

COMUNE DI VERBANIA
 PROVINCIA DEL VERBANO-CUSIO-OSSOLA



PROGETTO DEFINITIVO NUOVO PORTO TURISTICO DI PALLANZA OPERE IDRAULICHE

00	APPROVAZIONE	Maggio 2023	F.P.	F.P.	F.P.
Revisione:	Emesso per:	Data:	Redatto:	Verificato:	Approvato:
Contenuto: STUDIO METEOMARINO		Commessa: PALLANZA		Elaborato numero: PI_0113_0	
Nome file: PALLANZA_PI_0113_0		Scala: ---			
Committente: 		Progettista: opere idrauliche:  STUDIO Ing. FRANCESCO PRINZIVALLI INGEGNERE NAVALE E MECCANICO - MARINE CONSULTANT FERRARA - Via G. C. Abba n. 4 - 44122 MILANO - Ripa di Porta Ticinese n. 77 - 20143 e-mail: studioprinzivalli@studioprinzivalli.it - mobile: 335-5432172			

PALLANZA (LAGO MAGGIORE)

Studio Meteomarino

MODIMAR srl, Roma
Prof. Leopoldo Franco
Ing. Francesco Ragosta

novembre 2022

Capitolo 1	Premesse	2
1.1	Introduzione	2
1.2	Obiettivi	2
1.3	Metodologia e dati di base.....	2
Capitolo 2	Inquadramento geografico	4
2.1	Fetch geografico ed efficace	5
Capitolo 3	Regime dei venti	9
3.1	Regime dei venti (annuale)	9
3.2	Regime dei venti (estivo).....	14
3.3	Confronto rose dei venti (annuale ed estiva).....	19
Capitolo 4	Clima di moto ondoso al largo di Pallanza	20
4.1	Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda significativa e direzione	21
4.2	Confronto rose delle onde (annuale ed estiva).....	27
4.3	Curva di durata	28
4.4	Distribuzione degli eventi in relazione al periodo di picco del moto ondoso	30
Capitolo 5	Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo	33
5.1	Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali).....	33
5.2	Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati.....	35
5.3	Statistica delle altezze d'onda significative estreme	36
5.4	Conclusioni	46
Capitolo 6	Statistica degli eventi estremi di vento al largo	47
6.1	Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali).....	47
6.2	Statistica delle velocità di vento estreme	49
6.3	Conclusioni	59
APPENDICI		
I)	Descrizione del modello di ricostruzione di moto ondoso ALTAIR.....	60

Capitolo 1 Premesse

1.1 Introduzione

La presente relazione descrive i risultati dello studio meteomarinario relativo alla località di Pallanza (Verbania) sul Lago Maggiore, utile per il progetto di un nuovo porto turistico in corso di esecuzione dallo Studio ing. Francesco Prinzivalli. Lo studio è stato eseguito dal prof. Leopoldo Franco in collaborazione con l'ing. Francesco Ragosta per conto della Modimar srl.

1.2 Obiettivi

L'obiettivo del presente studio è definire le forzanti meteomarine in termini di vento e moto ondoso. Lo studio in particolare ha riguardato i seguenti aspetti:

- inquadramento geografico del paraggio e determinazione dell'area di generazione efficace per il moto ondoso;
- analisi dei venti in termini di direzione e intensità;
- definizione delle caratteristiche del moto ondoso in prossimità del sito in esame;
- valutazione, su base statistica, dei valori estremi di moto ondoso e di velocità del vento per definire le caratteristiche degli stati di mare associati a determinati tempo di ritorno.

1.3 Metodologia e dati di base

Per la definizione delle condizioni di moto ondoso al largo della frazione di Pallanza sono stati presi in esame 25 anni di registrazioni anemometriche direzionali (da novembre 1996 a settembre 2022) effettuate dalla stazione anemometrica situata nel Porticciolo di Pallanza nel punto di coordinate 45.9203 °N - 8.5536 °E, con cadenza oraria, gestita dall'ARPA del Piemonte.

Nel periodo indicato (Novembre 1996 – Settembre 2022) il rendimento complessivo dell'ondametro è risultato pari al 91.4%, ma come si evince dal rendimento annuale riportato in Figura 1-1, negli anni 1996, 1997 e 2022 l'ondametro ha avuto diversi periodi di inattività con rendimenti bassi, soprattutto per l'anno 1996.

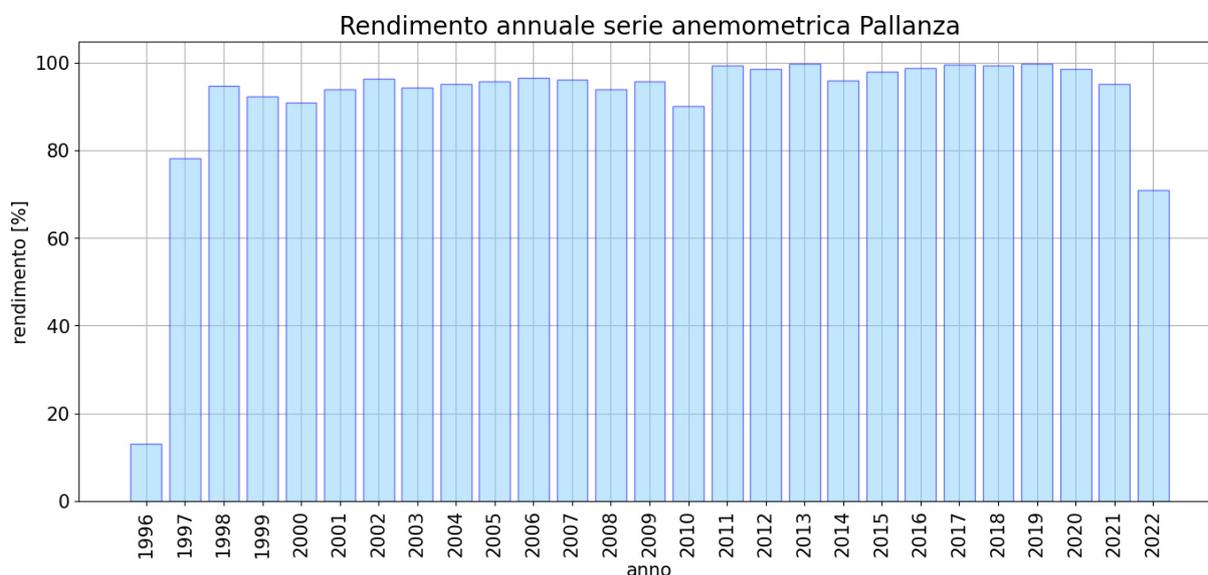


Figura 1-1. Rendimento della serie anemometrica di Pallanza – 1996/2022

Tali registrazioni sono state successivamente impiegate come dato di ingresso per un modello hindcasting di tipo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretsheneider, 1947), denominato ALTAIR, sviluppato dalla MODIMAR e applicato per la ricostruzione di stati di mare in funzione di serie storiche di registrazioni anemometriche (si rimanda all'APPENDICE I) per la descrizione del modello).

Si fa presente che nel dataset impiegato in ALTAIR, non sono stati inclusi tre dati facenti riferimento a un evento registrato a cavallo tra il 7 ottobre e l'8 ottobre del 1998. È stato deciso di eliminare l'intero evento poiché nella serie temporale la direzione ha salti di direzione tali da suggerire che si tratti di un errore di misura (Figura 1-2).

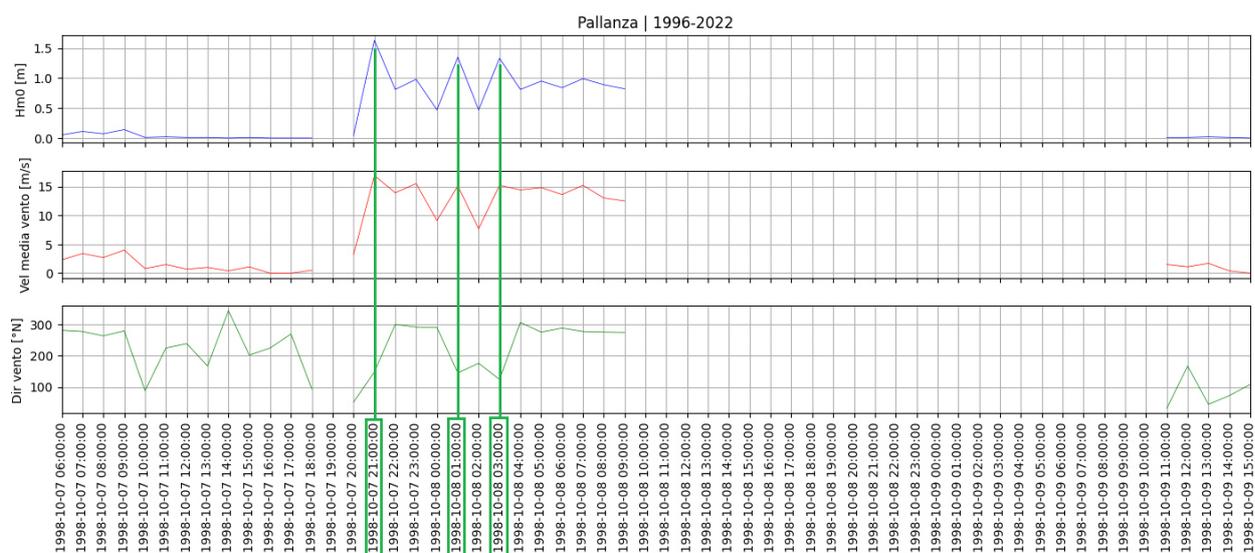


Figura 1-2. Caratteristiche evento outlier con indicazione dei 3 dati eliminati dalla serie storica.

Tabella 1-1. Caratteristiche dei 3 dati eliminati dalla serie storica

Data	Hm0 [m]	Direzione onda [°N]	Tp [s]	Velocità vento [m/s]	Direzione provenienza vento [°N]
1998-10-07 21:00:00	1.63	152.6	4.76	14.33	148.0
1998-10-08 01:00:00	1.35	152.0	4.38	12.37	145.0
1998-10-08 03:00:00	1.33	151.4	4.33	8.50	124.0

Sulla serie ondometrica ricostruita da ALTAIR è stata condotta l'analisi statistica che ha permesso di caratterizzare il clima medio annuale (vento e onde) e di calcolare i valori estremi (vento e onde) in corrispondenza di determinati tempi di ritorno.

Capitolo 2 Inquadramento geografico

La Figura 2-1 indica il punto in cui è prevista la realizzazione del progetto e la posizione della stazione anemometrica da cui sono stati presi i dati per effettuare l'analisi meteomarina.



Figura 2-1. Inquadramento geografico del sito in esame con posizione della stazione anemometrica utilizzata (immagine da Google Earth, Data: maggio 2021).

La Figura 2-2 mostra, nel dettaglio, la posizione della stazione anemometrica all'interno del Porticciolo di Pallaanza.

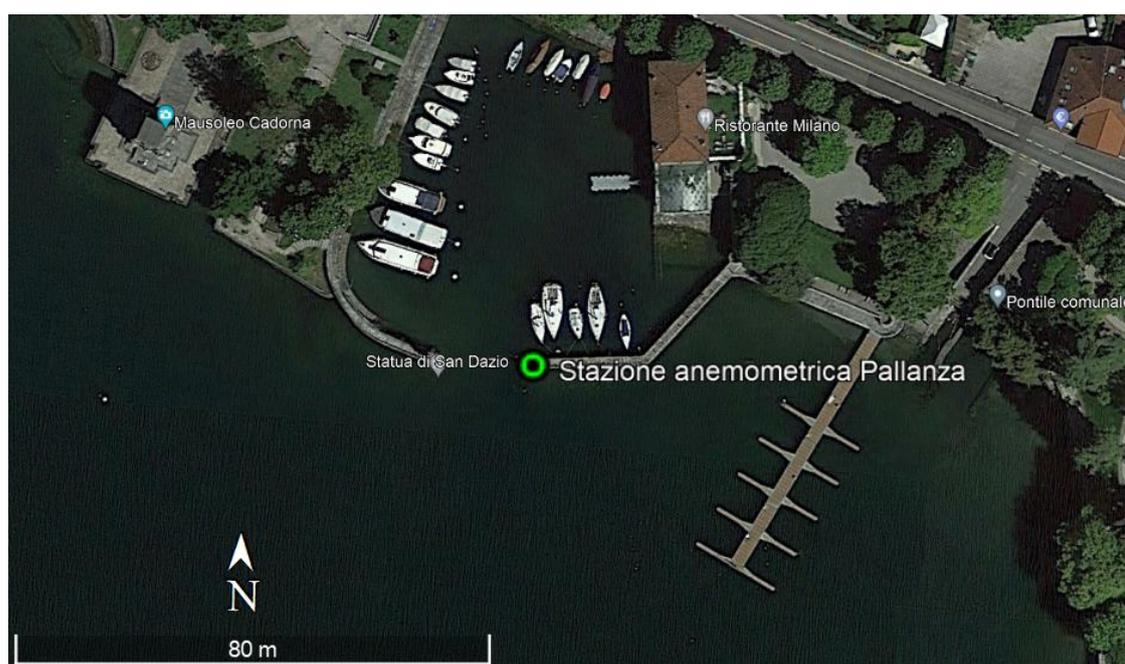


Figura 2-2. Dettaglio della posizione della stazione anemometrica all'interno del Porticciolo di Pallaanza

Si è scelto di considerare la stazione anemometrica di Pallanza in quanto più rappresentativa del sito di progetto in termini sia di posizione (in linea d'aria stazione e sito distano circa 800 m) che di quota (circa 195 m sul l.m.m).

2.1 Fetch geografico ed efficace

Una prima valutazione delle condizioni “potenziali” di esposizione al moto ondoso del sito in esame può essere effettuata sulla base dei settori di traversia geografica, rappresentativi dell'estensione della superficie marina che può contribuire alla generazione del moto ondoso (“fetch”).

In Figura 2-3, nel pannello di sinistra, è mostrato il *fetch geografico* per il punto di coordinate 45.9200 °N, 8.5500 °E, posizionato a Ovest della stazione anemometrica ad una distanza di circa 0.15 miglia nautiche (270 m) dalla costa.

Il punto di tracciamento dei fetch risulta esposto agli stati di mare provenienti dai settori di scirocco, mezzogiorno, libeccio, ponente e maestrale (settore di traversia compreso tra 120 °N e 310 °N). Il settore scirocco-mezzogiorno (150-160 °N) è caratterizzato da fetch più esteso. Risultano evidenti gli effetti schermo dell'Isola Madre, situata a circa 0.7 miglia nautiche a Sud-Ovest del Porticciolo di Pallanza, dell'Isola San Giovanni e del promontorio ad essa adiacente e delle isole posizionate sulla sponda opposta a quella occupata da Pallanza (Isola Superiore e Isola Bella).

Il *fetch efficace* è la porzione di mare sulla quale si esplica “effettivamente” l'azione del vento responsabile della generazione del moto ondoso. Esso è funzione dei valori dei *fetch geografici* associati alle direzioni contigue a quella considerata; in questo modo i *fetch efficaci* tengono conto del fatto che alla generazione del moto ondoso oltre alla superficie marina individuata nella direzione media ϕ_w lungo la quale spira il vento contribuiscono anche le porzioni di mare dalle direzioni comprese in un settore di $\pm\theta$ rispetto alla direzione media di azione del vento. Di conseguenza la lunghezza dei *fetch efficaci* risulta essere diversa da quella dei *fetch geografici*.

Il calcolo dei *fetch efficaci* può essere eseguito in base alla seguente relazione:

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

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).

I risultati dell'elaborazione sono riportati graficamente in Figura 2-3 e in Figura 2-4. In Tabella 2-1 sono riportati i valori dell'estensione dei fetch in funzione della direzione.

I massimi fetch efficaci si hanno tra 130°N e 170°N , con un'estensione media di 7.6 km ed un massimo di 9.2 km in direzione Sud-Sud-Est (150°N).

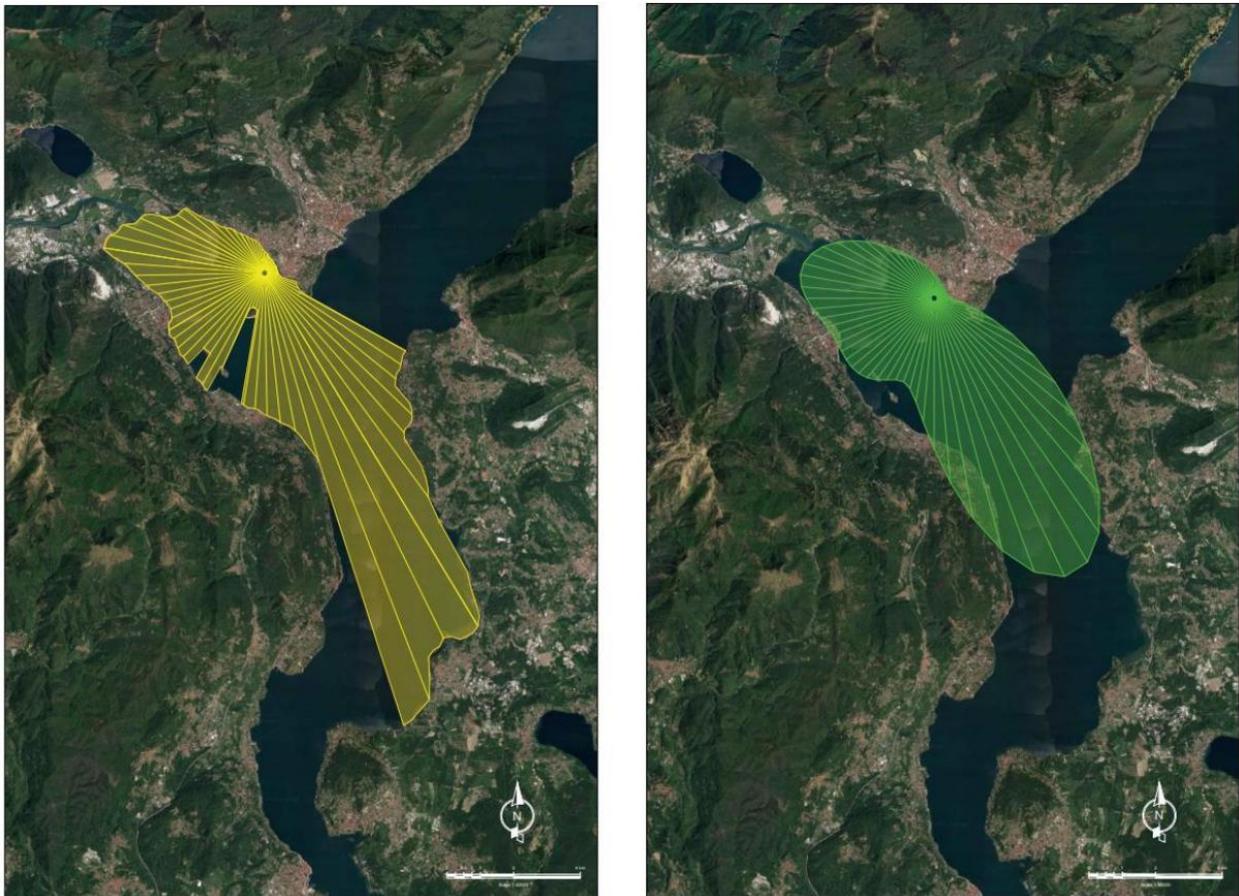


Figura 2-3. Estensione fetch geografico e fetch efficace nel punto di coordinate $45.9200^\circ\text{N} - 8.5500^\circ\text{E}$

Tabella 2-1. Fetch geografici ed efficaci nel punto di coordinate 45.9200 °N - 8.5500 °E

Direzione di provenienza	Fetch geografico	Fetch efficace	Deviazione vento/mare	Direzione di provenienza	Fetch geografico	Fetch efficace	Deviazione vento/mare
[°Nord]	[km]	[km]	[gradi]	[°Nord]	[km]	[km]	[gradi]
0	0.7	0.7	-47.0	180	4.3	4.6	-22.0
10	0.6	0.6	-48.0	190	4.0	3.2	-30.0
20	0.5	0.5	-43.0	200	1.1	2.7	-38.0
30	0.5	0.5	-40.0	210	3.8	2.8	-45.0
40	0.4	0.4	-36.0	220	3.6	3.1	-51.0
50	0.4	0.4	66.0	230	3.4	3.2	0.0
60	0.4	0.4	62.0	240	3.3	3.2	-2.0
70	0.4	0.4	58.0	250	3.0	3.2	19.0
80	0.4	0.4	53.0	260	3.3	3.5	14.0
90	0.4	0.5	48.0	270	3.9	3.8	8.0
100	0.5	0.9	42.0	280	4.9	4.1	1.0
110	1.0	1.9	35.0	290	4.3	3.9	-6.0
120	4.8	3.5	27.0	300	3.4	3.4	-13.0
130	5.1	5.5	19.0	310	3.0	2.7	-20.0
140	6.5	7.7	11.0	320	1.8	2.0	-26.0
150	12.5	9.2	3.0	330	1.4	1.5	-32.0
160	13.9	8.8	-6.0	340	1.1	1.1	-38.0
170	4.8	6.7	-14.0	350	0.9	0.9	-43.0

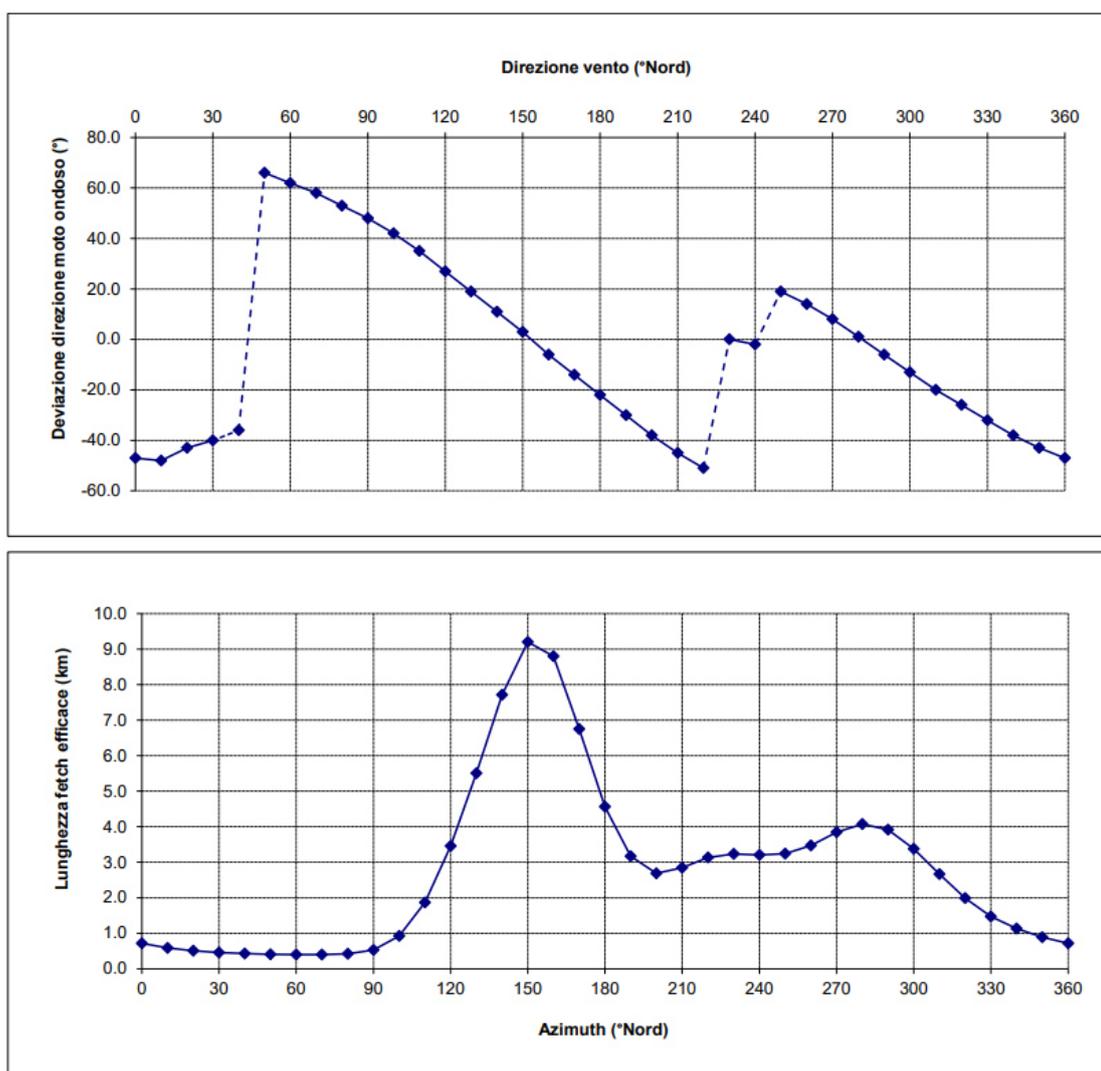


Figura 2-4. Correlazione Vento/Moto ondoso (sopra) ed estensione del fetch efficace (sotto).

Si tenga presente che per velocità del vento pari a 15 m/s e considerando una lunghezza del fetch di 9 km, la durata minima per raggiungere lo stato stazionario risulta essere:

$$t_{staz} = 32 \frac{F^{2/3}}{U_{10}^{1/3}} = 5614 \text{ s} \cong 1.56 \text{ h} \quad \text{con } F = 9000 \text{ m}; \quad U_{10} = 15 \text{ m/s}$$

Capitolo 3 Regime dei venti

3.1 Regime dei venti (annuale)

Per analizzare il regime dei venti la serie storica dei dati orari di vento registrati dalla stazione di Pallanza è stata suddivisa per classi di direzione e velocità del vento (Tabella 3-2).

In termini di frequenza di accadimento (Tabella 3-3) i venti regnanti (più frequenti) provengono dal settore di ponente (270-285 °N) e, con minor frequenza, dal settore di grecale (45 °N) e scirocco (135 °N) con frequenze complessive pari, rispettivamente, a 21.00%, 8.78% e 5.70%.

Le calme (stati di vento con velocità inferiore a 2 m/s) di scarso interesse ai fini della generazione del moto ondoso, si verificano con una frequenza pari al 74.77%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiori a 14 m/s, si verificano in media con percentuali annuali molto vicine allo zero, per 0.7 ore/anno (Figura 3-1 e Tabella 3-1) e provengono prevalentemente dal settore di ponente (285°N).

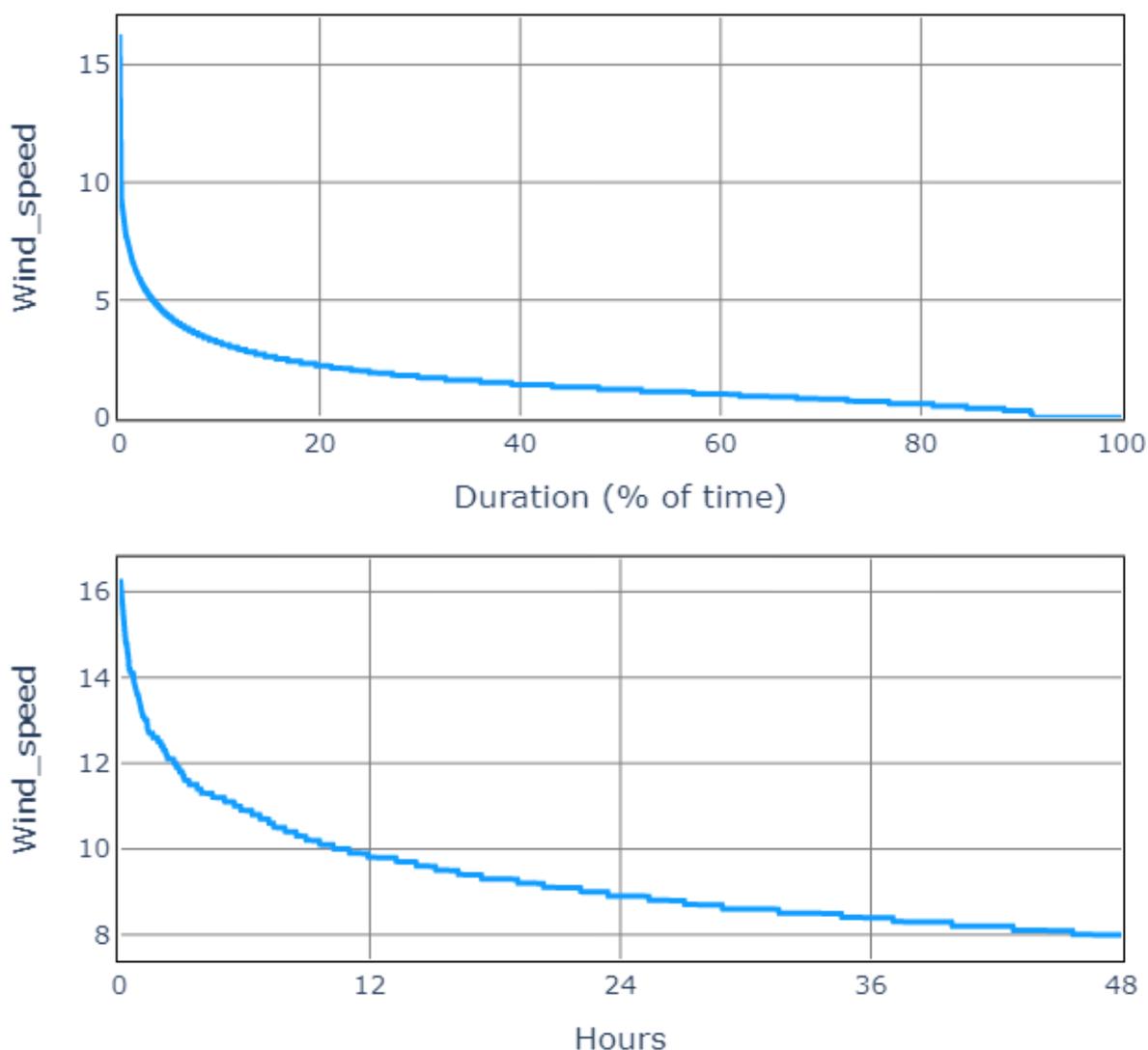


Figura 3-1. Curva di durata annuale (con dettaglio) della velocità del vento al largo di Pallanza.

Tabella 3-1. Regime dei venti annuale - Ore e percentuali di superamento delle velocità del vento

Velocità vento [m/s]	Ore	% (of 365 days)
1.0	5220.2	59.55
1.5	3279.7	37.41
2.0	2108.2	24.05
2.5	1423.1	16.23
3.0	1000.0	11.41
3.5	720.6	8.22
4.0	520.8	5.94
4.5	388.9	4.44
5.0	292.9	3.34
5.5	222.5	2.54
6.0	167.4	1.91
6.5	126.3	1.44
7.0	93.2	1.06
7.5	68.3	0.78
8.0	47.4	0.54
8.5	33.3	0.38
9.0	22.6	0.26
9.5	15.9	0.18
10.0	10.6	0.12
10.5	7.7	0.09
11.0	5.6	0.06
11.5	3.7	0.04
12.0	2.6	0.03
12.5	1.9	0.02
13.0	1.2	0.01
13.5	0.9	0.01
14.0	0.7	0.01
14.5	0.4	0.0
15.0	0.3	0.0
15.5	0.2	0.0

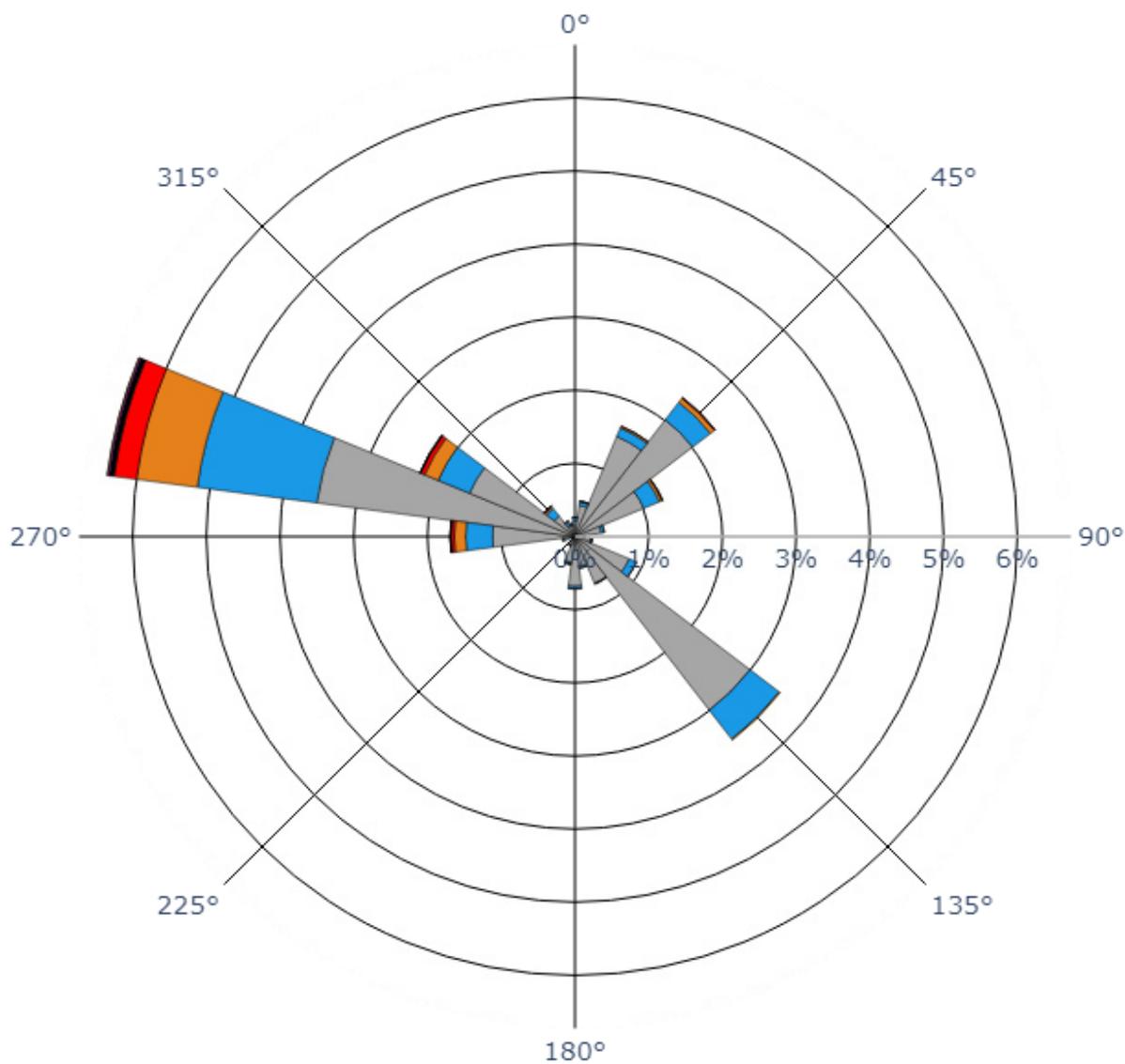
Tabella 3-2. Suddivisione dei dati di vento al largo di Pallanza (periodo 1996-2022).

Direzione di provenienza °N	Classi di velocità del vento [m/s]												Tot
	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	
0	1298	858	472	89	11	1	0	0	0	0	0	0	2729
15	3213	2577	929	110	18	3	0	0	0	0	0	0	6850
30	4625	6068	3207	274	54	4	0	0	0	0	0	0	14232
45	4643	9164	4357	656	145	29	0	1	0	0	0	0	18995
60	3888	5838	2186	502	87	13	1	0	0	0	0	0	12515
75	2563	2444	777	89	10	0	0	0	0	0	0	0	5883
90	5876	1537	262	19	10	0	0	0	0	0	0	0	7704
105	1399	1433	469	33	6	3	0	0	0	0	0	0	3343
120	1429	1876	1724	226	10	0	0	0	0	0	0	0	5265
135	1432	3306	6479	1082	30	0	0	0	0	0	0	0	12329
150	1433	2756	1499	22	1	0	0	0	0	0	0	0	5711
165	1463	2465	884	57	6	0	0	0	0	0	0	0	4875
180	2144	3085	1471	74	10	0	0	0	0	0	0	0	6784
195	2268	4014	775	48	6	1	0	0	0	0	0	0	7112
210	3246	4177	282	16	1	1	0	0	0	0	0	0	7723
225	3999	3184	112	9	2	0	0	0	0	0	0	0	7306
240	5386	2594	93	10	3	0	0	0	0	0	0	0	8086
255	5403	2546	309	54	24	0	0	0	0	0	0	0	8336
270	11340	4701	2420	791	330	92	27	3	2	0	0	0	19706
285	4450	7436	7645	3539	1800	662	152	44	12	1	0	0	25741
300	3482	4817	3349	998	429	122	24	2	2	0	0	0	13225
315	2382	2031	760	296	67	14	2	1	0	0	0	0	5553
330	1832	974	360	107	33	7	0	0	0	0	0	0	3313
345	1954	763	315	57	17	2	0	0	0	0	0	0	3108
N° di eventi	81148	80644	41136	9158	3110	954	206	51	16	1	0	0	216424

Tabella 3-3. Frequenza di accadimento dei venti al largo di Pallanza (periodo 1996-2022).

Direzione di provenienza °N	Classi di velocità del vento [m/s]												Freq. %	≥2.00
	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		
0	0.6	0.4	0.22	0.04	0.01	0	0	0	0	0	0	0	1.26	0.26
15	1.48	1.19	0.43	0.05	0.01	0	0	0	0	0	0	0	3.17	0.5
30	2.14	2.8	1.48	0.13	0.02	0	0	0	0	0	0	0	6.58	1.64
45	2.15	4.23	2.01	0.3	0.07	0.01	0	0	0	0	0	0	8.78	2.4
60	1.8	2.7	1.01	0.23	0.04	0.01	0	0	0	0	0	0	5.78	1.28
75	1.18	1.13	0.36	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	2.72	0.41
90	2.72	0.71	0.12	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	3.56	0.13
105	0.65	0.66	0.22	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	1.54	0.23
120	0.66	0.87	0.8	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	2.43	0.9
135	0.66	1.53	2.99	0.5	0.01	0	0	0	0	0	0	0	5.7	3.51
150	0.66	1.27	0.69	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	2.64	0.71
165	0.68	1.14	0.41	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	2.25	0.43
180	0.99	1.43	0.68	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	3.13	0.71
195	1.05	1.85	0.36	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	3.29	0.39
210	1.5	1.93	0.13	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	3.57	0.14
225	1.85	1.47	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.38	0.06
240	2.49	1.2	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.74	0.05
255	2.5	1.18	0.14	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	0	3.85	0.17
270	5.24	2.17	1.12	0.37	0.15	0.04	0.01	0	0	0	0	0	9.11	1.7
285	2.06	3.44	3.53	1.64	0.83	0.31	0.07	0.02	0.01	0	0	0	11.89	6.39
300	1.61	2.23	1.55	0.46	0.2	0.06	0.01	0	0	0	0	0	6.11	2.27
315	1.1	0.94	0.35	0.14	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	2.57	0.53
330	0.85	0.45	0.17	0.05	0.02	0	0	0	0	0	0	0	1.53	0.23
345	0.9	0.35	0.15	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	1.44	0.19
Freq. %	37.49	37.26	19.01	4.23	1.44	0.44	0.1	0.02	0.01	0	0	0	100	25.23

Rosa dei venti annuale



Classi di velocità del vento:

- 0-2 m/s
- 2-4 m/s
- 4-6 m/s
- 6-8 m/s
- 8-10 m/s
- 10-12 m/s
- 12-14 m/s
- 14- m/s

Figura 3-2. Distribuzione direzionale dei venti al largo di Pallanza su base annuale (periodo 1996 - 2022)

3.2 Regime dei venti (estivo)

Per analizzare il regime dei venti estivo la serie storica dei dati orari di vento registrati dalla stazione di Pallanza è stata suddivisa per classi di direzione e velocità del vento (Tabella 3-5).

In termini di frequenza di accadimento (Tabella 3-6) i venti regnanti (più frequenti) provengono dal settore di ponente (270-285 °N) e grecale (30-45 °N) e, con minor frequenza, dal settore di scirocco (135 °N) con frequenze complessive pari, rispettivamente, a 17.44%, 16.82% e 7.15%.

Le calme (stati di vento con velocità inferiore a 2 m/s) di scarso interesse ai fini della generazione del moto ondoso, si verificano con una frequenza pari al 73.57%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiori a 14 m/s, si verificano in media con percentuali annuali molto vicine allo zero, per 0.3 ore/anno (Figura 3-3 e Tabella 3-4) e provengono prevalentemente dal settore di ponente (285°N).

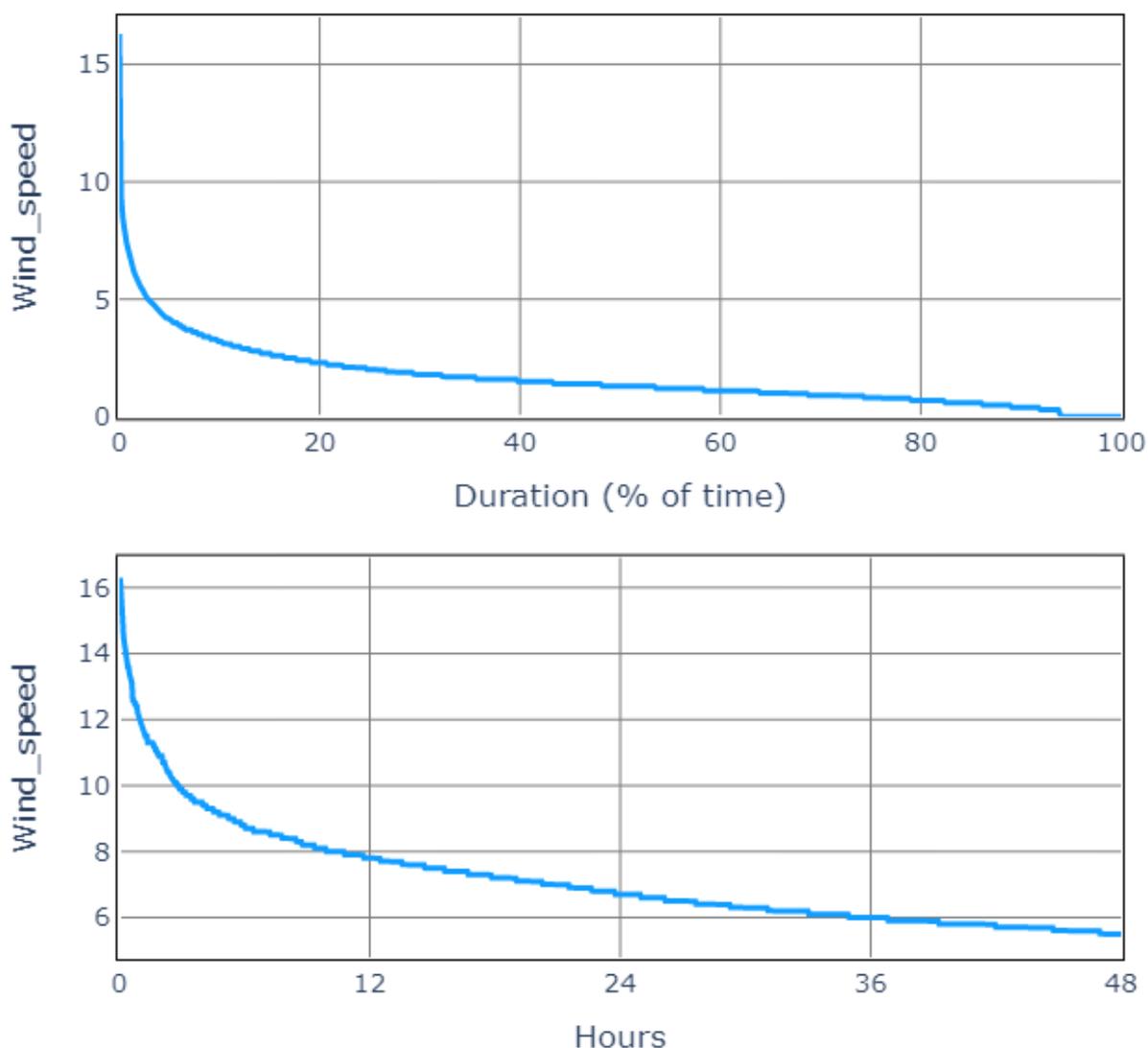


Figura 3-3. Curva di durata estiva (con dettaglio) della velocità del vento al largo di Pallanza.

Tabella 3-4. Regime dei venti estivo - Ore e percentuali di superamento delle velocità del vento

Velocità vento [m/s]	Ore	% (of 93 days)
1.0	1479.6	66.29
1.5	922.7	41.34
2.0	573.6	25.7
2.5	379.4	17.0
3.0	259.9	11.65
3.5	183.0	8.2
4.0	124.6	5.58
4.5	88.8	3.98
5.0	65.0	2.91
5.5	48.5	2.17
6.0	36.2	1.62
6.5	27.0	1.21
7.0	20.8	0.93
7.5	15.2	0.68
8.0	10.3	0.46
8.5	7.5	0.34
9.0	5.3	0.24
9.5	3.9	0.17
10.0	2.8	0.13
10.5	2.3	0.1
11.0	1.8	0.08
11.5	1.3	0.06
12.0	1.0	0.04
12.5	0.8	0.03
13.0	0.6	0.03
13.5	0.5	0.02
14.0	0.3	0.01
14.5	0.2	0.01
15.0	0.2	0.01
15.5	0.1	0.01

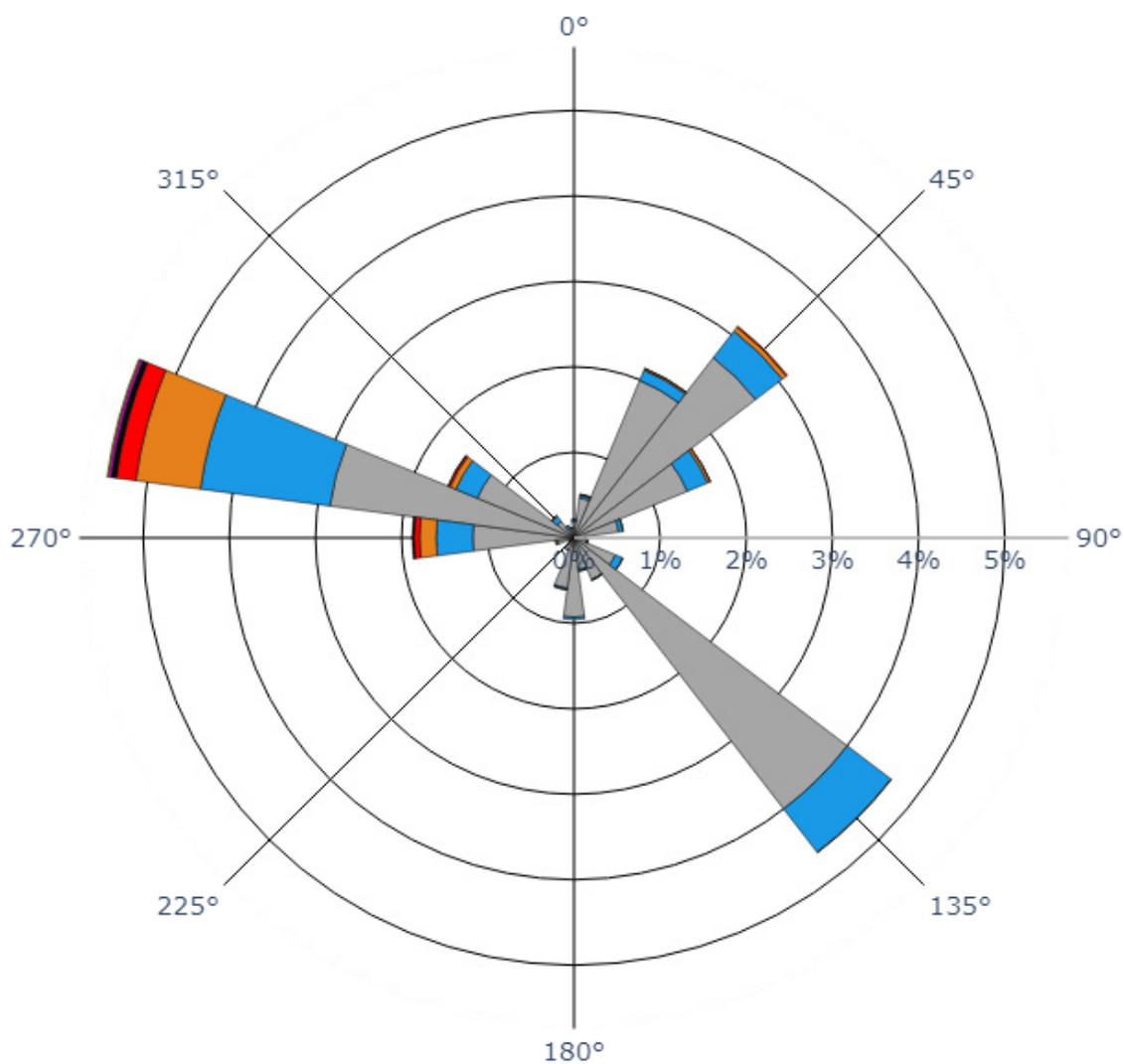
Tabella 3-5. Regime estivo - Suddivisione dei dati di vento al largo di Pallanza (periodo 1996-2022).

Direzione di provenienza °N	Classi di velocità del vento [m/s]												Tot
	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	
0	248	223	104	12	0	1	0	0	0	0	0	0	588
15	668	742	255	17	6	1	0	0	0	0	0	0	1689
30	971	1732	1082	71	11	1	0	0	0	0	0	0	3868
45	1055	2512	1442	213	32	7	0	0	0	0	0	0	5261
60	959	1586	773	139	18	1	0	0	0	0	0	0	3476
75	621	699	284	27	3	0	0	0	0	0	0	0	1634
90	1227	398	69	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1701
105	290	266	81	8	1	0	0	0	0	0	0	0	646
120	325	378	282	50	2	0	0	0	0	0	0	0	1037
135	347	1013	2170	347	3	0	0	0	0	0	0	0	3880
150	328	829	287	4	1	0	0	0	0	0	0	0	1449
165	364	695	202	10	2	0	0	0	0	0	0	0	1273
180	515	903	503	15	0	0	0	0	0	0	0	0	1936
195	462	1394	322	10	0	1	0	0	0	0	0	0	2189
210	636	1663	85	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2388
225	928	1413	41	3	1	0	0	0	0	0	0	0	2386
240	1368	1138	31	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2540
255	1382	950	104	11	5	0	0	0	0	0	0	0	2452
270	2260	1162	638	231	104	36	11	0	0	0	0	0	4442
285	741	1320	1551	823	410	125	33	17	6	1	0	0	5027
300	487	800	659	147	39	13	0	0	1	0	0	0	2146
315	401	420	133	40	4	1	0	0	0	0	0	0	999
330	328	225	66	19	1	0	0	0	0	0	0	0	639
345	371	188	60	5	1	0	0	0	0	0	0	0	625
N° di eventi	17282	22649	11224	2211	649	187	44	17	7	1	0	0	54271

Tabella 3-6. Regime estivo - Frequenza di accadimento dei venti al largo di Pallanza (periodo 1996-2022).

Direzione di provenienza °N	Classi di velocità del vento [m/s]												Freq. %	≥2.00
	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		
0	0.46	0.41	0.19	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	1.08	0.21
15	1.23	1.37	0.47	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	3.11	0.51
30	1.79	3.19	1.99	0.13	0.02	0	0	0	0	0	0	0	7.13	2.15
45	1.94	4.63	2.66	0.39	0.06	0.01	0	0	0	0	0	0	9.69	3.12
60	1.77	2.92	1.42	0.26	0.03	0	0	0	0	0	0	0	6.4	1.71
75	1.14	1.29	0.52	0.05	0.01	0	0	0	0	0	0	0	3.01	0.58
90	2.26	0.73	0.13	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	3.13	0.14
105	0.53	0.49	0.15	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	1.19	0.17
120	0.6	0.7	0.52	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	1.91	0.61
135	0.64	1.87	4	0.64	0.01	0	0	0	0	0	0	0	7.15	4.64
150	0.6	1.53	0.53	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	2.67	0.54
165	0.67	1.28	0.37	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	2.35	0.4
180	0.95	1.66	0.93	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	3.57	0.96
195	0.85	2.57	0.59	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	4.03	0.61
210	1.17	3.06	0.16	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	4.4	0.17
225	1.71	2.6	0.08	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	4.4	0.09
240	2.52	2.1	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.68	0.06
255	2.55	1.75	0.19	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	0	4.52	0.22
270	4.16	2.14	1.18	0.43	0.19	0.07	0.02	0	0	0	0	0	8.18	1.88
285	1.37	2.43	2.86	1.52	0.76	0.23	0.06	0.03	0.01	0	0	0	9.26	5.46
300	0.9	1.47	1.21	0.27	0.07	0.02	0	0	0	0	0	0	3.95	1.58
315	0.74	0.77	0.25	0.07	0.01	0	0	0	0	0	0	0	1.84	0.33
330	0.6	0.41	0.12	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	1.18	0.17
345	0.68	0.35	0.11	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	1.15	0.12
Freq. %	31.84	41.73	20.68	4.07	1.2	0.34	0.08	0.03	0.01	0	0	0	100	26.43

Rosa dei venti estiva



Classi di velocità del vento:

- 0-2 m/s
- 2-4 m/s
- 4-6 m/s
- 6-8 m/s
- 8-10 m/s
- 10-12 m/s
- 12-14 m/s
- 14- m/s

Figura 3-4. Distribuzione direzionale dei venti al largo di Pallanza su base estiva (periodo 1996 - 2022)

3.3 Confronto rose dei venti (annuale ed estiva)

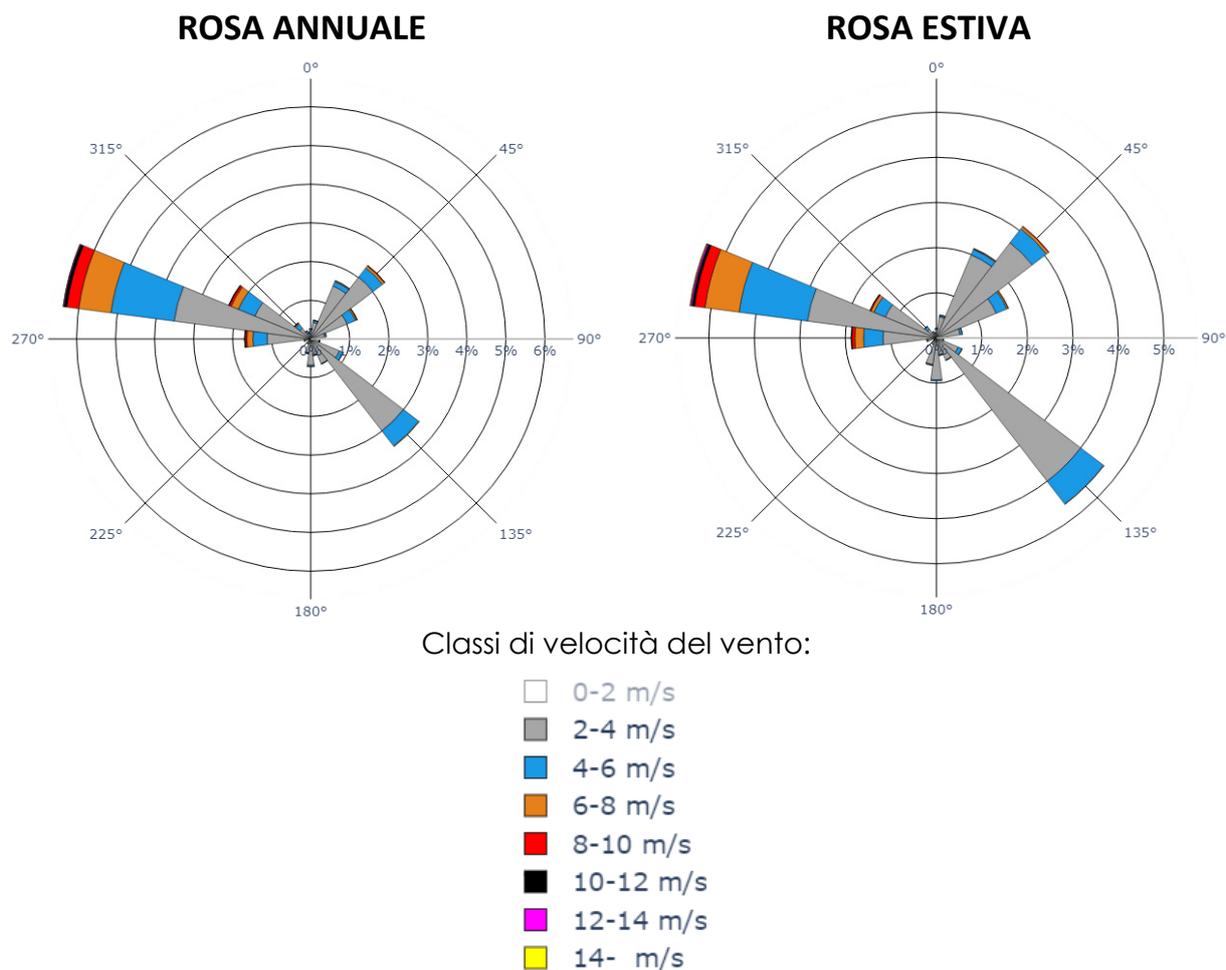


Figura 3-5. Confronto tra la distribuzione direzionale annuale ed estiva dei venti al largo di Pallanza (periodo 1996 - 2022)

In termini di distribuzione direzionale entrambe le rose presentano le stesse direzioni di provenienza del vento (Figura 3-5). In termini di intensità non risultano esserci evidenti differenze tra le rose, mentre in termini di frequenza si riscontra un aumento degli eventi provenienti dai settori di grecale e scirocco-mezzogiorno e una riduzione degli eventi provenienti dal settore ponente-maestrale.

Capitolo 4 Clima di moto ondoso al largo di Pallanza

Nel presente capitolo viene descritto il clima di moto ondoso su base annuale ed estiva al largo di Pallanza, definito a partire dai dati di vento registrati nel punto di coordinate 45.9203 °N - 8.5536 °E per il periodo 1996-2022, opportunamente elaborati dal programma ALTAIR.

Dal punto di vista dell'esposizione ondosa il paraggio presenta un clima bimodale e, nell'ottica di fornire una completa descrizione del clima del paraggio, si è deciso di considerare, oltre al settore omnidirezionale, due settori di traversia: il settore principale di ponente-maestrale [270-315 °N], il settore secondario di scirocco-mezzogiorno [135-180 °N].

Per quanto riguarda il clima di moto ondoso su base annuale, la suddivisione degli eventi per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 4-1) e la corrispondente frequenza di accadimento (Tabella 4-2) mostra che gli stati di moto ondoso più significativi ($H_s > 0.5$ m) si presentano da ponente (7.24%) e da scirocco (2.66%), con una frequenza di accadimento complessiva pari al 9.90%. Dal settore di ponente si presentano inoltre gli eventi con altezza d'onda più elevata ($H_s > 0.8$ m).

Gli stati di mare caratterizzati da altezza d'onda superiore a 0.5 m si verificano in media 17.8 ore l'anno, mentre la persistenza degli stati di mare con $H_s > 1.0$ m si riduce ad appena 0.4 ore all'anno (paragrafo 4.3.1).

Per quanto riguarda, invece, il clima su base estiva, la suddivisione degli eventi per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 4-3) e la corrispondente frequenza di accadimento (Tabella 4-4) mostra che gli stati di moto ondoso più significativi ($H_s > 0.5$ m) si presentano da ponente (6.27%) e da scirocco (3.20%), con una frequenza di accadimento complessiva pari al 9.47%. Dal settore di ponente si presentano inoltre gli eventi con altezza d'onda più elevata ($H_s > 0.8$ m).

Gli stati di mare caratterizzati da altezza d'onda superiore a 0.5 m si verificano in media 4.3 ore nella stagione estiva (93 giorni), mentre non persistono stati di mare con $H_s > 1.0$ m (paragrafo 4.3.2).

4.1 Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda significativa e direzione

4.1.1 Annuale

In Tabella 4-1 e in Tabella 4-2 sono riportati il numero di eventi di moto ondoso e la frequenza di accadimento percentuale degli eventi di moto ondoso al largo di Pallanza, suddivisi secondo classi di direzione e di altezza significativa suddivisi per settori di provenienza di 15° e per classi di altezza d'onda significativa H_s .

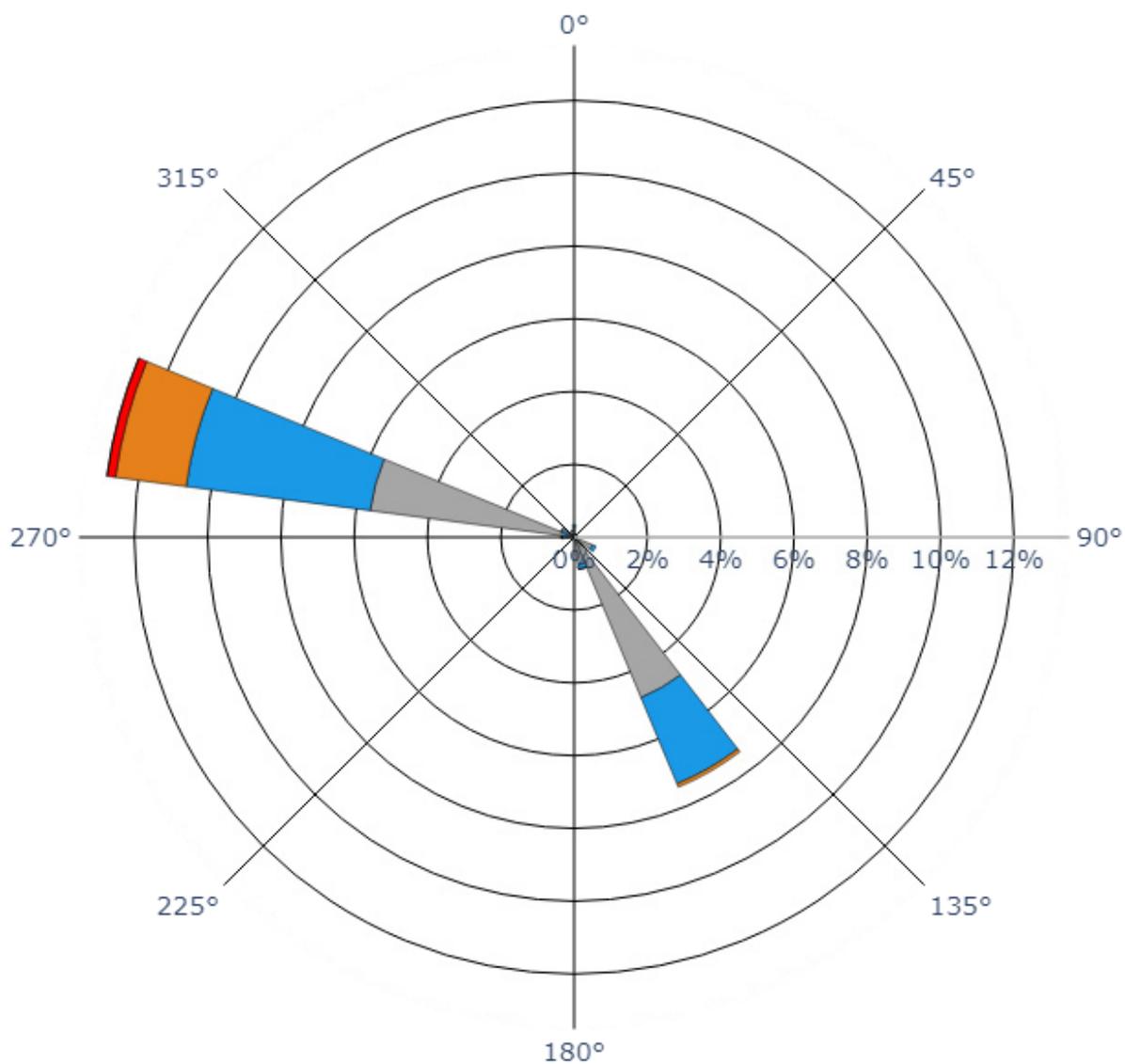
Tabella 4-1. Numero di eventi di moto ondoso al largo di Pallanza suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza delle onde. Periodo di riferimento 1996-2022

Altezza d'onda significativa [m]												
Dir. °Nord	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	0.9 1.0	>1.0	Tot
0.0	11315	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11410
15.0	1873	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1885
30.0	1886	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1901
45.0	2149	25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2175
60.0	2549	18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2569
75.0	2103	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2135
90.0	1690	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1712
105.0	1672	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1696
120.0	17143	211	3	0	0	0	0	0	0	0	0	17357
135.0	8124	28	3	0	0	0	0	0	0	0	0	8155
150.0	27478	4826	587	57	7	0	0	0	0	0	0	32955
165.0	21450	254	24	3	3	0	0	0	0	0	0	21734
180.0	1340	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1344
195.0	1576	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1582
210.0	1010	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1011
225.0	2784	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2789
240.0	4627	11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	4640
255.0	1623	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1628
270.0	9046	227	57	23	6	2	2	0	0	0	0	9363
285.0	42163	8380	3531	1749	770	292	114	42	23	5	6	57075
300.0	5991	268	62	14	1	0	0	0	0	0	0	6336
315.0	3374	52	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3428
330.0	3103	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3133
345.0	7756	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7801
N° di eventi	183825	14593	4276	1847	787	294	116	42	23	5	6	205814

Tabella 4-2. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso, al largo di Pallanza, suddivisi per altezza e direzione.
Periodo di riferimento 1996-2022

Altezza d'onda significativa [m]													
Dir. °Nord	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	0.9 1.0	>1.0	Freq. %	Hs>0.5
0.0	5.5	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.54	0.04
15.0	0.91	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0.01
30.0	0.92	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0.00
45.0	1.04	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.06	0.02
60.0	1.24	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25	0.01
75.0	1.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.04	0.02
90.0	0.82	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.83	0.01
105.0	0.81	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.82	0.01
120.0	8.33	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.43	0.10
135.0	3.95	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.96	0.01
150.0	13.35	2.34	0.29	0.03	0	0	0	0	0	0	0	16.01	2.66
165.0	10.42	0.12	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	10.56	0.14
180.0	0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.65	0.00
195.0	0.77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.77	0.00
210.0	0.49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.49	0.00
225.0	1.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.36	0.01
240.0	2.25	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.25	0.00
255.0	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.79	0.00
270.0	4.4	0.11	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	4.55	0.15
285.0	20.49	4.07	1.72	0.85	0.37	0.14	0.06	0.02	0.01	0	0	27.73	7.24
300.0	2.91	0.13	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	3.08	0.17
315.0	1.64	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.67	0.03
330.0	1.51	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.52	0.01
345.0	3.77	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.79	0.02
Freq. %	89.32	7.09	2.08	0.9	0.38	0.14	0.06	0.02	0.01	0	0	100	10.66

Rosa delle onde annuale



Classi di altezza d'onda significativa:

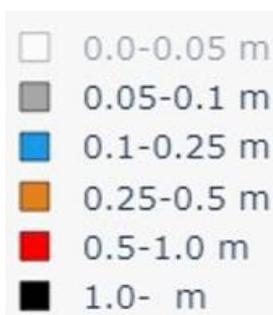


Figura 4-1. Distribuzione direzionale delle onde al largo di Pallanza su base annuale (periodo 1996 - 2022)

4.1.2 Estiva

In Tabella 4-5 e in Tabella 4-4 sono riportati il numero di eventi di moto ondoso e la frequenza di accadimento percentuale degli eventi di moto ondoso su base estiva al largo di Pallanza, suddivisi secondo classi di direzione e di altezza significativa suddivisi per settori di provenienza di 15° e per classi di altezza d'onda significativa H_s .

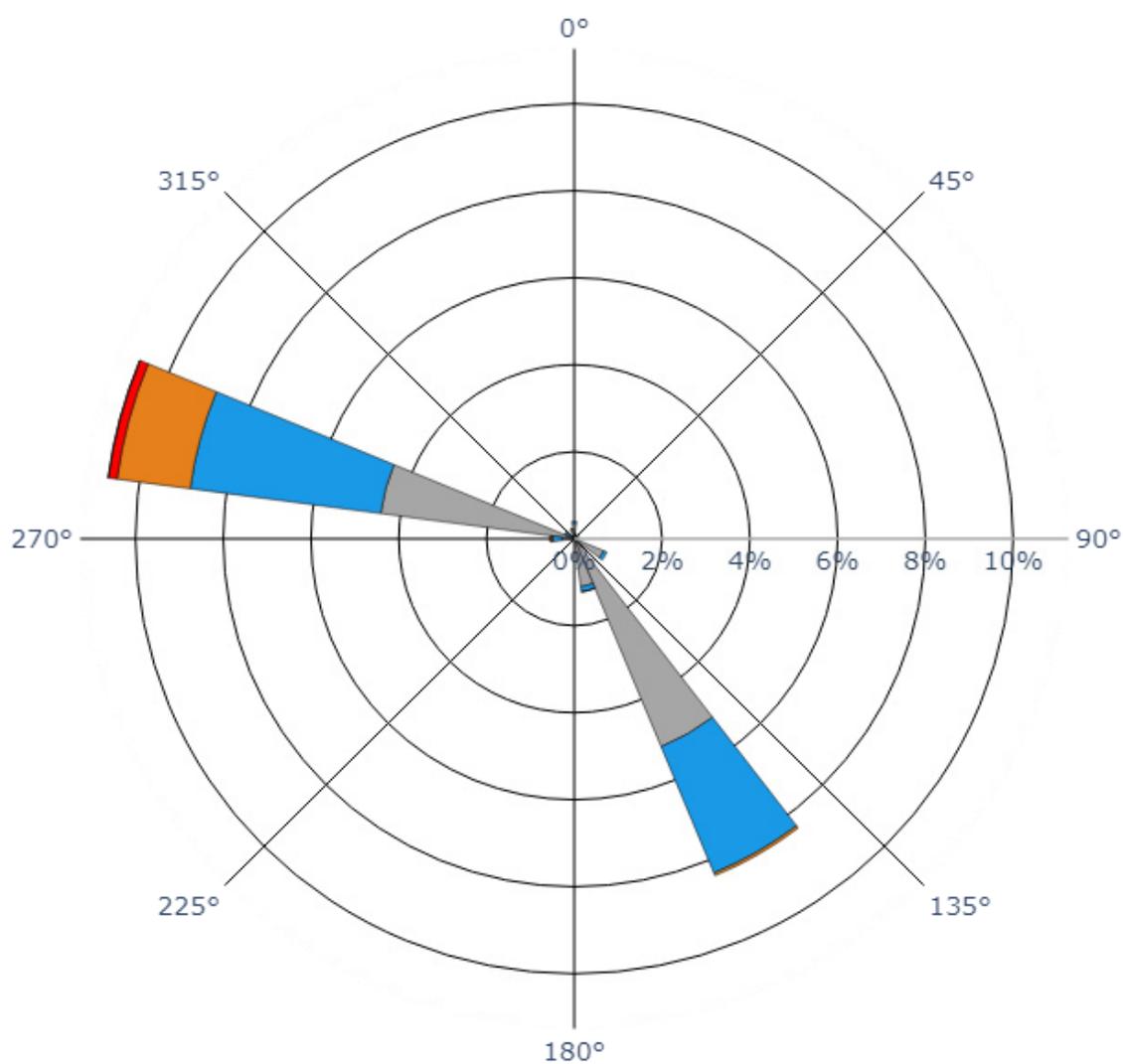
Tabella 4-3. Numero di eventi di moto ondoso su base estiva al largo di Pallanza suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza delle onde. Periodo di riferimento 1996-2022

Altezza d'onda significativa [m]												
Dir. °Nord	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	0.9 1.0	>1.0	Tot
0.0	3230	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3258
15.0	569	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	571
30.0	545	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	547
45.0	618	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	623
60.0	698	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	703
75.0	618	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	627
90.0	470	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	481
105.0	464	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	469
120.0	4720	42	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4763
135.0	1989	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1995
150.0	7000	1512	149	9	1	0	0	0	0	0	0	8671
165.0	6547	60	3	0	1	0	0	0	0	0	0	6611
180.0	460	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	462
195.0	488	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	491
210.0	369	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	369
225.0	962	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	964
240.0	1530	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1534
255.0	524	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	524
270.0	2721	96	23	13	4	2	2	0	0	0	0	2861
285.0	7631	1819	803	371	167	50	32	11	10	2	3	10899
300.0	1209	44	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1255
315.0	675	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	682
330.0	715	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	718
345.0	2054	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2057
N° di eventi	46806	3667	982	395	173	52	34	11	10	2	3	52135

Tabella 4-4. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso su base estiva al largo di Pallanza, suddivisi per altezza e direzione. Periodo di riferimento 1996-2022

Altezza d'onda significativa [m]													
Dir. °Nord	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	0.9 1.0	>1.0	Freq. %	Hs>0.5
0.0	6.2	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.25	0.05
15.0	1.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1	0.01
30.0	1.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.05	0
45.0	1.19	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.19	0
60.0	1.34	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.35	0.01
75.0	1.19	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2	0.01
90.0	0.9	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0.02
105.0	0.89	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.01
120.0	9.05	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.14	0.09
135.0	3.82	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.83	0.01
150.0	13.43	2.9	0.29	0.02	0	0	0	0	0	0	0	16.63	3.2
165.0	12.56	0.12	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	12.68	0.12
180.0	0.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.89	0.01
195.0	0.94	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.94	0
210.0	0.71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.71	0
225.0	1.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.85	0
240.0	2.93	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.94	0.01
255.0	1.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.01	0
270.0	5.22	0.18	0.04	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	5.49	0.27
285.0	14.64	3.49	1.54	0.71	0.32	0.1	0.06	0.02	0.02	0	0.01	20.91	6.27
300.0	2.32	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.41	0.09
315.0	1.29	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.31	0.02
330.0	1.37	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.38	0.01
345.0	3.94	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.95	0.01
Freq. %	89.78	7.03	1.88	0.76	0.33	0.1	0.07	0.02	0.02	0	0.01	100	10.22

Rosa delle onde estiva



Classi di altezza d'onda significativa:



Figura 4-2. Distribuzione direzionale delle onde al largo di Pallanza su base estiva (periodo 1996 - 2022)

4.2 Confronto rose delle onde (annuale ed estiva)

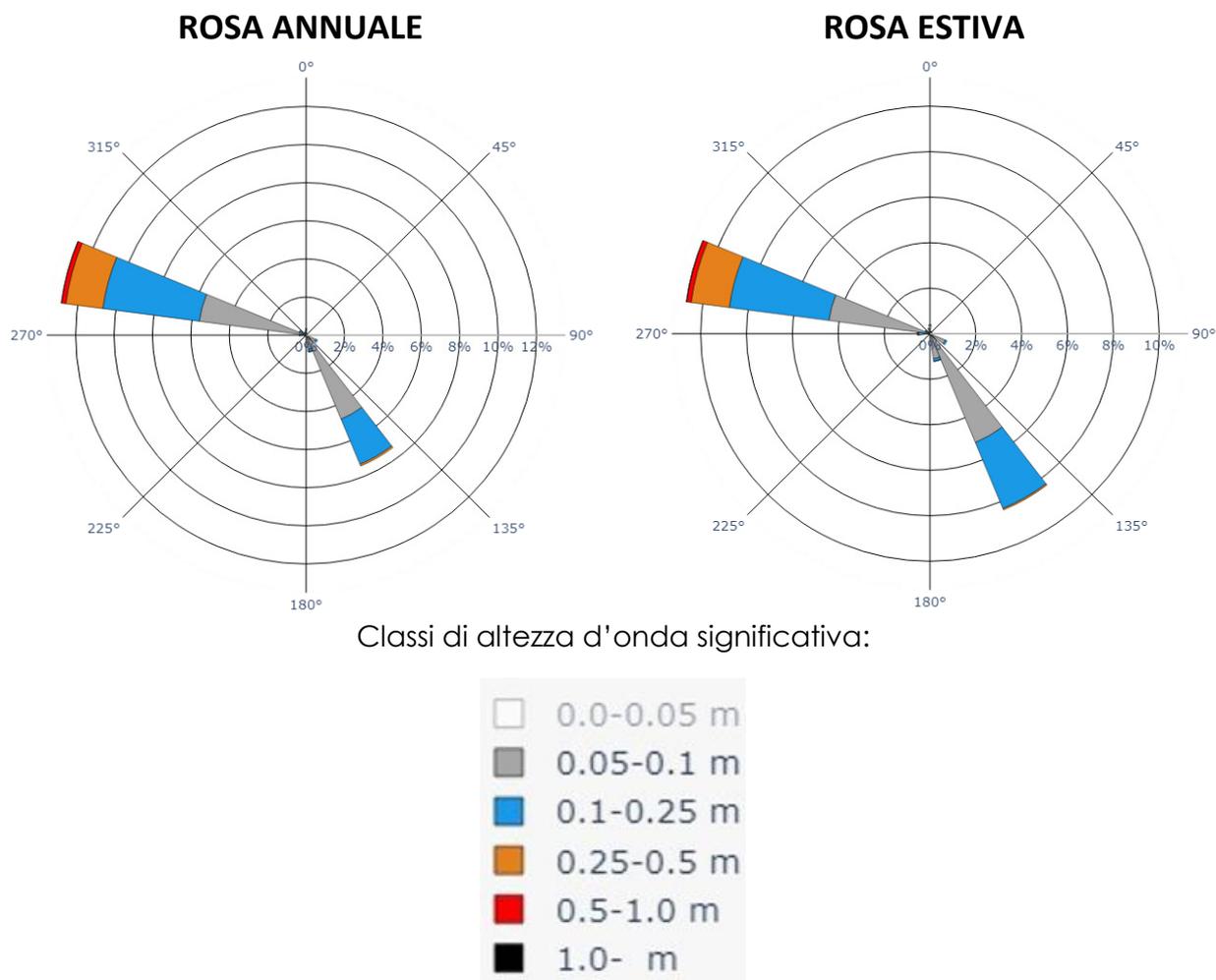


Figura 4-3. Confronto tra la distribuzione direzionale annuale ed estiva delle onde al largo di Pallanza (periodo 1996 - 2022)

In termini di distribuzione direzionale entrambe le rose presentano le stesse direzioni di provenienza del vento (Figura 4-3). In termini di intensità non risultano esserci evidenti differenze tra le rose, mentre in termini di frequenza si riscontra un aumento degli stati di mare provenienti dal settore scirocco-mezzogiorno e una riduzione degli stati di mare provenienti dal settore ponente-maestrale.

4.3 Curva di durata

4.3.1 Annuale

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

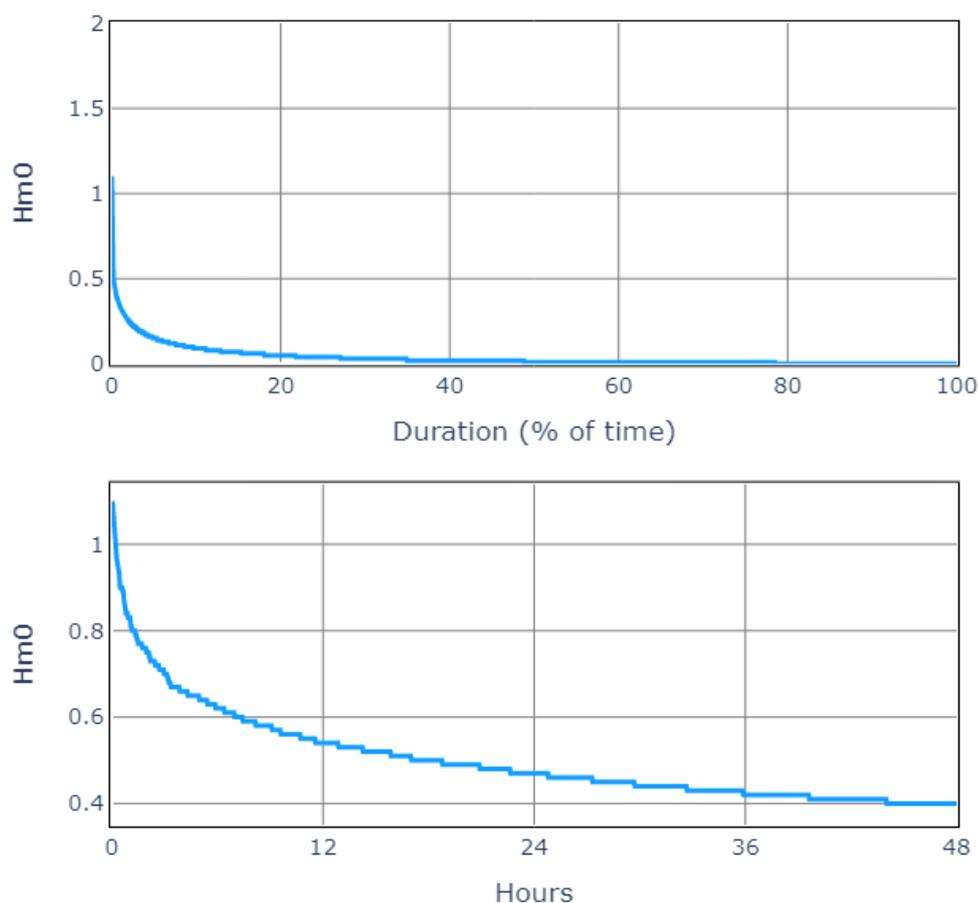


Figura 4-4. Curva di durata annuale (con dettaglio) delle altezze d'onda al largo di Pallanza.

Tabella 4-5. Clima moto ondoso annuale - Ore e percentuali di superamento delle altezze d'onda

H_{m0} [m]	Ore	%
0.1	890.2	10.16
0.2	295.0	3.37
0.3	129.9	1.48
0.5	17.8	0.20
0.8	1.4	0.02
1.0	0.4	0.00

4.3.2 Estiva

In merito alla persistenza degli eventi di moto ondoso si può far riferimento alla curva di durata estiva rappresentata in Figura 4-5. Dall'analisi della serie storica è stato possibile determinare la durata media estiva associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa.

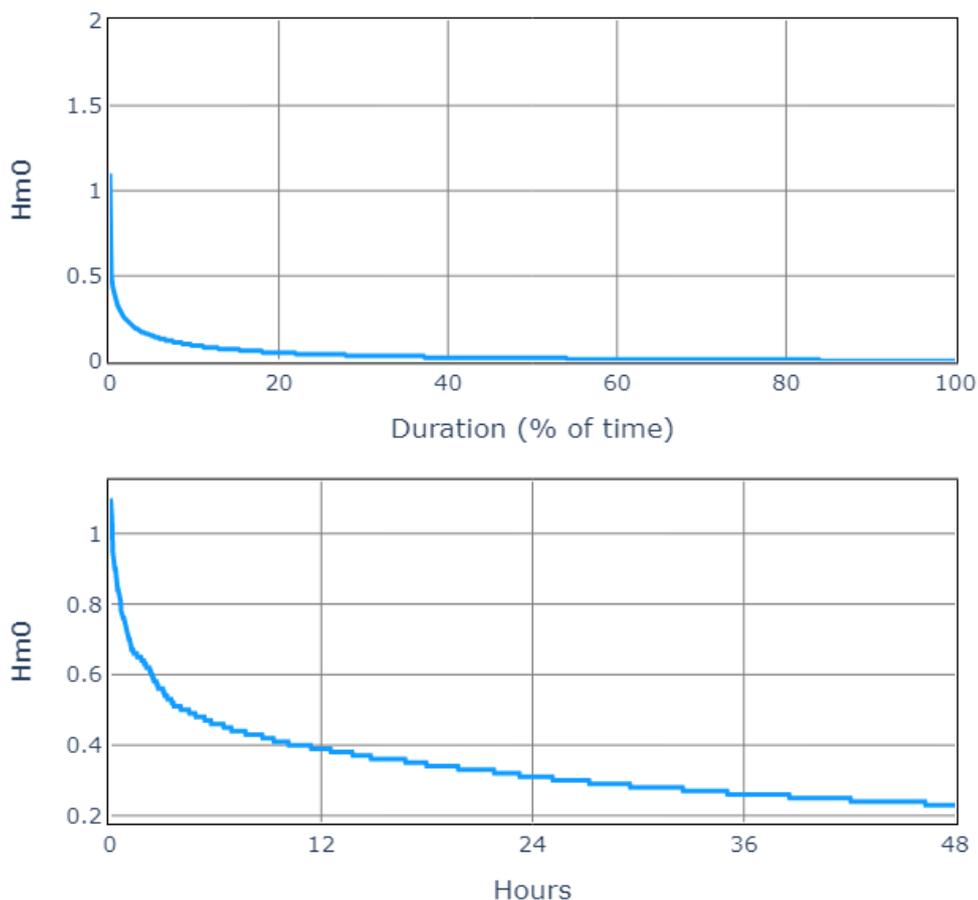


Figura 4-5. Curva di durata estiva (con dettaglio) delle altezze d'onda al largo di Pallanza.

Tabella 4-6. Clima moto ondoso estivo - Ore e percentuali di superamento delle altezze d'onda

Hm0 [m]	Ore	% (of 93 days)
0.1	247.1	11.07
0.2	75.2	3.37
0.3	32.5	1.46
0.5	4.3	0.19
0.8	0.8	0.03
1.0	0.0	0.00

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

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:

$$T_p = a \cdot (H_s)^b$$

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 agli eventi di moto ondoso appartenenti ai settori di traversia:

- 270.0 – 315.0 °N settore di traversia principale;
- 135.0 – 180.0 °N settore di traversia secondario;

In Figura 4-6, Figura 4-7 e Figura 4-8 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 Pallanza, per tutte le direzioni e per i due settori di traversia citati. Sui lati nord ed est di ogni grafico, inoltre, vengono riportati gli istogrammi di frequenza assoluta relativi alle altezze e ai periodi d'onda.

L'analisi condotta ha permesso di determinare i parametri della legge di adattamento riportati nella seguente Tabella 4-7.

Tabella 4-7. Parametri legge di dipendenza tra il periodo di picco delle onde T_p e l'altezza d'onda significativa H_s per i settori di traversia individuati.

$T_p = a \cdot (H_s)^b$	Parametro (a)	Parametro (b)
omnidirezionale 0-360 °N	3.763	0.430
settore di traversia principale 270-315 °N	3.548	0.378
settore di traversia secondario 135-180 °N	3.473	0.403

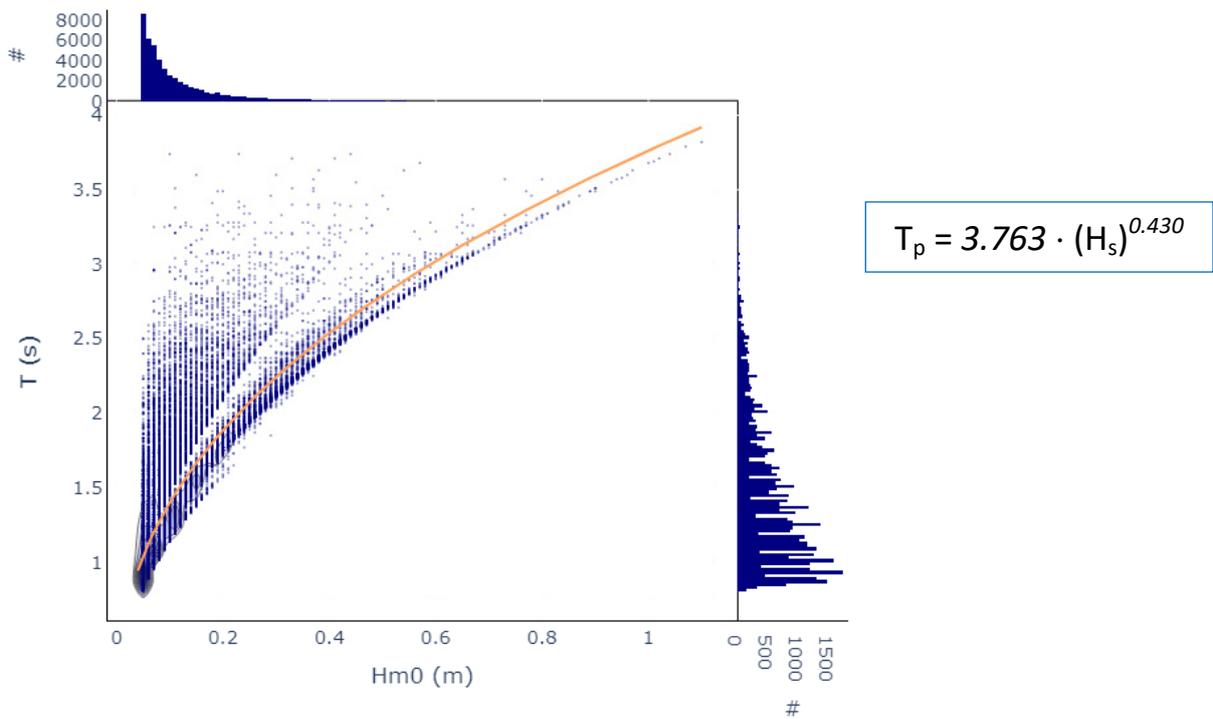


Figura 4-6. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ondometrica al largo di Pallanza.
Analisi omnidirezionale 0-360 °N.

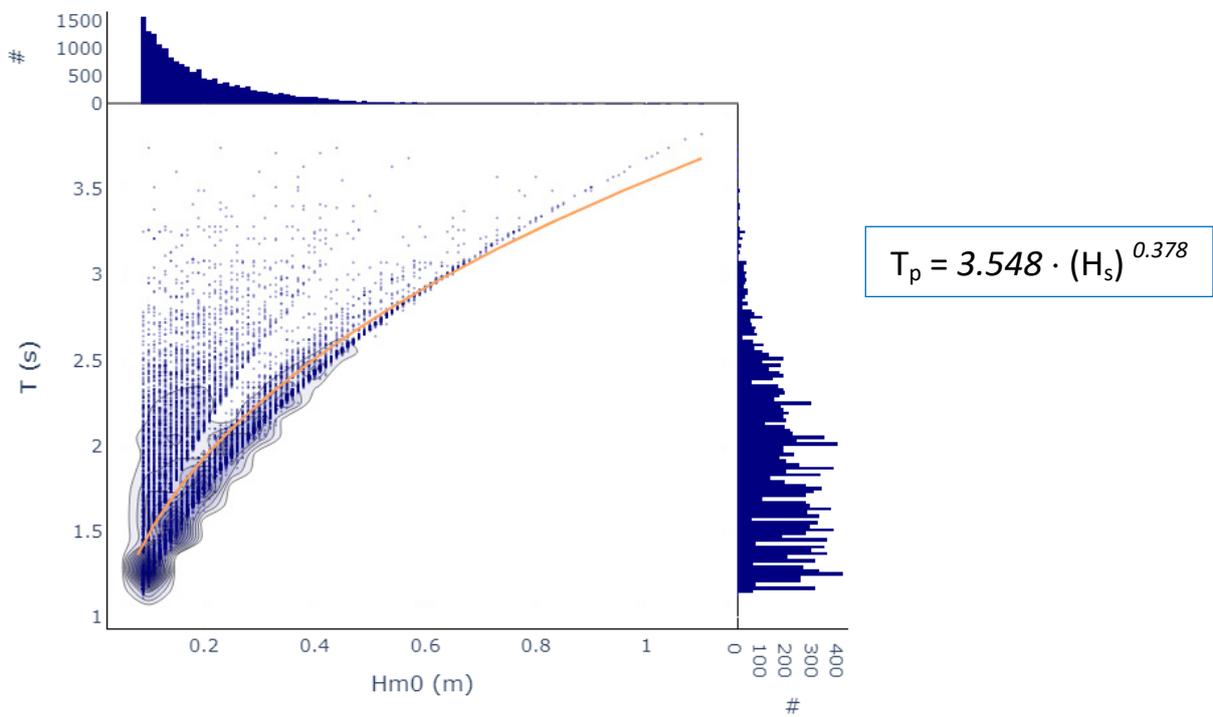


Figura 4-7. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ondometrica al largo di Pallanza.
Settore di traversia principale 270-315 °N.

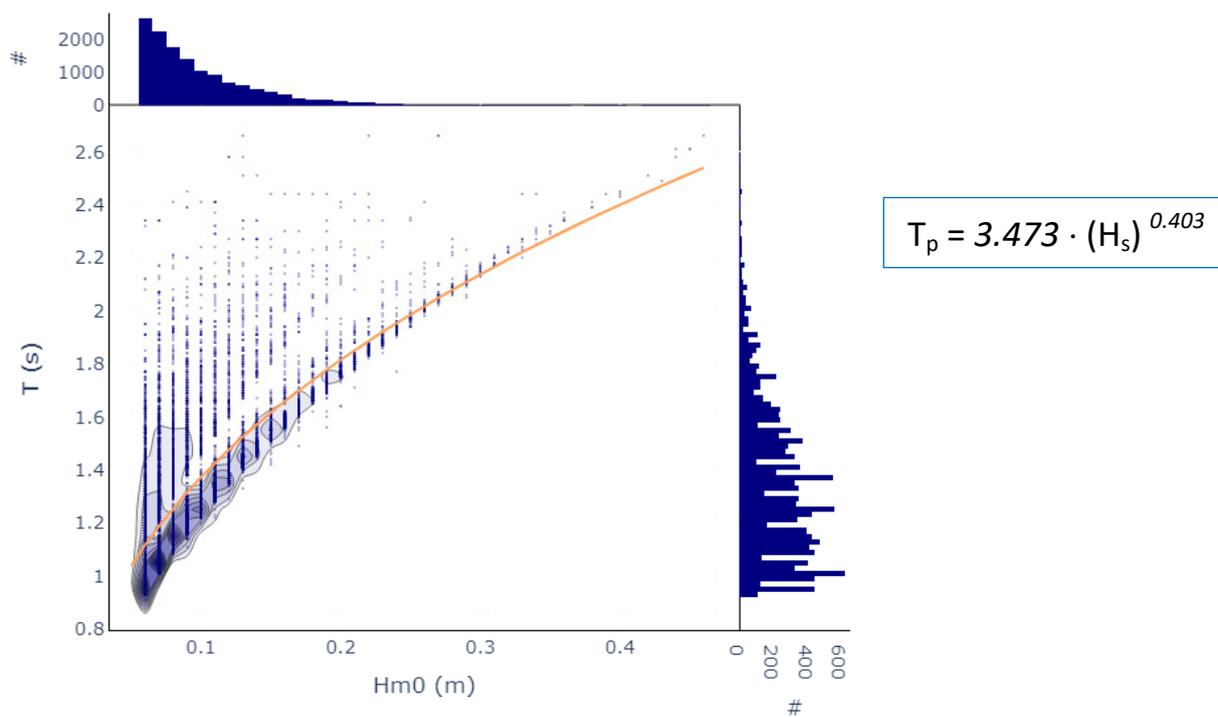


Figura 4-8. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ondometrica al largo di Pallanza. Settore di traversia secondario 135-180 °N.

Capitolo 5 Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo

5.1 Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali)

Nell'ambito del metodo ad eventi le metodologie per la selezione del campione sono le seguenti:

- il metodo dei massimi annuali;
- il metodo dei picchi sopra soglia (POT).

Un confronto tra i due metodi è oltre gli scopi del presente rapporto. Si sottolinea tuttavia che il metodo dei massimi annuali presenta il vantaggio di essere indipendente dalla scelta del valore di soglia, necessario invece per il metodo POT, che definisce inizio e fine delle mareggiate. Di contro il metodo POT permette di formare un campione di numerosità più elevata rispetto al metodo precedente, riducendo le incertezze sulla stima dei parametri delle distribuzioni di probabilità e riducendo quindi gli intervalli di confidenza delle stime.

Visto il numero di anni disponibili dei dati meteomarini (26), si propone in questa sede l'utilizzo del metodo dei massimi annuali per la selezione del campione (in seguito indicato con la sigla MA).

La preparazione del campione è inoltre effettuata tenendo conto dei settori di traversia del paraggio, con l'obiettivo di svolgere analisi indipendenti per ciascun settore di traversia, oltre all'analisi omnidirezionale.

I massimi annuali estratti dalla serie storica nel punto 45.9203 °N, 8.5536 °E sono riportati in Figura 5-1 (analisi omnidirezionale) e in Figura 5-2 (per i due settori di traversia). Sulla base della distribuzione direzionale dei massimi annuali sono stati inoltre confermati i settori di traversia precedentemente individuati che caratterizzano il paraggio in esame:

- il settore di traversia principale compreso tra 270 °N e 315 °N - **SETTORE A**
- il settore di traversia secondario compreso tra 135 °N e 180 °N - **SETTORE B**

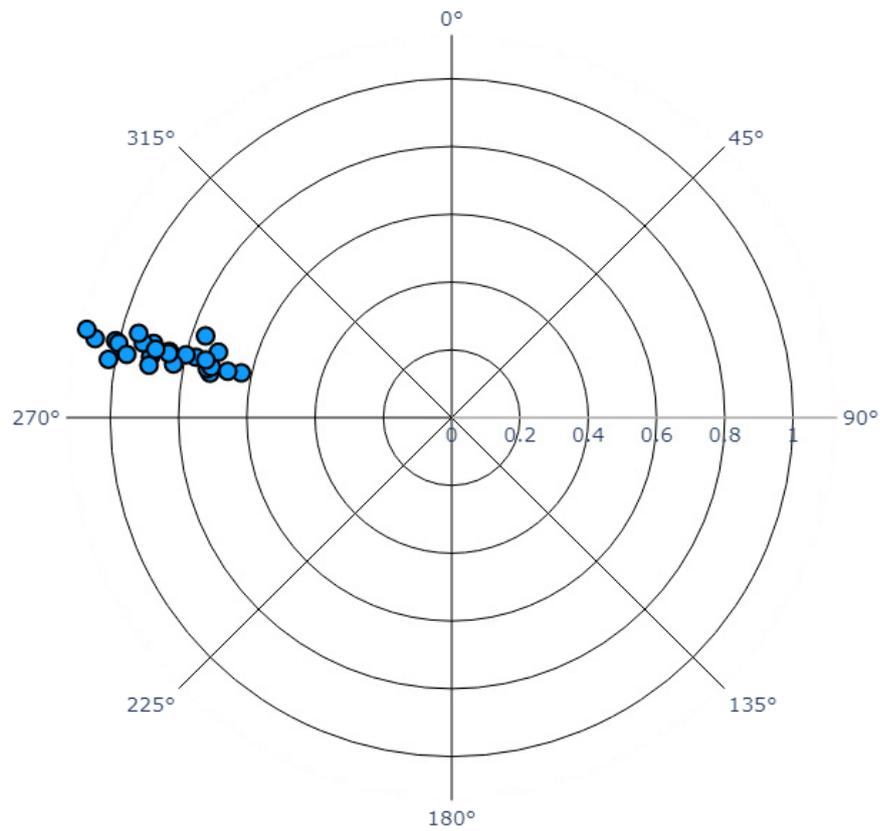


Figura 5-1. Massimi annuali di altezza d'onda significativa al largo di Pallanza nel periodo 1996-2022 - Omnidirezionale.

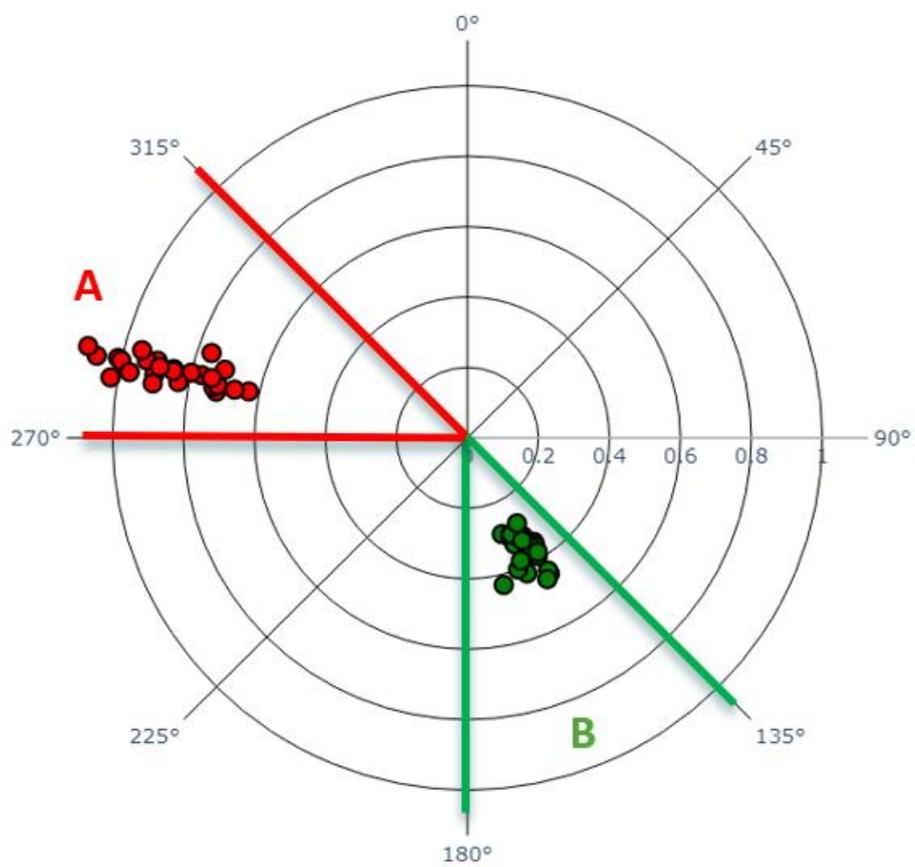


Figura 5-2. Massimi annuali al largo di Pallanza nel periodo 1996-2022 – Settori di traversia principale e secondario.

5.2 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

La scelta del modello probabilistico per ciascun campione estratto (sia per quello relativo alle altezze d'onda estreme che per quello dei venti estremi) è stata effettuata, in maniera automatica, da un programma che adatta al campione di dati le due distribuzioni di probabilità tipiche nell'ambito del metodo dei massimi annuali: la Gumbel e la GEV (Generalized Extreme Values). I parametri delle distribuzioni sono stimati secondo il criterio della massima verosimiglianza (MLE) e la scelta del modello migliore è effettuata in base al criterio d'informazione di Akaike (indicato come AIC)¹.

Oltre al metodo analitico dell'AIC, sono stati impiegati anche metodi di validazione grafica, come ad esempio, il confronto tra le densità di probabilità della distribuzione e le frequenze empiriche relative del campione rappresentate tramite un istogramma.

Per effettuare, invece, un confronto grafico in termini di distribuzioni cumulate, si è introdotta la funzione "plotting-position": al campione ordinato in senso decrescente viene associata ad ogni i -esimo evento una frequenza empirica di non superamento espressa mediante la relazione di Weibull:

$$F_i = 1 - \frac{i}{N}$$

Nelle figure che seguono, ad esempio in Figura 5-3, i valori estremi osservati (punti neri), sono definiti tramite la plotting position e vengono confrontati con le stime teoriche (ottenute dalla distribuzione), come si vede nei grafici Q-Q (confronto tra quantili), P-P (confronto tra proporzioni di distribuzioni). Le grandezze sono anche diagrammate in funzione del tempo di ritorno empirico e ottenuto dal modello probabilistico, tracciando anche le fasce di confidenza, ovvero l'intervallo di valori delimitato da due limiti (inferiore e superiore) che ha una definita probabilità, nota come grado di confidenza, di contenere il vero parametro della popolazione. Nel caso in esame il livello di confidenza è stato fissato al 95%. A titolo di esempio la Tabella 5-2 riporta i limiti dell'intervallo di confidenza relativo a diversi tempi di ritorno.

Nei grafici Q-Q e P-P sono forniti due indici statistici di controllo: il coefficiente di determinazione e il p-value, di seguito descritti. Il coefficiente di determinazione, noto come R^2 , che è un valore statistico che permette di capire se un modello di regressione lineare può essere utilizzato per fare previsioni (più il valore dell' R^2 si avvicina all'unità e più il modello ha un alto potere predittivo). Il p-value, che è un valore statistico che aiuta a capire se la differenza tra il risultato osservato e quello ipotizzato è dovuta alla casualità introdotta dal campione, oppure se tale differenza è statisticamente significativa, cioè difficilmente spiegabile mediante la casualità dovuta al campionamento. In termini pratici, se il p-value risulta minore o uguale del livello di significatività α (nel caso in esame posto uguale a 0,05), l'evidenza empirica è fortemente contraria all'ipotesi nulla che quindi va rifiutata e, in tal caso, si dice che i dati osservati sono statisticamente significativi.

Infine, nota la probabilità di non superamento corrispondente ad un tempo di ritorno assegnato:

¹ Si tratta di un metodo per la valutazione e il confronto tra modelli statistici che fornisce una misura della qualità della stima di un modello statistico tenendo conto sia della bontà di adattamento che della complessità del modello. È basato sul concetto di entropia come misura di informazione, tramite cui valuta la quantità di informazione persa quando un dato modello è usato per descrivere la realtà. La regola è quella di preferire i modelli con l'AIC più basso.

$$P_X(x) = 1 - \frac{1}{T_r}$$

tramite la formula inversa della probabilità di non superamento della distribuzione scelta è possibile stimare le altezze d'onda significative al colmo associate ai diversi tempi di ritorno.

5.3 Statistica delle altezze d'onda significative estreme

I risultati delle analisi statistiche descritte nel paragrafo precedente e svolte sui campioni di valori di H_s al colmo delle mareggiate, rappresentativi dell'esposizione ondosa omnidirezionale e dei due settori di traversia individuati, sono presentati nei grafici e nelle tabelle dei paragrafi che seguono.

5.3.1 Settore omnidirezionale

Per l'analisi omnidirezionale (0-360 °N) il campione estratto ha un valore medio di 0.85 m ed una deviazione standard di 0.13 m. La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata il 27 luglio del 2006 con un valore di altezza significativa al colmo $H_s = 1.10$ m proveniente da ponente (284 °N) e periodo di picco pari a 3.8 s. Il secondo evento più elevato si è verificato il 27 luglio del 2003, con $H_s = 1.07$ m, $T_p = 3.8$ s proveniente sempre da ponente (283 °N).

5.3.2 Settore A (270-315 °N)

Per il settore A (270-315 °N) il campione estratto ha un valore medio di 0.85 m ed una deviazione standard di 0.13 m. La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata il 27 luglio del 2006 con un valore di altezza significativa al colmo $H_s = 1.10$ m proveniente da ponente (284 °N) e periodo di picco pari a 3.8 s. Il secondo evento più elevato si è verificato il 27 luglio del 2003, con $H_s = 1.07$ m, $T_p = 3.8$ s proveniente sempre da ponente (283 °N).

5.3.3 Settore B (135-180 °N)

Per il settore B (135-180 °N) il campione estratto ha un valore medio di 0.36 m ed una deviazione standard di 0.05 m. La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata il 18 aprile del 2015 con un valore di altezza significativa al colmo $H_s = 0.46$ m proveniente da scirocco (151 °N) e periodo di picco pari a 2.7 s. Il secondo evento più elevato si è verificato il 13 dicembre del 2001, con $H_s = 0.45$ m, $T_p = 2.6$ s proveniente sempre da scirocco (149 °N).

OMNIDIREZIONALE: 0°N - 360°N

Tabella 5-1. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti al largo di Pallanza tra il 1996 e il 2022.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Nov-1996	Sep-2022	MA	26	MLE	gumbel_r	loc = 0.790 scale = 0.111	-28.64

i	Data	H _s [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2006-07-27 20:00:00	1.10	284	3.8	16.3	289
2	2003-07-27 18:00:00	1.07	283	3.8	16.0	287
3	2007-05-15 03:00:00	1.02	280	3.7	15.5	276
4	2016-05-23 08:00:00	1.01	283	3.7	15.4	288
5	2019-04-26 11:00:00	1.00	283	3.7	15.3	290
6	2022-04-01 16:00:00	0.97	281	3.6	14.8	288
7	2021-07-08 16:00:00	0.95	285	3.6	15.0	294
8	2011-07-13 17:00:00	0.93	284	3.5	14.5	289
9	2001-08-17 14:00:00	0.90	282	3.5	14.1	285
10	2005-01-21 14:00:00	0.90	284	3.5	14.2	290
11	2009-07-24 18:00:00	0.90	280	3.5	14.2	279
12	2020-02-26 13:00:00	0.89	283	3.5	14.1	279
13	2015-05-20 15:00:00	0.85	283	3.4	13.7	292
14	2018-08-20 22:00:00	0.85	283	3.4	13.6	287
15	2008-08-15 13:00:00	0.83	281	3.4	13.3	281
16	2003-12-22 17:00:00	0.80	283	3.3	13.0	290
17	1999-06-04 02:00:00	0.77	283	3.3	12.7	288
18	2014-05-11 17:00:00	0.76	288	3.2	13.7	308
19	2017-07-22 21:00:00	0.74	283	3.2	12.4	291
20	2002-05-23 19:00:00	0.73	283	3.2	12.3	290
21	2000-07-11 15:00:00	0.73	281	3.2	12.2	282
22	1997-05-16 14:00:00	0.72	280	3.2	12.1	279
23	2009-12-01 00:00:00	0.72	282	3.2	12.1	285
24	2012-05-16 05:00:00	0.71	286	3.1	12.3	291
25	2013-06-19 09:00:00	0.67	282	3.1	11.4	288
26	1998-08-02 21:00:00	0.63	282	3.0	11.0	288

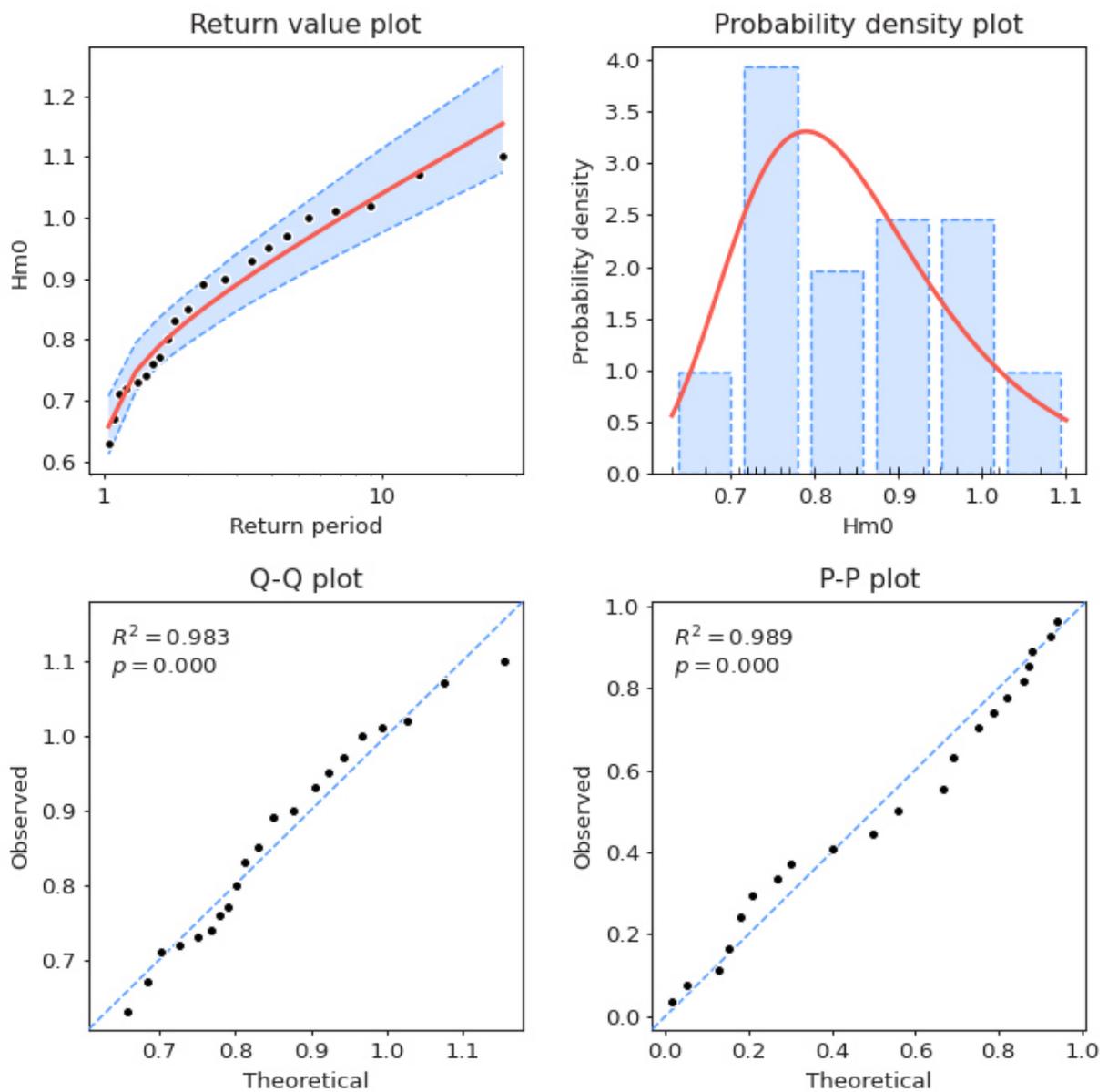


Figura 5-3. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione R2 e del p-value.

Tabella 5-2. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) – Altezze d’onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.

SETTORE: 0 – 360 °N			
Tempo di ritorno [anni]	Hs [m]	Limite inferiore [m]	Limite superiore [m]
1	0.62	0.57	0.67
5	0.96	0.90	1.02
10	1.04	0.98	1.11
20	1.12	1.05	1.21
30	1.17	1.08	1.26
40	1.20	1.11	1.30
50	1.22	1.13	1.33
100	1.30	1.20	1.42
150	1.35	1.24	1.48
200	1.38	1.26	1.51
250	1.40	1.28	1.54
300	1.42	1.30	1.57
400	1.46	1.33	1.61
500	1.48	1.35	1.64

SETTORE A: 270°N – 315°N

Tabella 5-3. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti al largo di Pallanza tra il 1996 e il 2022

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Nov-1996	Sep-2022	AM	26	MLE	gumbel_r	loc = 0.790 scale = 0.111	-28.64

i	Data	H _s [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2006-07-27 20:00:00	1.1	284	3.8	16.3	289
2	2003-07-27 18:00:00	1.07	283	3.8	16.0	287
3	2007-05-15 03:00:00	1.02	280	3.7	15.5	276
4	2016-05-23 08:00:00	1.01	283	3.7	15.4	288
5	2019-04-26 11:00:00	1.0	283	3.7	15.3	290
6	2022-04-01 16:00:00	0.97	281	3.6	14.8	288
7	2021-07-08 16:00:00	0.95	285	3.6	15.0	294
8	2011-07-13 17:00:00	0.93	284	3.5	14.5	289
9	2005-01-21 14:00:00	0.9	284	3.5	14.2	290
10	2001-08-17 14:00:00	0.9	282	3.5	14.1	285
11	2009-07-24 18:00:00	0.9	280	3.5	14.2	279
12	2020-02-26 13:00:00	0.89	283	3.5	14.1	279
13	2018-08-20 22:00:00	0.85	283	3.4	13.61	287
14	2015-05-20 15:00:00	0.85	283	3.4	13.7	292
15	2008-08-15 13:00:00	0.83	281	3.4	13.3	281
16	2003-12-22 17:00:00	0.8	283	3.3	13.01	290
17	1999-06-04 02:00:00	0.77	283	3.3	12.7	288
18	2014-05-11 17:00:00	0.76	288	3.2	13.7	308
19	2017-07-22 21:00:00	0.74	283	3.2	12.4	291
20	2002-05-23 19:00:00	0.73	283	3.2	12.3	290
21	2000-07-11 15:00:00	0.73	281	3.2	12.2	282
22	1997-05-16 14:00:00	0.72	280	3.2	12.1	279
23	2009-12-01 00:00:00	0.72	282	3.2	12.1	285
24	2012-05-16 05:00:00	0.71	286	3.1	12.3	291
25	2013-06-19 09:00:00	0.67	282	3.1	11.4	288
26	1998-08-02 21:00:00	0.63	282	3.0	11.0	288

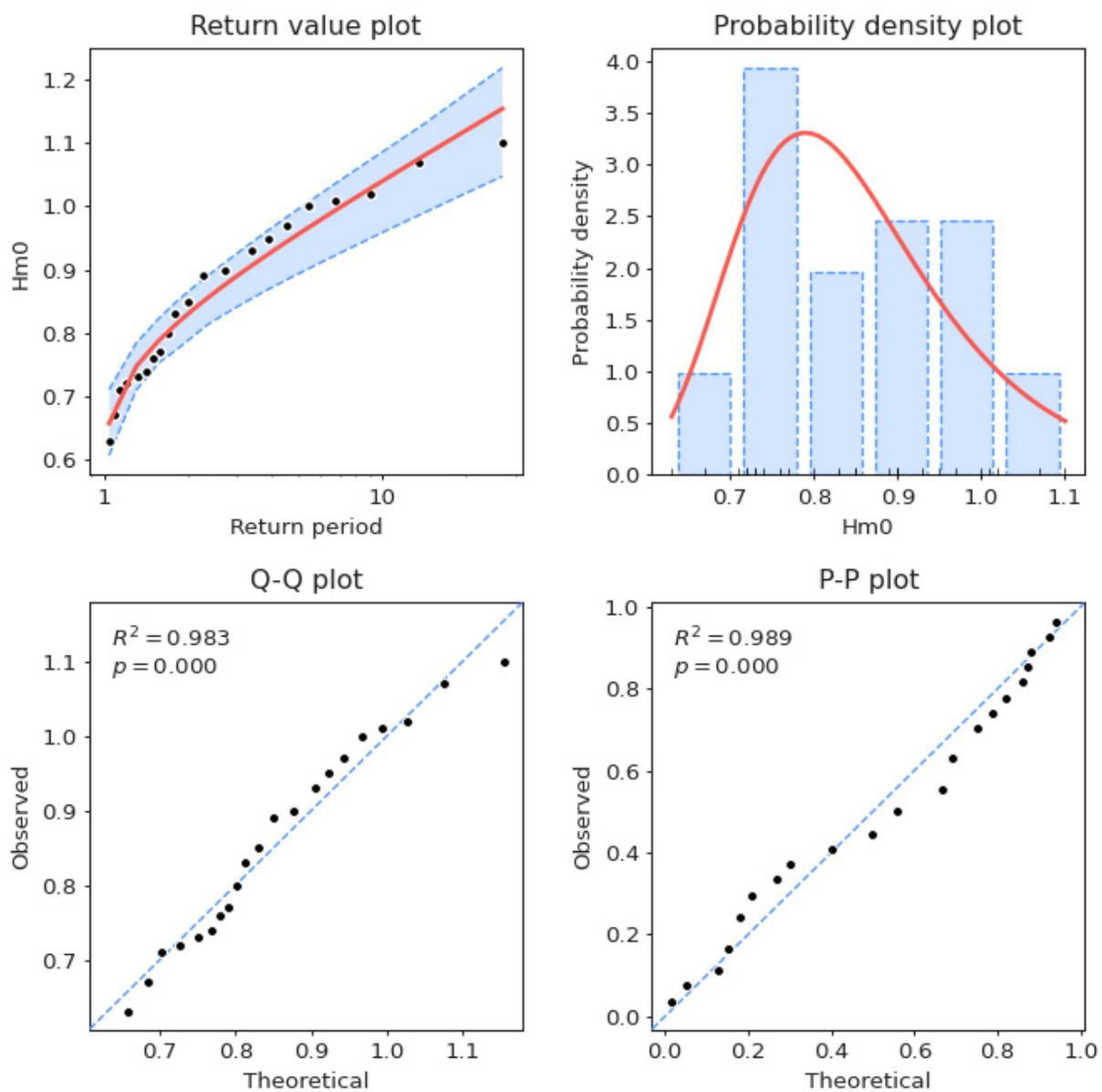


Figura 5-4. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione R^2 e del p-value.

Tabella 5-4. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) – Altezze d’onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.

SETTORE: 270 – 315 °N			
Tempo di ritorno [anni]	Hs [m]	Limite inferiore [m]	Limite superiore [m]
1	0.62	0.56	0.68
5	0.96	0.89	1.00
10	1.04	0.96	1.09
20	1.12	1.02	1.18
30	1.17	1.06	1.23
40	1.20	1.08	1.27
50	1.22	1.10	1.30
100	1.30	1.16	1.40
150	1.35	1.20	1.45
200	1.38	1.22	1.49
250	1.40	1.24	1.52
300	1.42	1.26	1.55
400	1.46	1.28	1.58
500	1.48	1.30	1.61

SETTORE B: 135°N – 180 °N

Tabella 5-5. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti al largo di Pallanza tra il 1996 e il 2022

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Nov-1996	Sep-2022	BM	26	MLE	gumbel_r	loc = 0.335 scale = 0.042	-78.62

i	Data	H _s [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2015-04-18 19:00:00	0.46	151	2.7	7.5	165
2	2001-12-13 20:00:00	0.45	149	2.6	8.0	130
3	2013-05-27 20:00:00	0.44	149	2.6	7.9	126
4	2001-03-26 14:00:00	0.43	166	2.5	9.3	213
5	2016-09-06 20:00:00	0.42	156	2.5	7.6	172
6	2018-07-16 15:00:00	0.4	159	2.4	8.2	192
7	2004-04-12 12:00:00	0.39	150	2.4	7.1	134
8	2020-04-14 19:00:00	0.38	157	2.4	7.2	173
9	1999-09-20 13:00:00	0.38	149	2.4	7.01	111
10	2012-04-01 12:00:00	0.38	149	2.4	7.3	128
11	2006-04-06 16:00:00	0.36	150	2.3	7.0	129
12	2008-05-20 18:00:00	0.36	148	2.3	7.3	125
13	2009-06-20 17:00:00	0.36	150	2.3	6.8	130
14	2007-03-19 14:00:00	0.35	151	2.3	6.8	128
15	2000-04-06 17:00:00	0.35	148	2.3	7.3	131
16	2003-04-06 18:00:00	0.34	152	2.3	6.3	173
17	2011-05-08 23:00:00	0.33	156	2.2	6.1	180
18	2022-04-03 14:00:00	0.33	152	2.2	6.5	130
19	2017-04-05 16:00:00	0.32	152	2.2	5.7	135
20	2005-04-18 15:00:00	0.32	151	2.2	5.89	137
21	2010-04-11 01:00:00	0.31	156	2.2	6.5	169
22	1998-05-16 02:00:00	0.31	157	2.2	6.0	180
23	2014-06-14 20:00:00	0.3	156	2.1	5.9	168
24	2019-09-18 22:00:00	0.3	156	2.2	5.9	176
25	1997-05-06 14:00:00	0.29	160	2.1	6.9	192
26	2021-04-02 14:00:00	0.28	150	2.1	5.9	134

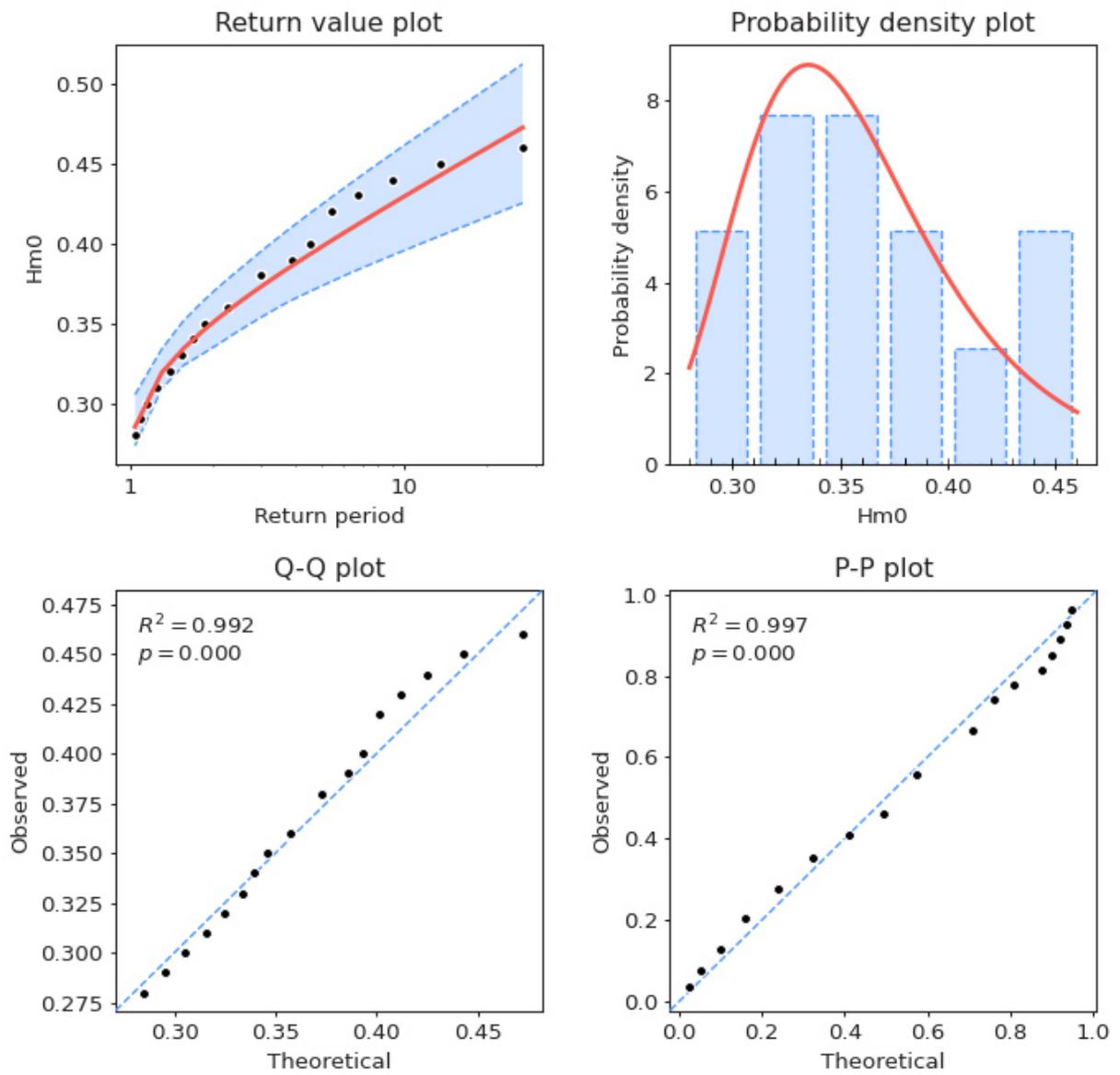


Figura 5-5. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione R2 e del p-value.

Tabella 5-6. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) – Altezze d’onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.

SETTORE: 135 – 180 °N			
Tempo di ritorno [anni]	Hs [m]	Limite inferiore [m]	Limite superiore [m]
1	0.27	0.26	0.29
5	0.40	0.37	0.42
10	0.43	0.40	0.46
20	0.46	0.42	0.50
30	0.48	0.43	0.52
40	0.49	0.44	0.53
50	0.50	0.44	0.54
100	0.53	0.46	0.58
150	0.55	0.48	0.60
200	0.56	0.48	0.61
250	0.57	0.49	0.62
300	0.57	0.50	0.63
400	0.59	0.50	0.65
500	0.60	0.51	0.66

5.4 Conclusioni

I risultati ottenuti a seguito dell'analisi dei valori estremi hanno consentito di determinare i valori di altezza d'onda significativa H_s e periodo di picco T_p (calcolati con le formule di correlazione altezze-periodi ricavate nel paragrafo 4.4) associati a prefissati tempi di ritorno per l'esposizione ondata omnidirezionale e per i due distinti settori di traversia che caratterizzano il paraggio in esame.

Qualora si intenda determinare il valore del periodo medio T_m delle onde si può far riferimento alla seguente relazione:

$$T_p = 1.15 T_m$$

Tabella 5-7. Eventi estremi di moto ondoso al largo di Pallanza nel punto di coordinate 45.9203 °N, 8.5536 °E

Tempo di ritorno	0 - 360 °N		SETTORE A 270 – 315 °N		SETTORE B 135 – 180 °N	
	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp
[anni]	[m]	[s]	[m]	[s]	[m]	[s]
1	0.62	3.1	0.62	3.0	0.27	2.0
5	0.96	3.7	0.96	3.5	0.40	2.4
10	1.04	3.8	1.04	3.6	0.43	2.5
20	1.12	4.0	1.12	3.7	0.46	2.5
30	1.17	4.0	1.17	3.8	0.48	2.6
40	1.20	4.1	1.20	3.8	0.49	2.6
50	1.22	4.1	1.22	3.8	0.50	2.6
100	1.30	4.2	1.30	3.9	0.53	2.7
150	1.35	4.3	1.35	4.0	0.55	2.7
200	1.38	4.3	1.38	4.0	0.56	2.7
250	1.40	4.3	1.40	4.0	0.57	2.8
300	1.42	4.4	1.42	4.1	0.57	2.8
400	1.46	4.4	1.46	4.1	0.59	2.8
500	1.48	4.5	1.48	4.1	0.60	2.8

Si noti come il settore omnidirezionale e il settore A condividono gli stessi valori di altezza d'onda dovuti al fatto che gli estremi annuali provengono tutti dal settore ponente-maestrale. I periodi di picco delle onde sono, invece, diversi in quanto i set di dati sui quali sono state tarate le leggi di correlazione H-T hanno numerosità campionaria diversa.

Capitolo 6 Statistica degli eventi estremi di vento al largo

6.1 Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali)

I massimi annuali estratti dalla serie storica nel punto 45.9203 °N, 8.5536 °E sono riportati in Figura 6-1 (analisi omnidirezionale) e in Figura 6-2 (per i due settori di traversia). Sulla base della distribuzione direzionale dei massimi annuali sono stati inoltre confermati i settori di traversia precedentemente individuati che caratterizzano il paraggio in esame:

- il settore di traversia principale compreso tra 270 °N e 315 °N - **SETTORE A**
- il settore di traversia secondario compreso tra 135 °N e 180 °N - **SETTORE B**

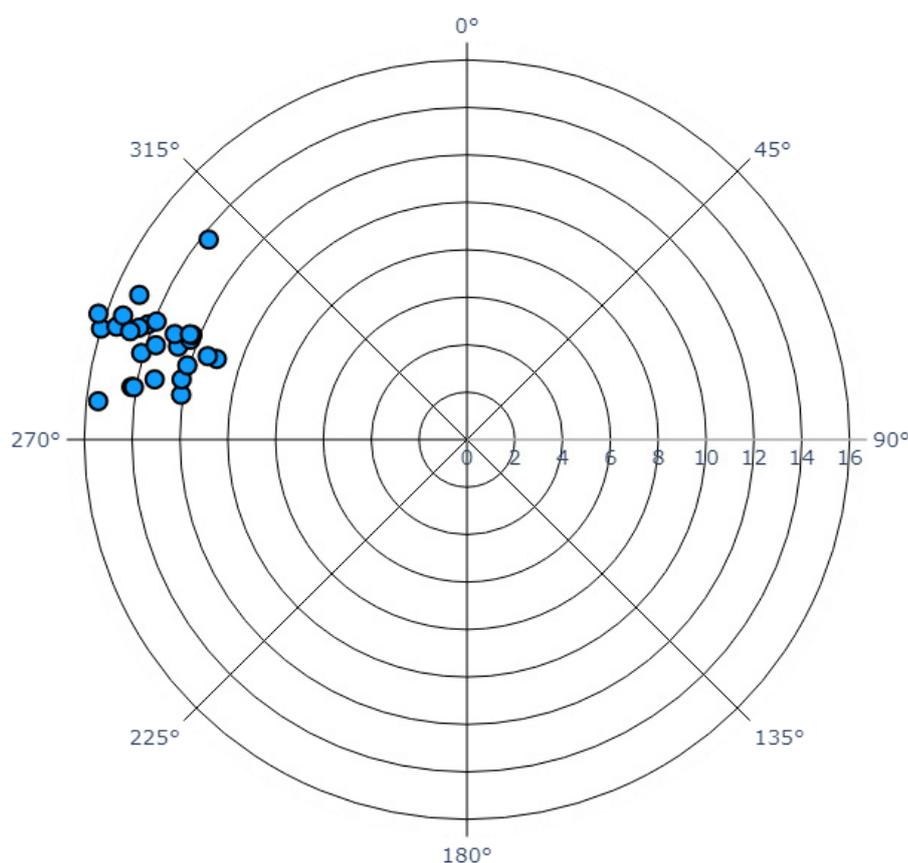


Figura 6-1. Massimi annuali di velocità del vento al largo di Pallanza nel periodo 1996-2022 - Omnidirezionale.

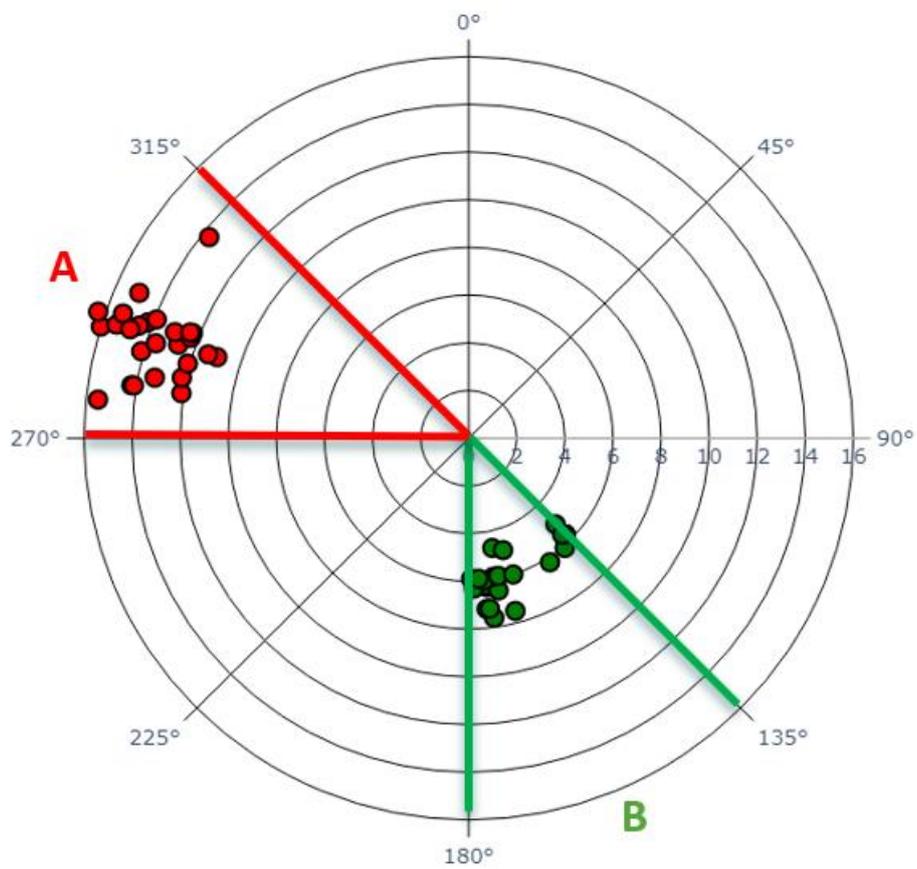


Figura 6-2. Massimi annuali al largo di Pallanza nel periodo 1996-2022 – Settori di traversia principale e secondario.

6.2 Statistica delle velocità di vento estreme

I risultati delle analisi statistiche descritte nel paragrafo precedente e svolte sui campioni di valori di velocità del vento massime annuali, rappresentativi dell'esposizione ondosa omnidirezionale e dei due settori di traversia individuati, sono presentati nei grafici e nelle tabelle dei paragrafi che seguono. Per tutti i settori sono stati individuati complessivamente N=26 eventi di mareggiata, applicando il metodo dei massimi annuali.

6.2.1 Settore omnidirezionale

Per l'analisi omnidirezionale (0-360 °N) il campione estratto ha un valore medio di 13.7 m/s ed una deviazione standard di 1.5 m/s. Il vento più intenso appartenente alla serie storica si è verificato il 27 luglio del 2006 con un valore di velocità del vento di 16.3 m/s proveniente da ponente (289 °N). Il secondo evento più elevato si è verificato il 27 luglio del 2003, con velocità del vento di 16.0 m/s, proveniente sempre da ponente (287 °N).

6.2.2 Settore A (270-315 °N)

Per il settore A (270-315 °N) il campione estratto ha un valore medio di 13.7 m/s ed una deviazione standard di 1.5 m/s. Il vento più intenso appartenente alla serie storica si è verificato il 27 luglio del 2006 con un valore di velocità del vento di 16.3 m/s proveniente da ponente (289 °N). Il secondo evento più elevato si è verificato il 27 luglio del 2003, con velocità del vento di 16.0 m/s, proveniente sempre da ponente (287 °N).

6.2.3 Settore B (135-180 °N)

Per il settore B (135-180 °N) il campione estratto ha un valore medio di 6.3 m/s ed una deviazione standard di 1.2 m/s. Il vento più intenso appartenente alla serie storica si è verificato il 6 settembre del 2016 con un valore di velocità del vento di 7.6 m/s proveniente da mezzogiorno (172 °N). Il secondo evento più elevato si è verificato il 18 aprile del 2015, con velocità del vento di 7.5 m/s, proveniente sempre da mezzogiorno (165 °N).

OMNIDIREZIONALE: 0°N - 360°N

Tabella 6-1. Analisi degli eventi estremi di velocità del vento al largo di Pallanza tra il 1996 e il 2022.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Nov-1996	Sep-2022	BM	26	MLE	gumbel_r	loc = 12.964 scale = 1.307	98.54

i	Data	H _s [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2006-07-27 20:00:00	1.1	284	3.8	16.3	289
2	2003-07-27 18:00:00	1.07	283	3.8	16.0	287
3	2007-05-15 03:00:00	1.02	280	3.7	15.5	276
4	2016-05-23 08:00:00	1.01	283	3.7	15.4	288
5	2019-04-26 11:00:00	1.0	283	3.7	15.3	290
6	2021-07-08 16:00:00	0.95	285	3.6	15.0	294
7	2022-04-01 16:00:00	0.97	281	3.6	14.8	288
8	2011-07-13 17:00:00	0.93	284	3.5	14.5	289
9	2009-07-24 18:00:00	0.9	280	3.5	14.2	279
10	2005-01-21 14:00:00	0.9	284	3.5	14.2	290
11	2020-02-26 13:00:00	0.89	283	3.5	14.1	279
12	2001-08-17 14:00:00	0.9	282	3.5	14.1	285
13	2015-05-21 06:00:00	0.84	286	3.4	13.9	291
14	2014-05-11 17:00:00	0.76	288	3.2	13.7	308
15	2018-08-20 22:00:00	0.85	283	3.4	13.61	287
16	2008-08-15 13:00:00	0.83	281	3.4	13.3	281
17	2003-12-22 17:00:00	0.8	283	3.3	13.01	290
18	1999-06-04 02:00:00	0.77	283	3.3	12.7	288
19	2017-07-22 21:00:00	0.74	283	3.2	12.4	291
20	2002-05-23 19:00:00	0.73	283	3.2	12.3	290
21	2012-05-16 05:00:00	0.71	286	3.1	12.3	291
22	2000-07-11 15:00:00	0.73	281	3.2	12.2	282
23	2009-12-01 00:00:00	0.72	282	3.2	12.1	285
24	1997-05-16 14:00:00	0.72	280	3.2	12.1	279
25	2013-06-19 09:00:00	0.67	282	3.1	11.4	288
26	1998-08-02 21:00:00	0.63	282	3.0	11.0	288

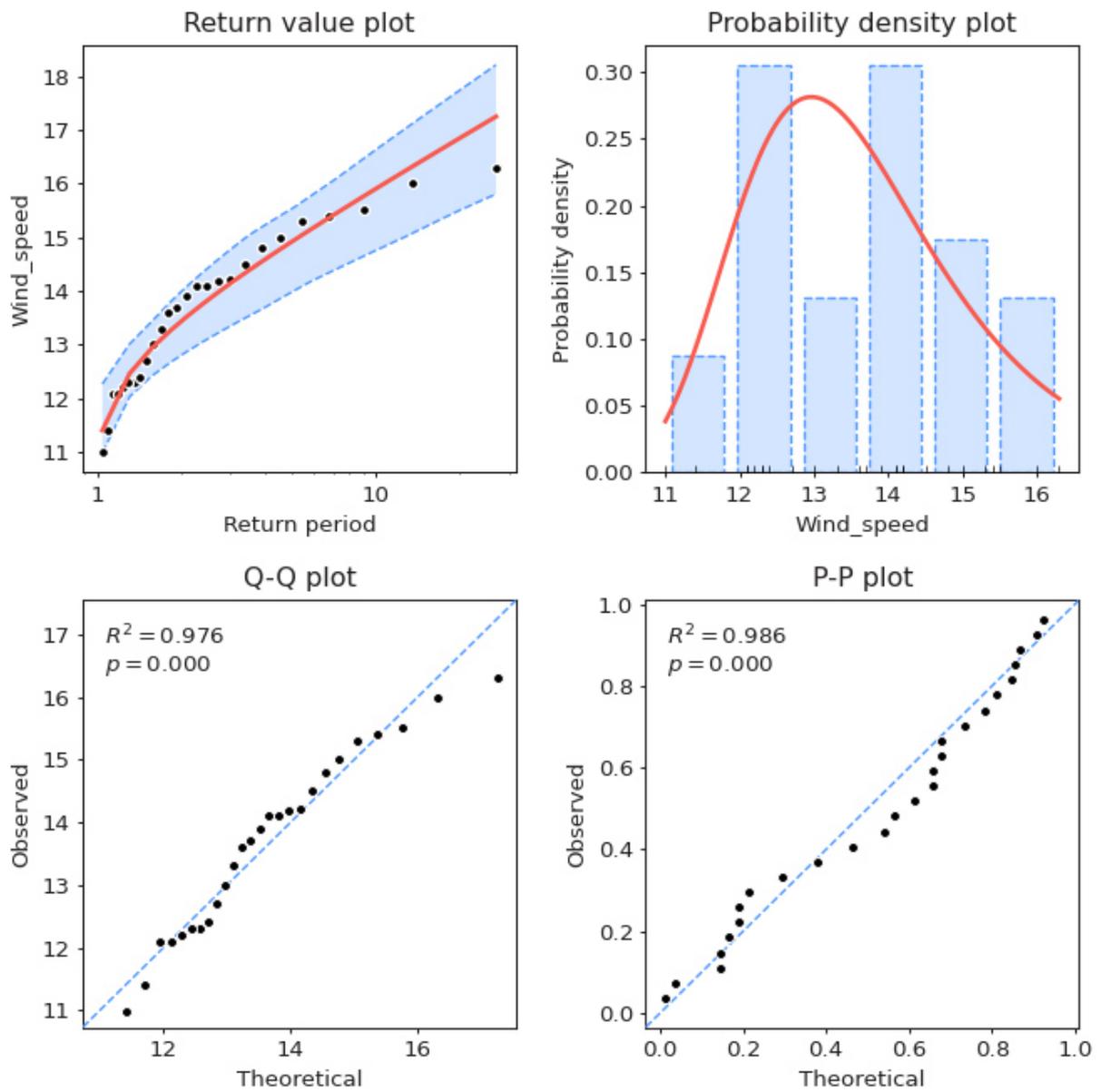


Figura 6-3. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione R2 e del p-value.

Tabella 6-2. Analisi dei venti estremi (MA) – Velocità del vento in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.

SETTORE: 0 – 360 °N			
Tempo di ritorno [anni]	Velocità del vento [m/s]	Limite inferiore [m/s]	Limite superiore [m/s]
1	11.0	10.5	12.0
5	14.9	14.0	15.5
10	15.9	14.8	16.6
20	16.9	15.5	17.7
30	17.4	15.9	18.4
40	17.8	16.2	18.8
50	18.1	16.4	19.1
100	19.0	17.1	20.2
150	19.5	17.4	20.8
200	19.9	17.7	21.2
250	20.2	17.9	21.5
300	20.4	18.1	21.8
400	20.8	18.3	22.2
500	21.1	18.5	22.6

SETTORE A: 270°N – 315°N

Tabella 6-3. Analisi dei venti estremi al largo di Pallanza tra il 1996 e il 2022

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Nov-1996	Sep-2022	BM	26	MLE	gumbel_r	loc = 12.964 scale = 1.307	98.54

i	Data	H _s [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2006-07-27 20:00:00	1.1	284	3.8	16.3	289
2	2003-07-27 18:00:00	1.07	283	3.8	16.0	287
3	2007-05-15 03:00:00	1.02	280	3.7	15.5	276
4	2016-05-23 08:00:00	1.01	283	3.7	15.4	288
5	2019-04-26 11:00:00	1.0	283	3.7	15.3	290
6	2021-07-08 16:00:00	0.95	285	3.6	15.0	294
7	2022-04-01 16:00:00	0.97	281	3.6	14.8	288
8	2011-07-13 17:00:00	0.93	284	3.5	14.5	289
9	2009-07-24 18:00:00	0.9	280	3.5	14.2	279
10	2005-01-21 14:00:00	0.9	284	3.5	14.2	290
11	2020-02-26 13:00:00	0.89	283	3.5	14.1	279
12	2001-08-17 14:00:00	0.9	282	3.5	14.1	285
13	2015-05-21 06:00:00	0.84	286	3.4	13.9	291
14	2014-05-11 17:00:00	0.76	288	3.2	13.7	308
15	2018-08-20 22:00:00	0.85	283	3.4	13.61	287
16	2008-08-15 13:00:00	0.83	281	3.4	13.3	281
17	2003-12-22 17:00:00	0.8	283	3.3	13.01	290
18	1999-06-04 02:00:00	0.77	283	3.3	12.7	288
19	2017-07-22 21:00:00	0.74	283	3.2	12.4	291
20	2002-05-23 19:00:00	0.73	283	3.2	12.3	290
21	2012-05-16 05:00:00	0.71	286	3.1	12.3	291
22	2000-07-11 15:00:00	0.73	281	3.2	12.2	282
23	2009-12-01 00:00:00	0.72	282	3.2	12.1	285
24	1997-05-16 14:00:00	0.72	280	3.2	12.1	279
25	2013-06-19 09:00:00	0.67	282	3.1	11.4	288
26	1998-08-02 21:00:00	0.63	282	3.0	11.0	288

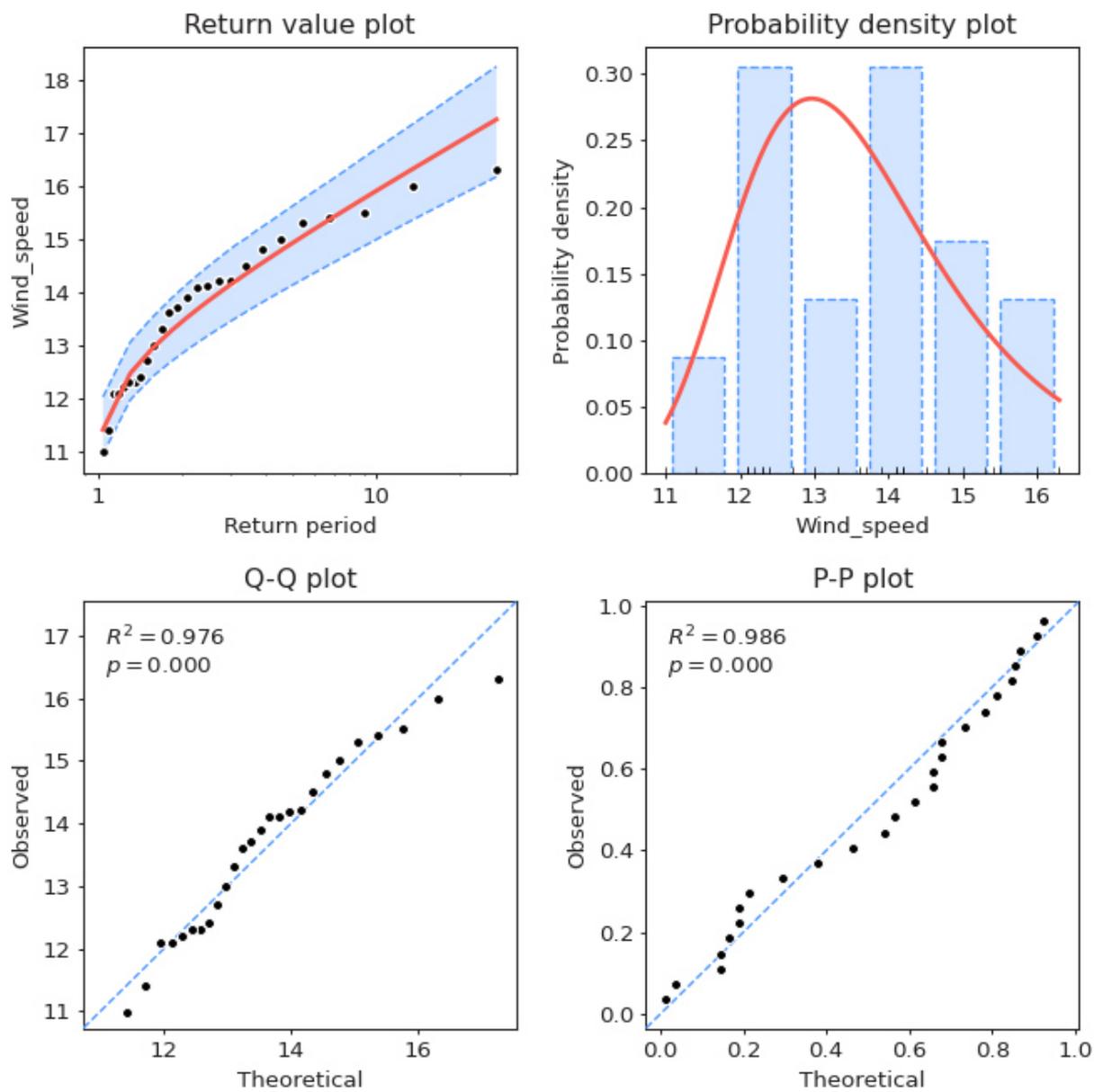


Figura 6-4. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione R2 e del p-value.

Tabella 6-4. Analisi dei venti estremi (MA) – Velocità del vento in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.

SETTORE: 270 – 315 °N			
Tempo di ritorno	Velocità del vento	Limite inferiore	Limite superiore
[anni]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
1	11.0	10.5	11.7
5	14.9	14.1	15.6
10	15.9	15.0	16.7
20	16.9	15.8	17.8
30	17.4	16.3	18.4
40	17.8	16.6	18.9
50	18.1	16.9	19.2
100	19.0	17.7	20.3
150	19.5	18.1	20.9
200	19.9	18.4	21.4
250	20.2	18.6	21.8
300	20.4	18.8	22.1
400	20.8	19.1	22.5
500	21.1	19.4	22.9

SETTORE B: 135°N – 180 °N

Tabella 6-5. Analisi dei venti estremi al largo di Pallanza tra il 1996 e il 2022

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Nov-1996	Sep-2022	BM	25	MLE	gumbel_r	loc = 5.871 scale = 0.912	85.35

i	Data	H _s [m]	Dir [°N]	Tp [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2016-09-06 20:00:00	0.42	156	2.5	7.6	172
2	2015-04-18 19:00:00	0.46	151	2.7	7.5	165
3	2020-04-14 19:00:00	0.38	157	2.4	7.2	173
4	2001-12-13 21:00:00	0.44	153	2.6	7.2	174
5	2010-04-11 01:00:00	0.31	156	2.2	6.5	169
6	2012-09-27 00:00:00	0.31	158	2.2	6.3	178
7	2003-04-06 18:00:00	0.34	152	2.3	6.3	173
8	2009-02-18 06:00:00	0.29	157	2.1	6.2	174
9	1998-07-14 17:00:00	0.29	152	2.1	6.2	147
10	2007-03-18 19:00:00	0.28	150	2.1	6.1	139
11	2008-06-13 19:00:00	0.28	156	2.1	6.09	171
12	2013-10-07 16:00:00	0.3	153	2.1	6.0	174
13	2018-06-27 21:00:00	0.3	151	2.2	6.0	162
14	2019-09-18 22:00:00	0.3	156	2.2	5.9	176
15	2001-08-04 18:00:00	0.26	158	2.0	5.9	179
16	2014-06-14 20:00:00	0.3	156	2.1	5.9	168
17	2011-08-27 03:00:00	0.26	156	2.0	5.9	170
18	2005-04-18 15:00:00	0.32	151	2.2	5.89	137
19	2004-04-26 18:00:00	0.33	152	2.3	5.8	136
20	2000-01-24 18:00:00	0.29	149	2.1	5.7	135
21	2017-04-05 16:00:00	0.32	152	2.2	5.7	135
22	2021-03-18 15:00:00	0.24	150	1.9	5.6	136
23	2006-02-27 18:00:00	0.23	152	1.9	5.11	135
24	1999-09-20 11:00:00	0.19	155	1.7	4.9	163
25	1997-05-28 22:00:00	0.23	153	1.9	4.7	168

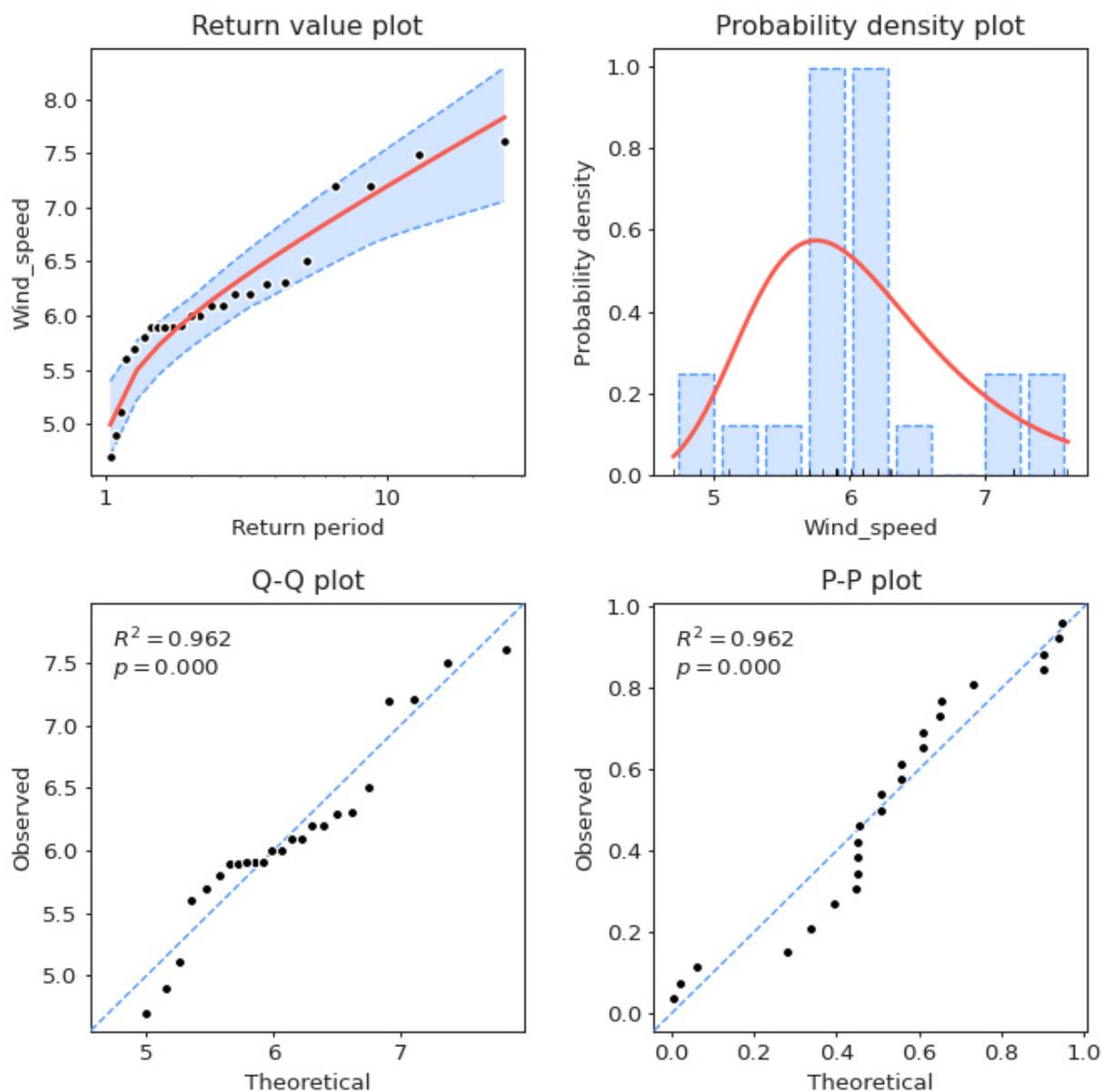


Figura 6-5. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione R^2 e del p-value.

Tabella 6-6. Analisi dei venti estremi (MA) – Velocità del vento in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.

SETTORE: 135 – 180 °N			
Tempo di ritorno [anni]	Velocità del vento [m/s]	Limite inferiore [m/s]	Limite superiore [m/s]
1	4.8	4.5	5.3
5	6.7	6.3	7.0
10	7.2	6.7	7.5
20	7.7	7.0	8.1
30	7.9	7.1	8.4
40	8.1	7.2	8.6
50	8.3	7.3	8.8
100	8.7	7.5	9.3
150	9.0	7.6	9.6
200	9.2	7.7	9.9
250	9.3	7.8	10.0
300	9.4	7.9	10.2
400	9.6	8.0	10.4
500	9.7	8.0	10.6

6.3 Conclusioni

I risultati ottenuti a seguito dell'analisi dei valori estremi di vento hanno consentito di determinare i valori di velocità del vento associati a prefissati tempi di ritorno per l'esposizione ondosia omnidirezionale e per i due distinti settori di traversia che caratterizzano il paraggio in esame.

Tabella 6-7. Eventi estremi di velocità del vento al largo di Pallanza nel punto di coordinate 45.9203 °N, 8.5536 °E

Tempo di ritorno	0 - 360 °N	SETTORE A 270 – 315 °N	SETTORE B 135 – 180 °N
Tr	Velocità vento	Velocità vento	Velocità vento
<i>[anni]</i>	<i>[m/s]</i>	<i>[m/s]</i>	<i>[m/s]</i>
1	11.0	11.0	4.8
5	14.9	14.9	6.7
10	15.9	15.9	7.2
20	16.9	16.9	7.7
30	17.4	17.4	7.9
40	17.8	17.8	8.1
50	18.1	18.1	8.3
100	19.0	19.0	8.7
150	19.5	19.5	9.0
200	19.9	19.9	9.2
250	20.2	20.2	9.3
300	20.4	20.4	9.4
400	20.8	20.8	9.6
500	21.1	21.1	9.7

Si noti come il settore omnidirezionale e il settore A condividono gli stessi valori di velocità del vento dovuti al fatto che gli estremi annuali provengono tutti dal settore ponente-maestrale.

APPENDICI

I) Descrizione del modello di ricostruzione di moto ondoso ALTAIR

Il modello Altair ricostruisce gli stati di moto ondoso conseguenti all'azione diretta del vento sulla superficie marina.

Per il calcolo degli stati di mare generati dall'azione diretta del vento sulla superficie marina si fa riferimento alle relazioni, derivate dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991). È necessario definire preliminarmente l'estensione e la conformazione dell'area di generazione nonché la profondità dei fondali di detta porzione di mare. Per quanto riguarda l'estensione e la conformazione si deve fare riferimento alla seguente classificazione:

- Restricted Fetches (SCELTA SELEZIONATA) per traversie geografiche delimitate dalla presenza della costa o comunque contraddistinte da distanze inferiori a quelle proprie dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche² responsabili del processo di generazione del moto ondoso;
- Open-Water Fetches per traversie geografiche non limitate da emergenze orografiche e comunque con estensioni superiori a quelle delle perturbazioni atmosferiche.

Per quanto riguarda la profondità dei fondali si deve fare la seguente distinzione:

- Shallow-Water per generazione del moto ondoso in acque basse ove cioè i fenomeni dissipativi per attrito e/o percolazione sul fondale non sono trascurabili (Bretchneider e Reid, 1954);
- Deep-Water (SCELTA SELEZIONATA) per generazione del moto ondoso in aree contraddistinte da profondità superiori a 90 m (300 ft, SPM 1984).

Le equazioni impiegate, nella forma più generale, sono le seguenti:

$$t_{fetch,min} = \frac{F^{1-C}}{g^C \cdot U_a^{(1-2 \cdot C)}} \quad (1)$$

$$H_{m0} = \frac{U_a^2}{g} \cdot 0.283 \cdot \tanh \left[0.530 \left(\frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{\frac{A}{0.283} \left(\frac{gF}{U_a^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0.530 \left(\frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.75} \right]} \right\} \quad (2)$$

² Per il Mediterraneo si è soliti considerare comunque un limite superiore dell'estensione delle perturbazioni atmosferiche pari a 500 km

$$T_p = \frac{U_a}{g} \cdot 7.540 \cdot \tanh \left[0.833 \left(\frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{\frac{B}{7.54} \left(\frac{gF}{U_a^2} \right)^C}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{gd}{U_a^2} \right)^{0.375} \right]} \right\} \quad (3)$$

ove:

- d profondità (m) del fondale (assunto costante) relativo all'area di generazione;
- U_a velocità (m/s) del vento "regolarizzata" (adjusted) in funzione delle caratteristiche della stazione di registrazione (quota e posizione geografica) e di un termine (coefficient drag) dovuto alla non linearità del legame esistente tra la velocità del vento e l'azione tangenziale di questo sulla superficie marina;
- F estensione della superficie marina lungo la quale si esplica l'azione del vento (fetch);
- g accelerazione di gravità pari a 9.81 m/s^2 ;
- A costante pari a 0.0016 in condizioni di Open-Water e 0.0015 per Restricted Fetch
- B costante pari a 0.2857 in condizioni di Open-Water e 0.3704 per Restricted Fetch
- C costante pari a 0.3333 in condizioni di Open-Water e 0.28 per Restricted Fetch
- D costante pari a 68.80 in condizioni di Open-Water e 51.09 per Restricted Fetch

Per la definizione del termine U_a si fa riferimento alla relazione (SPM, 1984):

$$U_a = 0.71 \cdot U_{10}^{1.23} \quad (4)$$

ove U_{10} esprime la velocità del vento relativa alla quota standard di misura pari a 10 m s.l.m.m.

Il valore della velocità del vento misurato dallo strumento posto alla generica quota z U_z deve essere quindi preliminarmente riferito alla quota standard di riferimento pari a 10 m s.l.m.m.; a tal riguardo si definisce un coefficiente correttivo tramite la relazione:

$$\frac{U_{10}}{U_z} = \frac{1}{\left[1 + 0.1 \ln \left(\frac{z}{10} \right) \right]} \quad (5)$$

Il termine F rappresenta il fetch efficace che viene calcolato preliminarmente, in funzione della conformazione geografica dell'area di generazione, tramite relazioni come quelle classiche di Saville o Seymour.

Nota una sequenza temporale di stati di vento, il programma è in grado di calcolare gli stati di mare generati operando una prima selezione, nella sequenza di registrazioni anemometriche, in gruppi di misure appartenenti allo stesso evento. Questa selezione viene effettuata

considerando la direzione di provenienza del vento e controllando quando questa si discosta dalla direzione media relativa al periodo temporale per uno scarto superiore a $\pm 45^\circ$ in esame. Nell'ambito di ciascun gruppo di sequenze reali di stati di vento, il programma calcola i valori di altezza significativa (H_{m0}) periodo di picco (T_p) e direzione media di provenienza (θ_m) del moto ondoso, tenendo conto dell'energia comunque trasferita dagli stati di vento precedenti. Nell'ambito della selezione dei "gruppi di stati di vento" il programma fa riferimento ai seguenti criteri per considerare chiuso un "gruppo":

- a) due valori consecutivi di direzione del vento sono contraddistinti da estensione nulla del fetch efficace (vento proveniente da un'area esterna a quella di generazione, ad es. vento da terra);
- b) due valori consecutivi di velocità del vento sono inferiori alla soglia delle calme (1 nodo);
- c) si verificano in successione una condizione tipo a) ed una tipo b) o viceversa;
- d) si presentano due valori consecutivi di vento interno alla traversia efficace ma tra loro sfasate di oltre 45° rispetto al valore medio ponderale di tutte le direzioni registrate in precedenza ed appartenenti allo stesso "gruppo".

Per simulare l'effetto di smorzamento del moto ondoso al fine di tenere conto dell'effettiva dissipazione energetica in atto nelle fasi calanti delle velocità del vento si è fatto riferimento all'espressione proposta da Lacombe (1965) calcolando l'altezza d'onda H_{sm} "di smorzamento", esplicitata in funzione dell'altezza H_i e del periodo T_i relativi al precedente intervallo di calcolo, e nell'ipotesi che nell'intervallo di tempo $i + 1$ la velocità del vento sia nulla:

$$H_{sm} = \sqrt{H_i^2 - \frac{H_i^4}{T_i^4} - 122.866} \quad (7)$$

In definitiva quando, per l'intervallo di tempo $(i + 1)$ -esimo, lo stato di vento è tale da non determinare un incremento dell'agitazione ondosa (perché il vento ha una velocità inferiore a quella relativa al precedente intervallo di calcolo), viene automaticamente calcolata anche l'altezza smorzata in funzione del moto ondoso noto per l'intervallo i -esimo; nella fase successiva del calcolo, se l'altezza d'onda H_{i+1} ricavata con la relazione (2) è inferiore a quella di smorzamento H_{sm} definita dalla (7), si assume questo valore come rappresentativo dell'intervallo $(i + 1)$ -esimo (infatti è improbabile che una riduzione di velocità del vento faccia calare l'altezza d'onda in misura superiore a quella che si registrerebbe nell'ipotesi di totale assenza di vento). Nel caso in cui l'altezza H_{i+1} risulti maggiore di H_{sm} si assume come valore dell'altezza d'onda la media aritmetica tra H_{i+1} e H_i (si tiene così conto del "ritardato" adeguamento del mare alle nuove ridotte condizioni di vento).