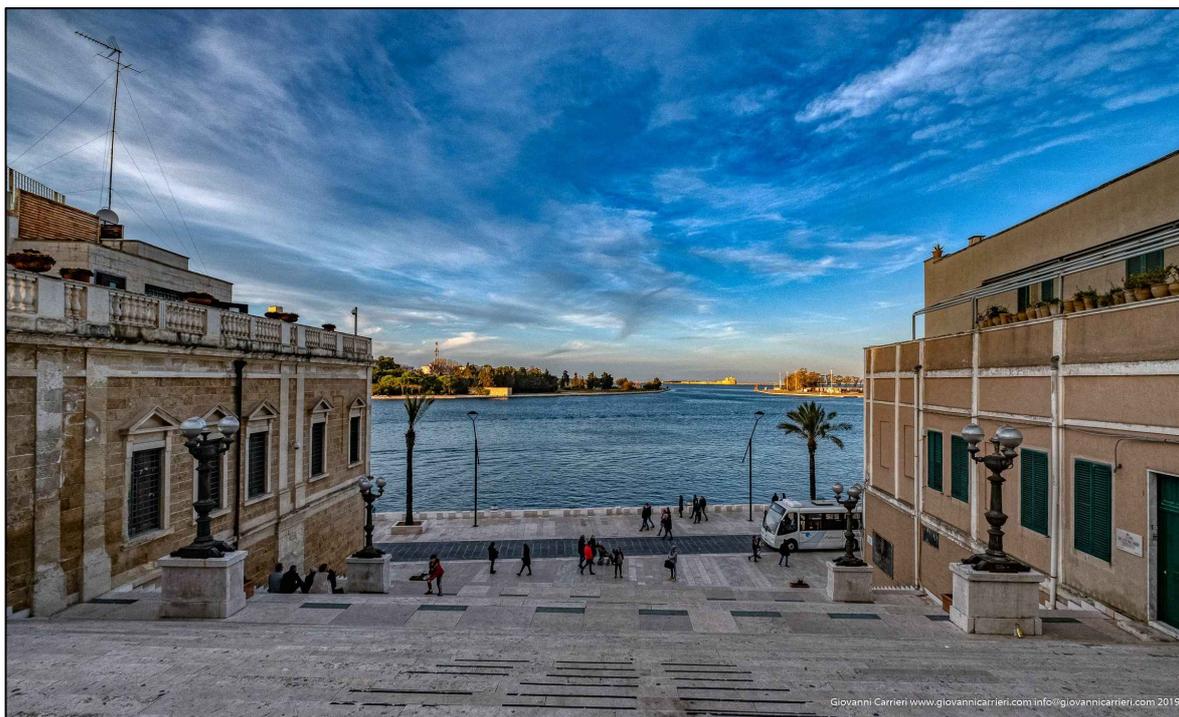


## Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Meridionale



Giovanni Carrieri www.giovannicarrieri.com info@giovannicarrieri.com 2019

### CONVENZIONE SOGESID SPA - ADSP del Mare Adriatico Meridionale Supporto tecnico-specialistico finalizzato alla redazione ed approvazione del Piano Regolatore Portuale del Porto di Brindisi

Titolo elaborato:

**STUDIO METEOMARINO**

Cod. Elaborato:

**21 21 PR 003 1 MAR**

Redatto da:



**Il Direttore Tecnico e Responsabile della convenzione**  
**Ing. Enrico BRUGIOTTI**

**Il Project Manager**  
**Ing. Francesco Maria Lopez Y Royo**

**GRUPPO DI LAVORO SOGESID**

Ing. Marco Deri  
Ing. Fabio Tamburrino  
Ing. Giovanni Borzi  
Ing. Francesco Voltasio  
Ing. Graziano Talò  
Ing. Fabio De Giorgio

**RELAZIONI SPECIALISTICHE**

Pianificazione e aspetti trasportistici e marittimi



Modimar srl



Modimar Project srl

Arch. Pierfrancesco Capolei

**Valutazione Ambientale Strategica**

Ing. Angelo Micolucci

**Committente:**

Autorità di Sistema Portuale del  
Mare Adriatico Meridionale

**Il Direttore del Dipartimento Tecnico dell'AdSP**

Ing. Francesco Di Leverano

**Data:**

Marzo 2023

**GRUPPO DI LAVORO AdSP del Mare Adriatico Meridionale**

Ing. Francesco Di Leverano  
Ing. Cristian Casilli  
Ing. Marinella Conte  
Geom. Davide Boasso

Rev.	Data	Descrizione	Verificato	Approvato
0	07/2022	Emissione per adozione		
1	03/2023	Recepimento osservazioni CSLPP		

**SOMMARIO**

<b>1</b>	<b>Premesse .....</b>	<b>2</b>
1.1	Introduzione .....	2
1.2	Metodologia e dati di base.....	2
<b>2</b>	<b>Inquadramento geografico .....</b>	<b>4</b>
2.1	Fetch geografico ed efficace.....	5
<b>3</b>	<b>Regime dei venti .....</b>	<b>9</b>
3.1	Regime dei venti al largo del Porto di Brindisi sulla base dei dati ERA5 .....	9
<b>4</b>	<b>Analisi e validazione dei dati ondametrici .....</b>	<b>14</b>
4.1	Caratteristiche delle serie di dati ondametrici disponibili.....	14
4.1.1	Registrazioni ondametriche della boa RON di Monopoli .....	15
4.1.2	Dati in ricostruzione ERA5 in prossimità di Monopoli .....	16
4.2	Calibrazione dei dati di moto ondoso ERA5 .....	17
<b>5</b>	<b>Clima di moto ondoso al largo .....</b>	<b>18</b>
5.1	Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda significativa e direzione .....	19
5.2	Curva di durata .....	22
5.3	Distribuzione degli eventi in relazione al periodo medio del moto ondoso .....	23
<b>6</b>	<b>Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo .....</b>	<b>26</b>
6.1	Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali) .....	26
6.2	Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati .....	28
6.3	Statistica dei valori estremi .....	29
6.3.1	Settore omnidirezionale .....	29
6.3.2	Settore A (270-22.5 °N) .....	29
6.3.3	Settore B (22.5-112.5 °N).....	30
6.3.4	Settore C (112.5-180 °N).....	30
6.4	Conclusioni .....	43
<b>7</b>	<b>Clima di moto ondoso in prossimità del porto .....</b>	<b>44</b>
7.1	Dominio di calcolo .....	45
7.2	Condizioni al contorno e ipotesi di calcolo.....	46
7.3	Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda e direzione .....	47
7.4	Curva di durata .....	53
7.5	Distribuzione degli eventi in relazione al periodo medio del moto ondoso .....	54
<b>8</b>	<b>Statistica degli eventi estremi in prossimità del porto .....</b>	<b>57</b>
8.1	Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali) .....	57
8.2	Statistica dei valori estremi .....	58
8.3	Conclusioni .....	71
<b>9</b>	<b>Analisi delle variazioni del livello del mare .....</b>	<b>72</b>
9.1	Serie storica dei livelli misurati dalla stazione mareografica di Bari .....	72
9.2	Marea astronomica .....	74
9.3	Analisi del residuo (componente meteorologica) .....	76
9.4	Analisi dei valori estremi totali (marea astronomica + sovrizzo) .....	78
9.5	Proiezione futura del livello del mare a causa del cambiamento climatico .....	79
<b>10</b>	<b>APPENDICI .....</b>	<b>81</b>
I)	Elenco completo costanti armoniche – Mareografo di Bari.....	81

## 1 PREMESSE

### 1.1 Introduzione

La presente relazione descrive i risultati dello studio meteomarino relativo al porto di Brindisi a supporto del redigendo Piano Regolatore del Porto di Brindisi (PRP).

Lo studio in particolare ha riguardato i seguenti aspetti:

- inquadramento geografico del paraggio e definizione dei settori di traversia che lo contraddistinguono; 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, al largo e in prossimità del sito in esame per mezzo di idonea modellistica numerica, finalizzata all'analisi oggettiva del regime di moto ondoso che contraddistingue il paraggio;
- valutazione, su base statistica, dei valori estremi di moto ondoso al largo e in prossimità delle opere in progetto, in modo da poter definire le caratteristiche degli stati di mare associati a determinati tempo di ritorno;
- valutazione delle variazioni del livello marino in funzione delle componenti astronomica e meteorologica.

### 1.2 Metodologia e dati di base

Per la definizione delle condizioni di moto ondoso al largo del porto di Brindisi sono state prese in esame le fonti di dati maggiormente attendibili e attualmente disponibili per il sito in esame:

- registrazioni ondametriche direzionali (da gennaio 1968 a dicembre 2011) effettuate dalla boa posta a circa 6 km a NE del porto di Monopoli con cadenza mista (rilevamenti triorari alternati a misure effettuate ogni mezz'ora), appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (gestita dall'ISPRA, ex APAT);
- dati di moto ondoso ricostruiti tra il 1979 ed il 2021 dal centro meteorologico europeo (ECMWF) facenti parte del database ERA5, caratterizzati da risoluzione spaziale (lat-lon) pari a 1/2 di grado e con una cadenza temporale oraria. La serie di dati estratti dal database ERA5 presenta una durata di circa 42 anni e rappresenta quindi un campione statisticamente molto significativo.

In particolare, sono stati estratti due set di dati in corrispondenza di due distinti punti della griglia ERA5: con il primo, data la relativa vicinanza alla boa RON di Monopoli (circa 10.5 km), si è proceduto ad un'operazione di calibrazione dei dati in ricostruzione forniti da ERA5 sulla base del confronto dei dati di moto ondoso appartenenti alla serie storica della stazione RON.

I coefficienti di calibrazione individuati in seguito all'analisi di confronto, sono stati ritenuti rappresentativi dell'area geografica in esame e quindi applicati alle altezze ed ai periodi d'onda ricostruiti nel secondo punto ERA5 designato, situato a circa 37 km al largo del porto di Brindisi (circa 20 miglia nautiche). In questo punto è stata successivamente condotta l'analisi del clima meteomarino al largo di Brindisi, comprensiva di valutazione statistica degli estremi di moto ondoso.

Anche per la definizione delle caratteristiche dei venti sono stati analizzati i dati di vento al largo di Brindisi appartenenti alla serie storica (1979-2021) ricostruita da ERA5 con cadenza oraria.

Le variazioni del livello del mare che contraddistinguono il paraggio sono state determinate facendo riferimento alle misure eseguite negli anni 2007 e 2008 presso la stazione mareografica di Brindisi gestita dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia nell'ambito del progetto SIMOP. L'analisi dei dati ha permesso di separare la componente di marea astronomica (deterministica) da quella meteorologica (stocastica).

Infine, per la propagazione del moto ondoso dal largo verso riva, finalizzata alla valutazione delle condizioni di esposizione del paraggio sottocosta, è stato applicato un modello di rifrazione inversa spettrale degli stati di mare al largo di Brindisi per un punto localizzato alla profondità di -30 m in prossimità delle opere di difesa del porto (40.663 °N, 18.004 °E). Il modello impiegato consente di simulare i processi fisici di rifrazione e shoaling che governano la propagazione delle onde in aree con fondali limitati e variabili.

In Tabella 1-1 sono elencate le diverse fonti utilizzate per lo svolgimento dello studio, per ognuna delle quali sono riportati il punto di acquisizione della serie di dati ed il periodo temporale di acquisizione.

**Tabella 1-1. Fonti utilizzate per lo studio meteomarinario.**

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	ERA5_0001045 42-Year Wave Hindcast	Dati di vento e di moto ondoso ricostruiti in prossimità di Monopoli per analisi di calibrazione	41.00 °N 17.50 °E	1979 2021
2	Rete Ondametrica Nazionale (RON) Boa di Monopoli	Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica di Monopoli (RON)	40.9750 °N 17.3778 °E	1989 2008
3	ERA5_0001084 42-Year Wave Hindcast	Dati di vento e di moto ondoso ricostruiti al largo di Brindisi	41.00 °N 18.00 °E	1979 2021
4	Autorità di Bacino Regione Puglia Progetto SIMOP	Misure di livello effettuate dalla stazione mareografica del Porto di Brindisi	40.64 °N 17.94 °E	2007 2008

## 2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il Porto di Brindisi si trova sulla costa orientale della Puglia ed è un porto turistico, commerciale e industriale tra i più importanti del mar Adriatico. Il traffico turistico riguarda i collegamenti con la penisola Balcanica e la Turchia, mentre il traffico mercantile concerne carbone, olio combustibile, gas naturale e prodotti chimici.

Il porto si articola su tre bacini: interno, medio ed esterno. Il porto esterno ha vocazione principalmente industriale; in esso sono installate strutture destinate allo sbarco di prodotti destinati agli stabilimenti del polo industriale chimico. Il porto medio è principalmente destinato alle attività commerciali. La posizione del porto (Figura 2-1) lo rende potenzialmente esposto agli eventi meteomarinò (moto ondoso e vento) provenienti da un settore che va da NO (315°N) a SE (135°N).



Figura 2-1. Inquadramento geografico del sito in esame.

## 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 2-2 è mostrato il fetch geografico (tracciato con passo angolare di 1°) per il punto di coordinate 40.70°N, 18.00°E, posizionato a Nord del Porto di Brindisi ad una distanza di circa 2.5 miglia nautiche dal porto. La tracciatura dei fetch geografici è stata effettuata considerando un limite superiore per l'estensione dei singoli fetch pari a 500 km, pari alla massima estensione delle perturbazioni che interessano il bacino del Mar Mediterraneo.

Il punto di tracciamento dei fetch risulta esposto agli stati di mare provenienti dai settori di maestrale, tramontana, grecale, ponente e scirocco (settore di traversia compreso tra 300 °N e 140° N). Il settore di maestrale è caratterizzato da fetch più esteso. Risultano, inoltre, ben evidenti gli effetti schermo del promontorio del Gargano a Nord-Ovest e delle coste dalmate e albanesi, nonché delle isole greche occidentali da Nord a Sud-Est del paraggio in esame.

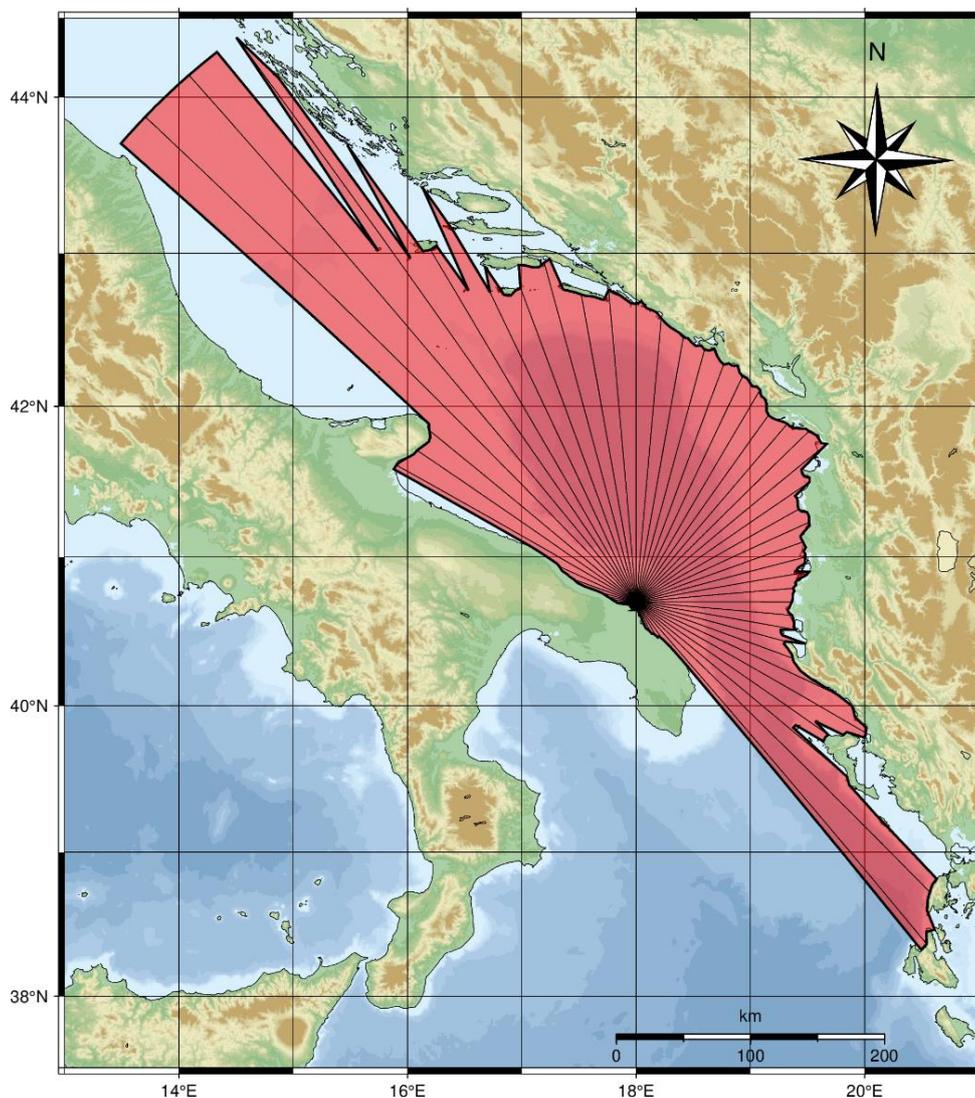


Figura 2-2. Fetch geografici al largo del Porto di Brindisi nel punto di coordinate 40.70°N – 18.00°E.

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  $\phi_w$  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  $\phi_w$ ;

$F_i$ : lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione  $i$ -esima  $\phi_i$ ;

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

$\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ : direzione  $i$ -esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2 \cdot \theta$  considerato nell’intorno della direzione  $\phi_w$ ;

$\theta$  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 nel diagramma polare di 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  $310^\circ\text{N}$  e  $0^\circ\text{N}$ , con un’estensione media di 240 km ed un massimo di circa 266 km in direzione Nord-Nord-Ovest ( $330^\circ\text{N}$ ).

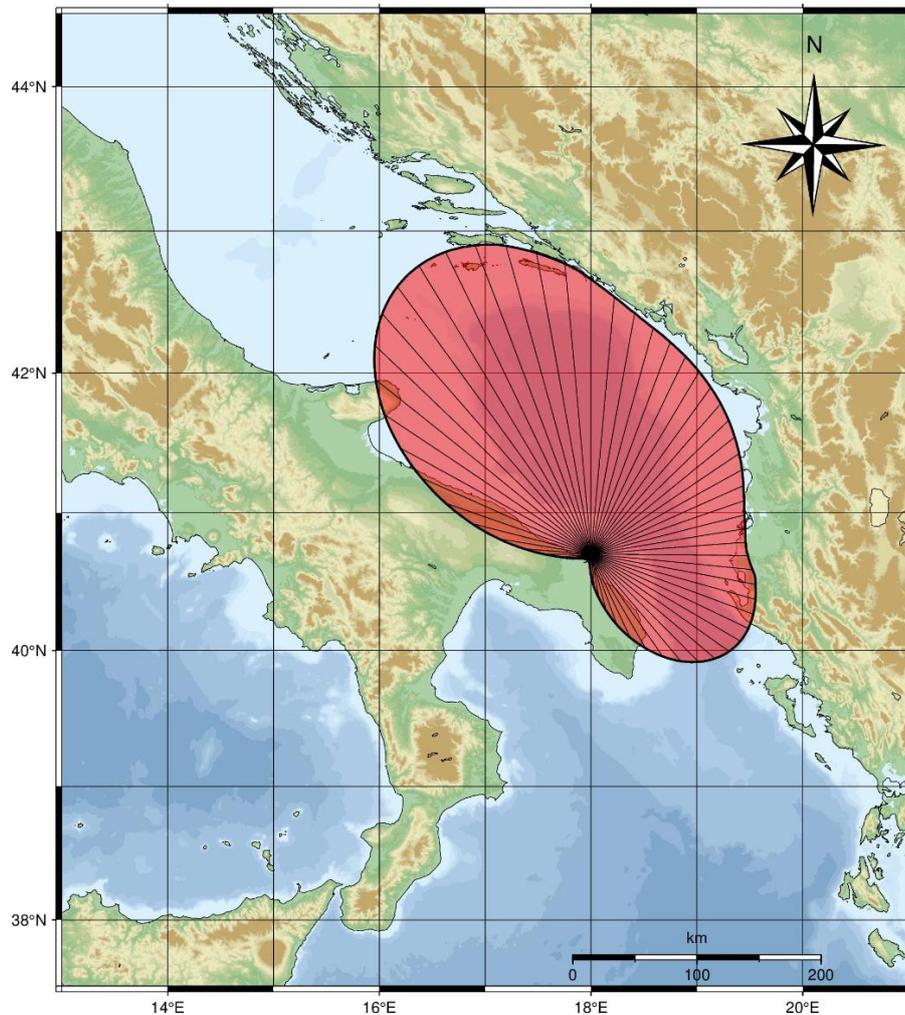


Figura 2-3. Fetch efficace al largo del Porto di Brindisi nel punto di coordinate 40.70°N, 18.00°E.

Tabella 2-1. Fetch geografici ed efficaci al largo del Porto di Brindisi nel punto di coordinate 40.70°N, 18.00°E.

Direzione vento [°N]	Fetch geografico [km]	Fetch efficace [km]	Direzione onda [°N]	Direzione vento [°N]	Fetch geografico [km]	Fetch efficace [km]	Direzione onda [°N]
0	218.7	218.3	351.1	180	4.7	17.7	146.9
10	197.9	195.1	4.2	190	6.0	7.4	174.2
20	186.3	180.2	15.4	200	6.3	5.9	190.8
30	180.8	168.9	25.3	210	5.0	5.4	208.5
40	172.0	158.2	35.3	220	5.5	5.4	223.0
50	182.1	147.6	45.2	230	5.5	5.9	237.5
60	137.9	137.7	55.3	240	5.4	7.0	252.5
70	130.9	128.9	65.9	250	5.8	9.7	270.6
80	129.7	124.4	78.7	260	9.6	17.9	289.2
90	115.2	125.0	92.3	270	14.9	36.6	301.6
100	119.6	133.6	105.5	280	20.8	74.6	310.0
110	123.5	138.5	111.1	290	48.8	122.7	315.4
120	197.0	138.7	116.0	300	203.2	173.6	319.6
130	205.0	130.4	121.0	310	197.7	219.9	323.7
140	339.0	112.7	125.5	320	500.1	252.3	328.3
150	29.2	87.8	129.8	330	298.0	265.9	332.6
160	20.7	60.8	134.0	340	245.4	261.2	336.6
170	6.1	36.0	139.4	350	229.2	242.8	342.5

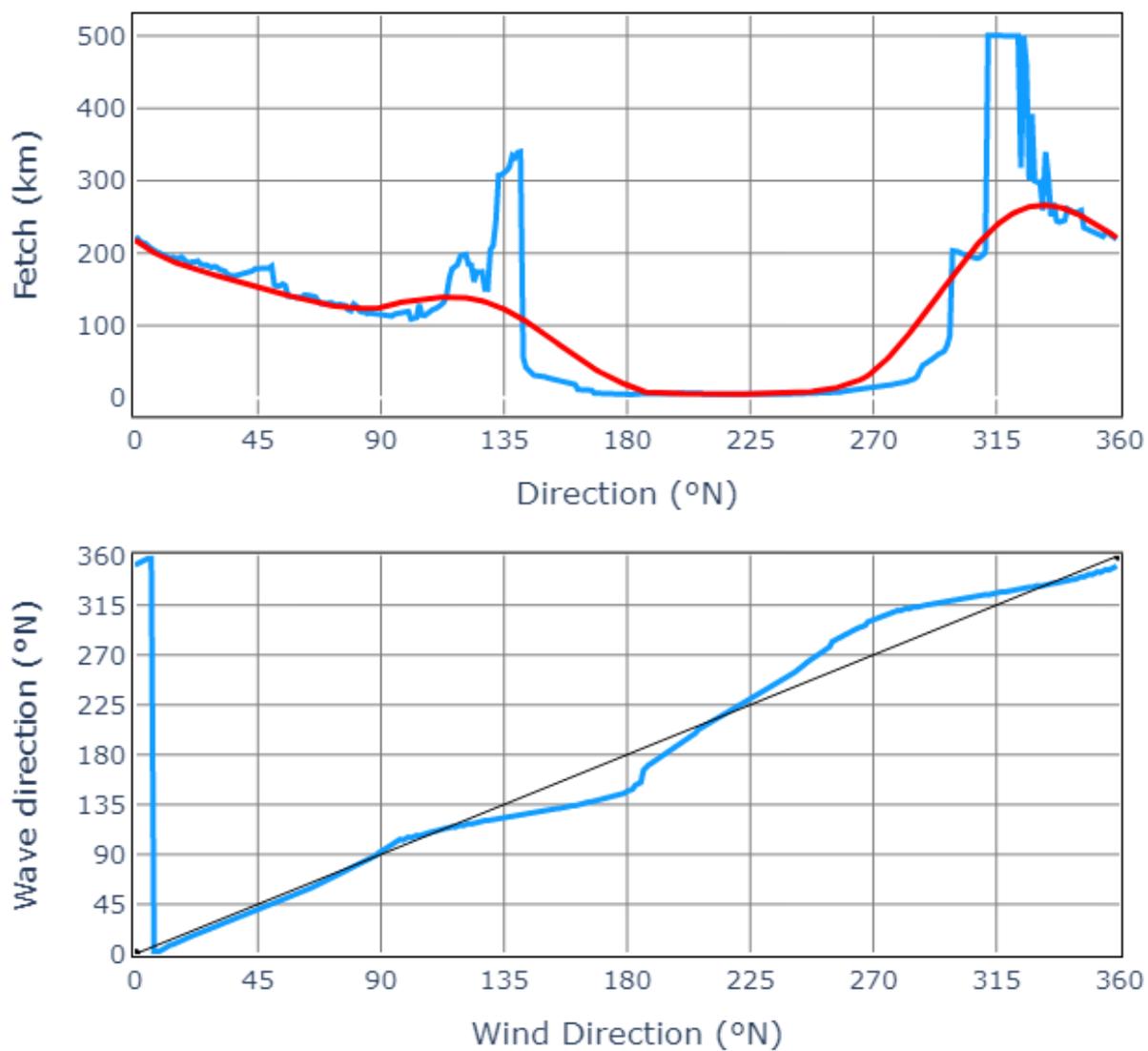
**Fetches geografici ed efficaci – Punto al largo del Porto di Brindisi – 40.70°N, 18.00°E**

Figura 2-4. Estensione dei fetch e confronto direzioni vento/mare al largo del Porto di Brindisi nel punto di coordinate 40.70°N, 18.00°E.

### 3 REGIME DEI VENTI

#### 3.1 Regime dei venti al largo del Porto di Brindisi sulla base dei dati ERA5

Per analizzare il regime dei venti la serie storica ERA5 dei dati orari di vento ricostruita al largo del Porto di Brindisi nel punto di coordinate 41.00°N, 18.00°E, 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 maestrale (315-330 °N) e, con minor frequenza, dal settore di scirocco (165°N) con una frequenza complessiva rispettivamente pari al 27.18% e 8.82%.

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 9.43%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiori a 16 m/s, si verificano in media con percentuali annuali molto vicine allo zero, per circa 10 ore/anno (Figura 3-1 e Tabella 3-1) e provengono prevalentemente dal settore di scirocco (135-165°N). In misura minore si possono verificare venti intensi da maestrale.

Dal punto di vista della distribuzione stagionale dei venti (Figura 3-2) si osserva che i regimi primaverile, autunnale e invernale presentano una distribuzione simile dei venti che conferma i settori di provenienza individuati su base annuale, ovvero maestrale e scirocco. Nel regime estivo, invece, prevale solo il settore maestrale, mentre il settore di scirocco subisce una drastica ed evidente riduzione in termini di frequenza di accadimento con venti che non superano i 12 m/s di velocità.

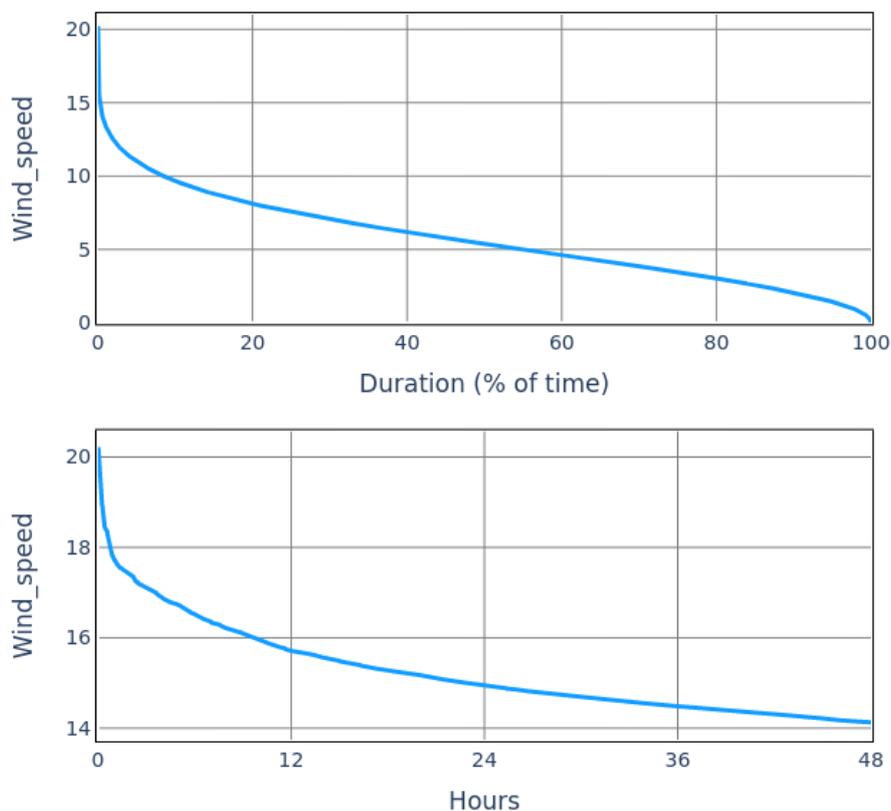


Figura 3-1. Curva di durata annuale (con dettaglio) della velocità del vento al largo del Porto di Brindisi.

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

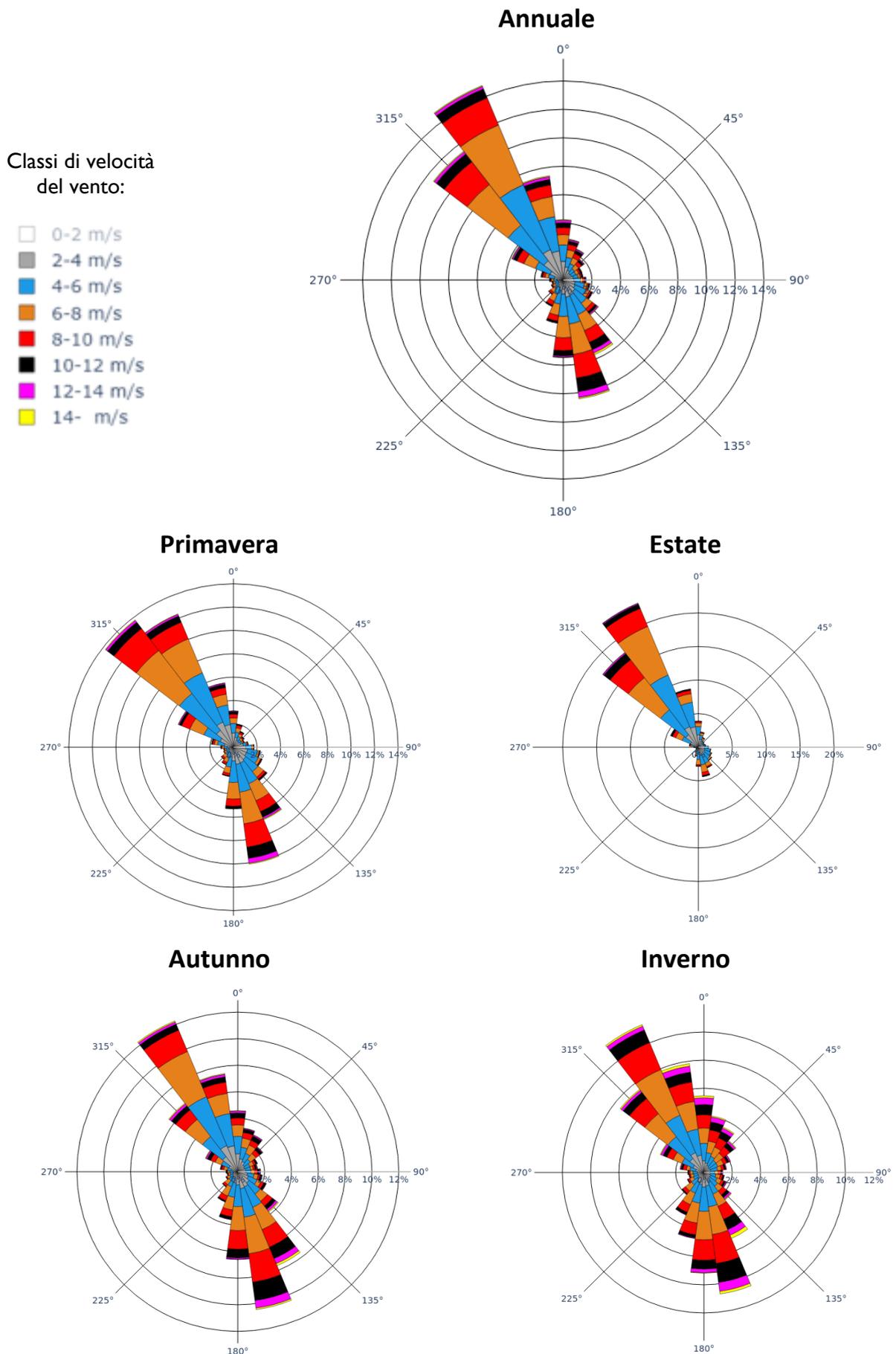
Velocità vento [m/s]	Ore	%
1.0	8549.2	97.59
1.5	8287.1	94.6
2.0	7933.9	90.57
2.5	7510.5	85.74
3.0	7031.9	80.27
3.5	6523.0	74.46
4.0	5970.7	68.16
4.5	5392.8	61.56
5.0	4815.7	54.97
5.5	4247.5	48.49
6.0	3696.3	42.2
6.5	3166.4	36.15
7.0	2678.1	30.57
7.5	2225.1	25.4
8.0	1828.5	20.87
8.5	1484.2	16.94
9.0	1192.9	13.62
9.5	948.5	10.83
10.0	743.4	8.49
10.5	577.3	6.59
11.0	436.9	4.99
11.5	325.9	3.72
12.0	238.5	2.72
12.5	172.6	1.97
13.0	120.9	1.38
13.5	82.2	0.94
14.0	53.6	0.61
14.5	35.5	0.41
15.0	22.9	0.26
15.5	14.9	0.17
16.0	9.7	0.11
16.5	6.1	0.07
17.0	3.6	0.04
17.5	1.6	0.02
18.0	0.8	0.01
18.5	0.4	0.0
19.0	0.2	0.0
19.5	0.1	0.0

Tabella 3-2. Suddivisione dei dati di vento ricostruiti al largo del Porto di Brindisi da ERA5 (periodo 1979-2021).

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	438	1489	4941	4348	2770	1860	1285	634	131	28	3	0	17927
15	430	1418	3512	2549	2040	1455	868	390	76	10	0	0	12748
30	406	1249	2763	1929	1733	1233	843	334	81	4	0	0	10575
45	419	1122	2267	1521	1370	981	585	209	52	6	0	0	8532
60	381	1045	2294	1304	831	471	265	100	15	4	0	0	6710
75	386	1068	2680	1262	572	356	225	106	7	8	0	0	6670
90	360	1068	2838	1658	665	394	271	110	8	0	0	0	7372
105	363	1029	3169	2475	782	359	207	47	9	1	0	0	8441
120	335	1024	3380	3123	961	457	302	111	20	0	0	0	9713
135	385	999	3921	3852	1840	990	612	326	97	28	0	0	13050
150	362	1056	4379	5557	4600	3373	2110	933	356	97	13	0	22836
165	362	1086	4577	7203	8138	6310	3636	1546	299	39	5	0	33201
180	338	1079	3741	5929	5658	3407	1427	351	38	1	0	0	21969
195	349	960	2865	3587	3009	1519	456	70	7	0	0	0	12822
210	333	842	2065	2084	1968	1113	317	27	0	0	0	0	8749
225	329	788	1613	1289	1234	571	124	10	0	0	0	0	5958
240	330	804	1342	953	704	287	59	9	3	0	0	0	4491
255	368	848	1286	864	523	202	64	6	0	0	0	0	4161
270	365	905	1621	932	576	268	95	31	14	0	0	0	4807
285	356	1024	2387	1568	902	625	283	122	46	4	0	0	7317
300	404	1214	3795	4130	3322	1963	982	352	94	22	1	0	16279
315	399	1332	6451	11860	13582	7566	2630	687	178	27	0	0	44712
330	407	1443	8725	18623	17105	7784	2568	722	175	49	2	2	57605
345	455	1557	7764	9157	5393	3094	1488	716	178	57	6	0	29865
<b>N° di eventi</b>	9060	26449	84376	97757	80278	46638	21702	7949	1884	385	30	2	<b>376510</b>

Tabella 3-3. Frequenza di accadimento dei venti ricostruiti al largo del Porto di Brindisi da ERA5 (periodo 1979-2021).

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	0.12	0.4	1.31	1.15	0.74	0.49	0.34	0.17	0.03	0.01	0	0	4.76	4.24
15	0.11	0.38	0.93	0.68	0.54	0.39	0.23	0.1	0.02	0	0	0	3.39	2.9
30	0.11	0.33	0.73	0.51	0.46	0.33	0.22	0.09	0.02	0	0	0	2.81	2.37
45	0.11	0.3	0.6	0.4	0.36	0.26	0.16	0.06	0.01	0	0	0	2.27	1.86
60	0.1	0.28	0.61	0.35	0.22	0.13	0.07	0.03	0	0	0	0	1.78	1.4
75	0.1	0.28	0.71	0.34	0.15	0.09	0.06	0.03	0	0	0	0	1.77	1.39
90	0.1	0.28	0.75	0.44	0.18	0.1	0.07	0.03	0	0	0	0	1.96	1.58
105	0.1	0.27	0.84	0.66	0.21	0.1	0.05	0.01	0	0	0	0	2.24	1.87
120	0.09	0.27	0.9	0.83	0.26	0.12	0.08	0.03	0.01	0	0	0	2.58	2.22
135	0.1	0.27	1.04	1.02	0.49	0.26	0.16	0.09	0.03	0.01	0	0	3.47	3.1
150	0.1	0.28	1.16	1.48	1.22	0.9	0.56	0.25	0.09	0.03	0	0	6.07	5.69
165	0.1	0.29	1.22	1.91	2.16	1.68	0.97	0.41	0.08	0.01	0	0	8.82	8.43
180	0.09	0.29	0.99	1.57	1.5	0.9	0.38	0.09	0.01	0	0	0	5.83	5.45
195	0.09	0.25	0.76	0.95	0.8	0.4	0.12	0.02	0	0	0	0	3.41	3.07
210	0.09	0.22	0.55	0.55	0.52	0.3	0.08	0.01	0	0	0	0	2.32	2.01
225	0.09	0.21	0.43	0.34	0.33	0.15	0.03	0	0	0	0	0	1.58	1.28
240	0.09	0.21	0.36	0.25	0.19	0.08	0.02	0	0	0	0	0	1.19	0.89
255	0.1	0.23	0.34	0.23	0.14	0.05	0.02	0	0	0	0	0	1.11	0.78
270	0.1	0.24	0.43	0.25	0.15	0.07	0.03	0.01	0	0	0	0	1.28	0.94
285	0.09	0.27	0.63	0.42	0.24	0.17	0.08	0.03	0.01	0	0	0	1.94	1.58
300	0.11	0.32	1.01	1.1	0.88	0.52	0.26	0.09	0.02	0.01	0	0	4.32	3.89
315	0.11	0.35	1.71	3.15	3.61	2.01	0.7	0.18	0.05	0.01	0	0	11.88	11.42
330	0.11	0.38	2.32	4.95	4.54	2.07	0.68	0.19	0.05	0.01	0	0	15.3	14.81
345	0.12	0.41	2.06	2.43	1.43	0.82	0.4	0.19	0.05	0.02	0	0	7.93	7.4
<b>Freq. %</b>	2.41	7.02	22.41	25.96	21.32	12.39	5.76	2.11	0.5	0.1	0.01	0	<b>100</b>	<b>90.57</b>



**Figura 3-2. Distribuzione direzionale dei venti ricostruiti al largo del Porto di Brindisi da ERA5 su base annuale e stagionale (periodo 1979 - 2021)**

## 4 ANALISI E VALIDAZIONE DEI DATI ONDAMETRICI

### 4.1 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 alle seguenti fonti di dati:

- registrazioni ondametriche direzionali (da gennaio 1968 a dicembre 2011) effettuate dalla boa situata a circa 6 km a NE del porto di Monopoli con cadenza mista (rilevamenti triorari alternati a misure effettuate ogni mezz'ora), appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (gestita dall'ISPRA ex APAT);
- dati di moto ondoso ERA5 ricostruiti tra il 1979 ed il 2021 (set di dati generato dal servizio europeo Copernicus) con una risoluzione spaziale (lat-lon) pari a 1/2 di grado e con una cadenza temporale oraria.

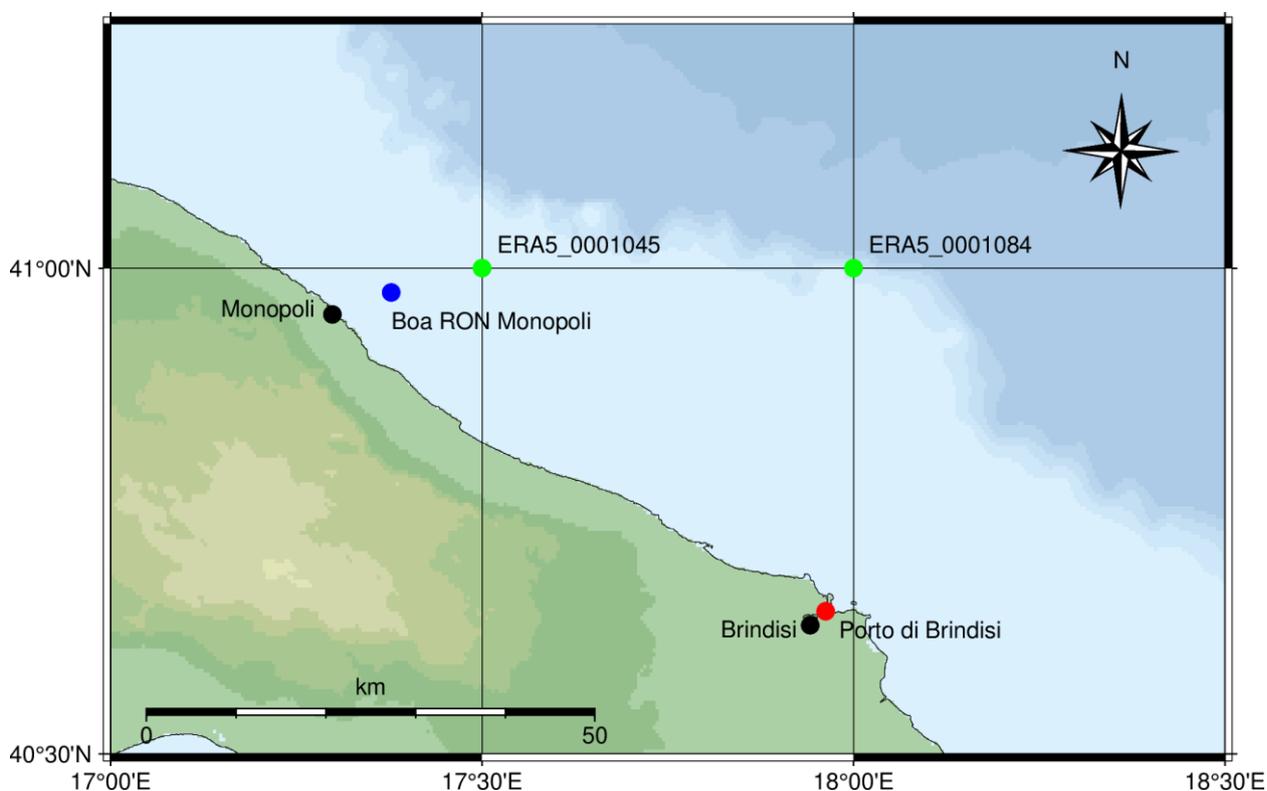


Figura 4-1. Inquadramento geografico con indicazione del sito di interesse (Porto di Brindisi), della posizione della boa RON di Monopoli e dei due punti ERA5 usati per la calibrazione (0001045) e la definizione del clima meteomarino (0001084).

In Figura 4-1 è riportata la localizzazione della stazione ondametrica di Monopoli e dei punti di ricostruzione ERA5: “ERA5\_0001045”, impiegato per la calibrazione delle ricostruzioni di moto ondoso, tramite confronto con i dati della boa RON di Monopoli; “ERA5\_0001084”, situato al largo del Porto di Brindisi utilizzato per la definizione del clima meteomarino previa applicazione dei coefficienti di calibrazione individuati nell’ambito dell’analisi di confronto delle serie storiche (si veda il successivo paragrafo 4.2).

#### 4.1.1 Regrazzazioni ondametriche della boa RON di Monopoli

La stazione ondametrica di Monopoli appartenente alla RON (Rete Ondametrica Nazionale gestita dall'ISPRA ex APAT) ha iniziato ad operare a luglio 1989.

La strumentazione è costituita da una boa ondametrica direzionale (dapprima del tipo Datawell Wavec MKI e poi del tipo TRIAXYS) ed è posizionata su fondali di circa -80 m s.l.m. al largo del porto di Monopoli ad una distanza dalla costa di circa 6 km.

Come è possibile osservare dall'analisi del rendimento dell'ondametro, riportata in Figura 4-2, nel periodo compreso tra il 1989 e il 2001, in cui ha operato la boa DATAWELL, il rendimento medio annuale dell'ondametro è stato sempre superiore al 80÷90%; dal 2001, cui corrisponde la messa in servizio della boa TRIAXIS, il rendimento dell'ondametro è calato decisamente, sia per problemi tecnici dello strumento che di manutenzione e gestione della rete ondametrica nazionale.

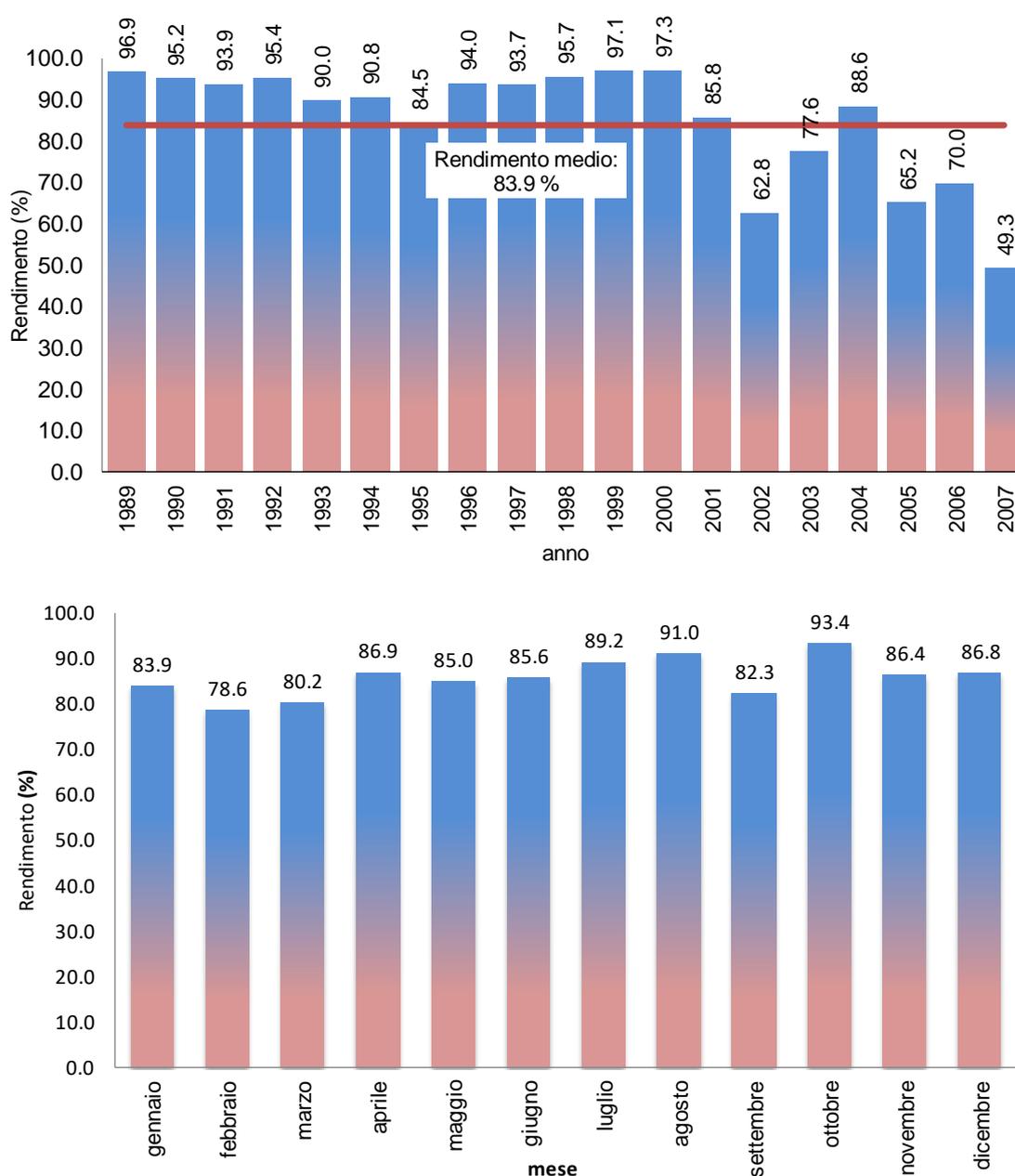


Figura 4-2. Rendimento della boa ondametrica RON di Monopoli – 1989/2008.

In Figura 4-3 è rappresentata la distribuzione direzionale e la frequenza di accadimento degli stati di mare registrati dall'ondametro di Monopoli con  $H_s > 0.5$  m. Gli eventi di moto ondoso prevalenti provengono da maestrale e da scirocco.

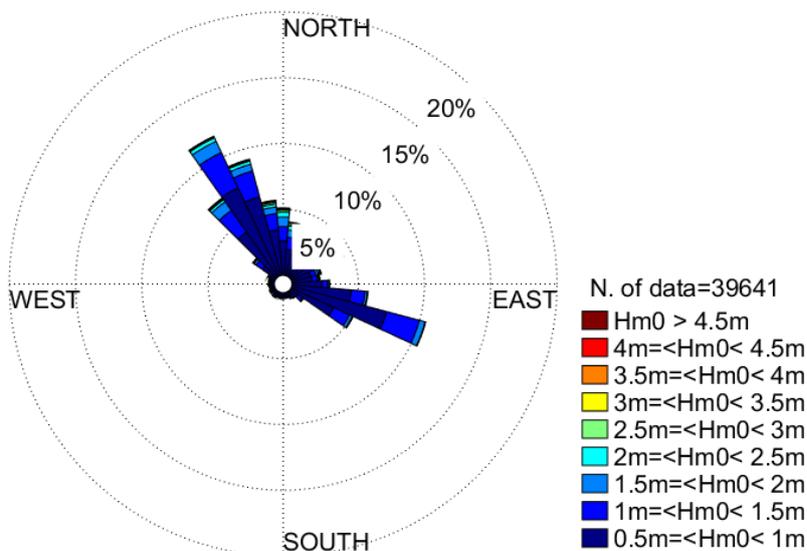


Figura 4-3. Frequenza di accadimento direzionale degli stati di moto ondoso con  $H_s \geq 0.5$  m registrati dalla boa RON di Monopoli.

#### 4.1.2 Dati in ricostruzione ERA5 in prossimità di Monopoli

Al fine di effettuare la calibrazione dei dati ERA5 sono stati acquisiti i dati di moto ondoso in ricostruzione per il nodo di calcolo più prossimo alla RON di Monopoli (coordinate  $41.00^\circ N - 17.50^\circ E$ ), localizzato a poco meno di 6 miglia nautiche verso Nord-Est rispetto alla boa RON.

In Figura 4-4 è riportata la distribuzione direzionale degli stati di moto ondoso ricostruiti da ERA5 in prossimità di Monopoli tra il 1979 e il 2021. Ponendo a confronto i dati in ricostruzione con i dati misurati dall'ondametro si osserva una buona congruenza per il settore di maestrale mentre si nota una deviazione di circa  $30^\circ$  degli stati di mare provenienti dal settore di scirocco. I dati in ricostruzione forniscono valori di altezza d'onda che risultano in generale più attenuati rispetto alle misure effettuate dalla boa.

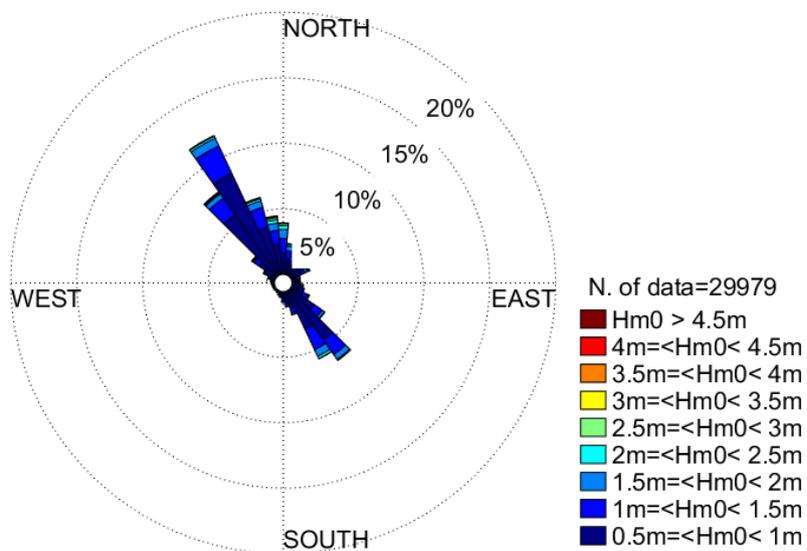


Figura 4-4. Frequenza di accadimento direzionale degli stati di moto ondoso con  $H_s > 0.5$  m ricostruiti da ERA5 in prossimità di Monopoli nel punto di coordinate  $41.00^\circ N - 17.50^\circ E$ .

## 4.2 Calibrazione dei dati di moto ondoso ERA5

I dati selezionati dalla serie storica di Monopoli (1989-2008) sono stati posti a confronto con i dati sincroni ricostruiti ERA5 nel punto di coordinate 41.00 °N, 15.5 °E situato, come anticipato in precedenza, ad una distanza di poco meno di 6 miglia nautiche dall'ondametro di Monopoli.

L'analisi condotta è basata sulla rappresentazione in diagrammi di tipo “scatter plot”, nei quali sono riportati tutti gli eventi di moto ondoso individuati in seguito alla sincronizzazione dei dati in termini di altezza, direzione e periodo d'onda. Alle nuvole di punti così determinate, sono state associate tre rette di regressione lineare al fine di individuare un rapporto medio tra le due grandezze.

In Figura 4-5 sono rappresentati i risultati della procedura di calibrazione che ha permesso, invertendo il valore della pendenza delle rette di regressione (slope), di definire i seguenti coefficienti di calibrazione per l'altezza d'onda e il periodo medio ricostruiti:

- **Coefficiente di calibrazione per le altezze d'onda: 1.22**
- **Coefficiente di calibrazione per i periodi di picco del moto ondoso: 1.20**

Si è deciso di applicare i coefficienti di calibrazione relativi alle altezze e ai periodi di picco delle onde che quindi sono stati maggiorati di circa il 20%.

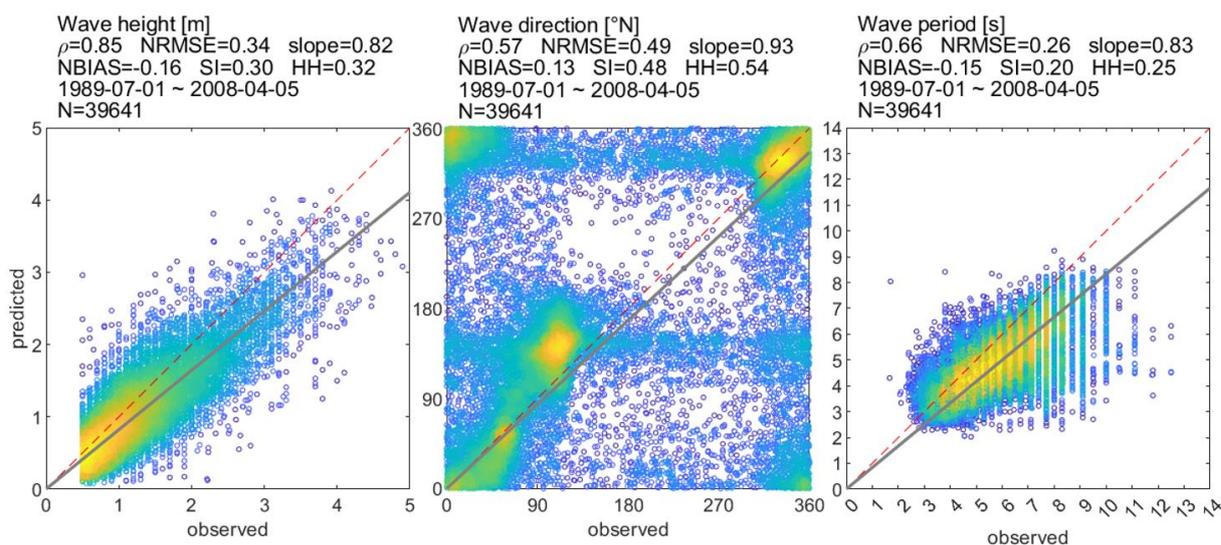


Figura 4-5. Calibrazione dei dati di moto ondoso ricostruiti ERA5 (predicted) sincronizzando i dati registrati dalla boa ondometrica RON di Monopoli (observed).

## 5 CLIMA DI MOTO ONDOSO AL LARGO

Nel presente capitolo viene descritto il clima di moto ondoso al largo del Porto di Brindisi, definito sulla base dei dati di moto ondoso ricostruiti ERA5 nel punto di coordinate 41.00 °N, 18.00 °E per il periodo 1979-2021, opportunamente calibrati come illustrato nel 4.

La serie storica contiene 376510 eventi e fornisce, con cadenza oraria, i parametri spettrali di moto ondoso ( $H_s$ ,  $T_m$ , Dir) e le componenti vettoriali  $uw$  e  $vw$  della velocità del vento alla quota convenzionale di 10 m sul l.m.m.

Dal punto di vista dell'esposizione ondosa il paraggio presenta un clima multimodale e, nell'ottica di fornire una completa descrizione del clima del paraggio, si è deciso di considerare, oltre al settore omnidirezionale, tre settori di traversia: il settore principale di ponente-maestrale-tramontana [270-22.5 °N], il settore secondario di scirocco-mezzogiorno [112.5-180 °N] e di grecale-levante [22.5-112.5 °N].

La suddivisione degli eventi per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 5-1) e la corrispondente frequenza di accadimento (Tabella 5-2) mostra che gli stati di moto ondoso più significativi ( $H_s > 0.5$  m) si presentano da maestrale (22.2%) e da scirocco (10.4%), con una frequenza di accadimento complessiva pari al 32.6%. Dal settore di maestrale si presentano inoltre gli eventi con altezza d'onda più elevata.

Durante il corso dell'anno il regime di moto ondoso presenta una sensibile variabilità stagionale. In autunno ed in inverno la distribuzione è simile: i settori predominanti sono quelli di maestrale e scirocco, ma le rose mostrano anche la presenza, seppur poco frequente, del settore grecale-levante (Figura 5-1). Si segnala inoltre una maggior intensità degli eventi di moto ondoso invernali che raggiungono anche i 2 m di altezza d'onda.

Le rose primaverili ed estive, invece, pur condividendo il settore di maestrale, presentano una marcata distinzione per quanto riguarda il settore di scirocco che risulta quasi assente nella stagione estiva.

Gli stati di mare caratterizzati da altezza d'onda superiore a 2 m si verificano in media 538 ore l'anno. La persistenza degli stati di mare con  $H_s > 3.0$  m si riduce a 102 ore/anno e solamente 15 ore l'anno si hanno altezze d'onda superiori a  $H_s > 4.0$  m (paragrafo 5.2).

I dati analizzati mostrano una prevalenza di "stati di mare vivo" e presentano, in media, valori del periodo medio  $T_m$  compresi tra 5.0 e 6.0 s (paragrafo 5.3).

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

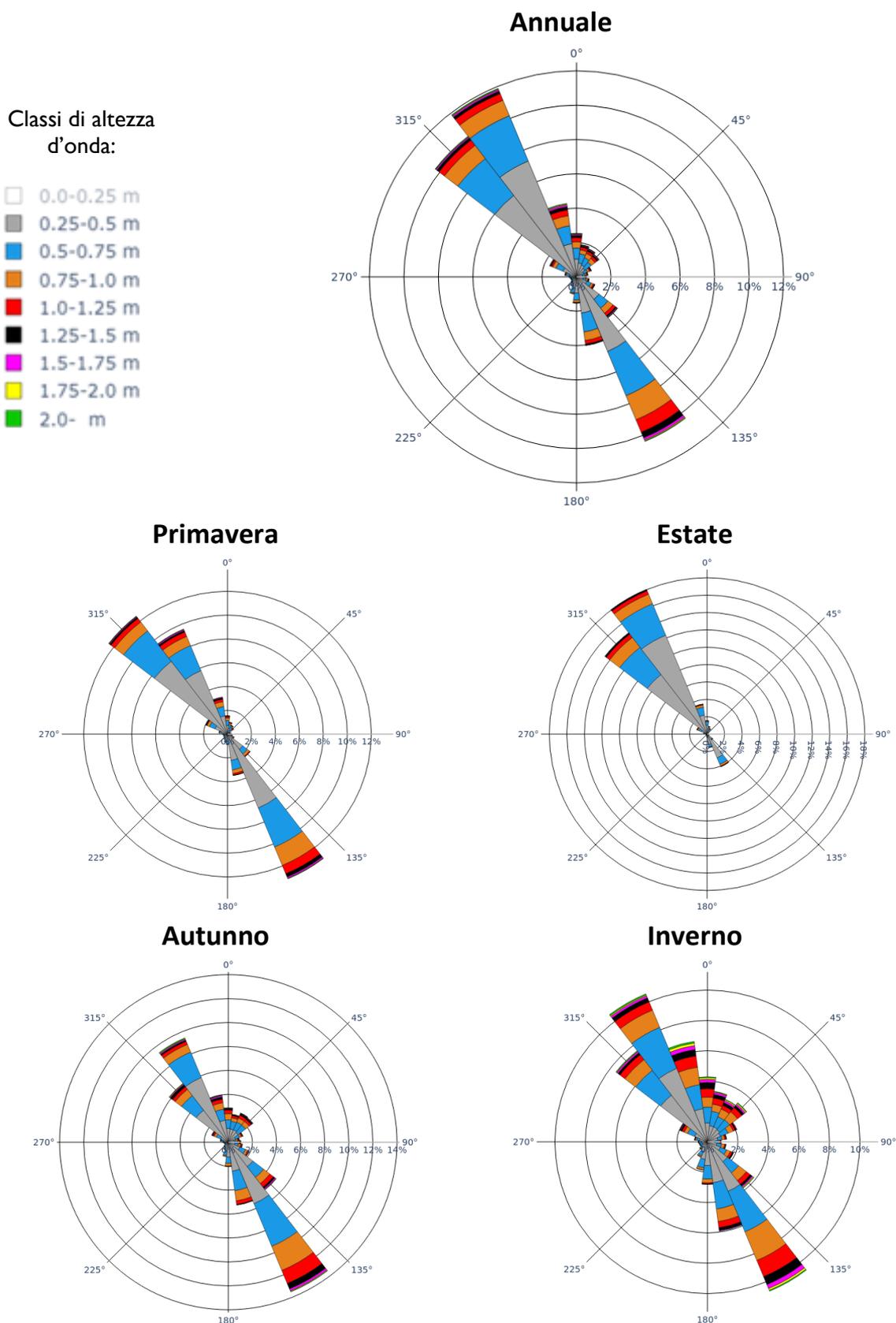
In Tabella 5-1 e in Tabella 5-2 sono riportati il numero di eventi di moto ondoso e la frequenza di accadimento percentuale degli eventi di moto ondoso ricostruiti e calibrati al largo di Brindisi, suddivisi secondo classi di direzione e di altezza significativa suddivisi per settori di provenienza di 15° e per classi di altezza d'onda significativa  $H_s$ .

Tabella 5-1. Numero di eventi di moto ondoso al largo del Porto di Brindisi suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione, ricostruiti da ERA5 e calibrati. Periodo di riferimento 1979-2021.

Dir. °Nord	Altezza d'onda significativa [m]											Tot
	0.0 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	
0	5778	3893	2433	1386	901	525	236	121	44	21	2	15340
15	3657	3057	2037	889	618	302	138	55	17	5	0	10775
30	3003	2778	1764	1015	544	326	163	77	22	1	1	9694
45	2511	2319	1745	1054	561	281	145	86	37	8	5	8752
60	2489	1668	934	501	228	87	50	2	4	10	0	5973
75	2776	1328	572	339	149	67	26	3	0	0	0	5260
90	3449	1191	450	219	145	88	24	10	0	0	0	5576
105	5004	1508	647	406	149	46	4	3	0	0	0	7767
120	7177	2439	1029	496	252	91	7	4	0	0	0	11495
135	10924	6208	2455	1401	695	286	161	80	19	5	0	22234
150	13035	17715	10519	5707	2967	1331	523	203	83	11	6	52100
165	7201	8029	4182	1911	774	218	47	3	0	0	0	22365
180	3524	3528	1564	514	98	33	2	0	0	0	0	9263
195	1876	2478	1038	246	22	0	0	0	0	0	0	5660
210	1364	1487	575	126	16	0	0	0	0	0	0	3568
225	1065	1073	311	80	13	2	0	0	0	0	0	2544
240	1009	838	328	70	10	3	0	0	0	0	0	2258
255	984	882	325	59	8	4	1	0	0	0	0	2263
270	1144	1050	369	90	27	5	0	0	0	0	0	2685
285	1841	1624	602	196	69	16	3	4	0	0	0	4355
300	3488	3210	1664	755	345	178	103	32	13	1	0	9789
315	14939	22501	10177	3686	1448	618	246	108	48	26	10	53807
330	29657	27509	10760	3670	1567	631	333	136	60	46	37	74406
345	12348	7349	3968	2235	1257	709	398	201	49	39	28	28581
N° di eventi	140243	125662	60448	27051	12863	5847	2610	1128	396	173	89	376510

**Tabella 5-2. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso, al largo del Porto di Brindisi ricostruiti da ERA5 e calibrati, suddivisi per altezza e direzione. Periodo di riferimento 1979-2021.**

Dir. °Nord	Altezza d'onda significativa [m]											Freq. %	Hs>0.5
	0.0 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		
0	1.53	1.03	0.65	0.37	0.24	0.14	0.06	0.03	0.01	0.01	0	4.07	2.54
15	0.97	0.81	0.54	0.24	0.16	0.08	0.04	0.01	0	0	0	2.86	1.89
30	0.8	0.74	0.47	0.27	0.14	0.09	0.04	0.02	0.01	0	0	2.57	1.77
45	0.67	0.62	0.46	0.28	0.15	0.07	0.04	0.02	0.01	0	0	2.32	1.65
60	0.66	0.44	0.25	0.13	0.06	0.02	0.01	0	0	0	0	1.59	0.93
75	0.74	0.35	0.15	0.09	0.04	0.02	0.01	0	0	0	0	1.4	0.66
90	0.92	0.32	0.12	0.06	0.04	0.02	0.01	0	0	0	0	1.48	0.56
105	1.33	0.4	0.17	0.11	0.04	0.01	0	0	0	0	0	2.06	0.73
120	1.91	0.65	0.27	0.13	0.07	0.02	0	0	0	0	0	3.05	1.14
135	2.9	1.65	0.65	0.37	0.18	0.08	0.04	0.02	0.01	0	0	5.91	3.01
150	3.46	4.71	2.79	1.52	0.79	0.35	0.14	0.05	0.02	0	0	13.84	10.38
165	1.91	2.13	1.11	0.51	0.21	0.06	0.01	0	0	0	0	5.94	4.03
180	0.94	0.94	0.42	0.14	0.03	0.01	0	0	0	0	0	2.46	1.52
195	0.5	0.66	0.28	0.07	0.01	0	0	0	0	0	0	1.5	1
210	0.36	0.39	0.15	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0.59
225	0.28	0.28	0.08	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.68	0.4
240	0.27	0.22	0.09	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0.33
255	0.26	0.23	0.09	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0.34
270	0.3	0.28	0.1	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	0.71	0.41
285	0.49	0.43	0.16	0.05	0.02	0	0	0	0	0	0	1.16	0.67
300	0.93	0.85	0.44	0.2	0.09	0.05	0.03	0.01	0	0	0	2.6	1.67
315	3.97	5.98	2.7	0.98	0.38	0.16	0.07	0.03	0.01	0.01	0	14.29	10.32
330	7.88	7.31	2.86	0.97	0.42	0.17	0.09	0.04	0.02	0.01	0.01	19.76	11.88
345	3.28	1.95	1.05	0.59	0.33	0.19	0.11	0.05	0.01	0.01	0.01	7.59	4.31
<b>Freq. %</b>	37.25	33.38	16.05	7.18	3.42	1.55	0.69	0.3	0.11	0.05	0.02	<b>100</b>	<b>62.73</b>



**Figura 5-1. Rose annuali e stagionali di distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con  $H_s > 0.5$  ricostruiti ERA5 e calibrati al largo del Porto di Brindisi - Periodo di riferimento 1979-2021.**

## 5.2 Curva di durata

In merito alla persistenza degli eventi di moto ondoso si può far riferimento alla curva di durata annuale rappresentata in Figura 5-2. Dall'analisi della serie storica è stato possibile determinare la durata media annuale associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa.

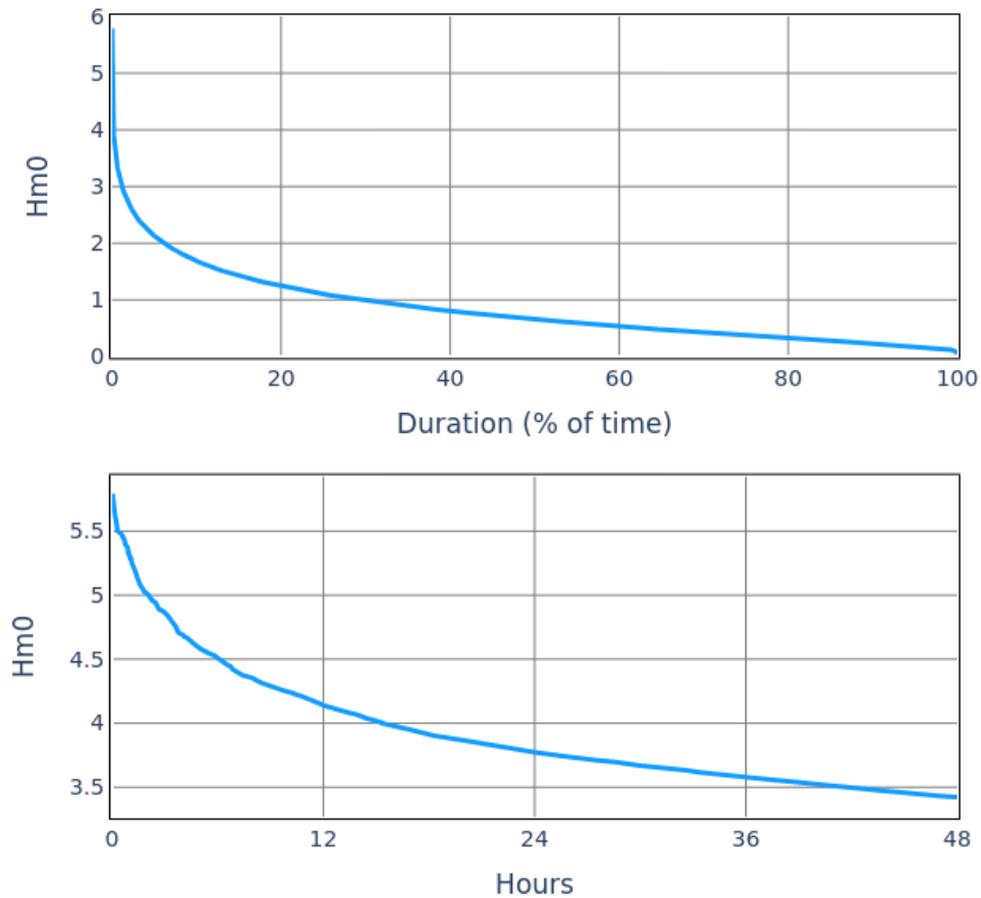


Figura 5-2. Curva di durata annuale (con dettaglio) degli eventi di moto ondoso al largo del Porto di Brindisi.

Tabella 5-3. Clima mtoto ondoso annuale - Ore e percentuali di superamento delle altezze d'onda.

Hm0 [m]	Ore	%
1.0	2573.4	29.38
1.5	1167.0	13.32
2.0	537.6	6.14
2.5	238.3	2.72
3.0	102.3	1.17
3.5	41.6	0.47
4.0	15.3	0.17
4.5	6.1	0.07

### 5.3 Distribuzione degli eventi in relazione al periodo medio del moto ondoso

Al fine di individuare la legge di dipendenza tra il periodo medio delle onde  $T_m$  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:

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

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 con altezza d'onda significativa  $H_s \geq 1$  m appartenenti ai settori di traversia:

- 270.0 – 22.5 °N settore di traversia principale;
- 22.5 – 112.5 °N settore di traversia secondario;
- 112.5 – 180.0 °N settore di traversia secondario.

In Figura 5-3, Figura 5-4, Figura 5-5 e Figura 5-6 sono riportate le funzioni di correlazione tra  $T_m$  e  $H_s$  trovate con il metodo dei minimi quadrati per i dati della serie storica al largo di Brindisi, per tutte le direzioni e per i tre 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 5-4.

**Tabella 5-4. Parametri legge di dipendenza tra il periodo medio delle onde  $T_m$  e l'altezza d'onda significativa  $H_s$  per i settori di traversia individuati.**

$T_m = a \cdot (H_s)^b$	Parametro (a)	Parametro (b)
omnidirezionale <b>0-360 °N</b>	4.91	0.36
settore di traversia principale <b>270-22.5 °N</b>	4.84	0.37
settore di traversia secondario <b>22.5-112.5 °N</b>	5.04	0.33
settore di traversia secondario <b>112.5-180 °N</b>	4.99	0.34

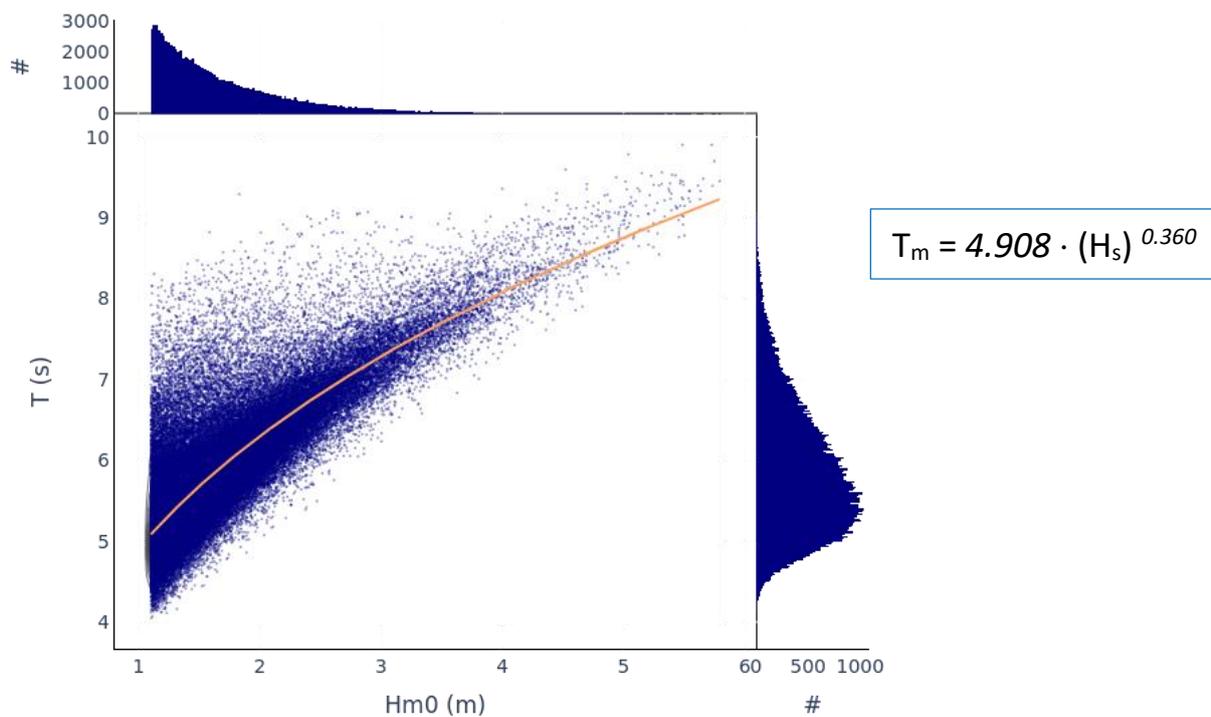


Figura 5-3. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 al largo di Brindisi.

Analisi omnidirezionale 0-360 °N.

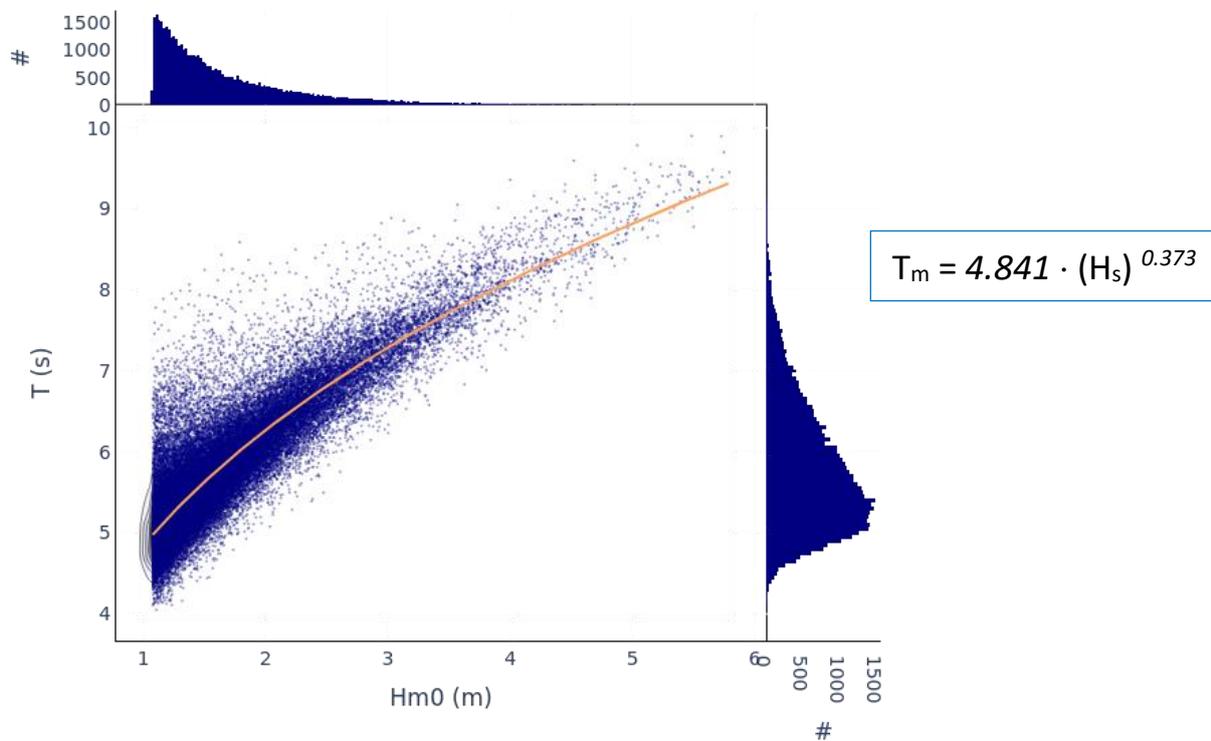


Figura 5-4. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 al largo di Brindisi.

Settore di traversia principale 270-22.5 °N.

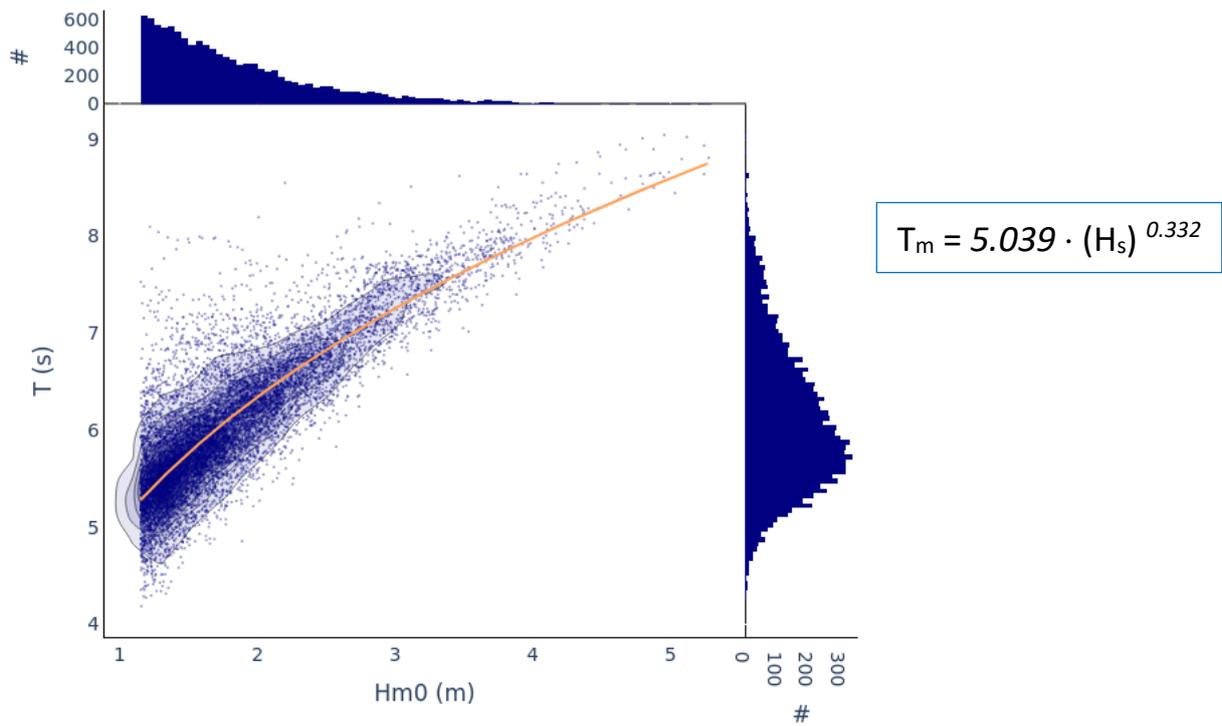


Figura 5-5. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 al largo di Brindisi.  
Settore di traversia secondario 22.5-112.5 °N.

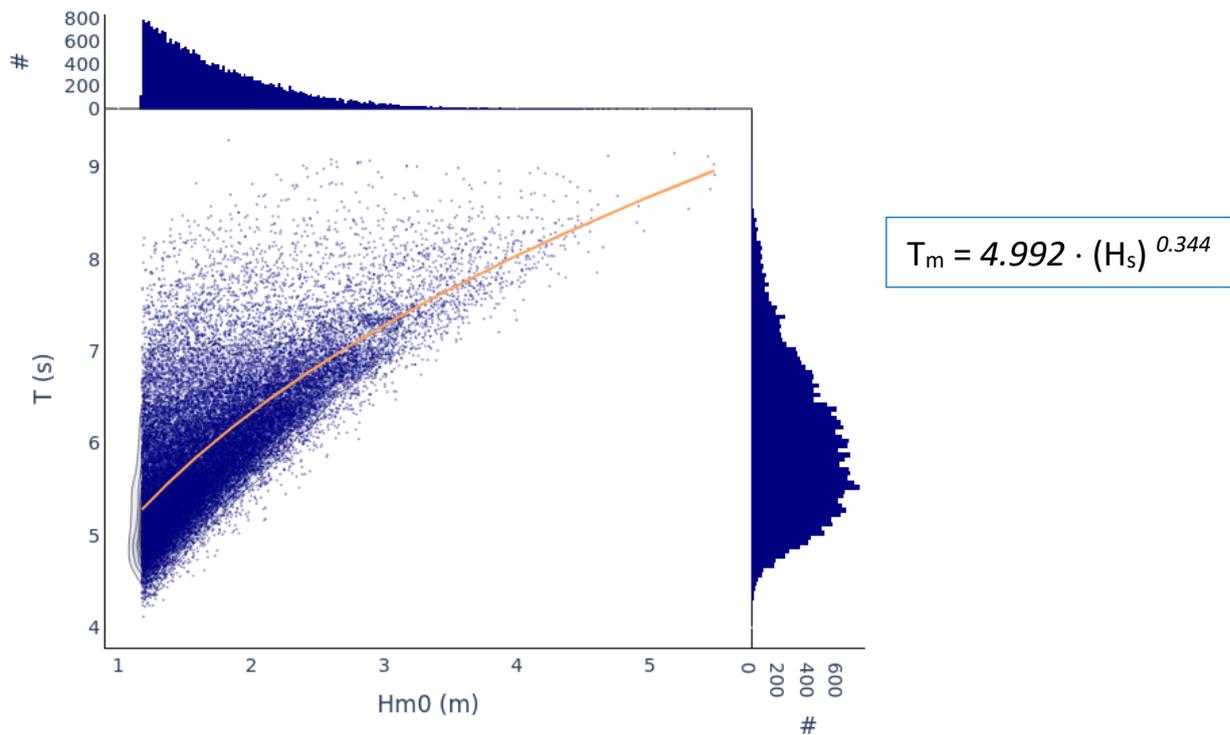


Figura 5-6. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 al largo di Brindisi.  
Settore di traversia principale 112.5-180 °N.

## 6 STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSÒ AL LARGO

Per determinare l'onda di progetto al largo è stata eseguita un'analisi statistica dei valori estremi estratti dalla serie storica dei dati in ricostruzione ERA5 al largo del Porto di Brindisi, nel punto di coordinate 41.00 °N, 18.00 °E, opportunamente **calibrati sulla base del confronto sincrono tra i valori registrati dalla boa RON di Monopoli ed i valori in ricostruzione ERA5 ottenuti in prossimità della boa (4)**.

La serie oraria ricostruita tra il 1979 e il 2021 consente di operare con un campione di dati molto numeroso ed un elevato numero di anni, pari a 42, sia per il caso omnidirezionale che per i settori di traversia principale e secondario.

### 6.1 Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali)

L'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso richiede necessariamente la definizione di criteri per la selezione di un campione rappresentativo delle mareggiate più significative per eseguire un'analisi di inferenza statistica.

L'analisi dei dati meteomarini è normalmente effettuata utilizzando due metodi:

- il metodo del campione totale;
- il metodo ad eventi.

Mentre il primo metodo punta a definire un modello probabilistico rappresentativo di tutti i dati contenuti nel campione originale, il secondo mira a descrivere solo gli eventi più intensi, caratterizzando ciascuno di essi con valori rappresentativi, tipicamente al colmo delle mareggiate. Le procedure di inferenza statistica applicate nell'ingegneria costiera sono tipicamente basate sul metodo ad eventi, impiegato quindi nel presente studio.

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).

Il metodo dei massimi annuali si basa sull'estrazione del massimo valore del parametro di interesse, in questo caso l'altezza d'onda significativa, in una finestra temporale di lunghezza pari ad un anno. La numerosità del campione così prodotto è pari al numero di anni di osservazione. Tipicamente si impiega una finestra temporale coincidente con l'anno meteorologico, che nell'emisfero boreale inizia dal mese di luglio. Il campione così ottenuto tipicamente rispetta le necessarie condizioni di omogeneità e indipendenza dei dati.

Il metodo dei picchi sopra soglia prevede di individuare le mareggiate indipendenti presenti nella serie storica e di formare un campione costituito dai valori di altezza significativa al colmo di ciascuna mareggiata. La definizione di ciascuna mareggiata è evidentemente basata su alcuni criteri, tra i quali il superamento di una soglia, la distanza temporale minima tra ciascuna mareggiata e il mantenimento di una direzione di provenienza del moto ondoso sostanzialmente omogenea nell'ambito dell'evento.

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 l'elevato numero di anni disponibili nei dati meteomarini relativi alle ricostruzioni ERA5 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 ERA5 (1979-2021) nel punto di ricostruzione  $41.00^{\circ}\text{N}$ ,  $18.00^{\circ}\text{E}$  opportunamente calibrati come precedentemente illustrato, sono riportati in Figura 6-1 (analisi omnidirezionale) e in Figura 6-2 (per i tre 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  $270^{\circ}\text{N}$  e  $22.5^{\circ}\text{N}$  - **SETTORE A**
- il settore di traversia secondario compreso tra  $22.5^{\circ}\text{N}$  e  $112.5^{\circ}\text{N}$  - **SETTORE B**
- il settore di traversia secondario compreso tra  $112.5^{\circ}\text{N}$  e  $180^{\circ}\text{N}$  - **SETTORE C**

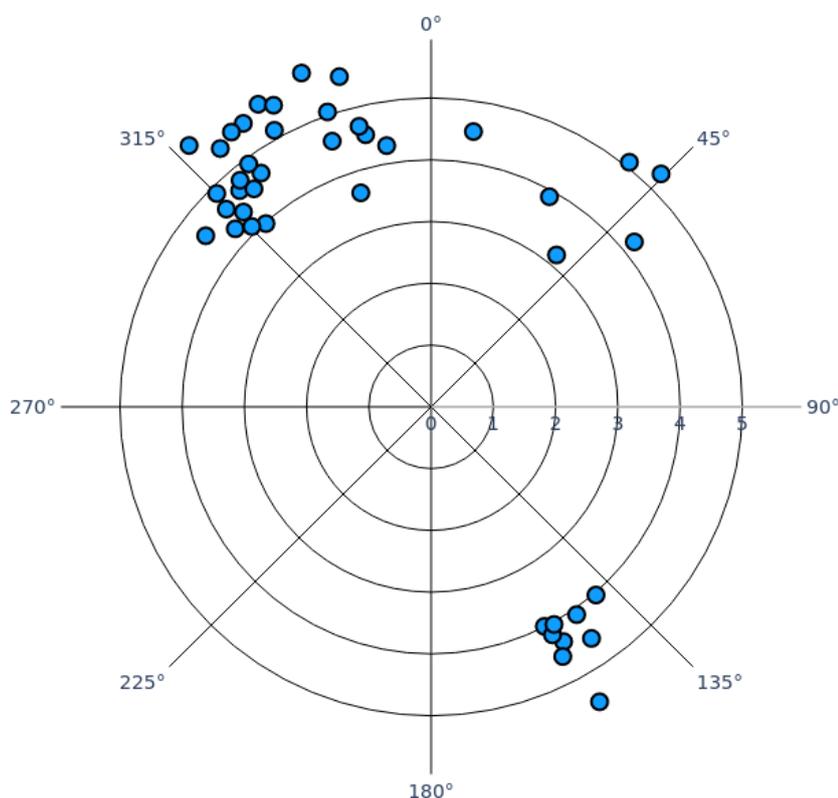


Figura 6-1. Massimi annuali di altezza d'onda significativa al largo di Brindisi nel periodo 1979-2021 ricostruiti da ERA5 e calibrati sulla base del confronto sincrono in corrispondenza della stazione ondometrica RON di Monopoli - Omnidirezionale.

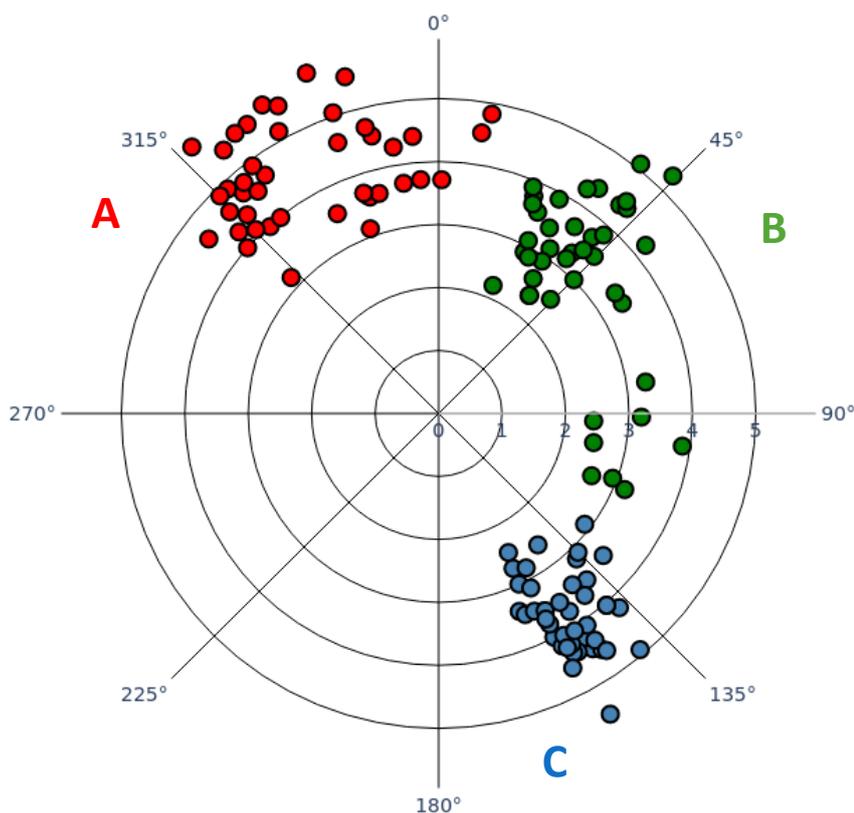


Figura 6-2. Massimi annuali al largo di Brindisi nel periodo 1979-2021 ricostruiti da ERA5 e calibrati sulla base del confronto sincrono in corrispondenza della stazione ondometrica RON di Monopoli – Settori di traversia principale e secondari.

## 6.2 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

La scelta del modello probabilistico per ciascun campione estratto 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). 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.

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 6-3, 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 6-2 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  $\alpha$  (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:

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

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.

### 6.3 Statistica dei valori estremi

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 tre settori di traversia individuati, sono presentati nei grafici e nelle tabelle dei paragrafi che seguono. Per tutti i settori sono stati individuati complessivamente  $N=42$  eventi di mareggiata, applicando il metodo dei massimi annuali.

#### 6.3.1 Settore omnidirezionale

Per l'analisi omnidirezionale (0-360 °N) il campione estratto ha un valore medio di 4.67 m ed una deviazione standard di 0.62 m. La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata il 7 gennaio del 2012 con un valore di altezza significativa al colmo  $H_s = 5.79$  m proveniente da maestrale (339 °N) e periodo medio pari a 9.5 s. Il secondo evento più elevato si è verificato il 15 gennaio del 2004, con  $H_s = 5.75$  m,  $T_m = 9.7$  s proveniente sempre da maestrale (317 °N).

#### 6.3.2 Settore A (270-22.5 °N)

Per il settore A (270-22.5 °N) il campione estratto ha un valore medio di 4.51 m ed una deviazione standard di 0.72 m. La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata il 7 gennaio del 2012 con un valore di altezza significativa al colmo  $H_s = 5.79$  m proveniente da

maestrale (339 °N) e periodo medio pari a 9.5 s. Il secondo evento più elevato si è verificato il 15 gennaio del 2004, con  $H_s = 5.75$  m,  $T_m = 9.7$  s proveniente sempre da maestrale (317 °N).

### **6.3.3 Settore B (22.5-112.5 °N)**

Per il settore B (22.5-112.5 °N) il campione estratto ha un valore medio di 3.43 m ed una deviazione standard di 0.73 m. La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata il 23 febbraio del 2019 con un valore di altezza significativa al colmo  $H_s = 5.28$  m proveniente da grecale (44 °N) e periodo medio pari a 8.8 s. Il secondo evento più elevato si è verificato il primo dicembre del 1983, con  $H_s = 5.08$  m,  $T_m = 8.8$  s proveniente sempre da grecale (39 °N).

### **6.3.4 Settore C (112.5-180 °N)**

Per il settore C (112.5-180 °N) il campione estratto ha un valore medio di 3.79 m ed una deviazione standard di 0.65 m. La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata il 26 marzo del 1992 con un valore di altezza significativa al colmo  $H_s = 5.49$  m proveniente da scirocco (150 °N) e periodo medio pari a 8.9 s. Il secondo evento più elevato si è verificato il primo febbraio del 2012, con  $H_s = 4.92$  m,  $T_m = 8.6$  s proveniente sempre da scirocco (140 °N).

**OMNIDIREZIONALE: 0°N - 360°N**

Tabella 6-1. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti al largo di Brindisi tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 4.37 scale = 0.592	87.25

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2012-01-07 00:00:00	5.79	339	9.5	17.55	349
2	2004-01-15 20:00:00	5.75	317	9.7	17.42	315
3	1981-11-15 23:00:00	5.63	330	9.3	17.46	332
4	2020-02-06 01:00:00	5.55	345	9.2	17.58	-6
5	1983-01-31 18:00:00	5.5	333	8.8	18.77	346
6	1980-01-01 07:00:00	5.49	327	9.4	16.69	331
7	1992-03-26 14:00:00	5.49	150	8.9	18.94	159
8	2009-10-13 06:00:00	5.49	324	9.4	16.36	327
9	1999-06-22 18:00:00	5.38	321	9.4	16.75	325
10	2019-02-23 12:00:00	5.28	44	8.8	16.74	58
11	2018-01-18 03:00:00	5.14	331	8.9	17.06	338
12	1983-12-01 21:00:00	5.08	39	8.8	16.13	40
13	1981-01-16 23:00:00	5.06	341	9.0	16.88	346
14	2013-03-21 20:00:00	4.91	323	8.8	16.31	328
15	1986-12-20 02:00:00	4.88	315	8.6	16.54	313
16	2021-03-15 16:00:00	4.78	320	8.8	16.23	323
17	2016-12-28 18:00:00	4.69	346	8.4	15.83	-1
18	2007-02-13 22:00:00	4.67	324	8.8	16.09	330
19	1995-03-28 21:00:00	4.66	319	8.3	15.88	320
20	1990-02-13 13:00:00	4.59	314	8.8	15.97	312
21	2001-11-24 14:00:00	4.59	340	8.6	15.33	342
22	1990-12-10 10:00:00	4.56	152	8.5	16.83	161
23	1993-03-28 10:00:00	4.56	307	9.1	14.82	294
24	1986-02-01 02:00:00	4.55	146	8.3	17.15	150
25	2014-05-14 17:00:00	4.53	321	8.7	15.33	319
26	1994-01-29 17:00:00	4.53	347	8.6	15.74	-2
27	2008-02-16 20:00:00	4.51	9	8.3	14.77	21
28	1999-11-23 23:00:00	4.36	316	8.3	15.66	316
29	1987-11-24 23:00:00	4.36	151	8.2	16.29	161
30	1997-02-28 14:00:00	4.29	350	8.3	14.97	4
31	1989-03-02 13:00:00	4.27	312	8.4	15.53	308
32	2006-01-24 01:00:00	4.22	51	8.2	14.44	55
33	2004-12-26 11:00:00	4.18	152	8.1	15.36	162
34	2001-06-04 11:00:00	4.1	315	8.4	14.02	315
35	2009-03-05 05:00:00	4.1	145	8.0	15.84	153
36	2016-02-29 05:00:00	4.04	151	8.4	14.41	162
37	2015-02-22 12:00:00	4.04	139	7.9	16.09	141
38	1997-12-20 12:00:00	3.99	153	8.0	15.75	164
39	1995-11-18 22:00:00	3.98	318	7.5	16.16	332
40	2011-03-08 00:00:00	3.9	29	7.8	14.27	36
41	1985-02-24 21:00:00	3.65	342	7.6	14.42	7
42	2003-01-11 21:00:00	3.18	39	7.3	12.51	26

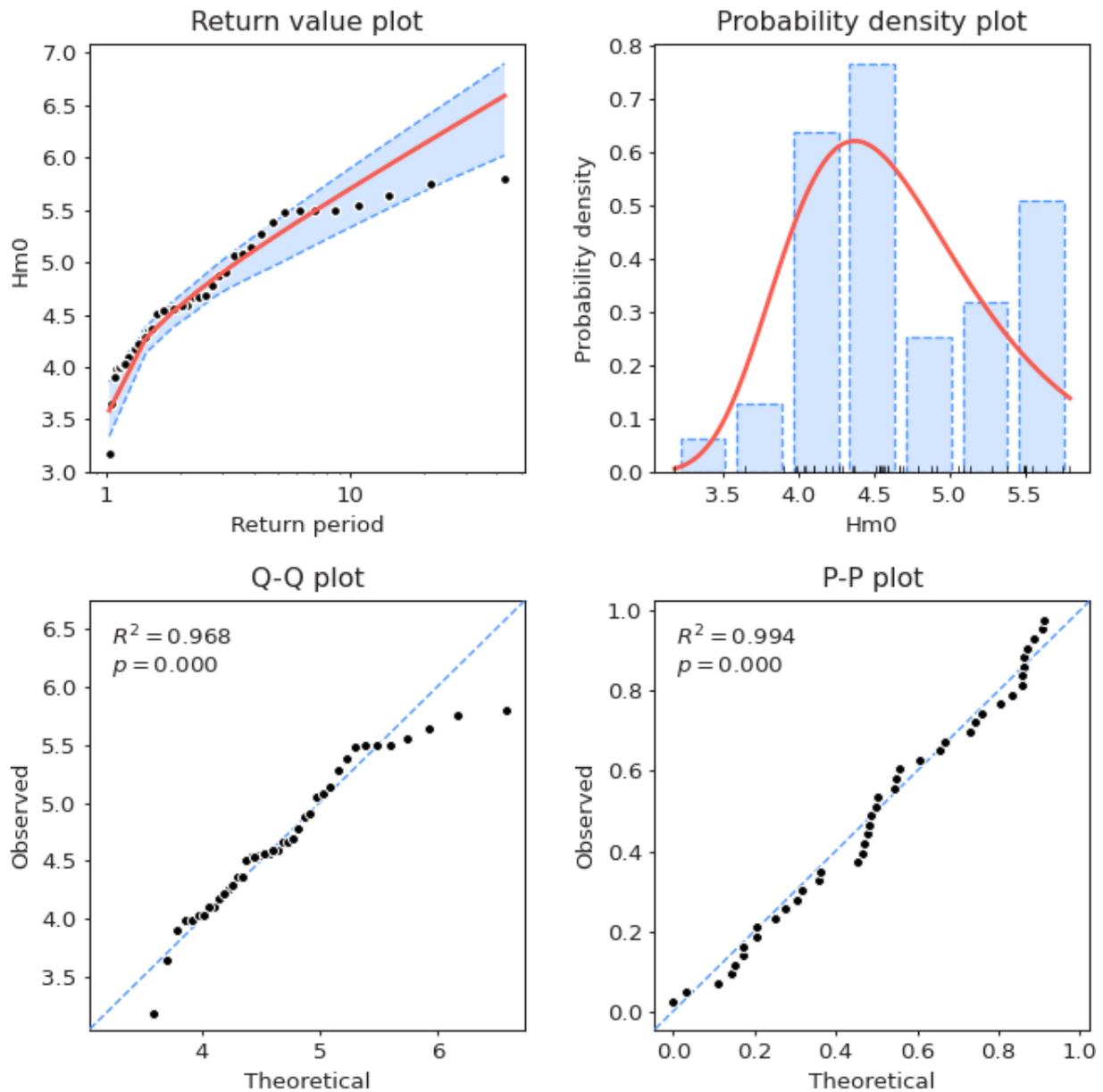


Figura 6-3. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione  $R^2$  e del p-value.

**Tabella 6-2. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) – Altezze d'onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.**

<b>SETTORE: 0.0 – 360.0°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>3.47</b>	3.2	3.76
5	<b>5.26</b>	4.98	5.4
10	<b>5.7</b>	5.33	5.9
20	<b>6.13</b>	5.67	6.38
30	<b>6.37</b>	5.86	6.65
40	<b>6.55</b>	5.99	6.85
50	<b>6.68</b>	6.08	7.0
100	<b>7.09</b>	6.38	7.47
150	<b>7.33</b>	6.55	7.75
200	<b>7.5</b>	6.68	7.94
250	<b>7.64</b>	6.77	8.09
300	<b>7.74</b>	6.85	8.21
400	<b>7.91</b>	6.97	8.41
500	<b>8.05</b>	7.06	8.56

**SETTORE A: 270°N – 22.5°N**

Tabella 6-3. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti al largo di Brindisi tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 4.153 scale = 0.662	98.61

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2012-01-07 00:00:00	5.79	339	9.5	17.55	349
2	2004-01-15 20:00:00	5.75	317	9.7	17.42	315
3	1981-11-15 23:00:00	5.63	330	9.3	17.46	332
4	2020-02-06 01:00:00	5.55	345	9.2	17.58	-6
5	1983-01-31 18:00:00	5.5	333	8.8	18.77	346
6	1980-01-01 07:00:00	5.49	327	9.4	16.69	331
7	2009-10-13 06:00:00	5.49	324	9.4	16.36	327
8	1999-06-22 18:00:00	5.38	321	9.4	16.75	325
9	2018-01-18 03:00:00	5.14	331	8.9	17.06	338
10	1981-01-16 23:00:00	5.06	341	9.0	16.88	346
11	2013-03-21 20:00:00	4.91	323	8.8	16.31	328
12	1986-12-20 02:00:00	4.88	315	8.6	16.54	313
13	1984-01-25 07:00:00	4.87	317	9.0	17.02	324
14	2019-03-12 10:00:00	4.83	10	8.4	16.18	18
15	2021-03-15 16:00:00	4.78	320	8.8	16.23	323
16	2016-12-28 18:00:00	4.69	346	8.4	15.83	-1
17	2007-02-13 22:00:00	4.67	324	8.8	16.09	330
18	1995-03-28 21:00:00	4.66	319	8.3	15.88	320
19	1990-02-13 13:00:00	4.59	314	8.8	15.97	312
20	2001-11-24 14:00:00	4.59	340	8.6	15.33	342
21	1993-03-28 10:00:00	4.56	307	9.1	14.82	294
22	2014-05-14 17:00:00	4.53	321	8.7	15.33	319
23	1994-01-29 17:00:00	4.53	347	8.6	15.74	-2
24	2008-02-16 20:00:00	4.51	9	8.3	14.77	21
25	1991-12-08 04:00:00	4.42	-5	8.5	15.39	4
26	1999-11-23 23:00:00	4.36	316	8.3	15.66	316
27	1997-02-28 14:00:00	4.29	350	8.3	14.97	4
28	1989-03-02 13:00:00	4.27	312	8.4	15.53	308
29	2001-06-04 11:00:00	4.1	315	8.4	14.02	315
30	2006-04-12 09:00:00	4.0	311	7.9	15.62	309
31	2016-04-26 00:00:00	3.98	321	7.9	15.33	323
32	1995-11-18 22:00:00	3.98	318	7.5	16.16	332
33	2005-02-03 04:00:00	3.72	-4	7.6	13.86	3
34	2010-12-10 23:00:00	3.71	1	7.8	13.73	5
35	2008-12-21 18:00:00	3.7	351	7.4	14.78	0
36	2015-01-12 04:00:00	3.69	341	7.3	15.38	349
37	1985-02-24 21:00:00	3.65	342	7.6	14.42	7
38	1998-03-11 10:00:00	3.62	345	8.4	11.91	342
39	1986-01-17 01:00:00	3.6	343	7.2	14.81	347
40	1988-02-01 06:00:00	3.55	333	7.5	14.09	339
41	2003-02-05 22:00:00	3.17	313	7.6	12.84	312
42	1990-09-12 21:00:00	3.12	340	7.1	13.49	351

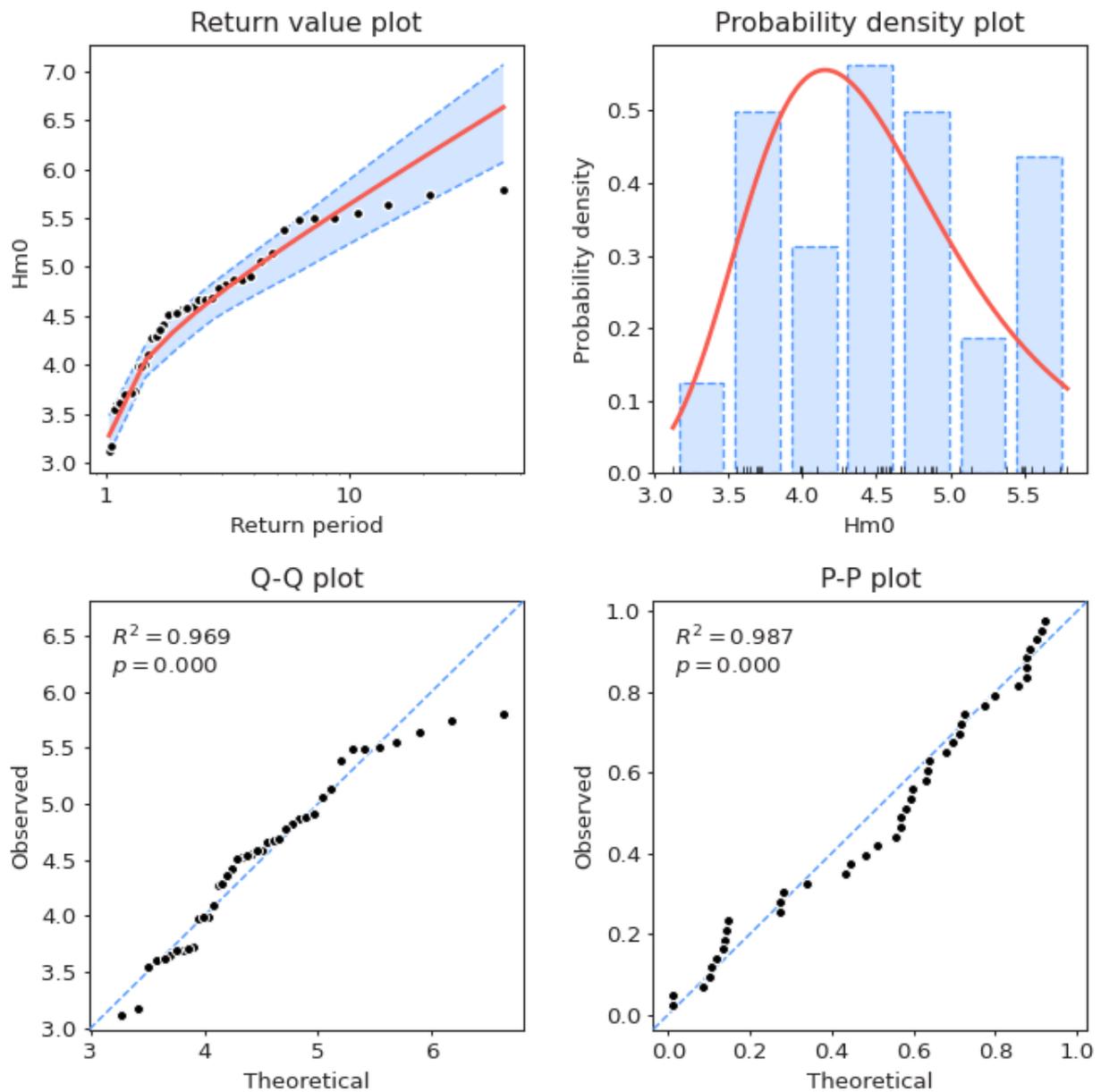


Figura 6-4. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione  $R^2$  e del p-value.

**Tabella 6-4. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) – Altezze d'onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.**

<b>SETTORE: 270.0 – 22.5°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>3.14</b>	2.93	3.36
5	<b>5.15</b>	4.83	5.32
10	<b>5.64</b>	5.24	5.9
20	<b>6.12</b>	5.64	6.46
30	<b>6.39</b>	5.87	6.78
40	<b>6.59</b>	6.03	7.01
50	<b>6.74</b>	6.16	7.19
100	<b>7.2</b>	6.55	7.72
150	<b>7.47</b>	6.77	8.03
200	<b>7.66</b>	6.92	8.25
250	<b>7.81</b>	7.04	8.42
300	<b>7.93</b>	7.14	8.56
400	<b>8.12</b>	7.29	8.78
500	<b>8.27</b>	7.41	8.95

**SETTORE B: 22.5°N – 112.5°N**

Tabella 6-5. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti al largo di Brindisi tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 3.085 scale = 0.618	94.86

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
<b>1</b>	<b>2019-02-23 12:00:00</b>	<b>5.28</b>	<b>44</b>	<b>8.8</b>	<b>16.74</b>	<b>58</b>
<b>2</b>	<b>1983-12-01 21:00:00</b>	<b>5.08</b>	<b>39</b>	<b>8.8</b>	<b>16.13</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>2003-12-23 21:00:00</b>	<b>4.48</b>	<b>41</b>	<b>8.6</b>	<b>13.93</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>1995-01-14 10:00:00</b>	<b>4.4</b>	<b>42</b>	<b>8.3</b>	<b>15.57</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>2002-01-04 07:00:00</b>	<b>4.37</b>	<b>35</b>	<b>8.2</b>	<b>15.39</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>1981-01-08 20:00:00</b>	<b>4.37</b>	<b>41</b>	<b>8.3</b>	<b>14.99</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>2021-02-15 04:00:00</b>	<b>4.27</b>	<b>33</b>	<b>8.1</b>	<b>15.29</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>2006-01-24 01:00:00</b>	<b>4.22</b>	<b>51</b>	<b>8.2</b>	<b>14.44</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>2011-03-08 00:00:00</b>	<b>3.9</b>	<b>29</b>	<b>7.8</b>	<b>14.27</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>2008-02-17 07:00:00</b>	<b>3.89</b>	<b>23</b>	<b>8.2</b>	<b>12.93</b>	<b>31</b>
11	1998-11-22 23:00:00	3.88	98	7.6	14.63	109
12	2015-01-01 00:00:00	3.85	43	7.8	14.58	36
13	1991-12-07 10:00:00	3.76	24	8.0	12.9	16
14	1998-03-25 23:00:00	3.7	41	7.6	14.81	34
15	2012-02-07 10:00:00	3.66	36	7.8	14.37	44
16	2016-12-29 11:00:00	3.64	24	7.8	14.08	35
17	1983-01-21 07:00:00	3.56	26	7.6	13.13	39
18	2000-02-10 11:00:00	3.5	45	7.5	13.82	55
19	2019-12-30 09:00:00	3.46	41	7.3	13.56	46
20	1987-03-04 08:00:00	3.43	31	7.9	12.15	34
21	1992-12-28 18:00:00	3.38	59	7.7	12.74	70
22	2001-01-14 08:00:00	3.38	56	7.6	13.33	65
23	1990-12-06 12:00:00	3.3	40	7.4	13.73	28
24	2013-12-01 15:00:00	3.3	81	7.9	11.81	91
25	1994-02-14 11:00:00	3.2	91	7.4	12.86	79
26	2003-01-11 21:00:00	3.18	39	7.3	12.51	26
27	1980-03-06 21:00:00	3.17	112	7.2	14.08	121
28	1996-12-26 22:00:00	3.15	34	7.5	12.65	35
29	2006-11-11 03:00:00	3.09	27	7.1	12.81	33
30	1988-12-17 02:00:00	3.01	45	7.5	11.47	54
31	2008-12-12 04:00:00	2.93	111	7.7	11.76	112
32	2005-01-16 09:00:00	2.92	34	7.0	12.09	43
33	1995-11-21 10:00:00	2.9	28	6.9	12.08	37
34	2018-03-22 13:00:00	2.86	30	7.0	11.74	19
35	1981-11-08 21:00:00	2.61	35	6.8	11.6	31
36	2010-02-10 11:00:00	2.61	112	6.7	12.07	132
37	2015-12-30 23:00:00	2.53	44	6.8	11.25	43
38	1984-11-13 20:00:00	2.49	101	6.8	11.26	99
39	2012-11-20 02:00:00	2.45	93	6.5	11.86	89
40	1987-11-05 00:00:00	2.36	37	6.5	11.12	33
41	1985-10-17 01:00:00	2.36	37	6.4	10.84	40
42	1990-03-04 09:00:00	2.21	23	6.4	10.09	23

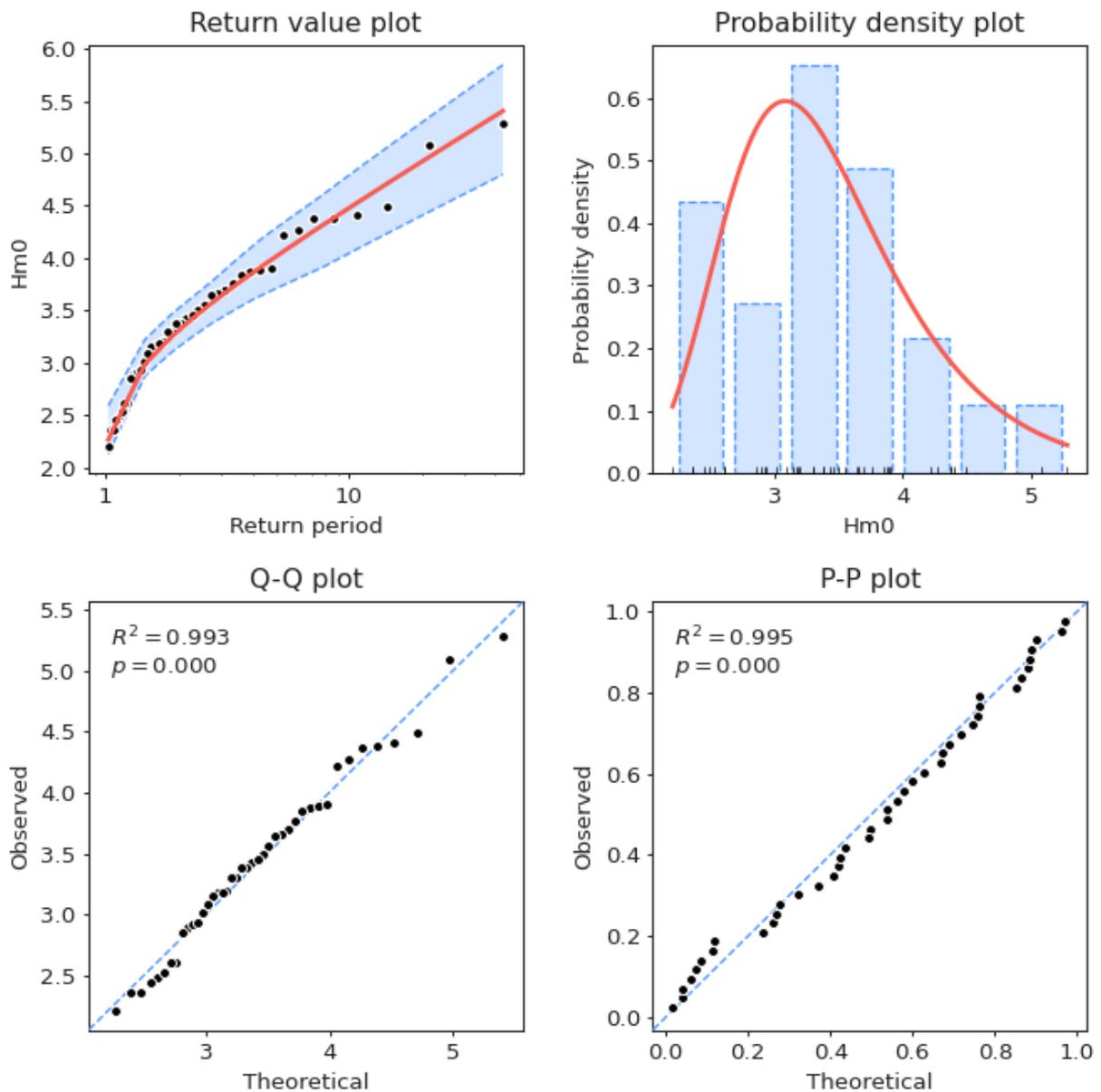


Figura 6-5. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di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

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

<b>SETTORE: 22.5 – 112.5°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>2.14</b>	1.93	2.33
5	<b>4.01</b>	3.76	4.27
10	<b>4.48</b>	4.18	4.78
20	<b>4.92</b>	4.57	5.27
30	<b>5.18</b>	4.79	5.56
40	<b>5.36</b>	4.94	5.76
50	<b>5.5</b>	5.06	5.92
100	<b>5.93</b>	5.42	6.41
150	<b>6.18</b>	5.63	6.7
200	<b>6.36</b>	5.78	6.9
250	<b>6.5</b>	5.89	7.06
300	<b>6.61</b>	5.99	7.19
400	<b>6.79</b>	6.14	7.39
500	<b>6.93</b>	6.25	7.55

**SETTORE C: 112.5°N – 180°N**

Tabella 6-7. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti al largo di Brindisi tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 3.47 scale = 0.615	91.5

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
<b>1</b>	<b>1992-03-26 14:00:00</b>	<b>5.49</b>	<b>150</b>	<b>8.9</b>	<b>18.94</b>	<b>159</b>
<b>2</b>	<b>2012-02-01 15:00:00</b>	<b>4.92</b>	<b>140</b>	<b>8.6</b>	<b>17.17</b>	<b>144</b>
<b>3</b>	<b>2019-11-12 10:00:00</b>	<b>4.6</b>	<b>145</b>	<b>7.9</b>	<b>18.98</b>	<b>158</b>
<b>4</b>	<b>1990-12-10 10:00:00</b>	<b>4.56</b>	<b>152</b>	<b>8.5</b>	<b>16.83</b>	<b>161</b>
<b>5</b>	<b>1986-02-01 02:00:00</b>	<b>4.55</b>	<b>146</b>	<b>8.3</b>	<b>17.15</b>	<b>150</b>
<b>6</b>	<b>1980-01-15 23:00:00</b>	<b>4.46</b>	<b>147</b>	<b>8.5</b>	<b>15.99</b>	<b>152</b>
<b>7</b>	<b>1987-01-14 17:00:00</b>	<b>4.38</b>	<b>150</b>	<b>8.3</b>	<b>16.46</b>	<b>158</b>
<b>8</b>	<b>2001-11-13 07:00:00</b>	<b>4.36</b>	<b>146</b>	<b>8.1</b>	<b>16.69</b>	<b>166</b>
<b>9</b>	<b>1987-11-24 23:00:00</b>	<b>4.36</b>	<b>151</b>	<b>8.2</b>	<b>16.29</b>	<b>161</b>
<b>10</b>	<b>1984-05-20 20:00:00</b>	<b>4.24</b>	<b>147</b>	<b>7.7</b>	<b>17.42</b>	<b>142</b>
11	2018-03-17 09:00:00	4.24	151	8.0	17.0	165
12	2010-01-08 15:00:00	4.22	150	8.2	16.35	159
13	1992-10-04 10:00:00	4.2	137	8.3	14.06	154
14	2004-12-26 11:00:00	4.18	152	8.1	15.36	162
15	2009-03-05 05:00:00	4.1	145	8.0	15.84	153
16	2019-02-02 21:00:00	4.06	148	7.9	16.8	153
17	2016-02-29 05:00:00	4.04	151	8.4	14.41	162
18	2015-02-22 12:00:00	4.04	139	7.9	16.09	141
19	2013-02-22 12:00:00	4.04	139	7.9	4.8	312
20	1997-12-20 12:00:00	3.99	153	8.0	15.75	164
21	2003-11-02 01:00:00	3.78	152	7.6	16.09	159
22	1983-03-25 23:00:00	3.76	147	8.2	14.82	159
23	2020-12-06 18:00:00	3.7	141	7.5	15.13	148
24	2011-03-17 03:00:00	3.68	153	7.8	14.38	170
25	2014-02-11 20:00:00	3.56	148	7.6	14.92	159
26	2000-10-01 15:00:00	3.55	152	7.6	15.0	154
27	1989-02-24 23:00:00	3.55	152	7.6	14.39	170
28	1981-12-22 17:00:00	3.53	139	7.8	14.76	149
29	1996-11-18 12:00:00	3.48	154	7.4	15.26	166
30	1993-12-26 14:00:00	3.47	157	7.3	15.26	166
31	1998-12-04 05:00:00	3.44	142	7.7	13.31	154
32	1995-12-13 11:00:00	3.44	131	7.5	14.63	132
33	1981-01-13 23:00:00	3.39	158	8.0	15.21	179
34	1984-11-15 17:00:00	3.17	137	7.6	14.49	147
35	2003-01-07 06:00:00	3.13	152	7.4	13.47	177
36	1994-12-20 21:00:00	3.11	135	7.3	15.42	141
37	2000-04-04 22:00:00	2.99	155	7.0	13.28	170
38	2006-09-26 13:00:00	2.9	127	6.8	12.4	136
39	2017-05-12 03:00:00	2.81	151	6.8	11.98	162
40	2006-04-11 04:00:00	2.73	154	6.9	12.99	165
41	2008-01-05 01:00:00	2.61	143	6.8	13.33	151
42	1989-12-19 09:00:00	2.47	154	6.7	12.9	166

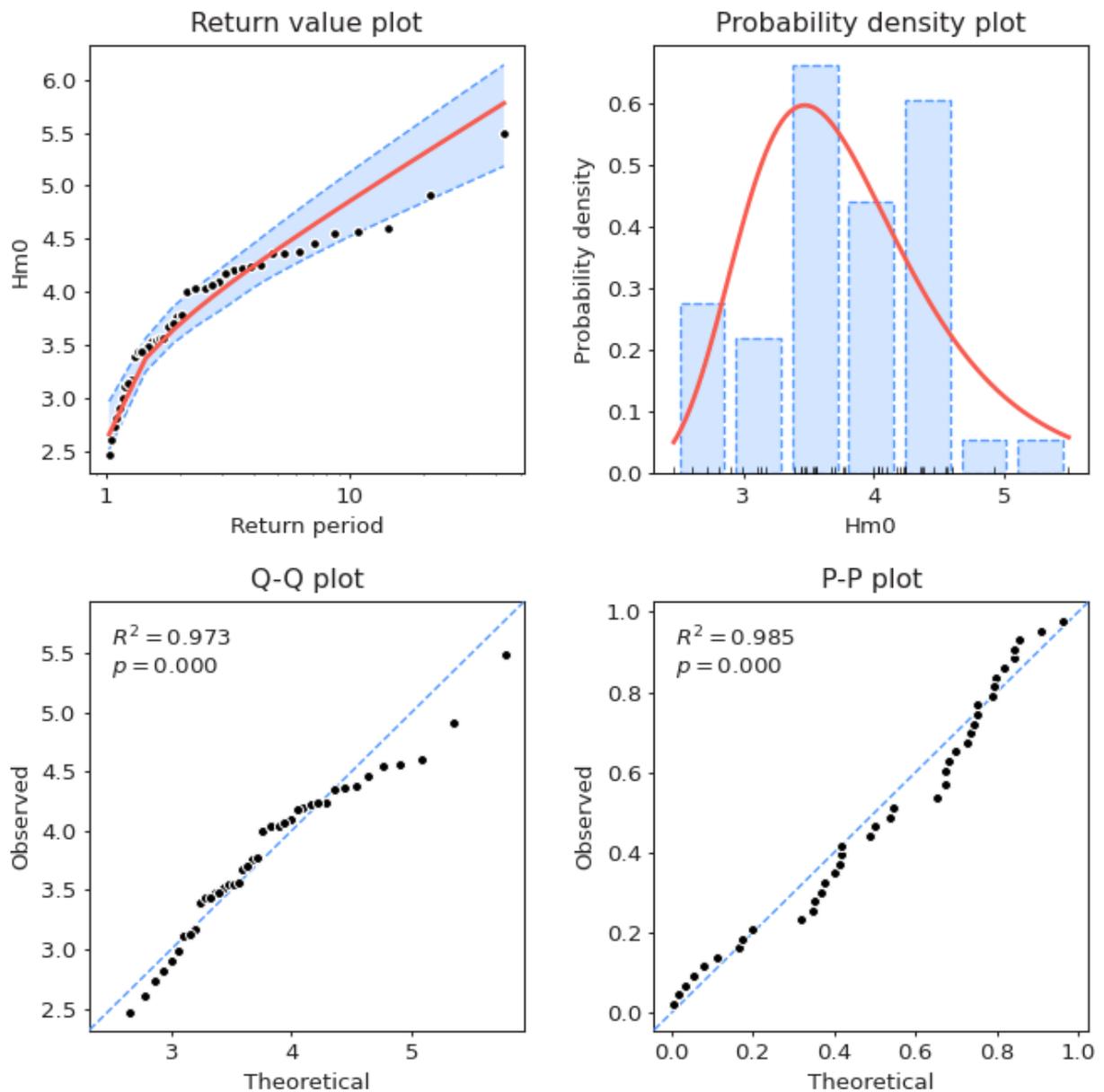


Figura 6-6. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di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

**Tabella 6-8. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) – Altezze d'onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.**

<b>SETTORE: 112.5 – 180.0°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>2.53</b>	2.38	2.87
5	<b>4.39</b>	4.17	4.62
10	<b>4.85</b>	4.52	5.13
20	<b>5.3</b>	4.84	5.61
30	<b>5.55</b>	5.02	5.89
40	<b>5.73</b>	5.15	6.09
50	<b>5.87</b>	5.25	6.24
100	<b>6.3</b>	5.58	6.71
150	<b>6.55</b>	5.77	6.99
200	<b>6.73</b>	5.91	7.19
250	<b>6.87</b>	6.02	7.35
300	<b>6.98</b>	6.1	7.47
400	<b>7.16</b>	6.24	7.67
500	<b>7.29</b>	6.34	7.82

## 6.4 Conclusioni

I risultati ottenuti a seguito dell'analisi dei valori estremi nel punto di ricostruzione ERA5 hanno consentito di determinare i valori di altezza d'onda significativa  $H_s$  e periodo medi  $T_m$  (calcolati con le formule di correlazione altezze-periodi ricavate nel paragrafo 5.3 ) associati a prefissati tempi di ritorno per l'esposizione ondosa omnidirezionale e per i tre distinti settori di traversia che caratterizzano il paraggio in esame.

Tabella 6-9. Eventi estremi di moto ondoso al largo di Brindisi nel punto ERA5 di coordinate 41.00 °N, 18.00 °E

Tempo di ritorno	0 - 360 °N		SETTORE A 270.0 – 22.5 °N		SETTORE B 22.5 – 112.5 °N		SETTORE C 112.5 – 180.0 °N	
	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm
[anni]	[m]	[s]	[m]	[s]	[m]	[s]	[m]	[s]
1	<b>3.47</b>	7.68	<b>3.14</b>	7.42	<b>2.14</b>	6.49	<b>2.53</b>	6.87
5	<b>5.26</b>	8.92	<b>5.15</b>	8.92	<b>4.01</b>	7.99	<b>4.39</b>	8.30
10	<b>5.7</b>	9.18	<b>5.64</b>	9.23	<b>4.48</b>	8.29	<b>4.85</b>	8.59
20	<b>6.13</b>	9.43	<b>6.12</b>	9.51	<b>4.92</b>	8.55	<b>5.3</b>	8.86
30	<b>6.37</b>	9.56	<b>6.39</b>	9.67	<b>5.18</b>	8.70	<b>5.55</b>	9.00
40	<b>6.55</b>	9.65	<b>6.59</b>	9.78	<b>5.36</b>	8.80	<b>5.73</b>	9.10
50	<b>6.68</b>	9.72	<b>6.74</b>	9.86	<b>5.5</b>	8.87	<b>5.87</b>	9.18
100	<b>7.09</b>	9.93	<b>7.2</b>	10.11	<b>5.93</b>	9.10	<b>6.3</b>	9.40
150	<b>7.33</b>	10.05	<b>7.47</b>	10.25	<b>6.18</b>	9.22	<b>6.55</b>	9.53
200	<b>7.5</b>	10.14	<b>7.66</b>	10.35	<b>6.36</b>	9.31	<b>6.73</b>	9.62
250	<b>7.64</b>	10.21	<b>7.81</b>	10.42	<b>6.5</b>	9.38	<b>6.87</b>	9.69
300	<b>7.74</b>	10.25	<b>7.93</b>	10.48	<b>6.61</b>	9.43	<b>6.98</b>	9.74
400	<b>7.91</b>	10.33	<b>8.12</b>	10.57	<b>6.79</b>	9.52	<b>7.16</b>	9.83
500	<b>8.05</b>	10.40	<b>8.27</b>	10.65	<b>6.93</b>	9.58	<b>7.29</b>	9.89

## 7 CLIMA DI MOTO ONDOSO IN PROSSIMITÀ DEL PORTO

Per definire le condizioni di moto ondoso in prossimità del Porto di Brindisi è stato necessario effettuare una propagazione del moto ondoso da largo verso riva utilizzando un modello matematico/numerico. Le informazioni su clima ed estremi di moto ondoso sono infatti desunte dalla serie storica ricostruita nel punto di griglia del modello ERA5, che dista circa 20 miglia nautiche dalle opere di difesa del porto. In generale è opportuno derivare, a partire da tale serie storica, informazioni riferibili a posizioni più prossime alla costa, che possano a tutti gli effetti essere sfruttate per la valutazione delle condizioni di moto ondoso incidente sul litorale. Nel presente studio, come illustrato più nel dettaglio nel seguito, si è scelto un punto P0 situato sulla batimetrica -30 m (Figura 7-1).

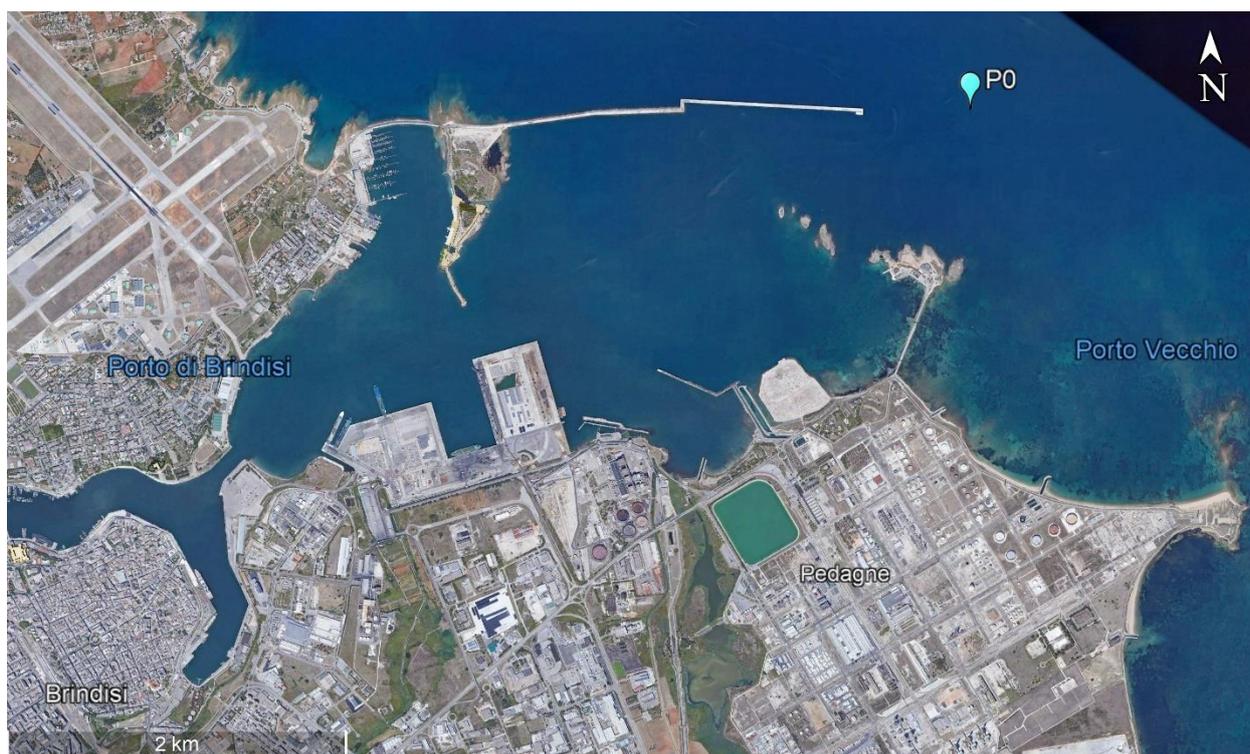


Figura 7-1. Posizione del punto P0 (coordinate 18.004 °E - 40.663 °N).

A tal fine è stato necessario in primo luogo scegliere il modello numerico più appropriato per lo studio in questione. La scelta del modello numerico viene normalmente effettuata a valle di una attenta analisi dei principali fenomeni fisici che condizionano l'evoluzione delle onde durante la loro propagazione.

Per quanto riguarda i meccanismi che possono influenzare la propagazione delle onde sui fondali via via decrescenti, che "collegano" il mare aperto alla zona di intervento, la regolarità dell'andamento delle linee batimetriche, che caratterizzano il litorale in esame, permette di ritenere che essi siano costituiti in modo dominante dalla rifrazione e dallo shoaling e che possano essere ritenuti trascurabili i processi diffrattivi (diffrazione esterna ed interna).

Per quanto riguarda i processi dissipativi (attrito sul fondo e frangimento), nel caso in esame, si può affermare che la loro importanza diventa rilevante solo su fondali aventi profondità inferiori a 10÷15 m.

Sulla base delle considerazioni appena effettuate si è scelto, per la propagazione sotto costa della serie di dati di moto ondoso, di utilizzare un modello di rifrazione inversa spettrale, capace di ben considerare tutti i fenomeni di interesse.

### 7.1 Dominio di calcolo

In Figura 7-2 è rappresentato il dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni effettuate con il modello di rifrazione inversa spettrale. La profondità nell'area considerata è stata definita sulla base dei dati batimetrici forniti dal servizio GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) e delle carte nautiche disponibili nell'area in esame.

Il sistema di riferimento selezionato per le simulazioni è di tipo sferico, ovvero sono impiegate le coordinate geografiche (latitudine, longitudine). Il dominio di calcolo ha forma rettangolare e lati allineati con le direzioni Est e Nord. Lo spigolo Sud-Ovest è nella posizione  $17.53^{\circ}\text{E} - 40.32^{\circ}\text{N}$ ; il dominio si estende per  $0.83^{\circ}$  di longitudine verso Est e  $0.68^{\circ}$  di latitudine verso Nord.

All'interno della griglia di calcolo è stato selezionato il punto P0 dal quale partono i raggi di ricostruzione previsti dal modello di propagazione inversa.

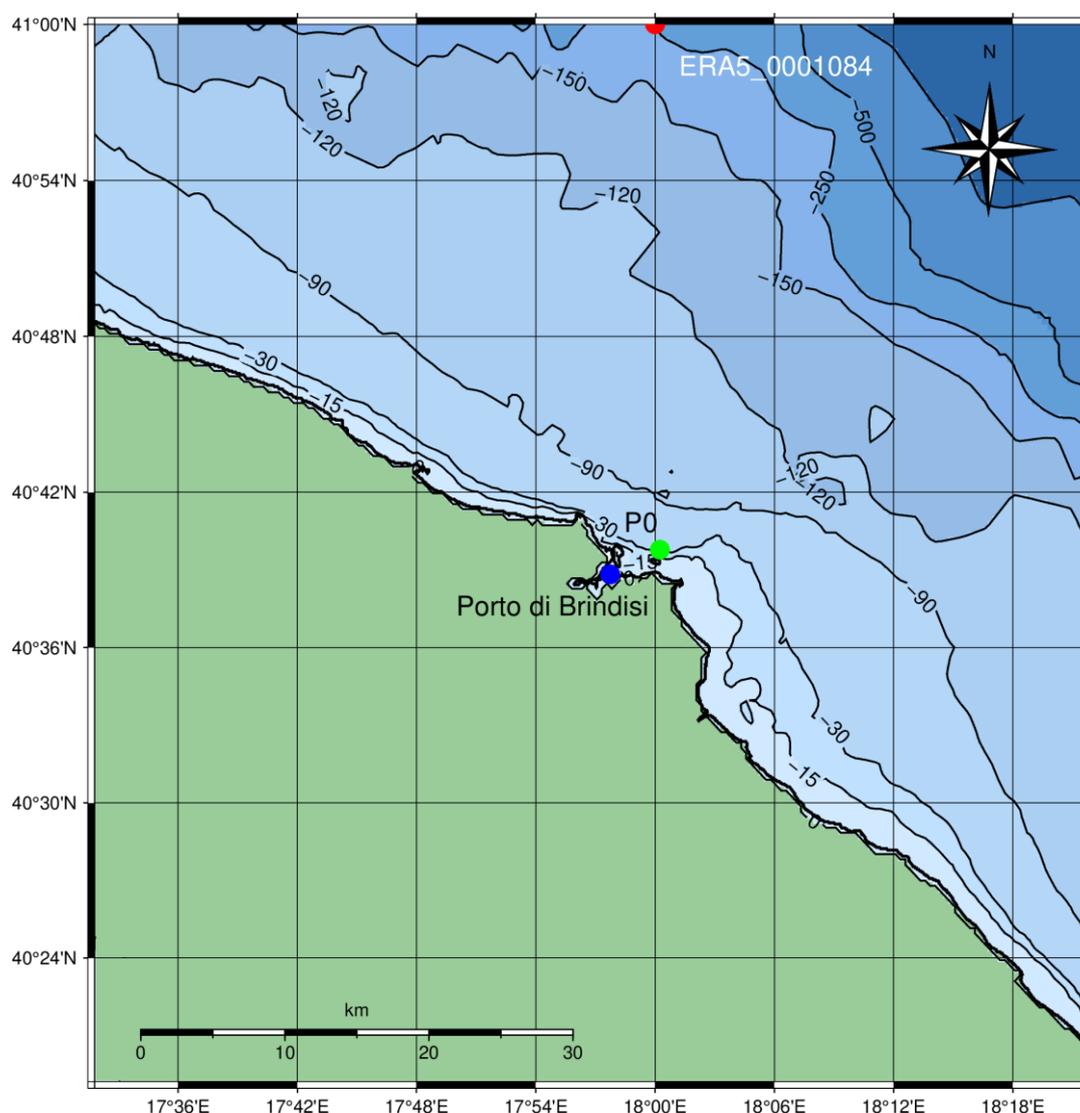


Figura 7-2. Dominio di calcolo utilizzato nel modello di rifrazione inversa spettrale e posizione (punto verde) del punto P0 in corrispondenza del quale sono stati calcolati i raggi di ricostruzione previsti dal modello. Si noti che non sono riportate in figura le opere portuali esterne

## 7.2 Condizioni al contorno e ipotesi di calcolo

Per i punti scelti sono stati calcolati 20 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spazati di 0.5°, sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia effettivo sottocosta.

I 4000 piani d'onda inversi (20 x 200) così calcolati hanno consentito di costruire un database di correlazione. Mediante questo database l'intera serie storica dei dati ERA5 calibrata al largo di Brindisi è stata propagata sotto costa nel punto P0 prescelto.

Per simulare la dispersione dell'energia in frequenza e direzione si è utilizzata la funzione densità spettrale:

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta)$$

Dove la funzione  $S(f)$  è stata espressa con uno spettro di tipo JONSWAP con  $\gamma = 3.3$ .

La funzione  $G(f, \theta)$ , viene esplicitata nel modello di calcolo sulla base dell'equazione fornita da Goda ponendo  $S_{max}=18$  (onde di mare vivo). Si ricorda che le "onde di mare vivo" (sea), tipiche dell'area di generazione (fetch), hanno un'elevata dispersione direzionale dell'energia e per tale ragione vengono anche chiamate "onde a cresta corta".

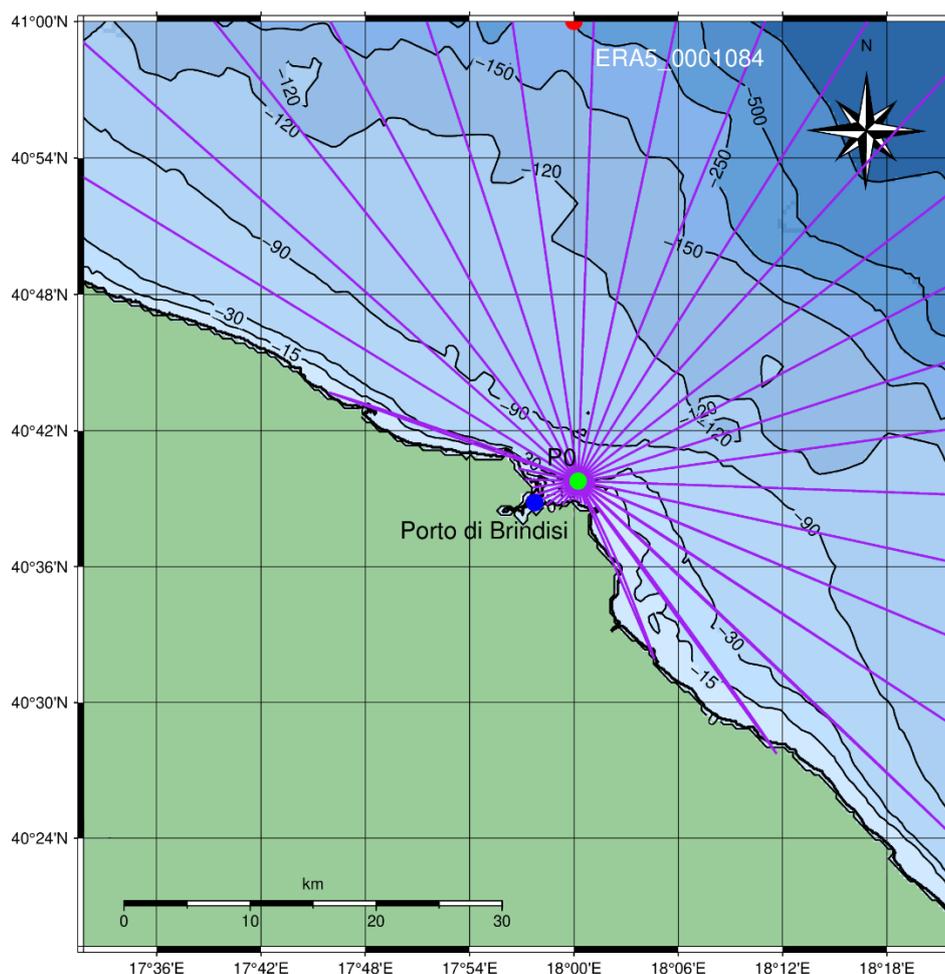


Figura 7-3. Raggi di ricostruzione previsti dal modello per T=6.1s. Si noti che non sono riportate in figura le opere portuali

esterne

### 7.3 Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda e direzione

L'applicazione del modello di rifrazione inversa spettrale ha consentito di propagare nel punto P0 tutti gli stati di mare della serie storica 1979-2021 al largo di Brindisi e di valutare pertanto le caratteristiche del clima di moto ondoso in prossimità del porto.

Confrontando le rose delle onde, sia annuali che stagionali, del punto ERA5 al largo con quelle relative al punto di propagazione P0 (Figura 7-4), risulta evidente che il settore di maestrale non presenta significative variazioni sia in termini di frequenza che intensità degli stati di mare, mentre il settore di scirocco subisce una leggera deviazione verso Est (stabilizzandosi sui 315°N), imputabile alla presenza della costa, accompagnata da prevedibili riduzioni in termini di altezze d'onda e frequenze degli stati di mare.

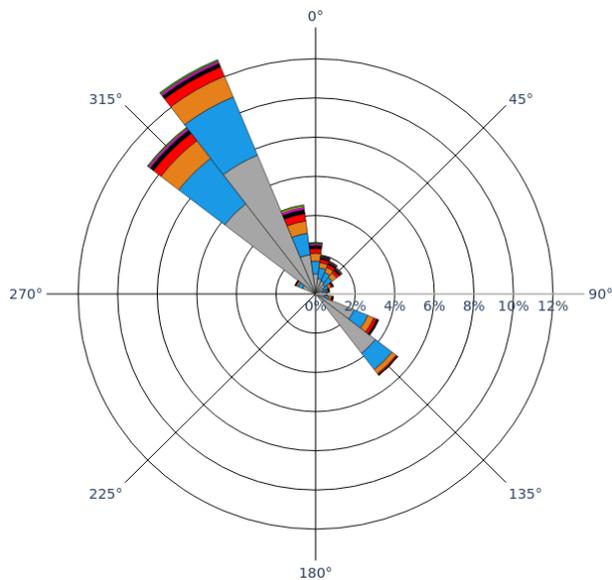
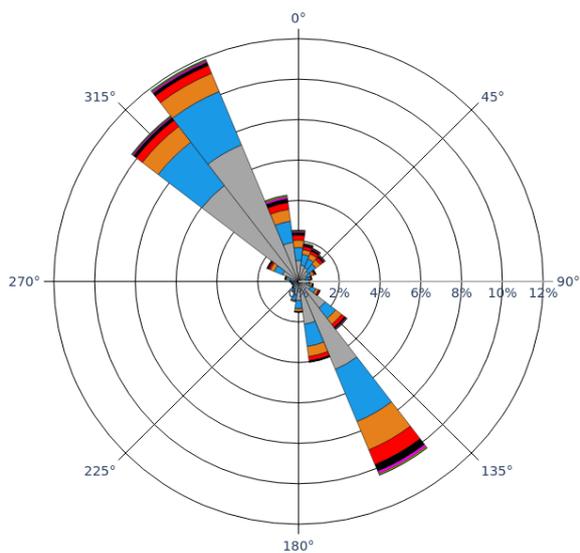
Dal punto di vista dell'esposizione ondosa il paraggio conferma la presenza, almeno nella rosa annuale e nelle stagioni autunno-inverno, di un clima bimodale mentre, nelle stagioni più calde il settore di scirocco risulta ridimensionato (primavera) o addirittura assente (estate).

La suddivisione degli eventi per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 7-1) e la conseguente frequenza di accadimento (Tabella 7-2) mostra che gli stati di moto ondoso più significativi ( $H_s > 0.5$  m) si presentano da maestrale (23.4%) e da scirocco (8.7%), con una frequenza di accadimento complessiva pari al 32.1%. Dal settore di maestrale si presentano inoltre gli eventi con altezza d'onda più elevata.

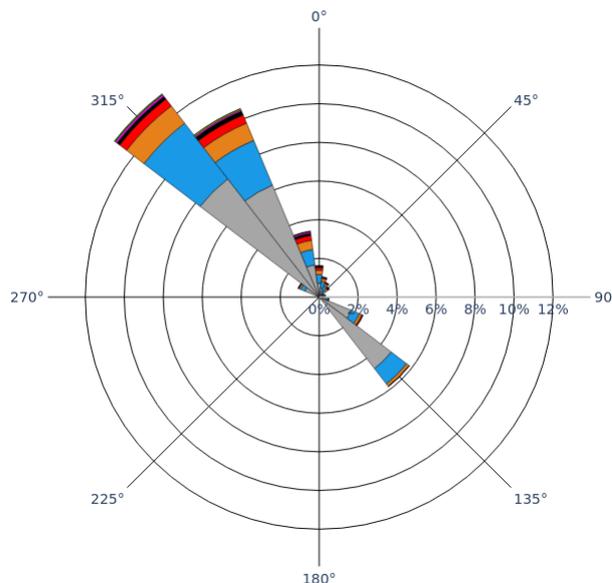
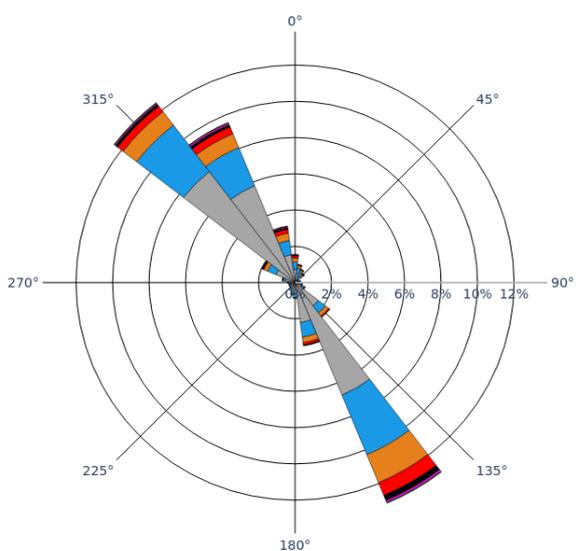
**SERIE ERA5 AL LARGO**

**SERIE ERA5 PROPAGATA**

**Annuale**



**Primavera**



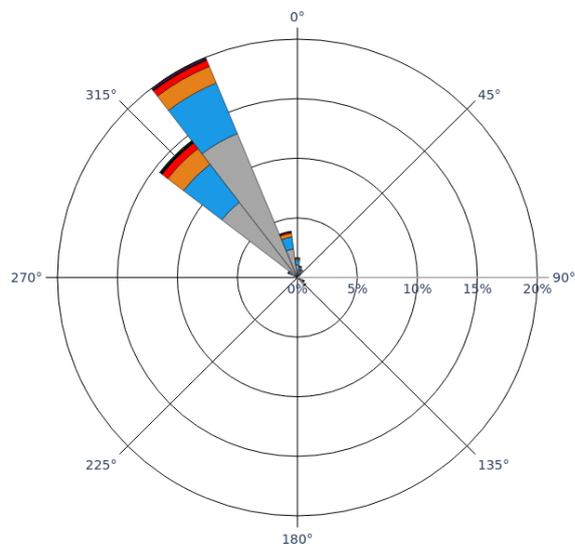
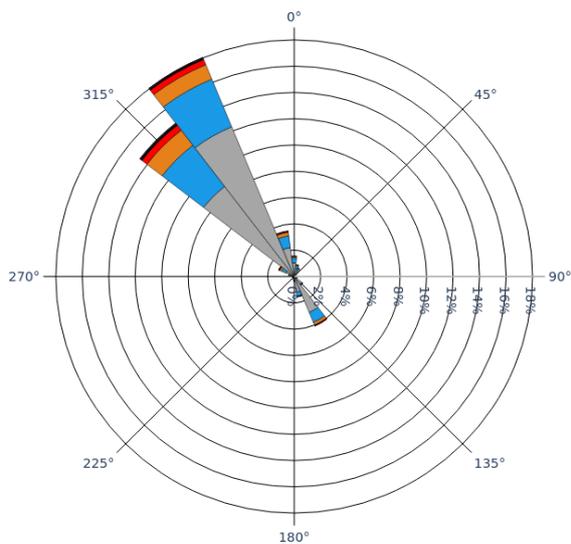
**Classi di altezza d'onda:**

- 0.0-0.25 m
- 0.25-0.5 m
- 0.5-0.75 m
- 0.75-1.0 m
- 1.0-1.25 m
- 1.25-1.5 m
- 1.5-1.75 m
- 1.75-2.0 m
- 2.0- m

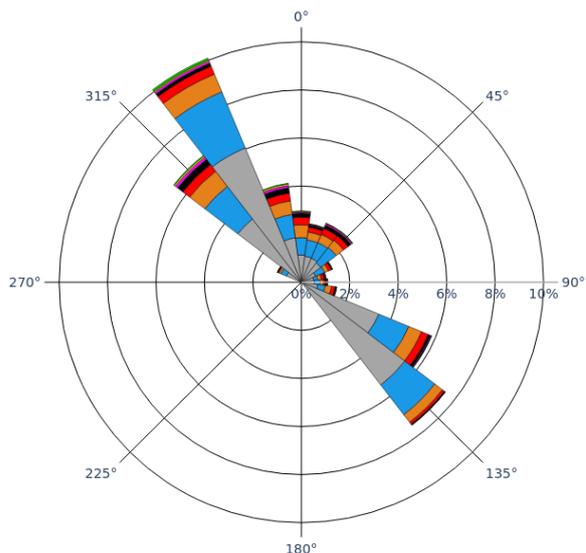
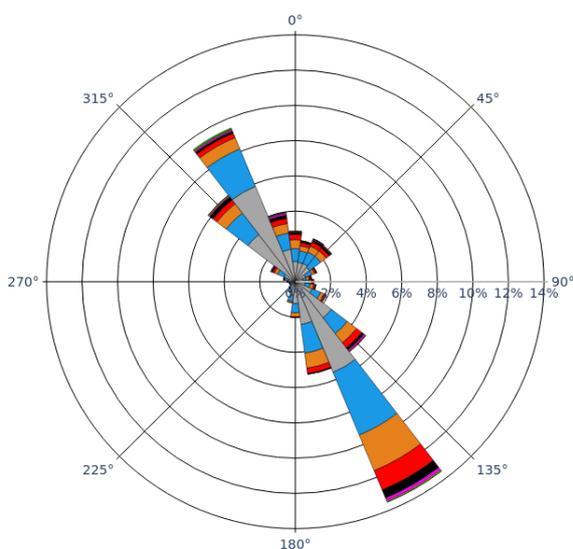
**SERIE ERA5 AL LARGO**

**SERIE ERA5 PROPAGATA**

**Estate**

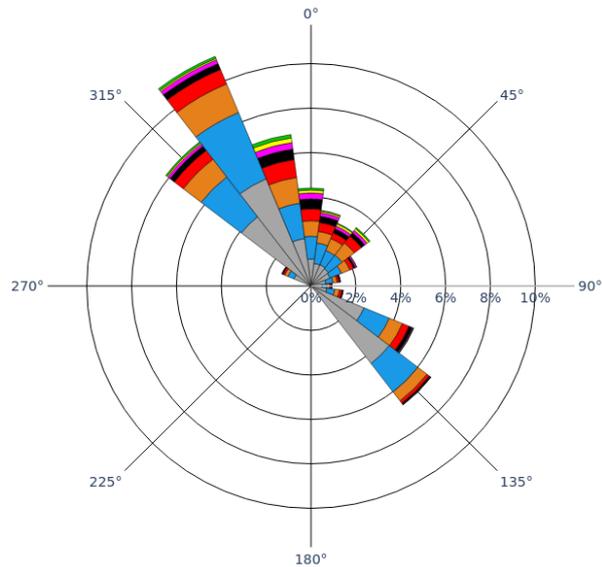
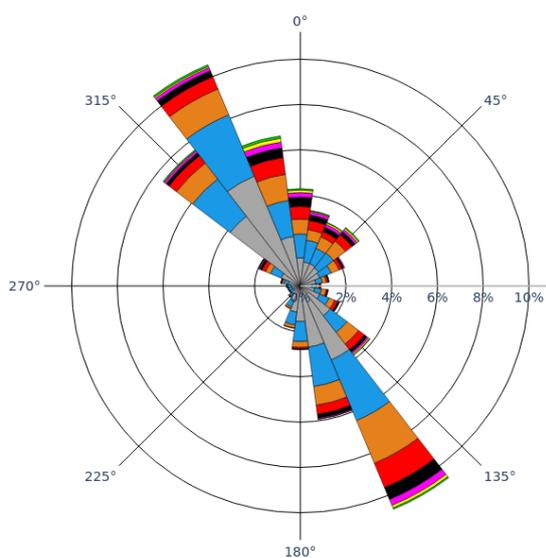


**Autunno**



**Classi di altezza d'onda:**

- 0.0-0.25 m
- 0.25-0.5 m
- 0.5-0.75 m
- 0.75-1.0 m
- 1.0-1.25 m
- 1.25-1.5 m
- 1.5-1.75 m
- 1.75-2.0 m
- 2.0- m

**SERIE ERA5 AL LARGO****SERIE ERA5 PROPAGATA****Inverno**

Classi di altezza d'onda:



**Figura 7-4. Confronto rose annuali e stagionali di distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso tra la serie storica ERA5 calibrata al largo di Brindisi e la serie ERA5 propagata - Periodo di riferimento 1979-2021.**

Tabella 7-1. Punto sottocosta P0 - Tabella climatica annuale del numero di eventi.

Dir. °Nord	Altezza d'onda significativa [m]											Tot
	0.0 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	
0	5603	3868	2454	1503	910	619	308	155	59	35	6	15520
15	3495	2981	2096	1000	648	352	180	75	31	12	0	10870
30	2854	2688	1791	1049	604	340	181	112	30	6	1	9656
45	2399	2269	1723	1094	629	339	172	108	54	16	10	8813
60	2376	1679	964	570	286	93	62	26	3	5	7	6071
75	2667	1391	611	337	199	78	46	6	1	0	0	5336
90	3287	1204	489	232	136	104	47	7	6	1	0	5513
105	5581	1788	763	487	254	72	23	4	1	0	0	8973
120	29883	7941	2821	1254	609	249	69	30	4	0	0	42860
135	62219	14356	3980	1007	230	98	24	11	3	0	0	81928
150	153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	153
165	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73
180	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37
195	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
210	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
225	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
240	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
255	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
270	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53
285	211	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	211
300	15181	2676	935	374	136	65	19	9	1	0	0	19396
315	14230	21832	10999	4288	1777	823	353	151	83	35	21	54592
330	28036	28864	12103	4344	1917	734	400	177	92	45	56	76768
345	12308	7623	4146	2375	1403	807	456	285	76	42	52	29573
<b>N° di eventi</b>	190760	101160	45875	19914	9738	4773	2340	1156	444	197	153	<b>376510</b>

Tabella 7-2. Punto sottocosta P0 - Tabella climatica annuale delle frequenze di accadimento.

Dir. °Nord	Altezza d'onda significativa [m]											Freq. %	Hs>0.5
	0.0 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		
0	1.49	1.03	0.65	0.4	0.24	0.16	0.08	0.04	0.02	0.01	0	4.12	2.63
15	0.93	0.79	0.56	0.27	0.17	0.09	0.05	0.02	0.01	0	0	2.89	1.96
30	0.76	0.71	0.48	0.28	0.16	0.09	0.05	0.03	0.01	0	0	2.56	1.8
45	0.64	0.6	0.46	0.29	0.17	0.09	0.05	0.03	0.01	0	0	2.34	1.7
60	0.63	0.45	0.26	0.15	0.08	0.02	0.02	0.01	0	0	0	1.61	0.98
75	0.71	0.37	0.16	0.09	0.05	0.02	0.01	0	0	0	0	1.42	0.71
90	0.87	0.32	0.13	0.06	0.04	0.03	0.01	0	0	0	0	1.46	0.59
105	1.48	0.47	0.2	0.13	0.07	0.02	0.01	0	0	0	0	2.38	0.9
120	7.94	2.11	0.75	0.33	0.16	0.07	0.02	0.01	0	0	0	11.38	3.44
135	16.53	3.81	1.06	0.27	0.06	0.03	0.01	0	0	0	0	21.76	5.23
150	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0
165	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0
180	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
195	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
225	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
255	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
270	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
285	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0
300	4.03	0.71	0.25	0.1	0.04	0.02	0.01	0	0	0	0	5.15	1.12
315	3.78	5.8	2.92	1.14	0.47	0.22	0.09	0.04	0.02	0.01	0.01	14.5	10.72
330	7.45	7.67	3.21	1.15	0.51	0.19	0.11	0.05	0.02	0.01	0.01	20.39	12.94
345	3.27	2.02	1.1	0.63	0.37	0.21	0.12	0.08	0.02	0.01	0.01	7.85	4.58
Freq. %	50.67	26.87	12.18	5.29	2.59	1.27	0.62	0.31	0.12	0.05	0.04	100	49.3

## 7.4 Curva di durata

In merito alla persistenza degli eventi di moto ondoso in prossimità del porto si può far riferimento alla curva di durata annuale rappresentata in Figura 7-5. Dall'analisi della serie storica propagata è stato possibile determinare la durata media annuale associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa.

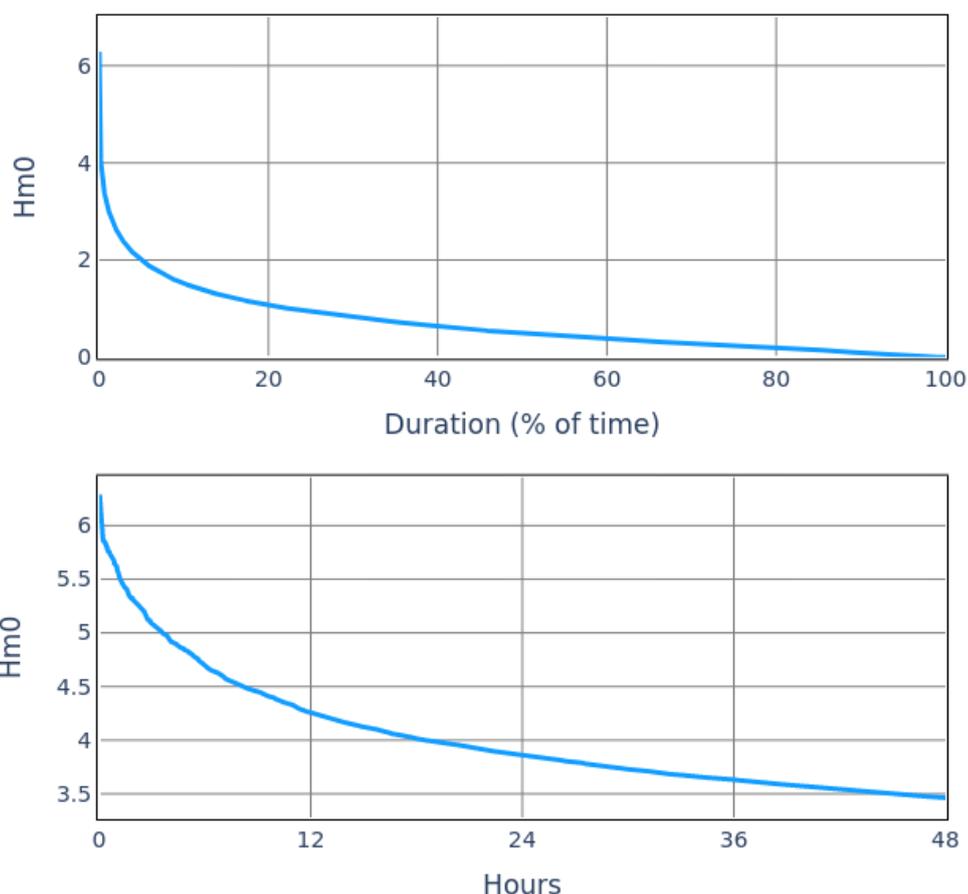


Figura 7-5. Curva di durata annuale (con dettaglio) degli eventi di moto ondoso propagati.

Tabella 7-3. Clima moto ondoso annuale - Ore e percentuali di superamento delle altezze d'onda propagate.

Hm0 [m]	Ore	%
1.0	1968.1	22.47
1.5	900.8	10.28
2.0	437.5	4.99
2.5	210.9	2.41
3.0	99.8	1.14
3.5	45.4	0.52
4.0	18.5	0.21
4.5	8.2	0.09
5.0	3.6	0.04
5.5	1.2	0.01

## 7.5 Distribuzione degli eventi in relazione al periodo medio del moto ondoso

Al fine di individuare la legge di dipendenza tra il periodo medio delle onde  $T_m$  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:

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

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 con altezza d'onda significativa  $H_s \geq 1$  m appartenenti ai settori di traversia:

- 270 – 22.5 °N settore di traversia principale;
- 22.5 – 112.5 °N settore di traversia secondario;
- 112.5 - 180 °N settore di traversia secondario.

In Figura 7-6, Figura 7-7, Figura 7-8, Figura 7-9 sono riportate le funzioni di correlazione tra  $T_m$  e  $H_s$  trovate con il metodo dei minimi quadrati per i dati della serie storica propagata, per tutte le direzioni e per i tre 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 7-4.

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

$T_m = a \cdot (H_s)^b$	Parametro (a)	Parametro (b)
omnidirezionale <b>0-360 °N</b>	5.03	0.32
settore di traversia principale <b>270-22.5 °N</b>	4.79	0.37
settore di traversia secondario <b>22.5-112.5 °N</b>	4.97	0.33
settore di traversia secondario <b>112.5-180 °N</b>	5.92	0.24

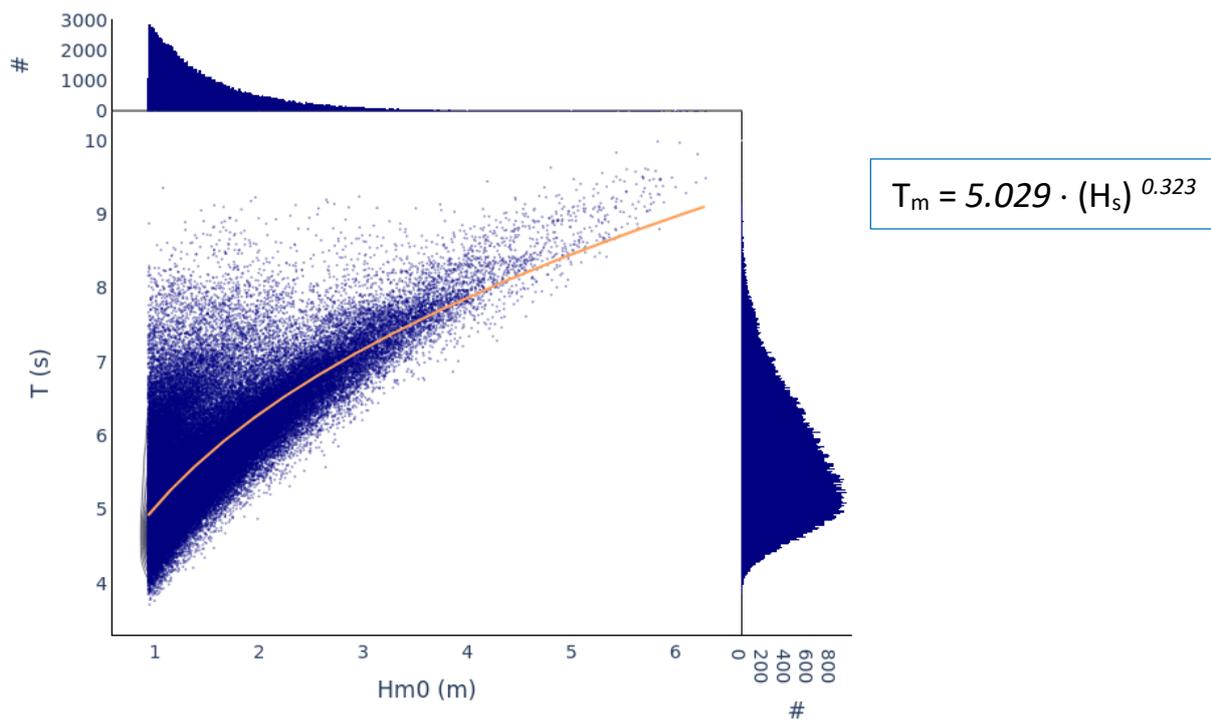


Figura 7-6. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 propagata.

Analisi omnidirezionale 0-360 °N.

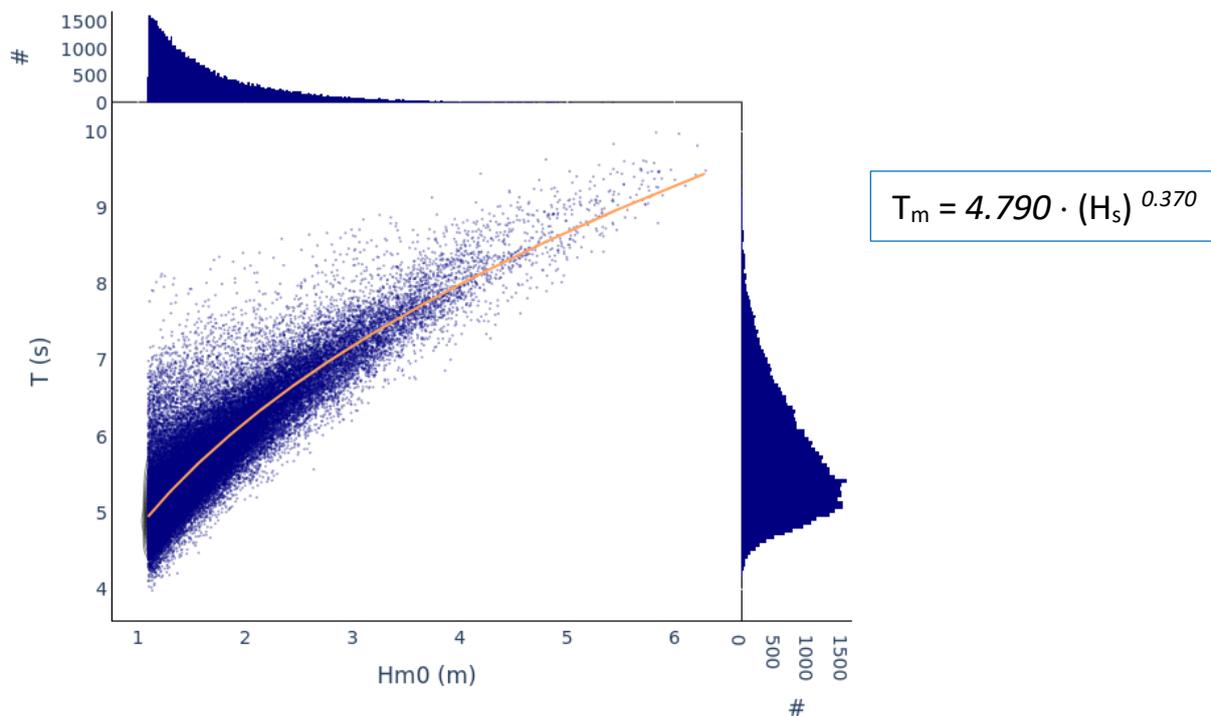


Figura 7-7. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 propagata.

Settore di traversia principale 270-22.5 °N.

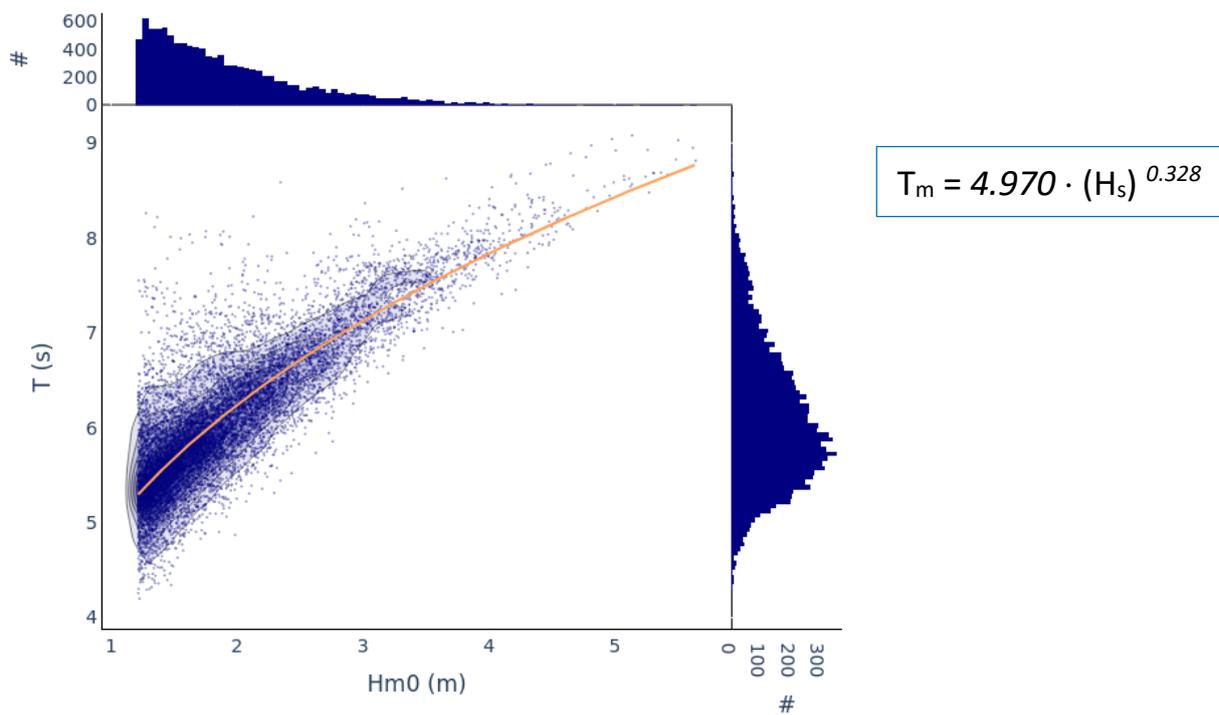


Figura 7-8. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 propagata.  
Settore di traversia secondario 22.5-112.5 °N.

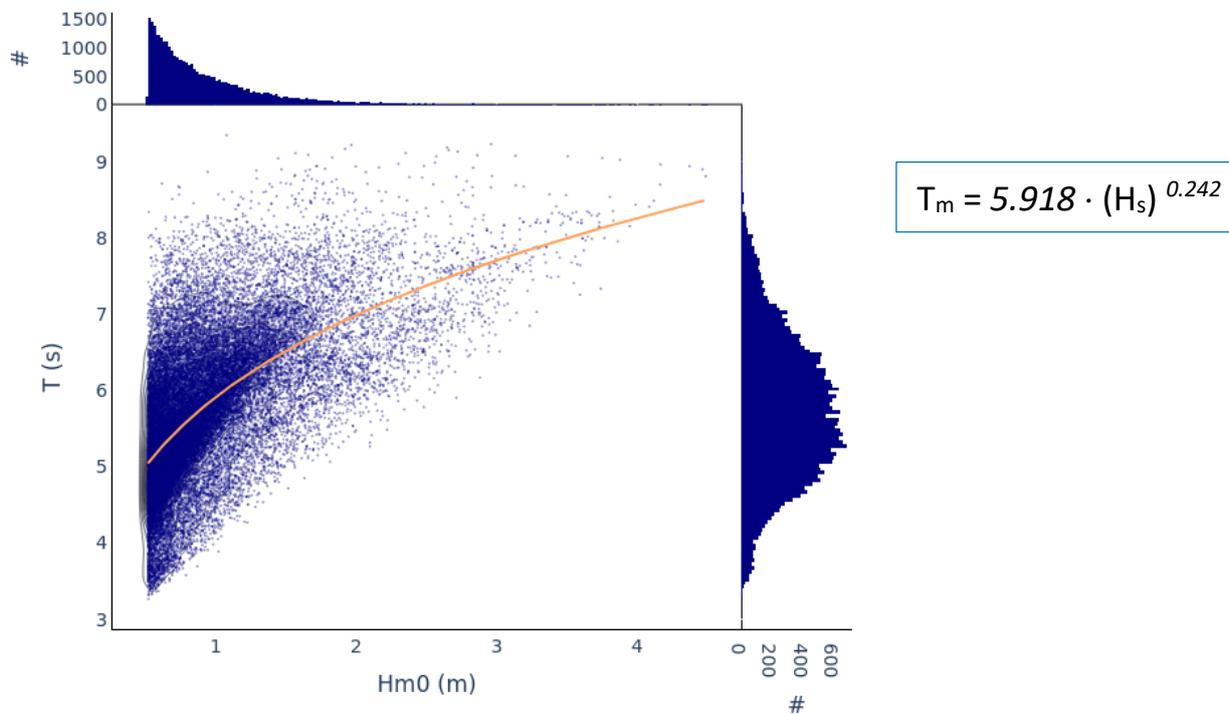


Figura 7-9. Correlazione altezza – periodo per i dati della serie ERA5 propagata.  
Settore di traversia principale 112.5-180 °N.

## 8 STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI IN PROSSIMITÀ DEL PORTO

È di seguito riportata l'analisi statistica dei valori estremi estratti dalla serie storica dei dati ERA5 propagati nel punto P0 di coordinate 40.663 °N, 18.004 °E, opportunamente **calibrati con medesimi coefficienti utilizzati nel punto ERA5 al largo (4)**.

### 8.1 Preparazione del campione (metodo dei massimi annuali)

Visto l'elevato numero di anni disponibili nei dati meteomarini relativi alle ricostruzioni ERA5 anche per il punto propagato è stato applicato il metodo dei massimi annuali per la selezione del campione (in seguito indicato con la sigla MA).

I massimi annuali estratti sono riportati in Figura 8-1 (analisi omnidirezionale) e in Figura 8-2 (per i tre settori di traversia). Sulla base della distribuzione direzionale dei massimi annuali sono stati confermati i settori di traversia precedentemente individuati che caratterizzano il paraggio in esame:

- il settore di traversia principale compreso tra 270 °N e 22.5 °N - **SETTORE A**
- il settore di traversia secondario compreso tra 22.5 °N e 112.5 °N - **SETTORE B**
- il settore di traversia secondario compreso tra 112.5 °N e 180 °N - **SETTORE C**

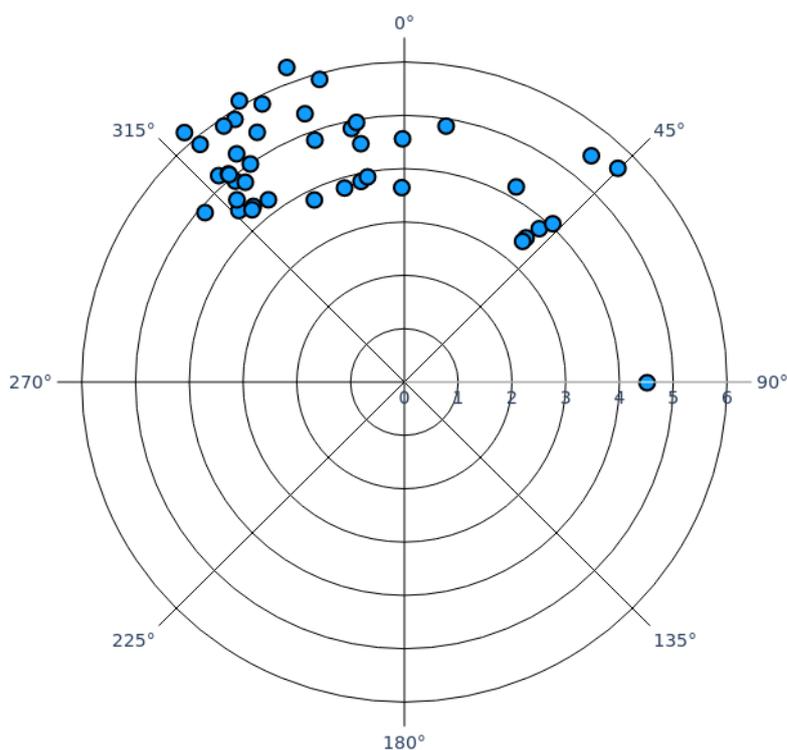


Figura 8-1. Massimi annuali di altezza d'onda significativa nel punto P0 (periodo 1979-2021) - Omnidirezionale.

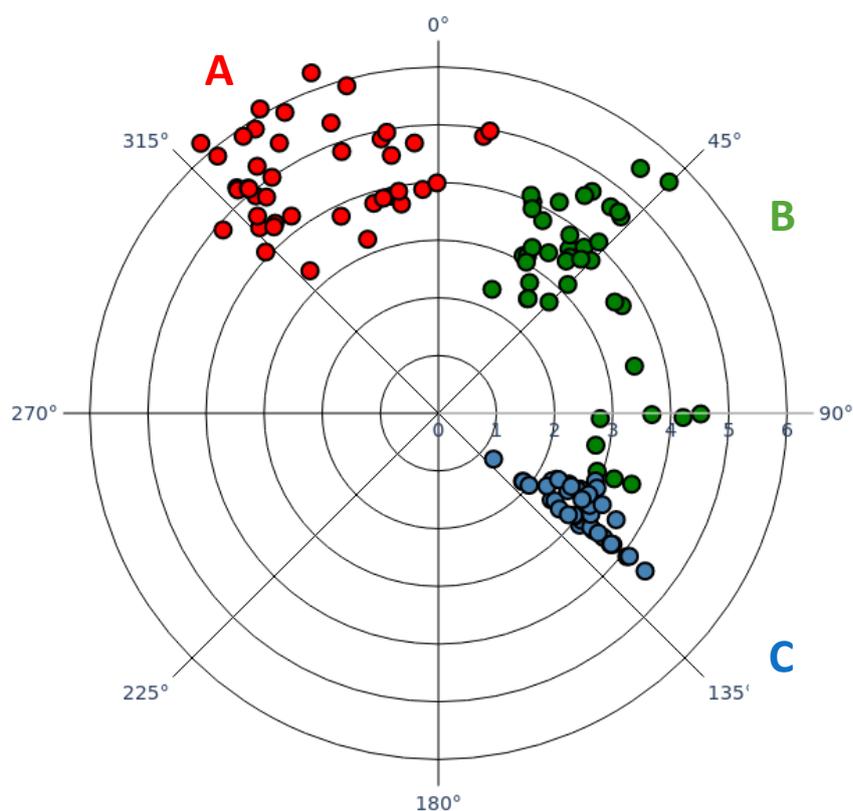


Figura 8-2. Massimi annuali di altezza d'onda significativa nel punto P0 (periodo 1979-2021) – Settori di traversia principale e secondari.

## 8.2 Statistica dei valori estremi

### OMNIDIREZIONALE: 0°N - 360°N

Tabella 8-1. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti nel punto P0 tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 4.45 scale = 0.708	105.14

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2012-01-07 00:00:00	6.29	340	9.5	17.55	349
2	2004-01-15 20:00:00	6.21	319	9.8	17.42	315
3	1982-03-12 07:00:00	6.1	330	9.3	17.62	344
4	2020-02-06 00:00:00	5.89	344	9.2	18.22	-6
5	2009-10-13 06:00:00	5.86	325	9.5	16.36	327
6	1999-06-22 17:00:00	5.86	320	9.5	16.87	321
7	1980-01-01 07:00:00	5.85	327	9.5	16.69	331
8	1983-01-31 18:00:00	5.85	333	8.8	18.77	346
9	2019-02-23 12:00:00	5.64	45	8.8	16.74	58

<b>10</b>	<b>1983-12-01 21:00:00</b>	<b>5.48</b>	<b>39</b>	<b>8.8</b>	<b>16.13</b>	<b>40</b>
11	2018-01-18 02:00:00	5.42	330	8.8	17.92	334
12	1981-01-16 15:00:00	5.36	340	8.7	16.95	344
13	2013-03-21 20:00:00	5.3	324	8.9	16.31	328
14	1986-12-20 03:00:00	5.19	318	9.0	15.74	316
15	1995-03-28 21:00:00	5.09	320	8.3	15.88	320
16	2021-03-15 15:00:00	5.07	320	8.6	16.79	318
17	2007-02-13 22:00:00	4.99	325	8.8	16.09	330
18	2016-12-28 19:00:00	4.95	350	8.5	15.36	7
19	1990-02-13 16:00:00	4.91	320	8.9	15.93	321
20	1993-03-28 10:00:00	4.88	311	9.3	14.82	294
21	2008-02-16 20:00:00	4.86	9	8.3	14.77	21
22	1994-01-29 18:00:00	4.85	348	8.7	15.54	4
23	2001-11-24 15:00:00	4.83	340	8.7	14.57	341
24	2014-05-14 17:00:00	4.77	322	8.7	15.33	319
25	1999-11-23 23:00:00	4.62	318	8.4	15.66	316
26	1991-12-07 23:00:00	4.56	0	8.2	14.87	5
27	1997-02-28 07:00:00	4.54	350	8.4	14.7	8
28	2005-12-11 14:00:00	4.51	90	8.0	14.73	104
29	1989-03-02 14:00:00	4.45	316	8.6	14.89	311
30	1995-11-18 22:00:00	4.33	320	7.6	16.16	332
31	2001-06-04 12:00:00	4.29	319	8.6	13.41	319
32	2016-04-26 01:00:00	4.25	323	8.1	15.0	325
33	2011-03-08 00:00:00	4.21	30	7.8	14.27	36
34	2015-01-01 00:00:00	4.05	43	7.8	14.58	36
35	2008-12-21 17:00:00	3.91	350	7.3	15.13	-2
36	1985-02-24 22:00:00	3.85	348	7.7	14.0	14
37	1998-03-25 23:00:00	3.82	41	7.6	14.81	34
38	1986-01-17 01:00:00	3.8	343	7.2	14.81	347
39	1988-02-01 06:00:00	3.8	334	7.6	14.09	339
40	2005-02-03 02:00:00	3.65	-1	7.2	14.22	2
41	1990-12-06 12:00:00	3.53	40	7.4	13.73	28
42	2003-01-11 21:00:00	3.43	40	7.4	12.51	26

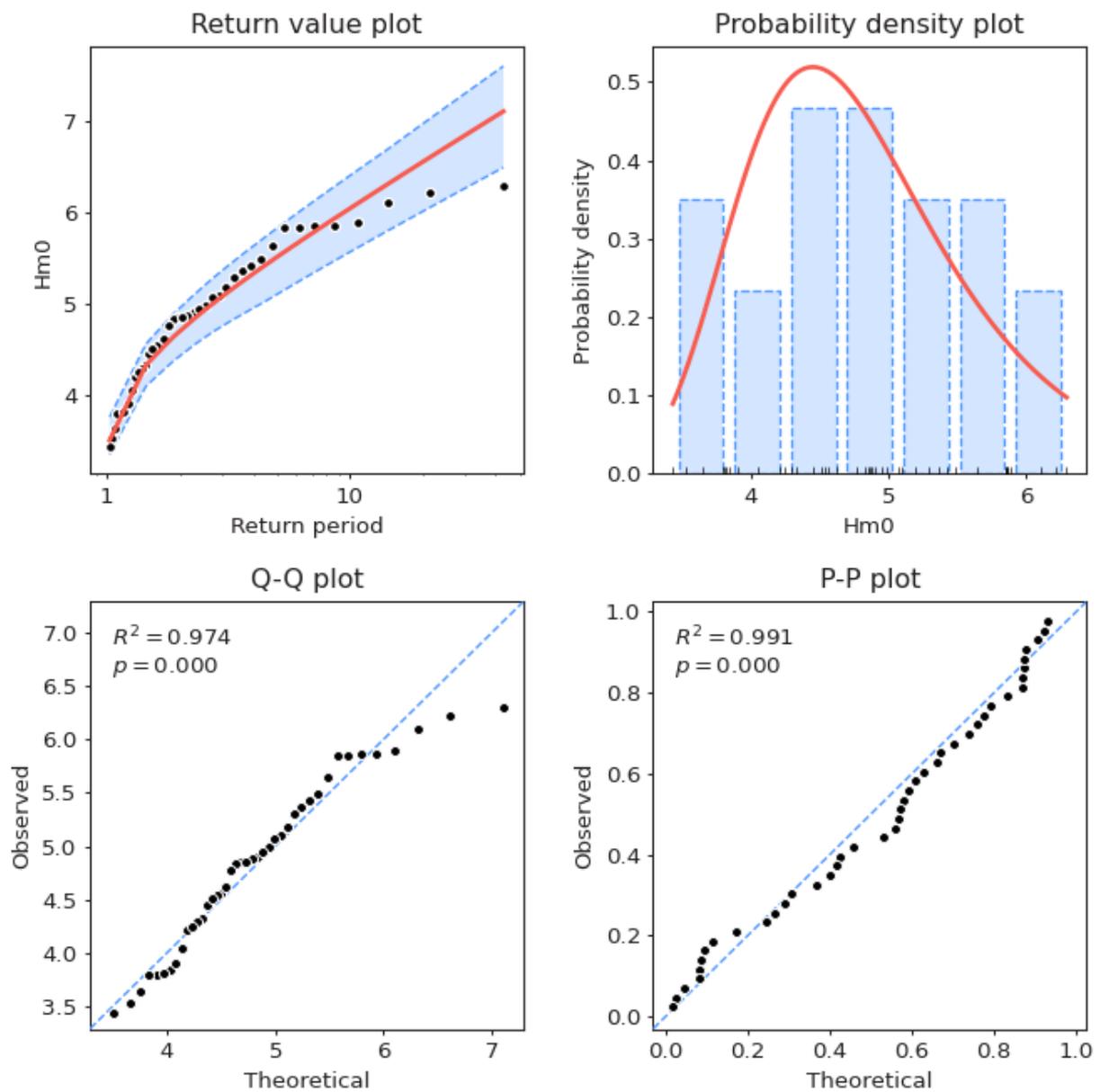


Figura 8-3. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione  $R^2$  e del p-value.

**Tabella 8-2. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) nel punto P0 – Altezze d'onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.**

<b>SETTORE: 0.0 – 360.0°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>3.37</b>	3.22	3.63
5	<b>5.51</b>	5.1	5.83
10	<b>6.04</b>	5.57	6.4
20	<b>6.55</b>	6.01	6.97
30	<b>6.85</b>	6.27	7.3
40	<b>7.05</b>	6.45	7.54
50	<b>7.21</b>	6.59	7.72
100	<b>7.71</b>	7.02	8.27
150	<b>8.0</b>	7.27	8.59
200	<b>8.2</b>	7.45	8.81
250	<b>8.36</b>	7.58	8.99
300	<b>8.49</b>	7.7	9.13
400	<b>8.69</b>	7.87	9.35
500	<b>8.85</b>	8.01	9.53

**SETTORE A: 270°N – 22.5°N**

Tabella 8-3. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti nel punto P0 tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 4.395 scale = 0.736	107.64

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
1	2012-01-07 00:00:00	6.29	340	9.5	17.55	349
2	2004-01-15 20:00:00	6.21	319	9.8	17.42	315
3	1982-03-12 07:00:00	6.1	330	9.3	17.62	344
4	2020-02-06 00:00:00	5.89	344	9.2	18.22	-6
5	2009-10-13 06:00:00	5.86	325	9.5	16.36	327
6	1999-06-22 17:00:00	5.86	320	9.5	16.87	321
7	1980-01-01 07:00:00	5.85	327	9.5	16.69	331
8	1983-01-31 18:00:00	5.85	333	8.8	18.77	346
9	2018-01-18 02:00:00	5.42	330	8.8	17.92	334
10	1981-01-16 15:00:00	5.36	340	8.7	16.95	344
11	2013-03-21 20:00:00	5.3	324	8.9	16.31	328
12	1984-01-25 07:00:00	5.23	318	9.1	17.02	324
13	1986-12-20 03:00:00	5.19	318	9.0	15.74	316
14	1995-03-28 21:00:00	5.09	320	8.3	15.88	320
15	2021-03-15 15:00:00	5.07	320	8.6	16.79	318
16	2007-02-13 22:00:00	4.99	325	8.8	16.09	330
17	2019-03-12 10:00:00	4.97	10	8.4	16.18	18
18	2016-12-28 19:00:00	4.95	350	8.5	15.36	7
19	1990-02-13 16:00:00	4.91	320	8.9	15.93	321
20	1993-03-28 10:00:00	4.88	311	9.3	14.82	294
21	2008-02-16 20:00:00	4.86	9	8.3	14.77	21
22	1994-01-29 18:00:00	4.85	348	8.7	15.54	4
23	2001-11-24 15:00:00	4.83	340	8.7	14.57	341
24	2014-05-14 17:00:00	4.77	322	8.7	15.33	319
25	1991-12-08 05:00:00	4.7	-5	8.5	15.12	4
26	1999-11-23 23:00:00	4.62	318	8.4	15.66	316
27	1997-02-28 07:00:00	4.54	350	8.4	14.7	8
28	1989-03-02 14:00:00	4.45	316	8.6	14.89	311
29	1995-11-18 22:00:00	4.33	320	7.6	16.16	332
30	2001-06-04 12:00:00	4.29	319	8.6	13.41	319
31	2016-04-26 01:00:00	4.25	323	8.1	15.0	325
32	2006-04-12 09:00:00	4.08	313	8.0	15.62	309
33	2010-12-11 02:00:00	3.99	0	7.9	13.54	-1
34	2008-12-21 17:00:00	3.91	350	7.3	15.13	-2
35	2005-02-03 04:00:00	3.89	-4	7.6	13.86	3
36	2015-01-12 05:00:00	3.85	346	7.6	13.53	-1
37	1985-02-24 22:00:00	3.85	348	7.7	14.0	14
38	1986-01-17 01:00:00	3.8	343	7.2	14.81	347
39	1988-02-01 06:00:00	3.8	334	7.6	14.09	339
40	1998-03-11 07:00:00	3.68	350	8.0	12.82	-5
41	2003-02-06 00:00:00	3.31	318	7.8	12.2	311
42	1990-09-12 20:00:00	3.25	338	7.0	13.63	348

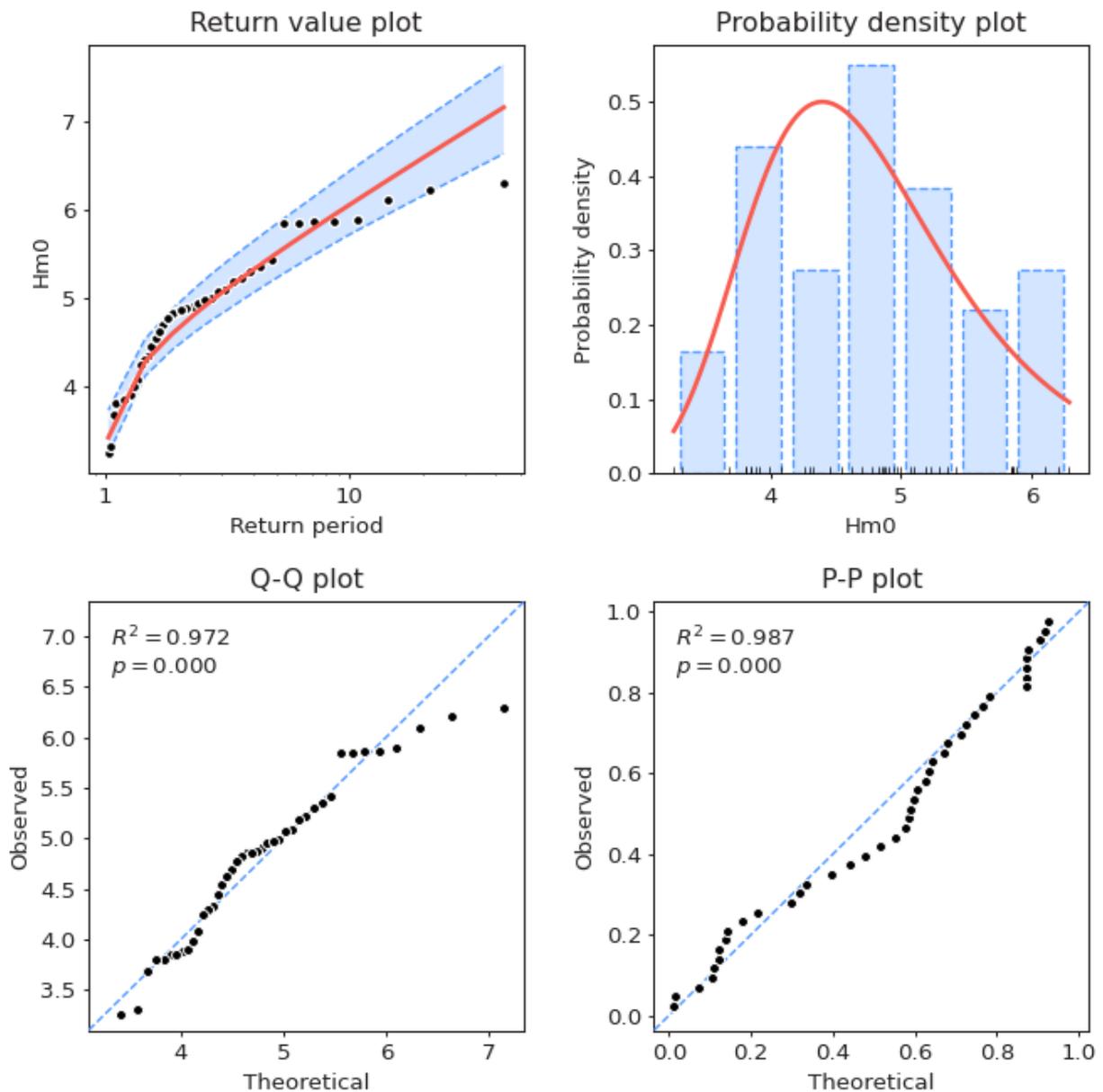


Figura 8-4. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione  $R^2$  e del p-value.

**Tabella 8-4. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) nel punto P0 – Altezze d'onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.**

<b>SETTORE: 270.0 – 22.5°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>3.27</b>	3.07	3.59
5	<b>5.5</b>	5.22	5.83
10	<b>6.05</b>	5.71	6.43
20	<b>6.58</b>	6.15	7.01
30	<b>6.89</b>	6.41	7.34
40	<b>7.1</b>	6.59	7.58
50	<b>7.27</b>	6.72	7.76
100	<b>7.78</b>	7.15	8.34
150	<b>8.08</b>	7.39	8.67
200	<b>8.29</b>	7.57	8.91
250	<b>8.46</b>	7.7	9.09
300	<b>8.59</b>	7.81	9.24
400	<b>8.8</b>	7.98	9.48
500	<b>8.97</b>	8.11	9.67

**SETTORE B: 22.5°N – 112.5°N**

Tabella 8-5. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti nel punto P0 tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 3.311 scale = 0.648	98.5

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
<b>1</b>	<b>2019-02-23 12:00:00</b>	<b>5.64</b>	<b>45</b>	<b>8.8</b>	<b>16.74</b>	<b>58</b>
<b>2</b>	<b>1983-12-01 21:00:00</b>	<b>5.48</b>	<b>39</b>	<b>8.8</b>	<b>16.13</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>2003-12-23 21:00:00</b>	<b>4.67</b>	<b>42</b>	<b>8.7</b>	<b>13.93</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>2002-01-04 06:00:00</b>	<b>4.67</b>	<b>35</b>	<b>8.1</b>	<b>15.61</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>1981-01-08 19:00:00</b>	<b>4.65</b>	<b>40</b>	<b>8.1</b>	<b>15.55</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>1995-01-14 10:00:00</b>	<b>4.63</b>	<b>43</b>	<b>8.3</b>	<b>15.57</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>2021-02-15 04:00:00</b>	<b>4.53</b>	<b>34</b>	<b>8.1</b>	<b>15.29</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>2005-12-11 14:00:00</b>	<b>4.51</b>	<b>90</b>	<b>8.0</b>	<b>14.73</b>	<b>104</b>
<b>9</b>	<b>1998-11-22 22:00:00</b>	<b>4.21</b>	<b>91</b>	<b>7.5</b>	<b>16.52</b>	<b>110</b>
<b>10</b>	<b>2011-03-08 00:00:00</b>	<b>4.21</b>	<b>30</b>	<b>7.8</b>	<b>14.27</b>	<b>36</b>
11	2008-02-17 07:00:00	4.1	23	8.2	12.93	31
12	2015-01-01 00:00:00	4.05	43	7.8	14.58	36
13	1991-12-07 10:00:00	4.0	24	8.0	12.9	16
14	2016-12-29 11:00:00	3.89	24	7.8	14.08	35
15	2012-02-07 10:00:00	3.83	36	7.8	14.37	44
16	1998-03-25 23:00:00	3.82	41	7.6	14.81	34
17	1983-01-21 08:00:00	3.79	28	7.7	13.15	40
18	2000-02-10 11:00:00	3.73	45	7.5	13.82	55
19	1994-02-14 11:00:00	3.67	90	7.5	12.86	79
20	1992-12-28 18:00:00	3.67	59	7.8	12.74	70
21	1986-12-25 09:00:00	3.63	38	7.6	13.19	33
22	2019-12-30 10:00:00	3.62	43	7.4	13.16	46
23	2001-01-14 10:00:00	3.6	58	7.8	11.68	71
24	1980-03-06 21:00:00	3.55	110	7.3	14.08	121
25	1990-12-06 12:00:00	3.53	40	7.4	13.73	28
26	2013-12-01 10:00:00	3.47	76	7.3	13.28	79
27	2003-01-11 21:00:00	3.43	40	7.4	12.51	26
28	1996-12-26 22:00:00	3.36	34	7.6	12.65	35
29	2006-11-11 04:00:00	3.29	29	7.1	12.23	35
30	2008-12-12 05:00:00	3.23	111	7.9	11.95	117
31	1988-12-17 01:00:00	3.15	45	7.4	11.47	56
32	2005-01-16 12:00:00	3.13	29	7.1	12.08	26
33	1995-11-21 10:00:00	3.1	28	6.9	12.08	37
34	2018-03-22 13:00:00	3.02	30	7.0	11.74	19
35	2010-02-10 11:00:00	2.91	110	6.8	12.07	132
36	2012-11-20 02:00:00	2.79	92	6.6	11.86	89
37	1984-11-13 21:00:00	2.77	102	7.0	10.92	101
38	1981-11-08 22:00:00	2.75	35	6.9	10.73	23
39	2015-12-30 23:00:00	2.71	45	6.8	11.25	43
40	1987-11-05 00:00:00	2.52	38	6.5	11.12	33
41	1985-10-17 01:00:00	2.5	38	6.5	10.84	40
42	1990-03-04 09:00:00	2.34	23	6.4	10.09	23

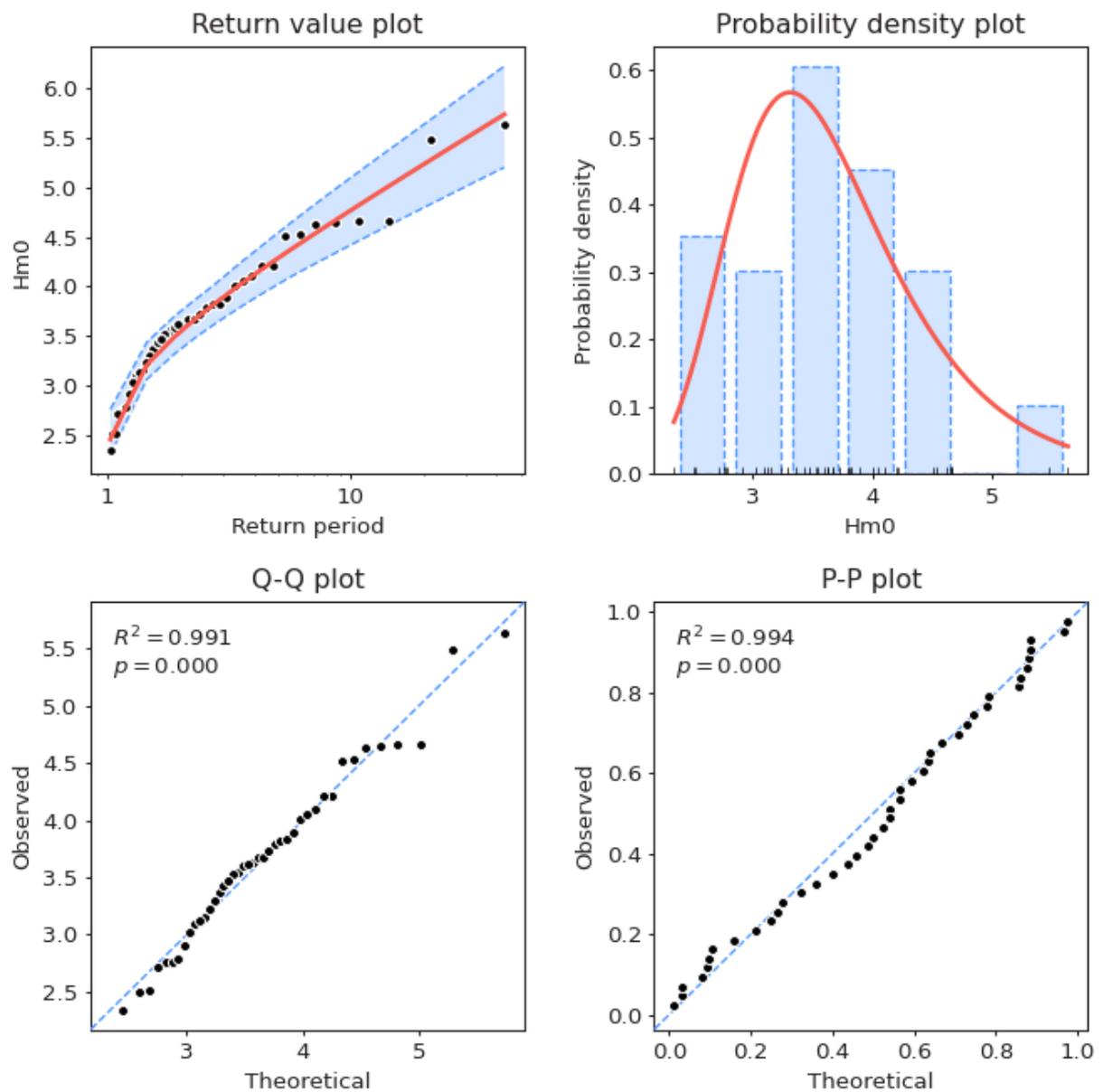


Figura 8-5. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione  $R^2$  e del p-value.

**Tabella 8-6. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) nel punto P0 – Altezze d'onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.**

<b>SETTORE: 22.5 – 112.5°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>2.32</b>	2.16	2.64
5	<b>4.28</b>	4.02	4.54
10	<b>4.77</b>	4.42	5.1
20	<b>5.24</b>	4.8	5.64
30	<b>5.5</b>	5.01	5.95
40	<b>5.69</b>	5.17	6.17
50	<b>5.84</b>	5.28	6.35
100	<b>6.29</b>	5.64	6.88
150	<b>6.56</b>	5.85	7.18
200	<b>6.74</b>	6.0	7.4
250	<b>6.89</b>	6.12	7.57
300	<b>7.01</b>	6.21	7.71
400	<b>7.19</b>	6.37	7.93
500	<b>7.34</b>	6.49	8.1

**SETTORE C: 112.5°N – 180°N**

Tabella 8-7. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti nel punto P0 tra il 1979 e il 2021.

Inizio	Fine	Metodo di estrazione	N° di eventi	Modello	Distribuzione	Param	AIC
Lug-1979	Dic-2021	MA	42	MLE	gumbel_r	loc = 2.622 scale = 0.668	95.86

i	Data	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	Tm [s]	Velocità vento [m/s]	Dir [°N]
<b>1</b>	<b>2012-02-01 16:00:00</b>	<b>4.49</b>	<b>128</b>	<b>8.8</b>	<b>16.28</b>	<b>142</b>
<b>2</b>	<b>1992-10-04 10:00:00</b>	<b>4.12</b>	<b>127</b>	<b>8.5</b>	<b>14.06</b>	<b>154</b>
<b>3</b>	<b>1980-03-15 16:00:00</b>	<b>4.09</b>	<b>127</b>	<b>8.4</b>	<b>17.6</b>	<b>138</b>
<b>4</b>	<b>2009-10-23 12:00:00</b>	<b>3.77</b>	<b>127</b>	<b>8.0</b>	<b>15.24</b>	<b>137</b>
<b>5</b>	<b>2019-11-12 09:00:00</b>	<b>3.74</b>	<b>127</b>	<b>7.3</b>	<b>18.41</b>	<b>146</b>
<b>6</b>	<b>2015-02-22 13:00:00</b>	<b>3.73</b>	<b>127</b>	<b>8.1</b>	<b>14.76</b>	<b>141</b>
<b>7</b>	<b>2013-02-22 13:00:00</b>	<b>3.73</b>	<b>127</b>	<b>8.1</b>	<b>3.35</b>	<b>326</b>
<b>8</b>	<b>1986-02-09 12:00:00</b>	<b>3.57</b>	<b>121</b>	<b>7.7</b>	<b>13.88</b>	<b>137</b>
<b>9</b>	<b>1997-11-13 13:00:00</b>	<b>3.57</b>	<b>127</b>	<b>8.4</b>	<b>14.72</b>	<b>144</b>
<b>10</b>	<b>2009-01-14 04:00:00</b>	<b>3.45</b>	<b>127</b>	<b>7.8</b>	<b>14.4</b>	<b>144</b>
11	1981-12-22 15:00:00	3.35	127	7.7	15.14	144
12	1991-11-24 07:00:00	3.28	127	7.0	17.52	134
13	1982-11-28 17:00:00	3.25	127	7.8	15.24	139
14	2015-11-26 21:00:00	3.23	119	6.9	13.83	123
15	1995-12-13 11:00:00	3.15	124	7.6	14.63	132
16	1983-12-22 11:00:00	3.11	129	7.8	16.86	147
17	1984-11-15 17:00:00	3.09	127	7.7	14.49	147
18	2003-09-08 14:00:00	3.05	122	7.1	14.33	129
19	1994-01-20 18:00:00	3.02	115	6.5	13.39	122
20	1994-12-20 22:00:00	2.95	127	7.5	14.17	146
21	1980-12-19 19:00:00	2.95	113	6.9	13.47	134
22	2006-09-26 12:00:00	2.94	119	6.6	14.51	124
23	2003-01-18 13:00:00	2.92	127	7.3	14.17	146
24	2011-03-02 03:00:00	2.89	121	7.3	13.74	130
25	2020-12-03 19:00:00	2.85	128	7.6	14.96	148
26	1999-01-03 03:00:00	2.77	118	6.8	13.71	103
27	2005-01-19 21:00:00	2.73	119	6.9	12.28	111
28	2001-11-13 06:00:00	2.66	129	7.9	17.85	145
29	2017-11-15 04:00:00	2.61	119	6.8	11.91	138
30	2014-02-01 16:00:00	2.6	121	6.9	12.7	126
31	1991-04-06 10:00:00	2.57	119	6.3	13.55	117
32	2007-09-26 09:00:00	2.56	119	6.0	13.88	114
33	1999-11-07 07:00:00	2.52	127	6.9	12.28	155
34	1987-02-19 19:00:00	2.46	128	6.9	13.11	139
35	2017-01-17 20:00:00	2.37	119	6.2	11.96	122
36	1988-02-13 12:00:00	2.33	119	6.6	11.0	111
37	1996-12-10 13:00:00	2.28	121	6.6	11.82	119
38	2005-10-08 10:00:00	2.25	124	6.8	10.81	136
39	2019-02-02 23:00:00	2.0	129	7.7	15.29	164
40	2000-10-01 15:00:00	1.88	129	7.3	15.0	154
41	1989-02-24 23:00:00	1.87	129	7.3	14.39	170
42	1989-12-19 11:00:00	1.24	130	6.5	11.72	167

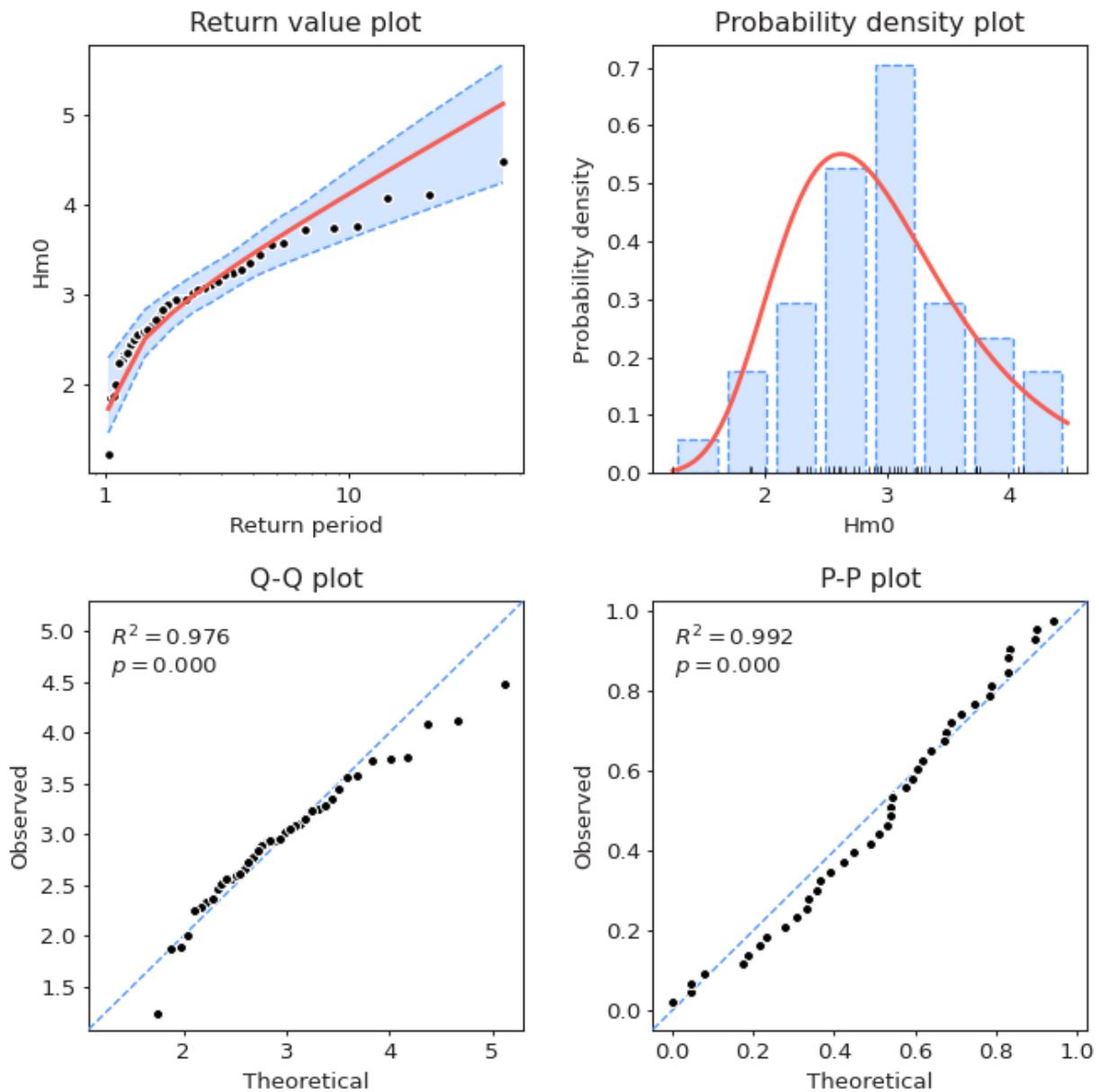


Figura 8-6. Risultati validazione modello scelto. Da sinistra a destra: confronto grafico in funzione del tempo di ritorno con indicazione delle fasce di confidenza; confronto istogramma frequenze campionarie e densità di probabilità; diagramma Q-Q e diagramma P-P con indicazione del coefficiente di determinazione  $R^2$  e del p-value.

**Tabella 8-8. Analisi degli eventi estremi di moto ondoso (MA) nel punto P0 – Altezze d'onda significative in funzione del tempo di ritorno con indicazione degli intervalli di confidenza.**

<b>SETTORE: 112.5 – 180.0°N</b>			
<b>Tempo di ritorno [anni]</b>	<b>Hs [m]</b>	<b>Limite inferiore [m]</b>	<b>Limite superiore [m]</b>
1	<b>1.6</b>	1.31	2.21
5	<b>3.62</b>	3.31	3.84
10	<b>4.13</b>	3.63	4.39
20	<b>4.61</b>	3.93	4.96
30	<b>4.88</b>	4.1	5.28
40	<b>5.08</b>	4.22	5.51
50	<b>5.23</b>	4.31	5.68
100	<b>5.7</b>	4.6	6.23
150	<b>5.97</b>	4.77	6.54
200	<b>6.16</b>	4.89	6.76
250	<b>6.31</b>	4.98	6.94
300	<b>6.43</b>	5.06	7.08
400	<b>6.62</b>	5.18	7.3
500	<b>6.77</b>	5.27	7.48

### 8.3 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 medi  $T_m$  (calcolati con le formule di correlazione altezze-periodi ricavate nel paragrafo 7.5) associati a prefissati tempi di ritorno per l'esposizione ondosa omnidirezionale e per i tre distinti settori di traversia che caratterizzano il paraggio in esame.

Tabella 8-9. Eventi estremi di moto ondoso nel punto P0

Tempo di ritorno	0 - 360 °N		SETTORE A 270.0 – 22.5 °N		SETTORE B 22.5 – 112.5 °N		SETTORE C 112.5 – 180.0 °N	
	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm
[anni]	[m]	[s]	[m]	[s]	[m]	[s]	[m]	[s]
1	<b>3.37</b>	7.45	<b>3.27</b>	7.43	<b>2.32</b>	6.55	<b>1.6</b>	6.63
5	<b>5.51</b>	8.73	<b>5.5</b>	9.00	<b>4.28</b>	8.01	<b>3.62</b>	8.08
10	<b>6.04</b>	8.99	<b>6.05</b>	9.32	<b>4.77</b>	8.30	<b>4.13</b>	8.34
20	<b>6.55</b>	9.23	<b>6.58</b>	9.62	<b>5.24</b>	8.56	<b>4.61</b>	8.57
30	<b>6.85</b>	9.36	<b>6.89</b>	9.78	<b>5.5</b>	8.69	<b>4.88</b>	8.69
40	<b>7.05</b>	9.45	<b>7.1</b>	9.89	<b>5.69</b>	8.79	<b>5.08</b>	8.77
50	<b>7.21</b>	9.52	<b>7.27</b>	9.98	<b>5.84</b>	8.87	<b>5.23</b>	8.83
100	<b>7.71</b>	9.73	<b>7.78</b>	10.23	<b>6.29</b>	9.08	<b>5.7</b>	9.02
150	<b>8.0</b>	9.84	<b>8.08</b>	10.38	<b>6.56</b>	9.21	<b>5.97</b>	9.12
200	<b>8.2</b>	9.92	<b>8.29</b>	10.48	<b>6.74</b>	9.29	<b>6.16</b>	9.19
250	<b>8.36</b>	9.99	<b>8.46</b>	10.56	<b>6.89</b>	9.36	<b>6.31</b>	9.24
300	<b>8.49</b>	10.04	<b>8.59</b>	10.61	<b>7.01</b>	9.41	<b>6.43</b>	9.28
400	<b>8.69</b>	10.11	<b>8.8</b>	10.71	<b>7.19</b>	9.49	<b>6.62</b>	9.35
500	<b>8.85</b>	10.17	<b>8.97</b>	10.79	<b>7.34</b>	9.56	<b>6.77</b>	9.40

## 9 ANALISI DELLE VARIAZIONI DEL LIVELLO DEL MARE

Per l'analisi dei livelli marini sono stati acquisiti i dati mareografici della stazione di Bari (Rete Mareografica Nazionale - ISPRA) relativi al periodo luglio 1998 – marzo 2023.



Figura 9-1. Inquadramento generale del Porto di Bari con posizione della stazione mareografica utilizzata (immagine da Google Earth).

### 9.1 Serie storica dei livelli misurati dalla stazione mareografica di Bari

La stazione è ubicata al Porto Traghetti presso il molo 12 nel punto di coordinate  $41.14026^{\circ}\text{N}$   $16.866033^{\circ}\text{E}$ . Il valore che compare con la denominazione "livello idrometrico" viene misurato con un sensore radar denominato SIAP+MICROS TLR con precisione millimetrica.

Sono state acquisite e analizzate le misure di livello dal 27/07/1998 al 10/03/2023. La Figura 9-2 mostra, per l'anno 2022, tre grafici che riportano nell'ordine: i livelli di marea registrati dal mareografo (in blu), la marea astronomica predetta dall'applicazione *u\_tide*, sviluppata da Codiga<sup>1</sup> (in rosso) e la marea meteorologica (residuo, in verde) calcolata come differenza tra il livello misurato dal mareografo e la marea astronomica.

La Figura 9-3 permette di osservare che nei periodi tra il 27-06-2003 e il 01-01-2004 e tra il 20-09-2015 e il 25-03-2019 il mareografo non ha registrato alcun dato. Tuttavia, il rendimento del

<sup>1</sup> Codiga, D.L., 2011. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp. <ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf>

mareografo, pari al 82%, risulta relativamente soddisfacente per tutto il periodo preso in considerazione.

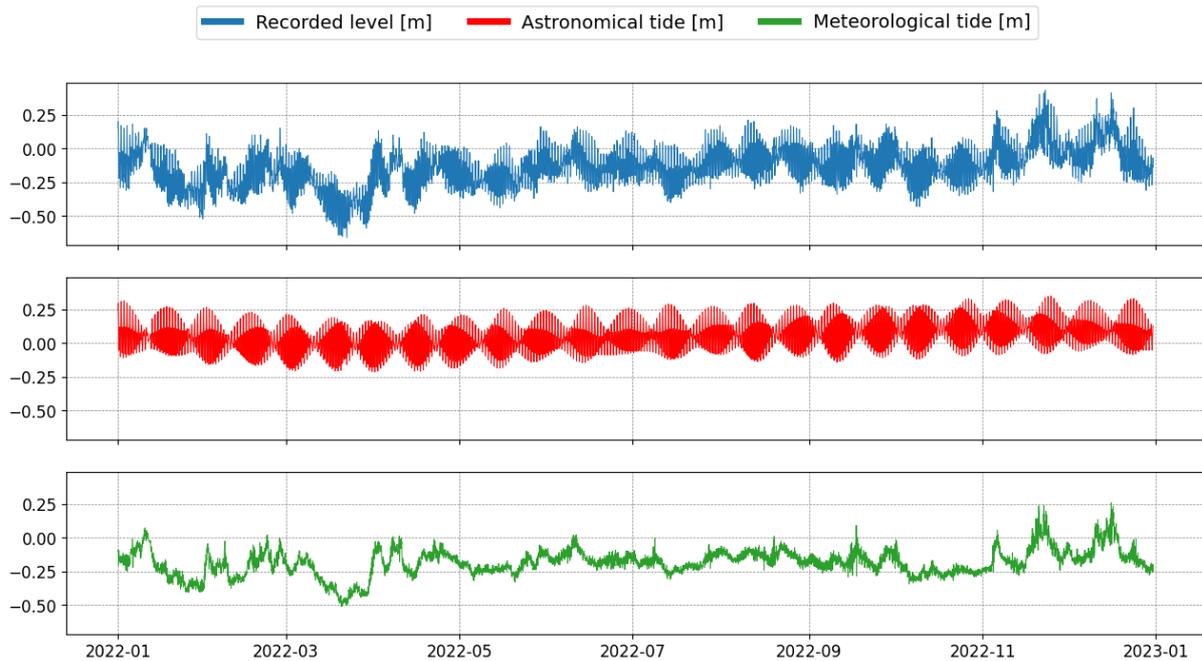


Figura 9-2. Livelli idrometrici osservati dalla stazione mareografica di Bari nell'anno 2022 (in blu), marea astronomica predetta dal programma u\_tide (in rosso) e marea meteorologica (in verde).

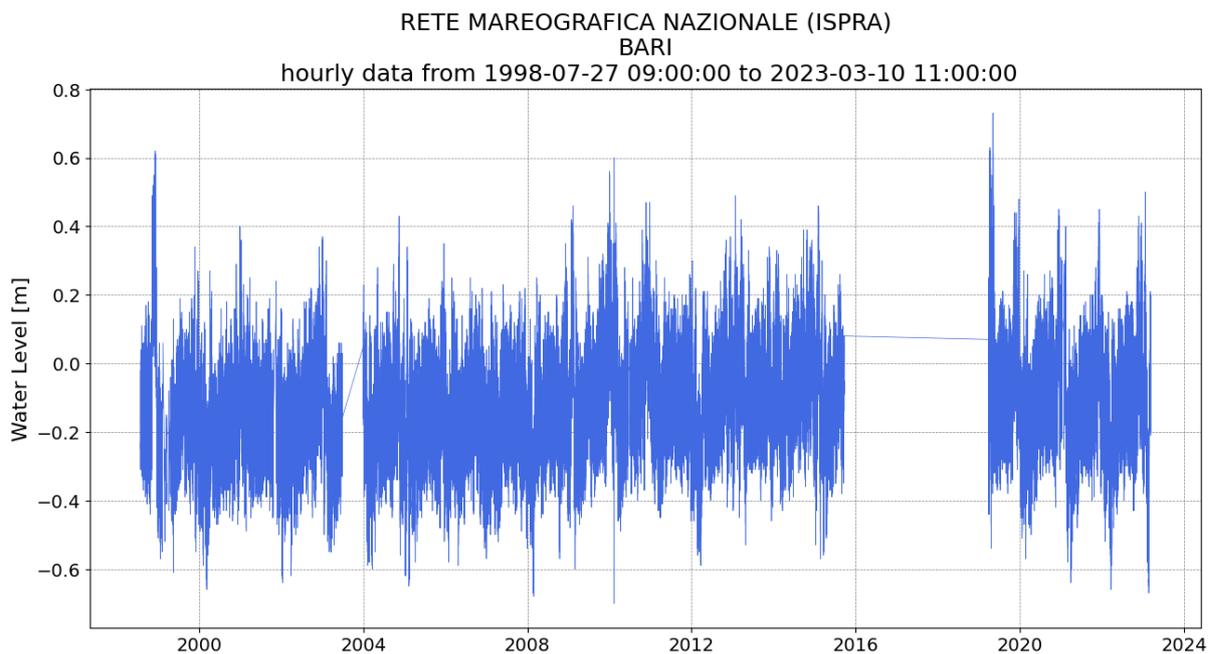


Figura 9-3. Livelli idrometrici osservati dalla stazione mareografica di Bari nel periodo 1998-2023.

## 9.2 Marea astronomica

La marea astronomica viene generata dall'attrazione gravitazionale della Luna (70%) e del Sole (30%). Per la valutazione della componente astronomica della marea si è proceduto a effettuare un'analisi armonica delle misure di livello in modo da calcolare le costanti armoniche che caratterizzano l'oscillazione nel paraggio in esame e scomporre le misure in *componente astronomica* e *componente residua*.

L'applicazione che è stata utilizzata, *u\_tide*, consente di effettuare un'analisi di tipo armonico del segnale registrato, che viene modellato come una somma finita di sinusoidi con frequenze legate alle costanti armoniche di marea che governano l'oscillazione del livello marino.

In Tabella 9-1 sono riportate le principali costituenti armoniche ottenute dall'analisi dei livelli di marea registrati dal mareografo di Bari nel periodo 1998-2023<sup>2</sup>.

Tabella 9-1. Costituenti armoniche ottenute dall'analisi dei livelli registrati nel periodo 1998-2023 per il mareografo di Bari.

Costituente	Descrizione	Periodo			Ampiezza [cm]	Fase (Greenwich) [gradi]
		hh	mm	ss		
<b>M2</b>	lunare semidiurna principale	12	25	14.16	<b>9.73</b>	75
<b>S2</b>	solare semidiurna principale	12	0	0	<b>6.04</b>	82
<b>K1</b>	lunisolare declinazione diurna	23	56	4.2	<b>5.05</b>	52
<b>N2</b>	lunare semidiurna ellittica maggiore	12	39	29.88	<b>1.61</b>	75
<b>O1</b>	lunare diurna principale	25	49	9.48	<b>1.82</b>	36

Le maree possono essere classificate sulla base delle tipiche curve di marea locali, calcolando il fattore di forma di marea  $F$ :

$$F = \frac{A_{K1} + A_{O1}}{A_{M2} + A_{S2}}$$

dove  $A$  è l'ampiezza di alcune particolari maree parziali. Il fattore  $F$  esprime il rapporto tra l'ampiezza della maggiore marea diurna e l'ampiezza della minore marea semi-diurna. In base ai valori assunti dal fattore  $F$  è possibile distinguere le diverse tipologie della marea astronomica:

- $0.00 < F < 0.25$  → Marea semi-diurna;
- $0.25 < F < 1.50$  → Marea mista prevalentemente semi-diurna;
- $1.50 < F < 3.00$  → Marea mista prevalentemente diurna;
- $F > 3.00$  → Marea diurna.

$$F_{SALERNO} = \frac{5.05 + 1.82}{9.73 + 6.04} = 0.436 \rightarrow \text{Marea mista semi - diurna}$$

<sup>2</sup> Per il presente studio sono state riportate in tabella le componenti mareali più significative. Si ricorda che l'algoritmo U-TIDE considera e analizza anche altre componenti meno significative, i cui valori sono riportati nelle appendici finali del presente elaborato.

L'analisi della componente astronomica della variazione di livello del mare ha permesso di determinare i valori massimi e minimi dell'oscillazione del livello dovuti alla componente astronomica.

I livelli di marea astronomica attesi a Bari, riferiti allo zero dello strumento (MTL) e al livello medio marino (MSL), sono riportati in Tabella 9-2.

**Tabella 9-2. Livelli di marea per Bari.**

		<b>m (MSL)</b>	<b>m (MTL)</b>
<i>Highest Astronomical Tide</i>	<b>HAT</b>	0.35	0.21
<i>Mean High Water Springs</i>	<b>MHWS</b>	0.21	0.07
<i>Mean High Water Neaps</i>	<b>MHWN</b>	0.11	-0.03
<i>Mean Sea Level</i>	<b>MSL</b>	0	-0.14
<i>Mean Low Water Neaps</i>	<b>MLWN</b>	-0.10	-0.24
<i>Mean Low Water Springs</i>	<b>MLWS</b>	-0.17	-0.31
<i>Lowest Astronomical Tide</i>	<b>LAT</b>	-0.32	-0.46

### 9.3 Analisi del residuo (componente meteorologica)

Una volta identificata la serie storica della sola componente meteorologica (residuo) è stata effettuata l'analisi dei valori estremi di tale forzante. L'analisi degli eventi estremi è stata realizzata individuando i massimi valori mensili di livello residuo relativi al periodo di misurazione e superiori a una soglia di 0.10 m, utilizzando una legge di adattamento tipo Gumbel con funzione di distribuzione:

$$P_X(x) = e^{-e^{-\varepsilon(x-u)}} \quad \text{probabilità cumulata}$$

in cui  $X$  è la variabile aleatoria,  $x$  il valore di non superamento mentre  $\varepsilon$  e  $u$  sono, rispettivamente, il parametro di scala e di posizione stimati con il metodo dei momenti a partire dalla media campionaria  $\mu$  e dalla varianza campionaria  $\sigma$  e utilizzando le seguenti relazioni:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma(x) \quad ; \quad u = \mu(x) - \gamma \varepsilon$$

Dove  $\gamma$  è la costante di Eulero-Mascheroni, pari a circa 0.577.

Per effettuare un confronto grafico in termini di distribuzioni cumulate, viene 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 Gringorten, raccomandata per le distribuzioni Gumbel (Sooyoung et al., 2008):

$$F_i = 1 - \frac{i - \alpha}{N + \beta}$$

Nel caso della distribuzione Gumbel i parametri  $\alpha$  e  $\beta$  valgono rispettivamente 0.44 e 0.12.

Viene proposto anche un confronto in termini di tempo di ritorno (in scala semilogaritmica), utilizzando le relazioni:

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

Il tempo di ritorno  $T_r(x)$  è legato, per mezzo del tempo di ritorno corretto  $T_r^*(x)$  il cui significato è illustrato più avanti, alla probabilità di non superamento dalla seguente relazione:

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

Assegnato il tempo di ritorno è quindi possibile calcolare la probabilità  $P_X$  e, una volta noti i parametri della distribuzione di probabilità Gumbel, utilizzare l'inverso della probabilità cumulata per ottenere il sovrizzo di marea meteorologica corrispondente ad un assegnato tempo di ritorno:

$$x = \frac{-\log(-\log P_X(x))}{\varepsilon} + u$$

Si tenga presente che le formule sopra riportate sono valide nel caso in cui vi sia esatta corrispondenza tra numero di misure e numero di anni di osservazione. Nelle stazioni in esame, in cui tale condizione non è verificata, è necessario correggere il tempo di ritorno per tenere conto della disuguaglianza. In particolare nel calcolo della  $P_X$  corrispondente ad un assegnato tempo di ritorno  $T_r$  va utilizzato il tempo di ritorno corretto  $T_r^*$ , calcolato mediante la relazione:

$$T_r^* = T_r \frac{N}{KM}$$

Dove  $N$  è il numero di estremi mensili considerati,  $K$  il rendimento del mareografo e  $M$  il numero di anni di osservazione.

In Figura 9-4 è riportato il confronto grafico in termini di distribuzione cumulata, mentre in Figura 9-5 l'andamento dei sovralti meteorologici in funzione del tempo di ritorno.

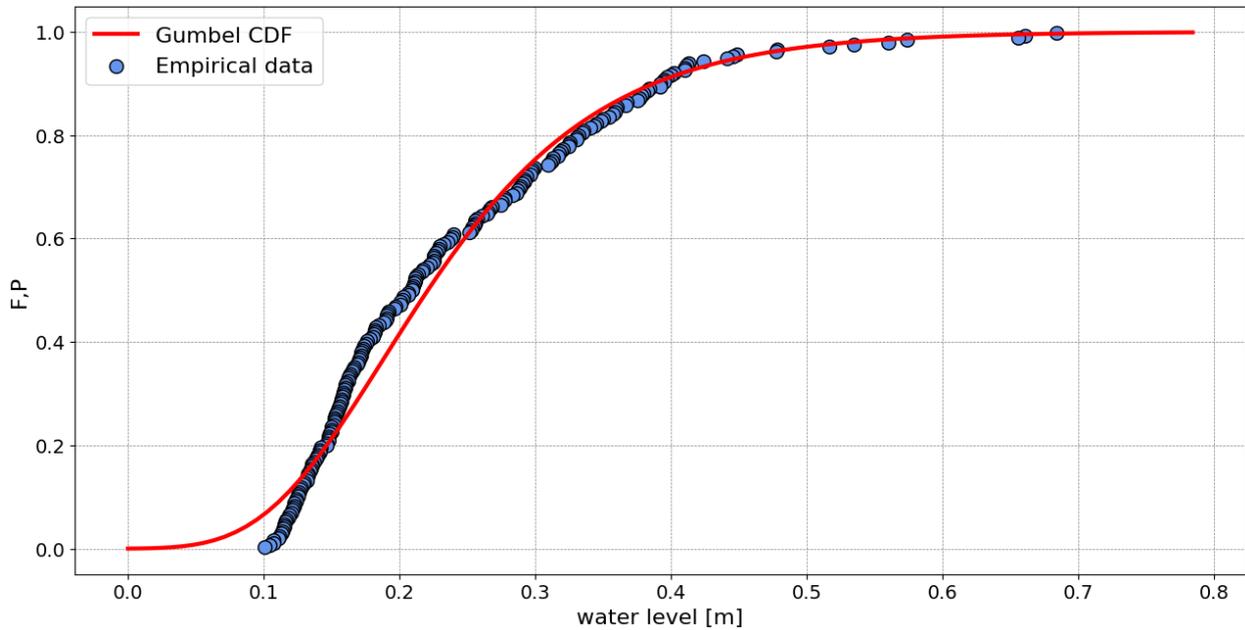


Figura 9-4. Residuo: confronto grafico in termini di distribuzione cumulata (mareografo di Bari).

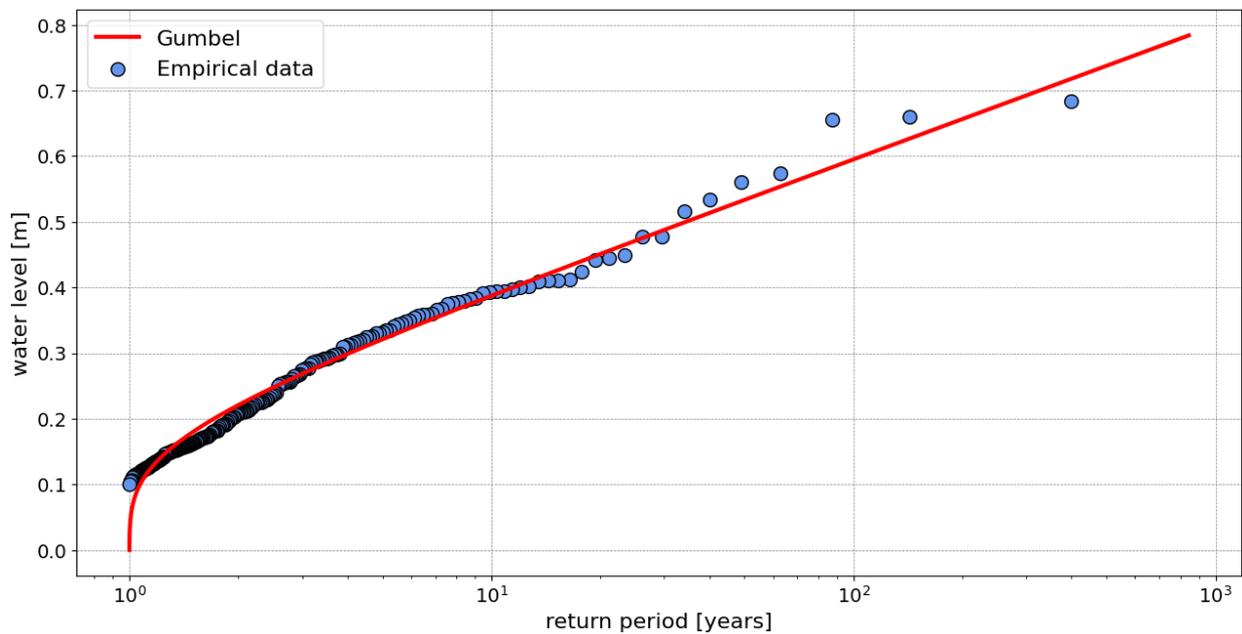


Figura 9-5. Adattamento massimi di marea meteorologica mensili con legge tipo Gumbel (soglia 0.10 m) – Mareografo di Bari.

#### 9.4 Analisi dei valori estremi totali (marea astronomica + sovralzò)

L'analisi dei valori estremi dei livelli è stata in seguito ripetuta analizzando i massimi valori mensili registrati dal mareografo (comprensivi sia della componente astronomica che della componente meteorologica), in modo da analizzare la probabilità di accadimento dei due fenomeni combinati (probabilità congiunta).

In Figura 9-6 è riportato il confronto grafico in termini di distribuzione cumulata, mentre in Figura 9-7 l'andamento dei sovralzò di marea in funzione del tempo di ritorno per i valori sopra la soglia di 0.10 m.

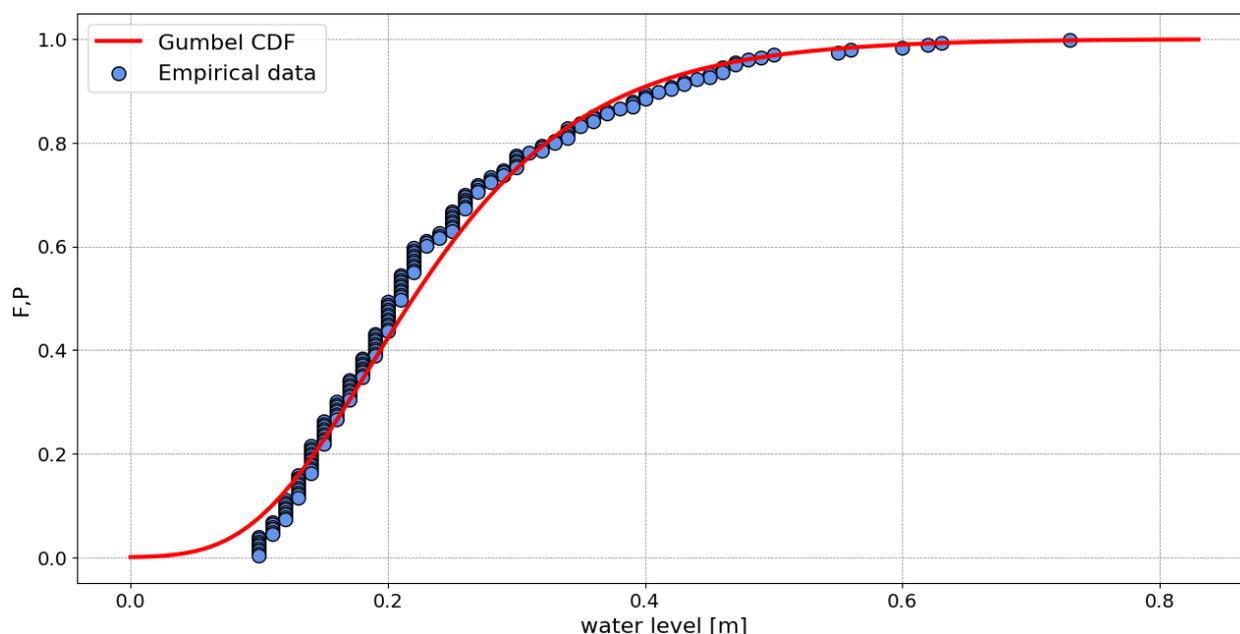


Figura 9-6. Marea totale: confronto grafico in termini di distribuzione cumulata (mareografo di Bari).

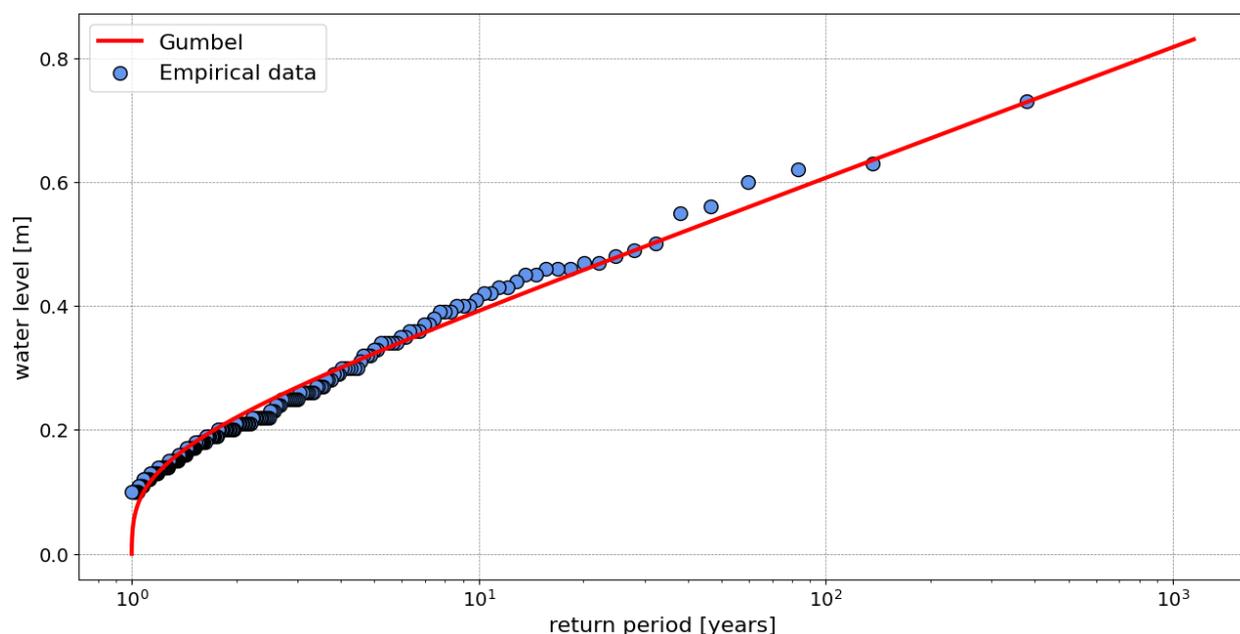


Figura 9-7. Adattamento massimi di marea mensili con legge tipo Gumbel (soglia 0.10 m) – Mareografo di Bari.

Tabella 9-3. Sovralzi di marea meteorologica in estrapolazione stimati con la distribuzione Gumbel.

<b>Bari</b>				
Tempo di ritorno	Sovralzo	Gumbel		
Tr [anni]	$\eta$ [m]	Parametri:		
2	0.46	k	0	
5	0.54	$\varepsilon$	0.088	
10	0.60	$u$	0.188	
15	0.64	<b>Campione</b>		
20	0.67	N	223	
25	0.69	M	20.12	
30	0.70	K	0.82	
50	0.75	Media	0.239 m	
100	0.81	Dev.Std	0.113 m	

Tabella 9-4. Sovralzi di marea (astronomica e meteorologica) in estrapolazione stimati con la distribuzione Gumbel.

<b>Salerno</b>				
Tempo di ritorno	Sovralzo	Gumbel		
Tr [anni]	$\eta$ [m]	Parametri:		
2	0.46	k	0	
5	0.55	$\varepsilon$	0.091	
10	0.61	$u$	0.186	
15	0.65	<b>Campione</b>		
20	0.67	N	212	
25	0.70	M	20.12	
30	0.71	K	0.82	
50	0.76	Media	0.239 m	
100	0.82	Dev.Std	0.117 m	

## 9.5 Proiezione futura del livello del mare a causa del cambiamento climatico

La proiezione futura del livello del mare è stata calcolata attraverso uno strumento online fornito dalla NASA. Questo strumento consente di estrarre un grafico del cambiamento del livello del mare per la località di interesse e considerando diversi scenari classificati come segue in base alle future emissioni di gas serra:

- SSP1-1.9: molto basso
- SSP1-2.6: basso
- SSP2-4.5: intermedio
- SSP3-7.0: alto
- SSP5-8.5: molto alto

La Figura 9-8 mostra la proiezione del livello del mare di Brindisi considerando lo scenario SSP3-7.0. La Tabella 9-5 riporta, per tutti gli scenari, il livello del mare nel 2070, secondo la plausibile vita utile dell'opera (circa 50 anni).

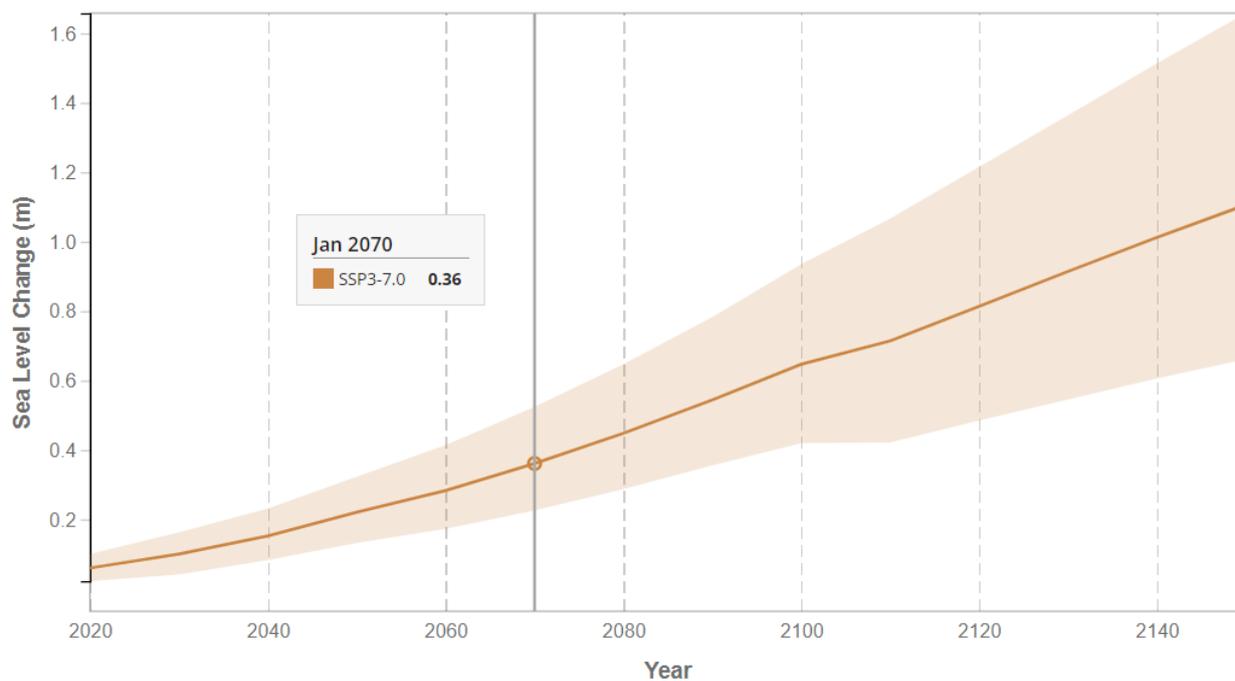


Figura 9-8. Proiezione futura del livello del mare per Brindisi (le fasce fiduciarie si riferiscono al 17esimo e al 83esimo percentile)

Tabella 9-5. Stima delle proiezioni dei livelli del mare attesi per Brindisi

2070	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
<b>BRINDISI</b>	0.26 (0.11-0.44)	0.30 (0.17-0.45)	0.34 (0.20-0.50)	0.36 (0.23-0.52)	0.40 (0.25-0.57)

**10 APPENDICI****I) Elenco completo costanti armoniche – Mareografo di Bari**

<b>Name</b>	<b>Freq</b>	<b>Amp [cm]</b>	<b>Greenwich phase</b>
M2	0.081	9.73	75
S2	0.083	6.04	82
SA	0	5.28	282
K1	0.042	5.05	52
O1	0.039	1.82	36
K2	0.084	1.80	78
SSA	0	1.71	141
P1	0.042	1.65	47
N2	0.079	1.61	75
MF	0.003	0.80	183
MM	0.002	0.69	227
MSM	0.001	0.35	194
L2	0.082	0.35	75
NU2	0.079	0.34	73
Q1	0.037	0.34	55
J1	0.043	0.28	72
S1	0.042	0.27	184
T2	0.083	0.26	96
OO1	0.045	0.22	90
NO1	0.04	0.20	41
MU2	0.078	0.20	78
2N2	0.077	0.18	75
PI1	0.041	0.16	354
PHI1	0.042	0.15	61
MSF	0.003	0.14	322
ETA2	0.085	0.13	81
H1	0.08	0.12	71
LDA2	0.082	0.09	61
M3	0.121	0.09	191
THE1	0.043	0.08	38
GAM2	0.08	0.08	98
SK3	0.125	0.08	128
RHO1	0.037	0.07	67
S4	0.167	0.06	283
EPS2	0.076	0.05	81
MS4	0.164	0.05	295
SO3	0.122	0.05	315
SIG1	0.036	0.05	58
2Q1	0.036	0.05	62
PS1	0.042	0.04	82
UPS1	0.046	0.04	112
CHI1	0.04	0.04	57
M4	0.161	0.04	245

MO3	0.119	0.04	281
R2	0.083	0.04	113
BET1	0.04	0.03	110
MK3	0.122	0.03	352
MKS2	0.081	0.03	192
MK4	0.164	0.03	15
OQ2	0.076	0.02	59
MN4	0.16	0.02	191
ALP1	0.034	0.02	63
2MS6	0.244	0.02	197
2SK5	0.208	0.02	72
H2	0.081	0.02	209
SO1	0.045	0.01	242
2SM6	0.247	0.01	212
SK4	0.167	0.01	81
2MK6	0.245	0.01	144
TAU1	0.039	0.01	359
2MK5	0.203	0.01	328
MSK6	0.247	0.01	255
MSN2	0.085	0.01	251
M8	0.322	0.01	26
SN4	0.162	0.01	17
2MN6	0.24	0.01	127
M6	0.242	0.01	213
3MK7	0.283	0.00	62