



SEZIONE DEL GENIO MILITARE PER LA MARINA DI CAGLIARI

Stazione VLF - Isola di Tavolara (OT)

RESTAURATION OF HEALTH AND SAFETY CONDITIONS TO
OPERATE THE STATION - STAZIONE VLF - ISOLA DI
TAVOLARA (OT)

002

PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO METEOMARINO

21

018

DR

002

0

MAR

Committente

SEZIONE DEL GENIO MILITARE
PER LA MARINA DI CAGLIARI

P.zza Marinai d'Italia snc

Progettazione opere marittime:



MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA
06.3269461 - www.modimar.it

Progettazione:

Ing. Mauro MARINI

Ing. Davide SALTARI

Ing. Leonardo FARINA

Dott. Arch. Alessandro BARTOLESCHI

Studi ambientali

Dott.ssa Scrimieri Sara

Dott. De Pirro Maurizio

Febbraio 2022	0	0	M.C.	D.S.	M.M.
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Disegnato:	Verificato:	Approvato:
Dimensioni foglio: A1		La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo documento con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta. This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission			

INDICE

1.	Premesse	1
1.1	Introduzione.....	1
1.2	Obiettivi dello studio	1
1.3	Contenuto del presente rapporto	2
2.	Dati meteomarini utilizzati	3
2.1	Dati di vento	3
2.2	Dati di moto ondoso	3
2.3	Dati batimetrici e topografici.....	3
3.	Inquadramento geografico	4
3.1	Impostazione dei Fetch geografico ed efficace	4
4.	Acquisizione ed analisi dei dati di vento	9
5.	Acquisizione ed analisi dei dati ondametrici	12
5.1	Caratteristiche delle serie di dati ondametrici disponibili	12
6.	Clima di moto ondoso al largo	14
6.1	Curva di Durata.....	18
6.2	Distribuzione degli eventi in relazione al periodo di picco del moto ondoso.....	19
7.	Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo	22
7.1	Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati	24
8.	Variazioni del livello marino	28
8.1	Marea astronomica	28
8.2	Dislivello barico.....	28
8.3	Sovralzo dovuto al vento	29
8.4	Valori estremi	29

1. Premesse

1.1 Introduzione

La presente relazione riguarda lo studio specialistico volto all'individuazione del clima di moto ondoso nel paraggio costiero di intervento, condotto dalla scrivente MODIMAR S.r.l., finalizzato alla definizione, dei principali parametri meteomarini (vento e moto ondoso) necessari per poter svolgere i successivi calcoli di dimensionamento della diga foranea a gettata posta a protezione dell'approdo di Cala di Ponente, ubicato in località Spalmatore di fuori sull'isola di Tavolara.



Figura 1-1. Ubicazione dell'area di intervento situata in prossimità di Punta Timone all'estremo nord orientale dell'Isola di Tavolara (fonte Google Earth)

1.2 Obiettivi dello studio

Lo Studio Meteomarino ha l'obiettivo di individuare i parametri meteomarini (vento e moto ondoso) cui fare riferimento per i successivi approfondimenti progettuali, tra cui il dimensionamento idraulico strutturale delle opere a gettata, la verifica dei livelli di oscillazione residua interna ed il valore della tracimazione ondosa dovuti ad eventi estremi che si determineranno con la realizzazione delle opere previste in progetto. I risultati di questo studio specialistico definiscono anche le forzanti meteomarine (in termini di direzione e intensità del vento e del moto ondoso) necessarie per la corretta applicazione dei modelli numerici, contemplati da altri studi specialistici che verranno redatti a corredo del progetto definitivo, la cui finalità è quella di verificare l'efficienza e correttezza dell'assetto plano-altimetrico delle opere da realizzare.

1.3 Contenuto del presente studio

Nella presente relazione sono riportati i risultati delle attività conoscitive, di acquisizione, validazione e analisi dei dati che hanno permesso di definire le condizioni di esposizione meteomarina al largo del tratto di costa dell'Isola di Tavolara interessato dagli interventi, con particolare riguardo a:

- inquadramento geografico al largo e definizione del settore di traversia che lo contraddistingue. Determinazione dell'area di generazione efficace per il moto ondoso;
- caratterizzazione generale dei dati meteomarini disponibili e selezione di quelli utilizzati per la redazione del presente studio;
- acquisizione ed analisi dei dati di vento disponibili;
- acquisizione e selezione dei dati di moto ondoso disponibili;
- analisi delle caratteristiche del moto ondoso al largo;
- analisi dei valori estremi di moto ondoso, su base statistica, per la definizione della legge di distribuzione dei valori estremi al largo.

Il paraggio geografico in cui ricade il tratto di litorale in esame si trova circa 14 km ad est del porto di Olbia e si affaccia sul Mar Tirreno occidentale.

Il progetto di fattibilità posto a base di gara, tra gli elaborati che lo compongono, riporta come unica documentazione specialistica, emessa nell'ottobre 2017, di Idraulica Marittima la relazione denominata: "PFTE.E02 - Relazione Idraulico Marittima" in cui è stato utilizzato il modello matematico Wave della suite Delf3D, basato sul modello SWAN con cui è stata effettuata la propagazione dal largo a riva degli stati di mare più significativi per il paraggio costiero in esame.

Con il presente studio si sono volute approfondire le analisi relative al clima medio annuale anemometrico e di moto ondoso utilizzando un intervallo di riferimento delle registrazioni molto più ampio di quello utilizzato nel progetto di fattibilità.

Per il paraggio in esame sono infatti disponibili serie storiche di sistemi previsionali e/o di monitoraggio climatico che hanno consentito di acquisire le registrazioni dei principali parametri meteo marini (intensità e velocità del vento, oltre che altezza significativa, direzione e periodo del moto ondoso) in un punto situato al largo, tenendo presenti le variazioni dei livelli in funzione delle oscillazioni di marea in prossimità del sito di intervento.

In particolare, si è fatto riferimento alle serie di dati di moto ondoso ricostruiti (*hindcasting*) con uno dei più recenti ed evoluti modelli di generazione e propagazione del moto ondoso a partire da modelli di circolazione atmosferica (che sulla base di misure puntuali definiscono la distribuzione dei campi barici e del vento su scala planetaria). In tal modo è stato possibile ricostruire una serie continua di dati di moto ondoso compresa in un intervallo temporale di circa 40 anni avente inizio nel 1979 e termine nel 2019.

2. Dati meteomarini utilizzati

2.1 Dati di vento

Si riporta nella seguente tabella i riferimenti dei dati di vento, costituiti da serie storiche, acquisiti e analizzati specificando che si tratta di dati ricostruiti (in re-analisi) mediante modelli meteorologici. Nella tabella seguente si riporta la descrizione sintetica del dato, i riferimenti da cui sono state estratte le registrazioni, la posizione geografica alla quale si riferisce la serie storica e il periodo di misura e/o ricostruzione utilizzato.

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 40-Year Wind Hindcast: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview	Dati di vento ricostruiti con modello ERA5	41.00° N 9.75° E	1979 2019

2.2 Dati di moto ondoso

Anche per le registrazioni del moto ondoso nella tabella seguente viene riportato l'elenco dei dati disponibili per la successiva analisi, costituiti da serie storiche, specificando se si tratta di dati ricostruiti (in re-analisi) mediante modelli numerici che si basano su dati meteorologici o di dati provenienti da misure dirette. Per le differenti tipologie di dato si è indicata la fonte, la descrizione sintetica della registrazione, la posizione geografica alla quale il dato si riferisce ed il periodo di misura o ricostruzione disponibile.

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
2	ECMWF-ERA5 40-Year Wind Hindcast: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview	Dati di vento ricostruiti con modello ERA5	41.00° N 9.75° E	1979 2019
3	United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) www.noaa.gov	Dati di vento ondoso ricostruiti con modello WWIII	41.00° N 9.75° E	1979 2009

2.3 Informazioni batimetriche e topografiche

Nella tabella presente poco sotto è riportato l'elenco delle informazioni batimetriche e topografiche acquisite ed utilizzate per la successiva implementazione dei modelli numerici di propagazione del moto ondoso alle quali si è fatto riferimento per definire la conformazione dei fondali e l'andamento della linea di costa che caratterizza la zona oggetto di studio.

Rif.	Fonte dati	Descrizione
1	EMODnet Bathymetry	Dati batimetrici su scala globale: GEBCO Digital Bathymetry e Satellite Derive Bathymetry (SDB)
2	Istituto Idrografico Marina Militare	Carte nautiche: CN – 322

3. Inquadramento geografico

Il paraggio costiero di interesse è situato ad est della costa nord orientale della Sardegna e si affaccia sul Mar Tirreno occidentale (vedi Figura 3-1). Quindi il sito è geograficamente esposto in prevalenza agli eventi di moto ondoso provenienti dal I° e dal IV° quadrante (Nord-Est e Nord-Ovest).

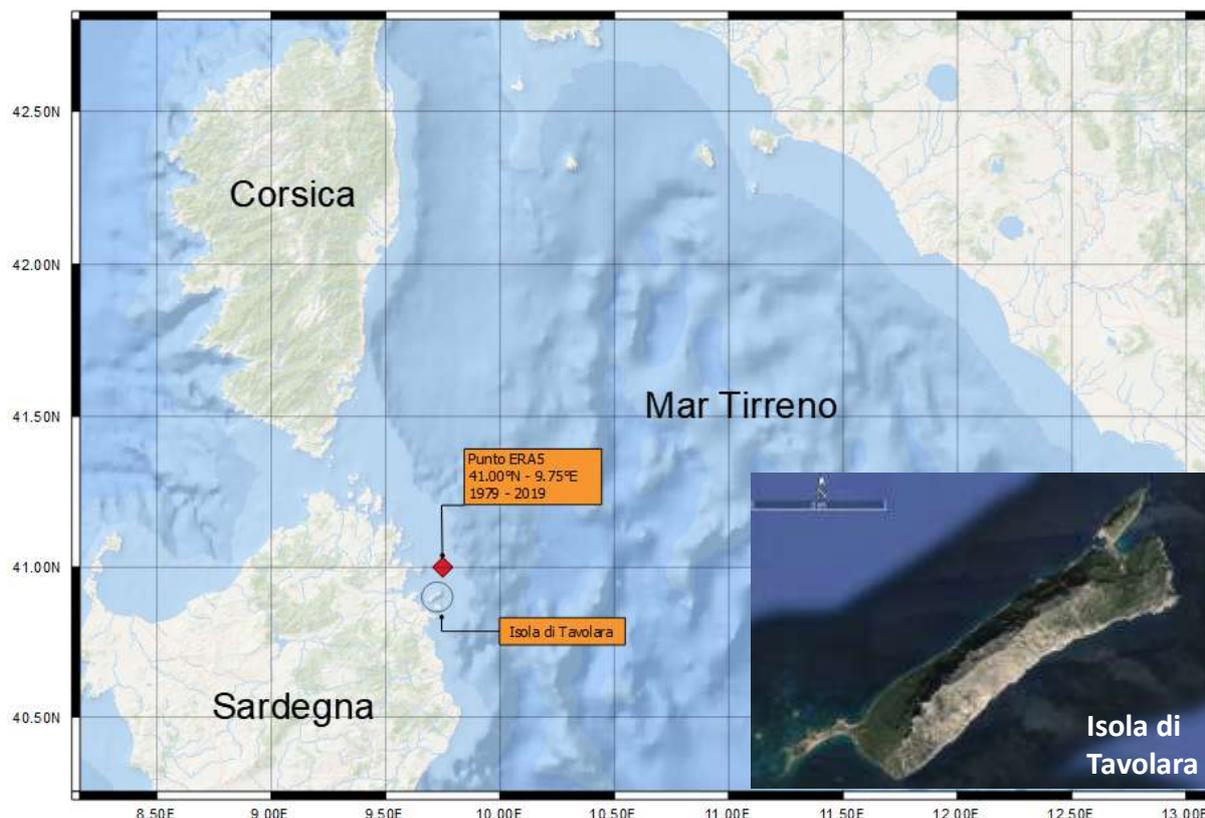


Figura 3-1. Inquadramento geografico d'insieme dell'area di interesse

3.1 Individuazione dei fetch geografico ed efficace

Una prima valutazione delle condizioni “potenziali” di esposizione al moto ondoso del sito in esame viene effettuata in funzione dei settori di traversia geografica, rappresentativi dell'estensione geografica della superficie marina (“fetch geografico”) che può contribuire alla generazione del moto ondoso sotto l'azione delle perturbazioni climatiche (venti e pressione) che possono interessare il bacino tirrenico.

Nella Figura 3-2 viene mostrato il fetch geografico (tracciato con passo angolare di 5°) per il punto di coordinate 40.9°N, 9.72°E, posizionato al largo dell'approdo di Cala di Ponente sull'Isola di Tavolara ad una distanza di circa 1,0 km e su fondali aventi una profondità di circa 60,0 m.

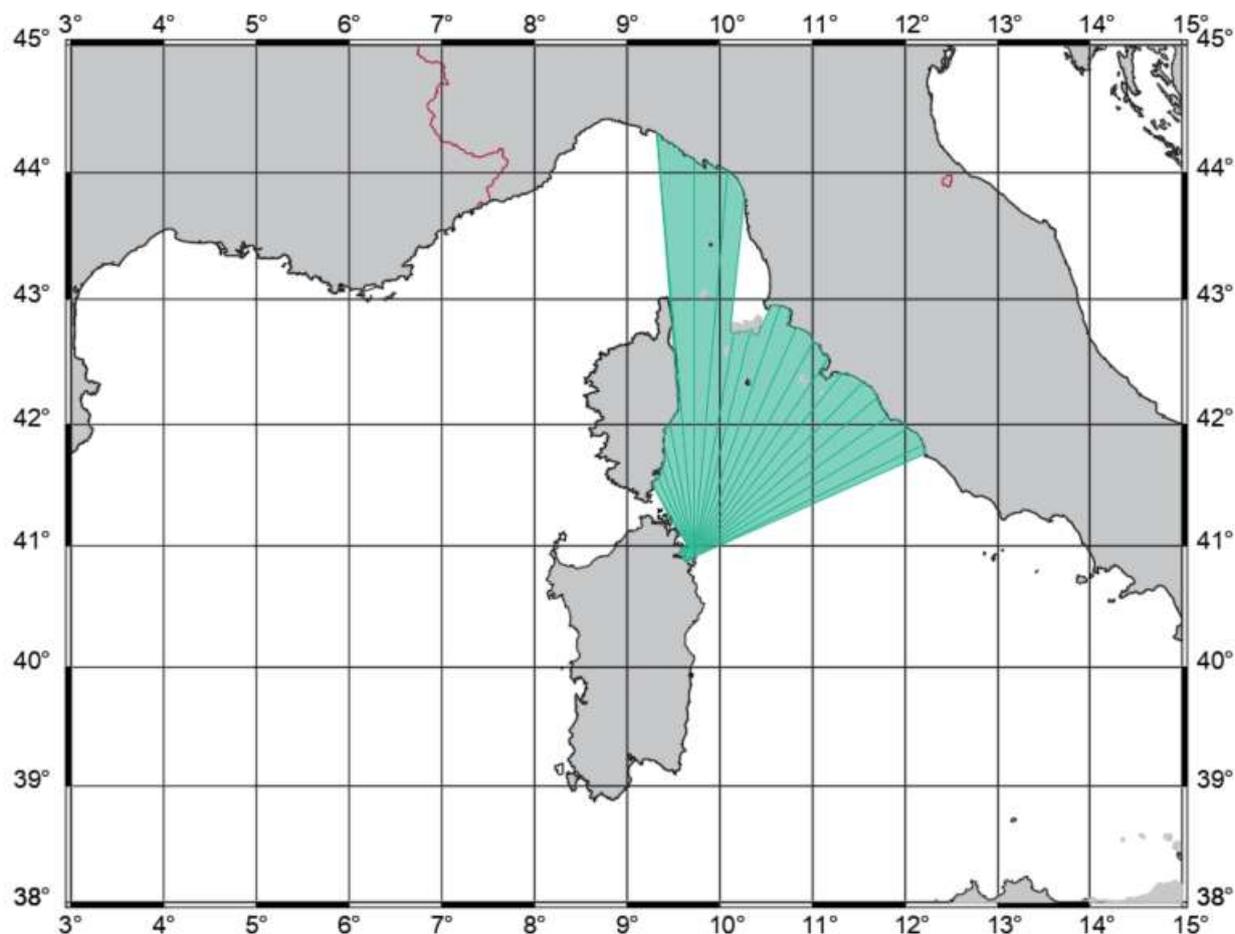


Figura 3-2. Fetch Geografico al largo dell'approdo di Cala di Ponente sull'isola di Tavolara (con estensioni comunque limitate a 500 km)

Il paraggio si colloca sul versante nord orientale della Sardegna e quindi i fetch geografici del secondo e terzo quadrante risultano essere molto ristretti essendo confinati solo a poche miglia nautiche dalla costa sarda. Per il primo e quarto quadrante, il fetch geografico si estende verso il mare aperto (Mar Tirreno) per un settore di traversia contenuto compreso tra le direzioni di $350^{\circ}N$ e $60^{\circ}N$ che si estende dalla costa della Corsica e raggiunge poi le coste liguri fino alle coste laziali con una lunghezza massima pari a 370 km.

Per la corretta analisi delle condizioni di esposizione meteomarina di un tratto di costa oggetto di studio in luogo del fetch geografico è necessario fare riferimento al "fetch efficace" ovvero alla porzione di mare sulla quale si esplica "efficacemente" l'azione del vento responsabile della generazione del moto ondoso. La sua conformazione è definita, operando in coordinate polari, in funzione dei valori dei fetch geografici e tenendo conto del fatto che alla generazione del moto ondoso, rispetto alla direzione media θ_w lungo la quale il vento esplica la sua azione lungo la superficie marina su cui spira, contribuiscono anche le porzioni di mare "adiacenti" comprese in un settore di $\pm\Delta\theta$.

Ne consegue che la lunghezza dei fetch efficaci può essere anche sensibilmente diversa rispetto a quella dei fetch geografici presi a riferimento.

Il calcolo dei *fetch efficaci* è stato eseguito utilizzando il software ENIF⁽¹⁾ che, sulla base del fetch geografico tracciato in coordinate polari, risolve la seguente equazione:

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

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

- $F_{e,w}$: lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w ;
- F_i : lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima ϕ_i ;
- ϕ_w : direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;
- $\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$: direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di $2 \cdot \theta$ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w ;
- θ : ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = \pm 45^\circ$ mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = \pm 90^\circ$);
- n: termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n = 4$).

L'equazione deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991).

L'applicazione del modello ENIF fornisce anche la correlazione tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso generato.

I risultati dell'elaborazione, condotta con un passo di discretizzazione di 1° , sono sintetizzati, per valori discreti con passo angolare di 10° , nella Tabella 3-1 e rappresentati nei diagrammi cartesiani della Figura 3-3 e Figura 3-4 riportando le lunghezze dei fetch efficaci anche sulla mappa geografica rappresentata nella Figura 3-5 dove si evidenzia la sua limitata estensione rispetto al corrispondente fetch geografico.

I fetch efficaci con estensione superiore a 150 km sono compresi tra le direzioni $0^\circ N$ e $40^\circ N$ con il valore massimo di 181 km per la direzione di $20^\circ N$ cui corrisponde l'allineamento tra la direzione del vento e la direzione media del moto ondoso generato.

¹ Il software ENIF che opera in ambiente Windows effettua il calcolo automatico dei fetch efficaci in funzione dei fetch geografici. Tale software è stato sviluppato e viene commercializzato dalla società MODIMAR s.r.l.

Tabella 3-1. Fetch Geografico ed Efficace e Correlazione Direzioni Vento/Mare al largo di Tavolara

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	345.00	158.63	12.0	180	0.67	0.89	44.0
10	197.07	175.22	6.0	190	0.77	1.24	41.0
20	230.70	181.78	1.0	200	0.96	1.77	37.0
30	213.16	177.40	-5.0	210	1.30	2.50	33.0
40	206.03	162.88	-11.0	220	2.14	3.38	30.0
50	209.26	140.45	-16.0	230	4.12	4.38	27.0
60	217.63	113.26	-21.0	240	8.03	5.44	58.0
70	0.87	84.76	-27.0	250	9.10	6.48	60.0
80	0.54	58.12	-32.0	260	6.73	7.50	58.0
90	0.52	35.80	-37.0	270	7.94	8.66	55.0
100	0.52	19.27	-41.0	280	12.56	10.48	51.0
110	0.53	8.78	-46.0	290	11.80	14.10	47.0
120	0.55	3.29	-50.0	300	12.86	21.34	43.0
130	0.56	1.12	-54.0	310	12.27	34.02	38.0
140	0.55	0.57	-58.0	320	8.85	53.10	33.0
150	0.55	0.53	-62.0	330	71.49	77.96	28.0
160	0.56	0.58	-66.0	340	81.77	106.26	23.0
170	0.60	0.68	-69.0	350	118.56	134.46	17.0

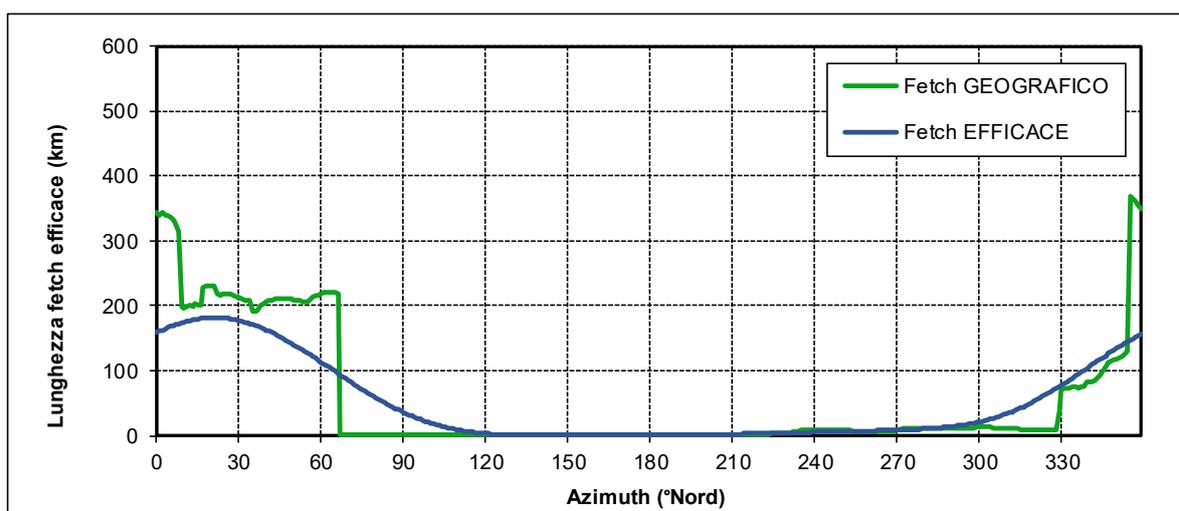


Figura 3-3. Fetch Geografico ed Efficace al largo di Tavolara

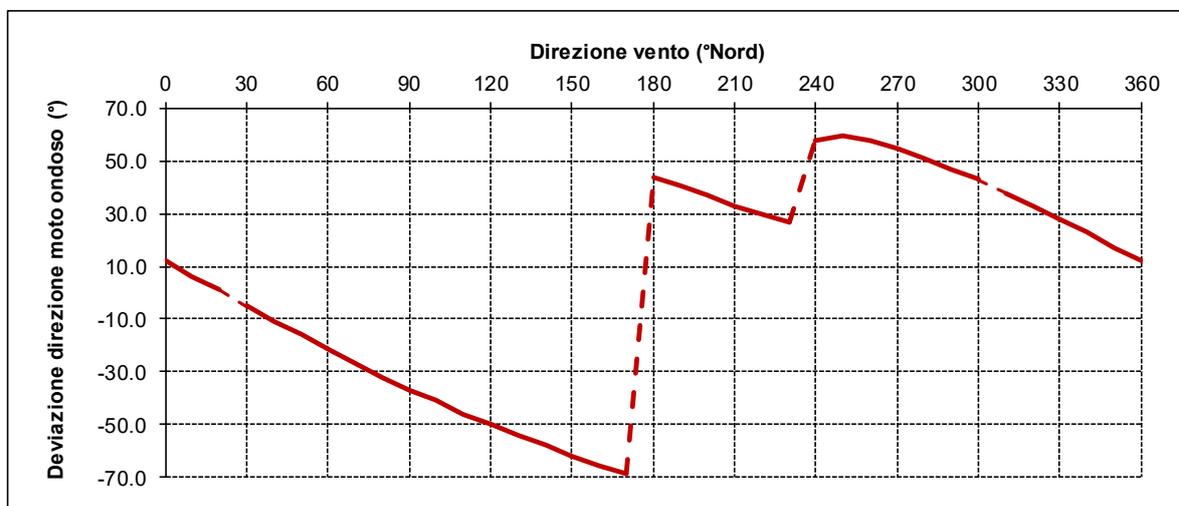


Figura 3-4 Correlazione Deviazione Vento/Mare

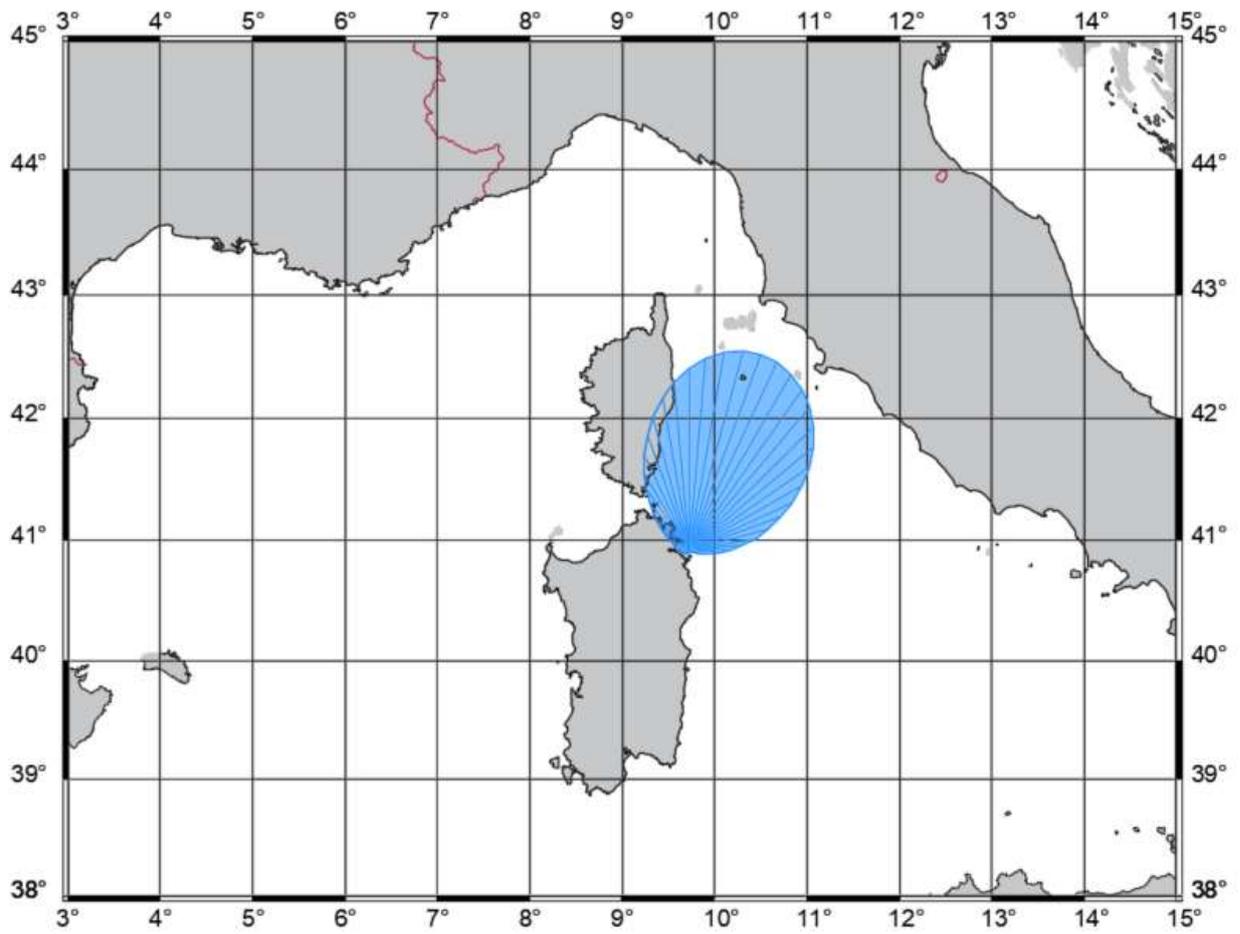


Figura 3-5. Fetch Efficace al largo di Tavolara

4. Acquisizione ed analisi dei dati di vento

Per le finalità della progettazione definitiva delle opere di difesa dell'approdo di Cala di Ponente cui è indirizzato il presente studio meteomarinario l'elaborazione della serie storica del vento assume un'importanza relativa in quanto la distribuzione e frequenza della velocità e direzione del vento, è di grande importanza nell'effettuare le scelte di progetto come l'ubicazione e configurazione planimetrica dell'infrastruttura portuale, ma anche all'orientamento delle dighe frangiflutti, dell'imboccatura e dei fronti di accosto. La sua conoscenza rappresenta comunque un utile strumento di confronto per la verifica della congruenza con il clima medio annuale del moto ondoso, poiché lo studio riguarda le onde generate dal vento.

Nella seguente Figura 4-1 è riportata la distribuzione direzionale del vento ottenuta sulla base dei dati ricostruiti dal modello ERA5 dell'ECMWF.

REGIME ANEMOMETRICO ANNUALE (1979-2019) - LAT=41.00°N LON=9.75°E

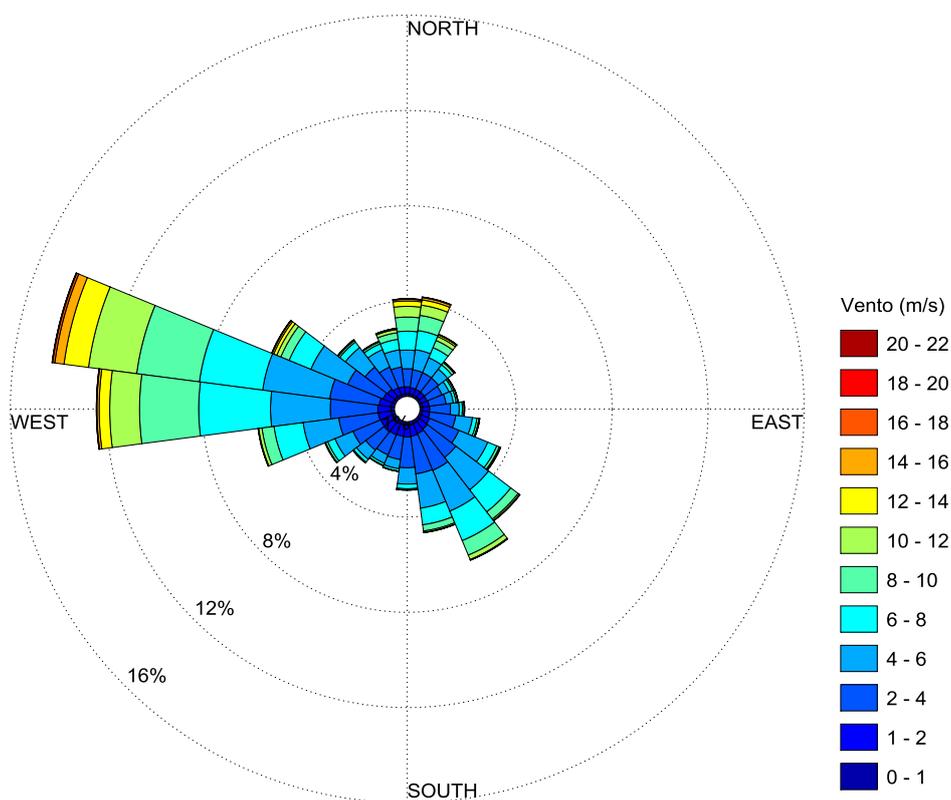


Figura 4-1. Distribuzione direzionale della velocità del vento relativi alla serie di dati orari (modello ERA5) nel punto LAT 41.00° N; LON 9.75° E - 1979-2019

Complessivamente, analizzando il diagramma polare della serie anemometrica riportata nella figura precedente, si osserva che i settori con le maggiori frequenze ed intensità di accadimento sono rappresentati dal settore di Ponente-Maestrale, di Tramontana - Grecale ed infine quello di Scirocco, con una netta prevalenza del settore di Maestrale.

Gli eventi anemometrici sono rappresentati in forma tabellare nella Tabella 4-1 (in cui è riportato il numero di eventi) e nella Tabella 4-2 (che riporta la distribuzione in forma percentuale).

Tabella 4-1 - Numero di eventi anemometrici al largo di Tavolara suddivisi per classi di altezza di vento e direzione di provenienza, ricostruiti dall'ECMWF. Periodo di riferimento 1979-2019.

Direzione vento (°N)	Distribuzione dei venti per classi si W10 e direzione di provenienza												tot
	Intensità del vento (m/s)												
	0.0 1.0	1.0 2.0	2.0 4.0	4.0 6.0	6.0 8.0	8.0 10.0	10.0 12.0	12.0 14.0	14.0 16.0	16.0 18.0	18.0 20.0	20.0 22.0	
10	269	667	1770	2031	2086	1684	1121	649	238	69	9	0	10593
20	251	605	1842	2034	1759	1278	907	405	196	36	1	0	9314
30	257	645	1801	1627	1044	812	400	162	61	2	0	0	6811
40	233	641	1808	1253	627	363	124	42	14	3	0	0	5108
50	252	579	1749	994	482	199	49	15	10	4	0	0	4333
60	239	617	1652	742	371	142	37	9	7	0	0	0	3816
70	252	624	1609	740	322	138	36	6	5	0	0	0	3732
80	262	686	1832	737	238	176	37	5	0	0	0	0	3973
90	257	704	2056	853	333	159	35	19	11	0	0	0	4427
100	272	747	2395	1281	388	157	54	18	1	1	0	0	5314
110	242	779	2831	2094	518	235	68	17	6	1	0	0	6791
120	303	861	3096	3147	928	248	109	29	18	2	0	0	8741
130	322	920	3477	3898	2102	605	114	30	15	2	0	0	11485
140	300	959	3782	4296	3295	1259	241	60	8	2	0	0	14202
150	321	1078	3987	4391	3213	1643	524	69	3	0	0	0	15229
160	334	1136	4055	4137	2400	1056	254	54	5	0	0	0	13431
170	371	1135	3543	2782	1126	277	63	8	0	0	0	0	9305
180	349	1162	3075	1637	429	109	12	0	0	0	0	0	6773
190	345	1157	2614	1083	238	35	5	1	0	0	0	0	5478
200	334	1151	2147	864	230	38	8	1	0	1	0	0	4774
210	388	1215	2181	905	220	31	4	0	0	1	0	0	4945
220	355	1226	2234	1021	311	60	15	1	0	0	0	0	5223
230	358	1245	2460	1321	439	98	16	2	0	0	0	0	5939
240	378	1229	2957	1920	742	222	50	6	1	0	0	0	7505
250	361	1248	3638	2866	1867	575	127	26	3	0	0	0	10711
260	335	1364	4269	4409	4059	2040	637	114	11	1	0	0	17239
270	354	1305	4719	6006	7466	5944	2824	905	164	37	1	0	29725
280	383	1228	5097	7080	7775	8256	6230	2948	940	200	58	2	40197
290	331	1183	4745	5972	4779	3914	2696	1579	762	190	24	1	26176
300	318	1030	3823	3936	2269	762	359	272	110	31	7	1	12918
310	312	1005	3092	2858	966	237	101	31	2	0	1	0	8605
320	291	829	2535	2140	533	150	45	15	3	1	0	0	6542
330	281	726	2252	1875	637	180	52	20	2	0	0	0	6025
340	267	735	2007	1766	815	405	168	39	15	0	0	0	6217
350	295	714	1990	1789	1364	933	531	205	32	5	2	0	7860
360	260	702	1821	1829	1946	1458	1140	552	191	37	3	4	9943
Totale	11032	33837	100941	88314	58317	35878	19193	8314	2834	626	106	8	359400

Tabella 4-2 - Frequenza di accadimento degli eventi anemometrici, al largo di Tavolara ricostruiti dall'ECMWF, suddivisi per classi di vento e direzione. Periodo di riferimento 1979-2019.

Direzione vento (°N)	Distribuzione percentuale dei venti per classi si W10 e direzione di provenienza												tot
	Intensità del vento (m/s)												
	0.0 1.0	1.0 2.0	2.0 4.0	4.0 6.0	6.0 8.0	8.0 10.0	10.0 12.0	12.0 14.0	14.0 16.0	16.0 18.0	18.0 20.0	20.0 22.0	
10	0.0748	0.1856	0.4925	0.5651	0.5804	0.4686	0.3119	0.1806	0.0662	0.0192	0.0025		2.95
20	0.0698	0.1683	0.5125	0.5659	0.4894	0.3556	0.2524	0.1127	0.0545	0.0100	0.0003		2.59
30	0.0715	0.1795	0.5011	0.4527	0.2905	0.2259	0.1113	0.0451	0.0170	0.0006			1.90
40	0.0648	0.1784	0.5031	0.3486	0.1745	0.1010	0.0345	0.0117	0.0039	0.0008			1.42
50	0.0701	0.1611	0.4866	0.2766	0.1341	0.0554	0.0136	0.0042	0.0028	0.0011			1.21
60	0.0665	0.1717	0.4597	0.2065	0.1032	0.0395	0.0103	0.0025	0.0019				1.06
70	0.0701	0.1736	0.4477	0.2059	0.0896	0.0384	0.0100	0.0017	0.0014				1.04
80	0.0729	0.1909	0.5097	0.2051	0.0662	0.0490	0.0103	0.0014					1.11
90	0.0715	0.1959	0.5721	0.2373	0.0927	0.0442	0.0097	0.0053	0.0031				1.23
100	0.0757	0.2078	0.6664	0.3564	0.1080	0.0437	0.0150	0.0050	0.0003	0.0003			1.48
110	0.0673	0.2168	0.7877	0.5826	0.1441	0.0654	0.0189	0.0047	0.0017	0.0003			1.89
120	0.0843	0.2396	0.8614	0.8756	0.2582	0.0690	0.0303	0.0081	0.0050	0.0006			2.43
130	0.0896	0.2560	0.9674	1.0846	0.5849	0.1683	0.0317	0.0083	0.0042	0.0006			3.20
140	0.0835	0.2668	1.0523	1.1953	0.9168	0.3503	0.0671	0.0167	0.0022	0.0006			3.95
150	0.0893	0.2999	1.1093	1.2218	0.8940	0.4572	0.1458	0.0192	0.0008				4.24
160	0.0929	0.3161	1.1283	1.1511	0.6678	0.2938	0.0707	0.0150	0.0014				3.74
170	0.1032	0.3158	0.9858	0.7741	0.3133	0.0771	0.0175	0.0022					2.59
180	0.0971	0.3233	0.8556	0.4555	0.1194	0.0303	0.0033						1.88
190	0.0960	0.3219	0.7273	0.3013	0.0662	0.0097	0.0014	0.0003					1.52
200	0.0929	0.3203	0.5974	0.2404	0.0640	0.0106	0.0022	0.0003		0.0003			1.33
210	0.1080	0.3381	0.6068	0.2518	0.0612	0.0086	0.0011			0.0003			1.38
220	0.0988	0.3411	0.6216	0.2841	0.0865	0.0167	0.0042	0.0003					1.45
230	0.0996	0.3464	0.6845	0.3676	0.1221	0.0273	0.0045	0.0006					1.65
240	0.1052	0.3420	0.8228	0.5342	0.2065	0.0618	0.0139	0.0017	0.0003				2.09
250	0.1004	0.3472	1.0122	0.7974	0.5195	0.1600	0.0353	0.0072	0.0008				2.98
260	0.0932	0.3795	1.1878	1.2268	1.1294	0.5676	0.1772	0.0317	0.0031	0.0003			4.80
270	0.0985	0.3631	1.3130	1.6711	2.0774	1.6539	0.7858	0.2518	0.0456	0.0103	0.0003		8.27
280	0.1066	0.3417	1.4182	1.9699	2.1633	2.2972	1.7334	0.8203	0.2615	0.0556	0.0161	0.0006	11.18
290	0.0921	0.3292	1.3203	1.6617	1.3297	1.0890	0.7501	0.4393	0.2120	0.0529	0.0067	0.0003	7.28
300	0.0885	0.2866	1.0637	1.0952	0.6313	0.2120	0.0999	0.0757	0.0306	0.0086	0.0019	0.0003	3.59
310	0.0868	0.2796	0.8603	0.7952	0.2688	0.0659	0.0281	0.0086	0.0006		0.0003		2.39
320	0.0810	0.2307	0.7053	0.5954	0.1483	0.0417	0.0125	0.0042	0.0008	0.0003			1.82
330	0.0782	0.2020	0.6266	0.5217	0.1772	0.0501	0.0145	0.0056	0.0006				1.68
340	0.0743	0.2045	0.5584	0.4914	0.2268	0.1127	0.0467	0.0109	0.0042				1.73
350	0.0821	0.1987	0.5537	0.4978	0.3795	0.2596	0.1477	0.0570	0.0089	0.0014	0.0006		2.19
360	0.0723	0.1953	0.5067	0.5089	0.5415	0.4057	0.3172	0.1536	0.0531	0.0103	0.0008	0.0011	2.77
Totale	3.070	9.415	28.086	24.573	16.226	9.983	5.340	2.313	0.789	0.174	0.029	0.002	100.00

Analizzando la frequenza di accadimento degli eventi è possibile osservare che il regime dei venti è contraddistinto in prevalenza da:

- brezze, da leggere a vivaci, appartenenti alla classe di velocità 2 ÷ 8 m/s, che hanno una frequenza di accadimento di circa il 68,88% pari a circa 250 giorni/anno;
- brezze tese e vento fresco, aventi velocità comprese tra 8 ÷ 14 m/s, che si verificano in media per 64 giorni/anno con una frequenza di accadimento del 17,63%;
- venti forti, aventi velocità superiore a 14 m/s che si verificano in media con una frequenza pari all'1% (circa 4 giorni/anno).

5. Acquisizione ed analisi dei dati ondametrici

5.1 Caratteristiche delle serie di dati ondametrici disponibili

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso al largo del paraggio in esame si è fatto riferimento alla serie di dati di moto ondoso ricostruiti (hindcasting) ERA5 nel punto di coordinate 41.0° N e 9.75°E, posto (Figura 5-1) circa 9 km a nord dell'area di interesse.

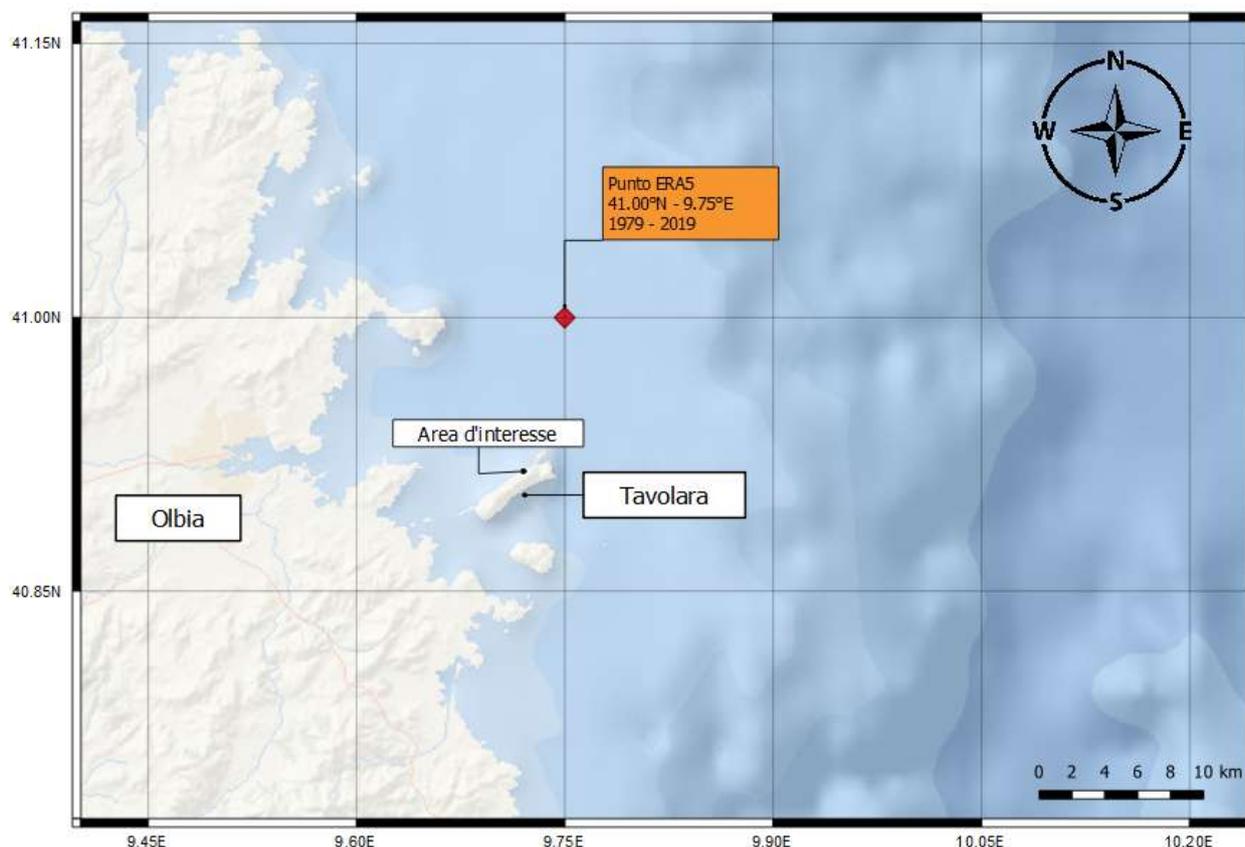


Figura 5-1. Inquadramento dell'area di interesse e del punto di riferimento per i dati ondametrici al largo

Nel dettaglio la selezione della serie di dati ERA5 (fonte ECMWF) rispetto a quelli WWIII (fonte NOAA) è stata motivata dal fatto che:

- la serie di dati ERA5 è la più recente essendo fornita dalla quinta generazione del modello, sviluppato dal ECMWF (WAM), per la ricostruzione in re-analisi dei dati climatologici di tutto il globo terrestre comprendendo un arco temporale che inizia nel 1979 fino ad arrivare al 2019, rendendo disponibili i dati di interesse, con una latenza di soli 5 giorni, secondo un passo "geografico" LAT/LON di 0,25° e di 60 minuti nel tempo;

In Figura 5-2 viene mostrata a titolo esemplificativo, la serie storica delle altezze d'onda significativa H_s nell'arco dei citati 40 anni di dati (1979÷2019).

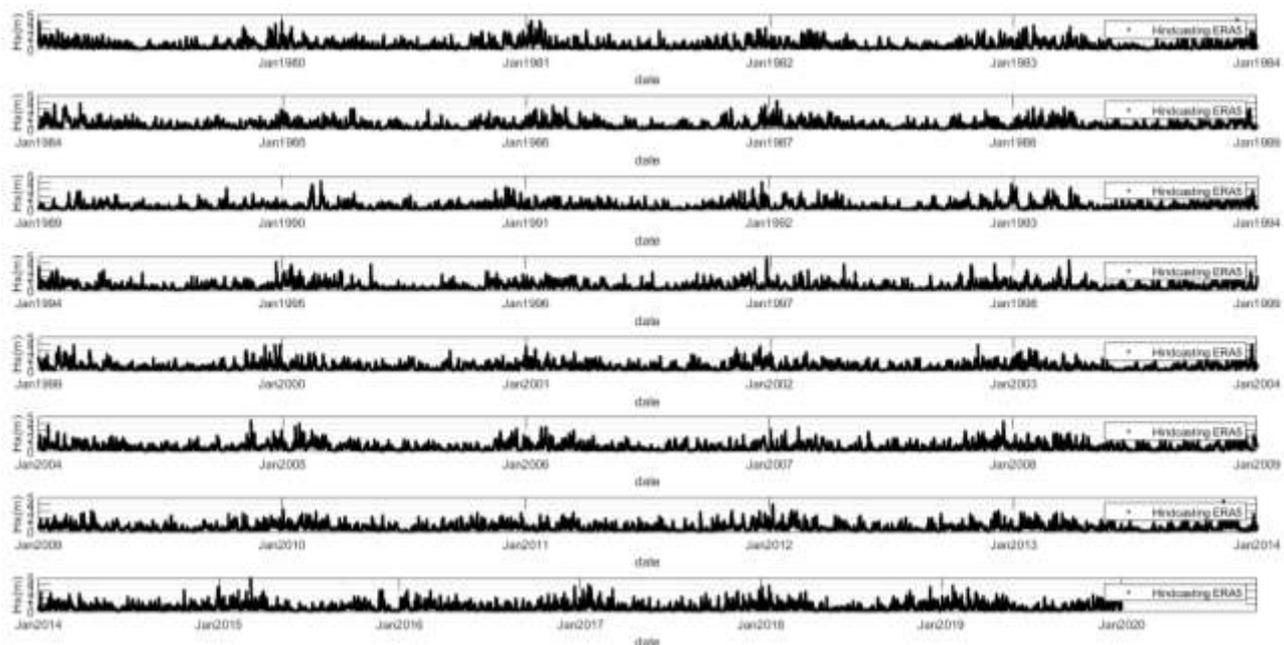


Figura 5-2. Valori di altezza d'onda significativa H_s desunti dalla serie ondometrica estrapolata dal database ERA5 (Intervallo temporale: 1979 ÷ 2019)

6. Clima di moto ondoso al largo

Per la redazione del presente studio meteomarinò è stata acquisita dal servizio del Centro ECMWF la serie storica dei dati ERA5 relativi sia al vento (velocità e direzione media) sia al moto ondoso (altezza significativa H_s , direzione media, periodo di picco) che riguarda, con cadenza oraria, il periodo compreso tra il 1979 ed il 2019 per un totale di 359.400 eventi.

Nella seguente Figura 6-1 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa H_s ricavata dall'analisi dei dati ERA5 da cui si può osservare, una forte prevalenza degli eventi di moto ondoso provenienti da Maestrale (280 ÷ 300 °N con una frequenza di accadimento di circa il 28%), da Scirocco (120 ÷ 150 °N con una frequenza di accadimento di circa il 23%) e da Grecale (10 ÷ 30 °N con una frequenza di circa il 14%) che complessivamente costituiscono circa il 64% degli stati di mare ricostruiti.

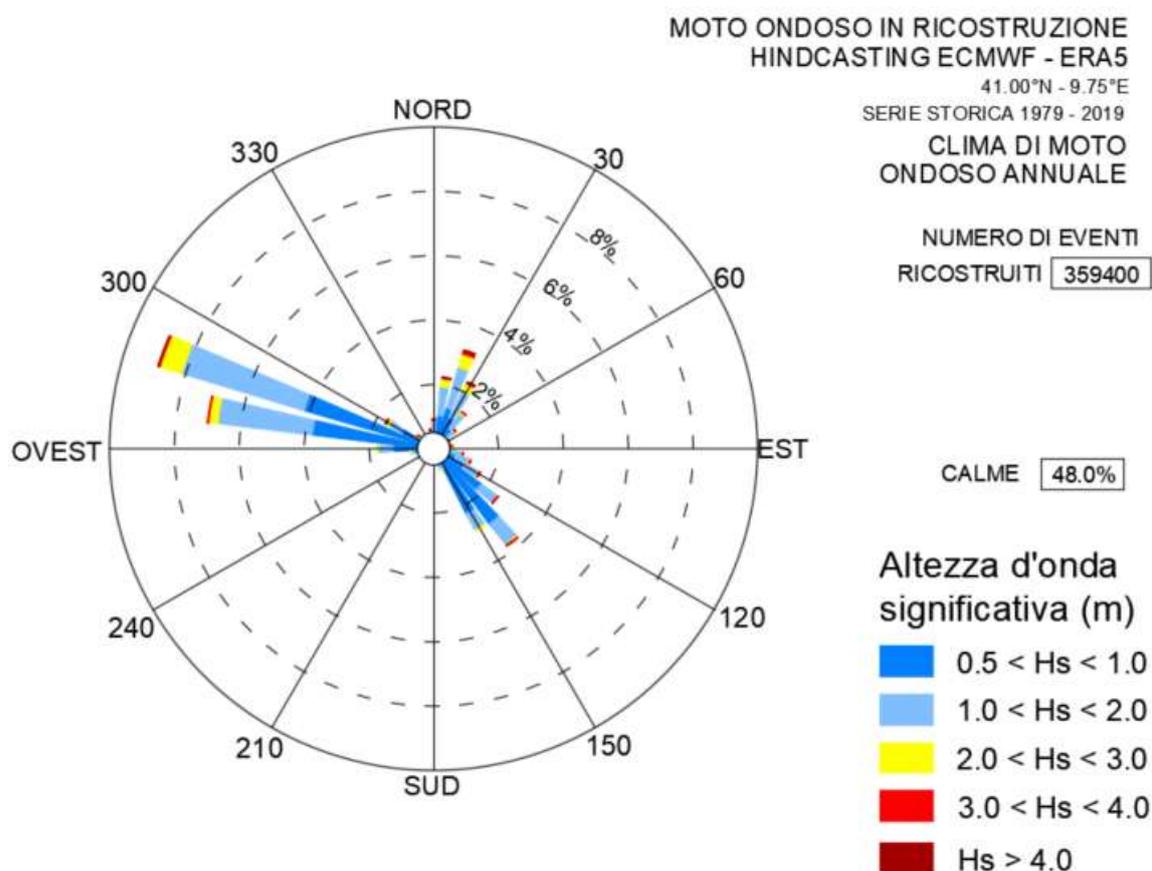


Figura 6-1. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa H_s al largo dell'Isola di Tavolara (punto ERA5 LAT 41.00° N; LON 9.75° E - Intervallo temporale: 1979÷2019)

La rappresentazione grafica riportata in Figura 6-2 (in cui sono state considerate anche le "calme", ovvero altezze d'onda minori di 0,5 m) conferma che il settore di traversia principale risulta essere compreso tra 350 ÷ 40°N corrispondente alla superficie marina che si estende verso ovest dalle bocche di Bonifacio, stretto compreso tra la Sardegna e la Corsica, fino alla costa toscana (parte più orientale del settore).

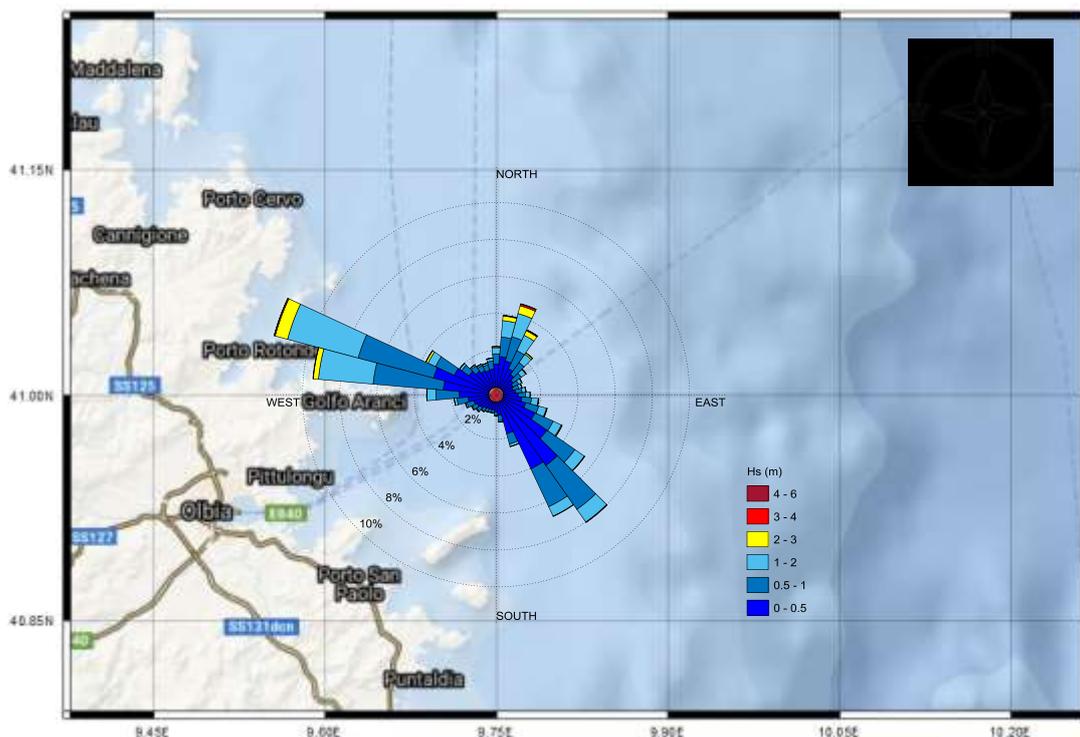


Figura 6-2. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa H_s al largo della costa sarda per il punto scelto al largo in relazione all'area di interesse delimitata a Ovest dalla costa sarda e a Est dalla costa italiana.

In Tabella 6-1 e in

Tabella 6-2 sono riportati il numero di eventi di moto ondoso e la frequenza di accadimento percentuale degli eventi di moto ondoso ricostruiti al largo del sito in esame, suddivisi secondo classi di direzione e di altezza significativa suddivisi per settori di provenienza di 10° e per classi di altezza d'onda significativa H_s .

Tabella 6-1. Numero di eventi di moto ondoso al largo di Tavolara suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza, ricostruiti dall'ECMWF. Periodo di riferimento: 1979 ÷ 2019

Direzione d'onda °N	Distribuzione del clima d'onda per classi di Hs e direzione di provenienza														Tot
	Altezza d'onda Hs (m)														
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	> 5.50		
10	2623	3426	3807	2020	1172	627	270	73	44	10	1		2	14075	
20	2175	3222	4856	2849	1818	1120	454	267	73	59	10	2	1	16906	
30	1668	2489	3876	2141	1165	649	337	135	53	15	0			12528	
40	1312	2058	2845	1391	612	222	86	19	5					8550	
50	991	1606	1899	747	324	59	19	27	16					5688	
60	870	1307	1178	478	215	31	19	3	4					4105	
70	785	1164	1152	432	169	24	7	9	2	5				3749	
80	876	1477	1249	515	193	58	10	3	4					4385	
90	1119	1730	1404	644	214	58	5	0	0					5174	
100	1522	2040	1880	926	390	73	25	14	0					6870	
110	1937	2559	2595	1179	372	103	22	20	8					8795	
120	2740	4121	3861	1375	359	109	52	14	3					12634	
130	3953	6620	6587	1944	286	48	17	12	3					19470	
140	4811	10518	10437	2394	606	73	12	3						28854	
150	4391	10086	8137	1671	364	52	16							24717	
160	2598	3824	2085	408	100	2	2							9019	
170	1066	1541	1077	204	25	4		1						3918	
180	735	1143	709	115	8		2							2712	
190	616	917	583	62	9									2187	
200	680	892	564	77	10									2223	
210	654	972	635	93	9									2363	
220	770	1060	701	113	14	1								2659	
230	1021	1257	858	119	22	2								3279	
240	1213	1392	999	164	27	2								3797	
250	1295	1717	1398	249	39	8								4706	
260	1590	2415	2134	463	79	5								6686	
270	2025	3653	4502	1434	318	33	2							11967	
280	2524	6287	13577	7667	2916	796	207	63	23					34060	
290	2335	8746	15077	9438	4703	1851	625	141	55	14				42985	
300	2220	5273	3992	1095	521	306	114	28	11	2				13562	
310	1814	3182	1697	379	120	21	4	0	1					7218	
320	1683	2468	1260	225	63	16	1	0	1					5717	
330	1471	2256	1129	240	61	15	1	0	1					5174	
340	1341	2111	1147	255	79	30	6	2	0					4971	
350	1331	2275	1564	409	122	42	13	4	0					5760	
360	1939	2640	1953	824	373	127	62	16	3					7937	
Totale	62694	110444	113404	44739	17877	6567	2390	854	310	105	11	2	3	359400	

Tabella 6-2. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso, al largo di Tavolara ricostruiti dall'ECMWF, suddivisi per classi di altezza significativa e direzione. Periodo di riferimento 1979-2019.

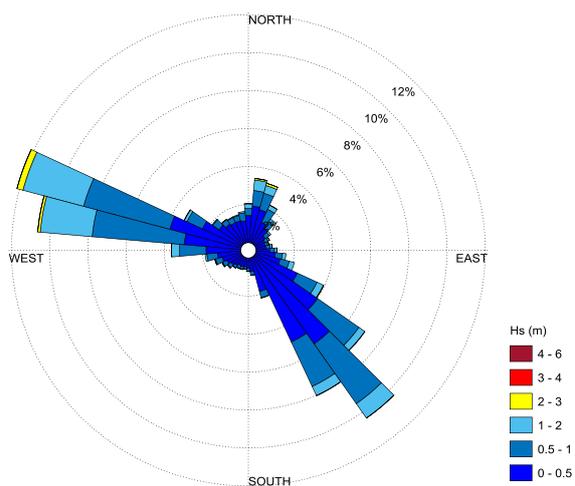
Distribuzione percentuale del clima d'onda per classi di Hs e direzione di provenienza														
Direzione d'onda °N	Altezza d'onda H _s (m)													Tot
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	> 5.50	
10	0.73	0.95	1.06	0.56	0.33	0.17	0.08	0.02	0.01					3.91
20	0.61	0.9	1.35	0.79	0.51	0.31	0.13	0.07	0.02	0.02				4.71
30	0.46	0.69	1.08	0.6	0.32	0.18	0.09	0.04	0.01					3.47
40	0.37	0.57	0.79	0.39	0.17	0.06	0.02	0.01						2.38
50	0.28	0.45	0.53	0.21	0.09	0.02	0.01	0.01						1.60
60	0.24	0.36	0.33	0.13	0.06	0.01	0.01							1.14
70	0.22	0.32	0.32	0.12	0.05	0.01								1.04
80	0.24	0.41	0.35	0.14	0.05	0.02								1.21
90	0.31	0.48	0.39	0.18	0.06	0.02								1.44
100	0.42	0.57	0.52	0.26	0.11	0.02	0.01							1.91
110	0.54	0.71	0.72	0.33	0.1	0.03	0.01	0.01						2.45
120	0.76	1.15	1.07	0.38	0.1	0.03	0.01							3.50
130	1.1	1.84	1.83	0.54	0.08	0.01								5.40
140	1.34	2.93	2.9	0.67	0.17	0.02								8.03
150	1.22	2.81	2.26	0.46	0.1	0.01								6.86
160	0.72	1.06	0.58	0.11	0.03									2.50
170	0.3	0.43	0.3	0.06	0.01									1.10
180	0.2	0.32	0.2	0.03										0.75
190	0.17	0.26	0.16	0.02										0.61
200	0.19	0.25	0.16	0.02										0.62
210	0.18	0.27	0.18	0.03										0.66
220	0.21	0.29	0.2	0.03										0.73
230	0.28	0.35	0.24	0.03	0.01									0.91
240	0.34	0.39	0.28	0.05	0.01									1.07
250	0.36	0.48	0.39	0.07	0.01									1.31
260	0.44	0.67	0.59	0.13	0.02									1.85
270	0.56	1.02	1.25	0.4	0.09	0.01								3.33
280	0.7	1.75	3.78	2.13	0.81	0.22	0.06	0.02	0.01					9.48
290	0.65	2.43	4.2	2.63	1.31	0.52	0.17	0.04	0.02					11.97
300	0.62	1.47	1.11	0.3	0.14	0.09	0.03	0.01						3.77
310	0.5	0.89	0.47	0.11	0.03	0.01								2.01
320	0.47	0.69	0.35	0.06	0.02									1.59
330	0.41	0.63	0.31	0.07	0.02									1.44
340	0.37	0.59	0.32	0.07	0.02	0.01								1.38
350	0.37	0.63	0.44	0.11	0.03	0.01								1.59
360	0.54	0.73	0.54	0.23	0.1	0.04	0.02							2.20
Totale	17	31	32	12	5	2	1	0	0	0	0	0	0	100
Totale cumulato		48	80	92	97	99	100	100	100	100	100	100	100	

Si riportano infine i diagrammi polari del clima ondometrico stagionale (Figura 6-3).

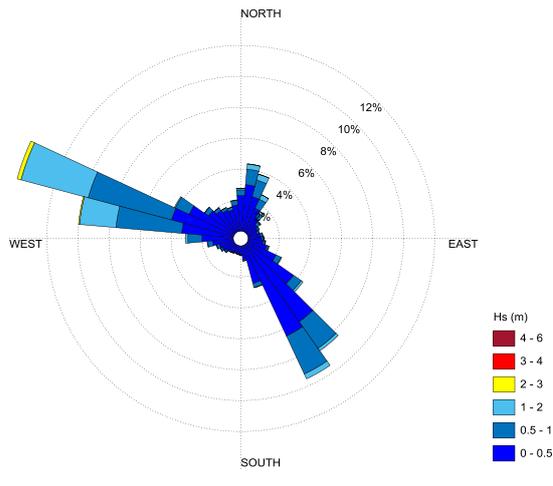
Per quanto riguarda la stagione primaverile, i settori principali di traversia che vengono individuati sono quelli di Nord-Ovest (ponente) e di Sud-Est (scirocco). Stesso comportamento si può riscontrare durante la stagione estiva.

Le stagioni autunnali e invernali mostrano invece, oltre che ai suddetti settori principali, anche un terzo settore individuabile nel I quadrante (settore di Nord-Est) è caratterizzato da eventi di elevata intensità.

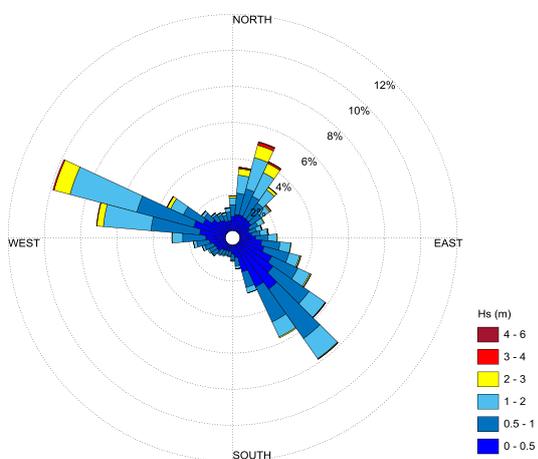
MOTO ONDOSO PRIMAVERILE (1979-2020) - LAT=41.00°N LON=9.75°E



MOTO ONDOSO ESTIVO (1979-2020) - LAT=41.00°N LON=9.75°E



MOTO ONDOSO AUTUNNALE (1979-2020) - LAT=41.00°N LON=9.75°E



MOTO ONDOSO INVERNALE (1979-2020) - LAT=41.00°N LON=9.75°E

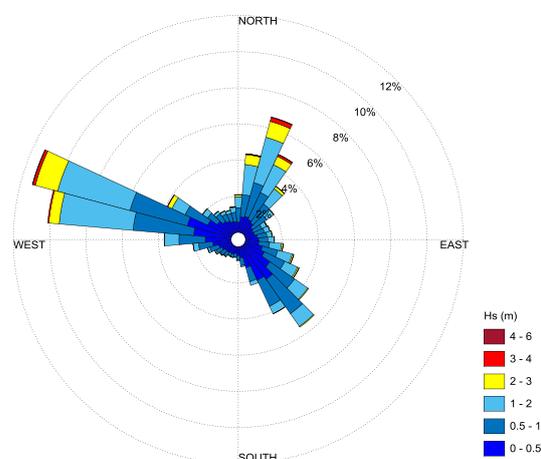


Figura 6-3. Regime di moto ondoso stagionale al largo di Tavolara dell'ECMWF. Periodo di riferimento 1979-2019

6.1 Curva di Durata

In merito alla persistenza degli eventi di moto ondoso si può far riferimento alla curva di durata rappresentata in Figura 6-4. Dall'analisi della serie storica è stato possibile determinare la durata media annuale associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa.

- durata media degli eventi con $H_s \geq 1.0$ m circa 1750 ore/anno
- durata media degli eventi con $H_s \geq 2.0$ m circa 245 ore/anno
- durata media degli eventi con $H_s \geq 3.0$ m circa 30 ore/anno
- durata media degli eventi con $H_s \geq 4.0$ m circa 2 ore/anno

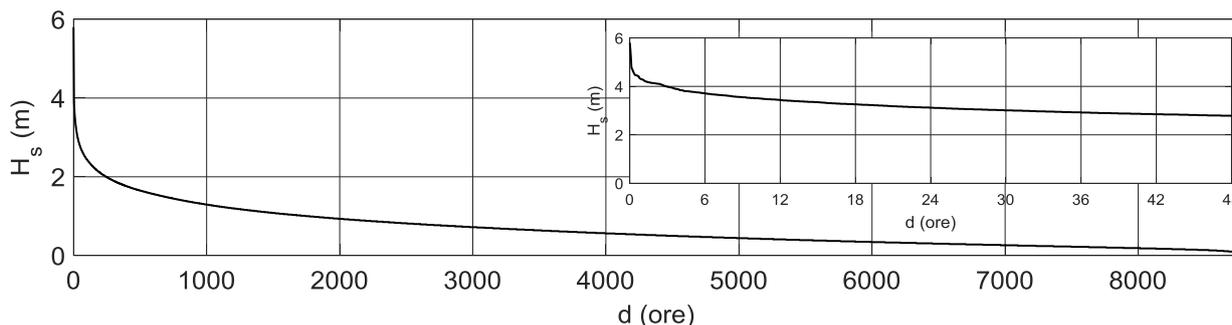


Figura 6-4. Curva di durata degli eventi di moto ondoso al largo.

6.2 Distribuzione degli eventi in relazione al periodo di picco del moto ondoso

L'istogramma di Figura 6-5 riporta la frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso appartenenti alla serie storica ERA5 al largo di Tavolara in base a classi di periodo di picco T_p di ampiezza di un secondo tra 0 e 15 secondi.

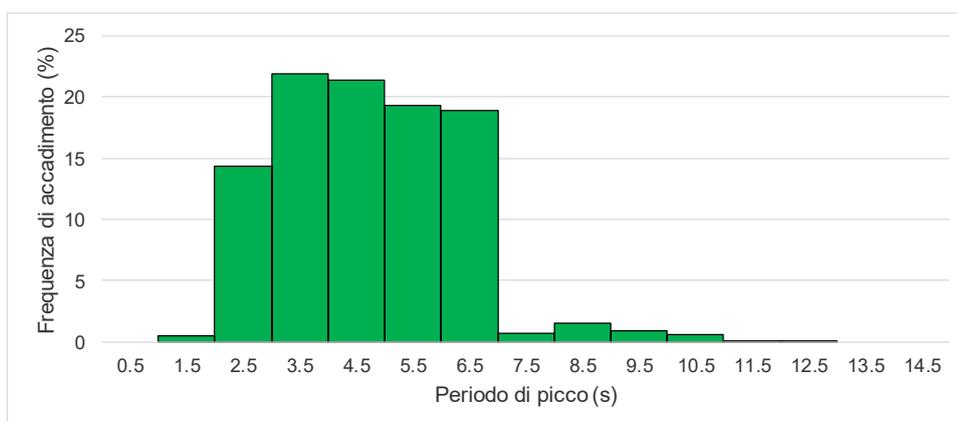


Figura 6-5. Frequenza di accadimento del periodo di picco T_p .

In

Tabella 6-3 è riportato il valore medio del periodo di picco T_p ottenuto suddividendo gli eventi della serie storica per classi di H_s e direzione di provenienza. La tabella fornisce per ogni classe di direzione o per ogni classe di altezza d'onda il valore della moda (valore medio di T_p più frequente) ottenuto come media pesata in base al numero di eventi appartenenti ad ogni classe. Da tale tabella è possibile desumere che il moto ondoso caratteristico per il paraggio costiero è rappresentato da onde/stati di mare con periodi compresi tra 3 s e 7 s.

Tabella 6-3. Valore medio del periodo di picco Tp associato a classi di direzione e altezza d'onda significativa Hs.

Direzione d'onda °N	Periodi d'onda medi (s)												
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	> 5.50
10	3.21	4.10	4.87	5.69	6.14	6.48	7.12	7.84	8.22	8.63	8.22		8.96
20	3.09	4.00	4.93	5.71	6.15	6.51	7.45	7.99	8.43	8.90	9.29	9.91	9.72
30	3.02	4.07	5.00	5.73	6.15	6.58	7.43	8.07	8.46	8.81			
40	3.02	4.14	5.03	5.74	6.15	6.64	7.29	7.97	8.45				
50	3.07	4.15	5.00	5.70	6.16	6.51	7.46	8.07	8.14				
60	3.21	4.14	5.08	5.63	6.04	6.62	7.83	7.69	8.02				
70	3.34	4.25	5.19	5.72	6.04	6.23	8.44	8.54	8.98	9.09			
80	3.38	4.32	5.22	5.88	6.13	6.68	8.38	8.90	9.02				
90	3.35	4.48	5.35	5.96	6.40	6.77	6.26	0.00	0.00				
100	3.31	4.46	5.40	6.09	6.40	6.72	7.20	7.79	0.00				
110	3.31	4.30	5.46	6.12	6.57	7.22	8.33	8.66	8.58				
120	3.09	4.28	5.35	6.20	6.64	7.53	8.16	7.98	8.62				
130	3.08	4.16	5.33	6.05	6.52	6.85	6.97	9.16	8.56				
140	3.24	4.21	5.17	5.94	6.55	6.89	7.26	10.10					
150	3.42	4.09	4.87	5.74	6.52	7.29	7.94						
160	3.53	4.34	5.28	5.96	6.49	10.25	9.82						
170	3.68	4.58	5.48	6.14	7.65	9.56		9.37					
180	3.59	4.58	5.53	6.30	6.32		5.28						
190	3.56	4.50	5.23	6.24	5.70								
200	3.36	4.43	5.23	5.66	5.70								
210	3.32	4.29	4.91	5.31	4.89								
220	3.39	4.30	4.81	4.76	7.36	4.82							
230	3.37	4.39	4.67	4.65	5.21	4.79							
240	3.35	4.39	4.69	4.75	5.08	5.34							
250	3.52	4.39	4.52	4.56	4.70	5.65							
260	3.56	4.17	4.30	4.66	4.88	5.38							
270	3.78	4.19	4.11	4.56	5.05	5.30	5.58						
280	3.94	4.34	4.14	4.60	5.19	5.68	6.11	6.55	6.72				
290	4.19	4.75	4.45	4.78	5.30	5.77	6.15	6.51	6.93	7.22			
300	4.28	5.36	5.28	5.22	5.51	5.91	6.24	6.54	6.98	7.12			
310	4.17	5.48	5.99	5.99	5.64	5.88	6.35		6.95				
320	4.07	5.43	6.31	6.66	5.80	5.92	6.23		6.99				
330	3.93	5.43	6.34	6.50	6.01	6.02	6.22		6.99				
340	3.84	5.13	5.75	6.12	5.96	6.32	6.13	8.31					
350	3.50	4.72	5.34	5.80	6.02	6.63	6.75	6.79					
360	3.30	4.25	5.00	5.64	6.07	6.49	7.02	7.25	7.88				

Al fine di individuare la legge di dipendenza tra il periodo di picco delle onde T_p e l'altezza d'onda significativa H_s si è fatto riferimento alla seguente relazione (Mathiesen et al., 1994) utilizzata anche nell'Atlante delle Onde Italiane edito da ISPRA:

$$T_p = a \times H_s^b$$

ove i parametri a e b possono essere ricavati dall'analisi di correlazione tra i valori della serie.

Per trovare la legge di dipendenza si è fatto riferimento a tutti gli eventi di moto ondoso e quelli con altezza d'onda significativa $H_s > 0,2$ m compresi nel settore di traversia principale 350°N - 40°N :

In Figura 6-6 e Figura 6-7 sono riportate le funzioni di correlazione tra T_p e H_s trovate con il metodo dei minimi quadrati per i dati della serie storica al largo di Tavolara, omnidirezionale e per il settore di traversia principale individuato.

L'analisi condotta ha permesso di determinare i seguenti parametri della legge di adattamento:

$T_p = a \times H_s^b$	Parametro (a)	Parametro (b)
Omnidirezionale 0 – 360°N	5,28	0,21
Settore di traversia 350-40°N	5,24	0,30
Settore di traversia 270-300°N	4,58	0,23

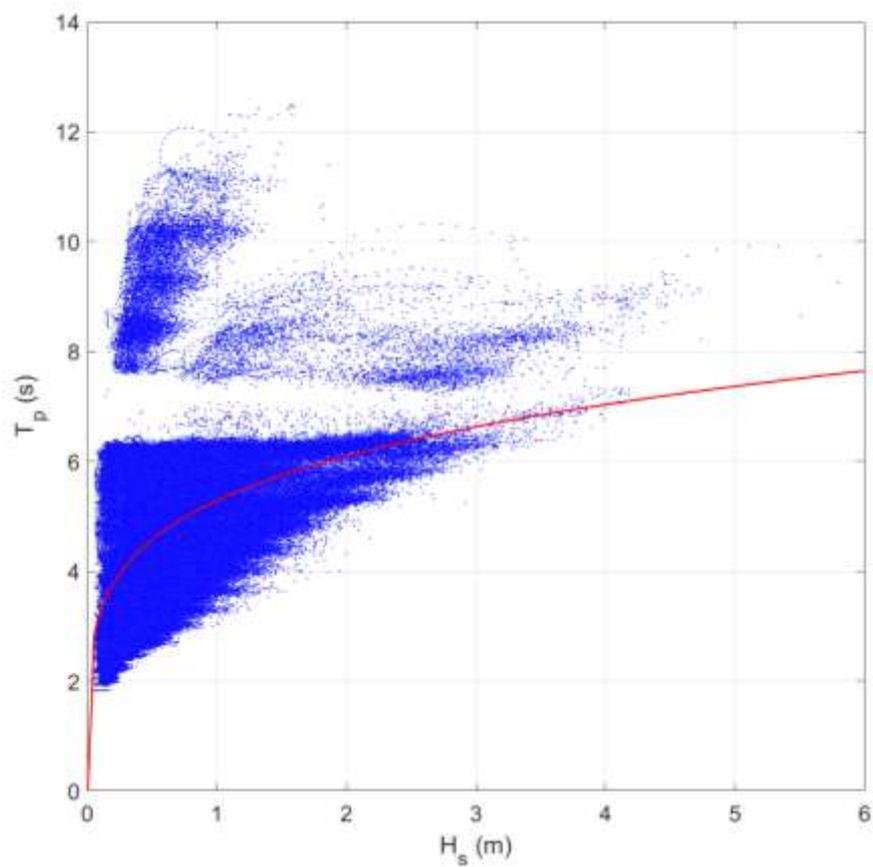


Figura 6-6. Correlazione altezza H_s – periodo T_p per i dati di moto ondoso appartenenti alla serie storica ERA5 al largo di Tavolara. Analisi omnidirezionale.

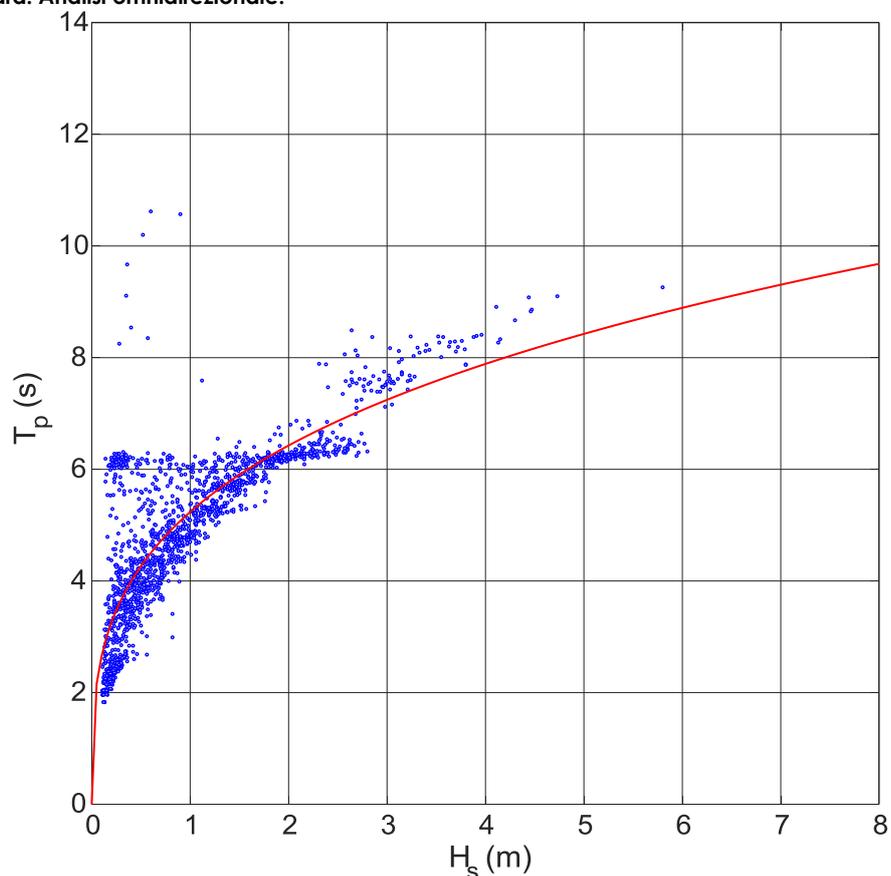


Figura 6-7. Correlazione altezza H_s – periodo T_p per i dati di moto ondoso appartenenti alla serie storica ERA5 al largo di Tavolara. Analisi del settore di traversia principale 350-40°N.

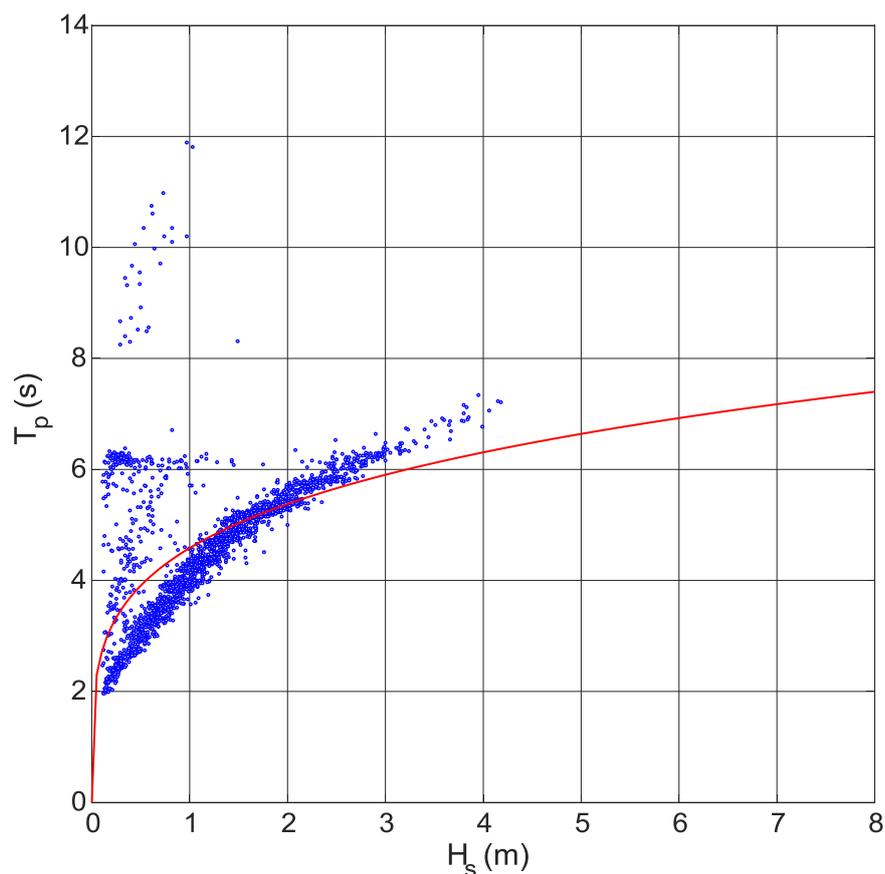


Figura 6-8. Correlazione altezza H_s – periodo T_p per i dati di moto ondoso appartenenti alla serie storica ERA5 al largo di Tavolara. Analisi del settore di traversia principale 270-300°N.

7. Analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo

Per eseguire l'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso, relativi alla serie storica ERA5 (vedi Figura 7-1), è necessario selezionare preliminarmente i dati in modo tale che rispondano al doppio requisito di risultare tra loro omogenei e statisticamente indipendenti.

L'indipendenza statistica si garantisce in generale accertando che gli eventi selezionati siano tra di loro indipendenti, ovvero, nel caso delle mareggiate, che ciascun evento sia attribuibile ad un fenomeno meteorologico diverso.

Dal punto di vista pratico, l'indipendenza statistica si garantisce in primo luogo prendendo in esame per ogni singolo evento di mareggiata il valore di H_s raggiunto al culmine dell'evento stesso. Essa può essere assicurata sia utilizzando il metodo dei "massimi annuali", sia il metodo POT (Peaks Over Threshold) detto anche "della serie di durata parziale sopra soglia". Nel primo caso il campione di riferimento è costituito dalla massima altezza d'onda significativa registrata o ricostruita ogni anno solare che viene poi associata al settore di provenienza considerato.

Applicando il metodo POT occorre preliminarmente definire la singola mareggiata, la quale viene poi caratterizzata dal valore di altezza d'onda significativa raggiunta al culmine dell'evento stesso insieme ai corrispondenti valori del periodo e della direzione delle onde.

Una prima selezione delle mareggiate di solito in Mediterraneo viene effettuata individuando nella serie storica gli eventi che superano la soglia di circa $H_s = 1.0$ m. In tal modo il singolo evento (mareggiata) ha inizio quando l'altezza d'onda significativa (H_s) supera per la prima volta il valore della soglia prestabilito e termina quando H_s assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica un rilevante rotazione della direzione di propagazione del moto ondoso (circa 60°).

Sempre secondo il metodo POT, per garantire l'indipendenza statistica tra le mareggiate individuate, si impongono dei parametri più stringenti, ovvero di solito si impone che per ogni mareggiata debba risultare:

1. il colmo in termini di altezza d'onda significativa superiore circa a 2,0 m;
2. la durata dell'evento sia superiore ad almeno 12 h.

Inoltre, il tempo minimo intercorrente tra i colmi di due eventi estremi consecutivi deve risultare superiore a circa 48 ore (Mathiesen).

In definitiva, per il metodo POT, il campione è costituito dalle altezze d'onda significative relative al massimo valore registrato (o ricostruito) per ogni singola mareggiata e per il settore di provenienza considerato.

L'omogeneità dei dati viene invece assicurata:

1. considerando i dati registrati con la medesima cadenza temporale: solo eventi orari;
2. raggruppando gli stessi dati in eventi caratterizzati da una simile genesi meteorologica. Ciò normalmente si traduce nel separare i valori massimi delle altezze d'onda registrati in distinti settori di provenienza degli stati di mare.

La scelta dei settori di provenienza degli stati di mare richiede di analizzare le condizioni meteorologiche che si possono verificare nel sito di interesse in relazione alla sua esposizione geografica.

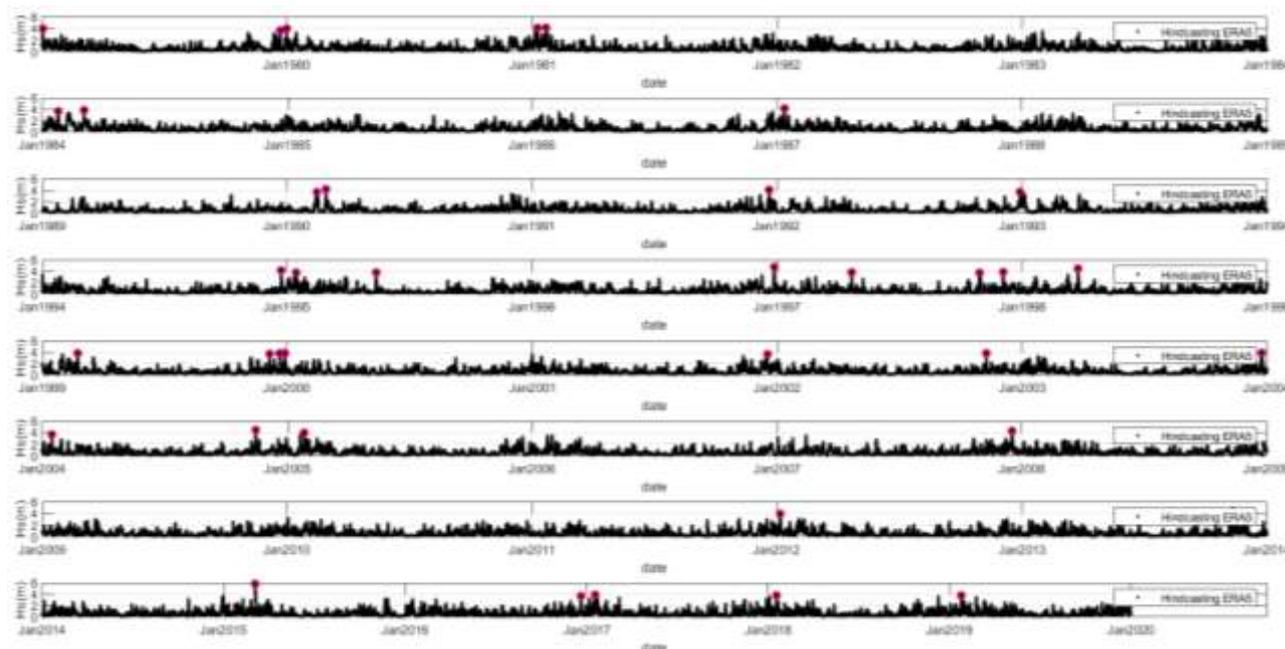


Figura 7-1. Serie storica ERA5 con evidenziati i primi 40 eventi caratterizzati da altezza significativa H_s di maggiore intensità.

7.1 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

Gli stati di mare estremi individuati come sopra esposto, sono oggetto di una elaborazione statistica al fine di determinare, mediante una regolarizzazione degli eventi estremi secondo note funzioni probabilistiche, le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno T_R (o a probabilità di occorrenza).

Le leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) sono:

- Distribuzione di Weibull:

$$P_{X_{max}}(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - B}{A} \right)^k \right]$$

- Distribuzione di Gumbel:

$$P_{X_{max}}(x) = \exp \left[- \exp \left(\frac{x - B}{A} \right) \right]$$

dove X_{max} è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento mentre A , B e k sono le costanti delle distribuzioni, che rappresentano rispettivamente il parametro di scala, di posizione e di forma. Il parametro k per la distribuzione di Weibull è assunto pari a 0.75, 1.0, 1.4 e 2.0.

La valutazione dei parametri della distribuzione richiede la preliminare stima della frequenza campionaria dei dati. Il campione dei dati viene ordinato in senso decrescente e per ogni medesimo evento viene calcolata la frequenza campionaria di non superamento utilizzando la seguente formula di generale (plotting position):

$$\widehat{F}_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, m = 1, 2, K, \dots, N$$

Introducendo la variabile ridotta:

$$y_{(m)} = \left[-\ln(1 - \widehat{F}_m) \right]^{\frac{1}{k}}$$

Viene applicato il metodo dei minimi quadrati per determinare i parametri A e B della retta:

$$x_{(m)} = B + A \times y_{(m)}$$

Definita la funzione di probabilità di non superamento e tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

$$T_r(X \leq x) = \frac{1}{(1 - P(X \leq x))}$$

è possibile valutare il valore massimo dell'altezza d'onda significativa, corrispondente ad un tempo di ritorno assegnato.

Una volta eseguite le elaborazioni di regolarizzazione statistica (Gumbel e Weibull), occorre verificare la bontà dei risultati ottenuti; a tale scopo Goda definisce due diversi criteri da seguire per scartare le distribuzioni statistiche non adatte:

1. Deviation of OutLier (DOL) - dove si controlla che l'evento con il maggiore valore di H_s ricada all'interno di un determinato campo di validità;
2. REsidue of Correlation coefficient (REC) - il coefficiente di correlazione residuo ($\Delta r = 1-r$) deve essere inferiore ad una determinata soglia definita come $\Delta r_{95\%}$.

Il criterio MIR (Minimum ratio of Residual correlation coefficient), proposto sempre da Goda, consente infine di selezionare, tra le distribuzioni rimaste valide, quella che meglio si adatta al campione esaminato; tale criterio si basa sul rapporto tra il coefficiente di correlazione residuo (Δr) e quello medio, che può essere stimato attraverso una relazione empirica (funzione della numerosità del campione e della distribuzione); la distribuzione di migliore adattamento è quella che presenta il minimo valore di tale rapporto.

Per individuare i settori di provenienza degli stati di mare si è fatto riferimento all'esposizione geografica del sito analizzata in precedenza la quale mostra chiaramente l'esistenza di un settore di traversia principale, ovvero quello compreso tra 350°N e 40°N (settore nord-orientale o di tramontana – grecale).

Tali eventi sono rappresentati nel diagramma polare riportato in Figura 7-2.

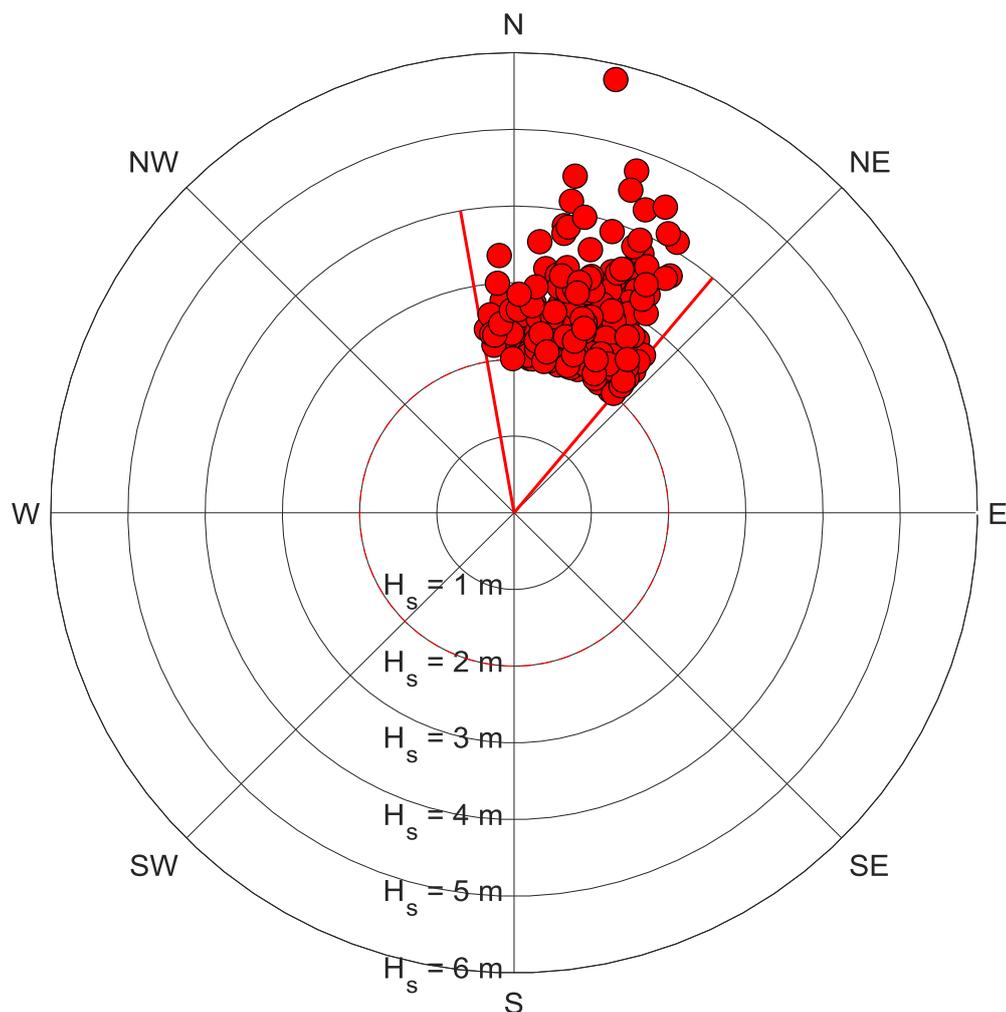


Figura 7-2. Distribuzione degli eventi estremi selezionati con il metodo POT per il settore di traversia principale compreso tra 350°N e 40°N .

Il metodo POT prevede che le sole mareggiate, che hanno all'interno del settore di competenza un'altezza significativa massima a superiore ad una certa soglia, vengano utilizzate per la successiva analisi statistica degli eventi estremi; viene quindi definito il parametro di taglio (censoring parameter):

$$v = \frac{N}{N_{tot}}$$

con N - numero degli eventi sopra la soglia; N_{tot} numero totale delle mareggiate.

La scelta del valore di soglia rappresenta uno dei limiti nell'uso del metodo POT, infatti considerare una soglia eccessivamente piccola comporta un maggiore peso agli eventi di modesta entità (mareggiate ordinarie), mentre con una soglia eccessivamente elevata viene selezionato un numero di eventi che può risultare piccolo a discapito della bontà della regolarizzazione statistica.

Per la definizione della soglia si fa riferimento al metodo di Goda il quale prevede di scegliere un valore di soglia tale poter includere nel campione un numero di eventi compreso 2 e 5 per anni. Nel caso specifico si è scelta una soglia pari a 1,8 m, individuando in totale circa 140 eventi estremi.

In

Figura 7-3 è riportato l'andamento dell'altezza d'onda significativa H_s in funzione del tempo di ritorno T_r . I medesimi valori sono riportati, in forma tabellare, all'interno di

Tabella 7-1.

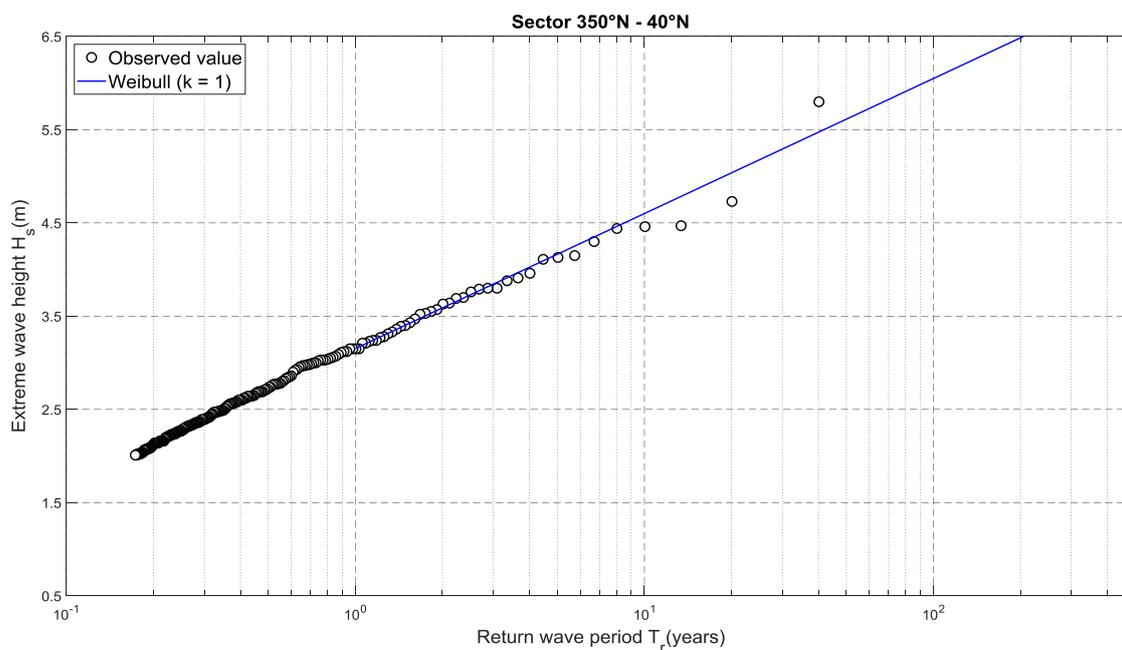


Figura 7-3. Altezze d'onda estreme - metodo POT (soglia posta uguale a 1,8 m) Legge Weibull (k=1.00) Settore 350°- 40°N

Tabella 7-1. Valori tabellati di H_s - T_r

T_R (anni)	H_s (m)
2	3.6
5	4.2
10	4.6
20	5.0
50	5.6
100	6.0
200	6.5
250	6.6
300	6.7
400	6.9
500	7.1

8. Variazioni del livello marino

La conoscenza delle massime variazioni quasi-statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente la marea astronomica e “meteorologica”), è necessaria per molteplici scopi: per una corretta progettazione delle quote da assegnare alle opere a mare, per l’analisi della posizione a breve e a lungo termine della linea di costa e per la determinazione della cosiddetta altezza limite di “swash”, ossia la quota della spiaggia emersa raggiunta dal mare e quindi il limite delle infrastrutture poste a terra.

Dal punto di vista geologico (lungo termine) la costa in esame si presenta abbastanza stabile; non esistono problemi di eustatismo o subsidenza. Per quanto riguarda le variazioni a breve termine, periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica, dall’azione del vento e della pressione atmosferica (“marea meteorologica”), le variazioni stagionali di densità ed anche il sovrizzo d’onda presente sulla battigia durante le mareggiate.

Nel Mar Tirreno e, soprattutto, nel paraggio costiero dell’Isola di Tavolara le escursioni del mare sono abbastanza modeste, anche se eccezionalmente si possono verificare variazioni significative.

8.1 Marea astronomica

La componente oscillatoria meglio conosciuta è la marea astronomica, generata dall’attrazione gravitazionale della luna (70%) e del sole (30%). Le ampiezze e 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”.

Le escursioni di marea astronomica sono contraddistinte da una periodicità bimensile distinta nelle fasi di sigizie (luna piena e nuova) e di quadratura. Nei periodi sigiziali si verificano i massimi dislivelli positivi e negativi che raggiungono valori di circa 0,20 m rispetto al livello medio marino (massimo dislivello assoluto pari a circa 0,40 m). Nelle fasi di quadratura l’escursione è comunque di $\pm 0,15$ m sul l.m.m. Mediamente l’oscillazione di marea da assumere (dislivello tra il minimo e il massimo livello diurno) è di 0,25 m.

8.2 Dislivello barico

Il fenomeno è legato alle variazioni di pressione: un abbassamento barico di 1 mb rispetto al valore medio-normale (1013 mb) produce un innalzamento di circa 1 cm del livello marino e viceversa. Nel Mar Tirreno i valori misurati minimi e massimi della pressione (legati al passaggio dei cicloni e anticicloni) possono essere assunti pari a 970 mb e 1050 mb rispettivamente. Ne consegue quale effetto “barico” un massimo sovrizzo marino di 0,43 m ed un massimo abbassamento del livello di 0,37 m.

In condizioni estreme eccezionali tali valori possono aumentare ancora di qualche centimetro.

8.3 Sovralzo dovuto al vento

Il sovrizzo di vento è dovuto all'accumulo d'acqua sottocosta per azione di venti foranei permanenti. Il calcolo del massimo sovrizzo di vento è stato effettuato mediante una nota formulazione analitica implicita:

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

dove:

- U = velocità del vento (m/s);
- D = profondità limite della piattaforma continentale (200 m);
- L_p = estensione della piattaforma (distanza tra d e D nella direzione del vento) (m);
- d = profondità ove si calcola il sovrizzo (m);
- g = accelerazione gravitazionale (9,81 m/s²);
- k_p = coefficiente pari a 3 x 10⁻⁶.

Considerando l'azione di un vento costante diretto verso la costa con velocità di 30 m/s (molto intensa) ed un'estensione della piattaforma continentale (fondale di -200 m) pari a circa 3 km, si è ricavato un innalzamento massimo del livello del mare in corrispondenza delle opere esterne di 0,02 m.

8.4 Valori estremi

In conclusione, considerando tutti i precedenti contributi (massimi) positivi e negativi, si ottengono i seguenti massimi dislivelli rispetto al livello medio del mare in corrispondenza delle opere:

- sovrizzo = +0,15 + 0,43 + 0,02 = 0,60 m;
- abbassamento = -0,15 - 0,37 = -0,52 m.

Si osserva che i valori così ottenuti sono da ritenere esatti solo nell'ipotesi di perfetta concomitanza tra i singoli fenomeni che contribuiscono alla variazione del l.m.m.

In generale la perfetta concomitanza non si verifica mai, basti pensare al fatto che la componente astronomica della marea può essere ritenuta di natura deterministica mentre non lo è quella meteorologica.