 207.4	4.32	5312
210	86.0	224.6	87.6	46.9								445.2	1.40	1404
220	4.9	2.6										7.4	0.33	99
230												0.0	0.00	0
240												0.0	0.00	0
Tot.	778.4	4 254.3	3 248.3	2 128.6	1 187.1	541.1	222.1	45.6	37.0	39.0	0.0	12 481.4	27.65	14215

Tabella 37. Punto P3W (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

Periodo 01/07/1989-30/06/2004

L_{mij}	*Hs (m)*											*Lmj (Hs>0,5)*	*Pmj (Hs>0,5)*	*eventi*
(kWh/m)	*0.5 ÷1.0*	*1.0 ÷1.5*	*1.5 ÷2.0*	*2.0 ÷2.5*	*2.5 ÷3.0*	*3.0 ÷3.5*	*3.0 ÷4.0*	*4.0 ÷4.5*	*4.5 ÷5.0*	*5.0 ÷5.5*	*≥ 5.5*	*kWh/m*	*kW/m*	*n.*
110												0.0	0.00	0
120												0.0	0.00	0
130	4.0	1.8										5.8	0.43	59
140	34.0	100.4	18.7	4.4								157.6	1.32	525
150	41.6	248.2	100.3	75.1	20.9							486.1	2.65	806
160	67.9	448.2	382.6	163.6	85.7	40.5	18.7	5.5	16.8			1 229.5	3.98	1359
170	99.8	481.0	425.4	206.7	168.9	96.9	32.7	32.7				1 544.1	3.98	1707
180	78.6	317.4	254.0	302.0	183.8	128.5	82.2		23.6	62.4		1 432.6	5.00	1262
190	162.1	1 114.9	1 009.3	750.9	335.5	97.4	37.7					3 507.7	4.98	3101
200	271.5	1 287.1	823.7	417.5	120.8	19.2	3.8					2 943.7	2.80	4620
210	16.2	19.3	1.6									37.1	0.55	299
220	0.1											0.1	0.12	3
230												0.0	0.00	0
240												0.0	0.00	0
Tot.	775.8	4 018.5	3 015.6	1 920.2	915.6	382.5	175.1	38.2	40.4	62.4	0.0	11 344.3	25.81	13741

Tabella 38. Punto P4W (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri

Periodo 01/07/1989-30/06/2004

4. VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

Nel contesto ligure, non risultando la costa soggetta a fenomeni di subsidenza e potendosi trascurare, dati i lunghissimi periodi coinvolti, eventuali fenomeni di eustatismo, le variazioni di livello della superficie marina sono essenzialmente riconducibili alla propagazione di onde lunghe di marea di origine sia astronomica che meteorologica.

Come noto, la marea si manifesta come ritmico innalzarsi ed abbassarsi del livello marino cui si accompagnano spostamenti orizzontali della massa marina noti come correnti di marea. Entrambi gli spostamenti, verticale ed orizzontale, rappresentano aspetti differenti dello stesso fenomeno. Se da una parte la perpetuità e la regolarità del loro manifestarsi testimonia la costante presenza delle forze che causano e governano il fenomeno, dall'altra il fatto che, lungo tutte le coste oceaniche e dei mari adiacenti, tali spostamenti siano della stessa natura, anche se differenti come estensione, testimonia la loro globalità. Da quanto precede si evince che le cause del fenomeno sono legate alla posizione che la Terra occupa nello spazio, ovvero all'azione che i corpi celesti, in particolare modo il Sole e la Luna, esercitano sulla Terra. L'origine astronomica giustifica la denominazione di marea astronomica comunemente data al fenomeno principale.

E' altresì noto come il ritmico innalzamento e abbassamento del livello medio marino indotto da cause astronomiche può essere disturbato da cause meteorologiche quali le variazioni bariche e l'azione tangenziale del vento, causa della cosiddetta marea meteorologica. In ogni caso, qualunque sia l'entità del disturbo, la regolarità del fenomeno propriamente astronomico ritorna sempre ad esplicarsi invariato una volta che il disturbo meteorologico abbia cessato la sua azione.

La marea astronomica, essendo originata dall'azione di attrazione Newtoniana indotta da moti di rivoluzione noti della Terra con i corpi celesti che la circondano (essenzialmente Luna e Sole), ha un carattere essenzialmente deterministico. La elevatissima precisione con la quale, a cavallo del XIX e XX secolo, sono state definite le caratteristiche dei moti della Luna attorno alla Terra e di questa attorno al Sole (Brown, 1908), ha consentito di scomporre il potenziale della marea astronomica in centinaia di costituenti armoniche (Darwin, 1886; Doodson, 1921; Cartwright e Tayler, 1961), permettendo di identificare ciclicità con periodi dell'ordine dei 18 anni (nutazione e ciclo di Saros). E' bene notare che, qualora la Terra fosse una Idrosfera, ovvero una sfera completamente ricoperta di acqua con tirante idrico costante, e qualora la risposta del fluido potesse ipotizzarsi istantanea (mancanza di reazione inerziale), una tale precisione nella conoscenza del potenziale generatore della marea permetterebbe di derivare teoricamente, con altrettanto elevata precisione, le variazioni temporali del livello marino in ogni punto del globo. La presenza dei continenti, la conformazione

frastagliata dei fondali e delle coste, nonché l'inerzia con la quale l'acqua del mare reagisce alla forzante, non permettono tuttavia una tale derivazione teorica. Quindi, mentre i periodi delle varie costituenti della marea sono conosciuti con elevata precisione, l'ampiezza e la fase con le quali si esplicano nei vari punti del globo rimane una incognita. Tali caratteristiche, ovvero ampiezza e fase delle varie costituenti in un punto, possono tuttavia essere calcolate per mezzo dell'analisi armonica delle misure di livello realizzate nel punto considerato (Doodson, 1928), risultando il calcolo tanto più preciso quanto più lunga risulta la serie continua analizzata.

Al limite, stanti le ciclicità fino ai 18 anni, per calcolare con precisione l'ampiezza e la fase di tutte le 368 costituenti di marea note occorrerebbero 18 anni di dati continui campionati con una frequenza di un ora. Per fortuna, per ottenere ricostruzioni o previsioni di marea dotate di buona approssimazione, sono sufficienti l'ampiezza e la fase di un numero di costituenti molto minore. Secondo il luogo di interesse infatti, possono bastare anche solo 7 costituenti per ricostruire o prevedere fino al 96%-98% dell'escursione di livello mareale. Mediamente, sono sufficienti da un minimo di 15 giorni a un massimo di un anno di dati continui per poter calcolare, con precisione crescente, da 7 fino a circa 68 costituenti di marea.

Di tutt'altro genere è l'oscillazione di marea indotta da cause meteorologiche, essenzialmente gradienti di pressione e azione tangenziale del vento. In questo caso, allo stato delle conoscenze, tale oscillazione può essere studiata solo come un fenomeno a carattere stocastico. Per quanto alcuni tipi di oscillazione rientrante in questa categoria possano essere studiati analiticamente (ad esempio le oscillazioni di sessa di una bacino, indotte da una forzante meteorologica, possono essere studiate calcolando i periodi di modo proprio del bacino stesso), ovvero complessivamente mediante l'applicazione di modelli in acqua bassa forzati dalle uscite di modelli meteorologici a scala globale e locale (GCM e LAM), il metodo locale ancora oggi più usato e più consolidato è quello che prevede di considerare il livello di marea meteorologica pari al livello residuo, dato dalla sottrazione dei livelli ricostruiti di marea astronomica da quelli osservati. Occorre notare che, tale metodo parte dal presupposto che il bacino considerato risponda linearmente alle due forzanti, ipotesi peraltro ampiamente accettata nel caso specifico del Mediterraneo.

Nella presente relazione vengono esposti i risultati dell'analisi dei dati disponibili osservati al mareografo di Genova posto vicino al sito di interesse. Tale analisi preliminare ha consentito di effettuare l'analisi armonica delle serie effettive e quindi ricavare le costituenti armoniche necessarie alla ricostruzione della marea astronomica. La determinazione dei livelli residui, identificati come livelli di marea meteorologica, ha poi consentito di effettuare una analisi statistica dei valori estremi

finalizzata a correlare tali livelli residui a una precisa probabilità di accadimento. I risultati che emergono sono da ritenersi essenziali sia per le analisi di rischio di inondazione delle coste che alla progettazione delle opere di difesa costiera.

4.1. Analisi dei dati mareografici

La stazione mareografica di Genova costituisce la stazione n.25 della Rete Mareografica Nazionale (vedi Figura 70). La stazione è stata impiantata nel 1998 presso l'acquario di Genova in corrispondenza delle coordinate geografiche

44°24'36,46'' N – 08°55'31,86'' E

4.1.1. Dati disponibili

La serie di misure eseguite al mareografo di Genova, analizzate nel presente documento, si estende dal 06 agosto 1998 al 13 ottobre del 2010. La frequenza di campionamento è, in generale, di una misura ogni ora. Fanno eccezione i dati a partire dal 3 febbraio 2010, forniti con una frequenza di campionamento di 10 minuti.

4.1.2. Analisi dei dati

In primo luogo, allo scopo di rendere omogenea la serie storica complessiva, si sono ridotte le serie campionate con frequenza 10 minuti a serie con frequenza di 1 ora. In seguito, al fine di determinare il rendimento reale della stazione, si sono individuati i periodi di vero e proprio funzionamento della stessa (presenza di dati misurati) e quelli in cui era evidente il malfunzionamento della stessa quali ad esempio ripetizioni su periodi temporali estesi, dello stesso valore della misura (vedi Figura 71), ovvero la presenza di 'spikes'. I dati delle misure di livello del mareografo di Genova dopo l'eliminazione delle misure errate per blocco dello strumento e spikes è riportato in Figura 72. Il rendimento della stazione mareografica nel periodo luglio 1998- dicembre 2010 è riportato in Tabella 39. Il rendimento complessivo della stazione per il periodo luglio 1998- dicembre 2010 è stato superiore al 92%. Concentrandosi sul periodo di 12 anni compreso tra il 1 ottobre 1998 e il 30 settembre 2010 il rendimento sale al 96,25%. Solamente il 2004 ha avuto un rendimento inferiore al 90% (88%). Il numero di osservazioni utili orarie di tale periodo risulta di 102 359.



Figura 70. Stazioni ISPRA della Rete Mareografica Nazionale (RMN) e localizzazione geografica della stazione di Genova

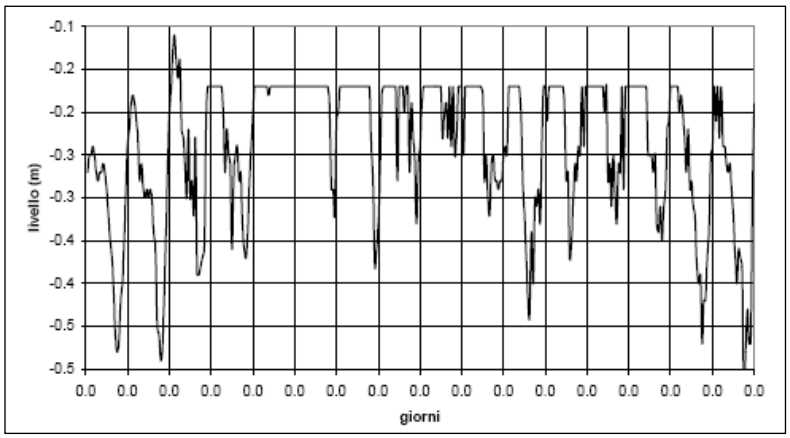


Figura 71. Esempio di malfunzionamento del mareografo

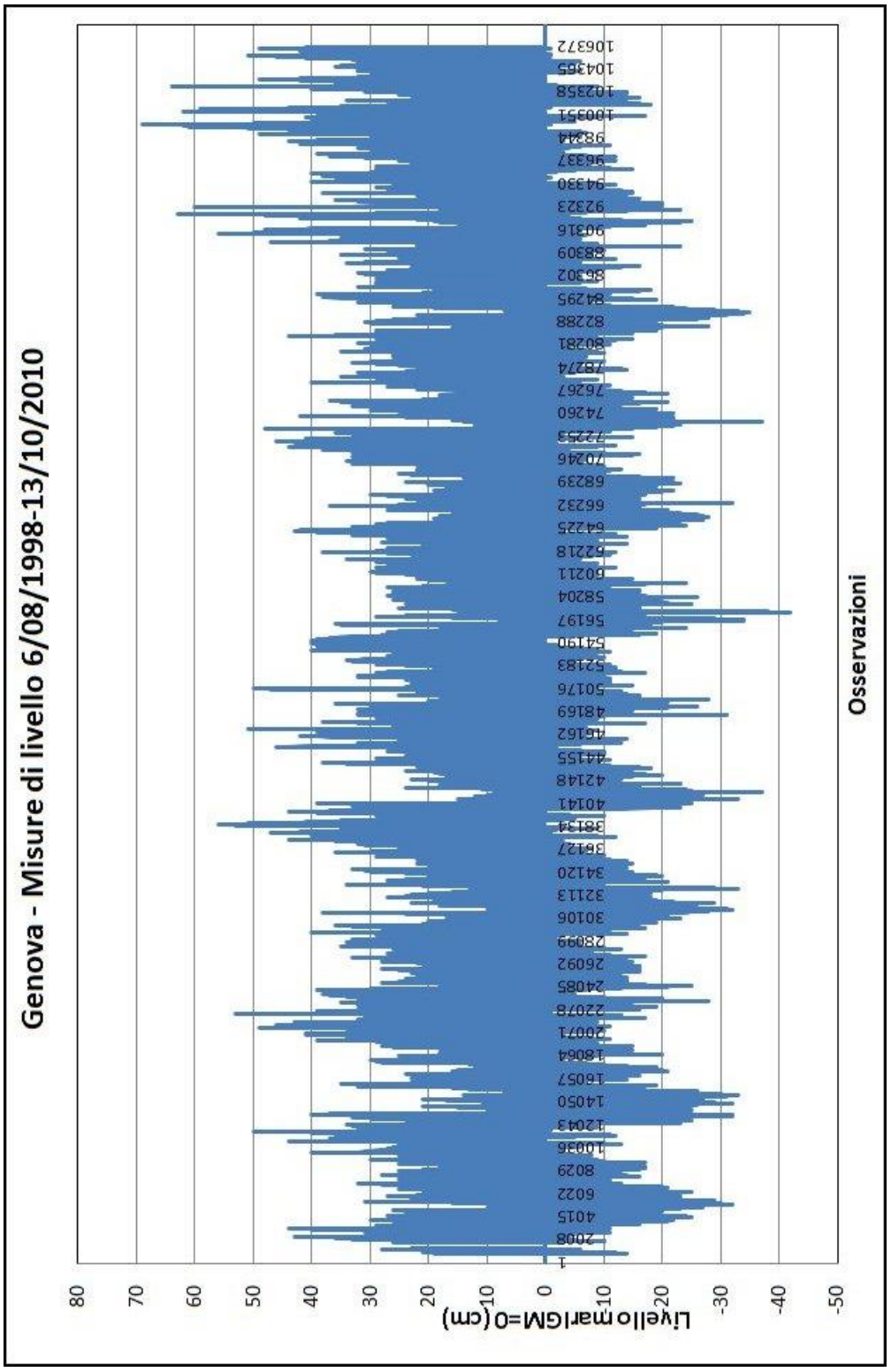


Figura 72. Misure di livello della stazione di Genova – dati elaborati con eliminazione di dati affetti da errore per blocco strumento e spikes

Periodo 06/08/1998-13/10/2010

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
1998	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7	0	0.00
	8	478	64.25
	9	374	51.94
	10	680	91.40
	11	714	99.17
	12	737	99.06
1999	1	736	98.92
	2	667	99.26
	3	736	98.92
	4	716	99.44
	5	738	99.19
	6	717	99.58
	7	734	98.66
	8	738	99.19
	9	704	97.78
	10	740	99.46
	11	706	98.06
	12	728	97.85
2000	1	732	98.39
	2	687	98.71
	3	732	98.39
	4	708	98.33
	5	710	95.43
	6	686	95.28
	7	721	96.91
	8	735	98.79
	9	714	99.17
	10	736	98.92
	11	716	99.44
	12	739	99.33
2001	1	734	98.66
	2	670	99.70
	3	735	98.79
	4	716	99.44
	5	742	99.73
	6	716	99.44
	7	737	99.06
	8	735	98.79
	9	707	98.19
	10	737	99.06
	11	712	98.89
	12	735	98.79

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
2002	1	736	98.92
	2	636	94.64
	3	739	99.33
	4	714	99.17
	5	737	99.06
	6	711	98.75
	7	733	98.52
	8	736	98.92
	9	703	97.64
	10	738	99.19
	11	712	98.89
	12	684	91.94
2003	1	722	97.04
	2	663	98.66
	3	736	98.92
	4	706	98.06
	5	738	99.19
	6	710	98.61
	7	732	98.39
	8	734	98.66
	9	717	99.58
	10	734	98.66
	11	655	90.97
	12	591	79.44
2004	1	532	71.51
	2	306	43.97
	3	524	70.43
	4	581	80.69
	5	728	97.85
	6	719	99.86
	7	735	98.79
	8	738	99.19
	9	703	97.64
	10	729	97.98
	11	714	99.17
	12	736	98.92
2005	1	737	99.06
	2	664	98.81
	3	733	98.52
	4	715	99.31
	5	737	99.06
	6	717	99.58
	7	737	99.06
	8	737	99.06
	9	707	98.19
	10	735	98.79
	11	713	99.03
	12	740	99.46

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
2006	1	735	98.79
	2	667	99.26
	3	731	98.25
	4	711	98.75
	5	738	99.19
	6	710	98.61
	7	740	99.46
	8	738	99.19
	9	707	98.19
	10	732	98.39
	11	714	99.17
	12	733	98.52
2007	1	740	99.46
	2	667	99.26
	3	733	98.52
	4	695	96.53
	5	695	93.41
	6	711	98.75
	7	717	96.37
	8	572	76.88
	9	646	89.72
	10	738	99.19
	11	713	99.03
	12	716	96.24
2008	1	730	98.12
	2	672	96.55
	3	675	90.73
	4	710	98.61
	5	703	94.49
	6	697	96.81
	7	692	93.01
	8	739	99.33
	9	711	98.75
	10	606	81.45
	11	699	97.08
	12	626	84.14
2009	1	613	82.39
	2	659	98.07
	3	728	97.85
	4	713	99.03
	5	717	96.37
	6	692	96.11
	7	726	97.58
	8	528	70.97
	9	650	90.28
	10	729	97.98
	11	688	95.56
	12	658	88.44

Anno	Mese	N° Eventi	Rend. (%)
2010	1	732	98.39
	2	618	91.96
	3	734	98.66
	4	712	98.89
	5	733	98.52
	6	700	97.22
	7	713	95.83
	8	709	95.30
	9	685	95.14
	10	294	39.52
	11	0	0.00
	12	0	0.00

Periodo	Rend. (%)
lug/1998-dic/1998	67.64
1999	98.86
2000	98.09
2001	99.05
2002	97.91
2003	96.35
2004	88.00
2005	98.99
2006	98.81
2007	95.28
2008	94.09
2009	92.55
2010	75.79
lug/1998-dic/2010	**92.42**

Periodo	Rend. (%)
ott/1998-dic/1998	96.54
1999	98.86
2000	98.09
2001	99.05
2002	97.91
2003	96.35
2004	88.00
2005	98.99
2006	98.81
2007	95.28
2008	94.09
2009	92.55
gen/2010-set/2010	96.66
ott/1998-set/2010	**96.25**

Tabella 39. Media e Rendimento effettivo annuale della stazione mareografica di Genova

4.2. Livello medio del mare della stazione RMN di Genova

Il livello di riferimento della RMN ISPRA è fissato sullo zero IGM derivato sulla base di livellazione di precisione a partire da capisaldi principali IGM.

ISPRA ha effettuato uno studio finalizzato all'analisi dei rilievi di livello marino nelle 26 stazioni mareografiche che da oltre 10 anni hanno monitorato il livello, allo scopo di definire il livello medio marino per ognuna delle stazioni.

I dati di base analizzati si riferiscono ai rilievi di livello marino nelle 26 stazioni mareografiche italiane prima del potenziamento avvenuto nel 2010.

La base dati è costituita da files TXT (ASCII) contenenti per ogni stazione e per ogni passo temporale a intervallo di 10 minuti la data (anno, mese, giorno, ora e minuto) e il livello marino in metri rispetto allo Zero IGM.

La base dati validata è stata analizzata preliminarmente tramite applicazione del filtro X0 di Doodson e del filtro di Bloomfield.

Essa è stata inoltre sottoposta ad analisi di marea per l'estrazione di tutte le componenti astronomiche risolvibili.

Si rammenta che il filtro X0 di Doodson è un filtro simmetrico a 19 pesi che permette di eliminare l'energia del segnale attribuibile alle componenti diurne e semidiurne della marea astronomica.

Esso si applica a dati orari ed è centrato alle ore 12 di ogni giorno considerato. Il livello medio giornaliero (L) è calcolato secondo la seguente formulazione:

$$L = \frac{\sum_{i=-19}^{i=19} L_h \bullet X0(i)}{\sum_{i=-19}^{i=19} X0(i)} \qquad (22)$$

dove:

L_h= Livello orario

X0(i)= (2,1,1,2,0,1,1,0,2,0,1,1,0,1,0,0,1,0,1) = pesi del filtro

Il filtro Bloomfield è invece un filtro a 119 pesi che permette di eliminare le componenti di alta frequenza del segnale ed evita il fenomeno di *aliasing*.

Esso si applica a dati orari ed è centrato alle ore 12 di ogni giorno considerato. Il livello medio giornaliero (L) è calcolato secondo la seguente formulazione:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^{i=119} L_h \bullet D(i)}{\sum_{i=1}^{i=119} D(i)} \qquad (23)$$

dove:

L_h= Livello orario

D(i)= sono i 119 pesi del filtro.

Nella Figura 73 e Figura 74 seguenti sono riportati i valori medi giornalieri del livello marivo nel periodo 2001-2009 pubblicati dall'ISPRA e filtrati con filtro di Bloomfield per la stazione mareografica di Genova. I valori medi giornalieri del livello marivo nel periodo 2010-2013 pubblicati dall'ISPRA sono invece riportati nella Figura 75.

Nelle stesse figure è riportato con un simbolo anche il livello medio mensile, calcolato come media aritmetica dei livelli medi giornalieri.

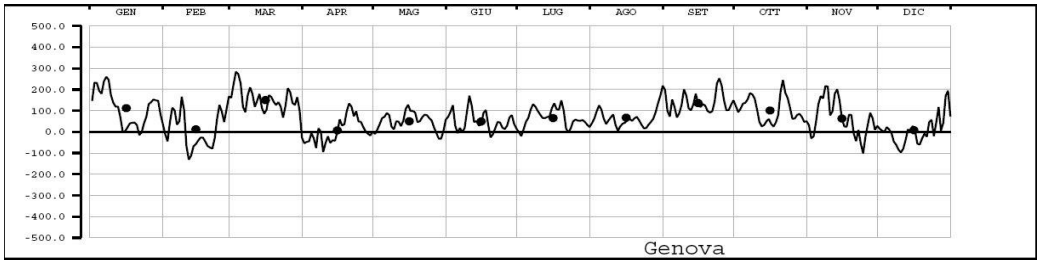
Il livello medio annuale è calcolato dell'ISPRA come media mensile e il livello medio totale come media annuale.

Il livello madio mare in metri nel periodo 2000-2009 riferito al dato IGM=0 secondo la base dati filtrata con i filtri di Doodsn, Bloomfield e dopo la risoluzione di 69 costituenti di marea secondo il metodo Foreman determinato dall'ISPRA per la stazione mareografica di Genova è riportato nella tabella seguente, e risulta di circa +**6,3 cm**.

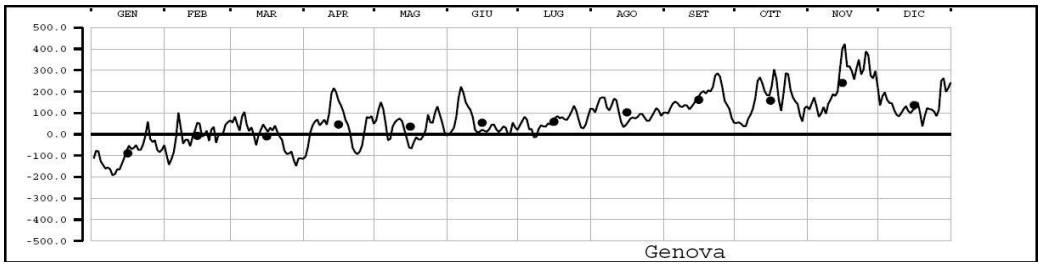
stazione	DOODSON	BLOOMFIELD	FOREMAN
Genova	0.0636	0.0636	0.0627

Tabella 40. Livello medio mare in m riferito al dato IGM=0 per la stazione di Genova

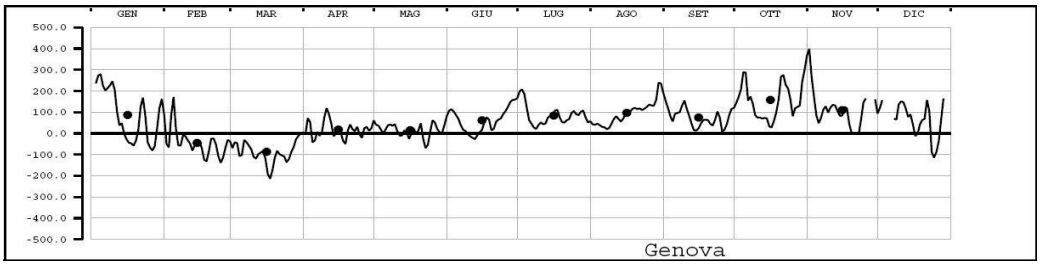
Livello (mm) 2001



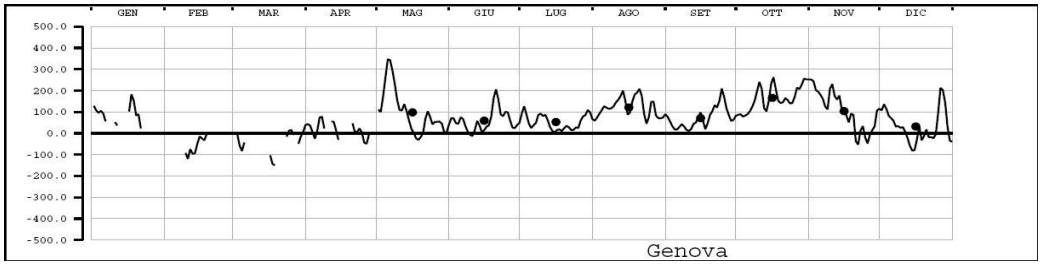
Livello (mm) 2002



Livello (mm) 2003



Livello (mm) 2004



Livello (mm) 2005

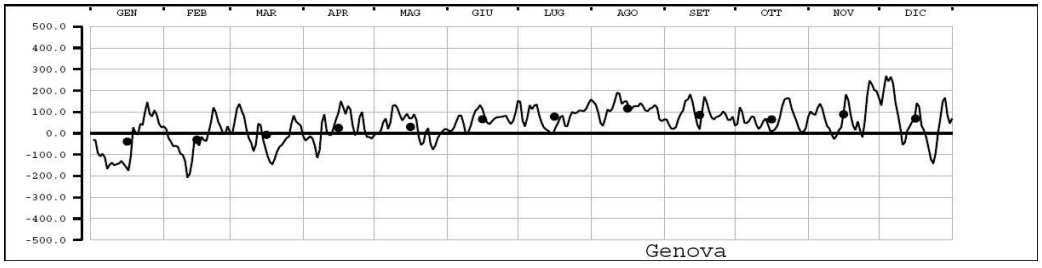
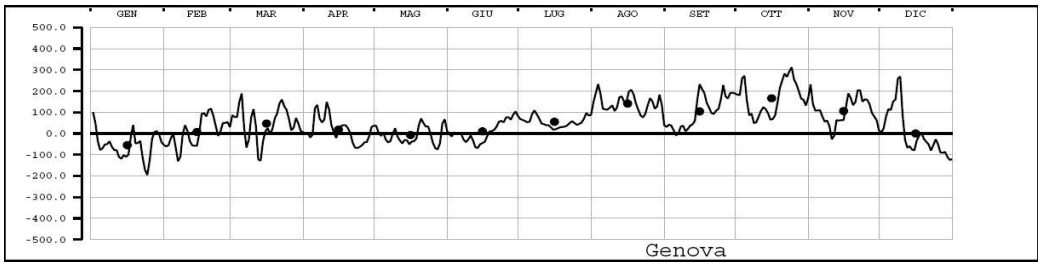
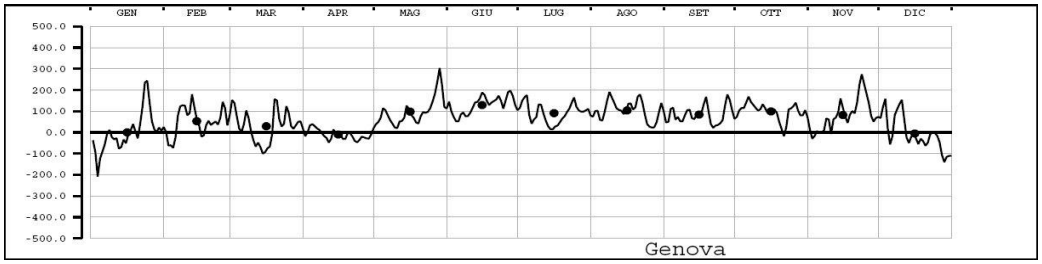


Figura 73. Valori medi giornalieri filtrati con filtro di Bloomfield pubblicati dall'ISPRA per la stazione mareografica di Genova periodo 2001-2005 ***Valore medio mensile*** = ●

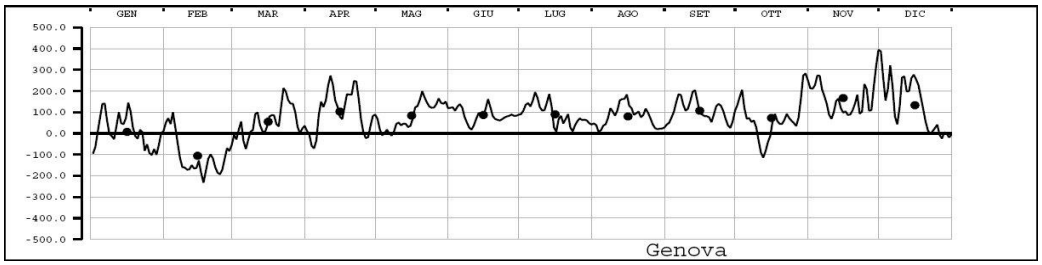
Livello (mm) 2006



Livello (mm) 2007



Livello (mm) 2008



Livello (mm) 2009

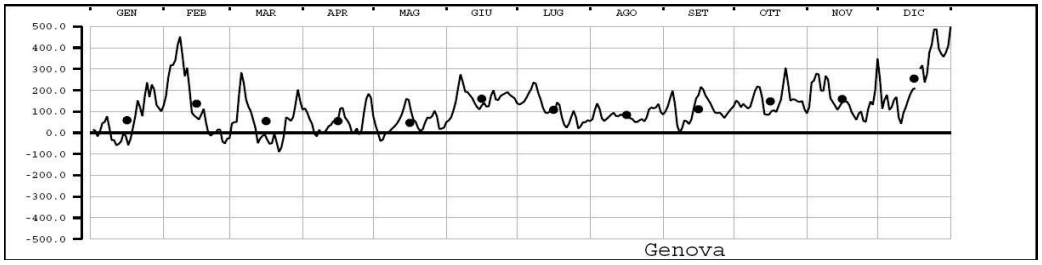
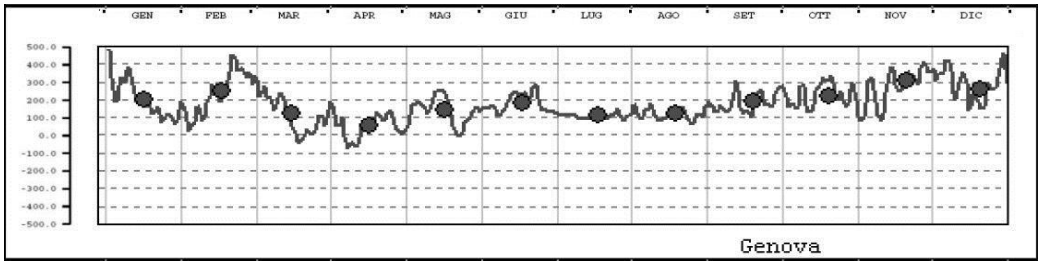
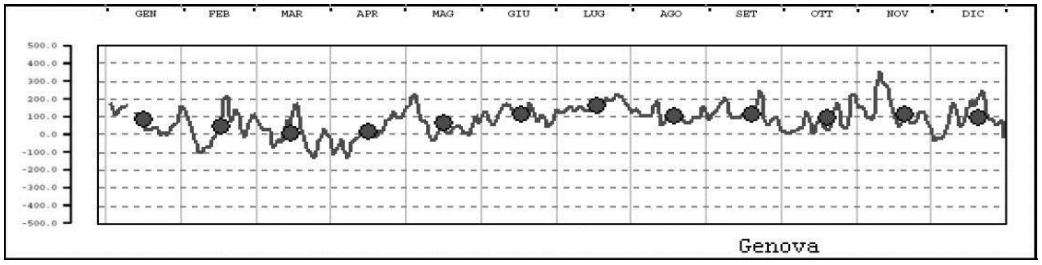


Figura 74. Valori medi giornalieri filtrati con filtro di Bloomfield pubblicati dall'ISPRA per la stazione mareografica di Genova periodo 2006-2009 ***Valore medio mensile*** = ●

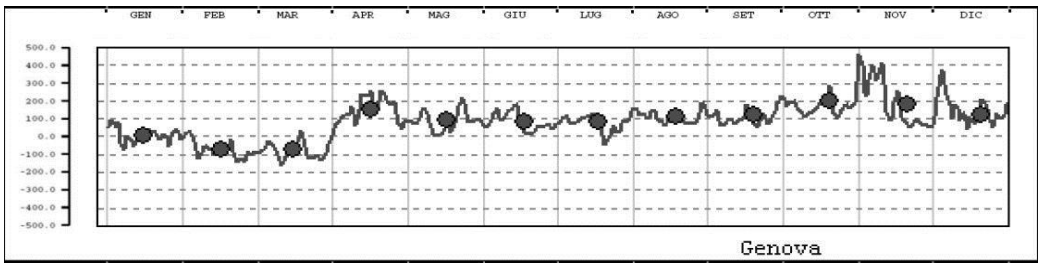
Livello (mm) 2010



Livello (mm) 2011



Livello (mm) 2012



Livello (mm) 2013

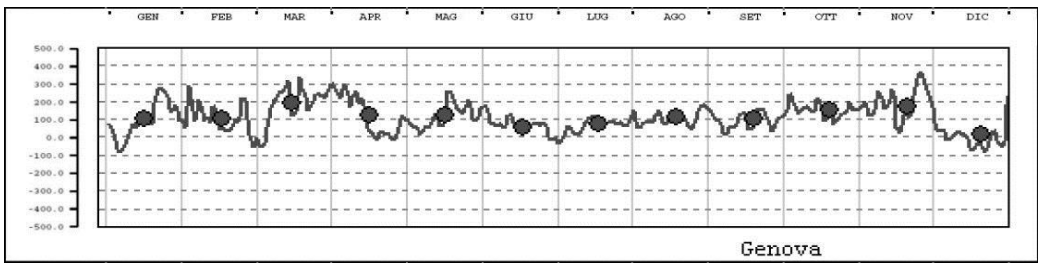


Figura 75. Valori medi giornalieri filtrati con filtro di Bloomfield pubblicati dall'ISPRA per la stazione mareografica di Genova periodo 2010-2013 ***Valore medio mensile*** = ●

4.3. Livelli di marea

4.3.1. Analisi armonica dei livelli misurati

Allo scopo di separare la componente deterministica astronomica dei livelli misurati da quella stocastico meteorologica, le serie storiche effettive (ovvero depurate da blocchi dello strumento e *spikes*) dei livelli misurati nella stazione mareografica di Genova sono state sottoposte ad analisi armonica. A tal fine, si è utilizzato il codice di calcolo SLPR2 (Caldwell, 1998) elaborato presso il JIMAR ('Joint Institute for Marine and Atmospheric Research') in collaborazione con il 'National Oceanographic Data Centere' del NOAA e il 'Sea Level Center' della 'University of Hawaii'. Il codice, mediante la tecnica dei minimi quadrati, analizza serie temporali di dati di livello campionati con frequenza oraria e restituisce l'ampiezza e la fase di un numero di costituenti principali e in acqua bassa dipendente dall'estensione della serie storica considerata. Si rimanda alla bibliografia per approfondimenti in merito al metodo di analisi utilizzato (Foreman, 1996; Godin, 1972).

Il buon rendimento è gli scarsi periodi di 'buco' o di 'errore' all'interno delle serie storiche disponibili hanno consentito di individuare, all'interno delle serie stesse, i periodi che si presentano ottimali in relazione alla continuità, omogeneità e regolarità del dato misurato alla determinazione delle costanti armoniche del singolo anno. L'estensione temporale delle serie scelte è indicata nella tabella 11.1. Nella Tabella 41 e Tabella 42 sono riportati a titolo di esempio per gli anni 2001 e 2009 l'ampiezza e la fase (riferita alle 00:00 del 01/01/1976) delle costituenti individuate

Occorre sottolineare che, data l'estensione annuale delle serie sottoposte ad analisi armonica, le costanti individuate (essenzialmente associate a componenti principali) per quanto in grado di descrivere con sufficiente approssimazione l'andamento locale complessivo dell'onda di marea, non permettono di definire con sufficiente dettaglio le variazioni corrispondenti a distorsioni legate alla propagazione in costa.

Inizio		Fine		
ora	data	ora	data	dati validi
00:00	01/10/1998	00:00	30/09/2010	102359

Tabella 41. Estensione temporale delle serie utilizzate per l'analisi armonica

No	Nome	Frequenza	hhhh	mm	sssss	Amp	Fase
1	Z0	0.00000000				6.7720	360.00
2	SSA	0.00022816	4382	53	21.12	2.9993	342.88
3	MSM	0.00130978	763	29	13.19	1.3916	307.16
4	MM	0.00151215	661	18	36.20	2.6854	259.83
5	MSF	0.00282193	354	22	2.64	0.5577	326.18
6	MF	0.00305009	327	51	33.04	0.6860	199.16
7	ALP1	0.03439657	29	04	21.60	0.0563	307.46
8	2Q1	0.03570635	28	00	22.40	0.0399	196.14
9	SIG1	0.03590872	27	50	54.20	0.0546	56.17
10	Q1	0.03721850	26	52	6.09	0.2675	14.45
11	RHO1	0.03742087	26	43	23.00	0.0671	312.04
12	**O1**	**0.03873065**	**25**	**49**	**9.64**	**1.5266**	**92.93**
13	TAU1	0.03895881	25	40	5.29	0.0661	233.93
14	BET1	0.04004043	24	58	29.12	0.0565	1.89
15	NO1	0.04026859	24	49	59.70	0.2291	119.29
16	CHI1	0.04047097	24	42	32.65	0.0413	169.50
17	**P1**	**0.04155259**	**24**	**03**	**57.20**	**1.1183**	**161.83**
18	**K1**	**0.04178075**	**23**	**56**	**4.08**	**3.3818**	**171.02**
19	PHI1	0.04200891	23	48	16.11	0.0958	97.93
20	THE1	0.04309053	23	12	25.04	0.0703	281.18
21	J1	0.04329290	23	05	54.51	0.1863	185.22
22	SO1	0.04460268	22	25	12.64	0.0462	173.55
23	OO1	0.04483084	22	18	21.86	0.0679	176.52
24	UPS1	0.04634299	21	34	41.65	0.1071	94.46
25	OQ2	0.07597494	13	09	44.05	0.0533	231.48
26	EPS2	0.07617731	13	07	38.17	0.0338	180.42
27	2N2	0.07748710	12	54	19.35	0.2267	170.75
28	MU2	0.07768947	12	52	18.33	0.3106	164.71
29	**N2**	**0.07899925**	**12**	**39**	**30.05**	**1.7261**	**182.44**
30	NU2	0.07920162	12	37	33.62	0.3040	182.95
31	**M2**	**0.08051140**	**12**	**25**	**14.16**	**8.4705**	**192.22**
32	MKS2	0.08073957	12	23	7.80	0.0149	104.05
33	LDA2	0.08182118	12	13	18.39	0.0899	187.92
34	L2	0.08202355	12	11	29.83	0.2361	206.50
35	**S2**	**0.08333334**	**11**	**59**	**60.00**	**3.3611**	**207.73**
36	**K2**	**0.08356149**	**11**	**58**	**2.05**	**0.9159**	**207.51**
37	MSN2	0.08484548	11	47	10.07	0.0235	357.33
38	ETA2	0.08507364	11	45	16.28	0.0517	250.74
39	MO3	0.11924210	08	23	10.68	0.0388	148.39
40	M3	0.12076710	08	16	49.44	0.1046	122.75
41	SO3	0.12206400	08	11	32.73	0.0095	93.42
42	MK3	0.12229210	08	10	37.72	0.0175	13.37
43	SK3	0.12511410	07	59	33.74	0.0970	45.46
44	MN4	0.15951060	06	16	9.03	0.2293	238.61
45	**M4**	**0.16102280**	**06**	**12**	**37.08**	**0.6412**	**273.27**
46	SN4	0.16233260	06	09	36.69	0.0103	320.32
47	**MS4**	**0.16384470**	**06**	**06**	**12.03**	**0.3907**	**347.19**
48	MK4	0.16407290	06	05	41.47	0.1417	338.99
49	S4	0.16666670	05	59	60.00	0.0617	218.06
50	SK4	0.16689480	05	59	30.47	0.0403	70.13
51	2MK5	0.20280360	04	55	51.16	0.0119	355.60
52	2SK5	0.20844740	04	47	50.54	0.0042	348.59
53	2MN6	0.24002200	04	09	58.63	0.0610	313.08
54	M6	0.24153420	04	08	24.72	0.0430	26.92
55	2MS6	0.24435610	04	05	32.60	0.0492	37.22
56	2MK6	0.24458430	04	05	18.85	0.0858	54.44
57	2SM6	0.24717810	04	02	44.40	0.0166	173.27
58	MSK6	0.24740620	04	02	30.97	0.0335	30.06
59	3MK7	0.28331490	03	31	46.71	0.0299	224.82
60	M8	0.32204560	03	06	18.54	0.0052	121.69

Tabella 42. Costanti armoniche per la stazione di Genova valutate nel periodo (2001) Analisi effettuata con misure orarie - Periodo da 01 Gennaio 2001 a 31 Dicembre 2001, Ampiezze in cm.- Frequenze in cicli/ora - Periodi in ore,minuti,secondi - Fase in gradi

No	Nome	Frequenza	hhhh	mm	sssss	Amp	Fase
1	Z0	0.00000000				9.2060	0.00
2	SSA	0.00022816	4382	53	21.12	3.5825	173.21
3	MSM	0.00130978	763	29	13.19	2.0582	243.33
4	MM	0.00151215	661	18	36.20	1.6266	289.20
5	MSF	0.00282193	354	22	2.64	0.9853	338.43
6	MF	0.00305009	327	51	33.04	3.0079	177.22
7	ALP1	0.03439657	29	04	21.60	0.1012	161.59
8	2Q1	0.03570635	28	00	22.40	0.1224	9.23
9	SIG1	0.03590872	27	50	54.20	0.0997	296.18
10	Q1	0.03721850	26	52	6.09	0.2638	2.75
11	RHO1	0.03742087	26	43	23.00	0.0109	144.44
12	**O1**	**0.03873065**	**25**	**49**	**9.64**	**1.5240**	**91.61**
13	TAU1	0.03895881	25	40	5.29	0.2923	243.01
14	BET1	0.04004043	24	58	29.12	0.1039	35.35
15	NO1	0.04026859	24	49	59.70	0.2780	105.26
16	CHI1	0.04047097	24	42	32.65	0.0801	224.96
17	**P1**	**0.04155259**	**24**	**03**	**57.20**	**1.0448**	**164.44**
18	**K1**	**0.04178075**	**23**	**56**	**4.08**	**3.3872**	**172.36**
19	PHI1	0.04200891	23	48	16.11	0.1753	142.35
20	THE1	0.04309053	23	12	25.04	0.0592	256.74
21	J1	0.04329290	23	05	54.51	0.1662	197.56
22	SO1	0.04460268	22	25	12.64	0.0654	210.63
23	OO1	0.04483084	22	18	21.86	0.0468	223.54
24	UPS1	0.04634299	21	34	41.65	0.0698	219.69
25	OQ2	0.07597494	13	09	44.05	0.0245	248.68
26	EPS2	0.07617731	13	07	38.17	0.0466	172.00
27	2N2	0.07748710	12	54	19.35	0.1827	184.89
28	MU2	0.07768947	12	52	18.33	0.2451	181.97
29	**N2**	**0.07899925**	**12**	**39**	**30.05**	**1.6508**	**190.26**
30	NU2	0.07920162	12	37	33.62	0.2983	204.05
31	**M2**	**0.08051140**	**12**	**25**	**14.16**	**7.9749**	**199.73**
32	MKS2	0.08073957	12	23	7.80	0.1125	244.67
33	LDA2	0.08182118	12	13	18.39	0.0620	162.03
34	L2	0.08202355	12	11	29.83	0.1759	213.85
35	**S2**	**0.08333334**	**11**	**59**	**60.00**	**3.0921**	**216.90**
36	**K2**	**0.08356149**	**11**	**58**	**2.05**	**0.8951**	**212.16**
37	MSN2	0.08484548	11	47	10.07	0.0095	53.92
38	ETA2	0.08507364	11	45	16.28	0.0374	235.99
39	MO3	0.11924210	08	23	10.68	0.0620	135.78
40	M3	0.12076710	08	16	49.44	0.0817	131.59
41	SO3	0.12206400	08	11	32.73	0.0062	238.61
42	MK3	0.12229210	08	10	37.72	0.0346	290.67
43	SK3	0.12511410	07	59	33.74	0.0701	83.16
44	MN4	0.15951060	06	16	9.03	0.2472	251.69
45	**M4**	**0.16102280**	**06**	**12**	**37.08**	**0.5962**	**295.13**
46	SN4	0.16233260	06	09	36.69	0.0841	315.45
47	**MS4**	**0.16384470**	**06**	**06**	**12.03**	**0.4045**	**358.85**
48	MK4	0.16407290	06	05	41.47	0.1102	1.74
49	S4	0.16666670	05	59	60.00	0.0629	211.37
50	SK4	0.16689480	05	59	30.47	0.0237	200.07
51	2MK5	0.20280360	04	55	51.16	0.0088	314.75
52	2SK5	0.20844740	04	47	50.54	0.0171	278.35
53	2MN6	0.24002200	04	09	58.63	0.0195	22.19
54	M6	0.24153420	04	08	24.72	0.0490	10.46
55	2MS6	0.24435610	04	05	32.60	0.0470	102.85
56	2MK6	0.24458430	04	05	18.85	0.0107	52.51
57	2SM6	0.24717810	04	02	44.40	0.0196	204.45
58	MSK6	0.24740620	04	02	30.97	0.0076	102.60
59	3MK7	0.28331490	03	31	46.71	0.0048	181.89
60	M8	0.32204560	03	06	18.54	0.0096	331.23

Tabella 43. Costanti armoniche per la stazione di Genova valutate nel periodo (2009) Analisi effettuata con misure orarie - Periodo da 01 Gennaio 2009 a 31 Dicembre 2009, Ampiezze in cm.- Frequenze in cicli/ora - Periodi in ore,minuti,secondi - Fase in gradi

4.3.2. Componente deterministica dei livelli misurati: Marea Astronomica

Sulla base della conoscenza delle costanti armoniche è stato successivamente possibile ricostruire la variazione temporale della componente deterministico astronomica del livello della superficie marina. Anche in questo caso si è fatto ricorso al sopra citato codice di calcolo SLPR2. L'onda di marea così ricostruita (si veda ad esempio la Figura 76 si presenta, concordemente ad altre località del Mar Ligure, del tipo misto a dominante semidiurna con una ampiezza di oscillazione variabile tra un massimo pari a circa **37 cm** e un minimo pari a circa **7 cm** (semi-ampiezze pari a 18,5 cm e 3,5 cm rispettivamente).

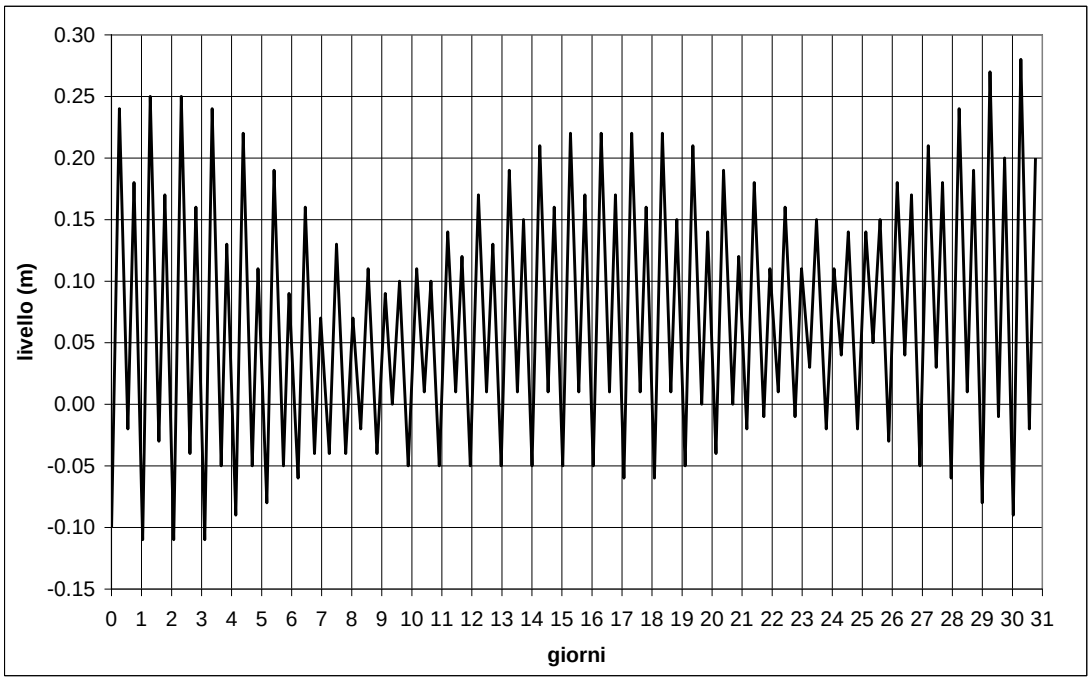


Figura 76. Ricostruzione della marea astronomica a Genova – gennaio 2014

4.3.3. Componente stocastica dei livelli misurati: Marea Meteorologica

In base all'ipotesi - comunemente accettata di comportamento lineare del bacino del Mediterraneo, i contributi alla variazione di livello totale dovuti all'azione astronomica e meteorologica possono essere semplicemente sovrapposti. Da quanto precede si evince che la variazione di livello indotta da fattori meteorologici (vento, pressione) può essere identificate con la variazione di livello residua ottenuta sottraendo l'oscillazione astronomica ricostruita da quella desumibile a partire dai dati osservati di un mareografo.

Operando in tal senso, ovvero calcolando i livelli residui, è stato possibile definire la serie dei livelli dovuti al propagarsi della marea meteorologica nella stazione di Genova. Occorre notare che la sopraccitata impossibilità di descrivere con sufficiente dettaglio le variazioni corrispondenti a distorsioni legate alla propagazione in costa determina la permanenza, all'interno della serie dei livelli residui, del segnale a loro imputabile.

4.4. Analisi statistica degli estremi di marea meteorologica

4.4.1. Selezione dei campioni

Per eseguire l'analisi statistica dei livelli residui rappresentativi delle variazioni legate alla forzante meteorologica, è stato necessario selezionare preliminarmente campioni di dati statisticamente indipendenti e omogenei.

Per quanto riguarda l'indipendenza, è stato utilizzato il metodo POT (Peaks Over Treshold detto anche "della serie di durata parziale sopra soglia") che consiste nel prendere in esame il massimo dei valori di livello residuo che si verifica nell'ambito di un singolo evento meteorologico. L'individuazione di ciascun evento meteorologico nell'ambito della serie storica è stata effettuata introducendo una valore di soglia (5 cm) e ipotizzando che il singolo evento abbia inizio in corrispondenza del valore di livello residuo che superi per la prima volta il valore di soglia prestabilito. Conseguentemente, si ipotizza che l'evento termini quando il livello misurato assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia. Per quanto concerne l'omogeneità dei dati, è stato invece adottato un criterio di tipo empirico, raggruppando insieme i dati sopra soglia estesi su un periodo corrispondente a quello delle usuali perturbazioni che interessano il Mar Ligure (5-10 giorni). Su questa base sono stati selezionati i campioni di livello residuo statisticamente indipendenti e omogenei presentati nella Tabella 44.

4.4.2. Leggi di distribuzione dei valori estremi

L'analisi statistica vera e propria è stata realizzata ordinando in senso decrescente i campioni di valori indipendenti e omogenei, calcolando la frequenza cumulata associata a ogni valore del campione e determinando la distribuzione del valore estremo ('EVD – Estreme Value Distribution') che meglio approssima i campioni stessi.

La frequenza cumulata è stata calcolata utilizzando l'espressione di Hazen (Kottegoda e Rosso, 1997)

$P(i) = (i-0.35) /n$

(con *i* pari al numero d'ordine del dato nel campione ordinato e *n* uguale al numero totale di dati nel campione).

Le leggi di distribuzione del valore estremo adottate sono quella di Weibull:

$$P(X \le x) = 1 - e^{-\left[\frac{(x-B)}{A}\right]^{\alpha}} \tag{24}$$

e la legge di Gumbel (1988):

$$P(X \le x) = \exp[-\exp[-(x-b)/a]] \tag{25}$$

dove X è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento e α, A B, a, b sono i parametri delle distribuzioni.

Poiché, come noto, la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

$$Tr(X \le x) = \frac{1}{(1 - P(X \le x))} \tag{26}$$

si sono infine stimati i livelli residui estremi in relazione a diversi tempi di ritorno.

4.4.3. Analisi dei risultati

L'analisi statistica ha permesso di calcolare, per ogni distribuzione, i parametri di forma, scala e posizione che meglio approssimano i campioni di Tabella 44 e in seguito, i livelli residui estremi in relazione a diversi tempi di ritorno (vedi Tabella 45). Tutte le distribuzioni forniscono risultati omogenei, nell'ambito di un confronto all'interno dei singoli campioni (livello variabile tra un minimo di 30 cm e un massimo di 50 cm per tempi di ritorno variabili tra un minimo di 2 anni e un massimo di 100 anni). Le curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dei livelli residui per la stazione mareografica di Genova sono riportati in Figura 77.

Le distribuzioni che meglio approssimano i campioni sono la distribuzione di Weibul 1.0 e la distribuzione di Gumbel (vedi Tabella 45). La distribuzione di Weibul 1.0 risulta essere però più cautelativa per tempi di ritorno maggiori (vedi Figura 77), pertanto nel seguito dello studio sono stati adottati i valori forniti dalla distribuzione di Weibul 1.0.

Numero anni di riferimento		11.55
Numero totale degli eventi sopra soglia		130
Numero episodi con livello > m	0.22	55
livello di soglia (m)		0.22
Livello residuo massimo sul l.m.m. (m)		0.44

Media	0.265
Deviazione	0.049

Evento	Altezza significativa (m)	Tempo di ritorno (anni)	Evento	Altezza significativa (m)	Tempo di ritorno (anni)	Evento	Altezza significativa (m)	Tempo di ritorno (anni)
1	0.44	20.67	**23**	0.26	0.51	**45**	0.23	0.26
2	0.38	7.42	**24**	0.25	0.49	**46**	0.22	0.25
3	0.37	4.52	**25**	0.25	0.47	**47**	0.22	0.25
4	0.36	3.25	**26**	0.25	0.45	**48**	0.22	0.24
5	0.34	2.54	**27**	0.25	0.44	**49**	0.22	0.24
6	0.34	2.08	**28**	0.25	0.42	**50**	0.22	0.23
7	0.33	1.76	**29**	0.25	0.41	**51**	0.22	0.23
8	0.32	1.53	**30**	0.25	0.39	**52**	0.22	0.22
9	0.32	1.35	**31**	0.24	0.38	**53**	0.22	0.22
10	0.31	1.21	**32**	0.24	0.37	**54**	0.22	0.22
11	0.31	1.10	**33**	0.24	0.36	**55**	0.22	0.21
12	0.30	1.00	**34**	0.24	0.34			
13	0.29	0.92	**35**	0.24	0.33			
14	0.28	0.85	**36**	0.24	0.33			
15	0.28	0.80	**37**	0.23	0.32			
16	0.28	0.74	**38**	0.23	0.31			
17	0.27	0.70	**39**	0.23	0.30			
18	0.27	0.66	**40**	0.23	0.29			
19	0.26	0.62	**41**	0.23	0.29			
20	0.26	0.59	**42**	0.23	0.28			
21	0.26	0.56	**43**	0.23	0.27			
22	0.26	0.54	**44**	0.23	0.27			

Tabella 44. Campioni dei dati di livello residuo relativi a Genova indipendenti e omogenei

Tempo di ritorno (anni)	GUMBEL		WEI(.75)		WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.	Hs (m)	Intervallo di conf.
0.1	0.19		0.17		0.18		0.20		0.21	
1	0.30		0.28		0.29		0.31		0.31	
2	0.33	0.02	0.32	0.01	0.33	0.02	0.34	0.02	0.34	0.02
5	0.37	0.03	0.36	0.02	0.37	0.03	0.38	0.03	0.39	0.03
10	0.41	0.03	0.40	0.03	0.41	0.03	0.41	0.03	0.42	0.03
15	0.43	0.04	0.42	0.03	0.43	0.04	0.43	0.04	0.44	0.04
20	0.44	0.04	0.43	0.04	0.45	0.04	0.45	0.04	0.45	0.04
25	0.45	0.04	0.45	0.04	0.46	0.05	0.46	0.05	0.46	0.05
50	0.48	0.05	0.48	0.05	0.49	0.06	0.49	0.06	0.49	0.05
100	0.52	0.06	0.52	0.06	0.53	0.07	0.52	0.07	0.52	0.06
150	0.53	0.07	0.54	0.07	0.55	0.07	0.54	0.07	0.53	0.07
250	0.56	0.08	0.56	0.07	0.58	0.08	0.56	0.08	0.56	0.08
500	0.59	0.09	0.60	0.09	0.61	0.10	0.60	0.09	0.59	0.09
1000	0.62	0.10	0.64	0.10	0.65	0.11	0.63	0.11	0.62	0.10

α	0.471	0.270	0.501	0.898	1.515
β	1.832	1.994	1.717	1.283	0.643
R	0.994	0.987	0.994	0.993	0.987

Tabella 45. Livelli residui estremi in relazione a diversi tempi di ritorno, parametri di forma e adattamento delle diverse distribuzioni utilizzate

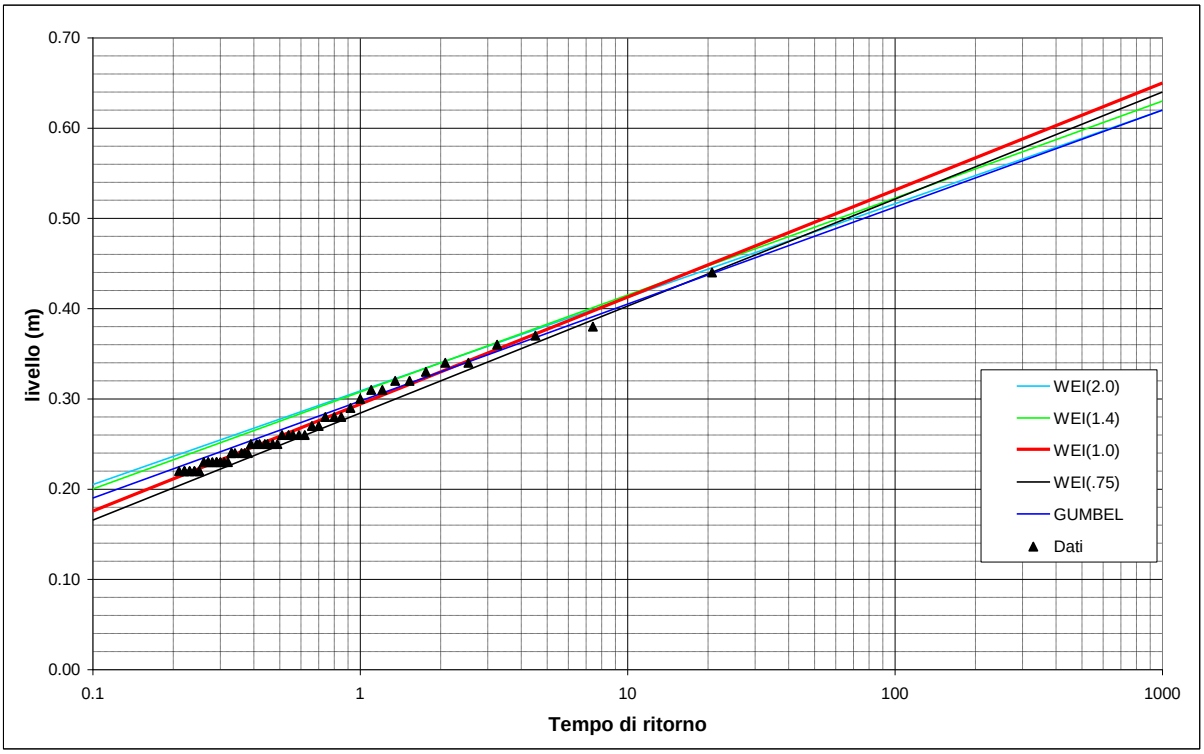


Figura 77. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dei livelli residui dati di Genova (periodo 01/10/1998-30/09/2010)

4.5. Conclusioni sull'analisi dei livelli di marea

L'analisi dei livelli totali misurati alla stazione mareografica di Genova nel periodo 2001-2009, ha permesso di determinare il livello medio marino rispetto allo 0 IGM di Genova (pari a **6,3 cm**).

L'analisi armonica dei livelli totali misurati alla stazione mareografica di Genova nel periodo ottobre 1998- settembre 2010, ha permesso non solo di definire la possibile oscillazione deterministica dovuta all'onda di marea astronomica (compresa tra un massimo di **37 cm** e un minimo di **7 cm**) ma, nell'ipotesi di linearità del comportamento del bacino del Mediterraneo (ipotesi comunemente accettata), ha permesso di stimare i livelli residui di oscillazione riconducibili con una qualche approssimazione a cause di natura meteorologica (onda di marea meteorologica). Una successiva analisi statistica degli estremi dei livelli residui ha quindi permesso di fornire la probabilità associata ai livelli residui estremi (tra un minimo di **33 cm** e un massimo di **53 cm** per tempi di ritorno variabili tra un minimo di **2 anni** e un massimo di **100 anni**).

4.6. Sovralzo d'onda

In progress

4.7. Massimi livelli in corrispondenza dell'opera

In progress

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Corografia generale del litorale di Voltri 4

Figura 2. Unità fisiografica del litorale di Voltri e punti di riferimento al largo 5

Figura 3. Settori di Traversia al largo di Voltri 9

Figura 4. Fetch geografici al largo di Voltri 13

Figura 5. Fetch efficaci al largo di Voltri 14

Figura 6. Direzione di provenienza del vento e degli stati di moto ondoso da esso generati al largo di Voltri 15

Figura 7. Deviazioni tra la direzione del vento e quella del moto ondoso al largo di Voltri 15

Figura 8. Boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia 18

Figura 9. Posizione della boa della rete R.O.N. di La Spezia e del punto di riferimento al largo di Voltri 18

Figura 10. Diagramma polare del moto ondoso al largo di La Spezia, ricostruzione in base ai dati della boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia 19

Figura 11. Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs al largo di La Spezia, ricostruzione in base ai dati della boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia 20

Figura 12. Distribuzione del rapporto Tm/Tp in funzione dell'altezza significativa Hs al largo di La Spezia, ricostruzione in base ai dati della boa direzionale della rete R.O.N. di La Spezia 20

Figura 13. Fetch geografici al largo di La Spezia 30

Figura 14. Fetch efficaci al largo di La Spezia 31

Figura 15. Direzione di provenienza del vento e degli stati di moto ondoso da esso generati a La Spezia 32

Figura 16. Deviazione tra la direzione del vento e quella del moto ondoso a La Spezia 32

Figura 17. Confronto tra fetch efficaci a largo di La Spezia e Voltri 33

Figura 18. Diagramma polare del moto ondoso al largo di Voltri 34

Figura 19. Moto ondoso al largo di Voltri - Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs (ricostruzione dai dati dell'ondametro direzionale di La Spezia)..... 34

Figura 20. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dell'altezza d'onda significativa al largo di Voltri – Settore di traversia principale del III quadrante 184°-244°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004) 43

Figura 21. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dell'altezza d'onda significativa al largo di Voltri – Settore di traversia principale del II quadrante 122°-184°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004) 43

Figura 22. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dell'altezza d'onda significativa al largo di Voltri – Settore di traversia secondario di levante 56°-122°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004)..... 44

Figura 23. Relazione Periodo di picco - Altezza significativa al largo di Voltri - Settore di traversia principale del III quadrante 184°-244°N onde con Hs>3.50 m..... 44

Figura 24. Relazione Periodo di picco - Altezza significativa al largo di Marina di Tarquinia - Settore di traversia principale del II quadrante 122°-184°N onde con Hs>3.70 m..... 45

Figura 25. Relazione Periodo di picco - Altezza significativa al largo di Marina di Tarquinia - Settore di traversia secondario di levante 56°-122°N onde con Hs>1.73 m..... 45

Figura 26. Frequenza di superamento delle altezze d'onde ricostruite al largo di Voltri in termini di altezza e periodo di picco 47

Figura 27. Carte nautiche e posizione delle griglie di calcolo..... 50

Figura 28. Carta nautica e posizione della griglia nidificata 20x20m 51

Figura 29. Griglia di calcolo del fondale del litorale di Voltri 100x100 52

Figura 30. Griglia di calcolo nidificata del fondale di Voltri 20x20 52

Figura 31. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 240°N 53

Figura 32. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 210°N 53

Figura 33. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 180°N 54

Figura 34. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 160°N 54

Figura 35. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 140°N 55

Figura 36. Rifrazione diretta sul litorale di Voltri Hs=1,0 m Tp=7s Dir 120°N 55

Figura 37. Rifrazione diretta Hs=1,0 m Tp=7s Dir 210°N griglia nidificata 20x20 56

Figura 38. Rifrazione diretta Hs=1,0 m Tp=7s Dir 160°N griglia nidificata 20x20 56

Figura 39. Punti significativi per il litorale di Voltri e risultante vettoriale del flusso di energia del moto ondoso..... 59

Figura 40. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) - Rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e sotto costa in funzione della direzione del moto ondoso al largo 60

Figura 41. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) - Corrispondenza direzioni di moto ondoso largo–riva 60

Figura 42. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso davanti alla foce del Torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 61

Figura 43. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs – Ricostruzione secondo il metodo SWAN 61

Figura 44. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) - Rapporto tra l'altezza d'onda al largo H_{so} e sotto costa in funzione della direzione del moto ondoso al largo 64

Figura 45. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) - Corrispondenza direzioni di moto ondoso largo–riva 64

Figura 46. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 65

Figura 47. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) – Distribuzione (%) dei periodi di picco Tp per classi di altezze d'onda Hs – Ricostruzione secondo il metodo SWAN 65

Figura 48. Punto P4E (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 66

Figura 49. Punto P3E (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 66

Figura 50. Punto P2E (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 67

Figura 51. Punto P2W (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 67

Figura 52. Punto P3W (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 68

Figura 53. Punto P4W (-10,0 m s.l.m.) – Regime medio annuale del moto ondoso alla foce del torrente Leira - Ricostruzione secondo il metodo SWAN 68

Figura 54. Punto P0 (–20,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) a Voltri..... 80

Figura 55. Punto P0 (–20,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) a Voltri 80

Figura 56. Punto P4E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) 83

Figura 57. Punto P3E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) 83

Figura 58. Punto P2E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) 84

Figura 59. Punto P1 (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m)..... 84

Figura 60. Punto P2W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) 85

Figura 61. Punto P3W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) 85

Figura 62. Punto P4W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare della potenza del moto ondoso (kWh/m) 86

Figura 63. Punto P4E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) 86

Figura 64. Punto P3E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) 87

Figura 65. Punto P2E (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) 87

Figura 66. Punto P1 (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m..... 88

Figura 67. Punto P2W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) 88

Figura 68. Punto P3W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) 89

Figura 69. Punto P4W (–10,0 m sul l.m.m.) - Distribuzione (%) Polare del lavoro medio annuale del moto ondoso (kWh/m) 89

Figura 70. Stazioni ISPRA della Rete Mareografica Nazionale (RMN) e localizzazione geografica della stazione di Genova 97

Figura 71. Esempio di malfunzionamento del mareografo 97

Figura 72. Misure di livello della stazione di Genova – dati elaborati con eliminazione di dati affetti da errore per blocco strumento e spikes 98

Figura 73. Valori medi giornalieri filtrati con filtro di Bloomfield pubblicati dall'ISPRA per la stazione mareografica di Genova periodo 2001-2005 ***Valore medio mensile*** **= ●** 103

Figura 74. Valori medi giornalieri filtrati con filtro di Bloomfield pubblicati dall'ISPRA per la stazione mareografica di Genova periodo 2006-2009 ***Valore medio mensile*** **= ●** 104

Figura 75. Valori medi giornalieri filtrati con filtro di Bloomfield pubblicati dall'ISPRA per la stazione mareografica di Genova periodo 2010-2013 ***Valore medio mensile*** **= ●** 105

Figura 76. Ricostruzione della marea astronomica a Genova – gennaio 2014..... 109

Figura 77. Curve probabilistiche di Weibull e Gumbel dei livelli residui dati di Genova (periodo 01/10/1998-30/09/2010)..... 113

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Fetch geografici ed efficaci al largo di Voltri 12

Tabella 2. Rendimento ondametro della stazione R.O.N. di La Spezia 23

Tabella 3. Distribuzione annuale del numero di eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza 24

Tabella 4. Distribuzione annuale del numero di eventi ondosi, per classi di Hs e periodo di picco Tp 24

Tabella 5. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza 25

Tabella 6. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco... 25

Tabella 7. Fetch geografici ed efficaci al largo di La Spezia 35

Tabella 8. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il metodo della trasposizione - dati di La Spezia 36

Tabella 9. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il metodo della trasposizione - dati di La Spezia 36

Tabella 10. Riepilogo caratteristiche del moto ondoso al largo di Voltri per diversi tempi di ritorno 39

Tabella 11. Statistica delle altezze d'onda significative al largo di Voltri Settore di traversia principale del III quadrante 184°-244°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004) 40

Tabella 12. Statistica delle altezze d'onda significative al largo di Voltri Settore di traversia principale del II quadrante 122°-184°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004) 41

Tabella 13. Statistica delle altezze d'onda significative al largo di Voltri Settore di traversia secondario di levante 56°-122°N ricostruzione del moto ondoso dati di La Spezia (01/07/(1989-01/07/2004) 42

Tabella 14. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P0 (–20,0 m s.l.m.) 62

Tabella 15. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P0 (–20,0 m s.l.m.) 62

Tabella 16. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P1 (–10,0 m s.l.m.) 69

Tabella 17. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P1 (–10,0 m s.l.m.) 69

Tabella 18. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P4E (–10,0 m s.l.m.)..... 70

Tabella 19. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P4E (–10,0 m s.l.m.) 70

Tabella 20. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P3E (–10,0 m s.l.m.)..... 71

Tabella 21. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P3E (–10,0 m s.l.m.) 71

Tabella 22. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P2E (–10,0 m s.l.m.)..... 72

Tabella 23. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P2E (–10,0 m s.l.m.) 72

Tabella 24. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P2W (–10,0 m s.l.m.) ... 73

Tabella 25. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P2W (–10,0 m s.l.m.)..... 73

Tabella 26. Distribuzione annuale in forma percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza secondo il modello SWAN - punto P3W (–10,0 m s.l.m.) ... 74

Tabella 27. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P3W (–10,0 m s.l.m.)..... 74

Tabella 28. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P4W (–10,0 m s.l.m.)..... 75

Tabella 29. Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco secondo il modello SWAN - punto P4W (–10,0 m s.l.m.)..... 75

Tabella 30. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri 81

Tabella 31. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Onde morfologiche equivalenti 81

Tabella 32. Punto P4E (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri..... 90

Tabella 33. Punto P3E (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri..... 90

Tabella 34. Punto P2E (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri..... 91

Tabella 35. Punto P1 (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri 91

Tabella 36. Punto P2W (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri..... 92

Tabella 37. Punto P3W (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri..... 92

Tabella 38. Punto P4W (-10,0 m s.l.m.) - Distribuzione annuale del flusso di energia del moto ondoso a Voltri..... 93

Tabella 39. Media e Rendimento effettivo annuale della stazione mareografica di Genova..... 100

Tabella 40. Livello medio mare in m riferito al dato IGM=0 per la stazione di Genova..... 102

Tabella 41. Estensione temporale delle serie utilizzate per l'analisi armonica..... 106

Tabella 42. Costanti armoniche per la stazione di Genova valutate nel periodo (2001) Analisi effettuata con misure orarie - Periodo da 01 Gennaio 2001 a 31 Dicembre 2001, Ampiezze in cm.- Frequenze in cicli/ora - Periodi in ore,minuti,secondi - Fase in gradi 107

Tabella 43. Costanti armoniche per la stazione di Genova valutate nel periodo (2009) Analisi effettuata con misure orarie - Periodo da 01 Gennaio 2009 a 31 Dicembre 2009, Ampiezze in cm.- Frequenze in cicli/ora - Periodi in ore,minuti,secondi - Fase in gradi 108

Tabella 44. Campioni dei dati di livello residuo relativi a Genova indipendenti e omogenei 112

Tabella 45. Livelli residui estremi in relazione a diversi tempi di ritorno, parametri di forma e adattamento delle diverse distribuzioni utilizzate 113