PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI

DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE

COMMISSARIO DELEGATO

(ORDINANZA C.D. P.C. n. 558 del 15 novembre 2018)

LIVELLO PROGETTUALE

PROGETTO ESECUTIVO

ATTIVITA'

OPERE DI CONTRASTO DELL'EROSIONE MARINA A SALVAGUARDIA DELLA DURABILITÀ DEGLI INTERVENTI DI RIPRISTINO E MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO FINALIZZATO ALLA RIAPERTURA DELLA STRADA PEDONALE DENOMINATA "VIA DELL'AMORE" NEL COMUNE DI RIOMAGGIORE (SP)





GRUPPO DI PROGETTAZIONE - R.T.P.

CAPOGRUPPO MANDATARIA

Prometeoengineering.it SRL
Direttore Tecnico
Dott. Ing. Alessandro Focaracci

MANDANTI

Geoeco Progetti
Direttore Tecnico
Prof. Geol. Eros Aiello

Geologia Verticale
Procuratore
Dott. Geol. Luigi Perasso

Ambiente S.p.A.
Direttore Tecnico
Dott. Ing. Andrea Lucioni

MC Engineering S.r.L
Direttore Tecnico
Dott. Ing. Matteo Ceravolo

Acquatecno S.r.L
Amministratore Unico
Dott. Ing. Renato Marconi

RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE DISCIPLINE SPECIALISTICHE

Prometeoengineering.it SRL
Dott. Ing. Alessandro Focaracci

PROGETTAZIONE

Acquatecno S.r.L
Dott. Ing. Renato Marconi
Dott. Arch. Vittoria Biego
Dott. Ing. Renato Del Prete

SOGGETTO ATTUATORE — Dott. Ing. Luca Berrutil

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO — Dott. Ing. Daniela Zucca

TITOLO

STUDIO METEOMARINO

ELABORATO: 8

DATA: 10/09/2021

SCALA:

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
1	10/09/2021	Revisione			
0	02/08/2021	Emissione			

CODICE ELABORATO: ESEC20210 1STRRE02R01

NOME FILE:

Indice

1. PREMESSA 2

2. RISULTATI DELLO STUDIO ONDOSO DI LARGO 3

3. RISULTATI DELLO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE ONDOSA 8

4. MOTO ONDOSO DI PROGETTO 12

4.1. Variazioni del livello marino 12

4.2. Onda di progetto derivante dalle formulazioni di Kamphuis 14

5. CONCLUSIONI 16

6. BIBLIOGRAFIA 17

7. ALLEGATI 18

1. PREMESSA

Il presente elaborato costituisce lo Studio Meteomarino del Progetto Esecutivo della scogliera radente di protezione della falesia nell'ambito delle *Opere di contrasto dell'erosione marina a salvaguardia della durabilita' degli interventi di ripristino e mitigazione del rischio idrogeologico finalizzati alla riapertura della strada pedonale denominata "Via dell'Amore"*.

Tale studio è stato basato sugli studi effettuati dalla Regione Liguria (riportati in allegato) relativi al moto ondoso di largo ed alla sua propagazione sottocosta.

La falesia oggetto del progetto esecutivo è sottostante una porzione della strada pedonale denominata Via dell'Amore nel Comune di Riomaggiore (SP), sito nel lato occidentale del Promontorio di Punta Mesco nella Riviera di Levante Ligure.

La lunghezza del tratto di scogliera è pari a circa 180 m.

La presente relazione si articola nelle seguenti parti principali:

- Analisi dei risultati dello studio ondoso di largo;
- Analisi dei risultati dello studio della propagazione ondosa sottocosta;
- Valutazione del moto ondoso di progetto sulle opere;

Per il dimensionamento dell'opera occorre fare riferimento alla Relazione di Calcolo delle Opere Marittime.

2. RISULTATI DELLO STUDIO ONDOSO DI LARGO

La relazione sul clima ondoso al largo degli ambiti costieri 16, 17 e 18 della Regione Liguria ha interessato le unità fisiografiche di Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra.

Tale arco di costa è compreso tra il promontorio di Punta Baffe ed il confine con la Regione Toscana.

Nell' ambito dello studio è stata effettuata la valutazione delle caratteristiche della distribuzione delle altezze d'onda e delle onde estreme in vari punti al largo, per diverse direzioni di provenienza, basandosi

sulle misure ondametriche eseguite dall'ondametro della Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.) di La Spezia nel periodo dal luglio 1989 al settembre 2006.

Per l'Ambito 16 è stato applicato un metodo di trasposizione geografica delle misure ondametriche dal punto di misura (al largo di La Spezia) ad un punto al largo individuato come rappresentativo dell'Ambito 16 medesimo. Per gli Ambiti 17 e 18, invece, il punto di localizzazione della boa ondametrica è stato valutato rappresentativo di entrambi gli ambiti e quindi il clima ondoso al largo è stato ricavato direttamente dai dati misurati dall'ondametro stesso.

E' stata quindi valutata l'esposizione geografica del sito al largo dell'Ambito 16, e del sito in cui è presente la boa ondametrica, rappresentativo dell'esposizione degli Ambiti 17 e 18, determinando in entrambi i casi i fetch geografici ed efficaci. A seguire sono state analizzate le serie di misure ondametriche poi trasposte, rappresentative dei due siti al largo. Infine è stato definito il clima meteomarino lungo l'arco di costa oggetto di studio, con la identificazione delle caratteristiche degli eventi estremi di moto ondoso da utilizzare nelle analisi successive.

I valori estremi ottenuti dalle elaborazioni dei dati ondametrici al largo della Spezia sono stati poi confrontati con i valori ottenuti dalle analisi ai valori estremi (EVA), condotte, per alcuni punti di hindcasting, dal (DICCA) Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università degli Studi di Genova.

Tali analisi hanno individuato gli eventi ondosi estremi attraverso l'altezza d'onda significativa Hs e il periodo di picco Tp, derivanti dall'hindcasting definito su tutto il Mar Mediterraneo, ad una risoluzione pari a 0.1° in longitudine e latitudine, sviluppato a partire dai campi di vento forniti dal Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) per il periodo 1979 – 2010 e dai dati del CFSv2 (Mentaschi et al., 2013) per il periodo 2011 – 2017.

Il comune di Riomaggiore (di interesse progettuale per il presente progetto) ricade negli ambiti 17-18 e di conseguenza i risultati dello studio del clima ondoso relativi al paraggio di progetto sono i seguenti:

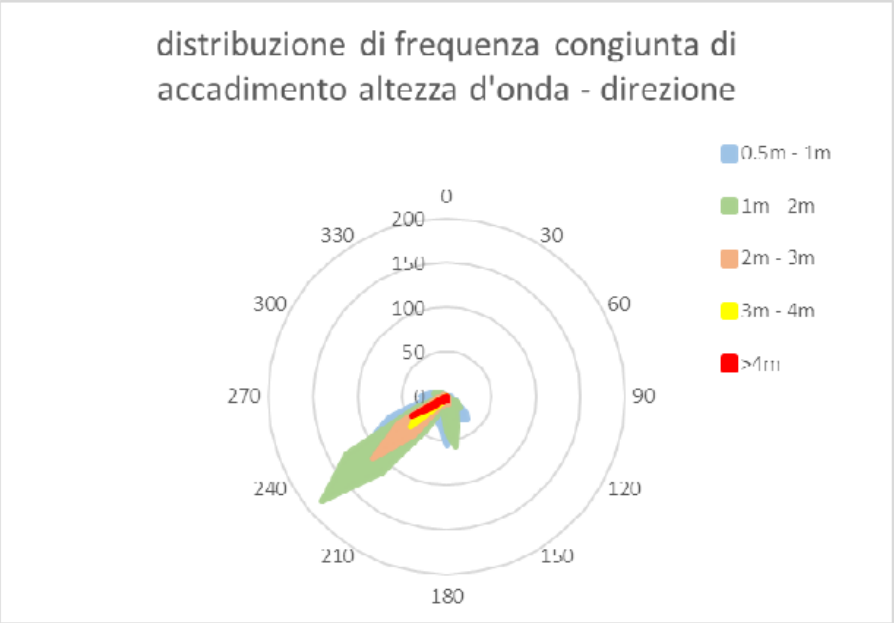


Figura 3.2 Rosa rappresentativa della distribuzione di frequenza altezza d'onda – direzione di provenienza, mediata su durata annuale per il sito rappresentativo degli Ambiti 17 e 18.

Gli studi sui valori ondosi estremi (EVA) hanno permesso di stimare l'altezza d'onda relativa a differenti periodi di ritorno, che spaziano da 1 anno a 1000 anni. Sono stati riportati di seguito in forma tabellare i risultati associati a diversi periodi di ritorno significativi per i diversi punti nell'area in esame (vedasi seguente tab. 5.1 in cui il punto più prossimo a Riomaggiore è il 331).

PUNTO	LON	LAT	$H_1[m]$	$H_5[m]$	$H_{25}[m]$	$H_{50}[m]$	$H_{100}[m]$	$H_{200}[m]$	
000263	9.2527	44.2200	4.82	5.46	6.25	6.52	6.77	7.00	Omni
			3.39	4.01	4.96	5.36	5.76	6.17	Set. 1
			4.78	5.42	6.20	6.47	6.70	6.92	Set. 2
000264	9.3800	44.2200	4.95	5.62	6.42	6.69	6.92	7.13	Omni
			3.17	3.80	4.72	5.10	5.47	5.83	Set. 1
			4.92	5.61	6.40	6.67	6.90	7.11	Set. 2
000295	9.3800	44.1300	5.07	5.74	6.61	6.93	7.22	7.49	Omni
			3.41	4.03	4.83	5.13	5.40	5.66	Set. 1
			5.05	5.73	6.61	6.93	7.22	7.49	Set. 2
000296	9.5073	44.1300	5.16	5.84	6.73	7.05	7.35	7.63	Omni
			3.34	3.98	4.88	5.23	5.57	5.90	Set. 1
			5.14	5.83	6.72	7.05	7.35	7.62	Set. 2
000297	9.6347	44.1300	5.01	5.68	6.57	6.90	7.21	7.50	Omni
			2.83	3.49	4.46	4.86	5.25	5.64	Set. 1
			4.99	5.67	6.56	6.89	7.20	7.48	Set. 2
000329	9.5073	44.0400	5.23	5.92	6.90	7.29	7.67	8.04	Omni
			3.37	4.01	4.88	5.20	5.51	5.80	Set. 1
			5.21	5.91	6.90	7.29	7.67	8.04	Set. 2
000330	9.6347	44.0400	5.01	5.67	6.66	7.07	7.48	7.88	Omni
			3.20	3.83	4.68	5.01	5.31	5.60	Set. 1
			5.00	5.66	6.66	7.07	7.48	7.88	Set. 2
000331	9.7620	44.0400	4.94	5.58	6.49	6.85	7.21	7.55	Omni
			3.12	3.76	4.57	4.85	5.12	5.36	Set. 1
			4.93	5.57	6.49	6.85	7.21	7.55	Set. 2
000332	9.8894	44.0400	4.12	4.59	5.21	5.45	5.68	5.89	Omni
			2.46	2.95	3.61	3.86	4.10	4.33	Set. 1
			4.12	4.58	5.21	5.45	5.68	5.89	Set. 2
000365	9.6347	43.9500	5.37	6.10	7.25	7.74	8.23	8.73	Omni
			3.31	3.93	4.80	5.14	5.47	5.78	Set. 1
			5.35	6.10	7.25	7.74	8.23	8.73	Set. 2

Tabella 5.1 Altezze d'onda relative ai diversi periodi di ritorno nei punti dell'area in esame

Di seguito è riportata anche la tabella relativa ai valori di periodo ondoso (tab. 5.2):

PUNTO	LON	LAT	$T_1[s]$	$H_5[s]$	$T_{25}[s]$	$T_{50}[s]$	$T_{100}[s]$	$T_{200}[s]$	
000263	9.2527	44.2200	10.08	10.44	10.87	11.01	11.15	11.27	Omni
			9.27	9.62	10.15	10.38	10.60	10.83	Set. 1
			10.05	10.41	10.84	10.99	11.11	11.23	Set. 2
000264	9.3800	44.2200	10.15	10.53	10.96	11.11	11.23	11.34	Omni
			9.15	9.50	10.02	10.23	10.44	10.64	Set. 1
			10.13	10.52	10.95	11.10	11.22	11.33	Set. 2
000295	9.3800	44.1300	10.22	10.59	11.06	11.23	11.39	11.53	Omni
			9.28	9.63	10.08	10.25	10.40	10.54	Set. 1
			10.21	10.58	11.06	11.23	11.39	11.53	Set. 2
000296	9.5073	44.1300	10.27	10.65	11.13	11.30	11.46	11.60	Omni
			9.24	9.60	10.11	10.31	10.50	10.68	Set. 1
			10.25	10.64	11.12	11.30	11.45	11.60	Set. 2
000297	9.6347	44.1300	10.18	10.56	11.04	11.22	11.38	11.53	Omni
			8.96	9.32	9.87	10.10	10.32	10.53	Set. 1
			10.17	10.55	11.04	11.21	11.38	11.53	Set. 2
000329	9.5073	44.0400	10.31	10.69	11.22	11.43	11.63	11.82	Omni
			9.26	9.62	10.11	10.29	10.46	10.62	Set. 1
			10.30	10.68	11.22	11.43	11.63	11.82	Set. 2
000330	9.6347	44.0400	10.18	10.55	11.09	11.31	11.52	11.73	Omni
			9.16	9.52	10.00	10.18	10.35	10.51	Set. 1
			10.18	10.55	11.09	11.31	11.52	11.73	Set. 2
000331	9.7620	44.0400	10.14	10.50	11.00	11.19	11.38	11.56	Omni
			9.12	9.48	9.93	10.10	10.24	10.38	Set. 1
			10.14	10.49	11.00	11.19	11.38	11.56	Set. 2
000365	9.6347	43.9500	10.39	10.78	11.36	11.59	11.81	12.03	Omni
			9.22	9.57	10.07	10.26	10.44	10.61	Set. 1
			10.38	10.78	11.36	11.59	11.81	12.03	Set. 2
000366	9.7620	43.9500	10.29	10.67	11.24	11.47	11.70	11.92	Omni
			9.17	9.51	9.97	10.13	10.28	10.43	Set. 1
			10.28	10.67	11.24	11.47	11.70	11.92	Set. 2
000367	9.8894	43.9500	10.03	10.36	10.83	11.02	11.21	11.38	Omni
			9.07	9.38	9.77	9.91	10.03	10.14	Set. 1
			10.03	10.36	10.83	11.02	11.21	11.38	Set. 2
000368	10.0167	43.9500	9.73	10.00	10.35	10.49	10.62	10.74	Omni
			8.86	9.12	9.46	9.57	9.68	9.77	Set. 1
			9.73	9.99	10.35	10.49	10.62	10.74	Set. 2

Tabella 5.2 Periodi di picco relativi alle altezze d'onda e ai diversi periodi di ritorno associati.

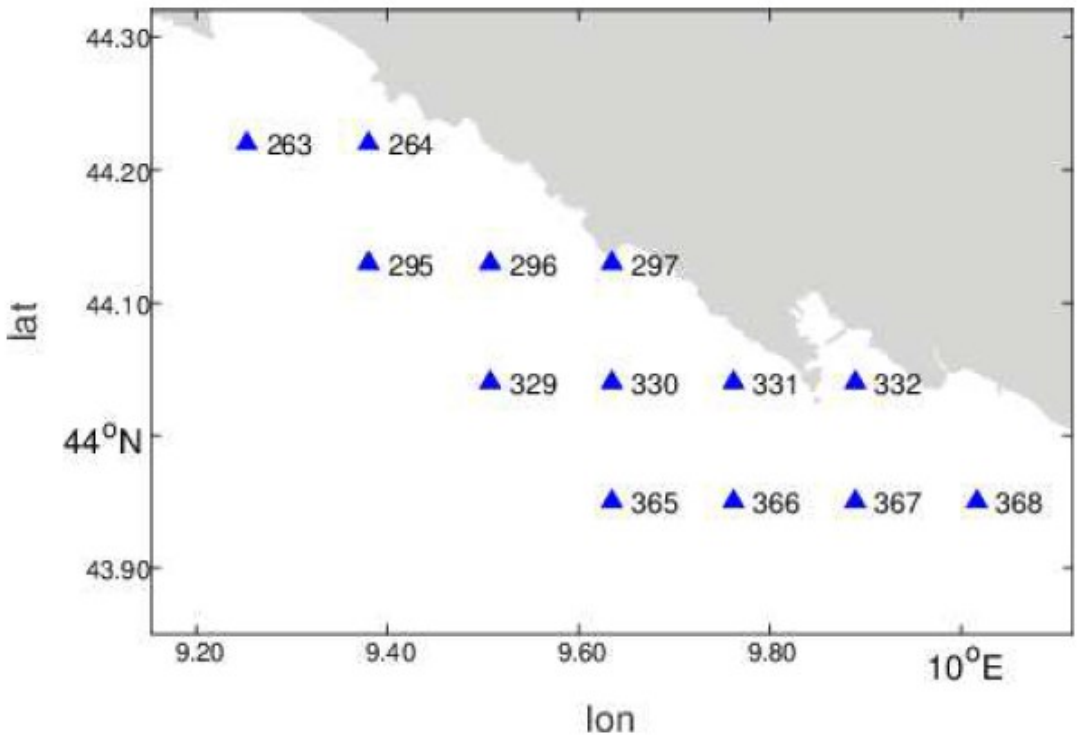


Figura 5.1 area di studio e localizzazione dei punti esaminati dall'hindcast

Per il punto di nostro interesse (331) è quindi possibile determinare i valori ondosi di interesse (evidenziati con freccia nelle tabelle precedenti) per il Tr = 25 anni pari a Hs = 6,49 m e Tp = 11,0 s.

Per il Tr = 21,6 anni (valore utilizzato nel progetto determinato secondo le Istruzioni del C.S.LL..PP) possono essere adottati i valori Hs = 6,3 m e Tp = 10,8 s.

Tale tempo di ritorno è compatibile con il tipo di opera (una semplice protezione del piede di una scarpata naturale), posata sul piede di una scogliera naturale e facilmente riparabile in caso di dislocazione dei massi naturali di mantellata.

3. RISULTATI DELLO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE ONDOSA

Nel presente paragrafo sono stati esaminati i risultati della relazione sulla propagazione del moto ondoso da largo verso costa effettuato dalla Regione Liguria.

Tale studio della propagazione ondosa è stato effettuato utilizzando il modello matematico MIKE 21 Spectral Waves (SW) di DHI (Danish Hydraulic Institute). Il modello numerico utilizzato permette di simulare l'effetto delle mareggiate di riferimento, determinate dall'analisi del clima ondoso al largo, sul litorale degli Ambiti Costieri 16, 17 e 18 in termini di distribuzione dei campi di altezza d'onda con i relativi tempi di ritorno probabili.

Il dato di ingresso al modello è rappresentato dall'onda al largo, come descritto nella "Relazione sul clima ondoso al largo". Sono state analizzate le onde caratteristiche per i periodi di ritorno pari a 1 anno, 50 anni e 100 anni e la loro propagazione da largo verso riva.

Per i vari periodi di ritorno, il modello numerico fornisce in uscita i dati caratteristici del moto ondoso in tutti i punti del dominio simulato, altezza, periodo e direzione dell'onda.

In una prima fase è stato fatto girare il modello a larga scala con le batimetrie dell'Istituto Idrografico della Marina, ottenendo una rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo. Successivamente sono stati creati dei modelli di dettaglio con rilievi batimetrici realizzati ad hoc ed è stata simulata la propagazione del moto ondoso sotto costa, utilizzando come dati di ingresso i valori caratteristici individuati con la simulazione a larga scala nei pressi di una batimetrica (boundary del modello di dettaglio) opportunamente stabilita.

Di seguito sono riportati i valori di input utilizzati per gli ambiti 17-18:

Zona di influenza compresa tra la foce del Torrente Parmignola e Punta Mesco						
Dir °N	T_R (anni)					
	1		50		100	
	H (m)	T_p (s)	H (m)	T_p (s)	H (m)	T_p (s)
160°N	2.4	6.9	5.3	10.4	5.7	10.8
180°N	2.0	6.3	4.8	9.8	5.2	10.3
220°N	5.1	10.2	8.1	12.9	8.6	13.3

Tabella 2.2 Valori di altezza d'onda significativa al largo (H), periodo (T_p) e direzione (dir °N), relativi ai tre periodi di ritorno considerati (T_R), derivati dall'analisi statistica dei dati misurati dall'ondametro della Spezia. Utilizzati come input per l'Ambito 17 e 18.

Di seguito sono riportati i Valori caratteristici delle onde nei pressi delle stazioni di calcolo.

L'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva all'interno delle unità fisiografiche è stata analizzata per i periodi di ritorno pari a 1, 50 e 100 anni; nelle Tabelle seguenti sono riportati i valori caratteristici delle onde nelle 41 stazioni, per i diversi periodi di ritorno.

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 160°			Direzione largo 180°			Direzione largo 220°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Marinella	AM18-1	2.2	6.4	161.9	1.9	6.0	180.8	4.0	8.2	218.5
Bocca di Magra	AM18-2	2.1	6.3	162.7	1.8	6.0	181.1	4.1	8.3	219.0
	AM18-3	2.1	6.3	163.4	1.8	6.0	181.4	4.0	8.3	218.7
	AM18-4	2.1	6.3	164.5	1.8	6.0	181.5	4.0	8.4	218.6
Fiascherino	AM18-5	2.1	6.3	163.7	1.8	6.0	181.4	3.8	8.5	217.3
	AM18-6	2.1	6.4	163.3	1.8	6.1	181.2	3.6	8.7	213.7
Lerici	AM18-7	2.1	6.4	163.8	1.8	6.1	180.0	2.7	9.1	207.3
Lerici	AM18-8	2.1	6.5	162.7	1.7	6.1	176.6	2.1	9.2	198.7
Le grazie	AM18-9	1.9	6.5	157.6	1.4	6.1	167.2	0.9	9.1	183.1
Palmaria est	AM18-10	1.9	6.6	157.0	1.4	6.2	167.5	1.1	9.3	183.9
Palmaria est	AM18-11	1.8	6.6	155.2	1.3	6.2	168.6	1.9	9.7	196.8
Palmaria est	AM18-12	1.4	6.6	148.1	1.2	6.2	175.5	2.7	9.8	186.2
Palmaria nord	AM18-13	0.5	6.8	180.6	0.7	6.2	186.6	2.5	9.7	187.0
	AM17-14	1.3	6.8	182.2	1.5	6.3	191.3	4.6	9.8	222.0
Schiara	AM17-15	1.9	6.8	171.6	1.8	6.3	183.6	4.6	10.0	221.5
Nacchè	AM17-16	1.5	6.8	182.7	1.6	6.3	190.5	4.6	10.0	224.1
Canneto	AM17-17	1.9	6.8	172.5	1.8	6.3	184.0	4.6	10.0	220.6
Riomaggiore	AM17-18	1.4	6.9	183.3	1.6	6.3	190.7	4.4	10.1	223.5
	AM17-19	1.6	6.9	179.8	1.7	6.3	188.3	4.7	10.0	220.1
	AM17-20	1.7	6.9	174.8	1.8	6.3	185.3	4.7	10.0	219.0
Corniglia	AM17-21	1.9	6.8	173.5	1.8	6.3	184.6	4.7	10.0	222.3
	AM17-22	1.8	6.8	173.1	1.8	6.3	183.8	4.7	10.0	213.8
Guvano Levante	AM17-23	1.7	6.8	174.7	1.8	6.3	185.1	4.5	10.0	219.7
Guvano Ponente	AM17-24	1.9	6.9	172.6	1.8	6.3	183.8	4.7	10.0	219.9
	AM17-25	1.8	6.9	173.5	1.8	6.3	184.3	4.6	10.0	218.9
Vernazza	AM17-26	1.9	6.9	174.2	1.8	6.3	184.7	4.5	10.0	220.6
Monterosso centro	AM17-27	2.1	6.9	165.2	1.8	6.3	180.1	4.0	10.0	203.3
Fegina	AM17-28	2.1	6.9	165.7	1.8	6.3	179.7	2.9	10.1	197.7
Lega navale	AM17-29	2.0	6.8	159.4	1.6	6.2	172.2	2.4	10.0	176.5

Tabella 3.1.1: Periodo di ritorno 1 anno - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 160°			Direzione largo 180°			Direzione largo 220°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Marinella	AM18-1	4.6	8.4	166.4	4.2	8.1	184.1	5.4	9.4	219.2
Bocca di Magra	AM18-2	4.3	8.1	168.0	4.0	7.9	184.8	5.5	9.3	219.4
	AM18-3	4.4	8.0	169.7	4.0	7.9	185.7	5.5	9.5	220.0
	AM18-4	4.2	8.0	171.5	4.0	7.9	186.3	5.5	9.6	219.6
Fiascherino	AM18-5	4.4	8.0	171.8	4.0	8.0	186.6	5.3	9.8	218.7
	AM18-6	4.4	8.1	171.8	4.0	8.2	186.8	5.4	10.2	215.4
Lerici	AM18-7	4.3	8.3	172.0	3.7	8.4	184.7	4.0	10.8	208.3
Lerici	AM18-8	4.1	8.5	169.3	3.4	8.5	180.3	3.1	11.0	199.1
Le grazie	AM18-9	3.3	8.4	159.3	2.3	8.4	166.4	1.1	11.0	179.0
Palmaria est	AM18-10	3.6	8.7	161.1	2.5	8.7	169.2	1.7	11.4	186.4
Palmaria est	AM18-11	3.2	8.9	161.9	2.4	9.0	178.5	3.3	11.9	208.5
Palmaria est	AM18-12	2.5	9.1	161.2	2.3	9.3	183.3	4.1	12.0	195.3
Palmaria nord	AM18-13	1.3	9.8	226.0	1.6	9.4	227.1	3.6	12.0	234.3
	AM17-14	2.3	9.9	191.5	2.8	9.5	199.6	6.9	12.1	222.5
Schiara	AM17-15	3.9	9.9	181.0	4.0	9.5	191.1	7.2	12.4	221.2
Nacchè	AM17-16	3.2	10.0	192.5	3.6	9.6	199.2	7.2	12.4	225.8
Canneto	AM17-17	3.7	10.1	184.8	3.9	9.6	193.1	7.4	12.5	222.3
Riomaggiore	AM17-18	2.8	10.2	195.4	3.4	9.7	201.2	7.3	12.6	225.7
	AM17-19	3.4	10.2	184.8	3.9	9.7	192.1	7.4	12.6	219.4
	AM17-20	3.2	10.1	185.9	3.7	9.6	193.4	7.2	12.5	218.8
Corniglia	AM17-21	3.5	10.1	186.5	3.9	9.6	194.4	7.4	12.5	222.9
	AM17-22	3.4	10.2	183.3	3.8	9.7	190.8	7.2	12.6	215.3
Guvano Levante	AM17-23	3.3	10.1	189.5	3.7	9.6	195.8	6.8	12.5	220.8
Guvano Ponente	AM17-24	3.5	10.2	184.9	3.9	9.6	192.5	7.4	12.5	220.4
	AM17-25	3.5	10.2	186.6	3.9	9.6	193.8	7.1	12.5	219.9
Vernazza	AM17-26	3.6	10.2	186.6	3.9	9.6	194.2	7.3	12.5	221.6
Monterosso centro	AM17-27	4.1	10.2	173.7	4.2	9.7	183.2	6.6	12.6	204.3
Fegina	AM17-28	4.1	10.2	174.0	4.1	9.7	182.6	5.1	12.7	200.3
Lega navale	AM17-29	4.0	10.3	163.4	3.8	9.7	170.9	4.0	12.7	181.2

Tabella 3.1.3: Periodo di ritorno 50 anni - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 160°			Direzione largo 180°			Direzione largo 220°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Marinella	AM18-1	4.8	8.6	167.0	4.5	8.3	184.6	5.4	9.5	219.2
Bocca di Magra	AM18-2	4.6	8.2	168.9	4.3	8.2	185.5	5.6	9.5	219.5
	AM18-3	4.6	8.2	170.7	4.3	8.2	186.4	5.6	9.6	220.2
	AM18-4	4.5	8.1	172.5	4.3	8.1	187.1	5.6	9.7	219.9
Fiascherino	AM18-5	4.7	8.1	172.9	4.3	8.2	187.4	5.4	9.9	219.1
	AM18-6	4.7	8.3	173.0	4.3	8.4	187.6	5.5	10.4	215.9
Lerici	AM18-7	4.6	8.5	172.9	3.9	8.7	185.3	4.3	11.1	208.6
Lerici	AM18-8	4.4	8.7	170.0	3.6	8.8	180.7	3.3	11.3	199.2
Le grazie	AM18-9	3.5	8.6	159.7	2.4	8.7	166.5	1.2	11.3	178.9
Palmaria est	AM18-10	3.8	8.9	161.5	2.7	9.0	169.3	1.8	11.7	186.3
Palmaria est	AM18-11	3.4	9.2	162.7	2.5	9.4	179.8	3.5	12.2	208.5
Palmaria est	AM18-12	2.7	9.4	162.7	2.5	9.7	183.9	4.2	12.3	195.0
Palmaria nord	AM18-13	1.4	10.1	226.5	1.7	9.8	227.8	3.8	12.4	234.4
	AM17-14	2.5	10.2	192.3	3.1	9.9	200.4	7.4	12.4	222.5
Schiara	AM17-15	4.2	10.2	182.2	4.3	10.0	192.3	7.6	12.7	221.4
Nacchè	AM17-16	3.4	10.3	193.6	3.9	10.0	200.4	7.5	12.7	226.0
Canneto	AM17-17	3.9	10.4	186.0	4.2	10.1	194.3	7.8	12.8	222.5
Riomaggiore	AM17-18	3.1	10.6	196.6	3.7	10.2	202.4	7.7	13.0	225.9
	AM17-19	3.7	10.6	185.9	4.2	10.2	193.1	7.8	13.0	219.5
	AM17-20	3.4	10.5	186.9	4.0	10.1	194.4	7.4	12.8	218.8
Corniglia	AM17-21	3.7	10.5	187.8	4.2	10.1	195.7	7.8	12.9	223.1
	AM17-22	3.7	10.5	184.4	4.1	10.1	191.9	7.6	12.9	215.3
Guvano Levante	AM17-23	3.5	10.5	190.7	3.9	10.1	196.9	7.1	12.9	220.8
Guvano Ponente	AM17-24	3.8	10.5	186.1	4.2	10.1	193.6	7.8	12.9	220.5
	AM17-25	3.7	10.5	187.8	4.2	10.1	195.0	7.5	12.9	220.0
Vernazza	AM17-26	3.8	10.5	187.8	4.2	10.1	195.4	7.7	12.9	221.7
Monterosso centro	AM17-27	4.3	10.6	174.7	4.6	10.2	183.9	7.0	13.0	204.2
Fegina	AM17-28	4.4	10.6	175.0	4.5	10.2	183.2	5.4	13.0	200.3
Lega navale	AM17-29	4.2	10.7	163.9	4.1	10.2	170.8	4.3	13.1	180.9

Tabella 3.1.5: Periodo di ritorno 100 anni - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambiti Costieri 17-18

4. MOTO ONDOSO DI PROGETTO

E' stato valutato il moto ondoso di progetto basandosi sui risultati dei due studi meteomarini sopra descritti. I valori desumibili dallo studio di propagazione ondosa non possono essere utilizzati direttamente, essendo il tempo di ritorno valutato nei calcoli secondo le Istruzioni del C.S.LL.PP. pari a 21,6 anni.

Il Tempo di ritorno statistico adottato per le azioni ondose di progetto è stato valutato seguendo, come detto, le Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime fornite dal C.S.LL.PP. adottando il livello di sicurezza 1 richiesto per opere di tale natura (infrastruttura ad uso specifico, difese costiere) che fornisce una vita utile pari a Tv = 15 anni; considerando un coefficiente pari a pf = 0,50 (valido per distruzione incipiente, essendo un'opera a gettata di natura flessibile e riparabile, con rischio limitato per la vita umana e ripercussione economica bassa) si ottiene un tempo di ritorno pari a circa Trp = Tv/(-ln(1- pf)) = 21,6 anni.

Di conseguenza sono stati adottati i valori relativi al Trp = Tr (tempo di ritorno) che sono reperibili nello studio di largo più prossimo (Tr = 25 anni), i quali sono stati poi leggermente ridotti per tenere conto del tempo di ritorno inferiore.

In conclusione l'altezza d'onda di progetto adottata per il dimensionamento della scogliera radente è pari a:

Hs = 6,3 m e Tp = 10,8 s

Il valore Tm = 8 s è stato invece desunto dalle correlazioni riportate nell'Atlante delle onde nei mari italiani (edito a cura dell'Univ di Roma Tre e dell'APAT) facendo riferimento alla boa ondometrica di La Spezia.

Infine sono state applicate, per un utile confronto, le formulazioni dovute a Kamphuis utilizzate per determinare l'altezza d'onda frangente limitata dai fondali, tenendo conto delle variazioni locali del livello marino determinate nel paragrafo che segue.

4.1. Variazioni del livello marino

Per una corretta individuazione del livello medio marino in occasione degli eventi ondosi più significativi è stato valutato il sovralzo idrico complessivo dovuto a cause diverse (principalmente la marea astronomica e "meteorologica" è il sovralzo di tempesta "stormsurge"), in particolare:

Marea astronomica

Le ampiezze ed i tempi di marea giornalieri sono prevedibili con esattezza per un gran numero di località e sono pubblicati annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare di Genova sulle "Tavole di Marea". Per il caso in esame si possono ben utilizzare i dati forniti per il vicino porto di Genova, i massimi dislivelli positivi raggiungono i valori di +/-0.20 m rispetto al livello medio del mare.

Variazioni meteorologiche di livello marino

Dislivello barico

Un poco maggiore risulta invece il massimo contributo che può essere fornito da variazioni della pressione atmosferica. E' noto infatti che un abbassamento barico di 1 mb rispetto al valore normale (1013 mb) produce un innalzamento di circa 1 cm del livello marino e viceversa.

Nell'area di Riomaggiore i valori misurati minimi e massimi della pressione (legati al passaggio dei cicloni ed anticicloni) risultano pari a 978 mb e 1044 mb.

Ne consegue quale effetto "barico" un massimo sovralzo marino di 0,35 m ed un massimo abbassamento del livello di 0,31 m. In condizioni estreme eccezionali tali valori possono aumentare ancora di qualche centimetro.

Sovralzo di vento (storm surge)

Trascurabile, invece, risulta il contributo del vento nella zona di Riomaggiore.

Infatti il sovralzo di vento dovuto all'accumulo d'acqua sottocosta per azione di venti foranei permanenti è contenuto in pochi centimetri data la limitatissima estensione della piattaforma continentale: l'isobata -200 si trova a soli 11 Km dalla costa.

Il calcolo del massimo sovralzo di vento è stato effettuato mediante una nota formulazione analitica implicita: $S = \{Kp\ Lp\ U2/[g\ (D - d - S)]\}\ \ln [D/(d + S)]$

dove:

U = velocità del vento persistente (m/s);

D = profondità limite della piattaforma continentale (200 m);

Lp = estensione della piattaforma (distanza tra d e D nella direzione del vento) (m);

d = profondità ove si calcola il sovralzo (10 m);

g = accelerazione di gravità (9,81 m/s2);
Kp = coefficiente pari a 3 x 10-6

Considerando l'azione di un vento costante diretto verso la costa con velocità di 28 m/s ed un'estensione della piattaforma continentale (fondale -200 m) pari a 13 km, si è ricavato un innalzamento massimo del livello del mare in corrispondenza delle opere progettate pari a 0,04 m (+4cm).

In conclusione, considerando che in generale non si verifica la piena concomitanza per i sovralzi di carattere meteorologico ed astronomico, si può cautelativamente assumere una riduzione del 20% della somma dei termini di sovralzo meteorologico a quelli astronomici.
In definitiva, per i contributi positivi e negativi, si ottengono i seguenti massimi dislivelli rispetto al medio mare:
Sovralzo Su = +0.20+ 0.80 (0.35+0.04) = +0.51 m valore arrotondato a +0,50 m
Abbassamento Sd = -0.20 + 0.80 (-0.31)= -0.45 m

4.2. Onda di progetto derivante dalle formulazioni di Kamphuis

A seguito della individuazione di tutti i dati di ingresso è stato possibile identificare l'onda di progetto con la quale dimensionare la mantellata della scogliera radente applicando la foruìmulazione dovuta a Komplus (1991).
Di seguito è riportato il tabulato di calcolo utilizzato per il calcolo dell'altezza d'onda frangente secondo le formule di Kamphuis:

Calcolo dell'altezza d'onda frangente con Kamphuis (1991)				Riomaggiore Via Amore
Risoluzione per tentativi di un'espressione implicita in funzione di L				
$L = gT^2/2\pi \tanh(2\pi d/L)$				
Lunghezza d'onda al largo	Lo (m) = $1,56T^2$ =	181,9584		
Lunghezza d'onda (valore iniziale di calcolo)	Lin (m) =	96,20		
Periodo d'onda	Tp (s) =	10,8	Tr = 21,6 anni	

Profondità	d (m) =	9	sovralzo incluso	
	$gT^2/2\pi$ =	182,1166		
	tanh(2πd/L) =	0,528316		
Lunghezza d'onda (valore finale risultante)	Lfin (m) =	96,22	L =	96,2

Lfin deve essere (circa) uguale ad Lin; in tal caso si ottiene il valore ricercato di L

Lpb (m) = 96,2

Kamphuis 1: $\mathbf{H_{sb}}$=0,095$e^{4m}L_{pb}\tanh(2\pi d_b/L_{pb})$= **8,11 m**

Kamphuis 2: H_{sb}=0,56$e^{3,5m}d_b$= 7,94 m

ove:

m=pendenza effettiva della spiaggia = 0,130

L'altezza d'onda massima frangente ricavabile è risultata pari a H_{sb} = 8,11 m, valore superiore a quello di progetto desumibile dagli studi della Regione Liguria che quindi risultano non limitati da fenomeni dissipativi di frangimento ondoso e possono quindi essere adottati nei calcoli di dimensionamento per i quali si rimanda alla Relazione di Calcolo delle Opere Marittime.

5. CONCLUSIONI

Il presente studio meteomarino è stato basato, seguendo le indicazioni ricevute dalla Committenza, sui risultati desumibili dai due studi della Regione Liguria e segnatamente: "Relazione sul CLIMA Ondoso al Largo (RO)" e "Relazione sulla Modellazione di Propagazione del Moto Ondoso da Largo verso costa (RM)" relativamente ai due ambiti costieri 17 e 18.

Tali studi sono allegati di seguito alla presente relazione.

I valori progettuali adottati (per Tr = 21,6 anni) sono: Hs = 6,3 m; Tp = 10,8 s e Tm = 8 s

6. BIBLIOGRAFIA

- U.S. CORP OF ENGINEERS – Coastal Engineering Manual - Coastal Engineering Research Center, Washington D.C., 2001.
- U.S. CORP OF ENGINEERS - Shore Protection Manual - Coastal Engineering Research Center, Washington D.C., 1984.
- ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA MILITARE – Tavole di marea 1998 – Genova.
- ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA MILITARE – Carte nautiche n. 330 (scala1:1.700.000), n. 909 (scala 1:250.000), n. 3 (scala 1:100.000) - Genova
- Noli A. ed altri – Opere esterne di difesa dei porti – Esa ed. Roma, 1980.
- Kamphuis, J.W. 1991. Alongshore sediment transport rate. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 117, p. 624-640
- Bolatti Guzzo, L. and Marconi, R. (1991). Flume Tests on a Physical Model of a Berm
- Breakwater. 3rd International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Mombasa, Kenya

7. ALLEGATI

1) Regione Liguria – Piano di tutela dell'ambiente marino e costiero – Ambiti costieri 16 – 17 – 18 Unità fisiografiche Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra. Art. 41 Legge Regionale n° 20/2006 - Relazione sul clima ondoso al largo (RO).

2) Regione Liguria – Piano di tutela dell'ambiente marino e costiero – Ambiti costieri 16 – 17 – 18 Unità fisiografiche Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra. Art. 41 Legge Regionale n° 20/2006 - Relazione sulla modellazione di propagazione del moto ondoso da largo verso costa (RM).

REGIONE LIGURIA

PIANO DI TUTELA DELL'AMBIENTE MARINO E COSTIERO

AMBITI COSTIERI 16-17-18

Unità fisiografiche Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra

ART. 41 LEGGE REGIONALE N° 20/2006

RELAZIONE SUL CLIMA ONDOSO AL LARGO (RO)

Indice

1.	Introduzione	3
2.	Inquadramento geografico dei paraggi	4
3.	Definizione del clima ondoso al largo	9
3.1.	Metodo di trasposizione geografica	9
3.2.	Analisi della serie di misure ondametriche	10
4.	Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso	18
4.1.1.	Analisi dei risultati	20
5.	Eventi estremi di moto ondoso derivanti dall'analisi di hindcast	22

1. Introduzione

Nel presente elaborato è riportato lo studio del clima di moto ondoso lungo l'arco di costa compreso tra il promontorio di Punta Baffe ed il confine con la Regione Toscana, analizzato per la redazione del Piano di tutela dell'Ambiente Marino e Costiero per gli Ambiti 16, 17 e 18.
Per la valutazione delle caratteristiche della distribuzione delle altezze d'onda e delle onde estreme in un punto al largo, per le diverse direzioni di provenienza, occorre la disponibilità di dati strumentali e/o di dati ricostruiti che utilizzano modelli indiretti. Il tratto di costa ligure compreso negli Ambiti 16, 17 e 18 può essere descritto dai rilievi della boa ondametrica della Spezia.
Lo studio è stato condotto sulla base delle misure ondametriche eseguite dall'ondametro della Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.) di La Spezia ed ha come obiettivo la definizione delle caratteristiche del moto ondoso lungo l'arco di costa che si estende da Punta Baffe al confine con la regione Toscana, che comprende gli Ambiti 16, 17 e 18.
A tal fine per l'Ambito 16 è stato applicato un metodo di trasposizione geografica delle misure ondametriche dal punto di misura (al largo di La Spezia) ad un punto al largo individuato come rappresentativo dell'Ambito 16. Mentre per gli Ambiti 17 e 18 il punto di localizzazione della boa ondametrica è di fatto rappresentativo di entrambi gli ambiti e quindi il clima ondoso al largo è stato ricavato direttamente dai dati misurati dall'ondametro stesso.
Si è proceduto pertanto ad individuare in prima analisi l'esposizione geografica del sito al largo, individuato come rappresentativo dell'esposizione dell'Ambito 16, e del sito in cui è presente la boa ondametrica, rappresentativo dell'esposizione degli Ambiti 17 e 18, determinando in entrambi i casi i fetch geografici ed efficaci. Quindi sono state analizzate le serie di misure ondametriche misurate e poi trasposte, rappresentative dei due siti al largo; ed è stato definito il clima meteomarino lungo l'arco di costa oggetto di studio, con definizione delle caratteristiche degli eventi estremi di moto ondoso da utilizzare nelle analisi successive propedeutiche alla stesura del Piano di Tutela dell'ambiente Marino e Costiero.

I valori estremi ottenuti dalle elaborazioni dei dati misurati dalla boa ondametrica al largo della Spezia, sono stai confrontati con i valori ottenuti dalle analisi ai valori estremi (EVA), condotte, per alcuni punti hindcast, dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli studi di Genova. Queste analisi propongono la caratterizzazione di mareggiate estreme, tramite altezza d'onda significativa H_s e periodo di picco T_p, derivanti dall'hindcast definito su tutto il Mar Mediterraneo, ad una risoluzione pari a 0.1° in longitudine e latitudine, sviluppato a partire dai campi di vento forniti dal Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) per il periodo 1979 – 2010 e dai dati del CFSv2 (Mentaschi et al., 2013) per il periodo 2011 – 2017.
I valori estremi delle onde, prodotti dalle analisi dell'Università degli studi di Genova, sono stai validati e verranno utilizzati nelle analisi propedeutiche alla stesura del Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero degli ambiti 16, 17 e 18 come confronto con i metodi tradizionali solitamente utilizzati.

2. Inquadramento geografico dei paraggi

Settori di traversia – fetch geografici ed efficaci

La traversia geografica di un paraggio costiero è definita come la porzione di mare dalla quale può potenzialmente giungere il moto ondoso. La traversia è spesso divisa in due settori (principale e secondario) in funzione delle lunghezze delle aree potenzialmente soggette all'azione diretta del vento. Tali lunghezze (fetch geografici) sono definite traguardando la costa limitrofa lungo la direzione di provenienza del vento. Invece il fetch efficace è definito come la porzione di mare che, sotto l'azione diretta del vento, costituisce l'area di generazione dell'evento di moto ondoso, tenendo debito conto delle lunghezze associate a direzioni laterali rispetto a quella principale e quindi anche della larghezza dell'area di generazione.
Per quanto riguarda l'analisi dell'esposizione geografica della porzione di mare situata al largo dell'Ambito 16 è stato individuato un punto, ritenuto significativo localizzato in zona a Sud, avente coordinate geografiche pari a 44° 08' - 9° 28',6 (come mostrato dal punto in blu nella figura seguente), dove sono state trasposte le misure di moto ondoso rilevate dall'ondametro della Spezia. Per quanto riguarda l'analisi dell'esposizione geografica della porzione di mare al largo degli Ambiti 17 e 18 è stato considerato come rappresentativo il punto di localizzazione della boa ondametrica, avente coordinate geografiche pari a 43° 55',7 - 9° 49',6 (come mostrato dal punto rosso nella figura seguente).

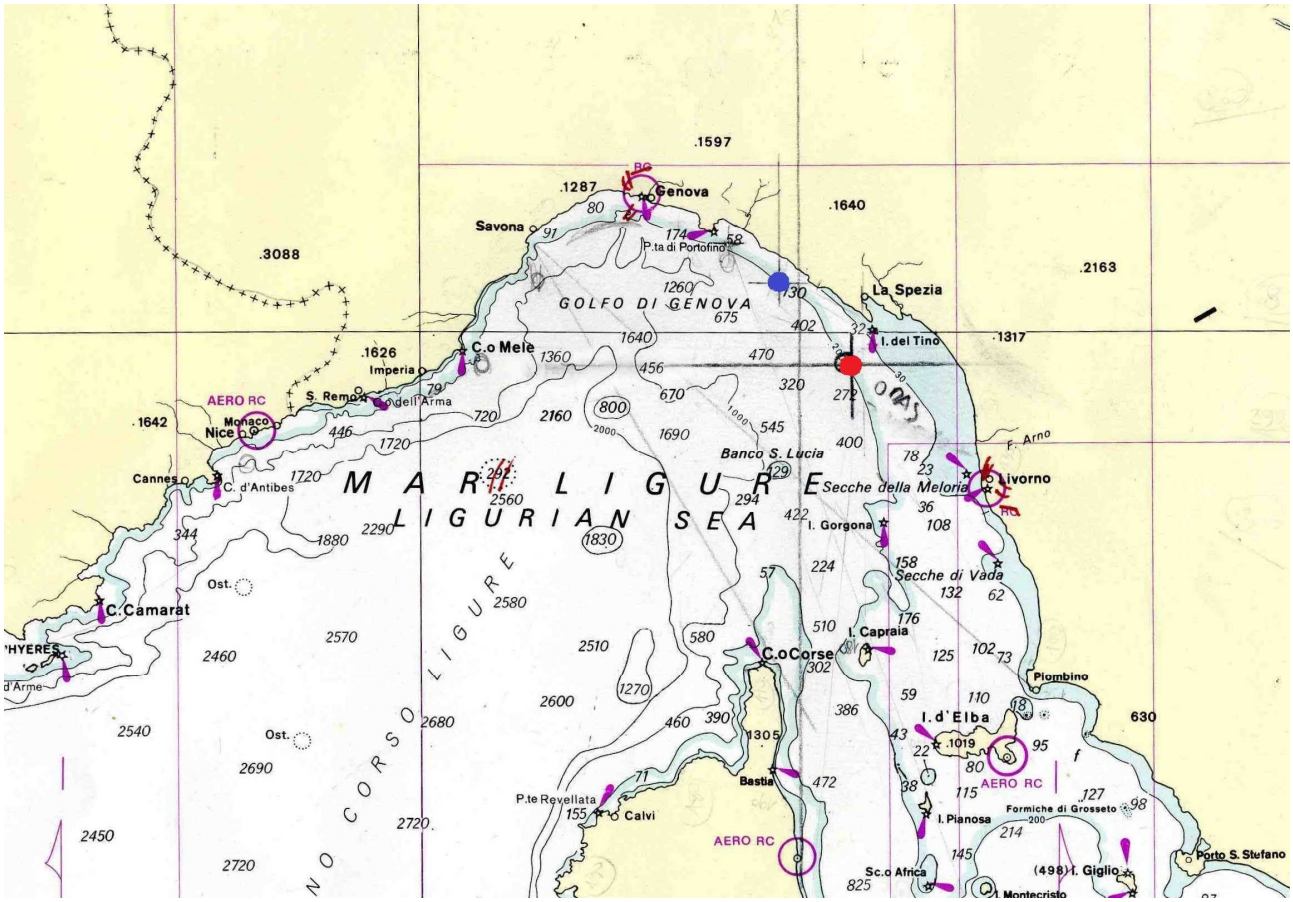


Figura 2.1 Localizzazione dei siti al largo rappresentativi degli ambiti 16, 17 e 18.

I valori dei fetch geografici sono stati misurati sulla carta nautica, a proiezione di Mercatore, per le direzioni presenti nel settore significativo avente ampiezza 100°-300°, escludendo le direzioni non significative per la propagazione del moto ondoso. Inoltre per una più corretta determinazione del fetch efficace, le lunghezze della traversia geografica sono state limitate ad una estensione massima

di 500 km, in ragione delle massime dimensioni delle perturbazioni meteorologiche agenti sui mari del bacino Mediterraneo.
Per completare l'inquadramento geografico del paraggio è necessario determinare i valori dei fetch efficaci sulla base dei valori dei fetch geografici individuati.
Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata; in questo modo i fetch efficaci consentono di tenere conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di ±45° (secondo il metodo di Saville) rispetto alla direzione media di azione del vento.
Il calcolo del fetch efficace è stato eseguito secondo l'espressione di Saville (SPM, 1975):

$$F_{eff} = \frac{\sum_{\varphi i=\varphi w-\theta}^{\varphi w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\varphi i - \varphi w)}{\sum_{\varphi i=\varphi w-\theta}^{\varphi w+\theta} \cos^{n}(\varphi i - \varphi w)}$$

dove:

F_{eff} = lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w;

F_i = lunghezza del fetch geografico, relativa alla direzione i-esima ϕ_i, espressa in chilometri;

ϕ_w = direzione media espressa in gradi (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;

ϕ_i = direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w (secondo il metodo di Saville $\theta = 45°$);

θ = ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso;

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

Vengono riportati nelle tabelle sottostanti, *tab.2.1* e *tab.2.2* rispettivamente, i valori dei fetch geografici ed efficaci del sito della boa ondametrica R.O.N. al largo della Spezia e del sito al largo dell'Ambito 16. Nelle successive figure vengono riportati i confronti, in forma grafica dei fetch geografici ed efficaci nei due siti considerati.

Boa ondametrica della Spezia coordinate geografiche: 43° 55',7 - 9° 49',6		
GRADI °	**Fetch geografico [km]**	**Fetch efficace [km]**
100	33	24
110	37	35
120	44	47
130	48	59
140	61	72
150	126	84
160	137	106
170	137	134
180	100	170
190	156	211
200	115	250
210	500	282
220	500	301
230	500	307
240	500	297
250	304	273
260	207	236
270	126	188
280	124	142
290	117	103
300	102	70

Tabella 2.1 Valori dei fetch geografici ed efficaci in corrispondenza della boa ondametrica della Spezia considerati per gli Ambiti 17 e 18.

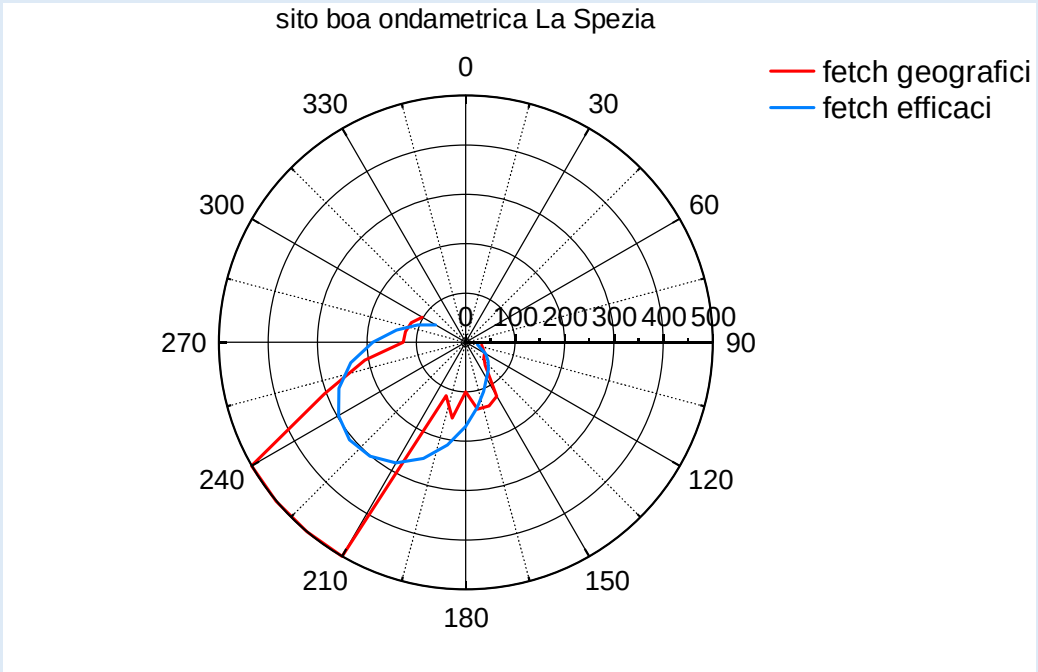


Figura 2.2 Confronto fetch geografici ed efficaci in corrispondenza della boa ondametrica della Spezia – coordinate geografiche 43°55',7 – 9°49',6.

Sito davanti all'Ambito16 (Punta Baffe - Punta Mesco) Coordinate geografiche 44° 08' - 9° 28',6		
GRADI °	**Fetch geografico [km]**	**Fetch efficace [km]**
100	19	35
110	33	52
120	74	81
130	87	107
140	135	133
150	228	156
160	159	184
170	500	213
180	139	243
190	161	274
200	211	297
210	500	309
220	500	312
230	500	296
240	500	277
250	219	244
260	106	201
270	96	152
280	85	108
290	74	73
300	63	45

Tabella 2.2 Valori dei fetch geografici ed efficaci in corrispondenza del sito davanti all'Ambito 16.

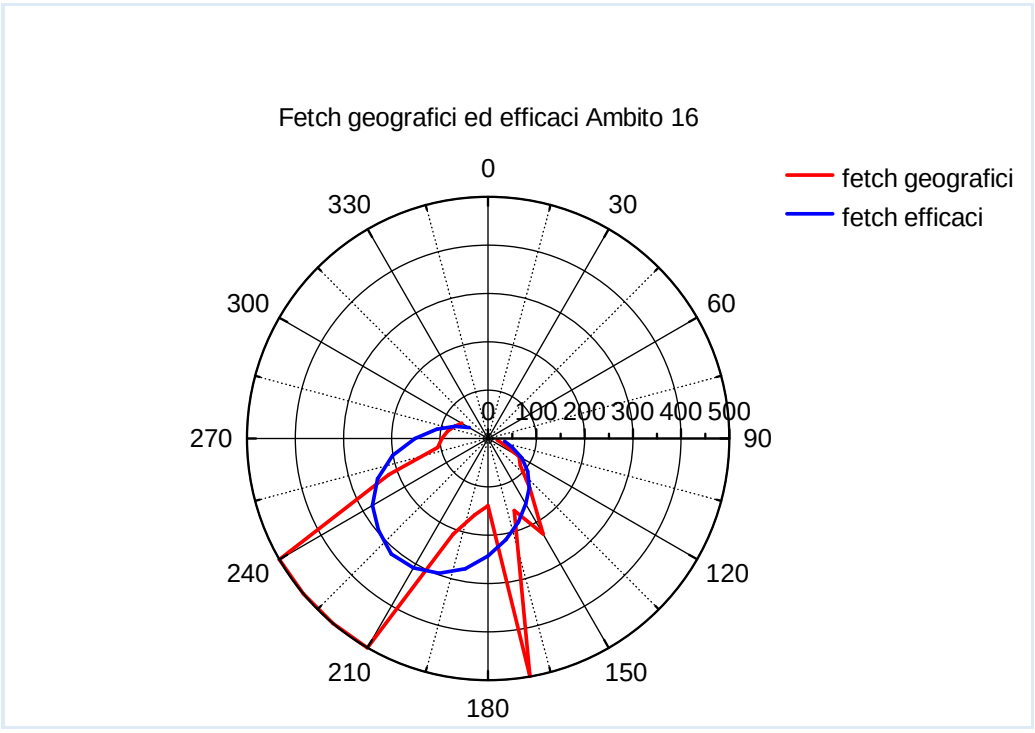


Figura 2.3 Confronto fetch geografici ed efficaci in corrispondenza del sito davanti all'Ambito 16 – coordinate geografiche 44°08' – 9°28',6.

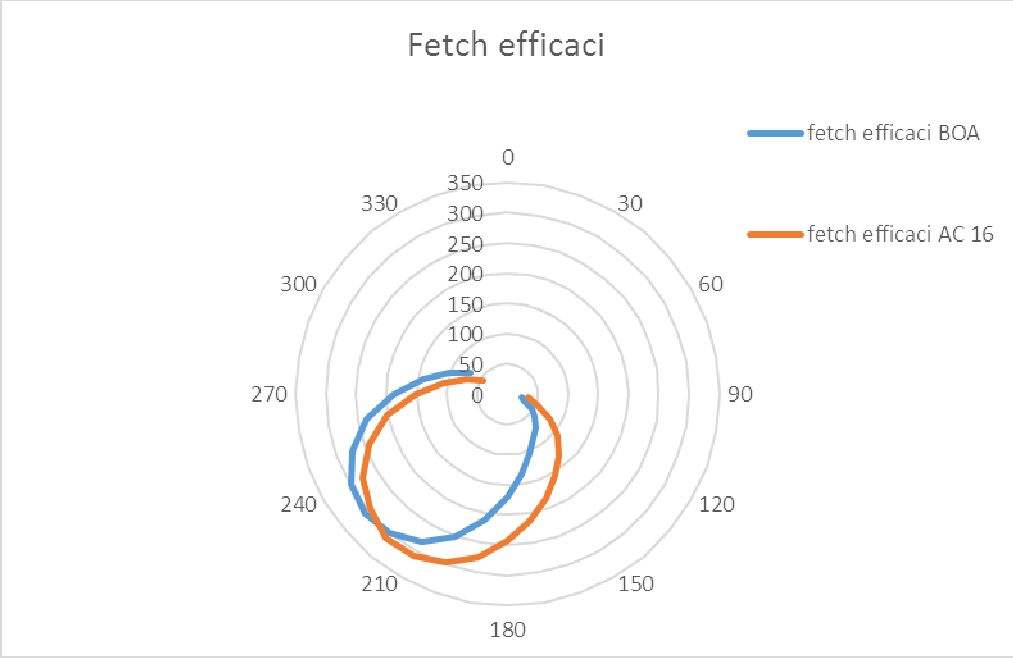


Figura 2.4 Confronto dei fetch efficaci in corrispondenza dell'ondametro della Spezia e del sito davanti all'Ambito 16.

Da un'analisi di raffronto dei fetch si può vedere come per l'Ambito 16 acquisti maggiore importanza il settore tra 150°N e 180°N, rispetto alla localizzazione della boa ondametrica della Spezia.
Il tratto di costa degli Ambiti 17 e 18, compreso da Punta Mesco al confine della Regione Toscana è esposto a fetch illimitato per un settore compreso tra 210°N e 240°N, con fetch importanti anche nel settore tra 240°N e 270°N e fetch molto limitati nel settore 150°N – 180°N.
Il tratto di costa dell'Ambito 16 è compreso nel tratto di costa che va da Punta Baffe a Punta Mesco, presentando un orientamento ed un'esposizione della costa omogenea. Il tratto costiero è esposto a fetch illimitato per un settore compreso tra circa 210°N e 240°N ed un fetch molto ampio per il settore intorno alla direzione di 170°N.

Per l'Ambito 17 e 18 i valori più alti della lunghezza del fetch geografico si hanno secondo le direzioni tra i 210°N e i 240°N per le quali la lunghezza del fetch geografico risulta superiore ai 500 Km. Il fetch efficace massimo ottenuto, secondo l'applicazione della formula di Saville, risulta quello relativo ai mari con direzione di provenienza 230°N.
Per l'Ambito 16 i valori più alti della lunghezza del fetch geografico si hanno lungo la direzione 170°N e nel settore tra i 210°N e i 240°N per le quali la lunghezza del fetch geografico risulta superiore ai 500 Km. Il fetch efficace massimo ottenuto, secondo l'applicazione della formula di Saville, risulta pari a 312 Km ed è riferito al settore di libeccio (220°N).

Il settore da libeccio al largo risulta il più influente, data l'orientazione della costa dell'Ambito 16 e la disposizione del fondale sotto costa, le onde provenienti dal settore 220° subiranno deboli effetti dissipativi per rifrazione nella propagazione verso costa. Analogamente gli Ambiti 17 e 18 per l'orientamento costiero sono interessati maggiormente da mare proveniente da Sud Ovest con fetch di generazione ampio e lungo.

Da questa prima analisi di confronto dei fetch si può evincere come per l'Ambito 16 acquisti maggiore importanza il settore secondario da Scirocco-Mezzogiorno, rispetto alla localizzazione della boa ondametrica della Spezia. Questo si ripercuoterà nella successiva trasposizione dei valori di altezza d'onda e direzione ricavati per l'Ambito 16.

3. Definizione del clima ondoso al largo

Il clima del moto ondoso al largo degli Ambiti 16, 17 e 18 è stato definito sulla base delle misurazioni eseguite all'ondametro R.O.N. di La Spezia.
La boa ondametrica situata al largo della Spezia (posizione 43°55',7 N – 9°49',6 E), inserita nella rete ondametrica nazionale, è attiva dal 1989. Le osservazioni forniscono altezza spettrale (H_{m0}), periodo di picco (T_p), periodo medio (T_m) e direzione media totale di propagazione (DTM) ogni tre ore e, nel caso di superamento della soglia di H_{m0} pari a 4.50 m, ogni 30 minuti.
L'area di ubicazione della boa di La Spezia è completamente aperta al settore 210°-240° (fetch praticamente illimitato), settore da cui provengono le mareggiate più intense. Per tutti gli Ambiti oggetto di studio è possibile affermare che l'esposizione ai mari più frequenti e dominanti è del tutto analoga.
Si ritiene pertanto possibile definire il clima del moto ondoso al largo dei tre Ambiti oggetto di studio sulla base delle misurazioni eseguite dall'ondametro R.O.N. di La Spezia, La posizione dell'ondametro della Spezia è ben rappresentativa dell'esposizione degli ambiti 17 e 18, mentre per l'ambito 16 tali dati verranno trasposti per tenere conto delle differenze di esposizione dell'Ambito 16 rispetto al punto di localizzazione della boa ondamentrica.
Il numero di dati rilevati (pari a 97114) e l'intervallo temporale di osservazione (luglio 1989 – settembre 2006, 17 anni; di cui dal luglio 2002 misurati in continuo) consentono di effettuare un'analisi statistica avente buona attendibilità.

3.1. Metodo di trasposizione geografica

Mentre gli Ambiti 17 e 18 possono essere direttamente rappresentati al largo dal punto di misurazione dei dati ondametrici, l'Ambito 16, pur ricadendo nella stessa area geografica, è situato in una posizione leggermente decentrata rispetto al tratto di mare "sotteso" dall'ondametro della Spezia. Per questo motivo è stato necessario ricorrere ad un metodo che consente di trasporre geograficamente le misure ondametriche dal punto di misura effettivo e quello di interesse per il solo Ambito 16.
Il metodo di trasposizione geografica delle misure di moto ondoso è stato recentemente proposto da Contini e De Girolamo (1998).
L'ipotesi di base 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. Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura e quello di interesse.
Nel caso di fetch limitati le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale H_{m0} e il periodo di picco spettrale T_P, in funzione della lunghezza del fetch e della velocità del vento, sono le seguenti (Shore Protection Manual, 1984):

$$\frac{gH_{m0}}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{1/2}$$

$$\frac{gT_P}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{1/3}$$

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

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

$$\frac{H_{m0}^{V}}{H_{m0}^{R}} = \left|\frac{F^{V}}{F^{R}}\right|^{1/2}$$

$$\frac{T_{P}^{V}}{T_{P}^{R}} = \left|\frac{F^{V}}{F^{R}}\right|^{1/3}$$

supponendo che il fattore di velocità del vento sia lo stesso nei due punti in esame.
Non si è tenuto conto della legge di correlazione tra la direzione dell'onda e quella del vento, in base alla quale si determina la direzione dell'onda nel punto di interesse. Si commette pertanto un errore nella stima delle misure di altezza d'onda associate alla direzione di provenienza del moto ondoso effettive per il sito in esame, che si ritiene comunque trascurabile ai fini dei risultati dello studio della dinamica costiera sui paraggi in esame, di cui questo elaborato costituisce parte integrante.

3.2. Analisi della serie di misure ondametriche

Con la definizione di regime di moto ondoso si indagano le caratteristiche statistiche dei parametri ondosi sintetici, rilevati in un periodo pluriennale, mediate su una durata annuale ed in particolare si fa riferimento alle loro frequenze di accadimento. L'analisi delle serie di misure ondametriche, al fine della definizione del clima di moto ondoso medio annuale, rappresentativo degli Ambiti 17 e 18, è stata effettuata suddividendo gli eventi di moto ondoso in base al valore dell'altezza d'onda significativa ed alla direzione di provenienza, al fine di individuare la frequenza di accadimento di ogni singola classe di eventi. L'analisi delle serie di misure ondametriche, al fine della definizione del clima di moto ondoso medio annuale, rappresentativo dell'Ambito 16, è stata effettuata suddividendo gli eventi di moto ondoso trasposti in base al valore dell'altezza d'onda significativa ed alla direzione di provenienza, al fine di individuare la frequenza di accadimento di ogni singola classe di eventi.
Si è fissata l'attenzione in particolare sulla distribuzione di frequenza congiunta di accadimento altezza d'onda – direzione di provenienza, di grande utilità nell'analisi della morfodinamica costiera e negli studi di difesa dei litorali. Sono stati adottati due criteri differenti per la rappresentazione della frequenza congiunta di accadimento altezza d'onda – direzione di provenienza, la forma tabellare e quella grafica. In questo modo nel primo caso si possono analizzare gli eventi con maggiore dettaglio e nel secondo caso si può avere un quadro di insieme della distribuzione degli eventi di moto ondoso.
In particolare nel caso di rappresentazione del risultato dell'analisi in forma tabellare è stato adottato il seguente schema:

- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 0.5 m si prendono in esame due classi: 0÷0.25 m, 0.25÷0.5 m;
- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0.5 m si prendono in esame classi di altezza d'onda aventi un intervallo di ampiezza pari a 0.5 m (0.5÷1 m; 1÷1.5 m; …).

La rappresentazione grafica utilizzata è quella dei diagrammi polari, che visivamente permette l'immediata identificazione della direzione di provenienza più frequente ("mare regnante") e della direzione di provenienza degli stati di mare con altezza d'onda elevate più frequenti ("mare dominante"). La loro eventuale coincidenza rappresenta il "mare prevalente". Nel caso di rappresentazione grafica è stato adottato il seguente schema:

- gli stati di mare con altezza d'onda significativa minore di 0.5 m sono stati definiti come "calme" e quindi non graficati;
- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore ad 1 m è stata considerata una sola classe: 0.5÷1 m;
- per gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore ad 1 m le seguenti classi: 1÷2 m; 2÷3 m; 3÷4 m; >4 m.

Per la suddivisione degli eventi in base alla direzione di provenienza del moto ondoso sono stati considerati settori di ampiezza pari a 10° sia per i risultati riportati in forma tabellare sia per quelli riportati in forma grafica.
L'analisi della distribuzione degli eventi di moto ondoso è fondamentale negli studi di morfologia costiera per la stima delle caratteristiche quantitative (altezza, periodo, durata e direzione) e qualitative (bidirezionalità) delle onde di modellazione, propedeutiche all'individuazione della larghezza della fascia attiva di una spiaggia.
Nella figura seguente è stata riportata la rosa della frequenza congiunta di accadimento altezza d'onda – direzione di provenienza relativa agli Ambiti 16, 17 e 18, seguita dalla tabella con la distribuzione degli eventi per ciascuna classe di altezza e direzione.

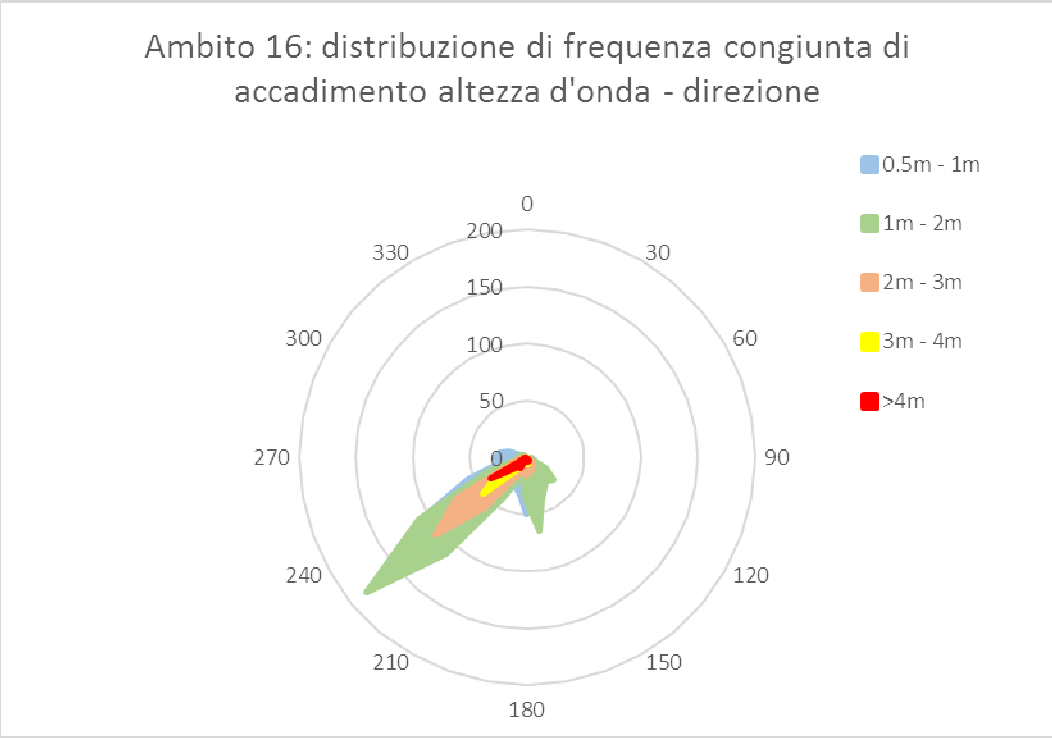


Figura 3.1 Rosa rappresentativa della distribuzione di frequenza altezza d'onda – direzione di provenienza, mediata su durata annuale per il sito rappresentativo dell'Ambito 16.

DIR (°N)	0m - 0,25m	0,25m - 0,5m	0,5m - 1m	1m - 1,5m	1,5m - 2m	2m - 2,5m	2,5m - 3m	3m - 3,5m	3,5m - 4m	4m - 4,5m	4,5m - 5m	5m - 5,5m	5,5m - 6m	6m - 6,5m	6,5m - 7m	7m - 7,5m	7,5m - 8m	TOT
10																		
20																		
30																		
40																		
50																		
60																		
70																		
80																		
90	1			1														2
100		3	4	3		1												11
110			7	3	1	1	2											14
120		1	7	14	5	2	1											30
130	1	1	13	24	6	6		1										52
140		1	25	21	5	4	4											60
150		2	25	25	5	5	3			1		1		1				68
160		1	23	21	18	7	5		2	2			1	1				81
170		8	23	38	27	8	4	4	2		1	1						116
180	3	12	50	26	13	10	6	2	2		1	2						127
190	4	22	33	16	5	3	1	1	1			1			1			88
200		9	28	8	11	10	5		3	1	1	1						77
210	2	12	25	27	13	13	4	1	4	6	2	1	1		1			112
220		16	64	62	48	35	23	10	3	1	1		1					264
230	3	46	98	79	105	60	45	26	24	7	3	1	3					500
240		42	104	75	34	38	34	14	16	8	18	5	2	3				393
250	2	45	55	22	13	8	5	3	1		1			1				156
260	2	36	22	7	4	7		1	1	1	1		1					83
270		28	28	3	2	2	2											65
280	2	23	24	5	1		1											56
290	1	17	17	5	2													42
300	7	7	5	4	1	2												26
310	1	2	4	2	1													10
320																		
330																		
340																		
350																		
360																		
TOT	29	334	684	491	320	222	145	63	59	27	29	13	9	6	2			2433

Tabella 3.1 Distribuzione della frequenza di accadimento congiunta altezza d'onda e direzione di provenienza rappresentativa del regime ondoso medio annuale del sito al largo dell'Ambito 16.

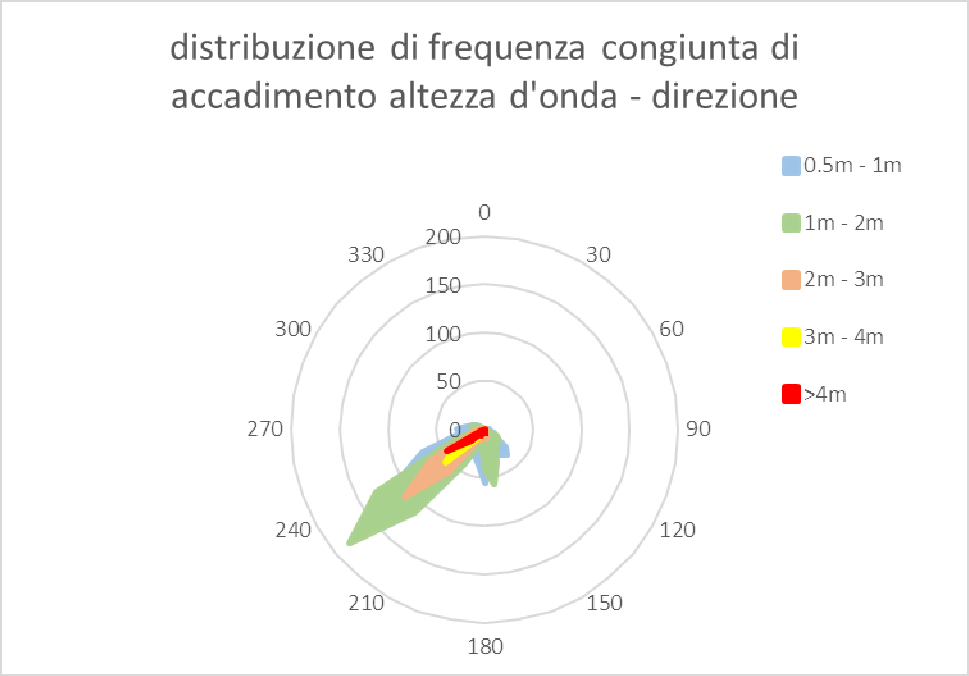


Figura 3.2 Rosa rappresentativa della distribuzione di frequenza altezza d'onda – direzione di provenienza, mediata su durata annuale per il sito rappresentativo degli Ambiti 17 e 18.

DIR (°N)	0m - 0,25m	0,25m - 0,5m	0,5m - 1m	1m - 1,5m	1,5m - 2m	2m - 2,5m	2,5m - 3m	3m - 3,5m	3,5m - 4m	4m - 4,5m	4,5m - 5m	5m - 5,5m	5,5m - 6m	6m - 6,5m	6,5m - 7m	7m - 7,5m	7,5m - 8m	TOT
0																		0
10																		0
20																		0
30																		0
40																		0
50																		0
60																		0
70																		0
80																		0
90		2	5	1		1												9
100		3	5	2	1	0												11
110			10	1	1	2												14
120		3	12	12	2	1			1									31
130	1	1	29	14	6	1				1								53
140	1	3	35	13	5	3												60
150		11	31	15	7	1		1	1	1								68
160		7	27	25	12	4	2	2		1	1							81
170	1	13	32	41	17	5	4	1	1	1								116
180	3	13	56	24	17	6	3	2	1	2								127
190	4	23	37	14	3	3	1	1			1		1					88
200		9	29	11	9	12	1	1	3	1	1							77
210	2	12	25	27	16	11	3	4	4	4	2	1			1			112
220		16	64	63	49	33	23	10	3	1	1		1					264
230	3	25	108	77	106	63	46	32	21	10	4	2	3					500
240		23	98	88	41	31	33	22	12	15	13	9	5	2		1		393
250	2	29	68	19	16	9	4	5	1	1		1		1				156
260	2	29	25	10	2	10			1	2		1		1				83
270		22	29	8	2	1	2	1										65
280	2	18	20	11	3	1		1										56
290	1	13	13	9	5	1												42
300	1	9	8	4	1	2	2											27
310																		0
320																		0
330																		0
340																		0
350																		0
TOT	23	284	766	489	321	201	124	83	49	40	23	14	10	4	1	1	0	2433

Tabella 3.2 Distribuzione della frequenza di accadimento congiunta altezza d'onda e direzione di provenienza rappresentativa del regime ondoso medio annuale del sito in corrispondenza della BOA ondametrica.

Dall'analisi dei risultati si evince che al largo dell'Ambito 16 gli stati di mare più frequenti sono quelli che provengono dal settore di traversia Sud-Ovest (220° - 240°N), le onde più elevate si hanno per settori compresi tra 210 e 260 e tra 150 e 160. Il settore di traversia principale può essere assunto quello da libeccio; la traversia secondaria dell'Ambito 16 è rappresentata dal settore sud-sud-est (compreso tra 150°-180°N). In particolare emergono le seguenti caratteristiche del clima ondoso:

- la percentuale degli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 0.5 m è inferiore al 15%;
- la percentuale degli eventi caratterizzati da altezze d'onda superiori a 0.5 m provengono per il 60% dal settore di traversia principale, per il 20% dal settore secondario e per il rimanente da altre direzioni (sempre comprese nel range di interesse 90°-300°);

- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0.5 m e provenienti dal settore di traversia principale hanno per il 60% altezza d'onda inferiore a 2 m;
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0.5 m e provenienti dalle altre direzioni hanno per il 70% circa altezze d'onda inferiori a 2 m.

Per gli Ambiti 17 e 18 gli stati di mare più frequenti sono quelli che provengono dal settore di traversia Sud-Ovest (210° - 240°N), le onde più elevate si hanno per settori compresi tra 210 e 260. Il settore di traversia principale può essere assunto quello da libeccio. Per settore secondario si considera comunque quello da Sud-Sud-Est pur presentando una percentuale di accadimento delle onde intorno al 15%.
In particolare emergono le seguenti caratteristiche del clima ondoso:

- la percentuale degli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 0.5 m è inferiore al 15%;
- la percentuale degli eventi caratterizzati da altezze d'onda superiori a 0.5 m provengono per il 55% dal settore di traversia principale, per il 15% dal settore S-S-E e per il rimanente dalle altre direzioni;
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0.5 m e provenienti dal settore di traversia principale hanno per il 60% altezza d'onda inferiore a 2 m;
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0.5 m e provenienti dalle altre direzioni hanno per il 70% circa altezze d'onda inferiori a 2 m.

Gli eventi di moto ondoso sono stati classificati anche in base alla correlazione tra l'altezza d'onda e il periodo di picco dell'onda al fine di individuare la frequenza di accadimento di ogni singola classe di eventi. Tale suddivisione è stata effettuata individuando le classi delle altezze d'onda, così come fatto per le distribuzioni di frequenza altezza d'onda e direzione di provenienza, con classi dei periodi di picco di ampiezza pari a 2 secondi (tra 0 e 2, 2-4, …).
Nelle tabelle seguenti vengono riportati i risultati dell'analisi, da cui si evince che per l'Ambito 16 la maggior parte degli eventi sono caratterizzati da un valore del periodo di picco T_P compreso tra 4 e 10 secondi; e per gli Ambiti 17 e 18 la maggior parte degli eventi (circa il 95%) sono caratterizzati da un valore del periodo di picco T_P compreso tra 2 e 10 secondi.

Tp [s]	<2	2- 4	4 -6	6 -8	8 -10	10 - 12	>12	TOT
Hs [m]								
0m - 0,25m	4	9	7	8	0	0	0	28
0,25m - 0,5m	2	84	159	65	12	6	0	328
0,5m - 1m	0	59	359	156	94	6	0	674
1m - 1,5m	0	1	189	206	81	12	0	489
1,5m - 2m	0	0	22	231	56	10	0	319
2m - 2,5m	0	0	5	141	64	7	0	217
2,5m - 3m	0	0	0	60	75	4	0	139
3m - 3,5m	0	0	0	11	40	2	1	54
3,5m - 4m	0	0	0	3	45	3	1	52
4m - 4,5m	0	0	0	0	17	6	0	23
4,5m - 5m	0	0	0	0	22	3	0	25
5m - 5,5m	0	0	0	0	3	2	0	5
5,5m - 6m	0	0	0	0	4	2	0	6
6m - 6,5m	0	0	0	0	1	3	1	5
6,5m - 7m	0	0	0	0	0	1	0	1
7m - 7,5m	0	0	0	0	0	0	0	0
7,5m - 8m	0	0	0	0	0	0	0	0
TOT	6	153	741	881	514	67	3	2365

Tabella 3.3 Ambito 16: Classificazione delle altezze d'onda in base al periodo di picco.

Tp [s]	<2	2- 4	4 -6	6 -8	8 -10	10 - 12	>12	tot
Hs [m]								
0m - 0,25m	0,17	0,38	0,30	0,34	0,00	0,00	0,00	1
0,25m - 0,5m	0,08	3,55	6,72	2,75	0,51	0,25	0,00	14
0,5m - 1m	0,00	2,49	15,18	6,60	3,97	0,25	0,00	28
1m - 1,5m	0,00	0,04	7,99	8,71	3,42	0,51	0,00	21
1,5m - 2m	0,00	0,00	0,93	9,77	2,37	0,42	0,00	13
2m - 2,5m	0,00	0,00	0,21	5,96	2,71	0,30	0,00	9
2,5m - 3m	0,00	0,00	0,00	2,54	3,17	0,17	0,00	6
3m - 3,5m	0,00	0,00	0,00	0,47	1,69	0,08	0,04	2
3,5m - 4m	0,00	0,00	0,00	0,13	1,90	0,13	0,04	2
4m - 4,5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,25	0,00	1
4,5m - 5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	0,13	0,00	1
5m - 5,5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,08	0,00	0
5,5m - 6m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,08	0,00	0
6m - 6,5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,13	0,04	0
6,5m - 7m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0
tot	0	6	31	37	22	3	0	100

Tabella 3.4 Ambito 16: Distribuzione percentuale della classificazione delle altezze d'onda in base al periodo di picco.

Per gli Ambiti 17 e 18

Tp [s]	<2	2- 4	4 -6	6 -8	8 -10	10 - 12	>12	TOT
Hs [m]								
0m - 0,25m	2	12	10	3	2	0	0	29
0,25m - 0,5m	0	160	128	61	7	6	0	362
0,5m - 1m	0	217	454	174	85	11	0	941
1m - 1,5m	0	27	266	163	89	26	0	571
1,5m - 2m	0	0	44	227	52	16	0	339
2m - 2,5m	0	0	2	131	57	14	0	204
2,5m - 3m	0	0	0	55	60	10	0	125
3m - 3,5m	0	0	0	13	46	10	0	69
3,5m - 4m	0	0	0	3	32	8	1	44
4m - 4,5m	0	0	0	0	25	12	0	37
4,5m - 5m	0	0	0	0	7	12	0	19
5m - 5,5m	0	0	0	0	2	8	0	10
5,5m - 6m	0	0	0	0	0	7	0	7
6m - 6,5m	0	0	0	0	0	3	0	3
6,5m - 7m	0	0	0	0	0	1	0	1
7m - 7,5m	0	0	0	0	0	1	0	1
7,5m - 8m	0	0	0	0	0	0	0	0
TOT	2	416	904	830	464	145	1	2762

Tabella 3.5 Ambito 17 e 18: Classificazione delle altezze d'onda in base al periodo di picco.

Tp [s]	<2	2- 4	4 -6	6 -8	8 -10	10 - 12	>12	tot
Hs [m]								
0m - 0,25m	0,07	0,43	0,36	0,11	0,07	0,00	0,00	1
0,25m - 0,5m	0,00	5,79	4,63	2,21	0,25	0,22	0,00	13
0,5m - 1m	0,00	7,86	16,44	6,30	3,08	0,40	0,00	34
1m - 1,5m	0,00	0,98	9,63	5,90	3,22	0,94	0,00	21
1,5m - 2m	0,00	0,00	1,59	8,22	1,88	0,58	0,00	12
2m - 2,5m	0,00	0,00	0,07	4,74	2,06	0,51	0,00	7
2,5m - 3m	0,00	0,00	0,00	1,99	2,17	0,36	0,00	5
3m - 3,5m	0,00	0,00	0,00	0,47	1,67	0,36	0,00	2
3,5m - 4m	0,00	0,00	0,00	0,11	1,16	0,29	0,04	2
4m - 4,5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91	0,43	0,00	1
4,5m - 5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,43	0,00	1
5m - 5,5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,29	0,00	0
5,5m - 6m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0
6m - 6,5m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0
6,5m - 7m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0
tot	0	15	33	30	17	5	0	100

Tabella 3.6 Ambito 17 e 18: Distribuzione percentuale della classificazione delle altezze d'onda in base al periodo di picco.

4. Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso

Per la definizione delle caratteristiche meteomarine associate ai periodi di ritorno, al fine della definizione del rischio a cui sono soggette le aree costiere, e al fine della definizione della fascia dinamica di spiaggia, associata alla risalita dell'onda sulla spiaggia e sulle strutture a tergo, sono state condotte analisi statistiche degli eventi estremi.
Per eseguire l'analisi statistica delle altezze d'onda risulta necessario selezionare preliminarmente dei campioni di dati che rispondano al requisito di risultare tra di loro statisticamente indipendenti ed omogenei.
Per l'indipendenza statistica è stato utilizzato il metodo POT (Peaks Over Threshold) della serie di "durata sopra soglia", che consiste nel prendere in esame il solo valore massimo di altezza d'onda che si verifica nell'ambito di una sola mareggiata. Si è pertanto proceduto a suddividere i dati misurati e trasposti in eventi della durata di 48 ore ciascuno (dalla definizione di durata di una mareggiata triangolare equivalente di Boccotti pari a massimo 48 ore), individuando così l'altezza massima nelle 48 ore, rappresentativa dello stato di mare, con relativo periodo di picco e direzione di provenienza del moto ondoso d'assieme. I dati misurati e trasposti sono stati suddivisi in eventi della durata di 48 ore ciascuno, considerando così l'altezza massima, rappresentativa dello stato di mare. Per l'omogeneità vengono separati i valori massimi delle altezze d'onda registrati nei distinti settori di provenienza degli stati di mare
In questo modo si ottengono stati di mare caratterizzati da un'altezza d'onda significativa (H_s) che diventano oggetto di elaborazioni statistiche al fine di individuare le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati periodi di ritorno.
La legge di probabilità adottata al fine dell'analisi statistica dei dati è quella di Gumbel :

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

dove *X* è la variabile aleatoria altezza d'onda, *x* il valore di non superamento e *a, b* sono i parametri delle distribuzioni.
Tenendo conto che la probabilità cumulata di superamento è legata al tempo di ritorno dalla relazione:

$$T_R(X \le x) = \frac{1}{(1-P(X \le x))}$$

da cui si possono stimare le altezze d'onda significative relative a diversi periodi di ritorno.
L'analisi statistica degli eventi estremi risulta fondamentale al fine della propagazione dell'onda da largo verso riva, per la determinazione delle altezze d'onda al frangimento e delle forze che interagiscono nella dinamica dei sedimenti, per la definizione delle forzanti meteomarine per l'applicazione di modelli di trasporto solido trasversale, oltre che per tutti i dimensionamenti e le analisi relative alla realizzazione delle opere marittime.
Al fine di separare i dati di moto ondoso nei settori di traversia principale e secondari sono stati realizzati i diagrammi polari (riportati nelle Figura e Figura) raffiguranti i valori dell'altezza d'onda significativa al colmo delle mareggiate selezionate, ottenuti a seguito dell'analisi degli eventi estremi, per il sito dell'ondametro della Spezia e per il punto al largo dell'Ambito 16.
Questa visualizzazione è stata determinante per la definizione dei settori di provenienza del moto ondoso da utilizzarsi nelle successive analisi di propagazione delle altezze d'onda da largo verso riva, per gli Ambiti oggetto di studio, propedeutiche alle analisi della morfodinamica costiera e alla definizione delle fasce dinamiche delle spiagge, relative ad una assegnata probabilità di occorrenza, o periodo di ritorno.

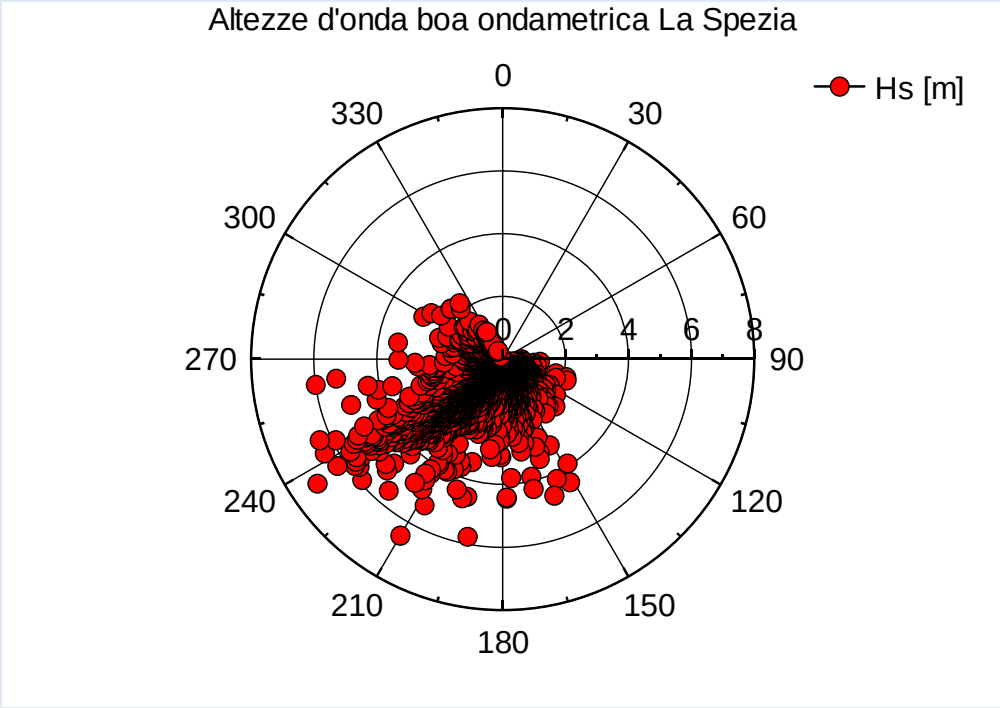


Figura 4.1 Distribuzione dei valori di altezza d'onda significativa derivanti dall'analisi statistica in corrispondenza della boa RON della Spezia.

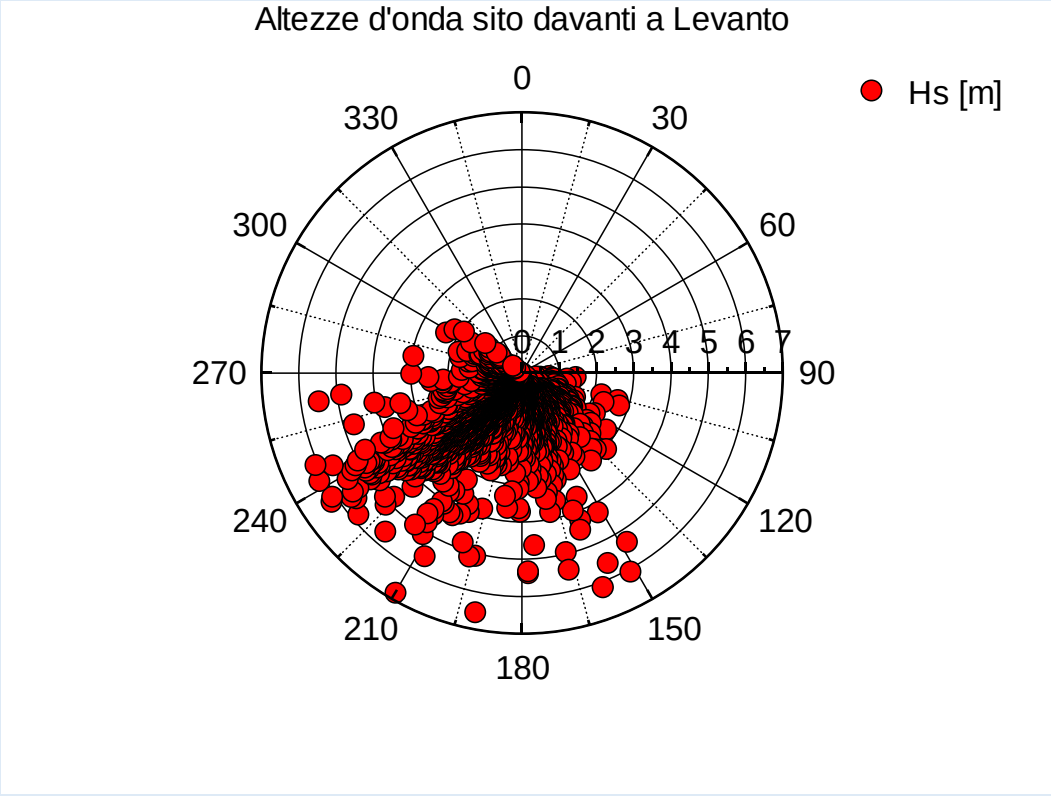


Figura 4.2 Distribuzione dei valori di altezza d'onda significativa derivanti dalla trasposizione dei dati in corrispondenza del sito significativo al largo dell'Ambito 16.

Nella Figura .1 è raffigurata la distribuzione delle altezze d'onda, ricavate dall'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso, per il sito in corrispondenza dell'ondametro della Spezia e nella Figura 1.3.2 è raffigurata la distribuzione delle altezze d'onda per il sito al largo dell'Ambito 16. Dal confronto dei valori in corrispondenza dei due siti sono emerse alcune particolarità di seguito specificate.

4.1 Analisi dei risultati

Per tutti gli ambiti quindi si è scelto di considerare tre settori rappresentativi a cui riferire le altezze d'onda derivanti dall'analisi statistica dei dati misurati dall'ondametro e traposti.

Ambiti 17-18

Per gli Ambiti 17 e 18, rappresentati dai dati misurati dalla boa ondametrica della Spezia, tenendo conto dell'esposizione degli ambiti e dei valori ottenuti dall'analisi statistica, si è scelta la direzione di 220°N per i mari da Libeccio, da cui risultavano valori di Hs e Tp più alti, rappresentativa del settore di traversia principale; la direzione 160°N per il settore secondario da Scirocco; la direzione 180°N per il settore da mezzogiorno meno significativo.

Ambito 16

Per l'Ambito 16, la trasposizione dei dati porta ad una sovrastima degli eventi provenienti dal settore di Scirocco e di Mezzogiorno, ed una leggera sottostima di quelli provenienti da Libeccio. In particolare per i valori di altezza d'onda compresi tra 5 e 6 m si nota una distribuzione più intensa nel settore con bisettrice 240°N. Dal confronto della rosa di distribuzione di frequenza H-dir media annuale con la distribuzione dei valori di altezza d'onda massimi, desunti dall'analisi statistica degli eventi estremi, emergono alcune difformità per il settore di provenienza da mezzogiorno. Si sarebbe potuto procedere secondo due approcci distinti alla risoluzione delle difformità:
in base ai settori di traversia individuabili dalla distribuzione media annuale di H e dir, correggere i valori di altezza d'onda e distribuirli secondo le due direzioni di libeccio e di scirocco (metodo preferibile nel caso di analisi di progettazione di opere marittime in quanto per periodi di ritorno medio-alti si ottengono valori di altezze d'onda maggiori, rispetto a quelle derivate dall'analisi statistica delle misure trasposte).
Mantenere i valori di altezza d'onda derivati dall'analisi statistica degli eventi estremi trasposti, considerando anche la direzione del settore di traversia secondario di mezzogiorno.
Quest'ultima opzione, che sottostima i valori massimi associati ai vari periodi di ritorno relativi specialmente alla direzione di propagazione principale, tuttavia non inficia i risultati finalizzati ad una stima degli eventi che influenzano la fascia attiva delle spiagge. Infatti nelle analisi successive, di cui questo studio è parte propedeutica, relative alla definizione del rischio delle aree costiere, a seguito degli effetti del moto ondoso lungo la costa, le aree e i livelli di pericolosità emergono dall'analisi comparata del moto ondoso nelle diverse direzioni di provenienza, come risultante omogenea delle azioni del moto ondoso incidente nelle diverse direzioni di provenienza e propagazione.
Per questo motivo e per semplicità di analisi si è scelto di procedere secondo il secondo dei due metodi, al fine di tenere comunque conto di tutte le direzioni di propagazione del moto ondoso a cui il sito oggetto di studio è soggetto, che influiscono nella dinamica dei sedimenti.
Si è scelto di considerare valori di altezze d'onda sovrastimati nelle direzioni secondarie a discapito della perdita di valori elevati di altezza d'onda per periodo di ritorno maggiore o uguale a 50 anni nella direzione principale da libeccio, proprio perché la finalità di tale studio è la propedeuticità ad un'analisi della morfodinamica costiera e dell'individuazione di fasce attive della spiaggia, che non dipendono tanto dal valore estremo quanto dalla distribuzione degli eventi che determinano i cambiamenti nella spiaggia emersa.

Per l'Ambito 16, tenendo conto della diversa esposizione del sito rispetto agli ambiti 17 e 18, si è scelta la direzione 240°N per i mari da Libeccio, rappresentativa del settore di traversia principale; la direzione 150°N per il settore secondario da Scirocco e la direzione 180°N per le ondazioni da mezzogiorno meno significative.

Una volta definiti i tre settori di provenienza delle onde per gli ambiti oggetto di studio, a questi settori sono stati associati, per i diversi periodi di ritorno, i valori delle altezze d'onda e dei periodi di picco, derivanti dall'analisi statistica effettuata, al fine del loro impiego nella propagazione del moto ondoso da largo verso riva (successive elaborazioni progettuali).

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori estremi di riferimento, risultanti dalle analisi statistiche effettuate.

Periodo di ritorno T [anni]	dir 160°		dir 180°		dir 220°	
	H_{m0T} [m]	T_P [s]	H_{m0T} [m]	T_P [s]	H_{m0T} [m]	T_P [s]
1	2,4	6,9	2,0	6,3	5,1	10,2
2	3,1	7,9	2,7	7,5	5,7	10,7
5	3,8	8,7	3,4	8,3	6,4	11,4
10	4,2	9,3	3,8	8,8	6,9	11,8
20	4,7	9,8	4,2	9,3	7,4	12,3
30	5,0	10,1	4,5	9,5	7,7	12,5
50	5,3	10,4	4,8	9,8	8,1	12,9
100	5,7	10,8	5,2	10,3	8,6	13,3

Tabella 4.1 Valori di altezza d'onda e periodo di picco associati ai periodi di ritorno significativi per le direzioni di propagazione scelte in corrispondenza dell'ondametro della Spezia.

Periodo di ritorno T [anni]	dir 150°		dir 180°		dir 240°	
	H_{m0T} [m]	T_P [s]	H_{m0T} [m]	[anni]	H_{m0T} [m]	T_P [s]
1	3,4	8,3	3,2	8,1	5,0	10,1
2	4,0	9,1	3,9	8,9	5,5	10,6
5	4,9	10,0	4,7	9,8	6,2	11,2
10	5,5	10,6	5,3	10,4	6,7	11,7
20	6,1	11,1	5,9	11,0	7,2	12,1
30	6,4	11,4	6,2	11,3	7,5	12,4
50	6,9	11,8	6,7	11,6	7,9	12,7
100	7,4	12,3	7,2	12,1	8,4	13,1

Tabella 4.2 Valori di altezza d'onda e periodo di picco associati ai periodi di ritorno significativi per le direzioni di propagazione scelte in corrispondenza del sito al largo dell'Ambito16.

Per l'Ambito 16 si è scelto di considerare gli eventi provenienti da libeccio riferiti ad una direzione di 240° per tenere conto dell'orientazione della costa.
Per le attività collegate a tale studio verranno eseguite le propagazioni fino alla costa di tali misure al fine di definire le forzanti di moto ondoso in prossimità della costa.

5. Eventi estremi di moto ondoso derivanti dall'analisi di hindcast

I valori estremi ottenuti dalle elaborazioni dei dati misurati dalla boa ondametrica della Spezia sono stati confrontati con quelli ottenuti dalle analisi ai valori estremi (EVA), condotte, per alcuni punti hindcast in un'area del Nord Tirreno, dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli studi di Genova.

Queste analisi individuano mareggiate estreme, caratterizzate da altezza d'onda significativa H_s e periodo di picco T_p derivanti dall'hindcast definito su tutto il Mar Mediterraneo, ad una risoluzione pari a 0.1° in longitudine e latitudine, sviluppato a partire dai campi di vento forniti dal Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) per il periodo 1979 – 2010 e dai dati del CFSv2 (Mentaschi et al., 2013) per il periodo 2011 – 2017.

Al fine di caratterizzare gli eventi estremi del moto ondoso nell'area in esame sono stati utilizzati tredici punti provenienti dall'hindcast, rappresentati in Figura 5.1 con il relativo codice identificativo.

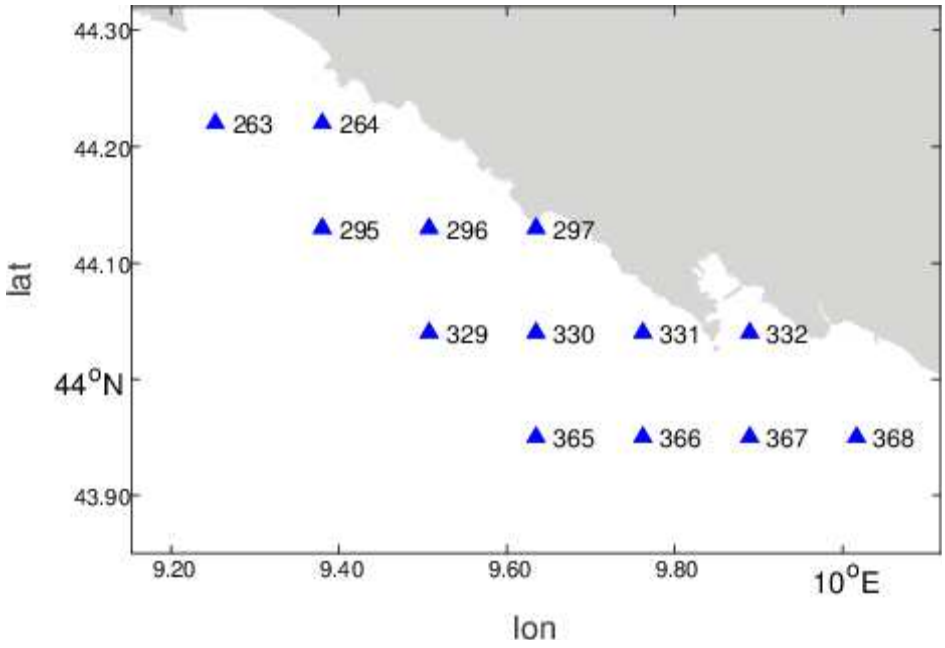
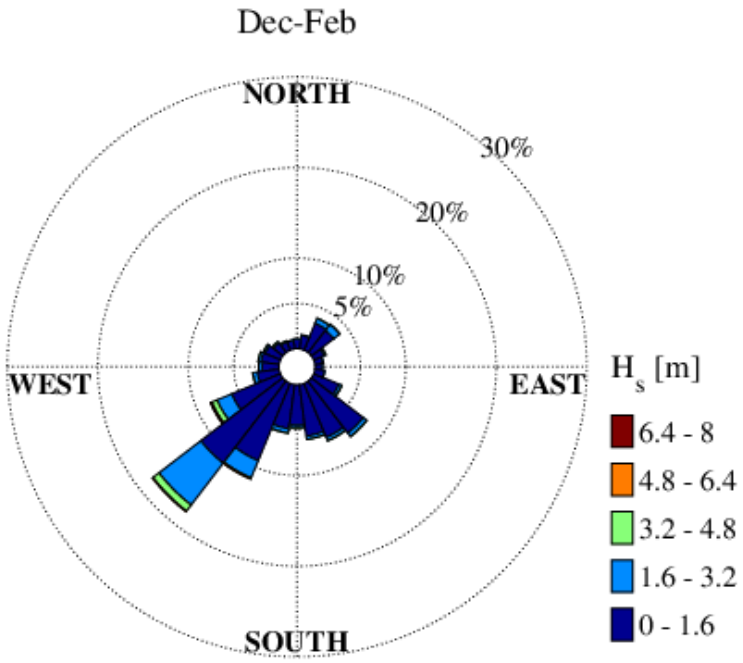
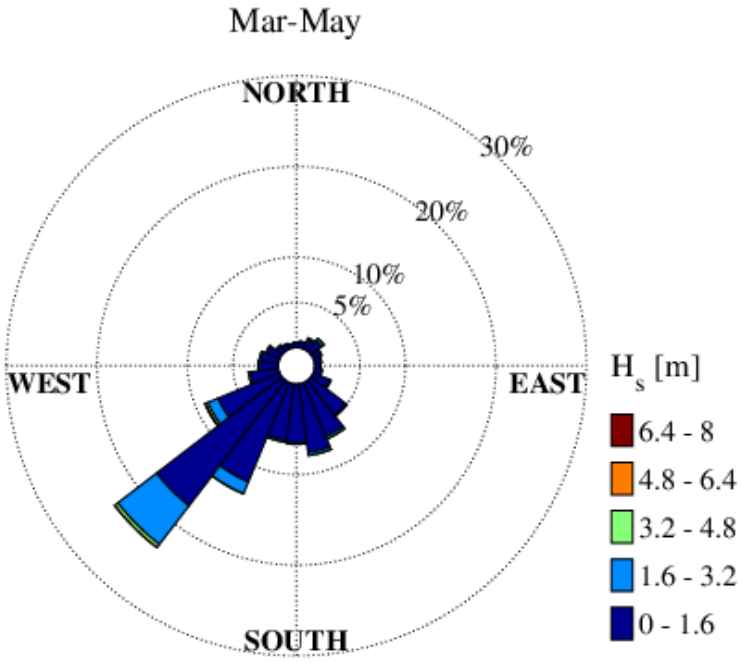


Figura 5.1 area di studio e localizzazione dei punti esaminati dall'hindcast

La climatologia del moto ondoso all'interno dell'area di interesse è stata dettagliata conducendo un'indagine sul punto 000329, assunto come significativo per tutta l'area in esame. Sono state riportate in corrispondenza di questo punto le rose direzionali stagionali, che evidenziano come le mareggiate più intense giungano dalla direzione S-SW (caratteristica del settore di libeccio).


Dec-Feb
NORTH
30%
20%
10%
5%
WEST
EAST
SOUTH
Hs [m]
6.4 - 8
4.8 - 6.4
3.2 - 4.8
1.6 - 3.2
0 - 1.6


Mar-May
NORTH
30%
20%
10%
5%
WEST
EAST
SOUTH
Hs [m]
6.4 - 8
4.8 - 6.4
3.2 - 4.8
1.6 - 3.2
0 - 1.6

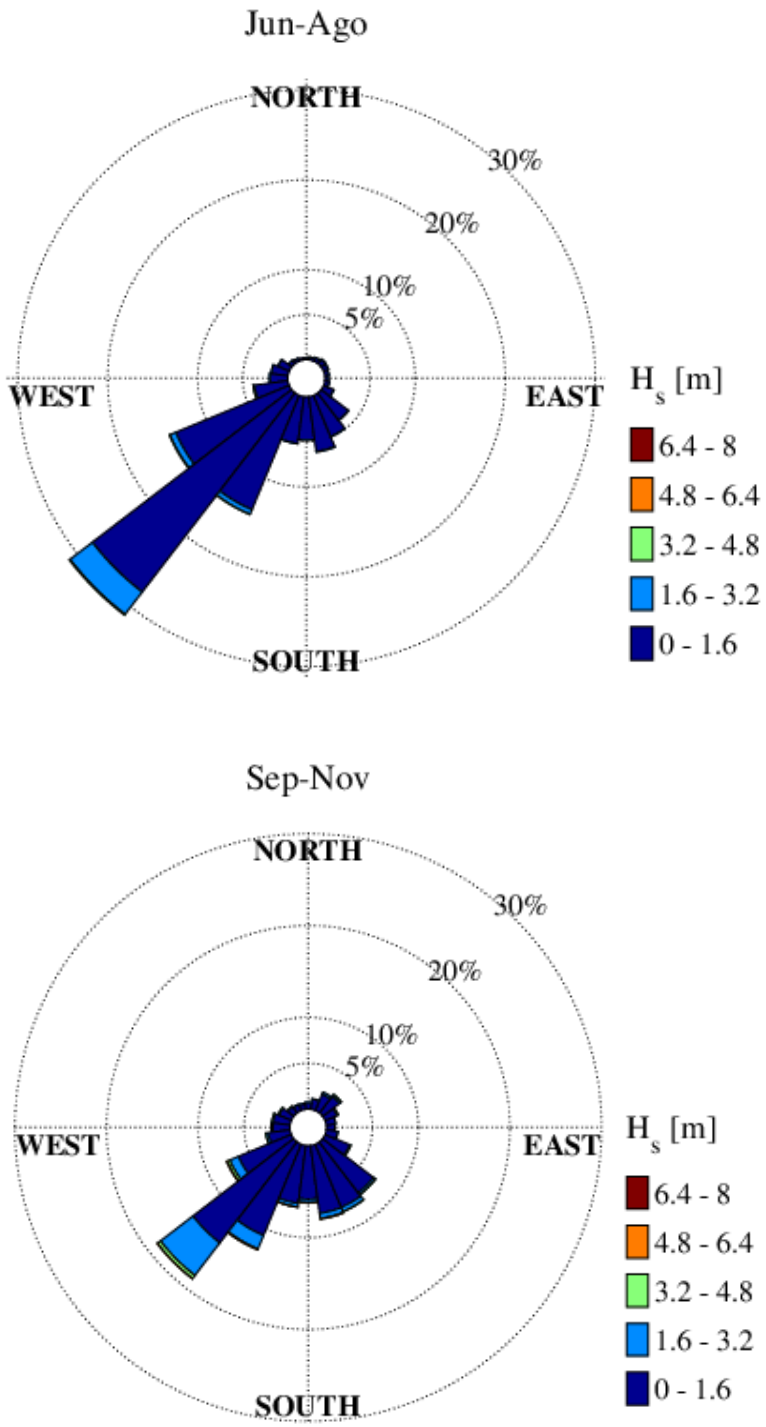


Figura 5.2 rose direzionali stagionali nel punto 000329

Il calcolo dei valori estremi è stato condotto, per ciascun punto considerato, sia con analisi omnidirezionale che con analisi direzionale, per considerare i settori di provenienza delle onde maggiormente significative per l'area di studio.

Per l'analisi direzionale sono stati definiti due settori, il Settore I caratterizzato dalle onde provenienti da sud-est (116°N-206°N) ed il Settore II con direzione di incidenza delle onde da sud-ovest (206°N e 296°N).

L'analisi ai valori estremi è stata condotta sulle altezze d'onda H_s, per ciascuna location, sia in modo omnidirezionale che in modo direzionale, in virtù della climatologia dell'area in

esame. L'analisi statistica per la definizione della distribuzione ai valori estremi si riferisce ad una serie di dati, secondo il metodo Annual Maxima (AM), ossia- considerando solo il valore massimo di una variabile per ciascun anno su cui i dati vengono definiti.
La distribuzione utilizzata per modellare i dati è la Generalized Extreme Values (GEV), che si presenta secondo la

$$P = exp\left(-\left(1+\xi\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1/\xi}\right)$$

Dove: ξ, σ e μ sono i parametri di forma, scala e posizione della distribuzione.

Le EVA hanno permesso di stimare l'altezza d'onda relativa a differenti periodi di ritorno, che spaziano da 1 anno a 1000 anni. Sono stati riportati in forma tabellare i risultati associati a periodi di ritorno significativi per i diversi punti nell'area in esame (tabella 5.1).

PUNTO	LON	LAT	$H_1[m]$	$H_5[m]$	$H_{25}[m]$	$H_{50}[m]$	$H_{100}[m]$	$H_{200}[m]$	
000263	9.2527	44.2200	4.82	5.46	6.25	6.52	6.77	7.00	Omni
			3.39	4.01	4.96	5.36	5.76	6.17	Set. 1
			4.78	5.42	6.20	6.47	6.70	6.92	Set. 2
000264	9.3800	44.2200	4.95	5.62	6.42	6.69	6.92	7.13	Omni
			3.17	3.80	4.72	5.10	5.47	5.83	Set. 1
			4.92	5.61	6.40	6.67	6.90	7.11	Set. 2
000295	9.3800	44.1300	5.07	5.74	6.61	6.93	7.22	7.49	Omni
			3.41	4.03	4.83	5.13	5.40	5.66	Set. 1
			5.05	5.73	6.61	6.93	7.22	7.49	Set. 2
000296	9.5073	44.1300	5.16	5.84	6.73	7.05	7.35	7.63	Omni
			3.34	3.98	4.88	5.23	5.57	5.90	Set. 1
			5.14	5.83	6.72	7.05	7.35	7.62	Set. 2
000297	9.6347	44.1300	5.01	5.68	6.57	6.90	7.21	7.50	Omni
			2.83	3.49	4.46	4.86	5.25	5.64	Set. 1
			4.99	5.67	6.56	6.89	7.20	7.48	Set. 2
000329	9.5073	44.0400	5.23	5.92	6.90	7.29	7.67	8.04	Omni
			3.37	4.01	4.88	5.20	5.51	5.80	Set. 1
			5.21	5.91	6.90	7.29	7.67	8.04	Set. 2
000330	9.6347	44.0400	5.01	5.67	6.66	7.07	7.48	7.88	Omni
			3.20	3.83	4.68	5.01	5.31	5.60	Set. 1
			5.00	5.66	6.66	7.07	7.48	7.88	Set. 2
000331	9.7620	44.0400	4.94	5.58	6.49	6.85	7.21	7.55	Omni
			3.12	3.76	4.57	4.85	5.12	5.36	Set. 1
			4.93	5.57	6.49	6.85	7.21	7.55	Set. 2
000332	9.8894	44.0400	4.12	4.59	5.21	5.45	5.68	5.89	Omni
			2.46	2.95	3.61	3.86	4.10	4.33	Set. 1
			4.12	4.58	5.21	5.45	5.68	5.89	Set. 2
000365	9.6347	43.9500	5.37	6.10	7.25	7.74	8.23	8.73	Omni
			3.31	3.93	4.80	5.14	5.47	5.78	Set. 1
			5.35	6.10	7.25	7.74	8.23	8.73	Set. 2
000366	9.7620	43.9500	5.19	5.89	6.95	7.38	7.81	8.24	Omni
			3.22	3.83	4.62	4.92	5.19	5.45	Set. 1
			5.18	5.89	6.94	7.38	7.81	8.24	Set. 2
000367	9.8894	43.9500	4.74	5.33	6.19	6.53	6.88	7.21	Omni
			3.02	3.58	4.28	4.52	4.74	4.93	Set. 1
			4.73	5.32	6.19	6.53	6.88	7.21	Set. 2
000368	10.0167	43.9500	4.21	4.68	5.31	5.56	5.79	6.02	Omni
			2.63	3.13	3.73	3.93	4.11	4.27	Set. 1
			4.21	4.68	5.32	5.56	5.79	6.02	Set. 2

Tabella 5.1 Altezze d'onda relative ai diversi periodi di ritorno nei punti dell'area in esame

Al fine di caratterizzare le mareggiate in maniera completa, sono stati calcolati i periodi di picco Tp associati alle altezze d'onda tramite la formula proposta da Callaghan et al. (2008):

$$\begin{cases} E(T_p) = aH_s^b + cfH_s^{d+g} \\ a = 3.005; b = 0.543; c = 4.82; d = -0.332; f = 1.122; g = -0.039 \end{cases}$$

In Tabella 5.2 sono riportati i risultati ottenuti in ciascun punto analizzato, per i diversi periodi di ritorno ritenuti significativi (1, 5, 25, 50, 100 e 200 anni), nel caso omnidirezionale e nei due casi direzionali.

PUNTO	LON	LAT	$T_1[s]$	$H_5[s]$	$T_{25}[s]$	$T_{50}[s]$	$T_{100}[s]$	$T_{200}[s]$	
000263	9.2527	44.2200	10.08	10.44	10.87	11.01	11.15	11.27	Omni
			9.27	9.62	10.15	10.38	10.60	10.83	Set. 1
			10.05	10.41	10.84	10.99	11.11	11.23	Set. 2
000264	9.3800	44.2200	10.15	10.53	10.96	11.11	11.23	11.34	Omni
			9.15	9.50	10.02	10.23	10.44	10.64	Set. 1
			10.13	10.52	10.95	11.10	11.22	11.33	Set. 2
000295	9.3800	44.1300	10.22	10.59	11.06	11.23	11.39	11.53	Omni
			9.28	9.63	10.08	10.25	10.40	10.54	Set. 1
			10.21	10.58	11.06	11.23	11.39	11.53	Set. 2
000296	9.5073	44.1300	10.27	10.65	11.13	11.30	11.46	11.60	Omni
			9.24	9.60	10.11	10.31	10.50	10.68	Set. 1
			10.25	10.64	11.12	11.30	11.45	11.60	Set. 2
000297	9.6347	44.1300	10.18	10.56	11.04	11.22	11.38	11.53	Omni
			8.96	9.32	9.87	10.10	10.32	10.53	Set. 1
			10.17	10.55	11.04	11.21	11.38	11.53	Set. 2
000329	9.5073	44.0400	10.31	10.69	11.22	11.43	11.63	11.82	Omni
			9.26	9.62	10.11	10.29	10.46	10.62	Set. 1
			10.30	10.68	11.22	11.43	11.63	11.82	Set. 2
000330	9.6347	44.0400	10.18	10.55	11.09	11.31	11.52	11.73	Omni
			9.16	9.52	10.00	10.18	10.35	10.51	Set. 1
			10.18	10.55	11.09	11.31	11.52	11.73	Set. 2
000331	9.7620	44.0400	10.14	10.50	11.00	11.19	11.38	11.56	Omni
			9.12	9.48	9.93	10.10	10.24	10.38	Set. 1
			10.14	10.49	11.00	11.19	11.38	11.56	Set. 2
000365	9.6347	43.9500	10.39	10.78	11.36	11.59	11.81	12.03	Omni
			9.22	9.57	10.07	10.26	10.44	10.61	Set. 1
			10.38	10.78	11.36	11.59	11.81	12.03	Set. 2
000366	9.7620	43.9500	10.29	10.67	11.24	11.47	11.70	11.92	Omni
			9.17	9.51	9.97	10.13	10.28	10.43	Set. 1
			10.28	10.67	11.24	11.47	11.70	11.92	Set. 2
000367	9.8894	43.9500	10.03	10.36	10.83	11.02	11.21	11.38	Omni
			9.07	9.38	9.77	9.91	10.03	10.14	Set. 1
			10.03	10.36	10.83	11.02	11.21	11.38	Set. 2
000368	10.0167	43.9500	9.73	10.00	10.35	10.49	10.62	10.74	Omni
			8.86	9.12	9.46	9.57	9.68	9.77	Set. 1
			9.73	9.99	10.35	10.49	10.62	10.74	Set. 2

Tabella 5.2 Periodi di picco relativi alle altezze d'onda e ai diversi periodi di ritorno associati.

I valori ricavati dalle analisi condotte dall'Università degli studi di Genova sono stati validati e verranno utilizzati come dati di input nella modellazione della propagazione del moto ondoso dal largo verso riva; i risultati saranno confrontati con quelli ottenuti con i dati misurati dalla boa della Spezia.
In particolare per la propagazione del moto ondoso nell'area geografica di interesse per l'Ambito 16 sono stati utilizzati i valori in corrispondenza del punto 000295, più prossimo alla line di input del dominio di calcolo a grande scala utilizzato dal modello matematico SW di Mike 21. Per l'ambito 17 e 18, che presentano lo stesso domino di calcolo, sono stati utilizzati i valori di altezza d'onda, periodo e direzione riferiti al punto 000365. Le tabelle seguenti riportano gli input adottati per le modellazioni di propagazione del moto ondoso da largo verso costa per gli ambiti 16 e 17-18, derivati dall'analisi statistica dei dati derivati dall'hindcast.

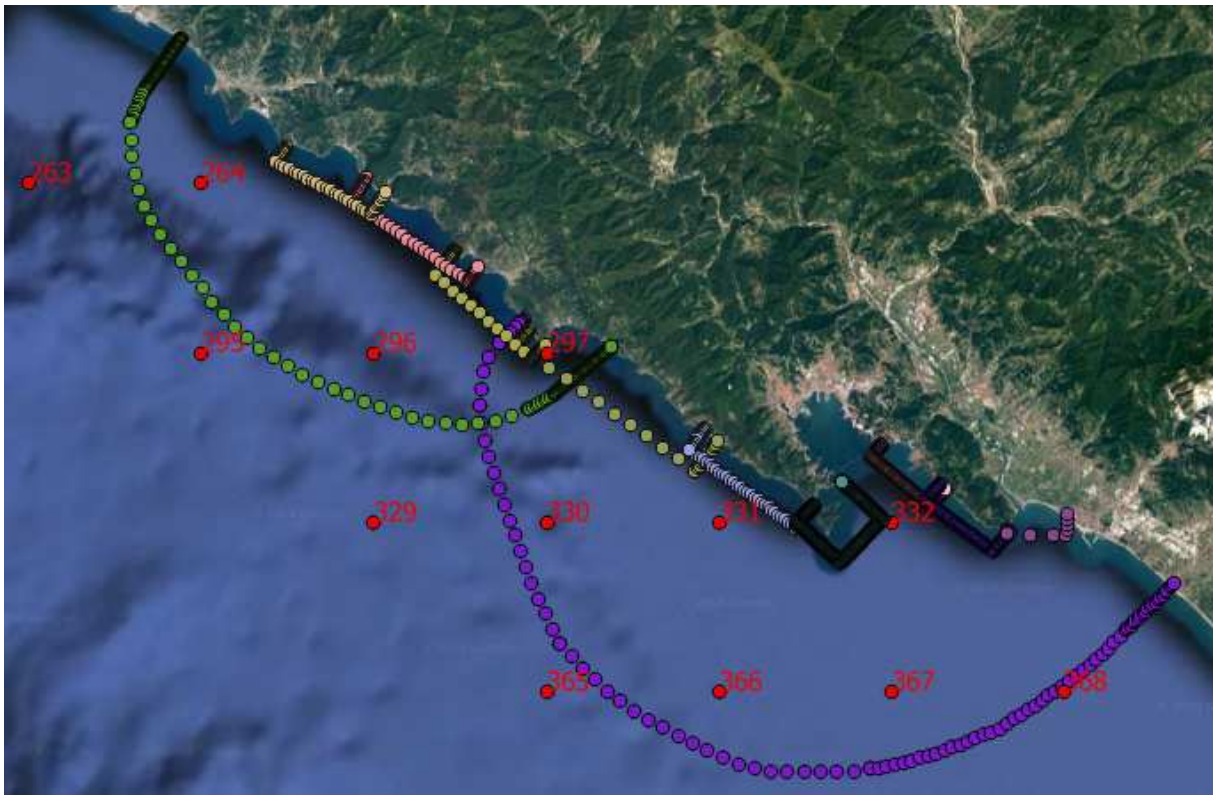


Figura 5.4 posizionamemto dei punti con dati derivati dall'hindcast con i confini delle griglie di calcolo Mike

Hindcast DICCA						
PUNTO 295 - lon 9.3800 , lat 44.1300						
Periodo di ritorno [anni]	dir 240°		dir 150°		omni	
	H_{m0T} [m]	T_P [s]	H_{m0T} [m]	T_P [s]	H_{m0T} [m]	T_P [s]
1	5,05	10,21	3,41	9,28	5,07	10,22
50	6,93	11,23	5,13	10,25	6,93	11,23
100	7,22	11,39	5,4	10,4	7,22	11,39

Tabella 5.3 Valori di altezza d'onda al largo (H), periodo (T_p) e direzione, relativi ai periodi di ritorno considerati (T_R), nel punto hindcast 000295 rappresentativo per il dominio di calcolo dell'ambito 16.

Hindcast DICCA						
PUNTO 000365 - lon 9.6347 , lat 43.95						
Periodo di ritorno	dir 220°		dir 160°		omni	
T [anni]	Hs [m]	T_P [s]	Hs [m]	T_P [s]	Hs [m]	T_P [s]
1	5,35	10,37	3,31	9,22	5,37	10,38
50	7,74	11,66	5,14	10,26	7,74	11,66
100	8,23	11,91	5,47	10,44	8,23	11,91

Tabella 5.4 Valori di altezza d'onda al largo (H), periodo (T_p) e direzione, relativi ai periodi di ritorno considerati (T_R), nel punto hindcast 000365 rappresentativo per il dominio di calcolo dell'ambito 17 e 18.

Non è stato possibile utilizzare i valori più prossimi alla costa per ottimizzare il lavoro già svolto, perché erano troppo distanti dall'inizio dei domini di calcolo del modello di propagazione a scala di dettaglio utilizzato e già realizzate. Si sarebbero dovute realizzare nuove griglie di calcolo con dispendio di tempo senza un apprezzabile effetto sui risultati.
I punti interni alla griglia di calcolo del modello Mike sono stati utilizzati come confronto. Sono stati estrapolati i valori in corrispondenza dei punti dei dati ricavati dall'hindcast e confrontati con i valori di altezza d'onda e periodo che risultavano dalla propagazione del moto ondoso utilizzando i valori dei punti più al largo. Ne è risultata una buona corrispondenza come si evince dalle tabelle seguenti.

PUNTO	LON	LAT
000296	9,5073	44,13

HINDCAST			MIKE			
TR 1	H1	Tp	Hs	Tp	Dir	HS diff (H-M)
Set. 1	3,34	9,24	3,41	9,28	150,01	-0,07
Set. 2	5,14	10,25	5,05	10,21	240,03	0,09
TR50	H50	Tp	Hs	Tp	Dir	
Set. 1	5,23	10,31	5,13	10,25	150,02	0,10
Set. 2	7,05	11,3	6,93	11,23	240,03	0,12
TR 100	H100	Tp	Hs	Tp	Dir	
Set. 1	5,57	10,5	5,40	10,40	150,02	0,17
Set. 2	7,35	11,45	7,22	11,39	240,03	0,13

PUNTO	LON	LAT
000264	9,38	44,22

HINDCAST			MIKE			
TR 1	H1	Tp	Hs	Tp	Dir	HS diff (H-M)
Set. 1	3,17	9,15	3,36	9,28	151,29	-0,19
Set. 2	4,92	10,13	5,05	10,21	240,02	-0,13
TR50	H50	Tp	Hs	Tp	Dir	
Set. 1	5,10	10,23	5,05	10,25	151,37	0,05
Set. 2	6,67	11,10	6,92	11,23	240,01	-0,25
TR 100	H100	Tp	Hs	Tp	Dir	
Set. 1	5,47	10,44	5,31	10,40	151,40	0,16
Set. 2	6,90	11,22	7,21	11,39	240,01	-0,31

PUNTO	LON	LAT			
330	9,63	44,04			
HINDCAST			MIKE		
TR 1	H1	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	3,20	9,16	3,29	9,21	160,53
Set. 2	5,00	10,18	5,35	10,37	220,01
TR50	H50	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	5,01	10,18	5,09	10,25	160,85
Set. 2	7,07	11,31	7,74	11,66	220,01
TR 100	H100	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	5,31	10,35	5,41	10,43	160,91
Set. 2	7,48	11,52	8,23	11,91	220,01

PUNTO	LON	LAT
331	9,76	44,04

HINDCAST			MIKE		
TR 1	H1	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	3,12	9,12	3,00	9,15	164,71
Set. 2	4,93	10,14	5,12	10,36	220,29
TR50	H50	Tp	Hs	Tp	Dir

Set. 1	4,85	10,10	4,38	10,14	167,32
Set. 2	6,85	11,19	7,22	11,62	220,61
TR 100	H100	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	5,12	10,24	4,62	10,32	167,81
Set. 2	7,21	11,38	7,64	11,87	220,69

PUNTO	LON	LAT			
332	9,89	44,04			
HINDCAST			MIKE		
TR 1	H1	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	2,46	8,77	2,91	8,04	170,21
Set. 2	4,12	9,68	3,79	9,35	217,01
TR50	H50	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	3,86	9,54	4,46	8,51	173,07
Set. 2	5,45	10,43	5,29	10,12	217,88
TR 100	H100	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	4,10	9,67	4,73	8,58	173,58
Set. 2	5,68	10,55	5,56	10,26	218,20

PUNTO	LON	LAT			
366	9,76	43,95			
HINDCAST			MIKE		
TR 1	H1	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	3,22	9,17	3,31	9,22	160,02
Set. 2	5,18	10,28	5,35	10,37	220,02
TR50	H50	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	4,92	10,13	5,13	10,26	160,08
Set. 2	7,38	11,47	7,72	11,66	220,03
TR 100	H100	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	5,19	10,28	5,46	10,44	160,10
Set. 2	7,81	11,70	8,20	11,91	220,03

PUNTO	LON	LAT			
367	9,89	43,95			
HINDCAST			MIKE		
TR 1	H1	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	3,02	9,07	3,13	9,16	162,67
Set. 2	4,73	10,03	4,94	10,30	220,12
TR50	H50	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	4,52	9,91	4,80	10,14	164,44
Set. 2	6,53	11,02	7,07	11,52	220,05
TR 100	H100	Tp	Hs	Tp	Dir
Set. 1	4,74	10,03	5,11	10,30	164,76
Set. 2	6,88	11,21	7,51	11,76	220,03

REGIONE LIGURIA

PIANO DI TUTELA DELL'AMBIENTE MARINO E COSTIERO

AMBITI COSTIERI 16, 17 e 18

Unità fisiografiche di Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinqueterre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra

ART. 41 LEGGE REGIONALE N° 20/2006

Relazione sulla modellazione di propagazione del moto ondoso da largo verso costa (RM)

Indice

1. Premessa 3

2. Il modello matematico MIKE21 5

2.1. Struttura del modello 5

2.2. Funzionamento del modello 5

2.3. Dati di input del modello 6

3. Applicazione del modello all'Ambito Costiero 16 (Unità Fisiografiche: Moneglia, Deiva e Ghiararo) e agli Ambiti Costieri 17 e 18 (Unità Fisiografiche: Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra) 9

3.1. Analisi dei dati batimetrici a disposizione **Errore. Il segnalibro non è definito.**

3.2. Valori caratteristici delle onde nei pressi delle stazioni di calcolo 13

3.3. Analisi dei risultati 16

4. Conclusioni della modellazione a larga scala 21

1. Premessa

La presente relazione tematica, propedeutica alla redazione del Piano di Tutela dell'ambiente marino e costiero, si pone lo scopo di individuare, mediante un modello matematico, l'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva all'interno degli Ambiti di studio, comprendenti le unità fisiografiche di Moneglia, Deiva, Ghiararo, Cinque terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra.
Lo studio è stato effettuato utilizzando il pacchetto modellistico MIKE 21 Spectral Waves (SW) di DHI (Danish Hydraulic Institute). Il modello numerico è in grado di simulare l'effetto delle mareggiate di riferimento, determinate dall'analisi del clima ondoso al largo, sul litorale degli Ambiti Costieri 16, 17 e 18 in termini di distribuzione dei campi di altezza d'onda, andamento delle correnti litoranee, individuazione dell'area dei frangenti.
L'input al modello è rappresentato dall'onda al largo, come descritto nella relazione tematica "Relazione sul clima ondoso al largo". Sono state analizzate le onde caratteristiche per i periodi di ritorno pari a 1 anno, 50 anni e 100 anni e le loro propagazioni da largo verso riva. Per i vari periodi di ritorno, il modello numerico fornisce in output i dati caratteristici del moto ondoso in tutti i punti del dominio simulato, altezza, periodo e direzione dell'onda, e altre grandezze energetiche associate al moto ondoso.
Con questa impostazione metodologica, la relativa simulazione del modulo MIKE21 SW è stata eseguita dapprima a larga scala e successivamente riscalata alla risoluzione di dettaglio per ogni singolo paraggio. Per poter simulare le dinamiche costiere nei paraggi è indispensabile utilizzare un'alta risoluzione della maglia (mesh) di calcolo, quindi si è resa necessaria la divisione degli Ambiti Costieri 16,17 e 18 in opportuni modelli di dettaglio.
Con riferimento alle batimetrie introdotte nel modello, si è proceduto ad un'operazione di unione dei rilievi disponibili per le aree modellate: in particolare, per la zona più sotto costa sono stati utilizzati il rilievo di dettaglio MultiBeam effettuato nel 2010 e nel 2018 (per la zona di Lerici e foce del Magra), mentre per le zone più esterne del dominio di calcolo si è fatto riferimento alle isobate dell'Istituto Idrografico della Marina.
Per studiare gli Ambiti Costieri con sufficiente dettaglio sono stati implementati due modelli "estesi": il primo su un dominio di calcolo che si estende da Lavagna a Vernazza che comprende tutta la zona di interesse dell'Ambito Costiero 16; il secondo da Punta Mesco a Marina di Massa in Toscana che comprende le zone degli Ambiti Costieri 17 e 18. Il domino di calcolo utilizzato per la modellazione dell'Ambito Costiero 16 si estende fino ad una profondità di -750 m circa, mentre quello implementato per gli Ambiti Costieri 17 e 18 si estende fino ad una profondità di -400 m circa. I modelli estesi sono stati utilizzati esclusivamente per simulare i processi di trasformazione del moto ondoso (modulo MIKE21 SW). La risoluzione dei modelli, intesa come dimensione media dei triangoli della mesh, varia dai 1000 m al largo ai 30 m sotto costa.

Per i modelli "di dettaglio", implementati su un'area molto più ridotta, è stata utilizzata una dimensione minima della maglia di calcolo molto più fine (fino a 5m sotto costa), che consente di risolvere al meglio i processi di trasformazione del moto ondoso fino ad apprezzare il fenomeno di frangimento (MIKE21-SW).
La scelta della risoluzione della *mesh* di calcolo ha potuto usufruire del grande vantaggio tipico dei modelli a maglia flessibile, ovvero quello di poter variare significativamente le dimensioni degli elementi di calcolo (triangoli) in funzione della zona di interesse e dei fenomeni che si intendono modellare. Si è potuto pertanto limitare il numero degli elementi riducendo la risoluzione dei triangoli laddove la profondità dell'acqua garantiva l'assenza di significativi processi di trasformazione dell'onda e idrodinamici. L'input dei modelli di dettaglio è rappresentato dai parametri di onda simulati dai modelli estesi esattamente in corrispondenza della boundary scelta, per le diverse onde estreme individuate per le direzioni di influenza.

Si è proceduto, pertanto, in una prima fase, a fare girare il modello a larga scala con le batimetrie dell'Istituto idrografico della Marina, ottenendo una rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo; successivamente sono stati creati i modelli di dettaglio con i rilievi batimetrici realizzati ad hoc e simulata la propagazione del moto ondoso fino a costa,

utilizzando come dati di input i valori caratteristici individuati con la simulazione a larga scala nei pressi di una batimetrica (boundary del modello di dettaglio) opportunamente stabilita.

2. Il modello matematico MIKE21

2.1. Struttura del modello

L'analisi dell'evoluzione del moto ondoso e delle trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso costa è stata condotta mediante un modello numerico bidimensionale: il modulo Spectral Waves (SW) del codice di calcolo MIKE 21 di DHI (Danish Hydraulic Institute). Il pacchetto MIKE 21 dispone di diverse versioni che si differenziano in base alle schematizzazioni geometriche, la licenza utilizzata è quella di cui si è dotata ARPAL, con la versione ai volumi finiti e maglia flessibile (Flexible Mesh) che offre la possibilità di condurre simulazioni integrate tra diversi moduli, simulando quindi la mutua influenza delle diverse fenomenologie considerate quali onde, correnti, trasporto solido.
La propagazione del moto ondoso viene modellata con algoritmi di calcolo che simulano le trasformazioni delle grandezze spettrali del moto ondoso gli effetti dissipativi dovuti ai frangimenti, all'attrito con il fondo, agli effetti di rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche.
MIKE 21 SW include due differenti formulazioni: "Directional decoupled parametric" e "Fully spectral". La prima delle due formulazioni è basata su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'energia del moto ondoso. La parametrizzazione è effettuata nel dominio della frequenza mediante l'introduzione come variabili dipendenti del momento di ordine zero e del momento di primo ordine dello spettro (Holthuijsen, 1989). La seconda formulazione è basata sulla conservazione dell'energia del moto ondoso come descritta da Komen (1994) e Young (1999). I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- Generazione dell'onda ad opera del vento;
- Interazione non lineare tra le onde;
- Dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping"
- Dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- Dissipazione dovuta al frangimento;
- Rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- Interazione onde-correnti;
- Diffrazione;
- Riflessione semplice;
- Frangimento.

I passi di un'indagine tipo consistono in:
- acquisizione ed importazione dei dati (ondametrici, batimetrici e immagini georiferite);
- analisi del clima ondoso al largo;
- individuazione delle classi (Hs, Tp, MWD);
- costruzione della mesh di calcolo;
- setup del modello SW;
- analisi e visualizzazione dei risultati.

2.2. Funzionamento del modello

MIKE 21 SW è un modello spettrale per vento ed onde di nuova generazione, basato su una griglia non strutturata che simula la trasformazione di onde generate dal vento e di onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.
Il modello risolve il processo di propagazione dell'onda considerando l'equazione di bilancio dell'energia associata al moto ondoso che tiene in conto i diversi contributi: la variazione nel tempo, la propagazione nello spazio, la variazione nella direzione, la variazione nel dominio delle frequenze e i

termini sorgente. I termini sorgente sono fenomeni fisici che contribuiscono alla variazione dell'energia del moto ondoso sia in senso negativo sia in senso positivo. I termini sorgente negativi sono i fenomeni che hanno una funzione dissipativa, come quelli sopra elencati, i termini positivi sono invece quelli che svolgono una funzione di accrescimento, come la generazione del moto ondoso per effetto del vento.

Le simulazioni effettuate con MIKE 21 SW permettono di ottenere una dettagliata rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo, con particolare attenzione alla zona più prossima alla spiaggia, laddove la risoluzione spaziale della mesh di calcolo è pari a circa 5 metri (lunghezza media dei lati dei triangoli che compongono la mesh).

Il modello descrive l'evoluzione delle caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione dal largo verso riva in seguito ai fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, di diffrazione, di interazione tra le onde e di whitecapping.

Una delle trasformazioni più rilevanti nello studio delle dinamiche costiere è il processo di *rifrazione*, la rotazione del fronte d'onda che tende a disporsi parallelo alle isobate ed alla linea di costa e che è in grado di determinare l'insorgenza di sforzi di taglio al fondo (*radiation stress*).

Sulle alte profondità non si ha una concreta riduzione dell'altezza d'onda per effetto della rifrazione; in tutte le condizioni le onde dissipano buona parte dell'energia per effetto del frangimento determinando, di conseguenza, valori di altezza d'onda significativa abbastanza elevati in prossimità della spiaggia.

I gradienti dei *radiation stress,* massimi in corrispondenza del frangimento, sono i responsabili della generazione delle correnti litoranee e presentano le seguenti caratteristiche:

- a parità di direzione di incidenza dell'onda sono tanto più elevati quanto maggiore è l'altezza d'onda al frangimento.
- a parità di altezza d'onda al frangimento sono tanto più elevati quanto maggiore è l'angolo di incidenza tra il fronte d'onda e le isobate.

Il software MIKE 21 SW può inoltre eseguire direttamente il calcolo del frangimento solo ad elevate risoluzioni avendo a disposizione un rilievo di dettaglio del fondale in esame, sfruttando la grandezza statistica "Breaking Index".

Nell'analisi di dettaglio vengono quindi fornite le altezze d'onda in punti specifici individuati sotto costa e le profondità al frangimento.

Per una completa descrizione delle equazioni numeriche utilizzate dal modello durante l'elaborazione si rimanda al manuale del software scaricabile al link:

http://www.mikebydhi.com/~/media/Microsite_MIKEbyDHI/Publications/PDF/Short%20descriptions/MIKE21_SW_FM_Short_Description.ashx.

2.3. Dati di input del modello

I primi passi da affrontare nell'ambito della modellazione sono: la costruzione della griglia di calcolo a partire dai dati batimetrici/topografici dell'area oggetto di studio; la definizione dello spettro bidimensionale. Per la messa a punto del modello occorre quindi procedere secondo i seguenti punti.

- Definizione della linea di costa con punti equidistanti: particolare attenzione deve essere posta in corrispondenza delle strutture di protezione del litorale in modo da riprodurre una linea di costa quanto più coerente alla realtà;
- georeferenziazione immagini da sovrapporre alla linea di costa per verificare la conformità della costa e del boundary offshore;
- definizione delle condizioni al contorno: le boundary offshore e laterali devono essere inserite in modo coerente all'esposizione del paraggio in esame e al numero di elementi supportabili dal modello;
- costruzione della mesh di calcolo e interpolazione sulle batimetriche: il risultato costituisce l'input batimetrico rappresentativo dello specchio di interesse. La costruzione della mesh di calcolo

consente di realizzare una griglia di calcolo variabile, distinguendo tra un dominio più ampio al largo e uno più dettagliato sotto costa, in corrispondenza dei rilievi batimetrici di dettaglio. La griglia variabile consente di affinare le zone a risoluzione diversa distinte in base all'influenza della geometria dei fondali e dell'orografia costiera sulle variabili della propagazione del moto ondoso. Un esempio schematico di griglia è rappresentato nella **Figura 2.3.1**, la cui interpolazione porta ad una raffigurazione delle isobate come in **Figura 2.3.2**;

- definizione dell'input sulla boundary offshore:
    - per i modelli estesi: individuazione spaziale dei punti rappresentativi dei parametri d'onda al largo su profondità maggiori di 100 metri, da fornire come input ai modelli sul contorno di largo del modello (offshore boundary conditions);
    - per i modelli di dettaglio: estrazione dei parametri di onda (altezza, periodo direzione) lungo tutta la boundary dai risultati del modello esteso per i diversi periodi di ritorno considerati;
- set-up del modello: all'interno del file di simulazione si inseriscono tutte le impostazioni relative alle diverse componenti da considerare. Per tutte le simulazioni eseguite è stato utilizzato l'algoritmo di calcolo in modalità disaccoppiata in cui lo spettro è discretizzato nelle direzioni e parametrizzato nelle frequenze, formulazione sufficiente per i modelli alla scala considerata e per le applicazioni in cui domina il mare completamente sviluppato senza considerare ulteriori forzanti meteorologiche.

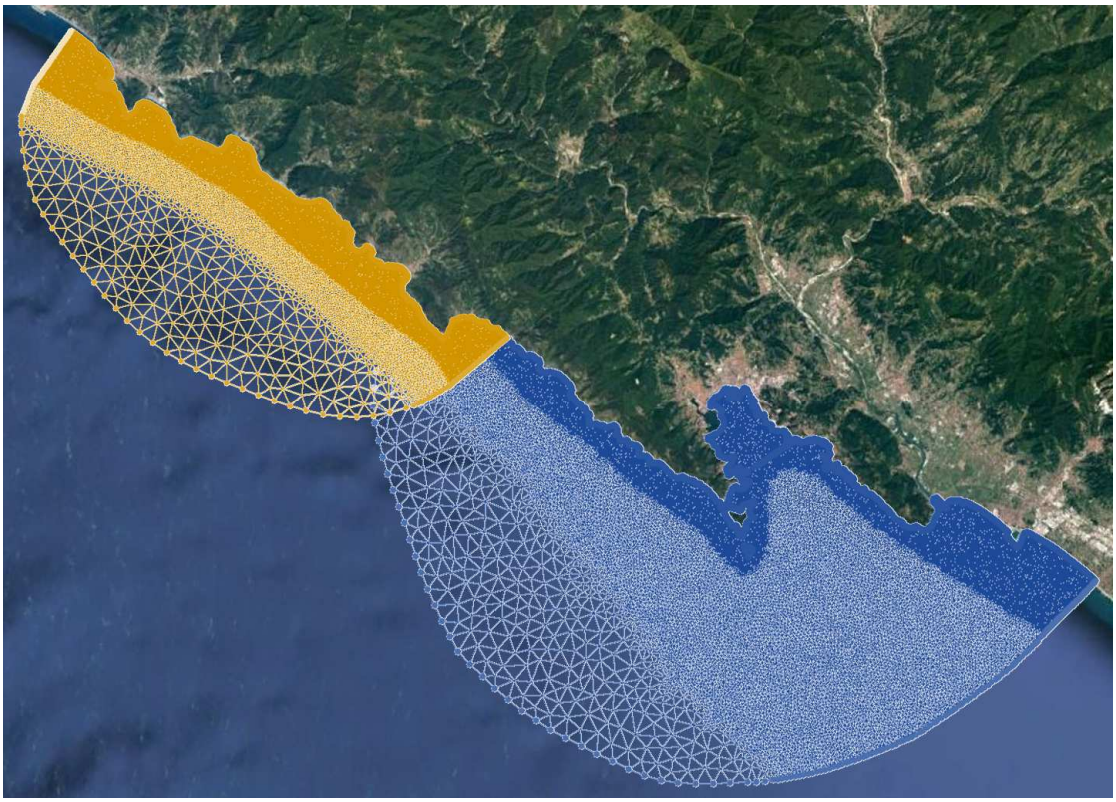


Figura 2.3.1 Mesh di calcolo dei due modelli estesi: in arancione il dominio implementato per l'Ambito Costiero 16, in blu quello per gli Ambiti Costieri 17 e 18.

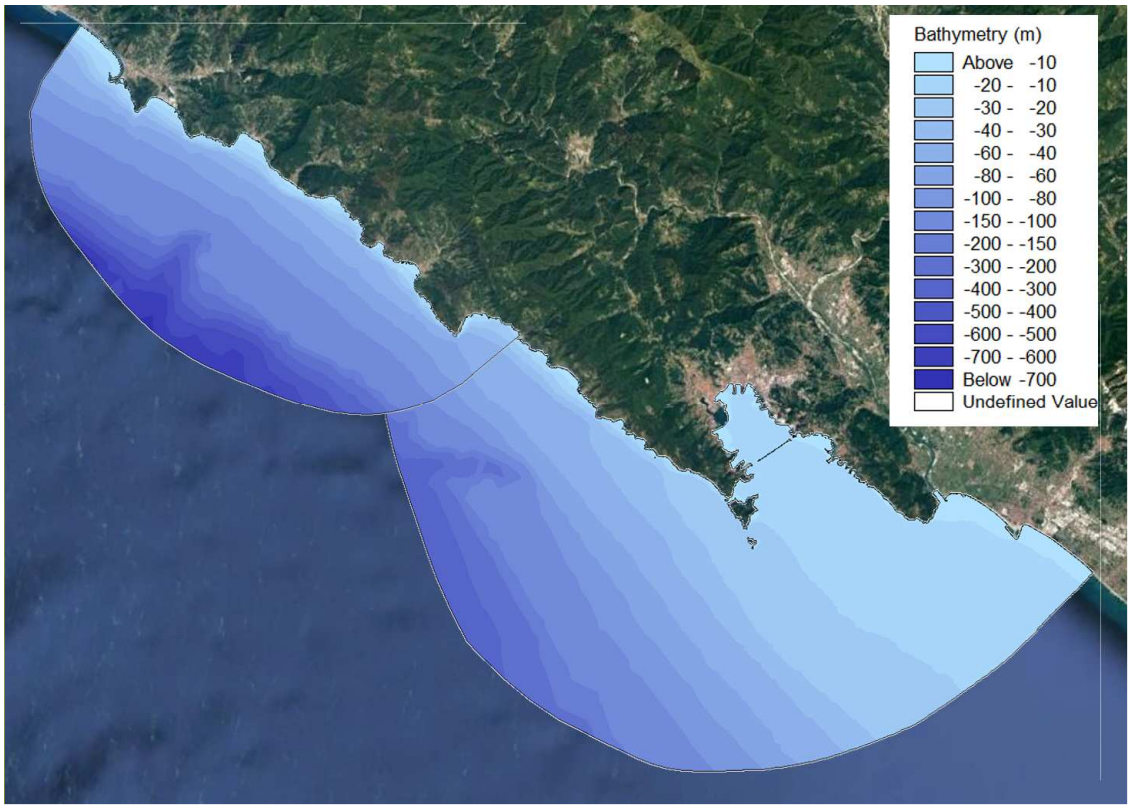


Figura 2.3.2 Interpolazione batimetriche (Ambito Costiero 16, 17 e 18)

Per la modellazione della propagazione del moto ondoso è stato utilizzato come input un'onda stazionaria con i parametri di altezza, direzione e periodo caratteristici del moto ondoso incidente relativa al periodo di ritorno in esame.

3. Applicazione del modello all'Ambito Costiero 16 (Unità Fisiografiche: Moneglia, Deiva e Ghiararo) e agli Ambiti Costieri 17 e 18 (Unità Fisiografiche: Cinque Terre, Muzzerone, Golfo della Spezia e Magra)

L'evoluzione del moto ondoso da largo verso riva è stata valutata applicando il modello, sopra descritto, agli Ambiti Costieri 16, 17 e 18. Vengono quindi nel seguito riportate le analisi specifiche e i risultati ottenuti con la modellazione a larga scala.
Per descrivere nel modo più dettagliato possibile i tre ambiti costieri sono stati considerati due domini di calcolo, con medesime caratteristiche generali, ma con diversi input di onde stazionarie, corrispondenti a prefissati periodi di ritorno, definite da altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione di provenienza.

La griglia di input per la modellazione al largo è stata costruita sulla base delle isobate derivate dal modello dei fondali del Mare Mediterraneo prodotto dall'Istituto Idrografico della Marina.

Nel corso del lavoro è emersa la possibilità di utilizzare le mappature della Posidonia, in modo da utilizzare un ulteriore input di attrito al fondo, realistico per le zone di interesse.

Per l'Ambito costiero 16, le celle della griglia sono state impostate nella mesh di calcolo definendo la linea di largo alla profondità di 750 m in modo tale che i triangoli della mesh più grossolana abbiano una lunghezza media di 1000 metri; tale risoluzione è stata poi variata in prossimità del fondale alla profondità di 100 metri con una lunghezza media dei triangoli di 200 metri fino ad arrivare ad una profondità di circa 70 m con una risoluzione delle maglie di griglia che variano da 50 metri a 30 metri sotto costa.
Per l'Ambito costiero 17 e 18, le celle della griglia sono state impostate nella mesh di calcolo definendo la linea di largo alla profondità di 400 m in modo tale che i triangoli della mesh più grossolana abbiano una lunghezza media di 1000 metri; tale risoluzione è stata poi variata in prossimità del fondale alla profondità di 75 metri con una lunghezza media dei triangoli di 500 m fino ad arrivare ad una profondità di 30 m con una risoluzione delle maglie di griglia che variano da 100 metri fino a 30 metri sotto costa.

In **Figura 2.3.1** del precedente paragrafo, sono riportate le due griglie di calcolo utilizzate per la propagazione del moto ondoso dal largo verso costa per l'Ambito Costiero 16 in arancione e per gli Ambiti 17 e 18 in blu. In Figura 2.3.2 è mostrata la batimetria di entrambi i modelli estesi.

Definite le griglie sono stati generati, per tutti i periodi di ritorno considerati, gli spettri bidimensionali da utilizzare come input al modello; questi sono rappresentativi della distribuzione dell'energia del moto ondoso incidente, funzione della frequenza e della direzione media di propagazione del moto ondoso d'assieme.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i valori caratteristici delle onde al largo, derivati dalle analisi statistiche effettuate, relativamente alle tre direzioni di propagazione interessanti gli ambiti (vedi relazione tematica "Relazione sul clima ondoso al largo"), per i vari periodi di ritorno.

Zona di influenza compresa tra Punta Mesco e Punta Baffe						
Dir °N	T_R (anni)					
	1		50		100	
	H (m)	T_p (s)	H (m)	T_p (s)	H (m)	T_p (s)
150°N	3.4	8.3	6.9	11.8	7.4	12.3

180°N	3.2	8.1	6.7	11.6	7.2	12.1
240°N	5.0	10.1	7.9	12.7	8.4	13.1

Tabella 1.1 Valori di altezza d'onda significativa al largo (H), periodo (Tp) e direzione (dir °N), relativi ai tre periodi di ritorno considerati (T_R), derivati dall'analisi statistica dei dati misurati dall'ondametro della Spezia, trasposte in punto al largo del tratto di costa compreso tra Punta Mesco e Punta Baffe. Utilizzati come input per l'Ambito 16.

Zona di influenza compresa tra la foce del Torrente Parmignola e Punta Mesco						
Dir °N	T_R (anni)					
	1		50		100	
	H (m)	T_p (s)	H (m)	T_p (s)	H (m)	T_p (s)
160°N	2.4	6.9	5.3	10.4	5.7	10.8
180°N	2.0	6.3	4.8	9.8	5.2	10.3
220°N	5.1	10.2	8.1	12.9	8.6	13.3

Tabella 2.2 Valori di altezza d'onda significativa al largo (H), periodo (T_p) e direzione (dir °N), relativi ai tre periodi di ritorno considerati (T_R), derivati dall'analisi statistica dei dati misurati dall'ondametro della Spezia. Utilizzati come input per l'Ambito 17 e 18.

Determinati i dati di input è stata analizzata l'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva mediante il modello MIKE 21, fatto girare in modalità stazionaria.

La propagazione dell'onda dal largo verso costa è stata simulata per i periodi di ritorno pari a 1, 50 e 100 anni, per le tre direzioni di provenienza significative.

In Figura 3.1 è riportato un esempio di output del modello, nella quale sono indicati i vettori di direzione di propagazione del moto ondoso per una mareggiata di libeccio (direzione al largo 240°), avente periodo di ritorno 50 anni, con le gradazioni di colore ad indicare le altezze d'onda.

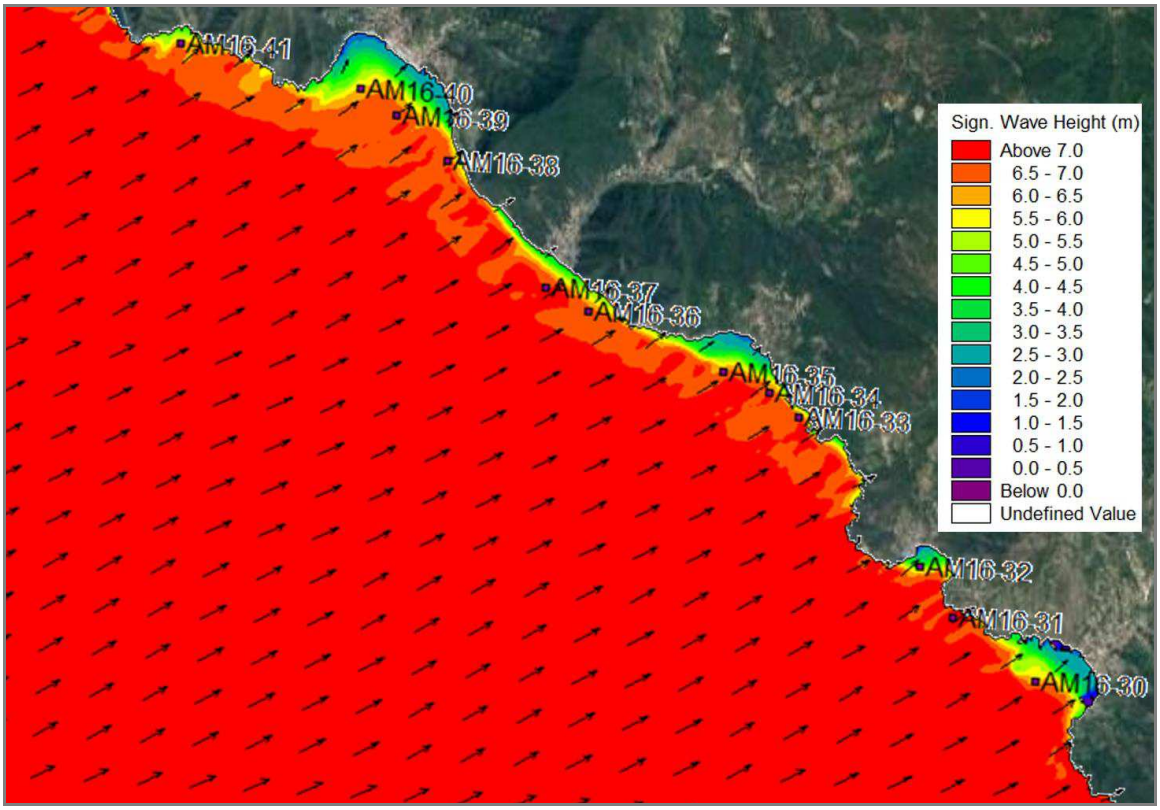


Figura 3.1 Distribuzione delle altezze d'onda e dei vettori di direzione di propagazione del moto ondoso dal largo verso riva relativa all'evento ondoso con periodo di ritorno pari a 50 anni – Moneglia (direzione al largo 240°)

La rappresentazione dei vettori di direzione fornisce una schematizzazione globale delle ortogonali d'onda (o raggi d'onda), che evidenziano la rotazione dei fronti al variare delle profondità.

Tali vettori, che in acque profonde sono equidistanti e paralleli tra loro, procedendo verso le acque basse variano la loro distanza e diventano convergenti o divergenti in funzione delle caratteristiche batimetriche e della morfologia costiera, evidenziando (dal punto di vista grafico) le aree a maggiore e minore concentrazione di energia ondosa.

Una volta a disposizione i risultati della modellazione matematica sono stati individuati i valori dell'altezza d'onda spettrale, il periodo e la direzione dell'onda nei pressi di 41 stazioni di riferimento; queste sono state individuate in punti significativi, almeno una all'interno di ogni paraggio, in modo da ricoprire omogeneamente l'intero tratto analizzato. Le stazioni sono state posizionate ad una profondità di 15 m tale che non si fosse ancora verificato il fenomeno del frangimento nella propagazione dal largo verso riva; ad ognuna di esse è stato associato un nome di riconoscimento in relazione alla posizione geografica scelta.

In Tabella 3.3 sono indicate le coordinate delle 41 stazioni di riferimento all'interno dei tre Ambiti Costieri, mentre in Figura 3.2 sono riportate su cartografia, a titolo di esempio, alcune stazioni individuate nell'Ambito Costiero 18.

Nome Stazione	Numero Stazione	Coordinate Stazione		
		x	y	Z [m]
Marinella	AM18-1	579900.60	4874383.00	-15
Bocca di Magra	AM18-2	577725.00	4875960.30	-15
	AM18-3	576708.00	4876357.30	-15
	AM18-4	575565.80	4877097.00	-15
Fiascherino	AM18-5	574206.00	4877695.30	-15
	AM18-6	572819.10	4877755.10	-15

Lerici	AM18-7	570605.50	4877820.40	-15
Lerici	AM18-8	569740.70	4877967.20	-15
Le grazie	AM18-9	568761.70	4878097.70	-15
Palmaria est	AM18-10	568718.10	4877330.80	-15
Palmaria est	AM18-11	568413.60	4876466.10	-15
Palmaria est	AM18-12	568038.30	4876134.30	-15
Palmaria nord	AM18-13	566857.20	4877578.70	-15
	AM17-14	566610.60	4877724.80	-15
Schiara	AM17-15	563580.40	4879407.00	-15
Nacchè	AM17-16	561794.00	4880889.60	-15
Canneto	AM17-17	560366.10	4881861.80	-15
Riomaggiore	AM17-18	559011.10	4882788.40	-15
	AM17-19	558777.20	4883043.60	-15
	AM17-20	557984.30	4883883.60	-15
Corniglia	AM17-21	557236.90	4884488.10	-15
	AM17-22	556614.90	4885083.60	-15
Guvano Levante	AM17-23	556012.60	4885672.90	-15
Guvano Ponente	AM17-24	555681.70	4885911.00	-15
	AM17-25	554636.20	4886900.80	-15
Vernazza	AM17-26	554376.40	4887169.90	-15
Monterosso centro	AM17-27	552498.80	4887881.30	-15
Fegina	AM17-28	551991.60	4887915.30	-15
Lega navale	AM17-29	551623.50	4887692.60	-15
Levanto	AM16-30	547948.90	4890597.10	-15
Vallesanta	AM16-31	546807.50	4891373.40	-15
Bonassola	AM16-32	546331.20	4892010.60	-15
Porto Pidocchio	AM16-33	544595.90	4893903.60	-15
Torsei	AM16-34	544187.60	4894212.90	-15
Arena-Vallà	AM16-35	543556.60	4894444.90	-15
Spiaggetta	AM16-36	541713.10	4895140.80	-15
Deiva Marina	AM16-37	541116.20	4895428.50	-15
Rocca incatenata	AM16-38	539708.80	4897021.40	-15
Moneglia	AM16-39	539000.50	4897581.30	-15
Moneglia	AM16-40	538499.40	4897921.50	-15
Vallegrande	AM16-41	536074.40	4898363.80	-15

Tabella 3.3: Coordinate geografiche delle 41 stazioni di riferimento

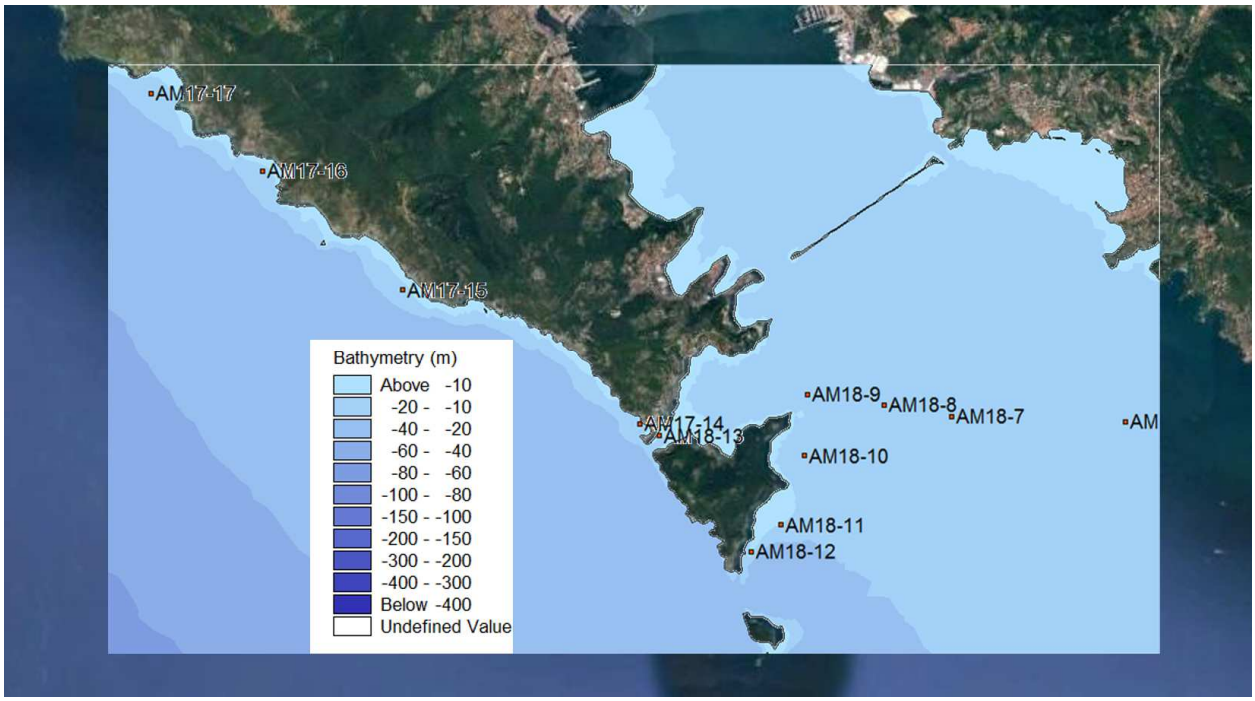


Figura 2.3.2 localizzazione delle stazioni a -15 m sulla carta batimetrica nell'Ambito 18

3.1. Valori caratteristici delle onde nei pressi delle stazioni di calcolo

L'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva all'interno delle unità fisiografiche è stata analizzata per i periodi di ritorno pari a 1, 50 e 100 anni; nelle Tabelle seguenti sono riportati i valori caratteristici delle onde nelle 41 stazioni, per i diversi periodi di ritorno.

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 160°			Direzione largo 180°			Direzione largo 220°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Marinella	AM18-1	2.2	6.4	161.9	1.9	6.0	180.8	4.0	8.2	218.5
Bocca di Magra	AM18-2	2.1	6.3	162.7	1.8	6.0	181.1	4.1	8.3	219.0
	AM18-3	2.1	6.3	163.4	1.8	6.0	181.4	4.0	8.3	218.7
	AM18-4	2.1	6.3	164.5	1.8	6.0	181.5	4.0	8.4	218.6
Fiascherino	AM18-5	2.1	6.3	163.7	1.8	6.0	181.4	3.8	8.5	217.3
	AM18-6	2.1	6.4	163.3	1.8	6.1	181.2	3.6	8.7	213.7
Lerici	AM18-7	2.1	6.4	163.8	1.8	6.1	180.0	2.7	9.1	207.3
Lerici	AM18-8	2.1	6.5	162.7	1.7	6.1	176.6	2.1	9.2	198.7
Le grazie	AM18-9	1.9	6.5	157.6	1.4	6.1	167.2	0.9	9.1	183.1
Palmaria est	AM18-10	1.9	6.6	157.0	1.4	6.2	167.5	1.1	9.3	183.9
Palmaria est	AM18-11	1.8	6.6	155.2	1.3	6.2	168.6	1.9	9.7	196.8
Palmaria est	AM18-12	1.4	6.6	148.1	1.2	6.2	175.5	2.7	9.8	186.2
Palmaria nord	AM18-13	0.5	6.8	180.6	0.7	6.2	186.6	2.5	9.7	187.0
	AM17-14	1.3	6.8	182.2	1.5	6.3	191.3	4.6	9.8	222.0
Schiara	AM17-15	1.9	6.8	171.6	1.8	6.3	183.6	4.6	10.0	221.5
Nacchè	AM17-16	1.5	6.8	182.7	1.6	6.3	190.5	4.6	10.0	224.1
Canneto	AM17-17	1.9	6.8	172.5	1.8	6.3	184.0	4.6	10.0	220.6
Riomaggiore	AM17-18	1.4	6.9	183.3	1.6	6.3	190.7	4.4	10.1	223.5

	AM17-19	1.6	6.9	179.8	1.7	6.3	188.3	4.7	10.0	220.1
	AM17-20	1.7	6.9	174.8	1.8	6.3	185.3	4.7	10.0	219.0
Corniglia	AM17-21	1.9	6.8	173.5	1.8	6.3	184.6	4.7	10.0	222.3
	AM17-22	1.8	6.8	173.1	1.8	6.3	183.8	4.7	10.0	213.8
Guvano Levante	AM17-23	1.7	6.8	174.7	1.8	6.3	185.1	4.5	10.0	219.7
Guvano Ponente	AM17-24	1.9	6.9	172.6	1.8	6.3	183.8	4.7	10.0	219.9
	AM17-25	1.8	6.9	173.5	1.8	6.3	184.3	4.6	10.0	218.9
Vernazza	AM17-26	1.9	6.9	174.2	1.8	6.3	184.7	4.5	10.0	220.6
Monterosso centro	AM17-27	2.1	6.9	165.2	1.8	6.3	180.1	4.0	10.0	203.3
Fegina	AM17-28	2.1	6.9	165.7	1.8	6.3	179.7	2.9	10.1	197.7
Lega navale	AM17-29	2.0	6.8	159.4	1.6	6.2	172.2	2.4	10.0	176.5

Tabella 3.1.1: Periodo di ritorno 1 anno - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 150°			Direzione largo 180°			Direzione largo 240°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Levanto	AM16-30	1.7	8.2	180.3	2.6	8.0	191.9	4.3	9.9	233.6
Vallesanta	AM16-31	2.2	8.2	172.3	2.7	8.1	187.2	4.7	10.0	235.7
Bonassola	AM16-32	2.1	8.2	173.5	2.7	8.0	187.0	3.8	10.0	222.1
Porto Pidocchio	AM16-33	1.7	8.3	181.3	2.5	8.1	192.9	4.3	10.0	234.7
Torsei	AM16-34	1.9	8.2	173.8	2.7	8.1	186.4	4.4	10.0	228.1
Arena-Vallà	AM16-35	2.4	8.2	170.8	2.9	8.1	186.8	4.2	10.0	233.3
Spiaggetta	AM16-36	2.6	8.3	164.8	2.8	8.1	183.4	4.3	10.0	227.8
Deiva Marina	AM16-37	2.7	8.3	165.0	2.9	8.1	184.7	4.5	10.0	233.3
Rocca incatenata	AM16-38	1.9	8.2	179.4	2.6	8.1	192.5	4.3	10.0	234.6
Moneglia	AM16-39	2.3	8.2	172.5	2.8	8.0	187.9	4.2	10.0	231.9
Moneglia	AM16-40	2.4	8.2	170.5	2.8	8.0	186.3	3.8	10.0	226.9
Vallegrande	AM 16-41	2.7	8.3	163.1	2.8	8.1	182.8	4.0	10.0	222.5

Tabella 3.1.2: Periodo di ritorno 1 anno - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambito Costiero 16

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 160°			Direzione largo 180°			Direzione largo 220°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Marinella	AM18-1	4.6	8.4	166.4	4.2	8.1	184.1	5.4	9.4	219.2
Bocca di Magra	AM18-2	4.3	8.1	168.0	4.0	7.9	184.8	5.5	9.3	219.4
	AM18-3	4.4	8.0	169.7	4.0	7.9	185.7	5.5	9.5	220.0
	AM18-4	4.2	8.0	171.5	4.0	7.9	186.3	5.5	9.6	219.6
Fiascherino	AM18-5	4.4	8.0	171.8	4.0	8.0	186.6	5.3	9.8	218.7
	AM18-6	4.4	8.1	171.8	4.0	8.2	186.8	5.4	10.2	215.4
Lerici	AM18-7	4.3	8.3	172.0	3.7	8.4	184.7	4.0	10.8	208.3
Lerici	AM18-8	4.1	8.5	169.3	3.4	8.5	180.3	3.1	11.0	199.1
Le grazie	AM18-9	3.3	8.4	159.3	2.3	8.4	166.4	1.1	11.0	179.0
Palmaria est	AM18-10	3.6	8.7	161.1	2.5	8.7	169.2	1.7	11.4	186.4
Palmaria est	AM18-11	3.2	8.9	161.9	2.4	9.0	178.5	3.3	11.9	208.5
Palmaria est	AM18-12	2.5	9.1	161.2	2.3	9.3	183.3	4.1	12.0	195.3
Palmaria nord	AM18-13	1.3	9.8	226.0	1.6	9.4	227.1	3.6	12.0	234.3
	AM17-14	2.3	9.9	191.5	2.8	9.5	199.6	6.9	12.1	222.5
Schiara	AM17-15	3.9	9.9	181.0	4.0	9.5	191.1	7.2	12.4	221.2
Nacchè	AM17-16	3.2	10.0	192.5	3.6	9.6	199.2	7.2	12.4	225.8
Canneto	AM17-17	3.7	10.1	184.8	3.9	9.6	193.1	7.4	12.5	222.3
Riomaggiore	AM17-18	2.8	10.2	195.4	3.4	9.7	201.2	7.3	12.6	225.7
	AM17-19	3.4	10.2	184.8	3.9	9.7	192.1	7.4	12.6	219.4
	AM17-20	3.2	10.1	185.9	3.7	9.6	193.4	7.2	12.5	218.8

Corniglia	AM17-21	3.5	10.1	186.5	3.9	9.6	194.4	7.4	12.5	222.9
	AM17-22	3.4	10.2	183.3	3.8	9.7	190.8	7.2	12.6	215.3
Guvano Levante	AM17-23	3.3	10.1	189.5	3.7	9.6	195.8	6.8	12.5	220.8
Guvano Ponente	AM17-24	3.5	10.2	184.9	3.9	9.6	192.5	7.4	12.5	220.4
	AM17-25	3.5	10.2	186.6	3.9	9.6	193.8	7.1	12.5	219.9
Vernazza	AM17-26	3.6	10.2	186.6	3.9	9.6	194.2	7.3	12.5	221.6
Monterosso centro	AM17-27	4.1	10.2	173.7	4.2	9.7	183.2	6.6	12.6	204.3
Fegina	AM17-28	4.1	10.2	174.0	4.1	9.7	182.6	5.1	12.7	200.3
Lega navale	AM17-29	4.0	10.3	163.4	3.8	9.7	170.9	4.0	12.7	181.2

Tabella 3.1.3**:** Periodo di ritorno 50 anni - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 150°			Direzione largo 180°			Direzione largo 240°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Levanto	AM16-30	3.9	11.5	189.5	5.5	11.3	198.8	6.7	12.4	231.2
Vallesanta	AM16-31	4.2	11.6	183.4	5.5	11.5	194.7	7.6	12.5	233.2
Bonassola	AM16-32	4.1	11.6	183.9	5.5	11.4	193.9	6.2	12.5	220.4
Porto Pidocchio	AM16-33	3.6	11.6	190.1	5.4	11.4	199.4	7.0	12.5	232.5
Torsei	AM16-34	4.1	11.6	180.5	5.5	11.4	190.5	7.0	12.4	224.8
Arena-Vallà	AM16-35	4.9	11.6	181.8	6.0	11.4	194.5	6.8	12.5	231.4
Spiaggetta	AM16-36	4.8	11.7	175.4	6.0	11.5	188.4	6.9	12.5	224.1
Deiva Marina	AM16-37	5.1	11.7	176.3	6.2	11.5	190.6	7.3	12.5	230.3
Rocca incatenata	AM16-38	3.8	11.6	190.4	5.2	11.4	199.9	6.9	12.5	231.7
Moneglia	AM16-39	4.5	11.6	183.4	5.8	11.4	194.8	6.8	12.4	229.1
Moneglia	AM16-40	4.6	11.5	180.5	5.7	11.4	192.5	6.3	12.4	224.7
Vallegrande	AM16-41	5.1	11.7	172.6	5.6	11.5	186.6	6.6	12.5	218.6

Tabella 3.1.4: Periodo di ritorno 50 anni - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambito Costiero 16

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 160°			Direzione largo 180°			Direzione largo 220°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Marinella	AM18-1	4.8	8.6	167.0	4.5	8.3	184.6	5.4	9.5	219.2
Bocca di Magra	AM18-2	4.6	8.2	168.9	4.3	8.2	185.5	5.6	9.5	219.5
	AM18-3	4.6	8.2	170.7	4.3	8.2	186.4	5.6	9.6	220.2
	AM18-4	4.5	8.1	172.5	4.3	8.1	187.1	5.6	9.7	219.9
Fiascherino	AM18-5	4.7	8.1	172.9	4.3	8.2	187.4	5.4	9.9	219.1
	AM18-6	4.7	8.3	173.0	4.3	8.4	187.6	5.5	10.4	215.9
Lerici	AM18-7	4.6	8.5	172.9	3.9	8.7	185.3	4.3	11.1	208.6
Lerici	AM18-8	4.4	8.7	170.0	3.6	8.8	180.7	3.3	11.3	199.2
Le grazie	AM18-9	3.5	8.6	159.7	2.4	8.7	166.5	1.2	11.3	178.9
Palmaria est	AM18-10	3.8	8.9	161.5	2.7	9.0	169.3	1.8	11.7	186.3
Palmaria est	AM18-11	3.4	9.2	162.7	2.5	9.4	179.8	3.5	12.2	208.5
Palmaria est	AM18-12	2.7	9.4	162.7	2.5	9.7	183.9	4.2	12.3	195.0
Palmaria nord	AM18-13	1.4	10.1	226.5	1.7	9.8	227.8	3.8	12.4	234.4
	AM17-14	2.5	10.2	192.3	3.1	9.9	200.4	7.4	12.4	222.5
Schiara	AM17-15	4.2	10.2	182.2	4.3	10.0	192.3	7.6	12.7	221.4
Nacchè	AM17-16	3.4	10.3	193.6	3.9	10.0	200.4	7.5	12.7	226.0
Canneto	AM17-17	3.9	10.4	186.0	4.2	10.1	194.3	7.8	12.8	222.5
Riomaggiore	AM17-18	3.1	10.6	196.6	3.7	10.2	202.4	7.7	13.0	225.9
	AM17-19	3.7	10.6	185.9	4.2	10.2	193.1	7.8	13.0	219.5
	AM17-20	3.4	10.5	186.9	4.0	10.1	194.4	7.4	12.8	218.8
Corniglia	AM17-21	3.7	10.5	187.8	4.2	10.1	195.7	7.8	12.9	223.1
	AM17-22	3.7	10.5	184.4	4.1	10.1	191.9	7.6	12.9	215.3

Guvano Levante	AM17-23	3.5	10.5	190.7	3.9	10.1	196.9	7.1	12.9	220.8
Guvano Ponente	AM17-24	3.8	10.5	186.1	4.2	10.1	193.6	7.8	12.9	220.5
	AM17-25	3.7	10.5	187.8	4.2	10.1	195.0	7.5	12.9	220.0
Vernazza	AM17-26	3.8	10.5	187.8	4.2	10.1	195.4	7.7	12.9	221.7
Monterosso centro	AM17-27	4.3	10.6	174.7	4.6	10.2	183.9	7.0	13.0	204.2
Fegina	AM17-28	4.4	10.6	175.0	4.5	10.2	183.2	5.4	13.0	200.3
Lega navale	AM17-29	4.2	10.7	163.9	4.1	10.2	170.8	4.3	13.1	180.9

Tabella 3.1.5: Periodo di ritorno 100 anni - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione largo 150°			Direzione largo 180°			Direzione largo 240°		
		H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N	H [m]	T [s]	Dir °N
Levanto	AM16-30	4.3	12.0	190.4	6.0	11.8	199.4	7.0	12.8	230.9
Vallesanta	AM16-31	4.6	12.1	184.5	6.0	11.9	195.5	8.0	12.9	232.9
Bonassola	AM16-32	4.4	12.0	184.9	6.0	11.9	194.6	6.6	12.8	220.3
Porto Pidocchio	AM16-33	4.0	12.1	191.0	5.8	11.9	200.1	7.5	12.8	232.2
Torsei	AM16-34	4.5	12.0	181.2	6.0	11.9	191.0	7.4	12.8	224.3
Arena-Vallà	AM16-35	5.3	12.0	183.1	6.5	11.9	195.4	7.2	12.8	231.2
Spiaggetta	AM16-36	5.2	12.1	176.5	6.4	12.0	189.1	7.3	12.9	223.6
Deiva Marina	AM16-37	5.5	12.1	177.5	6.6	12.0	191.3	7.7	12.9	229.9
Rocca incatenata	AM16-38	4.1	12.1	191.4	5.6	11.9	200.7	7.3	12.8	231.4
Moneglia	AM16-39	4.8	12.0	184.5	6.2	11.9	195.5	7.2	12.8	228.7
Moneglia	AM16-40	4.9	12.0	181.5	6.1	11.8	193.2	6.7	12.8	224.5
Vallegrande	AM16-41	5.4	12.1	173.7	6.0	12.0	187.1	7.0	12.9	218.1

Tabella 3.1.6: Periodo di ritorno 100 anni - valori di altezza, periodo e direzione d'onda estrapolate in corrispondenza delle stazioni di riferimento a -15m - Ambito Costiero 16

In rosso è indicata, per ogni periodo di ritorno, l'altezza d'onda più alta tra le tre direzioni di provenienza considerate; risulta evidente come, in genere, le onde più alte abbiano direzione al largo da Libeccio.

3.2. Analisi dei risultati

Da una prima analisi dei risultati ottenuti si evidenzia che i mari provenienti da libeccio sono i più significativi per i paraggi dell'Ambito 16, 17 e parte del 18, mentre quelli da scirocco lo sono per alcuni paraggi delle Unità Fisiografiche del Golfo della Spezia e del Magra; si nota inoltre come i risultati delle stazioni Lerici, Le Grazie e Palmaria est siano influenzati dall'isola Palmaria e dall'isola di Tino, che offrono una "schermatura" e quindi una protezione dalle ondazioni da Libeccio e, in misura minore, da quelle provenienti da Mezzogiorno.

Nelle Tabelle seguenti (dalla 3.2.1 alla 3.2.6) è indicato come si modifica l'altezza d'onda, in termini di decremento percentuale, nel passaggio dal largo alla profondità delle stazioni di riferimento (-15 metri).

In corrispondenza dei paraggi da Marinella a Montemarcello, nell'Ambito 18, si ha una minor riduzione delle altezze d'onda per la direzione da Mezzogiorno e Scirocco. Mentre per gli altri paraggi, degli Ambiti di studio, la minor riduzione delle altezze d'onda si ha per ondazioni con direzione da Libeccio.

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione al largo 160°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 220°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %
Marinella	AM18-1	2.4	2.2	7	2.0	1.9	6	5.1	4.0	22
Bocca di Magra	AM18-2	2.4	2.1	11	2.0	1.8	9	5.1	4.1	20

	AM18-3	2.4	2.1	12	2.0	1.8	9	5.1	4.0	21
	AM18-4	2.4	2.1	14	2.0	1.8	9	5.1	4.0	22
Fiascherino	AM18-5	2.4	2.1	12	2.0	1.8	9	5.1	3.8	26
	AM18-6	2.4	2.1	12	2.0	1.8	9	5.1	3.6	29
Lerici	AM18-7	2.4	2.1	12	2.0	1.8	10	5.1	2.7	47
Lerici	AM18-8	2.4	2.1	14	2.0	1.7	15	5.1	2.1	60
Le grazie	AM18-9	2.4	1.9	22	2.0	1.4	32	5.1	0.9	83
Palmaria est	AM18-10	2.4	1.9	20	2.0	1.4	30	5.1	1.1	79
Palmaria est	AM18-11	2.4	1.8	25	2.0	1.3	37	5.1	1.9	62
Palmaria est	AM18-12	2.4	1.4	40	2.0	1.2	42	5.1	2.7	48
Palmaria nord	AM18-13	2.4	0.5	81	2.0	0.7	67	5.1	2.5	52
	AM17-14	2.4	1.3	48	2.0	1.5	25	5.1	4.6	9
Schiara	AM17-15	2.4	1.9	20	2.0	1.8	9	5.1	4.6	9
Nacchè	AM17-16	2.4	1.5	36	2.0	1.6	18	5.1	4.6	10
Canneto	AM17-17	2.4	1.9	22	2.0	1.8	10	5.1	4.6	9
Riomaggiore	AM17-18	2.4	1.4	42	2.0	1.6	20	5.1	4.4	14
	AM17-19	2.4	1.6	33	2.0	1.7	16	5.1	4.7	8
	AM17-20	2.4	1.7	28	2.0	1.8	12	5.1	4.7	8
Corniglia	AM17-21	2.4	1.9	22	2.0	1.8	10	5.1	4.7	9
	AM17-22	2.4	1.8	26	2.0	1.8	12	5.1	4.7	8
Guvano Levante	AM17-23	2.4	1.7	27	2.0	1.8	12	5.1	4.5	11
Guvano Ponente	AM17-24	2.4	1.9	23	2.0	1.8	10	5.1	4.7	7
	AM17-25	2.4	1.8	25	2.0	1.8	10	5.1	4.6	10
Vernazza	AM17-26	2.4	1.9	23	2.0	1.8	9	5.1	4.5	11
Monterosso centro	AM17-27	2.4	2.1	14	2.0	1.8	8	5.1	4.0	22
Fegina	AM17-28	2.4	2.1	13	2.0	1.8	9	5.1	2.9	43
Lega navale	AM17-29	2.4	2.0	16	2.0	1.6	18	5.1	2.4	53

Tabella 3.2.1: Periodo di ritorno 1 anno – altezze d'onda al largo, nelle stazioni di riferimento e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità di 15 metri, per le tre direzioni analizzate - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione al largo 150°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 240°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %
Levanto	AM16-30	3.4	1.7	49	3.2	2.6	20	5.0	4.3	15
Vallesanta	AM16-31	3.4	2.2	36	3.2	2.7	15	5.0	4.7	6
Bonassola	AM16-32	3.4	2.1	38	3.2	2.7	17	5.0	3.8	24
Porto Pidocchio	AM16-33	3.4	1.7	51	3.2	2.5	21	5.0	4.3	13
Torsei	AM16-34	3.4	1.9	42	3.2	2.7	17	5.0	4.4	13
Arena-Vallà	AM16-35	3.4	2.4	28	3.2	2.9	10	5.0	4.2	15
Spiaggetta	AM16-36	3.4	2.6	23	3.2	2.8	11	5.0	4.3	14
Deiva Marina	AM16-37	3.4	2.7	21	3.2	2.9	9	5.0	4.5	10
Rocca incatenata	AM16-38	3.4	1.9	43	3.2	2.6	20	5.0	4.3	14
Moneglia	AM16-39	3.4	2.3	31	3.2	2.8	12	5.0	4.2	16
Moneglia	AM16-40	3.4	2.4	29	3.2	2.8	13	5.0	3.8	23
Vallegrande	AM16-41	3.4	2.7	19	3.2	2.8	13	5.0	4.0	21

Tabella 3.2.2: Periodo di ritorno 1 anno – altezze d'onda al largo, nelle stazioni di riferimento e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità dei 15 metri, per le tre direzioni analizzate - Ambito Costiero 16

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione al largo 160°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 220°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %

Marinella	AM18-1	5.3	4.6	13	4.8	4.2	12	8.1	5.4	34
Bocca di Magra	AM18-2	5.3	4.3	18	4.8	4.0	17	8.1	5.5	32
	AM18-3	5.3	4.4	18	4.8	4.0	16	8.1	5.5	32
	AM18-4	5.3	4.2	20	4.8	4.0	18	8.1	5.5	32
Fiascherino	AM18-5	5.3	4.4	18	4.8	4.0	17	8.1	5.3	34
	AM18-6	5.3	4.4	17	4.8	4.0	17	8.1	5.4	34
Lerici	AM18-7	5.3	4.3	19	4.8	3.7	24	8.1	4.0	50
Lerici	AM18-8	5.3	4.1	23	4.8	3.4	30	8.1	3.1	62
Le grazie	AM18-9	5.3	3.3	38	4.8	2.3	53	8.1	1.1	86
Palmaria est	AM18-10	5.3	3.6	32	4.8	2.5	47	8.1	1.7	79
Palmaria est	AM18-11	5.3	3.2	39	4.8	2.4	51	8.1	3.3	59
Palmaria est	AM18-12	5.3	2.5	52	4.8	2.3	52	8.1	4.1	50
Palmaria nord	AM18-13	5.3	1.3	76	4.8	1.6	67	8.1	3.6	55
	AM17-14	5.3	2.3	56	4.8	2.8	41	8.1	6.9	14
Schiara	AM17-15	5.3	3.9	26	4.8	4.0	17	8.1	7.2	11
Nacchè	AM17-16	5.3	3.2	40	4.8	3.6	25	8.1	7.2	11
Canneto	AM17-17	5.3	3.7	31	4.8	3.9	18	8.1	7.4	8
Riomaggiore	AM17-18	5.3	2.8	46	4.8	3.4	29	8.1	7.3	10
	AM17-19	5.3	3.4	35	4.8	3.9	20	8.1	7.4	9
	AM17-20	5.3	3.2	39	4.8	3.7	24	8.1	7.2	12
Corniglia	AM17-21	5.3	3.5	34	4.8	3.9	19	8.1	7.4	9
	AM17-22	5.3	3.4	35	4.8	3.8	21	8.1	7.2	11
Guvano Levante	AM17-23	5.3	3.3	38	4.8	3.7	24	8.1	6.8	16
Guvano Ponente	AM17-24	5.3	3.5	34	4.8	3.9	19	8.1	7.4	9
	AM17-25	5.3	3.5	34	4.8	3.9	19	8.1	7.1	12
Vernazza	AM17-26	5.3	3.6	32	4.8	3.9	18	8.1	7.3	10
Monterosso centro	AM17-27	5.3	4.1	23	4.8	4.2	12	8.1	6.6	19
Fegina	AM17-28	5.3	4.1	22	4.8	4.1	14	8.1	5.1	37
Lega navale	AM17-29	5.3	4.0	24	4.8	3.8	21	8.1	4.0	50

Tabella 3.2.3: Periodo di ritorno 50 anni – altezze d'onda al largo, nelle stazioni di riferimento e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità dei 15 metri, per le tre direzioni analizzate - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione al largo 150°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 240°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %
Levanto	AM16-30	6.9	3.9	43	6.7	5.5	17	7.9	6.7	15
Vallesanta	AM16-31	6.9	4.2	38	6.7	5.5	17	7.9	7.6	4
Bonassola	AM16-32	6.9	4.1	41	6.7	5.5	17	7.9	6.2	21
Porto Pidocchio	AM16-33	6.9	3.6	47	6.7	5.4	20	7.9	7.0	11
Torsei	AM16-34	6.9	4.1	40	6.7	5.5	17	7.9	7.0	11
Arena-Vallà	AM16-35	6.9	4.9	29	6.7	6.0	10	7.9	6.8	14
Spiaggetta	AM16-36	6.9	4.8	29	6.7	6.0	10	7.9	6.9	12
Deiva Marina	AM16-37	6.9	5.1	25	6.7	6.2	8	7.9	7.3	7

Rocca incatenata	AM16-38	6.9	3.8	44	6.7	5.2	22	7.9	6.9	13
Moneglia	AM16-39	6.9	4.5	35	6.7	5.8	13	7.9	6.8	14
Moneglia	AM16-40	6.9	4.6	33	6.7	5.7	14	7.9	6.3	20
Vallegrande	AM16-41	6.9	5.1	26	6.7	5.6	16	7.9	6.6	17

Tabella 3.2.4: Periodo di ritorno 50 anni – altezze d'onda al largo, nelle stazioni di riferimento e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità dei 15 metri, per le tre direzioni analizzate - Ambito Costiero 16

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione al largo 160°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 220°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %
Marinella	AM18-1	5.7	4.8	15	5.2	4.5	13	8.6	5.4	37
Bocca di Magra	AM18-2	5.7	4.6	19	5.2	4.3	17	8.6	5.6	35
	AM18-3	5.7	4.6	19	5.2	4.3	16	8.6	5.6	35
	AM18-4	5.7	4.5	21	5.2	4.3	18	8.6	5.6	35
Fiascherino	AM18-5	5.7	4.7	18	5.2	4.3	17	8.6	5.4	37
	AM18-6	5.7	4.7	18	5.2	4.3	18	8.6	5.5	36
Lerici	AM18-7	5.7	4.6	19	5.2	3.9	24	8.6	4.3	51
Lerici	AM18-8	5.7	4.4	24	5.2	3.6	31	8.6	3.3	62
Le grazie	AM18-9	5.7	3.5	39	5.2	2.4	54	8.6	1.2	86
Palmaria est	AM18-10	5.7	3.8	33	5.2	2.7	49	8.6	1.8	79
Palmaria est	AM18-11	5.7	3.4	40	5.2	2.5	52	8.6	3.5	59
Palmaria est	AM18-12	5.7	2.7	52	5.2	2.5	52	8.6	4.2	51
Palmaria nord	AM18-13	5.7	1.4	75	5.2	1.7	67	8.6	3.8	56
	AM17-14	5.7	2.5	55	5.2	3.1	41	8.6	7.4	15
Schiara	AM17-15	5.7	4.2	26	5.2	4.3	18	8.6	7.6	11
Nacchè	AM17-16	5.7	3.4	40	5.2	3.9	25	8.6	7.5	12
Canneto	AM17-17	5.7	3.9	31	5.2	4.2	18	8.6	7.8	9
Riomaggiore	AM17-18	5.7	3.1	46	5.2	3.7	29	8.6	7.7	10
	AM17-19	5.7	3.7	35	5.2	4.2	20	8.6	7.8	10
	AM17-20	5.7	3.4	40	5.2	4.0	24	8.6	7.4	13
Corniglia	AM17-21	5.7	3.7	34	5.2	4.2	20	8.6	7.8	10
	AM17-22	5.7	3.7	36	5.2	4.1	22	8.6	7.6	12
Guvano Levante	AM17-23	5.7	3.5	38	5.2	3.9	24	8.6	7.1	18
Guvano Ponente	AM17-24	5.7	3.8	34	5.2	4.2	19	8.6	7.8	10
	AM17-25	5.7	3.7	34	5.2	4.2	20	8.6	7.5	12
Vernazza	AM17-26	5.7	3.8	33	5.2	4.2	18	8.6	7.7	11
Monterosso centro	AM17-27	5.7	4.3	24	5.2	4.6	12	8.6	7.0	19
Fegina	AM17-28	5.7	4.4	23	5.2	4.5	14	8.6	5.4	37
Lega navale	AM17-29	5.7	4.2	26	5.2	4.1	22	8.6	4.3	50

Tabella 3.2.5: Periodo di ritorno 100 anni – altezze d'onda al largo, nelle stazioni di riferimento e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità dei 15 metri, per le tre direzioni analizzate - Ambiti Costieri 17-18

Nome Stazione	Numero Stazione	Direzione al largo 150°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 240°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %	H_{largo}	$H_{stazione}$	Decrem. %
Levanto	AM16-30	7.4	4.3	43	7.2	6.0	17	8.4	7.0	17
Vallesanta	AM16-	7.4	4.6	38	7.2	6.0	18	8.4	8.0	4

	31									
Bonassola	AM16-32	7.4	4.4	41	7.2	6.0	18	8.4	6.6	21
Porto Pidocchio	AM16-33	7.4	4.0	47	7.2	5.8	20	8.4	7.5	10
Torsei	AM16-34	7.4	4.5	40	7.2	6.0	18	8.4	7.4	12
Arena-Vallà	AM16-35	7.4	5.3	29	7.2	6.5	10	8.4	7.2	14
Spiaggetta	AM16-36	7.4	5.2	30	7.2	6.4	11	8.4	7.3	13
Deiva Marina	AM16-37	7.4	5.5	26	7.2	6.6	8	8.4	7.7	8
Rocca incatenata	AM16-38	7.4	4.1	44	7.2	5.6	22	8.4	7.3	13
Moneglia	AM16-39	7.4	4.8	35	7.2	6.2	14	8.4	7.2	15
Moneglia	AM16-40	7.4	4.9	34	7.2	6.1	15	8.4	6.7	20
Vallegrande	AM16-41	7.4	5.4	27	7.2	6.0	17	8.4	7.0	17

Tabella 3.2.6: Periodo di ritorno 100 anni – altezze d'onda al largo, nelle stazioni di riferimento e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità dei 15 metri, per le tre direzioni analizzate - Ambito Costiero 16

I risultati della modellazione matematica hanno evidenziato che nella propagazione del moto ondoso dal largo verso riva le onde subiscono una trasformazione dovuta all'effetto del fondo; i fronti d'onda subiscono una rotazione a causa della diminuzione della velocità delle onde con la profondità e l'altezza d'onda subisce una diminuzione legata alla dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase e velocità di gruppo.

Il moto ondoso, a causa dell'orientazione della costa, subisce modesti effetti rifrattivi per le mareggiate provenienti da libeccio e si presenta con altezze d'onda notevoli anche vicino a costa.

Differente è il comportamento che si manifesta in corrispondenza di mareggiate provenienti da scirocco, come si evince dalle tabelle di cui sopra, per tale direzione infatti l'effetto dell'orientamento delle batimetriche e della costa sono responsabili di un maggiore effetto di rifrazione che porta a un decremento di oltre il 50% per diverse zone.

I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare come gli eventi estremi provenienti da Libeccio siano i più significativi per tutti i paraggi dell'Ambito 16, 17 e parte del 18; mentre quelli da Scirocco lo siano per alcuni paraggi delle Unità Fisiografiche del Golfo della Spezia e del Magra.
Inoltre, dai risultati ottenuti nelle stazioni in corrispondenza di Lerici, Le Grazie e Palmaria est, è possibile notare la schermatura offerta dall'isola Palmaria e dall'isola di Tino sulle mareggiate da Libeccio e, in misura minore, da Mezzogiorno.

4. Conclusioni della modellazione a larga scala

Una volta definito il clima ondoso al largo, per i tre periodi di ritorno considerati (1, 50 e 100 anni), è stata analizzata la propagazione verso riva, mediante l'applicazione del modello matematico MIKE21; le onde subiscono una trasformazione dovuta all'effetto del fondo, i fronti d'onda ruotano a causa della diminuzione della velocità delle onde con la profondità e l'altezza diminuisce a causa della dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase e velocità di gruppo.

I risultati della modellazione matematica, applicata agli ambiti di studio, hanno evidenziato che Il moto ondoso, a causa dell'orientazione della costa, subisce modesti effetti rifrattivi per le mareggiate provenienti da libeccio e si presenta a costa con altezze d'onda notevoli; differente è il comportamento delle mareggiate provenienti da scirocco, per le quali si ha, in alcune zone, un decremento dell'altezza d'onda di oltre il 50%.

Per la definizione delle caratteristiche delle onde sotto costa, analizzate per ciascun paraggio degli ambiti di studio, occorre fare riferimento alla modellazione matematica, applicata secondo il codice di calcolo Mike 21 sulla griglia di dettaglio (derivata dal rilievo mutibeam effettuato sotto costa), i cui risultati e assunzioni sono riportati nelle relazioni di paraggio.
Si rimanda pertanto alle relazioni di paraggio per quanto riguarda la propagazione ondosa e la disposizione delle ortogonali d'onda sotto costa, derivati dal modello di dettaglio, all'interno dei singoli paraggi degli Ambiti Costieri.

Riferimenti

Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proc. 16th Int. Conf. On Coastal Eng., Hamburg, pp.569-587, 1978.