



Autorità di Sistema Portuale  
del Mare di Sardegna

## PORTO DI CAGLIARI

# ADEGUAMENTO TECNICO FUNZIONALE

Titolo elaborato :

S1 - STUDIO METEOMARINO

Scala:

2 4 0 1 0 P R 0 0 1 - 2 M A R

Segretario Generale:  
Avv. Natale Ditel

R.U.P.:  
Ing. Alessandra Mannai

Collaboratore del R.U.P.:  
Ing. Monica Deidda

Consulenze specialistiche di  
Ingegneria idraulica marittima



Gruppo di lavoro:  
Ing. Paolo Contini  
Prof. Ing. Paolo De Girolamo  
Ing. Myrta Castellino  
Ing. Jessica Ciarrocchi  
Arch. Fabrizio D'Andrea

Ing. Gioele Ruffini  
Ing. Davide Saltari

	31/01/2025	2	AGGIORNAMENTO PER PARERE CSLPP	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	20/12/2024	1	EMISSIONE DEFINITIVA	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	08/10/2024	0	EMISSIONE IN BOZZA	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Controllato:	Validato:

La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo disegno con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta.  
This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission

Visto del Committente:

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## INDICE

<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
1.1 Obiettivi e metodologia di lavoro .....	1
<b>2 DATI METEOMARINI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>2</b>
2.1 Dati di vento.....	2
2.2 Dati di moto ondoso .....	3
2.3 Dati di livello del mare.....	3
2.4 Dati di pressione atmosferica .....	4
<b>3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL SITO DI INTERESSE.....</b>	<b>5</b>
3.1 Fetch geografici ed efficaci .....	6
<b>4 ANALISI ANEMOMETRICHE .....</b>	<b>10</b>
4.1 Clima anemometrico nel punto ERA5 Cagliari (39.00°N-9.25°E).....	10
4.2 Clima anemometrico nel punto RMN Cagliari (39.210°N-9.114°E).....	11
4.3 Statistica degli stati di vento estremi per il punto RMN Cagliari (39.210°N-9.114°E) 14	
4.4 Velocità estreme del vento base previste dalle NTC 2018.....	16
<b>5 CLIMA DEL MOTO ONDOLO AL LARGO DI CAGLIARI.....</b>	<b>18</b>
5.1 Dati di moto ondoso in ricostruzione ERA5 Cagliari .....	18
<b>6 CLIMA DEL MOTO ONDOLO REGISTRATO DALLA BOA DI CAGLIARI .....</b>	<b>29</b>
6.1 Dati di moto ondoso misurati dall'ondametro di Cagliari.....	29
<b>7 CALIBRAZIONE EVENTI ESTREMI.....</b>	<b>39</b>
7.1 Analisi rendimento dell'ondametro di Cagliari.....	39
7.2 Confronto degli eventi estremi sincroni al largo di Cagliari.....	42
7.3 Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Cagliari .....	43
<b>8 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOLO IN PROSSIMITA' DEL PORTO DI CAGLIARI .....</b>	<b>46</b>
8.1 Condizioni al contorno e dati di calcolo.....	47
8.2 Clima ondometrico in costa.....	50
<b>9 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOLO .....</b>	<b>53</b>
9.1 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati.....	53
9.2 Analisi statistica con il metodo dei massimi annuali nel punto di inversa Cagliari....	54
<b>10VARIAZIONE DEL LIVELLO DEL MARE.....</b>	<b>58</b>
10.1Variazioni della pressione atmosferica .....	62
<b>11VARIAZIONI CLIMATICHE.....</b>	<b>63</b>
11.1Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Cagliari.....	63

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarino.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 1 INTRODUZIONE

L'AdSP del Mare di Sardegna con Decreto n. 216 del 14/06/2024 ha affidato alla società Modimar s.r.l. l'attività di supporto specialistico alla Direzione Tecnica SUD dell'Ente per lo studio della configurazione delle opere marittime e per gli aspetti di ingegneria marittima, finalizzato alla predisposizione dell'Adeguamento Tecnico Funzionale del PRP per la zona "A" – Porto Turistico del PRP di Cagliari (CIG B22212C614).

La presente relazione riporta i risultati dello "Studio Meteomarino" che costituisce parte del servizio di supporto specialistico di cui sopra.

Il ruolo di coordinamento del gruppo di lavoro della Modimar, che ha curato le prestazioni specialistiche di ingegneria idraulica marittima a supporto del Servizio Tecnico dell' AdSP, è stato svolto dall'Ing. Paolo Contini.

Lo Studio Meteomarino di seguito riportato ha riguardato la caratterizzazione statistica dei principali parametri meteo marini (livelli del mare, vento e moto ondoso) nel Golfo di Cagliari ed è stato redatto dalla Dott.ssa Ing. Myrta Castellino e dall' Ing. Jessica Ciarrocchi con il coordinamento scientifico del Prof. Ing. Paolo De Girolamo.

### 1.1 Obiettivi e metodologia di lavoro

Lo Studio Meteomarino ha riguardato la caratterizzazione statistica dei principali parametri meteo marini (livelli del mare, vento e moto ondoso) nel Golfo di Cagliari con l'obiettivo di definire le condizioni meteo climatiche medie ed estreme nei pressi dell'imboccatura del Porto Civico di Cagliari.

Per conseguire questo obiettivo lo studio si è articolato come di seguito riportato:

- definizione dei dati meteomarini utilizzati per la redazione dello studio;
- inquadramento geografico del Golfo di Cagliari;
- analisi anemometriche medie ed estreme;
- analisi del clima del moto ondoso al largo del Golfo di Cagliari con riferimento ai dati ERA5 ricostruiti in ri-analisi (1940-2022) e alle misure ondometriche dirette eseguita dalla boa ondometrica RON-Ispira;
- calibrazione degli eventi estremi di moto ondoso ERA5 sulla base delle misure dirette;
- propagazione della serie storica di moto ondoso in prossimità dell'imboccatura portuale e definizione degli stati di mare medio-climatici;
- definizione delle onde estreme in prossimità dell'imboccatura portuale;
- variazioni del livello del mare indotte sia dalla marea astronomica che dalla marea meteorologica;
- variazioni future del livello del mare indotte dalle variazioni climatiche dovute al riscaldamento globale.

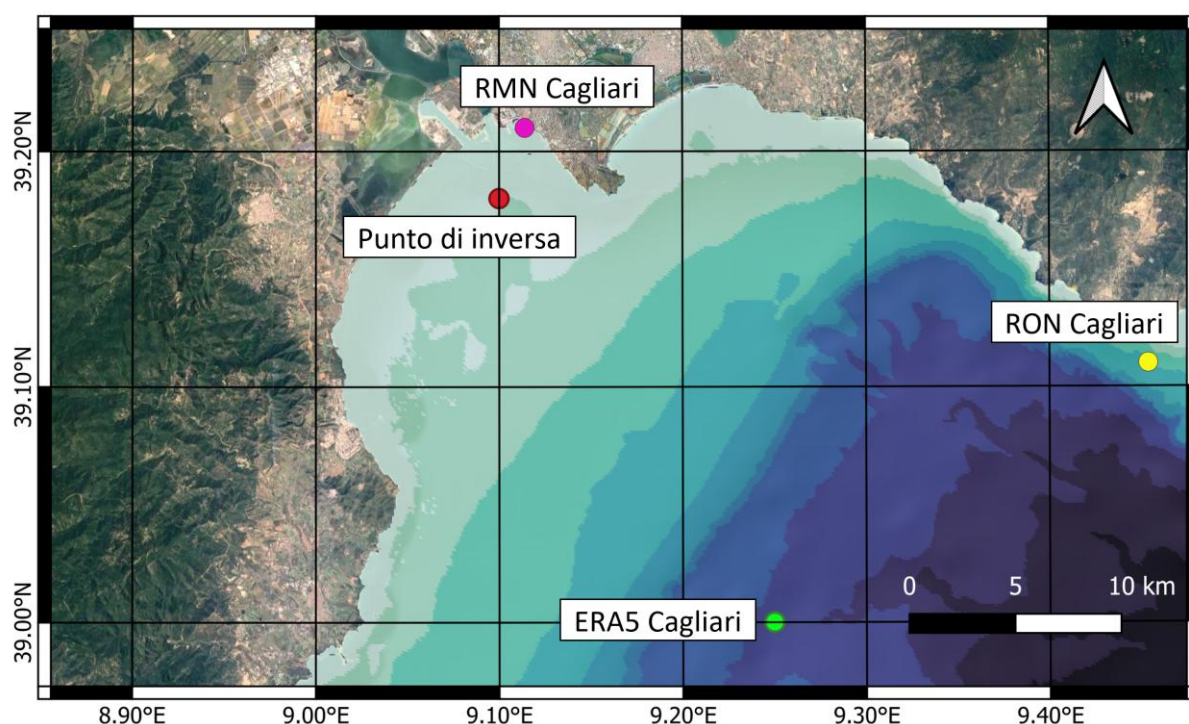
Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 2 DATI METEOMARINI DI RIFERIMENTO

Il presente capitolo riguarda i dati utilizzati nell'ambito dello studio meteomarinò del Porto di Cagliari. Con riferimento alla Figura 2.1, i dati meteomarinò attualmente più affidabili disponibili per l'area in esame e che sono stati utilizzati per la redazione del presente studio sono costituiti da:

- dati di moto ondoso e di vento ricostruiti in ri-analisi dal Centro Meteorologico Europeo (ECMWF) in corrispondenza del punto "ERA5 Cagliari" indicato nella figura;
- dati di moto ondoso provenienti da misure dirette (acquisite tramite la boa ondometrica direzionale della Rete Ondometrica Nazionale, gestita dall'ISPRA, e posta in corrispondenza del punto "RON Cagliari");
- dati di vento, di variazioni del livello del mare e della pressione atmosferica provenienti da misure dirette eseguite dall'ISPRA in corrispondenza del punto indicato nella figura con "RMN Cagliari" dove è localizzata la stazione mareografica di Cagliari facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN).

Si riportano di seguito le caratteristiche principali dei dati.



**Figura 2.1 - Localizzazione geografica dei dati utilizzati.**

### 2.1 Dati di vento

Le caratteristiche principali dei dati anemometrici utilizzati sono riportate nella Tabella 2.1. La posizione geografica dei dati è riportata graficamente in Figura 2.1. La serie storica oraria ricostruita in ri-analisi dall'ECMWF per un punto posto al largo del Golfo di Cagliari, si estende per 83 anni (1940-2022). I dati misurati a terra dalla stazione mareografica di Cagliari ricoprono una finestra temporale di 15 anni.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 83-Year Wave Hindcast: <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview</a>	Dati anemometrici ricostruiti con modello ERA5 Cagliari	39.00° N 9.25° E	1940 2022
2	Rete Mareografica Nazionale (RMN - ISPRA) Stazione di Cagliari <a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>	Dati anemometrici misurati	39.210°N 9.114° E	2010 2024

**Tabella 2.1 - Dati anemometrici acquisiti.**

## 2.2 Dati di moto ondoso

Le caratteristiche principali dei dati ondometrici utilizzati sono riportati nella seguente tabella. Anche in questo caso le serie storiche orarie ricostruite in ri-analisi dall'ECMWF e da Copernicus si estendono per 83 anni dal 1940 al 2022 mentre quelli misurati dalla boa ondometrica di Cagliari coprono un periodo di 8 anni.

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	DATI RICOSTRUITI: ECMWF-ERA5 83-Year Wave Hindcast: <a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview</a>	Dati anemometrici ricostruiti con modello ERA5 Cagliari	39.00° N 9.25° E	1940 2022
2	DATI BOA ONDAMETRICA DI CAGLIARI (RON-ISPRA)	Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondometrica RON Cagliari	39.110°N 9.454°E	2007 2014

**Tabella 2.2 - Dati di moto ondoso acquisiti.**

La posizione geografica di riferimento dei dati di moto ondoso ricostruiti e misurati è indicata in forma grafica in Figura 2.1 con il pallino verde ERA5 Cagliari localizzato ad una profondità di circa -500 m. Nella stessa figura è indicata la posizione geografica della Boa Ondometrica di Cagliari (punto giallo) posta ad una profondità di circa -150 m, facente parte della Rete Ondometrica Nazionale.

## 2.3 Dati di livello del mare

La posizione geografica di riferimento della stazione mareografica di Cagliari, facente parte della Rete Mareografica Italiana (RMN) gestita dall'ISPRA è planimetricamente indicata in Figura 2.1 (punto magenta) e nel dettaglio in Figura 2.2.

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	Rete Mareografica Nazionale (RMN - ISPRA) Stazione di Cagliari <a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>	Dati di livello misurati	39.210°N 9.114° E	2010 2024

**Tabella 2.3 - Dati di livello acquisiti.**



Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

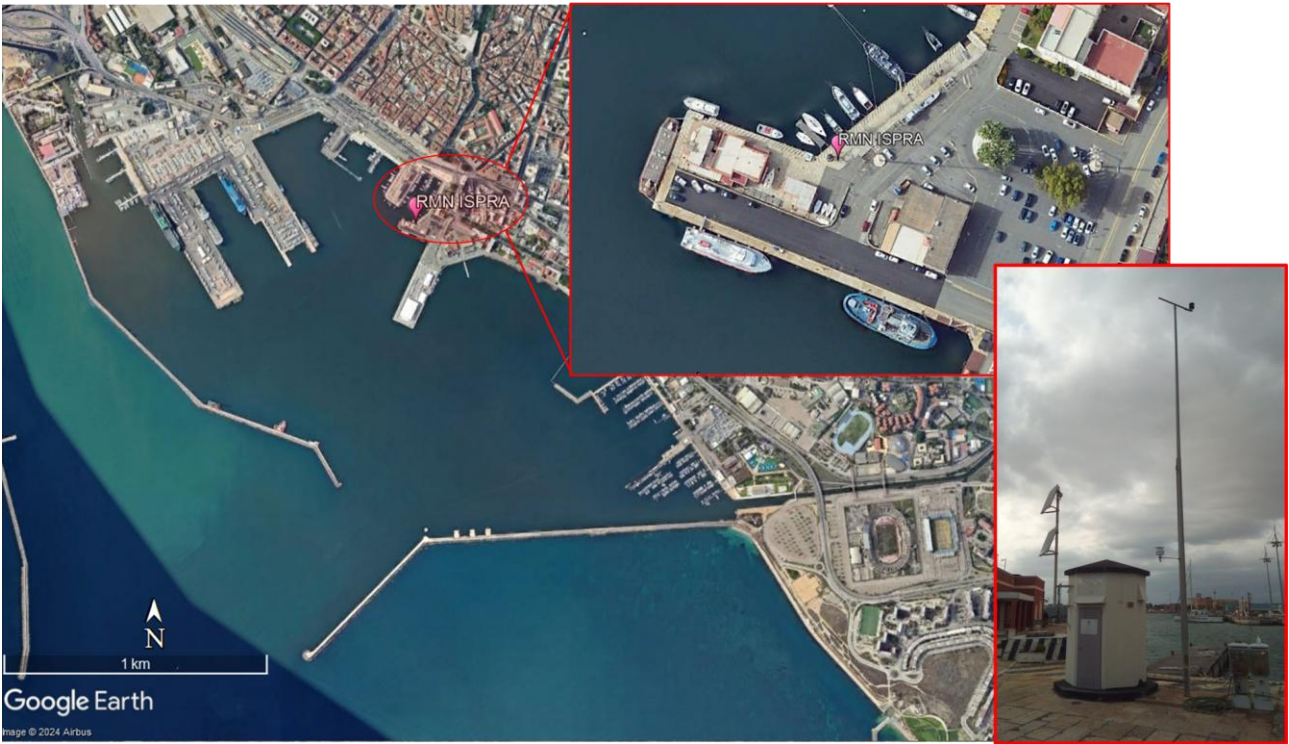


Figura 2.2 - Stazione RMN di Cagliari, posizionamento e strumento di misura.

2.4 Dati di pressione atmosferica

La posizione geografica di riferimento della stazione mareografica di Cagliari, facente parte della Rete Mareografica Italiana (RMN) gestita dall'ISPRA è planimetricamente indicata in Figura 2.1 (punto magenta) e nel dettaglio in Figura 2.2.

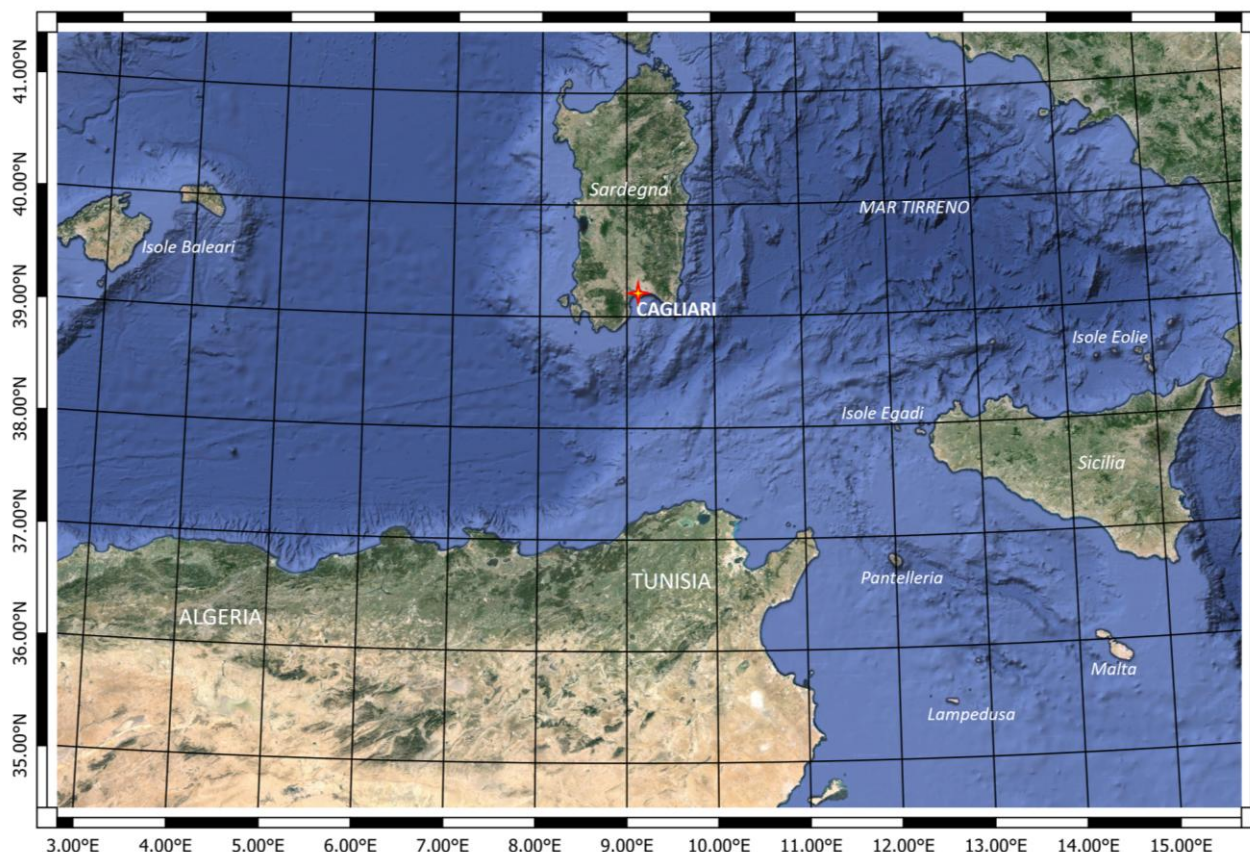
Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	Rete Mareografica Nazionale (RMN - ISPRA) Stazione di Cagliari <a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>	Dati di pressione misurati	39.210°N 9.114° E	2010 2024

Tabella 2.4 - Dati di pressione acquisiti.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarin.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

### 3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL SITO DI INTERESSE

Il Porto di Cagliari si colloca nella zona mediana dell'omonimo golfo (anche detto "golfo degli Angeli") che costituisce il margine meridionale della Sardegna (Figura 3.1) e si affaccia sul Canale di Sardegna ad una distanza di circa 200 km dalla costa africana.



*Figura 3.1 - Inquadramento geografico del Porto di Cagliari.*

Nella Figura 3.2 è riportata la zonizzazione del Porto di Cagliari prevista dal PRP. Il Porto è suddiviso in due zone: il Porto Canale posto ad Ovest e il Porto Vecchio posto ad Est.

L'area di interesse per il presente lavoro è costituita dalla Zona A (porto turistico) che è localizzata nella parte meridionale del Porto Vecchio, evidenziata nella Figura 3.2 con la linea tratteggiata gialla.

## PORTO DI CAGLIARI

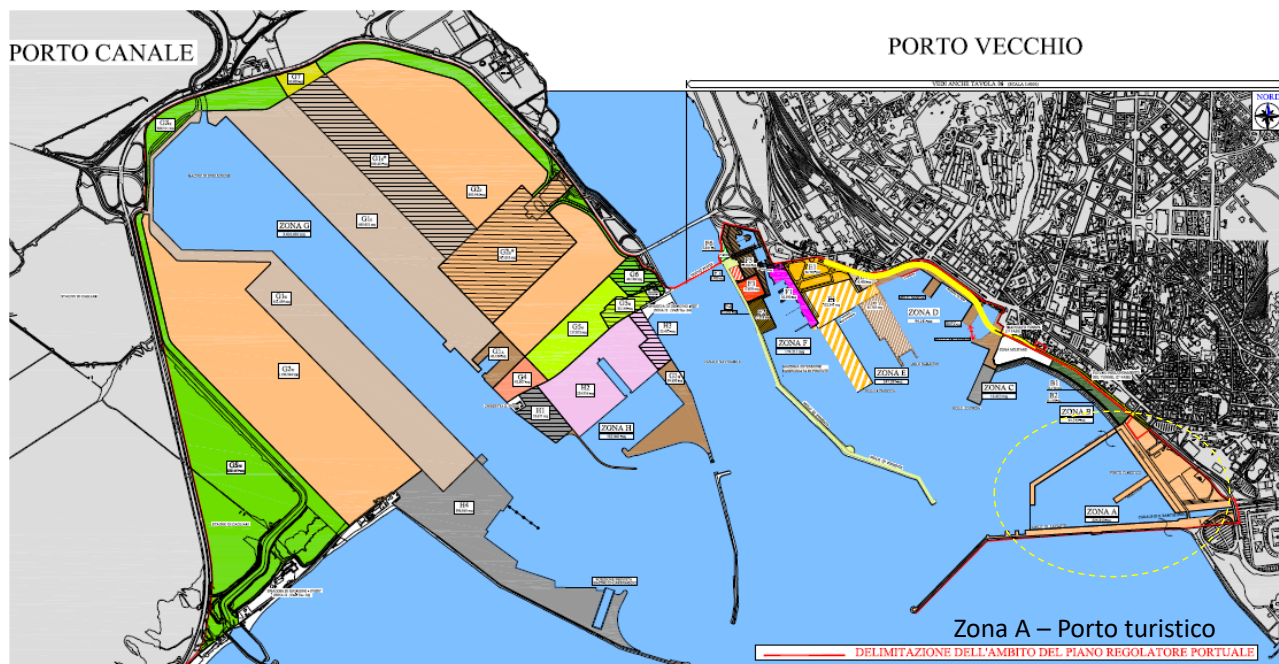


Figura 3.2 – Porto di Cagliari - Zonizzazione del Porto Canale e del Porto Vecchio prevista dal PRP.

### 3.1 Fetch geografici ed efficaci

L'analisi dell'esposizione geografica o traversia di un sito costiero si basa sulla determinazione dei fetch geografici ed efficaci. Per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso per opera dell'azione esercitata dal vento.

Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata. In questo modo i fetch efficaci consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso è generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla direzione media di azione del vento (Massel, 1996). Di conseguenza, la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici.

Il calcolo dei fetch efficaci è stato eseguito utilizzando il software ENIF (sviluppato dalla Modimar s.r.l.) che, sulla base del fetch geografico tracciato in coordinate polari, risolve la 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  $\theta_i$ ;
- $\Phi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;



Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

- $\Phi_w - \theta_i \leq \Phi_i \leq \Phi_w + \theta_i$  direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2\theta$  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
- $\theta = \pm 90^\circ$ . Nel presente caso si è fatto riferimento al metodo di Saville);
- 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  $n = 4$ ).

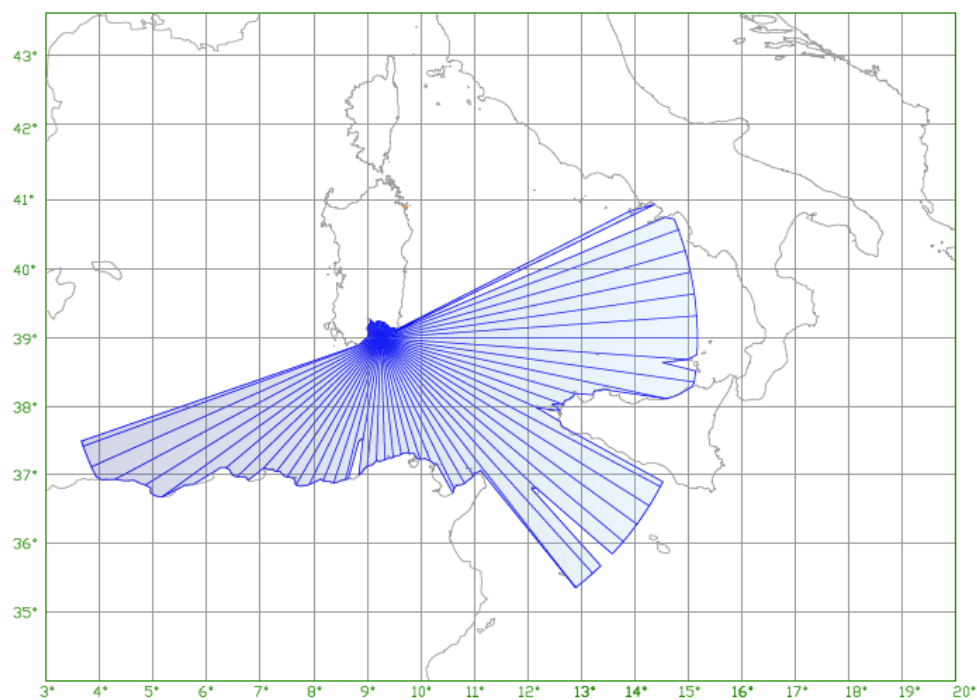
L'equazione deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretschneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991).

Nel seguito si illustrano le caratteristiche di esposizione del sito di Cagliari in termini di distribuzione direzionale dei fetch geografici e dei fetch efficaci.

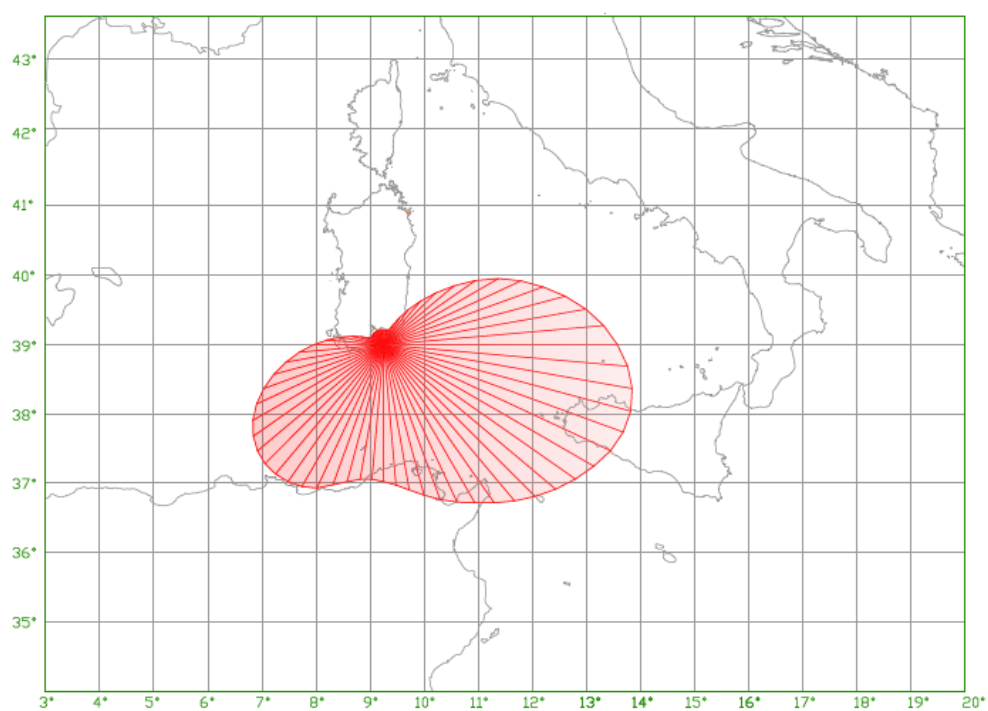
In Figura 3.3 è riportato il fetch geografico calcolato per il punto ERA5 Cagliari, di coordinate  $39.00^\circ\text{N}$ - $9.25^\circ\text{E}$ , posto a circa 25 km al largo del Porto di Cagliari. Considerato che nel Mar Mediterraneo le perturbazioni cicloniche hanno estensioni massime dell'ordine dei 500 km, i fetch geografici che riguardano il Canale di Sicilia a Sud Est ed il Mar Tirreno ad Est sono stati limitati a tale distanza.

L'applicazione del modello ENIF fornisce la correlazione tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso generato. I risultati dell'elaborazione, condotta con un passo di discretizzazione di  $1^\circ$ , sono sintetizzati, per valori discreti con passo angolare di  $10^\circ$ , nella Tabella 3.1 e riportati in forma grafica nei diagrammi cartesiani della Figura 3.5 e della Figura 3.6.

Tali risultati mostrano che il sito in esame, al largo del porto di Cagliari, risulta esposto al mare aperto per il settore di traversia compreso tra  $70^\circ\text{N}$  e  $250^\circ\text{N}$ , con il tratto a Sud Est limitato dalla costa della Sicilia, mentre tra le direzioni  $150^\circ\text{N}$  e  $230^\circ\text{N}$  il tratto è limitato dalle coste del continente africano.



*Figura 3.3 - Fetch geografico per il punto ERA5 Cagliari.*



*Figura 3.4 - Fetch efficace per il punto ERA5 Cagliari.*

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	25.54	23.37	54.0	180	194.29	213.73	-20.0
10	24.73	22.79	49.0	190	162.57	213.31	16.0
20	23.04	25.91	44.0	200	240.74	232.62	10.0
30	22.52	48.89	38.0	210	267.72	255.55	6.0
40	21.78	88.68	35.0	220	271.15	263.27	1.0
50	25.17	143.22	30.0	230	318.60	257.37	-5.0
60	25.69	206.61	25.0	240	449.76	235.84	-10.0
70	500.00	264.68	19.0	250	500.00	199.55	-16.0
80	500.00	320.60	16.0	260	28.01	155.04	-22.0
90	500.00	364.89	9.0	270	21.12	109.76	-28.0
100	485.86	393.89	4.0	280	20.46	69.18	-33.0
110	307.48	397.96	-2.0	290	19.94	37.41	-39.0
120	499.92	378.89	-8.0	300	24.20	22.62	-44.0
130	500.00	350.51	-13.0	310	27.14	23.14	-48.0
140	500.00	317.95	-16.0	320	28.33	23.81	-53.0
150	264.90	284.68	-18.0	330	28.65	24.27	-57.0
160	202.27	257.34	-21.0	340	23.28	24.36	62.0
170	186.45	229.96	-20.0	350	26.89	24.01	58.0

Tabella 3.1 - Fetch geografico ed efficace con deviazione direzionale vento/mare nel punto ERA5 Cagliari.

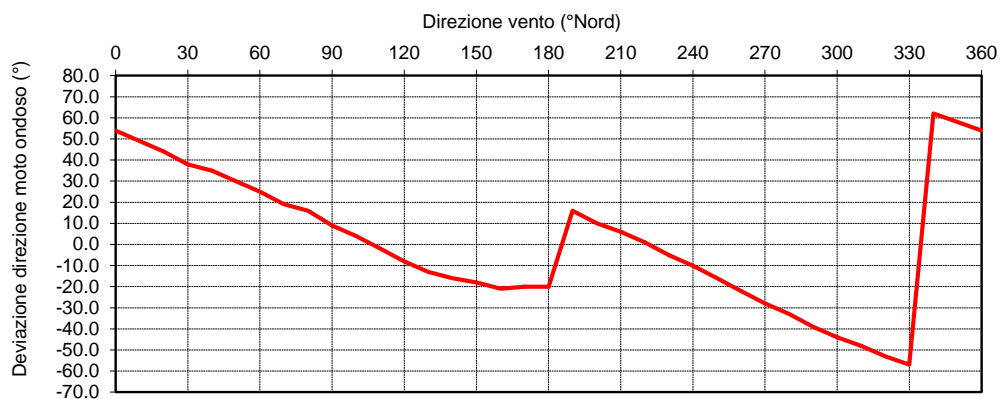


Figura 3.5 - Confronto fetch geografico ed efficace nel punto ERA5 Cagliari.

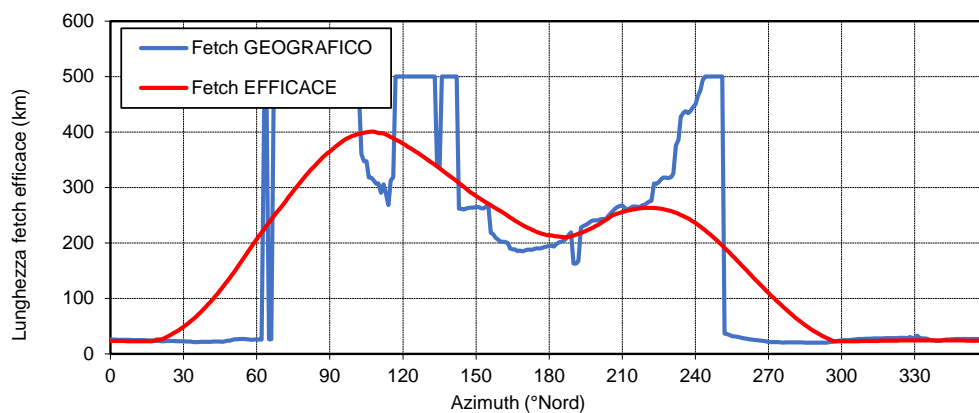


Figura 3.6 - Deviazione tra la direzione di provenienza del vento e del moto ondoso.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 4 ANALISI ANEMOMETRICHE

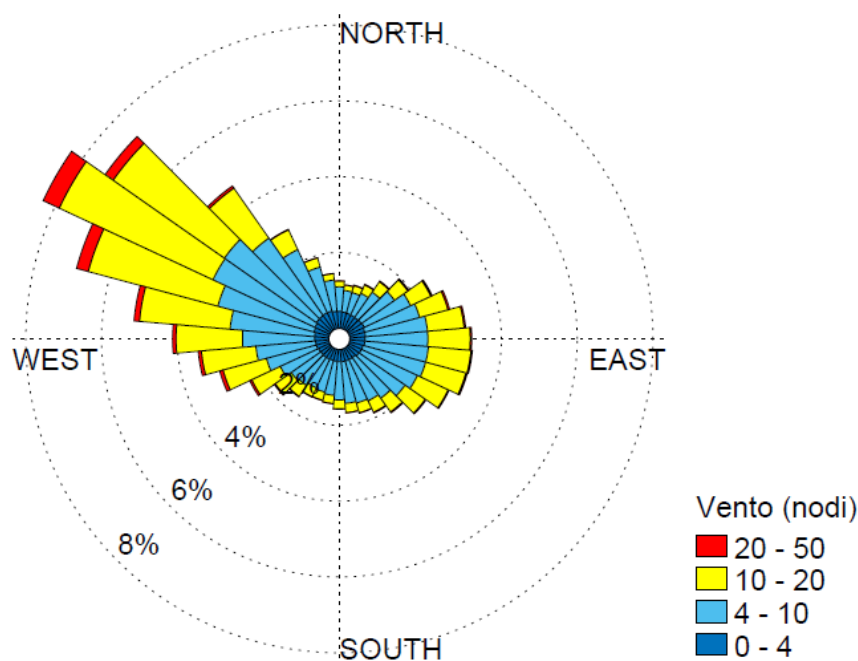
Per l'analisi del regime dei venti al largo si è fatto riferimento sia ai dati di vento ricostruiti in ri-analisi dall'ECMWF e da Copernicus e riportati nel database ERA5 sul nodo di griglia 39.00°N - 9.25°E (vedi Figura 2.1), sia ai dati misurati dalla Stazione mareografica di Cagliari posta nel punto di coordinate 39.210°N-9.114°E, nella zona mediana del porto vecchio di Cagliari e facente parte della Rete Mareografica Nazionale.

### 4.1 Clima anemometrico nel punto ERA5 Cagliari (39.00°N-9.25°E)

Nella Figura 4.1 è riportata in forma polare la rosa direzionale degli eventi anemometrici medi annuali ottenuta sulla base della serie storica oraria acquisita nel punto ERA5 Cagliari di coordinate 39.00°N-9.25°E e relativo al periodo 1940-2022. La serie storica analizzata è costituita dalla velocità del vento medio su 10 minuti alla quota + 10 m sul l.m.m..

Con riferimento alla Figura 2.1, il punto ERA5 Cagliari è posto a largo del Golfo di Cagliari.

Nella Tabella 4.1 è riportato il clima anemometrico medio annuale ottenuto classificando gli eventi anemometrici in classi di direzione, di provenienza e velocità espressa in nodi.



*Figura 4.1 - Distribuzione direzionale del regime anemometrico ricostruito nel punto ERA5 Cagliari.*



Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Direzione °N	Classi di velocità del vento (nodi)											
	da 1 a 4	4 7	7 11	11 17	17 22	22 28	28 34	34 41	41 48	48 56	56 63	Tot
10	0.30	0.47	0.54	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.433
20	0.29	0.48	0.49	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.399
30	0.30	0.46	0.46	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.407
40	0.29	0.49	0.50	0.22	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.550
50	0.31	0.52	0.58	0.34	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.838
60	0.30	0.58	0.71	0.58	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.326
70	0.33	0.69	0.89	0.83	0.22	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.993
80	0.33	0.77	1.09	1.02	0.22	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.467
90	0.35	0.81	1.20	0.96	0.17	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.517
100	0.38	0.78	1.20	0.78	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.250
110	0.35	0.77	1.24	0.74	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.223
120	0.34	0.71	1.17	0.59	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.918
130	0.33	0.66	0.99	0.42	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.486
140	0.32	0.61	0.85	0.27	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.129
150	0.31	0.58	0.74	0.20	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.875
160	0.31	0.56	0.71	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.745
170	0.30	0.55	0.68	0.13	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.672
180	0.34	0.48	0.42	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.377
190	0.41	0.41	0.19	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.138
200	0.40	0.41	0.20	0.13	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.178
210	0.40	0.43	0.24	0.16	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.302
220	0.38	0.53	0.35	0.22	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.548
230	0.42	0.67	0.50	0.29	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.972
240	0.42	0.77	0.71	0.40	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.420
250	0.39	0.80	0.90	0.51	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.736
260	0.40	0.83	1.04	0.66	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.072
270	0.38	0.89	1.28	1.07	0.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.837
280	0.36	0.97	1.71	1.70	0.38	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.187
290	0.39	1.08	2.12	2.45	0.75	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	6.940
300	0.41	1.16	2.46	3.13	1.00	0.21	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	8.394
310	0.43	1.17	2.41	2.53	0.58	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	7.245
320	0.47	1.18	1.76	1.13	0.16	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.724
330	0.47	1.03	0.98	0.39	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.911
340	0.46	0.82	0.46	0.17	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.931
350	0.43	0.61	0.26	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.443
360	0.39	0.51	0.41	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.421
% di eventi	13.211	25.225	32.449	23.009	5.182	0.878	0.046	0.000	0	0	0	100.00

**Tabella 4.1 - Tabella delle frequenze di accadimento dei venti in corrispondenza del punto ERA5 Cagliari**

Il clima anemometrico medio annuale a largo di Cagliari è di tipo bimodale con due traversie principali costituite dai venti provenienti dal IV quadrante e dal settore di levante compreso tra il I e il II quadrante.

I venti più frequenti e di maggiore intensità (venti dominanti) provengono dal IV quadrante.

Si osserva che i venti provenienti da Sud sono poco frequenti.

## 4.2 Clima anemometrico nel punto RMN Cagliari (39.210°N-9.114°E)

Nella Figura 4.2 è riportata in forma polare la rosa direzionale degli eventi anemometrici ottenuta sulla base delle misurazioni acquisite dalla stazione mareografica di Cagliari, facente parte della Rete Mareografica Nazionale, posto in corrispondenza del punto di coordinate 39.210°N-9.114°E e relativo al periodo di misurazione 2010-2024.

Si evidenzia che la Stazione Mareografica di Cagliari, gestita dall'Ispra, si trova nella zona mediana del bacino del Porto Vecchio di Cagliari.

Nella Tabella 4.2 è riportato il clima anemometrico ottenuto classificando gli eventi anemometrici misurati dalla stazione in classi di direzione, di provenienza e velocità espressa in nodi. Anche in questo caso la serie storica misurata è costituita da vento medio su 10 minuti.

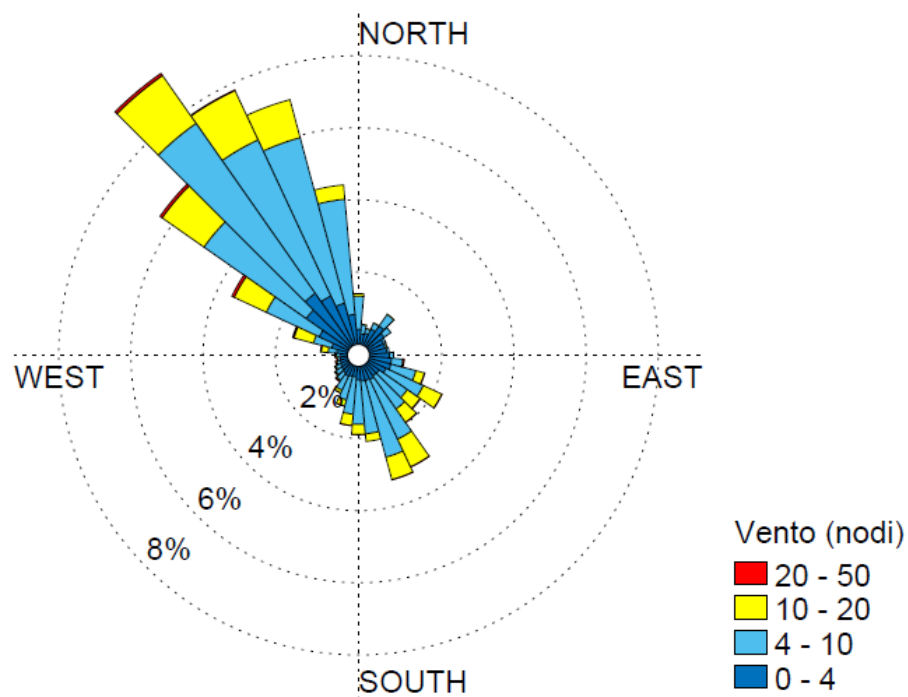


Figura 4.2 - Distribuzione direzionale del regime anemometrico misurato nel punto RMN Cagliari.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Direzione °N	Classi di velocità del vento (nodi)											Tot
	da 1 a 4	4 a 7	7 a 11	11 a 17	17 a 22	22 a 28	28 a 34	34 a 41	41 a 48	48 a 56	56 a 63	
10	0.37	0.30	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.774
20	0.40	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.581
30	0.59	0.22	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.835
40	0.88	0.45	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.369
50	0.74	0.34	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.106
60	0.58	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.699
70	0.57	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.654
80	0.61	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.703
90	0.67	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.814
100	0.79	0.32	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.221
110	0.82	0.59	0.41	0.20	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.037
120	0.68	0.78	1.04	0.55	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.088
130	0.53	0.65	0.85	0.43	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.492
140	0.46	0.68	0.96	0.45	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.562
150	0.52	0.94	1.83	0.78	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.092
160	0.52	1.21	2.30	0.65	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.698
170	0.48	1.08	1.30	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.031
180	0.48	1.01	0.98	0.22	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.692
190	0.40	0.78	0.85	0.31	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.356
200	0.40	0.62	0.51	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.727
210	0.41	0.41	0.26	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.185
220	0.37	0.29	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.833
230	0.35	0.20	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.676
240	0.29	0.14	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.574
250	0.25	0.10	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.460
260	0.21	0.09	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.379
270	0.23	0.10	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.444
280	0.32	0.16	0.16	0.14	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.824
290	0.56	0.38	0.37	0.51	0.13	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.956
300	1.05	1.13	1.04	0.89	0.21	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.362
310	1.83	2.79	2.17	1.36	0.27	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.469
320	2.38	5.14	3.26	1.61	0.27	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.707
330	1.97	4.33	3.14	1.55	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.144
340	1.57	3.79	3.17	1.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.598
350	1.11	2.93	2.26	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.682
360	0.54	1.00	0.58	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.178
% di eventi	24.938	33.495	28.291	11.812	1.272	0.182	0.010	0.001	0	0	0	100.00

**Tabella 4.2 - Tabella delle frequenze di accadimento dei venti in corrispondenza del punto RMN Cagliari.**

Rispetto al clima anemometrico a largo relativo al punto ERA5 Cagliari, la stazione anemometrica RMN di Cagliari è soggetta a venti di intensità mediamente inferiori. Inoltre il settore di Maestrale-Tramontana caratterizzato dalla maggiore frequenza ed intensità risulta ruotato leggermente verso Nord, rispetto a quello a largo.

Invece il settore secondario, rispetto a quello a largo, risulta ruotato verso Scirocco (140°N-170°N).

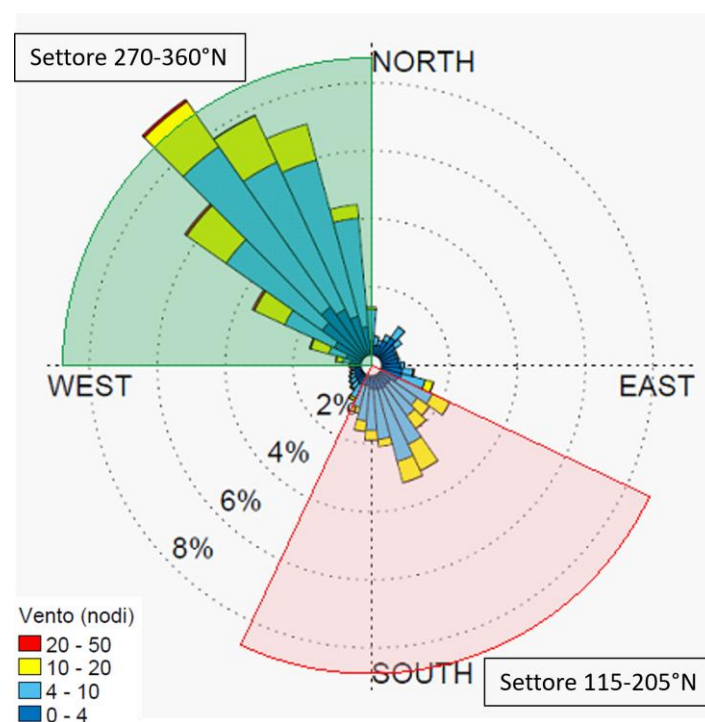
Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

### 4.3 Statistica degli stati di vento estremi per il punto RMN Cagliari (39.210°N-9.114°E)

Nel presente paragrafo viene illustrata l'analisi degli stati di vento estremi, eseguita tramite l'utilizzo del metodo POT (Peak Over Threshold), per il vento registrato dalla stazione mareografica di Cagliari. Il vento misurato dalla stazione e di seguito analizzato è costituito dal valore medio su 10 minuti.

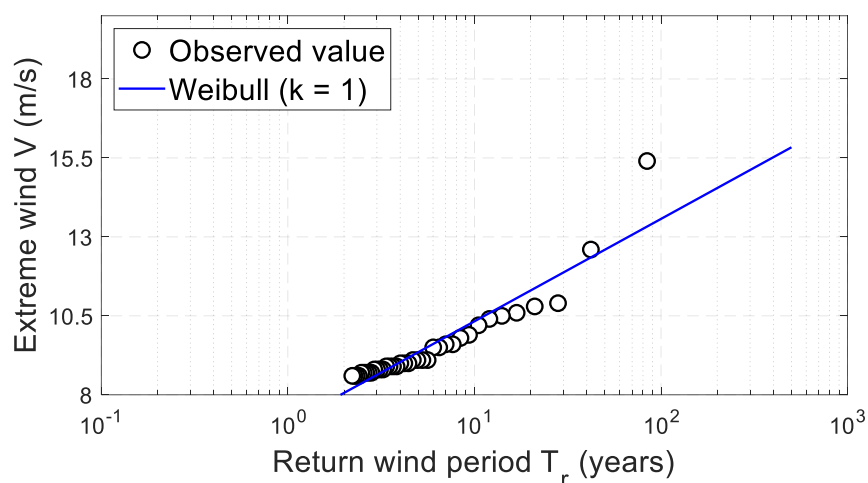
A partire dall'intera serie storica dei dati di vento, misurata nel punto RMN Cagliari (39.210°N-9.114°N), sono stati selezionati gli eventi con velocità maggiore di 5 m/s e caratterizzati da una persistenza maggiore di 12 ore.

Sono stati individuati due settori di provenienza del vento, rispettivamente il Settore 115°N-205°N ed il Settore 270°N-360°N, come illustrato nella Figura 4.3. Si è imposta un'ulteriore soglia di troncamento, per il settore 115°N-205°N pari a 8.5 m/s ottenendo 35 eventi, mentre per il settore 270°N-360°N la soglia è stata posta pari a 11 m/s per un totale di 38 eventi. Si è quindi applicata una funzione di probabilità alla Weibull (con fattore  $k=1$ ) che è risultata la più adatta a rappresentare gli eventi estremi, i cui risultati sono riportati in forma grafica nella Figura 4.4 e Figura 4.5, nella Tabella 4.3 e Tabella 4.4, nelle quali sono riportati i valori estremi di  $V$  (m/s) in riferimento ai tempi di ritorno 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 anni.



**Figura 4.3 - Individuazione dei settori di provenienza del vento per il punto di misura RMN Cagliari (39.210°N-9.114°N).**

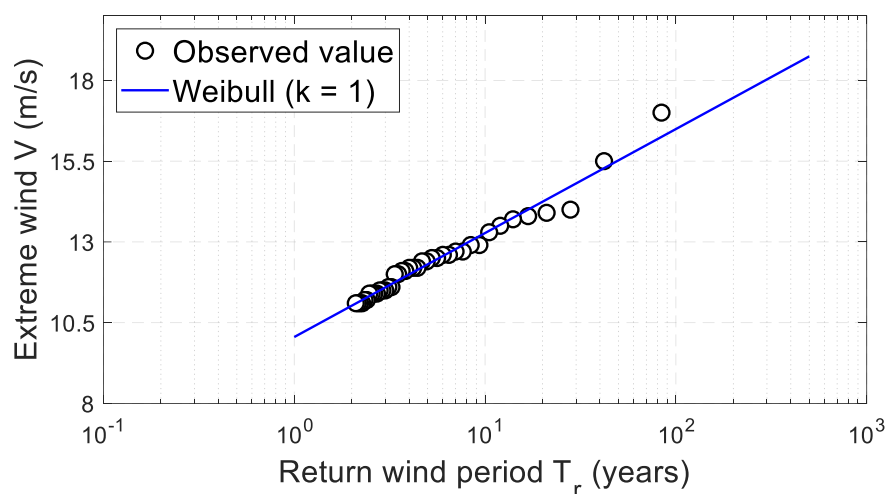




**Figura 4.4 - Valori V- metodo POT. Legge Weibull ( $k=1.00$ ) - Settore 115°N-205°N per la stazione di misura RMN Cagliari (39.210°N-9.114°N).**

Settore 115-205°N	
Tr (anni)	V (m/s)
2	8.06
5	9.35
10	10.33
15	10.90
20	11.30
25	11.62
50	12.59
100	13.57

**Tabella 4.3 - Eventi estremi - Settore 115°N-205°N.**



**Figura 4.5 - Valori V- metodo POT. Legge Weibull ( $k=1.00$ ) - Settore 270°N-360°N per la stazione di misura RMN Cagliari (39.210°N-9.114°N).**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Settore 270 - 360	
Tr (anni)	V (m/s)
2	11.02
5	12.31
10	13.27
15	13.84
20	14.24
25	14.56
50	15.52
100	16.49

**Tabella 4.4 - Eventi estremi - Settore 270°N-360°N.**

#### 4.4 Velocità estreme del vento base previste dalle NTC 2018

Si riporta infine la velocità del vento base di riferimento ( $v_{b,o}$ ) (media su 10 minuti alla quota di + 10 m sul l.m.m.) riportata nel Paragrafo 3.3.1 (Velocità base di riferimento) delle NTC2018. La zona di interesse, ove ricade il Porto di Cagliari, come si evince dalla Figura 4.6, è la 5, ovvero la zona a Oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola della Maddalena



**Figura 4.6 – NTC2018 (Fig. 3.3.1) Mappa delle zone in cui è suddiviso il territorio italiano.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	$a_0$ [m]	$k_s$
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

**Tabella 4.5 – NTC2018 (Tab. 3.3.I) Valori dei parametri  $v_{b,0}$ ,  $a_0$ ,  $k_s$ .**

Dalla Tabella 4.5 risulta che tale velocità del vento, corrispondente ad un tempo di ritorno  $T_r = 50$  anni, risulta essere  $v_{b,0} = 28 \text{ m/s}$ .

Si ricorda che la normativa fornisce anche valori della velocità del vento per tempi di ritorno maggiori (vedi paragrafo 3.3.2 Velocità di riferimento).

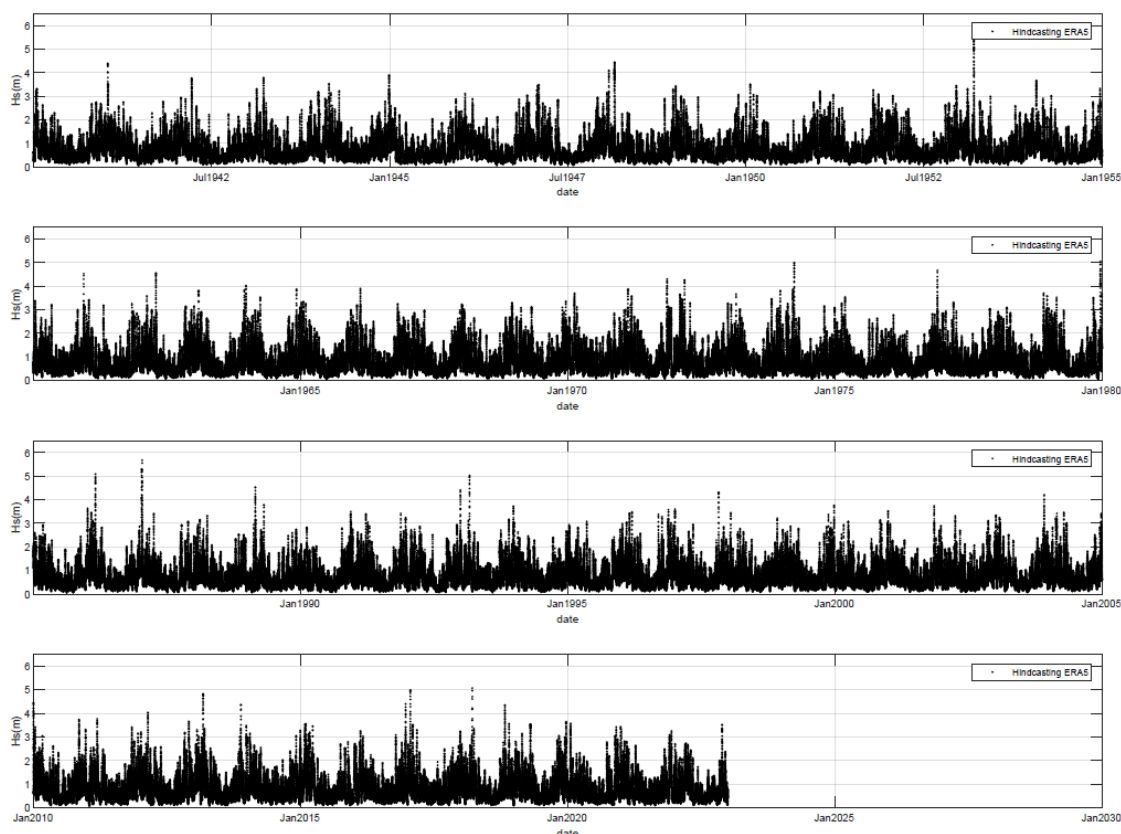
## 5 CLIMA DEL MOTO ONDO SO AL LARGO DI CAGLIARI

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso al largo di Cagliari si è fatto riferimento alla serie storica dei dati ondametrici ERA5. Nel dettaglio, ERA5 rende disponibili i dati meteomarinari orari (moto ondoso, vento e pressione atmosferica) ricostruiti in ri-analisi dal 1940 al 2022, con un passo di discretizzazione spaziale LAT/LON di  $0.25^\circ$  e una discretizzazione temporale oraria.

Questi dati sono stati acquisiti sul punto di griglia  $39.00^\circ\text{N}$ - $9.25^\circ\text{E}$ , indicato in Figura 2.1 come “ERA5 Cagliari” e utilizzati come condizione al largo del sito in esame.

### 5.1 Dati di moto ondoso in ricostruzione ERA5 Cagliari

La serie storica ondametrica oraria, che copre con continuità 83 anni relativa al punto ERA5 Cagliari di coordinate  $39.00^\circ\text{N}$ - $9.25^\circ\text{E}$ , è costituita da 727584 stati di mare. La serie storica dell'altezza d'onda significativa  $H_s$ , relativa a tale punto, è riportata a titolo di esempio graficamente nella Figura 5.1.



**Figura 5.1 - Serie storica dei valori di  $H_s$  ricostruiti nel punto ERA5 Cagliari di coordinate  $39.00^\circ\text{N}$ - $9.25^\circ\text{E}$  nel periodo 1940-2022.**

Nella Figura 5.2, nella Tabella 5.1 nella Tabella 5.2, è riportato il clima ondametrico relativo al punto ERA5 sia in forma grafica, sia in forma numerica.

In particolare, mentre in ciascuna casella della Tabella 5.1 è riportato il numero degli eventi osservati (classificati in termini di  $H_s$  e di direzione di provenienza), nella Tabella 5.2 gli stessi eventi sono forniti in percentuale la quale coincide con la loro frequenza di accadimento media annuale.



Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarino.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

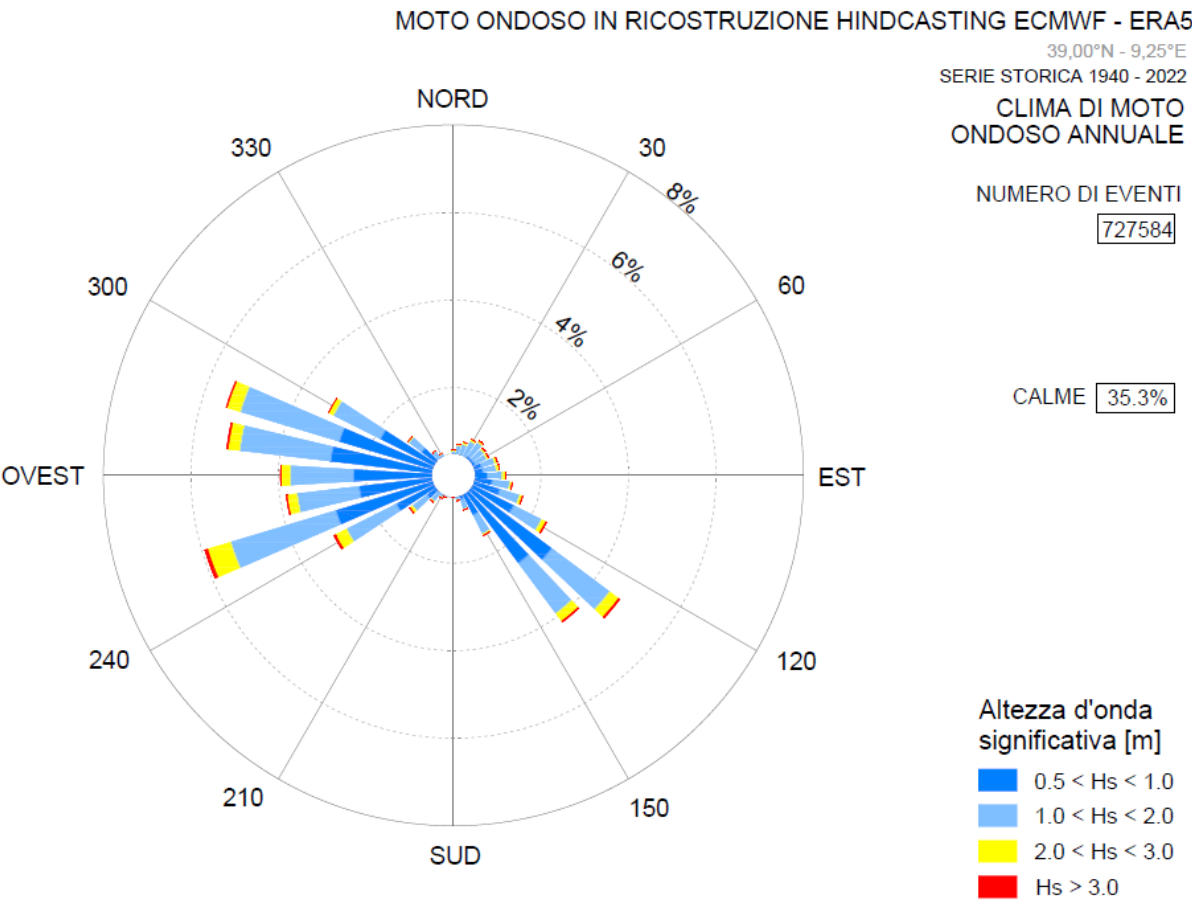


Figura 5.2 - Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con Hs>0.5 m nel punto ERA5 Cagliari di coordinate 39°N - 9.25°E.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot
	<0.25	0.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5	
10	672	1851	2779	1632	612	154	56	8								7764
20	678	2115	3066	1684	639	271	114	37								8604
30	662	2366	3508	1994	811	334	58	12								9745
40	933	2751	3931	2108	779	261	71	16	5	1						10856
50	986	3215	3930	1613	675	243	123	26	4	5						10820
60	1087	3579	4040	1484	637	280	75	39	4	6						11231
70	1386	3965	4841	1561	734	330	110	39	18	6						12990
80	1996	4012	4906	1622	636	303	192	38	3							13708
90	2212	4790	5571	1773	807	396	146	65	3	2	2	7				15774
100	2622	6062	6497	2178	760	255	110	58	13			5				18560
110	3013	7941	8062	2598	815	353	143	25	25	28	5	2				23010
120	3320	10485	11193	3793	1392	536	268	109	31	7	6	2				31142
130	3623	13818	20342	8730	3296	1399	450	146	75	19	12	1				51911
140	3422	12252	18148	7616	2817	1199	381	110	40	28	20	1				46034
150	2723	6306	7365	2625	862	237	49	24	2	2						20195
160	1952	3898	4147	1339	376	79	34	7	1	1						11834
170	1481	2932	2929	983	266	71	15		1	2						8680
180	1514	2767	2576	780	244	63	6	1		3						7954
190	1418	2610	2441	764	218	52	13	2	3	1						7522
200	1502	2885	2625	917	224	55	19	5	1		1					8234
210	1508	3054	2819	999	323	86	23	8	1	2	2					8825
220	1530	3770	3573	1307	471	164	52	22	6	3	4	2				10904
230	1663	4871	5427	2061	958	405	153	53	12	9	5					15617
240	1794	6504	10583	6117	3181	1398	665	219	48	22	7	4	2			30544
250	2018	9560	20369	12163	6106	2902	1113	372	85	28	10	2				54728
260	2185	10592	15759	7123	3277	1154	538	107	25	1	1	3				40765
270	2610	11351	16625	7413	3048	1144	404	103	16	5						42719
280	2442	11553	20542	10888	4341	1447	511	170	34	3						51931
290	1975	10667	19770	12283	4921	1770	546	141	27							52100
300	1658	7922	13550	6419	2343	687	198	52	3							32832
310	1264	5082	6563	1905	714	174	36	13								15751
320	881	2984	3292	1268	435	76	13	2								8951
330	709	2164	2524	1058	464	82	12	7								7020
340	620	1673	2185	967	375	84	5	5								5914
350	600	1599	2064	1022	404	104	23	11								5827
360	582	1761	2359	1200	522	127	30	7								6588
Tot	61241	195707	270901	121987	49483	18675	6755	2059	486	184	75	29	2	0	0	727584

**Tabella 5.1 - Numero di eventi di moto ondoso al largo di Cagliari suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione. Punto di acquisizione ERA5 Cagliari 39.00°N - 9.25°E.  
Periodo di riferimento 1940 – 2022.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa Hs [m]															Tot	>0.5
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10	0.092	0.254	0.382	0.224	0.084	0.021	0.008	0.001								1.1	0.7
20	0.093	0.291	0.421	0.231	0.088	0.037	0.016	0.005								1.2	0.8
30	0.091	0.325	0.482	0.274	0.111	0.046	0.008	0.002								1.3	0.9
40	0.128	0.378	0.540	0.290	0.107	0.036	0.010	0.002	0.001	0.000						1.5	1.0
50	0.136	0.442	0.540	0.222	0.093	0.033	0.017	0.004	0.001	0.001						1.5	0.9
60	0.149	0.492	0.555	0.204	0.088	0.038	0.010	0.005	0.001	0.001						1.5	0.9
70	0.190	0.545	0.665	0.215	0.101	0.045	0.015	0.005	0.002	0.001						1.8	1.0
80	0.274	0.551	0.674	0.223	0.087	0.042	0.026	0.005	0.000							1.9	1.1
90	0.304	0.658	0.766	0.244	0.111	0.054	0.020	0.009	0.000	0.000	0.000	0.001				2.2	1.2
100	0.360	0.833	0.893	0.299	0.104	0.035	0.015	0.008	0.002			0.001				2.6	1.4
110	0.414	1.091	1.108	0.357	0.112	0.049	0.020	0.003	0.003	0.004	0.001	0.000				3.2	1.7
120	0.456	1.441	1.538	0.521	0.191	0.074	0.037	0.015	0.004	0.001	0.001	0.000				4.3	2.4
130	0.498	1.899	2.796	1.200	0.453	0.192	0.062	0.020	0.010	0.003	0.002	0.000				7.1	4.7
140	0.470	1.684	2.494	1.047	0.387	0.165	0.052	0.015	0.005	0.004	0.003	0.000				6.3	4.2
150	0.374	0.867	1.012	0.361	0.118	0.033	0.007	0.003	0.000	0.000						2.8	1.5
160	0.268	0.536	0.570	0.184	0.052	0.011	0.005	0.001	0.000	0.000						1.6	0.8
170	0.204	0.403	0.403	0.135	0.037	0.010	0.002		0.000	0.000						1.2	0.6
180	0.208	0.380	0.354	0.107	0.034	0.009	0.001	0.000		0.000						1.1	0.5
190	0.195	0.359	0.335	0.105	0.030	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000						1.0	0.5
200	0.206	0.397	0.361	0.126	0.031	0.008	0.003	0.001	0.000		0.000					1.1	0.5
210	0.207	0.420	0.387	0.137	0.044	0.012	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000					1.2	0.6
220	0.210	0.518	0.491	0.180	0.065	0.023	0.007	0.003	0.001	0.000	0.001	0.000				1.5	0.8
230	0.229	0.669	0.746	0.283	0.132	0.056	0.021	0.007	0.002	0.001	0.001					2.1	1.2
240	0.247	0.894	1.455	0.841	0.437	0.192	0.091	0.030	0.007	0.003	0.001	0.001	0.000			4.2	3.1
250	0.277	1.314	2.800	1.672	0.839	0.399	0.153	0.051	0.012	0.004	0.001	0.000				7.5	5.9
260	0.300	1.456	2.166	0.979	0.450	0.159	0.074	0.015	0.003	0.000	0.000	0.000				5.6	3.8
270	0.359	1.560	2.285	1.019	0.419	0.157	0.056	0.014	0.002	0.001						5.9	4.0
280	0.336	1.588	2.823	1.496	0.597	0.199	0.070	0.023	0.005	0.000						7.1	5.2
290	0.271	1.466	2.717	1.688	0.676	0.243	0.075	0.019	0.004							7.2	5.4
300	0.228	1.089	1.862	0.882	0.322	0.094	0.027	0.007	0.000							4.5	3.2
310	0.174	0.698	0.902	0.262	0.098	0.024	0.005	0.002								2.2	1.3
320	0.121	0.410	0.452	0.174	0.060	0.010	0.002	0.000								1.2	0.7
330	0.097	0.297	0.347	0.145	0.064	0.011	0.002	0.001								1.0	0.6
340	0.085	0.230	0.300	0.133	0.052	0.012	0.001	0.001								0.8	0.5
350	0.082	0.220	0.284	0.140	0.056	0.014	0.003	0.002								0.8	0.5
360	0.080	0.242	0.324	0.165	0.072	0.017	0.004	0.001								0.9	0.6
Tot	8.42	26.90	37.23	16.77	6.80	2.57	0.93	0.28	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00			100.0	64.7
Tot. cumul.		35.3	72.5	89.3	96.1	98.7	99.6	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 5.2 - Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso al largo di Cagliari suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione. Punto di acquisizione ERA5 Cagliari 39.00°N - 9.25°E. Periodo di riferimento 1940 – 2022.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarino.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Il diagramma polare di Figura 5.2 rappresentativo del clima ondametrico medio annuale, mostra che il punto in esame posto a largo del sito di interesse, presenta due settori di traversia principali, uno ricadente nel II quadrante l'altro tra il III e il IV quadrante.

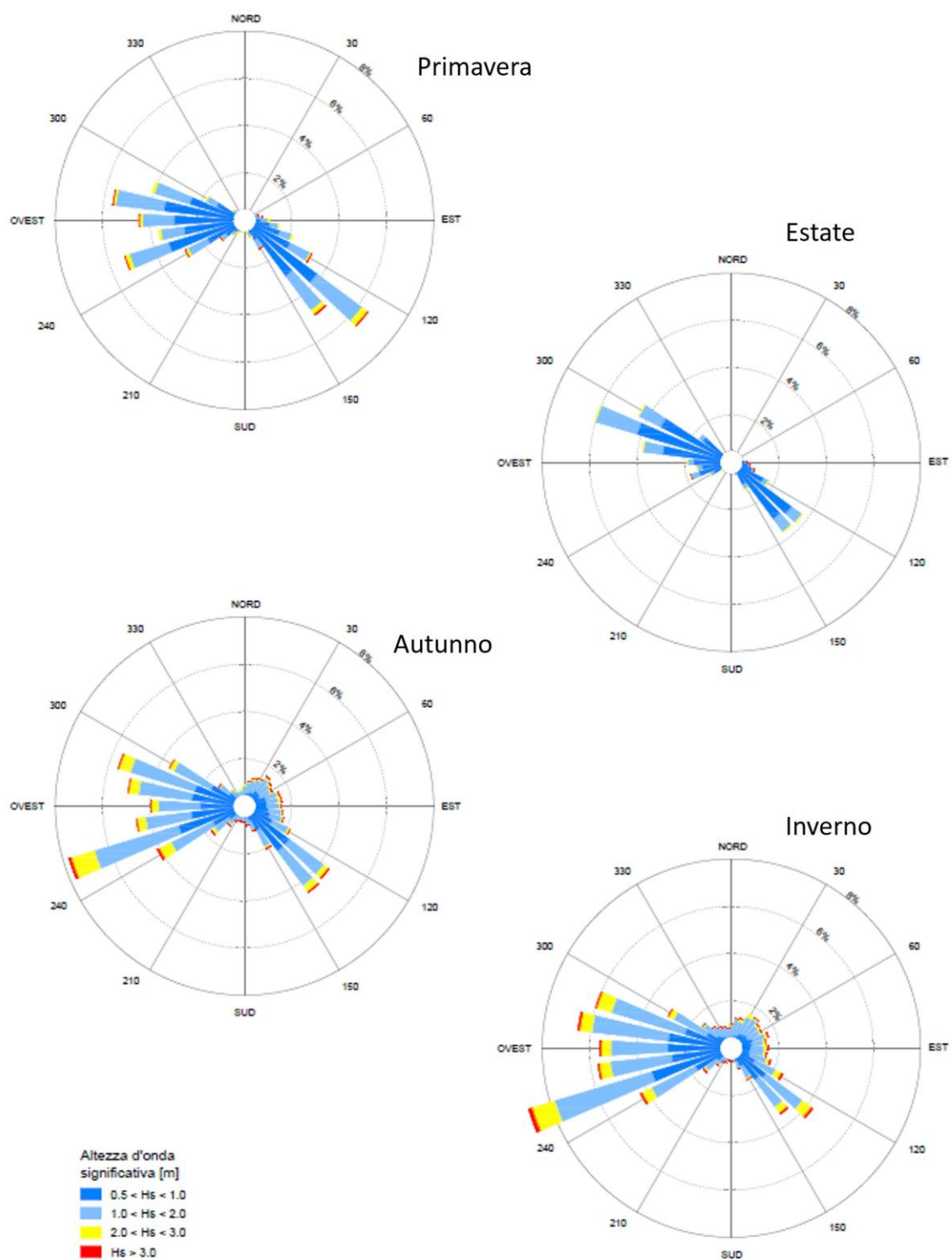
Gli stati di mare provenienti dal Ponente risultano sia di maggiore intensità, sia di maggiore frequenza rispetto a quelli provenienti da Scirocco e pertanto il settore di Ponente può essere considerato per il punto posto a largo il settore di traversia principale.

Il settore di Scirocco è compreso tra le direzioni 100°N e 150°N, mentre quello di Ponente è compreso tra le direzioni 230°N e 300°N.

In Figura 5.3 sono riportate le rose ondametriche medie stagionali desunte sempre dalla serie storica. La Tabella 5.3, la Tabella 5.4, la Tabella 5.5 e la Tabella 5.6 riportano le rose stagionali in forma numerica.

Nella Figura 5.4 è riportata la curva di durata delle altezze d'onda significative Hs medie annuali per il punto ERA5 Cagliari.





**Figura 5.3 - Rose di distribuzione direzionale su base stagionale degli eventi di moto ondoso con  $H_s > 0.5\text{m}$  nel punto ERA 5 Cagliari di coordinate  $39.00^\circ\text{N} - 9.25^\circ\text{E}$ .**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10	0.077	0.170	0.199	0.075	0.023	0.003										0.5	0.3
20	0.054	0.165	0.279	0.062	0.021	0.003										0.6	0.4
30	0.071	0.258	0.333	0.077	0.021	0.005										0.8	0.4
40	0.128	0.263	0.359	0.076	0.026	0.001										0.9	0.5
50	0.115	0.333	0.296	0.064	0.020	0.001										0.8	0.4
60	0.137	0.340	0.392	0.071	0.017	0.003	0.001									1.0	0.5
70	0.185	0.451	0.461	0.105	0.041	0.010	0.010	0.001								1.3	0.6
80	0.293	0.495	0.535	0.159	0.048	0.015	0.006	0.003								1.6	0.8
90	0.369	0.736	0.712	0.223	0.083	0.043	0.004									2.2	1.1
100	0.485	1.002	1.065	0.283	0.104	0.029	0.004									3.0	1.5
110	0.584	1.416	1.565	0.441	0.084	0.039	0.006									4.1	2.1
120	0.579	1.700	2.169	0.702	0.237	0.056	0.014	0.005	0.001							5.5	3.2
130	0.578	2.167	3.822	1.771	0.601	0.225	0.065	0.020	0.003							9.3	6.5
140	0.573	1.845	2.941	1.294	0.519	0.161	0.051	0.015	0.006	0.006	0.002					7.4	5.0
150	0.453	0.920	0.953	0.314	0.070	0.009	0.004	0.003								2.7	1.4
160	0.289	0.648	0.581	0.151	0.029	0.003	0.001									1.7	0.8
170	0.234	0.503	0.401	0.110	0.019	0.001	0.001									1.3	0.5
180	0.225	0.521	0.369	0.092	0.026	0.002	0.001									1.2	0.5
190	0.228	0.491	0.355	0.090	0.014	0.001	0.001									1.2	0.5
200	0.247	0.572	0.417	0.102	0.012	0.004	0.002									1.4	0.5
210	0.244	0.637	0.485	0.104	0.017	0.008	0.001									1.5	0.6
220	0.233	0.708	0.629	0.124	0.030	0.008	0.002									1.7	0.8
230	0.258	0.979	0.969	0.195	0.049	0.022	0.010	0.003								2.5	1.2
240	0.268	1.299	1.764	0.681	0.239	0.092	0.029	0.003								4.4	2.8
250	0.320	1.951	3.356	1.295	0.432	0.158	0.034	0.006								7.6	5.3
260	0.308	2.214	2.586	0.734	0.256	0.068	0.009									6.2	3.7
270	0.383	2.182	2.990	1.029	0.313	0.090	0.036	0.001								7.0	4.5
280	0.310	2.166	3.431	1.622	0.440	0.076	0.028	0.006								8.1	5.6
290	0.239	1.561	2.418	1.228	0.339	0.076	0.017									5.9	4.1
300	0.213	1.002	1.317	0.382	0.100	0.019	0.002									3.0	1.8
310	0.154	0.575	0.516	0.077	0.013	0.003										1.3	0.6
320	0.089	0.341	0.254	0.044	0.012	0.001										0.7	0.3
330	0.074	0.236	0.217	0.034	0.007	0.001										0.6	0.3
340	0.077	0.170	0.159	0.027	0.009	0.001										0.4	0.2
350	0.064	0.175	0.146	0.027	0.012	0.002										0.4	0.2
360	0.066	0.161	0.136	0.041	0.014	0.002										0.4	0.2
Tot	9.21	31.35	39.58	13.91	4.30	1.24	0.34	0.07	0.01	0.01	0.00					100.0	59.4
Tot. cumul.	40.6	80.1	94.0	98.3	99.6	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 5.3 - Frequenza primaverile in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso al largo di Cagliari nel punto ERA5 (39.00°N - 9.25°E).**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	< 0.25	0.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10	0.164	0.362	0.231	0.030	0.001											0.8	0.3
20	0.171	0.421	0.241	0.041		0.002										0.9	0.3
30	0.157	0.482	0.267	0.055	0.001	0.002										1.0	0.3
40	0.193	0.491	0.261	0.044		0.002										1.0	0.3
50	0.230	0.542	0.283	0.062	0.009	0.003	0.001	0.001								1.1	0.4
60	0.294	0.583	0.308	0.046	0.016	0.003		0.001	0.001							1.3	0.4
70	0.349	0.599	0.324	0.051	0.025	0.004	0.001	0.001								1.4	0.4
80	0.487	0.720	0.358	0.058	0.003		0.002	0.002								1.6	0.4
90	0.517	0.933	0.576	0.052	0.005	0.002		0.001								2.1	0.6
100	0.608	1.263	0.712	0.070	0.012	0.004		0.001								2.7	0.8
110	0.794	1.674	0.928	0.080	0.018	0.006	0.001	0.001								3.5	1.0
120	0.872	2.387	1.528	0.189	0.034	0.003	0.001									5.0	1.8
130	1.052	3.504	3.170	0.474	0.056	0.019	0.001									8.3	3.7
140	0.951	3.019	2.980	0.600	0.076	0.021										7.6	3.7
150	0.775	1.421	1.060	0.178	0.041	0.004										3.5	1.3
160	0.610	0.804	0.443	0.062	0.012											1.9	0.5
170	0.423	0.614	0.282	0.058	0.005											1.4	0.3
180	0.467	0.569	0.236	0.040	0.005											1.3	0.3
190	0.428	0.548	0.203	0.030	0.002											1.2	0.2
200	0.425	0.591	0.244	0.039	0.003											1.3	0.3
210	0.458	0.630	0.273	0.043	0.004											1.4	0.3
220	0.477	0.820	0.298	0.039	0.010											1.6	0.3
230	0.505	0.995	0.456	0.047	0.008	0.002										2.0	0.5
240	0.536	1.234	0.850	0.144	0.024	0.007										2.8	1.0
250	0.566	1.538	1.425	0.306	0.050	0.004	0.002	0.002								3.9	1.8
260	0.604	1.700	1.257	0.183	0.023	0.013										3.8	1.5
270	0.706	2.047	1.599	0.212	0.050	0.010										4.6	1.9
280	0.703	2.356	2.933	0.655	0.168	0.029	0.003									6.8	3.8
290	0.581	2.630	4.170	1.580	0.250	0.019	0.006									9.2	6.0
300	0.458	2.146	3.346	0.957	0.075	0.002	0.002									7.0	4.4
310	0.338	1.498	1.511	0.155	0.003											3.5	1.7
320	0.277	0.733	0.427	0.033												1.5	0.5
330	0.193	0.451	0.231	0.040	0.002											0.9	0.3
340	0.147	0.345	0.169	0.024												0.7	0.2
350	0.138	0.322	0.198	0.029												0.7	0.2
360	0.117	0.344	0.219	0.028												0.7	0.2
Tot	16.77	41.32	34.00	6.73	0.99	0.16	0.02	0.01	0.00							100.0	41.9
Tot. cumul.		58.1	92.1	98.8	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 5.4 - Frequenza estiva in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso al largo di Cagliari nel punto ERA5 (39.00°N - 9.25°E).**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10	0.076	0.260	0.553	0.307	0.138	0.049	0.017	0.002								1.4	1.1
20	0.103	0.300	0.614	0.380	0.150	0.060	0.028	0.011								1.6	1.2
30	0.082	0.295	0.653	0.421	0.174	0.062	0.011	0.007								1.7	1.3
40	0.100	0.438	0.797	0.432	0.217	0.074	0.029	0.008	0.003	0.001						2.1	1.6
50	0.117	0.573	0.786	0.345	0.185	0.062	0.037	0.008	0.002	0.003						2.1	1.4
60	0.116	0.653	0.738	0.343	0.130	0.061	0.023	0.019	0.001	0.003						2.1	1.3
70	0.139	0.702	0.936	0.348	0.154	0.075	0.017	0.009	0.004	0.001						2.4	1.5
80	0.212	0.630	0.937	0.349	0.148	0.082	0.061	0.010								2.4	1.6
90	0.206	0.567	0.960	0.349	0.164	0.060	0.017	0.007								2.3	1.6
100	0.203	0.649	1.024	0.417	0.135	0.037	0.020	0.008	0.006							2.5	1.6
110	0.176	0.750	1.119	0.404	0.129	0.040	0.027	0.002								2.6	1.7
120	0.211	1.030	1.332	0.580	0.164	0.066	0.024	0.008	0.002							3.4	2.2
130	0.198	1.119	2.361	1.285	0.535	0.181	0.056	0.024	0.008	0.005	0.001					5.8	4.5
140	0.206	1.074	2.367	1.289	0.533	0.243	0.083	0.014	0.004	0.004						5.8	4.5
150	0.144	0.572	1.163	0.534	0.228	0.067	0.016	0.009	0.001	0.001						2.7	2.0
160	0.087	0.348	0.658	0.295	0.095	0.028	0.016	0.002	0.001	0.001						1.5	1.1
170	0.081	0.255	0.513	0.205	0.065	0.032	0.007		0.001	0.001						1.2	0.8
180	0.093	0.244	0.431	0.175	0.062	0.026	0.002			0.002						1.0	0.7
190	0.081	0.208	0.461	0.138	0.063	0.022	0.004	0.001	0.001	0.001						1.0	0.7
200	0.090	0.218	0.411	0.163	0.057	0.019	0.008	0.003			0.001					1.0	0.7
210	0.071	0.208	0.401	0.212	0.087	0.020	0.008	0.004		0.001	0.001					1.0	0.7
220	0.065	0.280	0.537	0.284	0.118	0.054	0.016	0.008	0.003	0.001	0.002	0.001				1.4	1.0
230	0.073	0.345	0.797	0.477	0.289	0.116	0.046	0.019	0.007	0.005	0.001					2.2	1.8
240	0.093	0.486	1.495	1.185	0.788	0.356	0.201	0.067	0.017	0.005	0.001					4.7	4.1
250	0.092	0.835	2.916	2.349	1.358	0.744	0.268	0.086	0.015	0.004	0.002					8.7	7.7
260	0.160	0.984	2.269	1.283	0.661	0.252	0.114	0.028	0.004							5.8	4.6
270	0.177	0.917	1.873	1.238	0.519	0.238	0.074	0.016	0.001							5.1	4.0
280	0.195	0.938	2.239	1.506	0.757	0.308	0.125	0.022	0.006							6.1	5.0
290	0.173	0.865	2.202	1.915	0.919	0.375	0.132	0.035	0.005							6.6	5.6
300	0.168	0.696	1.591	1.217	0.529	0.171	0.046	0.005								4.4	3.6
310	0.116	0.432	0.803	0.340	0.166	0.039	0.008	0.001								1.9	1.4
320	0.067	0.323	0.504	0.252	0.097	0.018	0.001									1.3	0.9
330	0.063	0.289	0.414	0.201	0.098	0.016	0.001									1.1	0.7
340	0.056	0.223	0.369	0.176	0.088	0.025	0.001									0.9	0.7
350	0.058	0.219	0.352	0.220	0.100	0.034	0.005									1.0	0.7
360	0.071	0.240	0.455	0.260	0.128	0.040	0.008									1.2	0.9
Tot	4.42	19.17	38.03	21.88	10.23	4.15	1.56	0.44	0.09	0.04	0.01	0.00				100.0	76.4
Tot. cumul.		23.6	61.6	83.5	93.7	97.9	99.4	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

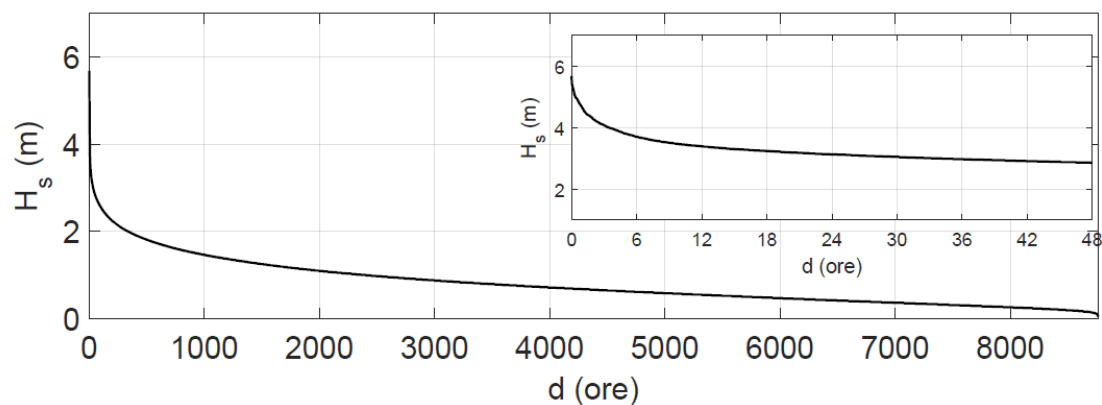
**Tabella 5.5 - Frequenza autunnale in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso al largo di Cagliari nel punto ERA5 (39.00°N - 9.25°E).**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<25	25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10	0.051	0.224	0.546	0.488	0.175	0.033	0.013	0.003								1.5	1.3
20	0.044	0.274	0.552	0.445	0.182	0.085	0.035	0.009								1.6	1.3
30	0.053	0.264	0.679	0.546	0.252	0.116	0.021									1.9	1.6
40	0.092	0.319	0.746	0.611	0.185	0.067	0.010	0.001								2.0	1.6
50	0.080	0.315	0.798	0.417	0.157	0.068	0.031	0.006								1.9	1.5
60	0.048	0.387	0.786	0.357	0.188	0.088	0.017	0.001	0.001	0.001						1.9	1.4
70	0.087	0.424	0.943	0.356	0.184	0.092	0.033	0.010	0.006	0.003						2.1	1.6
80	0.102	0.357	0.869	0.327	0.151	0.070	0.037	0.006	0.002							1.9	1.5
90	0.121	0.394	0.816	0.353	0.194	0.114	0.060	0.028	0.002	0.001	0.001	0.004				2.1	1.6
100	0.142	0.413	0.771	0.429	0.169	0.071	0.037	0.023	0.001			0.003				2.1	1.5
110	0.099	0.519	0.820	0.507	0.219	0.110	0.046	0.011	0.014	0.016	0.003	0.001				2.4	1.7
120	0.160	0.635	1.124	0.619	0.333	0.171	0.110	0.048	0.015	0.004	0.003	0.001				3.2	2.4
130	0.159	0.788	1.823	1.278	0.625	0.348	0.127	0.037	0.031	0.006	0.006	0.001				5.2	4.3
140	0.146	0.783	1.679	1.005	0.423	0.236	0.076	0.031	0.012	0.006	0.009	0.001				4.4	3.5
150	0.121	0.548	0.869	0.417	0.135	0.050	0.007	0.001								2.1	1.5
160	0.085	0.340	0.598	0.229	0.071	0.012	0.002	0.002								1.3	0.9
170	0.073	0.238	0.414	0.168	0.057	0.006	0.001									1.0	0.6
180	0.044	0.185	0.382	0.123	0.041	0.006	0.001	0.001								0.8	0.6
190	0.041	0.186	0.323	0.162	0.040	0.005	0.002	0.001	0.001							0.8	0.5
200	0.061	0.203	0.372	0.202	0.052	0.007	0.001		0.001							0.9	0.6
210	0.053	0.202	0.392	0.191	0.070	0.019	0.004		0.001	0.001	0.001					0.9	0.7
220	0.064	0.263	0.501	0.273	0.101	0.028	0.010	0.004		0.001	0.001	0.001				1.2	0.9
230	0.076	0.356	0.765	0.416	0.181	0.083	0.028	0.007			0.002					1.9	1.5
240	0.086	0.555	1.717	1.361	0.700	0.315	0.136	0.051	0.009	0.007	0.003	0.002	0.001			4.9	4.3
250	0.130	0.931	3.520	2.753	1.526	0.692	0.309	0.111	0.032	0.012	0.003	0.001				10.0	9.0
260	0.127	0.923	2.564	1.728	0.867	0.304	0.174	0.031	0.010	0.001	0.001	0.002				6.7	5.7
270	0.165	1.092	2.694	1.608	0.800	0.293	0.113	0.039	0.008	0.003						6.8	5.6
280	0.130	0.884	2.694	2.218	1.028	0.385	0.126	0.066	0.013	0.002						7.5	6.5
290	0.088	0.798	2.062	2.031	1.203	0.506	0.146	0.042	0.009							6.9	6.0
300	0.070	0.498	1.177	0.968	0.587	0.186	0.060	0.023	0.002							3.6	3.0
310	0.084	0.279	0.771	0.478	0.212	0.054	0.012	0.007								1.9	1.5
320	0.050	0.239	0.625	0.371	0.131	0.023	0.006	0.001								1.4	1.2
330	0.059	0.211	0.527	0.308	0.150	0.029	0.006	0.004								1.3	1.0
340	0.060	0.180	0.506	0.307	0.110	0.021	0.002	0.003								1.2	0.9
350	0.070	0.161	0.441	0.287	0.111	0.022	0.008	0.006								1.1	0.9
360	0.066	0.222	0.487	0.332	0.146	0.027	0.009	0.004								1.3	1.0
Tot	3.19	15.59	37.35	24.67	11.76	4.74	1.81	0.62	0.17	0.06	0.03	0.02	0.00			100.0	81.2
Tot. cumul.		18.8	56.1	80.8	92.6	97.3	99.1	99.7	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 5.6 - Frequenza invernale in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso al largo di Cagliari nel punto ERA5 (39.00°N - 9.25°E).**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR



**Figura 5.4 - Curva di durata annuale delle  $H_s$  per il punto ERA5 Cagliari (39.00°N – 9.25°E).**

Al fine di rappresentare la persistenza degli eventi di moto ondoso si può far riferimento alla curva di durata riportata in Figura 5.4. La curva è ottenuta ordinando la serie storica e determinando così la durata media annuale associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa.

In particolare si osserva che:

- durata media degli eventi con  $H_s \geq 1.0$  m circa 2368 ore/anno,
- durata media degli eventi con  $H_s \geq 2.0$  m circa 336 ore/anno,
- durata media degli eventi con  $H_s \geq 3.0$  m circa 33 ore/anno,
- durata media degli eventi con  $H_s \geq 4.0$  m circa 4 ore/anno.



Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarin.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 6 CLIMA DEL MOTO ONDO SO REGISTRATO DALLA BOA DI CAGLIARI

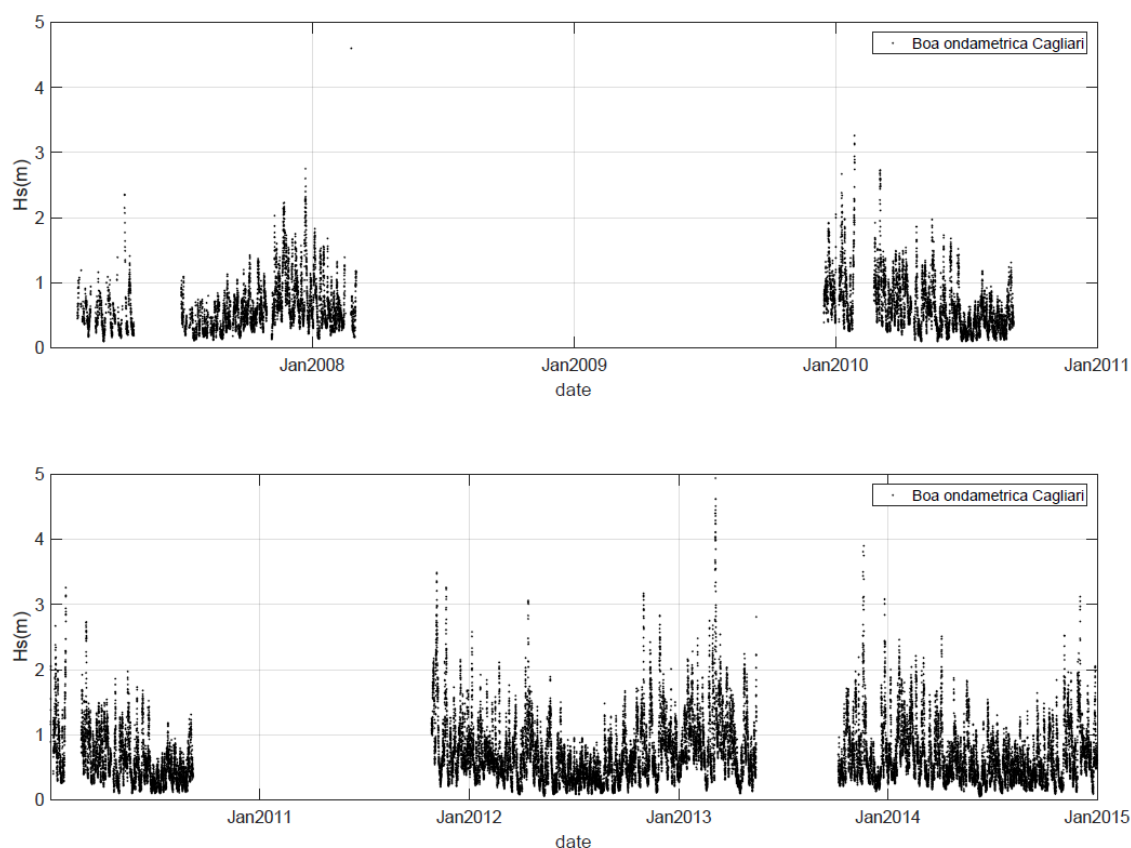
La stazione di misura ondametria di Cagliari, facente parte della Rete Ondametria Nazionale (RON) oggi gestita dall'ISPRA, è stata operativa con intervalli non regolari tra il 2007 e il 2014.

La stazione è situata nel punto di coordinate 39.110280°N-9.454440°E su fondali di circa -150 m s.l.m. al largo della località Porto Sa Ruxi, ad una distanza di circa 2 km dalla costa e ad una distanza di circa 30 km a Sud-Est del Porto di Cagliari.

Purtroppo il rendimento della stazione di misura, il cui calcolo è riportato in dettaglio nel seguente capitolo, non risulta particolarmente elevato.

### 6.1 Dati di moto ondo so misurati dall'ondametro di Cagliari

La serie storica ondametria relativa al punto RON Cagliari di coordinate 39.110°N-9.454°E è costituita da 35433 stati di mare ed è riportata a titolo di esempio graficamente nella Figura 6.1.



**Figura 6.1 - Serie storica dei valori di Hs misurati nel punto RON Cagliari di coordinate 39.110°N-9.454°E nel periodo 2007-2014.**

Nella Figura 6.2, Tabella 6.1 e nella Tabella 6.2, viene riportato il clima ondametria relativo al punto RON Cagliari sia in forma grafica, sia in forma numerica.

In particolare, mentre in ciascuna casella della Tabella 6.1 è riportato il numero degli eventi osservati (classificati in termini di Hs e di direzione di provenienza), nella Tabella 6.2 gli stessi eventi sono forniti in percentuale la quale coincide con la loro frequenza di accadimento media annuale.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

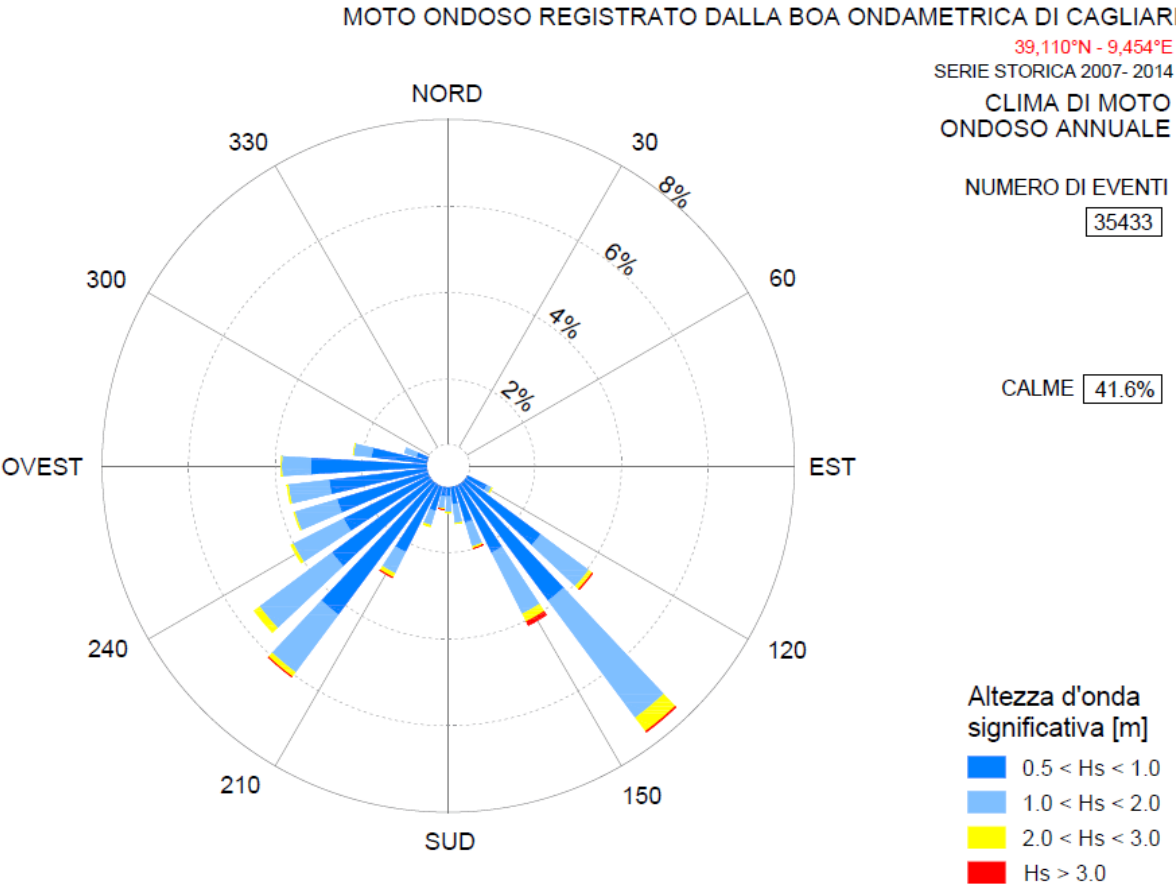


Figura 6.2 - Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso con Hs>0.5 m nel punto RON Cagliari.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5	
10	1	3	1													5
20	2	2	1													5
30	2		3													5
40	4	5														9
50	3	11	8													22
60	8	48	15													71
70	10	101	15													126
80	17	99	25													141
90	15	128	39	3												185
100	20	127	63	4												214
110	33	236	140	18	2											429
120	75	414	354	38	4	2	3									890
130	147	567	942	390	100	32	3	6								2187
140	268	836	1373	877	318	106	31	9								3818
150	414	796	795	405	154	50	20	10	11	11	3					2669
160	395	588	486	141	61	11	5	2								1689
170	387	415	315	130	26		5									1278
180	347	459	251	109	22	2	1									1191
190	362	549	251	73	27	5	1	1								1269
200	298	696	385	86	37	9	3									1514
210	250	941	789	161	33	25	10	5								2214
220	191	917	1516	475	113	32	11	2	2							3259
230	123	605	1190	528	211	48	6									2711
240	110	575	962	346	115	21										2129
250	95	582	954	283	78	7										1999
260	59	669	986	271	64	11										2060
270	24	475	1126	220	20	4	1									1870
280	10	182	636	123	25		1									977
290		31	276	85	13											405
300		9	45	7	8	1										70
310	1	7	2													10
320	1	1														2
330	1	2														3
340		1	1													2
350	1		1													2
360		1	1								1					3
Tot	3674	11078	13947	4773	1431	366	101	35	13	11	4	0	0	0	0	35433

**Tabella 6.1 - Numero di eventi di moto ondoso al largo di Cagliari suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione. Punto di acquisizione RON Cagliari.**  
**Periodo di riferimento 2007-2014.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa Hs [m]															Tot	>0.5
	<25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10	0.003	0.008	0.003													0.0	0.0
20	0.006	0.006	0.003													0.0	0.0
30	0.006		0.008													0.0	0.0
40	0.011	0.014														0.0	0.0
50	0.008	0.031	0.023													0.1	0.0
60	0.023	0.135	0.042													0.2	0.0
70	0.028	0.285	0.042													0.4	0.0
80	0.048	0.279	0.071													0.4	0.1
90	0.042	0.361	0.110	0.008												0.5	0.1
100	0.056	0.358	0.178	0.011												0.6	0.2
110	0.093	0.666	0.395	0.051	0.006											1.2	0.5
120	0.212	1.168	0.999	0.107	0.011	0.006	0.008									2.5	1.1
130	0.415	1.600	2.659	1.101	0.282	0.090	0.008	0.017								6.2	4.2
140	0.756	2.359	3.875	2.475	0.897	0.299	0.087	0.025								10.8	7.7
150	1.168	2.246	2.244	1.143	0.435	0.141	0.056	0.028	0.031	0.031	0.008					7.5	4.1
160	1.115	1.659	1.372	0.398	0.172	0.031	0.014	0.006								4.8	2.0
170	1.092	1.171	0.889	0.367	0.073		0.014									3.6	1.3
180	0.979	1.295	0.708	0.308	0.062	0.006	0.003									3.4	1.1
190	1.022	1.549	0.708	0.206	0.076	0.014	0.003	0.003								3.6	1.0
200	0.841	1.964	1.087	0.243	0.104	0.025	0.008									4.3	1.5
210	0.706	2.656	2.227	0.454	0.093	0.071	0.028	0.014								6.2	2.9
220	0.539	2.588	4.278	1.341	0.319	0.090	0.031	0.006	0.006							9.2	6.1
230	0.347	1.707	3.358	1.490	0.595	0.135	0.017									7.7	5.6
240	0.310	1.623	2.715	0.976	0.325	0.059										6.0	4.1
250	0.268	1.643	2.692	0.799	0.220	0.020										5.6	3.7
260	0.167	1.888	2.783	0.765	0.181	0.031										5.8	3.8
270	0.068	1.341	3.178	0.621	0.056	0.011	0.003									5.3	3.9
280	0.028	0.514	1.795	0.347	0.071		0.003									2.8	2.2
290		0.087	0.779	0.240	0.037											1.1	1.1
300		0.025	0.127	0.020	0.023	0.003										0.2	0.2
310	0.003	0.020	0.006													0.0	0.0
320	0.003	0.003														0.0	0.0
330	0.003	0.006														0.0	0.0
340		0.003	0.003													0.0	0.0
350	0.003		0.003													0.0	0.0
360		0.003	0.003								0.003					0.0	0.0
Tot	10.37	31.26	39.36	13.47	4.04	1.03	0.29	0.10	0.04	0.03	0.01					100.0	58.4
Tot. cumul.	41.6	81.0	94.5	98.5	99.5	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 6.2 - Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso al largo di Cagliari suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione. Punto di acquisizione RON Cagliari.**  
**Periodo di riferimento 2007-2014.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarino.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Il diagramma polare di Figura 6.2 (clima ondametrico medio annuale) mostra che il punto in esame presenta due settori di traversia principali, uno ricadente nel II quadrante (Scirocco) l'altro nel III quadrante (Libeccio).

Gli stati di mare provenienti dal II quadrante risultano sia di maggiore intensità, sia di maggiore frequenza rispetto a quelli provenienti dal III quadrante e pertanto il settore di Scirocco può essere considerato per il moto ondoso il settore di traversia principale. Tale settore è compreso tra le direzioni 120°N e 170°N, mentre quello di Libeccio è compreso tra le direzioni 210°N e 280°N.

In Figura 6.3 sono riportate le rose ondamiche medie stagionali desunte sempre dalla serie storica. La figura mostra che la frequenza delle onde provenienti da Scirocco risulta in generale prevalente durante l'autunno rispetto alle onde provenienti da Libeccio, le quali si verificano più frequentemente durante l'inverno.

Nelle tabelle infine sono riportate le rose ondamiche medie stagionali in forma numerica.

Il confronto tra la Figura 5.2 e la Figura 6.2 mostra una sostanziale congruità tra i dati ERA5 e le misure ondamiche dirette eseguite dalla RON.

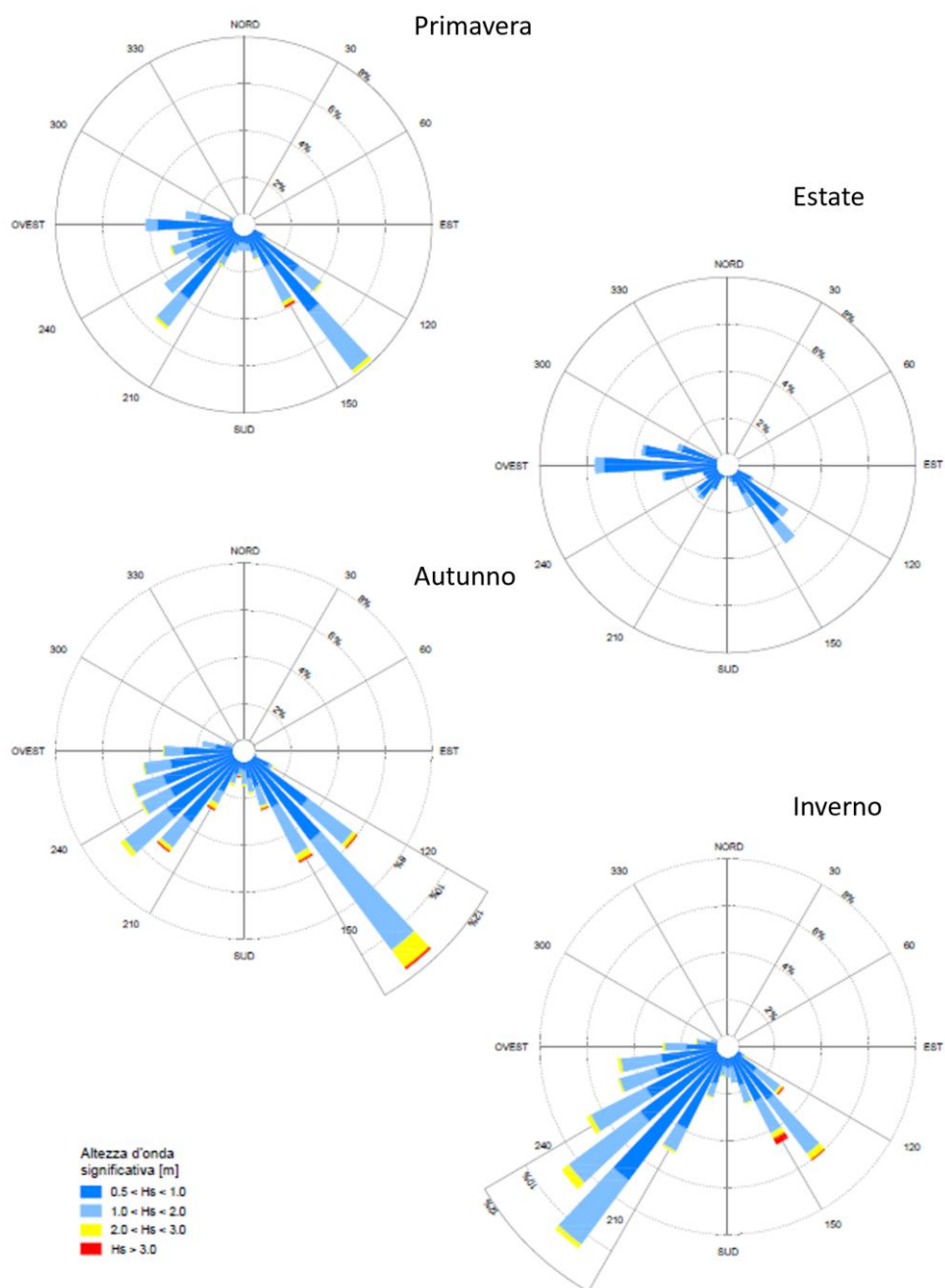


Figura 6.3 - Rose di distribuzione direzionale su base stagionale degli eventi di moto ondoso con  $H_s > 0.5m$  nel punto di acquisizione RON Cagliari.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10		0.013														0.0	0.0
20		0.013														0.0	0.0
30																	0.0
40	0.013	0.038														0.1	0.0
50		0.038														0.0	0.0
60		0.102	0.038													0.1	0.0
70	0.013	0.434	0.026													0.5	0.0
80	0.051	0.383	0.051													0.5	0.1
90	0.038	0.421	0.026	0.013												0.5	0.0
100	0.077	0.447	0.140	0.038												0.7	0.2
110	0.089	0.970	0.306	0.038												1.4	0.3
120	0.319	1.289	0.932	0.077	0.013											2.6	1.0
130	0.613	2.030	2.924	0.996	0.191	0.013										6.8	4.1
140	1.213	2.311	4.634	2.387	0.715	0.102	0.013									11.4	7.9
150	1.749	2.515	2.004	1.289	0.409	0.153	0.026	0.051								8.2	3.9
160	1.251	1.379	1.200	0.243	0.089	0.013										4.2	1.5
170	1.264	0.779	0.830	0.268	0.013											3.2	1.1
180	1.085	0.919	0.779	0.319	0.013											3.1	1.1
190	1.340	1.226	0.766	0.243	0.077											3.7	1.1
200	1.328	1.545	0.919	0.255	0.051											4.1	1.2
210	1.034	2.872	1.545	0.332	0.064	0.026										5.9	2.0
220	1.085	3.115	3.945	1.315	0.153	0.064	0.013									9.7	5.5
230	0.587	2.119	2.477	1.340	0.370											6.9	4.2
240	0.447	2.234	1.826	0.740	0.128											5.4	2.7
250	0.409	2.004	2.413	0.626	0.191	0.026										5.7	3.3
260	0.243	2.809	2.234	0.523	0.064											5.9	2.8
270	0.140	1.838	3.690	0.472												6.1	4.2
280		0.230	1.877	0.498	0.115											2.7	2.5
290		0.026	0.485	0.128												0.6	0.6
300		0.013	0.077	0.013												0.1	0.1
310																	0.0
320		0.013														0.0	0.0
330		0.013														0.0	0.0
340		0.013														0.0	0.0
350																	0.0
360			0.013													0.0	0.0
Tot	14.39	34.15	36.15	12.15	2.66	0.40	0.05	0.05								100.0	51.5
Tot. cumul.		48.5	84.7	96.8	99.5	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 6.3 - Frequenza primaverile in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso nel punto di acquisizione RON Cagliari.**



Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<25	25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10	0.013															0.0	0.0
20	0.027															0.0	0.0
30	0.027															0.0	0.0
40	0.027	0.013														0.0	0.0
50	0.040	0.040														0.1	0.0
60	0.080	0.040														0.1	0.0
70	0.053	0.040														0.1	0.0
80	0.067	0.080	0.027													0.2	0.0
90	0.080	0.160	0.093													0.3	0.1
100	0.080	0.280	0.120													0.5	0.1
110	0.200	1.001	0.347													1.5	0.3
120	0.387	1.601	1.148	0.040												3.2	1.2
130	0.801	2.322	2.776	0.387	0.013											6.3	3.2
140	1.228	3.936	3.203	0.801	0.120											9.3	4.1
150	2.055	3.256	1.401	0.600												7.3	2.0
160	2.469	2.295	0.787	0.133												5.7	0.9
170	2.415	1.801	0.534	0.160												4.9	0.7
180	2.148	1.748	0.214	0.053												4.2	0.3
190	2.122	1.428	0.414	0.053												4.0	0.5
200	1.721	2.042	0.587	0.027												4.4	0.6
210	1.588	2.842	1.161	0.040												5.6	1.2
220	0.987	3.630	1.708	0.093												6.4	1.8
230	0.654	2.148	1.628	0.080												4.5	1.7
240	0.534	2.055	1.014													3.6	1.0
250	0.600	2.842	1.081													4.5	1.1
260	0.347	3.229	2.736	0.053												6.4	2.8
270	0.107	2.802	5.271	0.360												8.5	5.6
280	0.120	1.468	3.576	0.107												5.3	3.7
290		0.267	2.055	0.187												2.5	2.2
300		0.067	0.267	0.013												0.3	0.3
310	0.013	0.080														0.1	0.0
320																	0.0
330	0.013															0.0	0.0
340																	0.0
350	0.013															0.0	0.0
360																	0.0
Tot	21.02	43.51	32.15	3.19	0.13											100.0	35.5
Tot. cumul.		64.5	96.7	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 6.4 - Frequenza estiva in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso nel punto di acquisizione RON Cagliari.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<0.25	0.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10		0.010	0.010													0.0	0.0
20		0.010														0.0	0.0
30			0.010													0.0	0.0
40																	0.0
50		0.048	0.019													0.1	0.0
60		0.239	0.057													0.3	0.1
70	0.010	0.258	0.038													0.3	0.0
80	0.048	0.315	0.057													0.4	0.1
90	0.048	0.343	0.095													0.5	0.1
100	0.029	0.334	0.143													0.5	0.1
110	0.067	0.429	0.410	0.134	0.010											1.0	0.6
120	0.114	1.088	1.221	0.143	0.019	0.019										2.6	1.4
130	0.239	1.412	3.406	1.708	0.658	0.200		0.029								7.7	6.0
140	0.477	1.994	4.751	4.064	1.746	0.763	0.162	0.076								14.0	11.6
150	0.782	1.774	2.690	1.507	0.744	0.162	0.134	0.038	0.019							7.9	5.3
160	0.611	1.679	1.603	0.439	0.410	0.086	0.048	0.019								4.9	2.6
170	0.534	1.097	1.193	0.439	0.134		0.048									3.4	1.8
180	0.477	1.040	0.820	0.458	0.153	0.019	0.010									3.0	1.5
190	0.506	1.145	0.754	0.172	0.134	0.048		0.010								2.8	1.1
200	0.467	1.641	1.049	0.267	0.124	0.076	0.010									3.6	1.5
210	0.305	2.433	1.946	0.458	0.095	0.181	0.076	0.048								5.5	2.8
220	0.210	1.879	3.787	1.202	0.124	0.134	0.057	0.019	0.019							7.4	5.3
230	0.143	1.431	4.093	1.670	0.553	0.181	0.010									8.1	6.5
240	0.258	1.441	3.520	1.068	0.267	0.038										6.6	4.9
250	0.134	1.450	3.587	1.097	0.258	0.010										6.5	5.0
260	0.086	1.126	3.158	0.906	0.229	0.010										5.5	4.3
270	0.029	0.735	2.595	0.696	0.114	0.010										4.2	3.4
280	0.010	0.305	1.212	0.448	0.095											2.1	1.8
290		0.038	0.315	0.410	0.095											0.9	0.8
300		0.019	0.038	0.019	0.067	0.010										0.2	0.1
310			0.010													0.0	0.0
320	0.010															0.0	0.0
330																	0.0
340																	0.0
350																	0.0
360																	0.0
Tot	5.59	25.71	42.59	17.31	6.03	1.95	0.55	0.24	0.04							100.0	68.7
Tot. cumul.		31.3	73.9	91.2	97.2	99.2	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 6.5 - Frequenza autunnale in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso nel punto di acquisizione RON Cagliari.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
10		0.010														0.0	0.0
20			0.010													0.0	0.0
30			0.021													0.0	0.0
40	0.010	0.010														0.0	0.0
50			0.062													0.1	0.1
60	0.021	0.125	0.062													0.2	0.1
70	0.042	0.384	0.094													0.5	0.1
80	0.031	0.312	0.135													0.5	0.1
90	0.010	0.488	0.208	0.021												0.7	0.2
100	0.052	0.374	0.291	0.010												0.7	0.3
110	0.042	0.416	0.488	0.010	0.010											1.0	0.5
120	0.094	0.821	0.696	0.145	0.010		0.031									1.8	0.9
130	0.145	0.894	1.538	1.081	0.156	0.104	0.031	0.031								4.0	2.9
140	0.322	1.569	2.826	2.120	0.727	0.187	0.135	0.010								7.9	6.0
150	0.426	1.756	2.608	1.049	0.457	0.218	0.042	0.021	0.094	0.114	0.031					6.8	4.6
160	0.499	1.372	1.714	0.686	0.114	0.010										4.4	2.5
170	0.530	1.081	0.883	0.530	0.114											3.1	1.5
180	0.530	1.527	0.914	0.333	0.052											3.4	1.3
190	0.468	2.348	0.842	0.333	0.073		0.010									4.1	1.3
200	0.166	2.598	1.652	0.374	0.208	0.010	0.021									5.0	2.3
210	0.187	2.577	3.917	0.873	0.187	0.042	0.021									7.8	5.0
220	0.104	2.120	7.086	2.483	0.914	0.135	0.042									12.9	10.7
230	0.135	1.330	4.624	2.515	1.288	0.301	0.052									10.2	8.8
240	0.083	0.987	3.886	1.829	0.800	0.177										7.8	6.7
250	0.042	0.623	3.200	1.236	0.374	0.042										5.5	4.9
260	0.052	0.925	2.857	1.361	0.364	0.104										5.7	4.7
270	0.021	0.457	1.766	0.862	0.083	0.031	0.010									3.2	2.8
280		0.229	0.977	0.301	0.062		0.010									1.6	1.4
290		0.052	0.530	0.187	0.031											0.8	0.7
300		0.010	0.156	0.031	0.010											0.2	0.2
310		0.010														0.0	0.0
320																	0.0
330		0.010														0.0	0.0
340			0.010													0.0	0.0
350			0.010													0.0	0.0
360		0.010									0.010					0.0	0.0
Tot	4.01	25.43	44.08	18.37	6.04	1.36	0.41	0.06	0.09	0.11	0.04					100.0	70.6
Tot. cumul.		29.4	73.5	91.9	97.9	99.3	99.7	99.8	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Tabella 6.6 - Frequenza invernale in classi di altezza significativa e direzione degli eventi di moto ondoso nel punto di acquisizione RON Cagliari.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 7 CALIBRAZIONE EVENTI ESTREMI

I dati ondametrici ricostruiti in ri-analisi dai principali centri meteorologici mondiali sono inevitabilmente soggetti ad approssimazioni riconducibili ai margini di attendibilità dei campi di vento che si ripercuotono sulla ricostruzione del moto ondoso.

Mentre dal punto di vista climatico queste approssimazioni sono generalmente poco significative per definire le condizioni medie di esposizione ondametrica di un sito, possono condizionare in modo rilevante la statistica delle onde estreme soprattutto se l'analisi statistica è finalizzata al dimensionamento strutturale delle opere marittime.

Pertanto, risulta sempre di estrema importanza confrontare i dati ondametrici ricostruiti in ri-analisi con i dati provenienti da misure dirette per validare la serie ondametrica ed in particolare per verificare o meno la necessità di effettuare una calibrazione dei valori estremi dei dati ricostruiti.

Con riferimento alla Figura 2.1, nel caso in esame la stazione di misura diretta selezionata per la calibrazione degli eventi estremi è quella di Cagliari facente parte della Rete Ondametrica Nazionale (RON) oggi gestita dall'ISPRA.

La Boa di Cagliari è stata operativa con intervalli non regolari tra il 2007 e il 2014. La boa è situata nel punto di coordinate 39.110280°N-9.454440°E su fondali di circa -150 m s.l.m. al largo della località Porto Sa Ruxi ad una distanza di circa 2 km dalla costa e di circa 30 km a Sud-Est del porto di Cagliari.

Come di seguito illustrato, si sono utilizzati due approcci differenti per confrontare i dati di moto ondoso ricostruiti ERA5 con quelli osservati dall'ondametro di Cagliari.

Il primo criterio, di seguito indicato come "confronto sincrono", fornisce delle indicazioni sull'errore che viene mediamente commesso con la tecnica di ricostruzione del moto ondoso in ri-analisi. La seconda metodologia, di seguito indicata come "confronto asincrono", è di interesse per valutare la necessità di calibrare i valori di Hs raggiunti al culmine delle singole mareggiate per analizzare gli stati di mare estremi e quindi per definire la correlazione Hs - Tempo di ritorno (Tr).

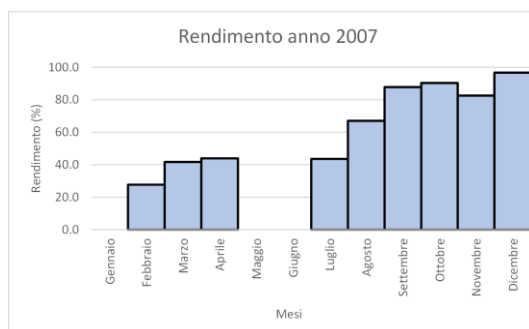
Queste tecniche di confronto, sviluppate da De Girolamo et al. (2017), si basano sul concetto che tra le misure e i dati ricostruiti, valutati nello stesso istante, gli errori sincroni, risentono spesso della tempistica (timing) con cui si sviluppa l'evento meteomarinò. Tale errore può essere eliminato facendo ricorso al confronto asincrono, ovvero comparando i valori di Hs al culmine delle mareggiate, i quali possono avvenire anche in tempi leggermente diversi, purché appartenenti allo stesso evento meteorologico estremo. L'applicazione di questa tecnica consente di confrontare e quindi di calibrare agevolmente i dati da utilizzare per effettuare la statistica degli eventi estremi.

Nel prossimo paragrafo si premette l'analisi del rendimento dell'ondametro di Cagliari finalizzata a verificare l'affidabilità dei dati di misura individuando le "finestre temporali" idonee per il confronto.

### 7.1 Analisi rendimento dell'ondametro di Cagliari

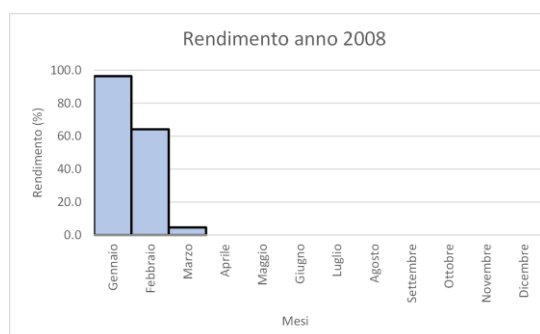
Come si può osservare dalle figure di seguito riportate, il rendimento dell'ondametro è stato discontinuo.

Il rendimento complessivo valutato sull'intero periodo di misura è risultato di poco superiore al 50%.



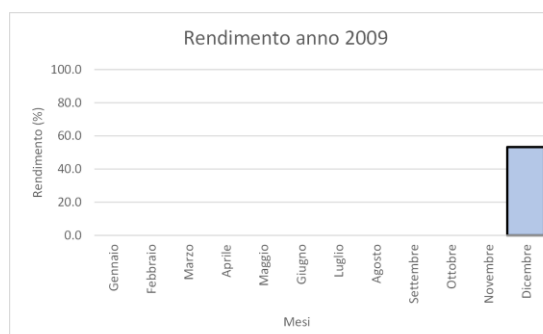
ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2007	Gennaio	0	31	48	0.0
	Febbraio	372	28	48	27.7
	Marzo	620	31	48	41.7
	Aprile	633	30	48	44.0
	Maggio	0	31	48	0.0
	Giugno	0	30	48	0.0
	Luglio	648	31	48	43.5
	Agosto	998	31	48	67.1
	Settembre	1264	30	48	87.8
	Ottobre	1345	31	48	90.4
	Novembre	1190	30	48	82.6
	Dicembre	1439	31	48	96.7
Rendimento anno 2007					48.6

Figura 7.1 – Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2007.



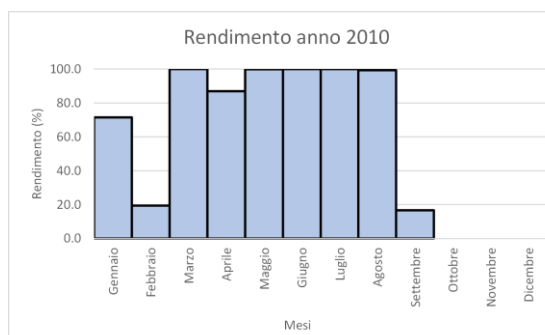
ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2008	Gennaio	1434	31	48	96.4
	Febbraio	893	29	48	64.2
	Marzo	70	31	48	4.7
	Aprile	0	30	48	0.0
	Maggio	0	31	48	0.0
	Giugno	0	30	48	0.0
	Luglio	0	31	48	0.0
	Agosto	0	31	48	0.0
	Settembre	0	30	48	0.0
	Ottobre	0	31	48	0.0
	Novembre	0	30	48	0.0
	Dicembre	0	31	48	0.0
Rendimento anno 2008					13.6

Figura 7.2 - Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2008.



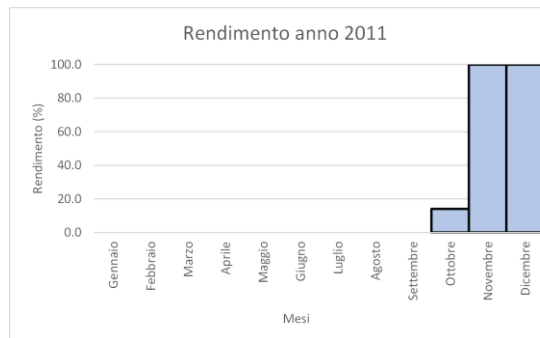
ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2009	Gennaio	0	31	48	0.0
	Febbraio	0	28	48	0.0
	Marzo	0	31	48	0.0
	Aprile	0	30	48	0.0
	Maggio	0	31	48	0.0
	Giugno	0	30	48	0.0
	Luglio	0	31	48	0.0
	Agosto	0	31	48	0.0
	Settembre	0	30	48	0.0
	Ottobre	0	31	48	0.0
	Novembre	0	30	48	0.0
	Dicembre	793	31	48	53.3
Rendimento anno 2009					4.5

Figura 7.3 - Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2009.



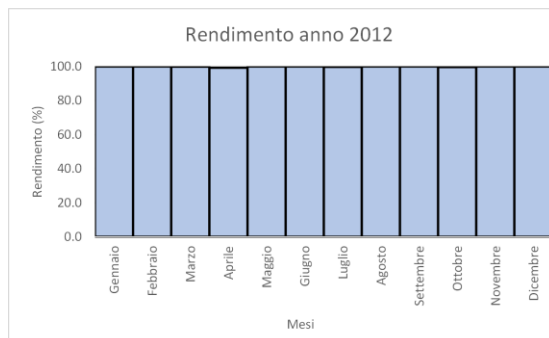
ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2010	Gennaio	1064	31	48	71.5
	Febbraio	262	28	48	19.5
	Marzo	1487	31	48	99.9
	Aprile	1251	30	48	86.9
	Maggio	1486	31	48	99.9
	Giugno	1439	30	48	99.9
	Luglio	1487	31	48	99.9
	Agosto	1478	31	48	99.3
	Settembre	240	30	48	16.7
	Ottobre	0	31	48	0.0
	Novembre	0	30	48	0.0
	Dicembre	0	31	48	0.0
Rendimento anno 2010					58.2

Figura 7.4 - Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2010.



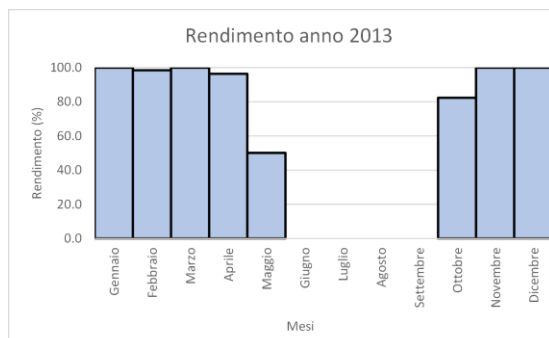
ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2011	Gennaio	0	31	48	0.0
	Febbraio	0	28	48	0.0
	Marzo	0	31	48	0.0
	Aprile	0	30	48	0.0
	Maggio	0	31	48	0.0
	Giugno	0	30	48	0.0
	Luglio	0	31	48	0.0
	Agosto	0	31	48	0.0
	Settembre	0	30	48	0.0
	Ottobre	209	31	48	14.0
	Novembre	1439	30	48	99.9
	Dicembre	1488	31	48	100.0
Rendimento anno 2011					17.9

Figura 7.5 - Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2011.



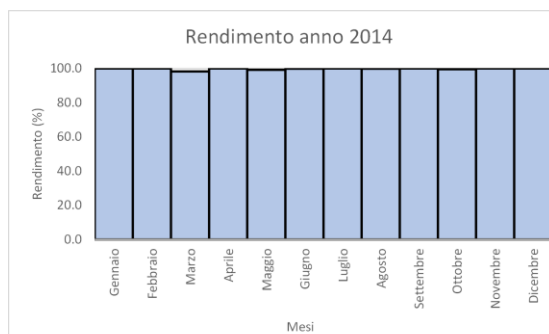
ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2012	Gennaio	1487	31	48	99.9
	Febbraio	1392	29	48	100.0
	Marzo	1486	31	48	99.9
	Aprile	1429	30	48	99.2
	Maggio	1488	31	48	100.0
	Giugno	1439	30	48	99.9
	Luglio	1484	31	48	99.7
	Agosto	1487	31	48	99.9
	Settembre	1440	30	48	100.0
	Ottobre	1483	31	48	99.7
	Novembre	1439	30	48	99.9
	Dicembre	1488	31	48	100.0
Rendimento anno 2012					99.9

Figura 7.6 - Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2012.



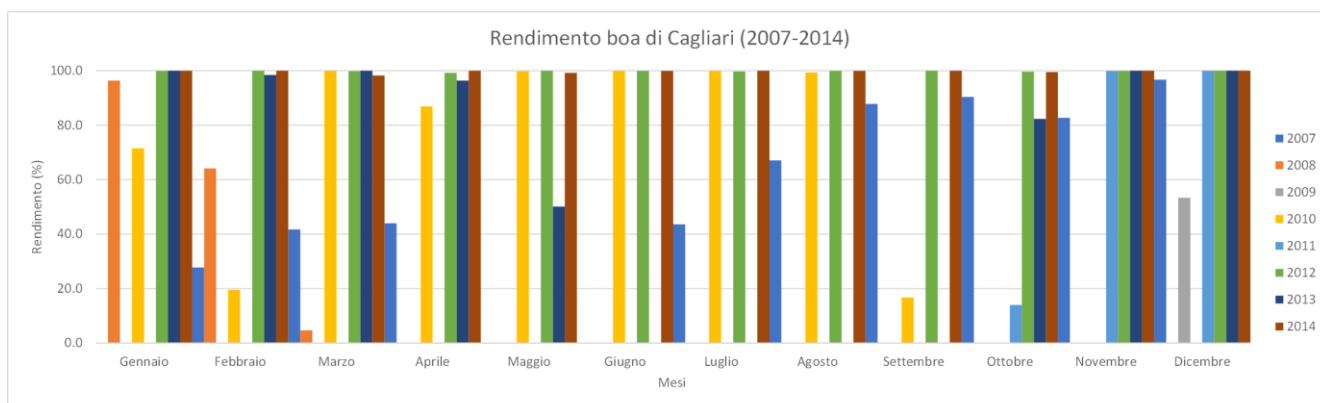
ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2013	Gennaio	1488	31	48	100.0
	Febbraio	1323	28	48	98.4
	Marzo	1488	31	48	100.0
	Aprile	1387	30	48	96.3
	Maggio	745	31	48	50.1
	Giugno	0	30	48	0.0
	Luglio	0	31	48	0.0
	Agosto	0	31	48	0.0
	Settembre	0	30	48	0.0
	Ottobre	1225	31	48	82.3
	Novembre	1440	30	48	100.0
	Dicembre	1488	31	48	100.0
Rendimento anno 2013					60.4

Figura 7.7 - Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2013.



ANNO	MESE	DATI	GG/MM	DATI/MM	RENDIMENTO
2014	Gennaio	1488	31	48	100.0
	Febbraio	1344	28	48	100.0
	Marzo	1462	31	48	98.3
	Aprile	1440	30	48	100.0
	Maggio	1476	31	48	99.2
	Giugno	1439	30	48	99.9
	Luglio	1488	31	48	100.0
	Agosto	1487	31	48	99.9
	Settembre	1440	30	48	100.0
	Ottobre	1481	31	48	99.5
	Novembre	1440	30	48	100.0
	Dicembre	1488	31	48	100.0
Rendimento anno 2014					99.7

Figura 7.8 - Rendimento dell'ondametro di Cagliari relative all'anno 2014.



Rendimento anno 2007	48.6
Rendimento anno 2008	13.6
Rendimento anno 2009	4.5
Rendimento anno 2010	58.2
Rendimento anno 2011	17.9
Rendimento anno 2012	99.9
Rendimento anno 2013	60.4
Rendimento anno 2014	99.7
Rendimento totale	50.4

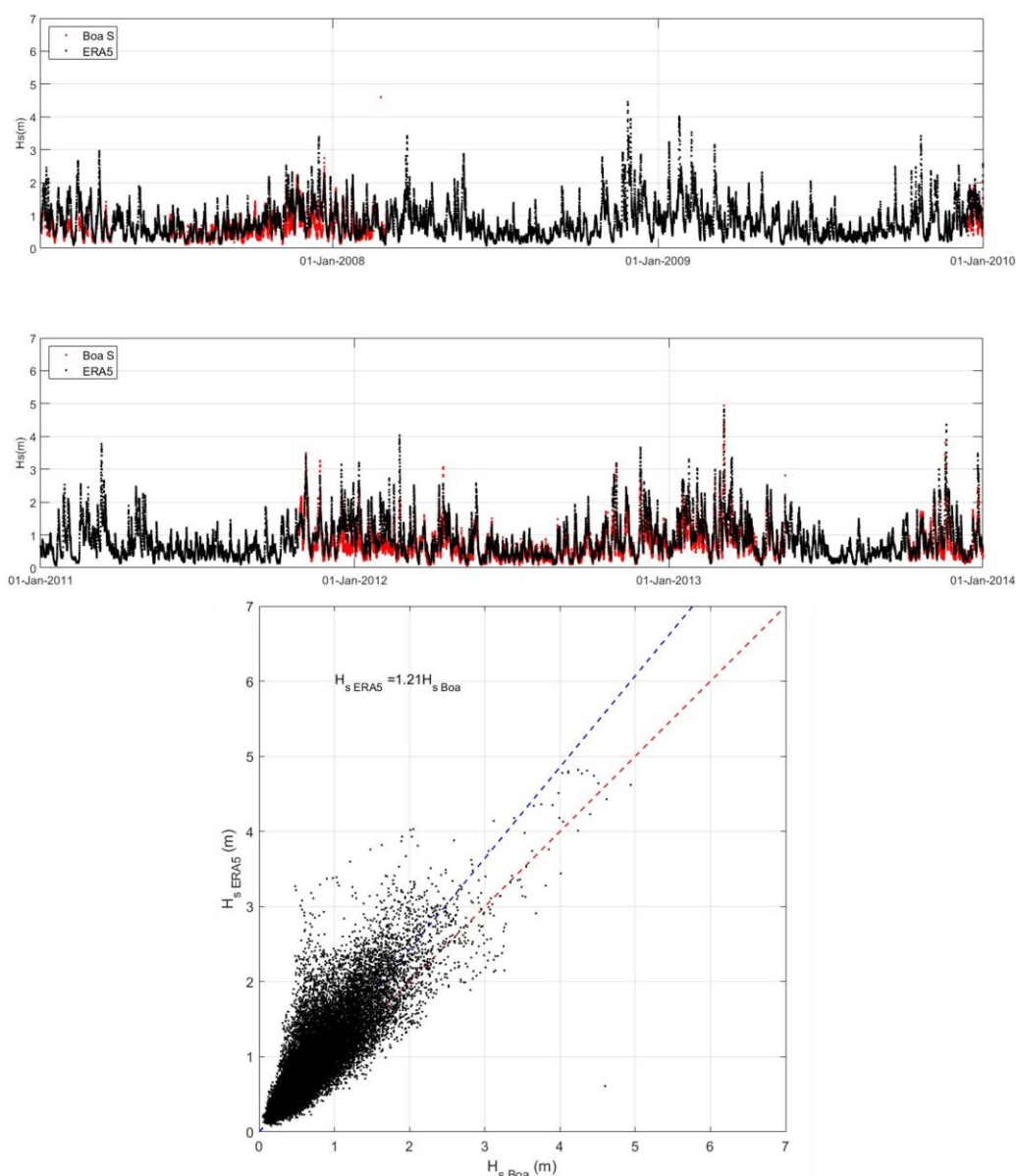
**Figura 7.9 – Rendimento complessivo dell'ondametro di Cagliari.**

## 7.2 Confronto degli eventi estremi sincroni al largo di Cagliari

Per quanto riguarda la prima metodologia di analisi (confronto sincrono), i dati ricostruiti ERA5 al largo di Cagliari sono stati posti a confronto con i dati sincroni estratti dalle due serie storiche, per i periodi di tempo in comune.

I risultati del confronto sincrono, mostrati nel grafico in basso della Figura 7.10, evidenziano che mediamente i dati ricostruiti ERA5 tendono a sovrastimare (21%) i dati misurati con un coefficiente di calibrazione pari a 0.826.





**Figura 7.10 - Confronto dei dati di moto ondoso ricostruita dall'ECMWF (ERA5 Cagliari) con i dati sincroni registrati dalla boa ondamentica di Cagliari per il periodo 1940-2022.**

### 7.3 Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Cagliari

Nei grafici polari di Figura 7.11 sono riportati i valori di altezza significativa e direzione di provenienza al colmo delle mareggiate, definite secondo quanto specificato nel seguito, estratte dalla serie storica di misure di moto ondoso effettuate dalla boa ondamentica di Cagliari (pannello di sinistra) e dalla serie di dati ricostruiti di moto ondoso ERA5 Cagliari (pannello di destra).

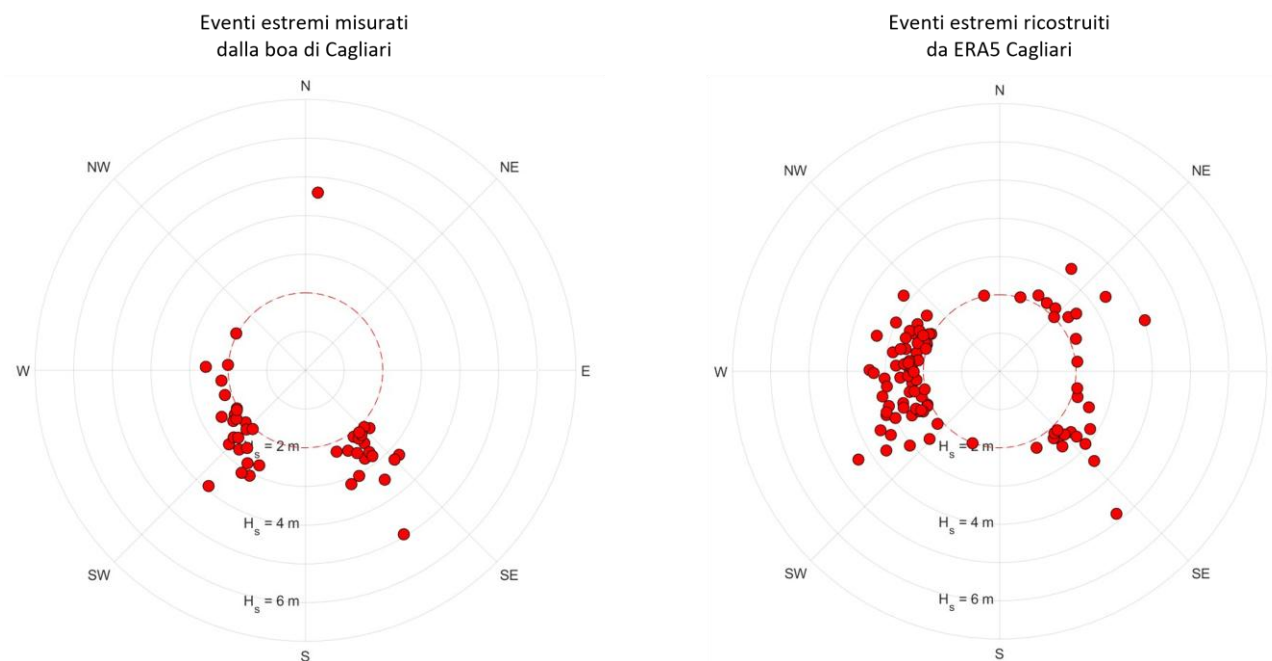
I dati fanno riferimento alle stesse mareggiate ma come detto non sono sincroni, ovvero si accetta che i colmi delle singole mareggiate possano avvenire in istanti diversi pur appartenendo allo stesso evento meteorologico.

La singola mareggiata è stata identificata in base al soddisfacimento contemporaneo dei seguenti requisiti:

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

- altezza d'onda  $H_s$  sopra la soglia di 1.0 m per più di 12 ore;
- altezza d'onda  $H_s$  al colmo dell'evento meteorologico uguale o superiore alla soglia 2.0 m;
- distanza tra due mareggiate pari ad almeno 48 ore.

Il soddisfacimento di questi requisiti consente di definire i valori estremi di moto ondoso raggiunti al culmine delle mareggiate che risultano statisticamente indipendenti l'uno dall'altro.

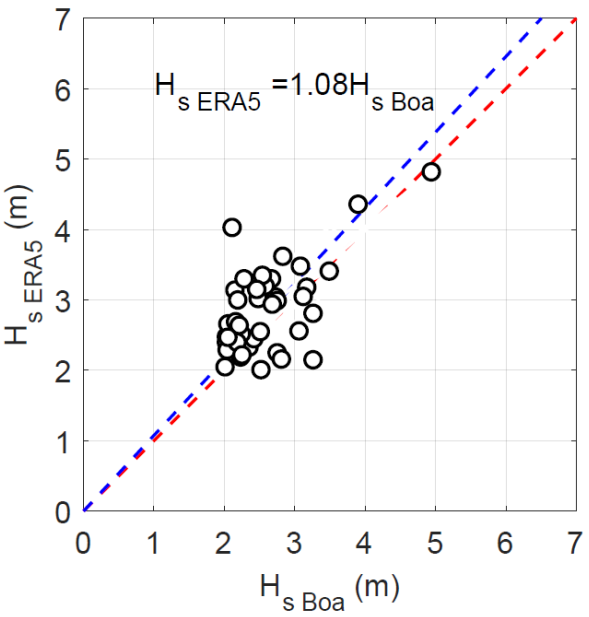


**Figura 7.11 - Distribuzione dei valori di altezza d'onda  $H_s$  al colmo delle mareggiate registrate dalla boa di Cagliari (sinistra) e ricostruiti dall'ECMWF (ERA5 Cagliari) nel medesimo periodo.**

Nella Figura 7.12 gli stessi dati sono confrontati prendendo in esame solo i valori di  $H_s$  riportando in ordinata i valori ERA5 Cagliari e in ascissa i valori misurati dalla boa ondometrica. Il confronto mostra di nuovo una leggera sovrastima dei valori ricostruiti.

Per calcolare un coefficiente di calibrazione medio da applicare solo agli eventi estremi di moto ondoso ricostruiti in re-analisi, è stata presa in esame la retta di interpolazione di equazione  $HP = A + B \cdot HM$ . Imponendo alla stessa retta il passaggio per l'origine ( $A=0$ ), si è calcolato applicando il metodo dei minimi quadrati il coefficiente  $B$  per il quale si è ottenuto  $B = 1.08$ . Sostanzialmente per correggere la sovrastima degli eventi estremi individuata nel database ERA5 è necessario ridurre i valori di  $H_s$  ricostruiti di circa l'8% (coefficiente di calibrazione  $1/1.08=0.926$ ).

Assumendo un approccio cautelativo, tenendo conto che i valori di ERA5 risultano leggermente sovrastimati rispetto a quelli misurati dalla boa ondometrica, si è deciso di non applicare il coefficiente di calibrazione per gli eventi estremi utilizzando "tal quale" la serie storica ricostruita in rianalisi.



*Figura 7.12 - Confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate (con Hs maggiore di 2.0 m) registrati dalla boa di Cagliari tra il 2007 e il 2014 e quelli ricostruiti dall’ECMWF nel punto ERA5 Cagliari.*

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 8 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO IN PROSSIMITA' DEL PORTO DI CAGLIARI

La propagazione largo-riva della serie storica ERA5 è stata effettuata per definire il clima ondametrico in prossimità dell'imboccatura del porto di Cagliari su un fondale di circa -20.0 m sul l.m.m..

Per effettuare la propagazione dell'intera serie storica si è applicato il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE, sviluppato dalla società Modimar S.r.l.

Il modello numerico MEROPE risolve la rifrazione inversa spettrale di stati di mare e consente di determinare in un punto posizionato in costa (denominato punto d'inversa) le caratteristiche spettrali del moto ondoso che si propagano da largo a riva.

Il modello simula l'evoluzione spaziale di stati di mare rappresentati da uno spettro con energia distribuita in frequenza e in direzione e riproduce gli effetti indotti sul moto ondoso dalla rifrazione e dallo shoaling causati dal fondale senza tenere conto degli effetti dissipativi dovuti al frangimento e all'attrito sul fondo, utilizzando pertanto un approccio conservativo.

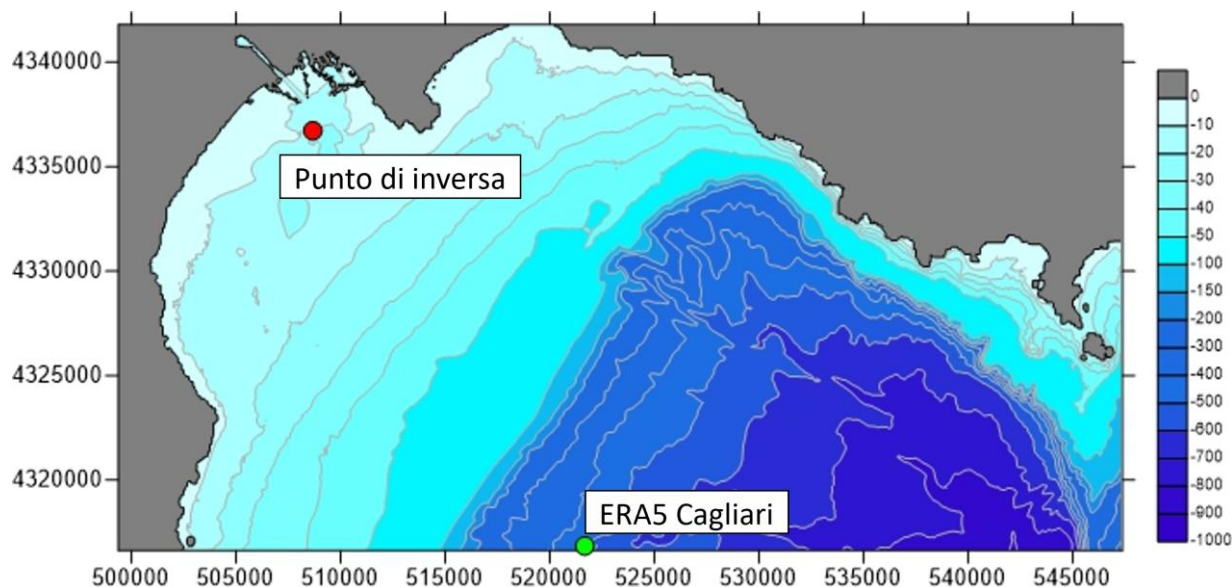
Come descritto nel seguito, l'applicazione del modello numerico ha consentito di propagare in costa l'intera serie storica oraria ondametrica su un arco di tempo di 83 anni ricostruita in ri-analisi a largo.

In Figura 8.1 è rappresentata la batimetria del dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni effettuate con il modello MEROPE. La batimetria è stata definita sulla base dei dati di profondità forniti dall'AdSP che sono stati integrati con quelli provenienti dalle carte nautiche disponibili per l'area in esame e con il database "opensource" EMODNET.

Nella Figura 8.1 è indicata sia la posizione del punto ERA5 Cagliari (posto alla profondità di circa – 500 m sul l.m.m.) dove è definita la serie storica ondametrica a largo, sia la posizione del Punto di Inversa (posto alla profondità di circa – 20 m sul l.m.m.) in corrispondenza del quale è stata propagata l'intera serie storica ondametrica.

Il dominio di calcolo ha dimensioni di circa 25 km x 48 km ed è numericamente definito da una griglia di calcolo a maglie quadrate con passo di discretizzazione di 25 m in entrambe le direzioni.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR



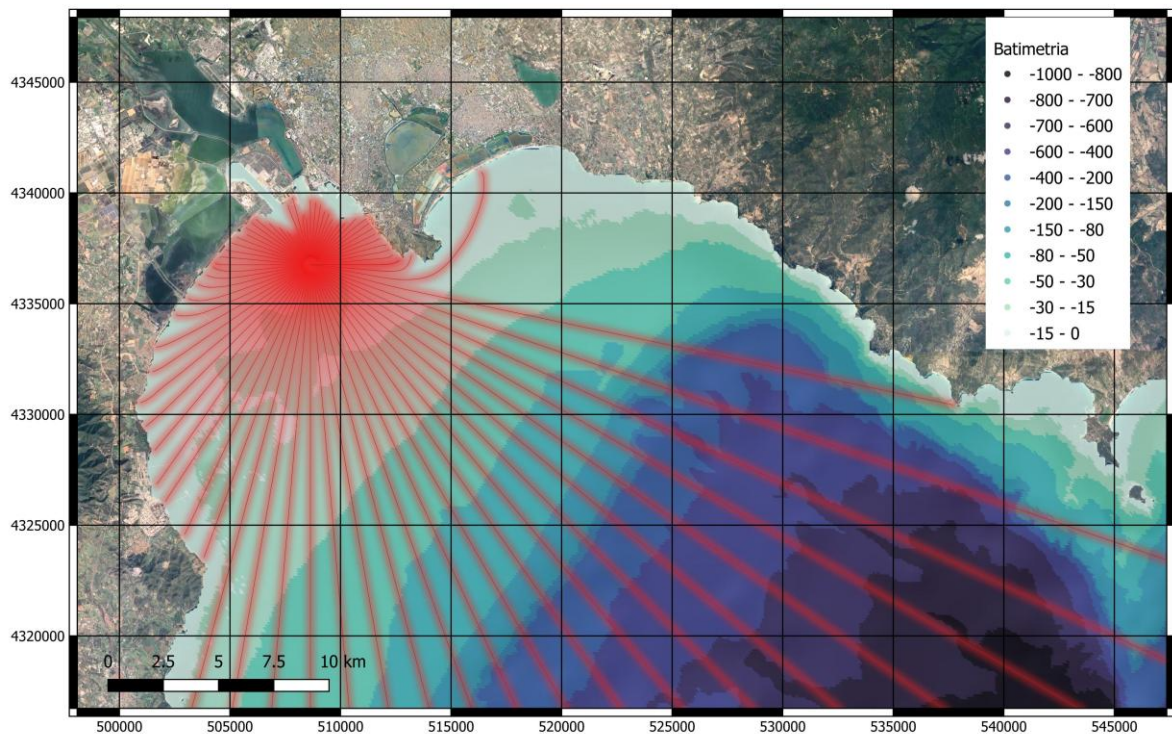
**Figura 8.1 – Batimetria della griglia di calcolo utilizzata per la propagazione in costa (nel Punto di inversa posto alla profondità -20.0 m sul l.m.m.) della serie storica ondamentrica ricostruita in rianalisi nel punto a largo ERA5 Cagliari.**

## 8.1 Condizioni al contorno e dati di calcolo

Per il punto di inversa sono stati calcolati (utilizzando il metodo inverso, ovvero partendo dal punto in costa andando verso il largo) 20 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando per ogni piano una serie di raggi (linee ortogonali ai fronti d'onda), spaziate di  $0.5^\circ$ , sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia effettivo sotto costa. In Figura 8.2 sono rappresentati, a titolo di esempio, i raggi dell'inversa spettrale centrati nel punto di propagazione sotto costa ottenuti per un periodo di 3 s.



Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarin.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR



**Figura 8.2 – Esempio di tracciamento inverso dei raggi eseguito mediante il modello MEROPE per onde caratterizzate da periodi di 3 s.**

I 4000 piani d'onda inversi (20 x 200) così calcolati hanno consentito di costruire un database di correlazione largo-riva. Mediante questo database l'intera serie storica dei dati ERA5 al largo di Cagliari è stata propagata nel punto di inversa.

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

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

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

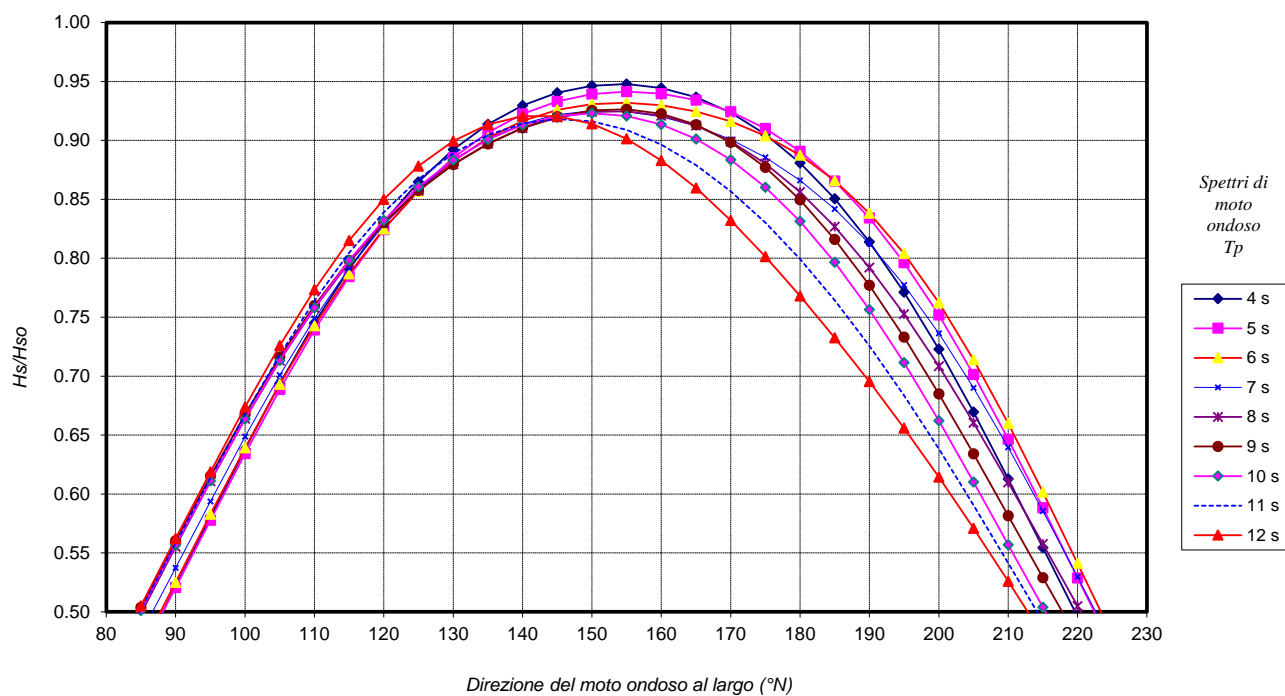
La funzione  $G(f, \theta)$  viene esplicitata nel modello MEROPE sulla base dell'equazione fornita da Goda ponendo  $s_{max} = 18$  (onde di mare vivo). Si ricorda che le "onde di mare vivo" (sea), tipiche dell'area di generazione (fetch), hanno una elevata dispersione direzionale dell'energia e per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

Per il punto di inversa spettrale, la Figura 8.3 riporta in forma grafica l'andamento del coefficiente  $K = H_s/H_{so} = K_r \cdot K_s$  rispetto alla direzione di incidenza a largo, dove:

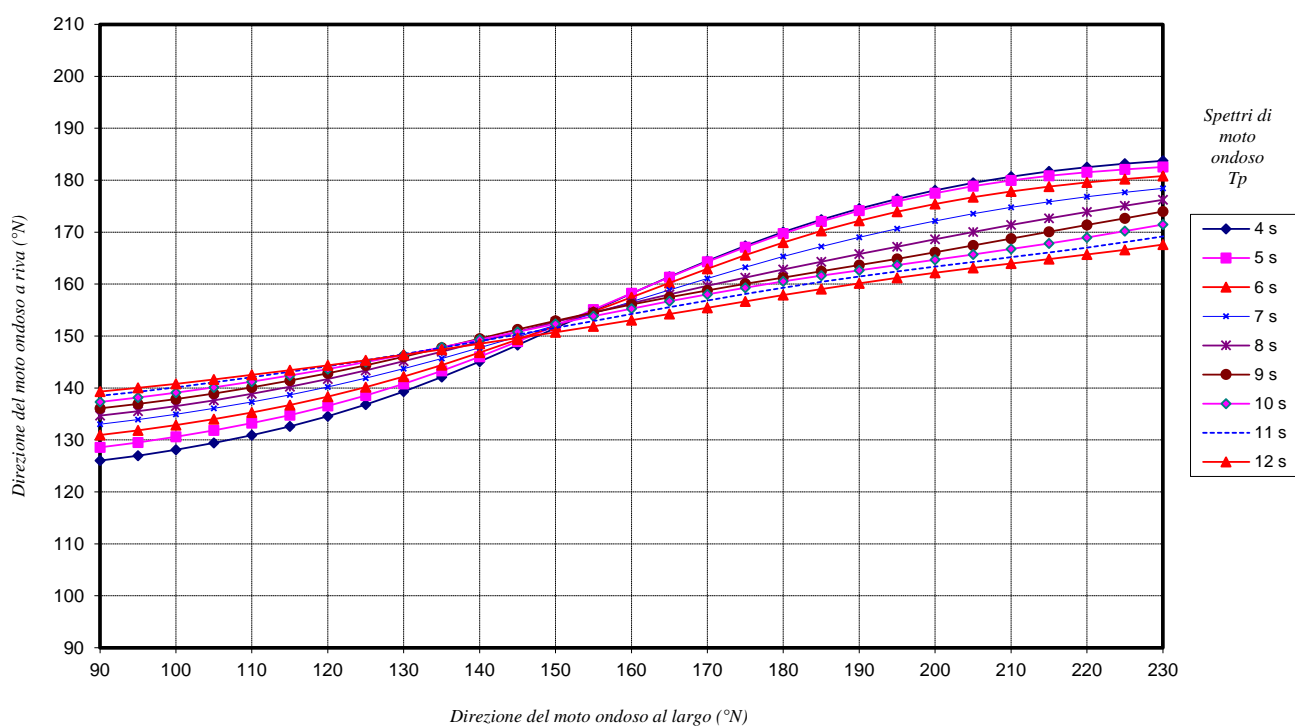
- $H_s$  è l'altezza d'onda significativa in costa;
- $H_{so}$  è l'altezza d'onda significativa a largo;
- $K_r$  è il coefficiente di rifrazione;
- $K_s$  è il coefficiente di shoaling.

Nella Figura 8.4 è rappresentata anche la corrispondenza calcolata tra le direzioni del moto ondoso al largo e i corrispondenti valori di direzione calcolati a riva.

I grafici, ottenuti dall'applicazione del modello MEROPE per il caso in questione, consentono di calcolare facilmente le caratteristiche del moto ondoso in costa in funzione di quelle a largo.



**Figura 8.3 - Diagramma di correlazione largo/riva. Rapporto tra  $H_s/H_{s0}$  in funzione della direzione del moto ondoso al largo.**



**Figura 8.4 - Diagramma di correlazione largo/riva. Rapporto tra direzione del moto ondoso al largo e a riva.**

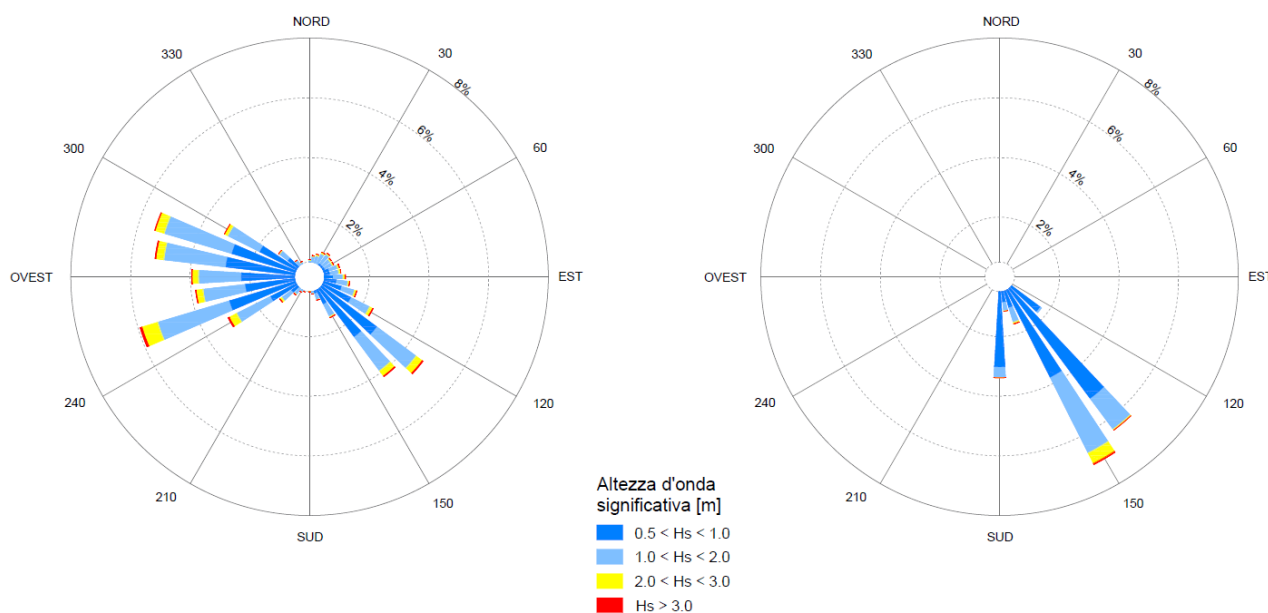


## 8.2 Clima ondametrico in costa

L'applicazione del modello MEROPE ha consentito di propagare nel punto di inversa spettrale tutti gli stati di mare della serie storica 1940-2022 ricostruita al largo e di valutare pertanto le caratteristiche di clima di moto ondoso in prossimità dell'imboccatura del Porto di Cagliari.

La serie storica propagata in costa è stata quindi analizzata per definire il clima ondametrico medio nel punto di inversa.

I risultati ottenuti sono riportati nel grafico polare (rosa di moto ondoso media annuale) a destra della Figura 8.5. Mentre a sinistra della stessa figura è riportata per un confronto diretto la rosa ondometrica a largo stralciata dalla Figura 5.2.



**Figura 8.5 - Rose ondamiche a largo nel Punto Era5 Cagliari (pannello di sinistra) e propagate nel Punto di inversa in prossimità del Porto di Cagliari (pannello di destra).**

Tenendo conto delle differenti esposizioni geografiche del Punto ERA5 Cagliari e del Punto di Inversa spettrale evidenziati nella Figura 8.6, si comprende che nel punto d'inversa posto di fronte all'imboccatura del porto di Cagliari risultano completamente schermati dalla costa gli stati di mare provenienti a largo dal III e IV quadrante, mentre quelli provenienti dal II quadrante tendono a ruotare per rifrazione verso Sud.

In sostanza quindi i due settori di traversia presenti a largo, in costa si riducono ad uno solo ricadente nel II quadrante.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR



Figura 8.6 - Esposizione geografica del punto di acquisizione ERA5 Cagliari e del punto di inversa spettrale.

Con riferimento alla serie storica ondametrica propagata in costa, si riporta rispettivamente nella Tabella 8.1 e nella Tabella 8.2 il numero di eventi registrati e le relative frequenze di accadimento classati per altezza d’onda Hs e direzione di provenienza.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5	
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	4749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4749
120	41273	577	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41850
130	40815	32960	11559	448	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85782
140	10668	29765	34815	7600	1292	223	28	23	5	0	0	0	0	0	0	84419
150	5082	14391	25833	13914	5619	2079	566	213	55	36	2	0	0	0	0	67790
160	3217	6041	7305	2726	909	255	110	22	17	12	4	0	0	0	0	20618
170	4270	5901	5785	1684	426	90	9	4	7	0	0	0	0	0	0	18176
180	80861	45007	20713	2246	238	33	12	5	0	0	0	0	0	0	0	149115
190	208960	2817	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	211777
200	1987	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1987
210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tot	401882	137459	106010	28618	8484	2680	725	267	84	48	6	0	0	0	0	686263

Tabella 8.1 - Numero di eventi per classi di direzione e altezza d'onda della serie storica propagata largo/riva.

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa H <sub>s</sub> [m]															Tot	>0.5
	<.25	.25÷0.5	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	5.0÷5.5	5.5÷6.0	6.0÷6.5	≥ 6.5		
100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0
110	0.690	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.7	0.0
120	6.010	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.1	0.0
130	5.950	4.800	1.680	0.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.5	1.8
140	1.550	4.340	5.070	1.110	0.190	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.3	6.4
150	0.740	2.100	3.760	2.030	0.820	0.300	0.080	0.030	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.9	7.0
160	0.470	0.880	1.060	0.400	0.130	0.040	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.0	1.7
170	0.620	0.860	0.840	0.250	0.060	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.7	1.2
180	11.780	6.560	3.020	0.330	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.7	3.4
190	30.450	0.410	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	30.9	0.0
200	0.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.3	0.0
210	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0
Tot	58.55	20.03	15.43	4.19	1.23	0.38	0.10	0.03	0.01	0.01						100.0	21.4
Tot. cumul.		78.6	94.0	98.2	99.4	99.8	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

Tabella 8.2 - Frequenza di accadimento per classi di direzione e altezza d'onda della serie storica propagata largo/riva.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 9 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSONO

### 9.1 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

Per determinare la correlazione Hs-Tr (Tr= tempo di ritorno) relativa al Porto di Cagliari, è stata eseguita l'analisi statistica degli eventi estremi utilizzando come campione di dati la serie propagata nel punto di inversa spettrale.

Si evidenzia che il punto di inversa è stato appositamente posizionato ad una profondità elevata pari a circa -20,0 m sul l.m.m. al fine di escludere che le onde estreme possano subire il frangimento indotto dal fondale e quindi che la loro altezza possa essere limitata dallo stesso fondale.

Si evidenzia che in generale per eseguire l'analisi statistica delle altezze d'onda risulta necessario selezionare preliminarmente dei campioni di dati che rispondano al doppio requisito di risultare: tra di loro (i) statisticamente indipendenti ed (ii) omogenei.

Dato l'elevato intervallo temporale della serie storica pari a 83 anni, si è applicato il metodo dei massimi annuali il quale garantisce automaticamente l'indipendenza statistica dei valori massimi estratti dalla serie storica. L'unica accortezza riguarda la necessità di accertarsi che nel passaggio tra un anno e l'altro non si consideri la stessa mareggiata.

Per quanto riguarda l'omogeneità dei dati di solito si fa riferimento ad eventi caratterizzati dalla stessa genesi meteorologica che normalmente viene assicurata classificando gli eventi estremi per settori di traversia. Nel presente caso come evidenziato nel paragrafo precedente le onde propagate in costa ricadono in un solo settore di traversia.

Gli stati di mare così selezionati sono stati quindi oggetto di una elaborazione statistica al fine di ricavare la correlazione Hs-Tr dove Tr è il tempo di ritorno degli eventi.

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

- Distribuzione di Weibull:

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

- Distribuzione di Gumbel:

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

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

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

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

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

Introducendo la variabile ridotta:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 9.2 Analisi statistica con il metodo dei massimi annuali nel punto di inversa Cagliari

L'analisi degli estremi con l'utilizzo del metodo dei massimi annuali ha portato all'individuazione di 83 stati di mare estremi, riportati nel grafico polare della Figura 9.1 e nella Tabella 9.1 con i valori numerici (Data, Hs, Tp, Dir) ordinati per Hs decrescente.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarino.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

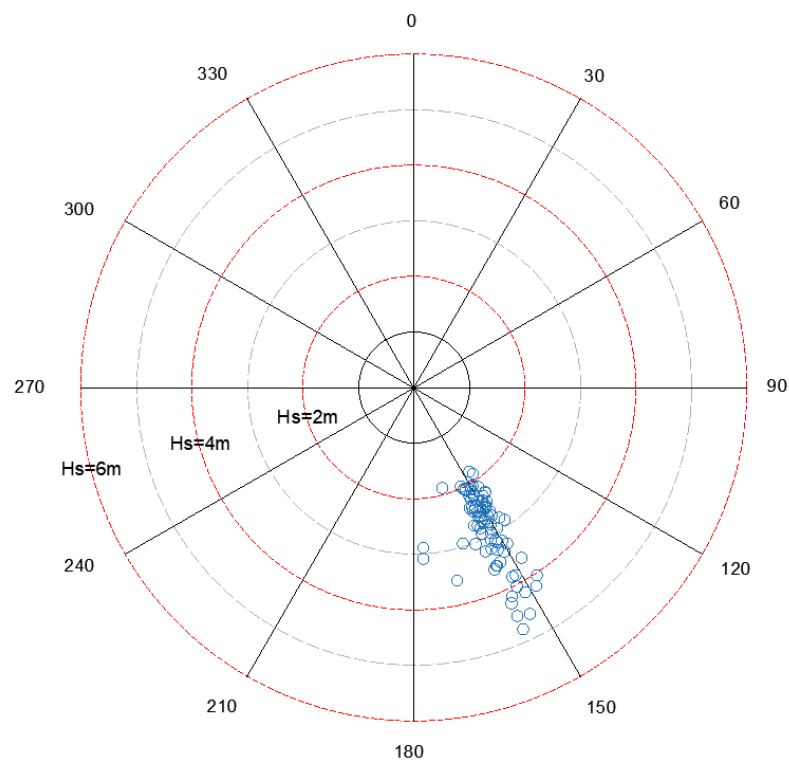


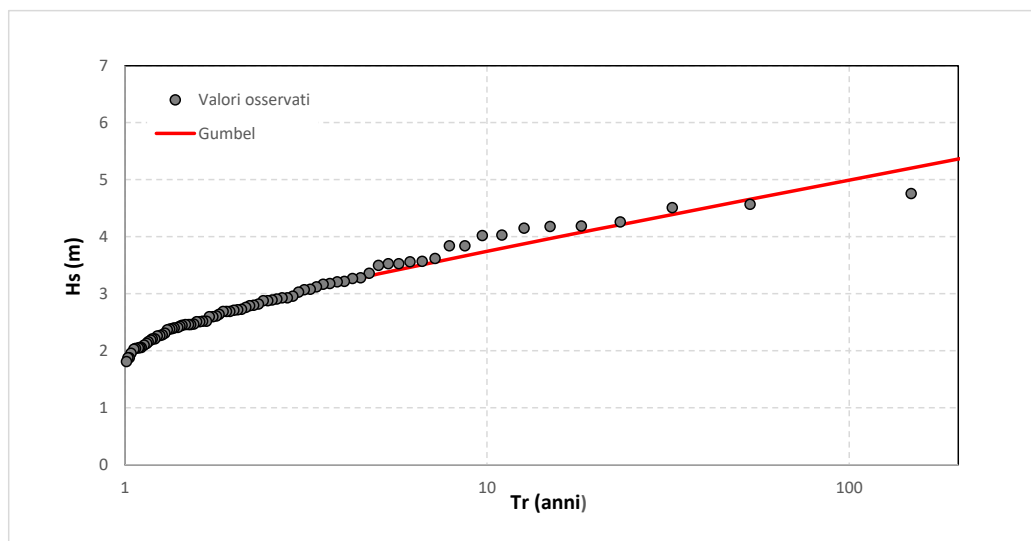
Figura 9.1 - Individuazione massimi annuali per il settore 140°N-180°N nel punto di inversa spettrale.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinario.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

SETTORE 140°N-180°N									
N°	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	N°	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1	01/03/1986	4.76	3.7	156	33	02/04/2000	2.89	9.8	155
2	29/03/1974	4.57	5.4	153	34	22/01/1957	2.88	7.3	146
3	06/03/2013	4.51	8.5	156	35	09/12/1960	2.88	5.8	177
4	17/04/1962	4.26	7.3	156	36	28/04/1969	2.82	3.5	151
5	15/03/1953	4.19	5.4	148	37	14/01/1961	2.80	3.7	147
6	21/12/1979	4.18	7.3	151	38	25/02/1964	2.79	3.5	155
7	28/11/2008	4.15	6.8	155	39	08/12/1996	2.76	5.8	151
8	21/01/2017	4.03	7.3	147	40	03/11/1966	2.73	9.8	155
9	19/12/2016	4.02	5.8	153	41	01/05/1949	2.72	7.3	152
10	09/03/1972	3.84	4.3	152	42	17/02/1967	2.71	5.8	156
11	03/12/2003	3.84	7.3	152	43	15/01/1980	2.69	6.8	151
12	28/02/1948	3.62	5.8	148	44	21/12/1978	2.69	5.8	149
13	24/12/1973	3.57	5.4	156	45	26/10/1946	2.69	3.0	153
14	24/12/1963	3.56	4.3	167	46	13/04/2007	2.64	7.3	150
15	26/03/1943	3.53	4.3	155	47	29/10/1976	2.61	5.4	152
16	25/04/1989	3.53	5.4	155	48	08/05/1959	2.60	7.3	148
17	12/03/2011	3.50	7.3	154	49	14/05/1947	2.60	5.0	153
18	11/11/2001	3.36	7.3	151	50	11/10/1990	2.52	5.8	149
19	14/03/1971	3.28	9.8	153	51	28/04/1999	2.52	9.8	151
20	22/03/1942	3.27	4.3	149	52	15/03/2022	2.51	3.7	153
21	04/04/1987	3.22	7.3	156	53	11/03/1975	2.51	6.8	149
22	16/04/2004	3.21	13.2	154	54	10/04/2021	2.47	3.0	154
23	21/01/2020	3.18	8.5	150	55	22/04/1958	2.46	7.3	150
24	22/04/2019	3.17	4.0	152	56	08/12/1968	2.46	5.8	151
25	24/03/1991	3.12	7.3	152	57	27/01/1955	2.46	4.3	149
26	01/03/1993	3.08	5.8	177	58	21/10/1952	2.45	5.8	153
27	23/03/1977	3.07	3.5	153	59	07/03/1985	2.43	7.3	148
28	29/10/2018	3.03	4.3	158	60	15/11/2005	2.41	5.8	153
29	16/04/1944	2.96	7.3	152	61	13/04/2012	2.40	0.0	154
30	15/11/2002	2.93	5.8	163	62	22/06/1992	2.39	7.3	155
31	03/04/1988	2.93	9.8	149	63	31/03/1981	2.38	5.4	149
32	08/11/1982	2.91	7.3	155	64	18/02/2014	2.37	3.7	149

**Tabella 9.1 - Elenco dei primi 64 valori di Hs massimi annuali per il settore 140°N-180°N.**

Nella Figura 9.2 è riportata la correlazione Hs-Tr ottenuta applicando la funzione di probabilità alla Gumbel che è risultata la più adatta nel presente caso a rappresentare gli eventi estremi.



**Figura 9.2 - Legge di Gumbel - Settore 140°N-180°N per il punto di inversa spettrale.**



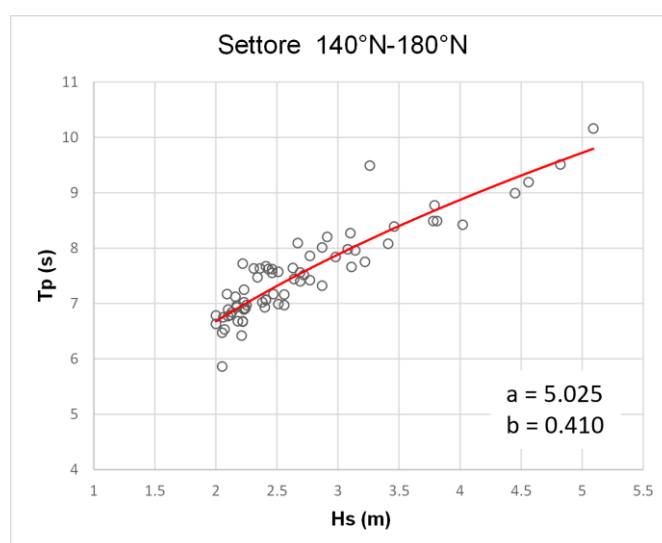
Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Ai valori estremi di Hs si sono associati i valori del periodo di picco Tp tramite la seguente legge esponenziale:

$$T = aH_s^b$$

i cui risultati sono riportati nella Figura 9.3.

Infine nella Tabella 9.2 vengono riportati i valori di Hs e Tp relativi ai tempi di ritorno 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 anni.



**Figura 9.3 - Legge Hs-Tp per il settore 140°N-180°N.**

Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)
2	3.0	7.8
5	3.5	8.4
10	3.9	8.7
15	4.1	8.9
20	4.2	9.1
25	4.4	9.2
50	4.8	9.5
100	5.2	9.9

**Tabella 9.2 - Eventi estremi - Settore 140°N-180°N.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarino.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 10 VARIAZIONE DEL LIVELLO DEL MARE

Le variazioni del livello del mare in prossimità della costa sono dovute a varie cause, tra le quali risultano prevalenti:

- maree astronomiche: variazioni del livello del mare dovute all'interazione tra le masse oceaniche e il campo gravitazionale degli astri posti in prossimità della terra tra i quali quelli della luna e del sole risultano i più importanti. Poiché si può assumere che i moti relativi degli astri e della terra e le loro periodicità siano note con ottima approssimazione, si può assumere che le maree astronomiche siano ricostruibili e prevedibili in senso deterministico;
- maree meteorologiche: variazioni del livello del mare dovute a perturbazioni atmosferiche (processo stocastico). La componente meteorologica della marea è indotta essenzialmente da due fenomeni che si esplicano contemporaneamente:
  - (i) l'effetto barometrico inverso;
  - (ii) l'azione esercitata dal vento sulle masse oceaniche ("wind set-up").

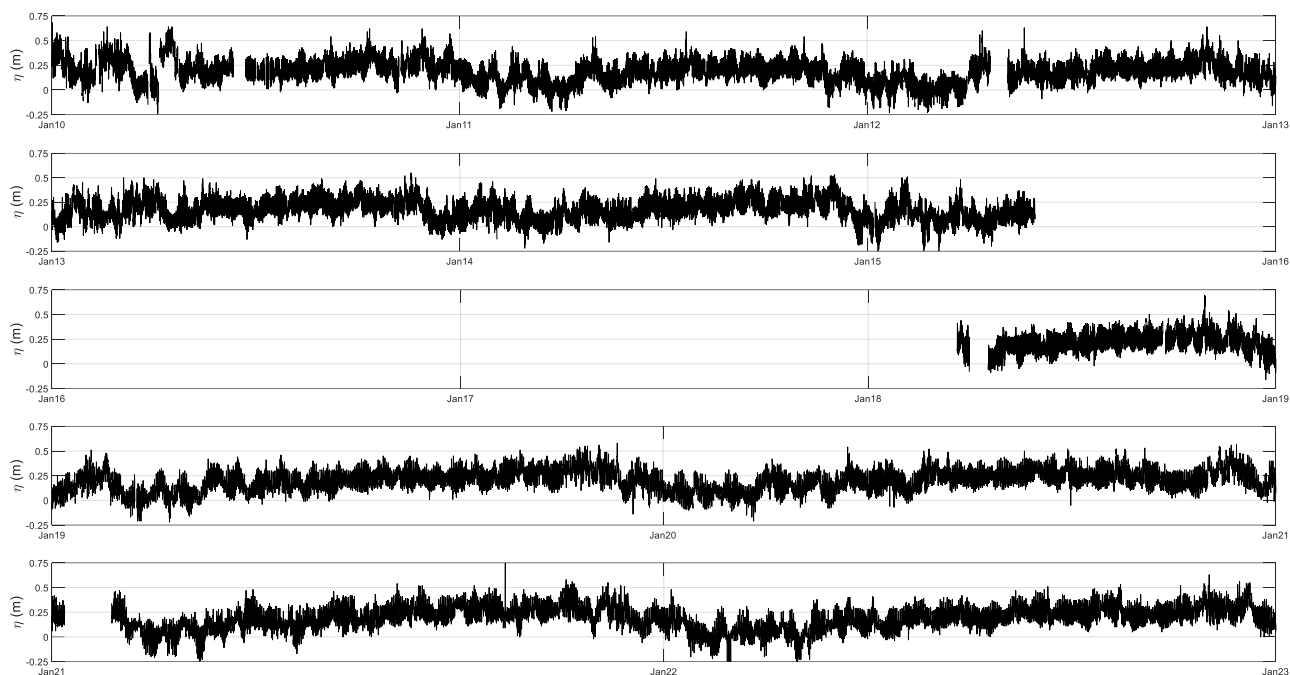
In presenza di perturbazioni meteorologiche di tipo ciclonico (depressioni atmosferiche) con vento che spira verso la costa, si verifica un aumento del livello del mare comunemente indicato con il termine sovrizzo di tempesta ("storm surge").

In presenza di alte pressioni (anticicloni) i venti sono generalmente deboli per cui prevale l'effetto barometrico inverso che dà origine ad un abbassamento del livello medio marino.

Per analizzare le variazioni del livello del mare si è fatto riferimento ai dati registrati dalla stazione mareografica di Cagliari, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita da ISPRA. La stazione acquisisce, oltre alla misura del livello idrometrico, anche i valori di temperatura e pressione atmosferica, nonché il vento (velocità e direzione).

I grafici di Figura 10.1 riportano i livelli idrometrici registrati dalla stazione mareografica di Cagliari nel periodo 2010-2024. Da osservare che lo zero dello strumento non coincide con il livello medio del mare.

La marea astronomica di Cagliari è di tipo misto semidiurno (periodo 12 ore e 30 minuti) con due alte e due basse maree, di diversa ampiezza.

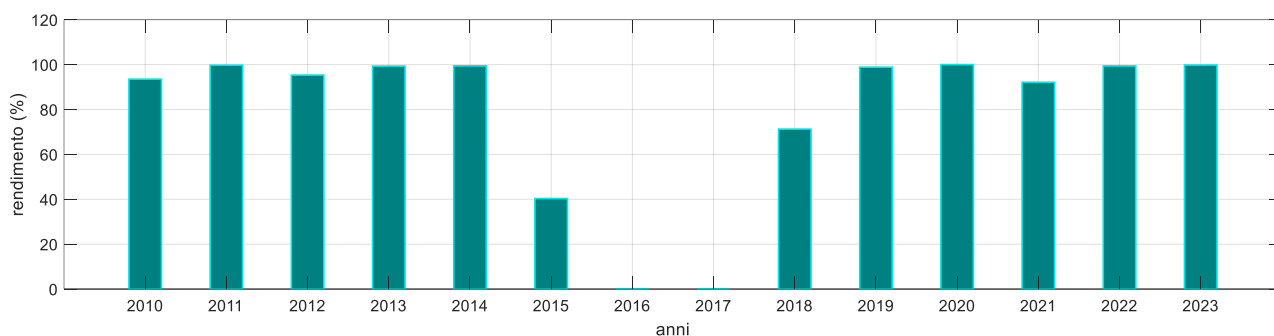


**Figura 10.1 - Livelli idrometrici osservati dalla stazione mareografica di Cagliari nel periodo 2010 -2024.**

Per la valutazione della componente astronomica della marea, le misure mareografiche effettuate dalla stazione di Cagliari sono più che sufficienti per valutare le costanti armoniche di marea.

I livelli rappresentati in Figura 10.1 sono riferiti allo zero dello strumento mareografico (zero idrometrico) che in generale non è detto che coincida con il livello medio del mare.

Come è desumibile dalla Figura 10.2, il rendimento della stazione mareografica si può considerare sufficiente per l'analisi.



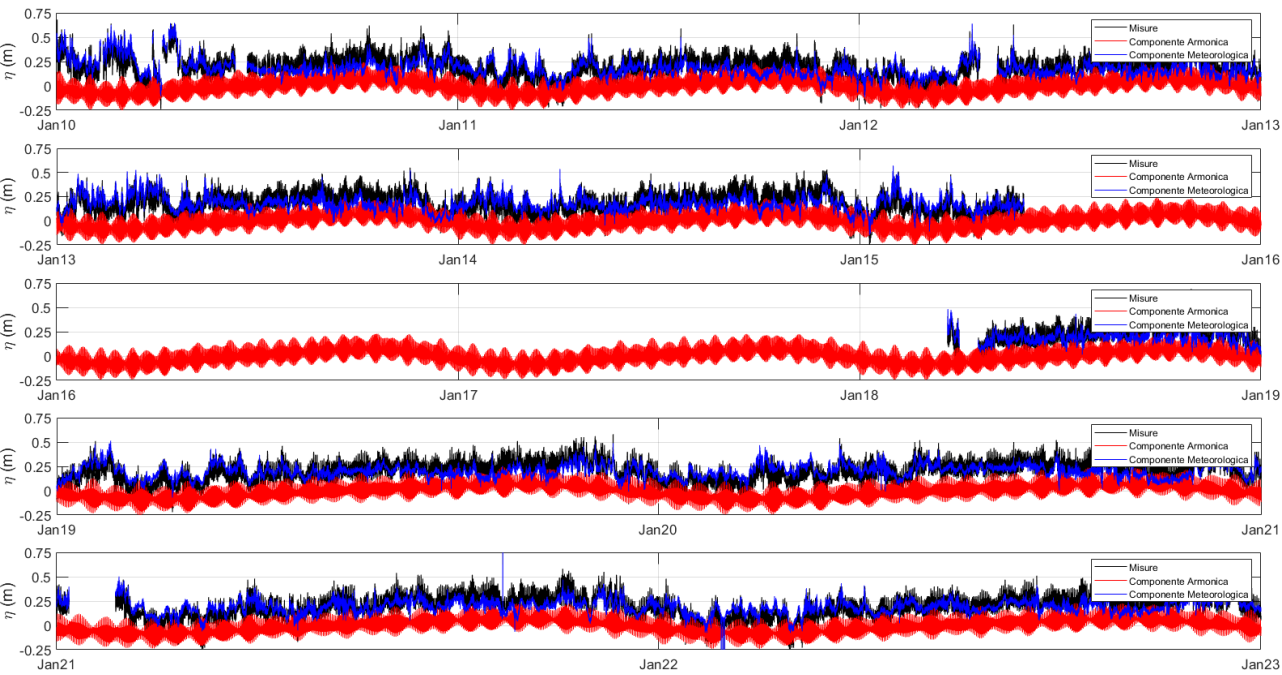
**Figura 10.2 - Rendimento annuale della stazione mareografica di Cagliari per il periodo di riferimento 2010-2024.**

Le misure acquisite dallo strumento sono state processate mediante l'algoritmo di Pawlowicz et al., 2002, comunemente utilizzato a livello mondiale, al fine di ottenere le costanti armoniche relative alla marea astronomica.

Una volta determinato il segnale di livello dovuto alla sola marea astronomica, i livelli indotti dalla sola componente meteorologica (residuo) sono stati ottenuti sottraendo alle misure la componente astronomica.

La Figura 10.3 mostra a titolo di esempio una porzione del risultato dell'analisi condotta. Nel grafico sono rappresentate: le misure di livello (in nero), la componente armonica (in rosso) e la componente residua dovuta prevalentemente alla marea meteorologica (in blu).

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR



**Figura 10.3 - Analisi della serie storica delle misure di livello misurate presso la stazione RMN di Cagliari: identificazione della componente armonica e meteorologica.**

I valori caratteristici della marea astronomica di Cagliari sono sintetizzati in Tabella 10.1 dove si è utilizzata la nota simbologia internazionale per la loro caratterizzazione.

	Zero-strumento (m)	L.M.M. (m)
HAT	0.44	0.24
MHWS	0.34	0.14
MHWN	0.29	0.10
MSL	0.19	0.00
MLWN	0.11	-0.08
MLWS	0.06	-0.13
LAT	-0.06	-0.25

**Tabella 10.1 - Livelli caratteristici della marea astronomica per la stazione di Cagliari. Ricostruzione basata su circa quindici anni di misura.**

Si riportano inoltre, nella Tabella 10.2 le principali componenti armoniche della marea astronomica.

Porto		Costanti armoniche								
		M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	M <sub>4</sub>	MS <sub>4</sub>
Cagliari	H (cm)	8.1	2.9	1.8	0.8	3.0	1.6	1.0	0.2	0.1
	g (°)	265	287	243	287	198	114	198	253	311

**Tabella 10.2 – Valori delle costanti armoniche relative al porto di Cagliari.**

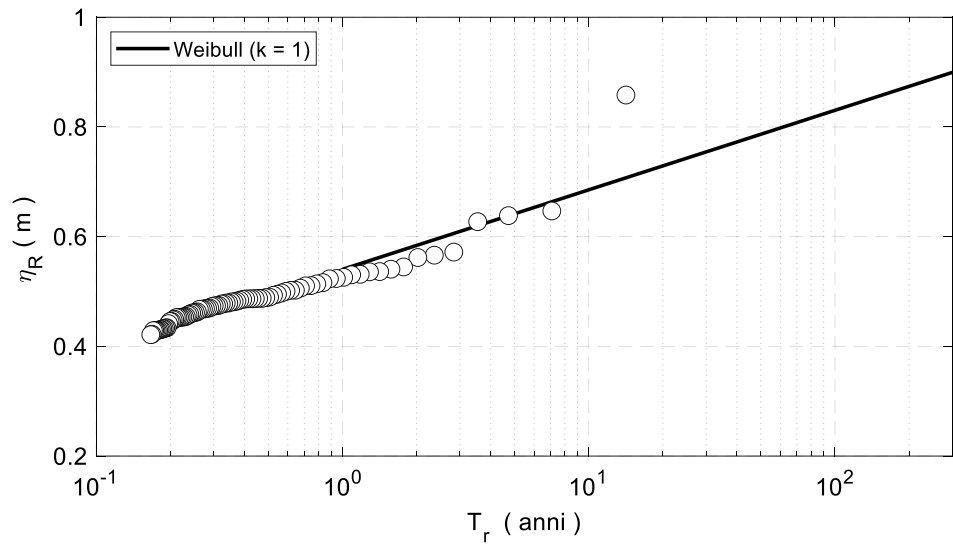
La serie storica del residuo di marea, ovvero la marea meteorologica si ottiene sottraendo dal segnale totale misurato la componente astronomica.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

Una volta identificata la serie storica della sola componente meteorologica è stata effettuata l'analisi dei valori estremi dei valori massimi del segnale ottenuto. L'analisi dei valori estremi è stata effettuata utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT) con valore di soglia del sovrizzo meteorologico pari a +0.4 m sul l.m.m.

La distribuzione di probabilità che meglio approssima i dati è risultata essere la distribuzione di Weibull ( $k = 1$ ).

In Figura 10.4 viene riportato l'andamento del sovrizzo meteorologico in funzione del tempo di ritorno  $T_r$ , mentre la Tabella 10.3 mostra i valori numerici associati ad alcuni tempi di ritorno selezionati.



*Figura 10.4 - Analisi degli estremi con soglia pari a 0.4 m per Cagliari.*

Tr	Livello
2	0.58
5	0.64
10	0.69
15	0.71
20	0.73
25	0.74
30	0.75
50	0.79
100	0.83

*Tabella 10.3 - Valori estremi del sovrizzo residuo (marea meteorologica) in funzione del tempo di ritorno  $T_r$  per il porto di Cagliari.*

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 10.1 Variazioni della pressione atmosferica

E' stata eseguita una analisi delle variazioni della pressione atmosferica registrata dalla stazione meteorologica afferente alla stazione mareografica di Cagliari.

Con l'analisi ci si è posti l'obbiettivo di determinare:

- la massima pressione atmosferica misurata dalla stazione;
- la minima pressione atmosferica misurata dalla stazione;
- la massima differenza positiva tra la pressione misurata e la pressione di riferimento sul livello del mare pari a 1013,25 hPa;
- la massima differenza negativa tra la pressione misurata e la pressione di riferimento sul livello del mare pari a 1013,25 hPa;
- la differenza media positiva;
- la differenza media negativa.

I risultati sono riportati nella Tabella 10.4.

	P (hPa)	$\Delta +$ (hPa)	$\Delta -$ (hPa)	$\Delta$ medio (hPa)
15/02/2021 11:00	1038.4	25.4		5.8
24/01/2019 05:00	982.8		-30.2	-4.6

**Tabella 10.4 - Valori massimi di alta e bassa pressione registrati dalla stazione mareografica di Cagliari nel periodo 2010-2024.**

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S1 - Studio Meteomarinò.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	001	-2	MAR

## 11 VARIAZIONI CLIMATICHE

È noto che le analisi statistiche dei vari fenomeni meteomarinari che condizionano il progetto per un'opera marittima (in particolare onde e livelli) devono tenere conto delle possibili tendenze attese nel prossimo futuro in un arco temporale comparabile con la vita utile delle opere in progetto. È anche noto che negli ultimi anni molti studiosi hanno indicato scenari futuri con variazioni significative, legate in gran parte alle interferenze antropiche sulla climatologia terrestre.

È abbastanza certo che nei prossimi decenni si avrà un aumento delle temperature medie e un conseguente aumento dei livelli marini, anche se è ancora piuttosto incerta l'entità di questi innalzamenti, in relazione ai possibili scenari di emissione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera terrestre.

Più incerte sono invece le previsioni relative alle eventuali modifiche delle statistiche relative alle eventuali modifiche delle statistiche relative al regime dei venti e delle onde nei diversi mari e oceani.

### 11.1 Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Cagliari

Come illustrato nel capitolo precedente, le variazioni del livello marino a Cagliari sono contenute. Le analisi mareografiche hanno evidenziato nell'ultimo secolo un innalzamento del livello medio marino di circa 12 cm.

Per quanto riguarda le previsioni al futuro il tasso di incremento è sicuramente più elevato in relazione ai nuovi cambiamenti climatici. È noto che tali stime sono periodicamente aggiornate dalla commissione internazionale di scienziati "International Panel on Climate Change" (IPCC), in relazione ai possibili scenari sulle emissioni di anidride carbonica: lo scenario più ottimista è denominato SSPs 2.6, mentre quello più pessimista SSPs 8.5 (SSPs "Shared Socioeconomic Pathways"). La Figura 11.1 mostra la previsione di innalzamento del livello del mare per il nostro secolo fornita dall'IPCC nel 2014. Le linee colorate presenti nella figura mostrano gli scenari in termini di innalzamento di livello forniti da diversi modelli climatologici in relazione ad emissioni variabili.

Le previsioni di variazione del livello che potrebbe registrarsi entro la fine di questo secolo (2100) è molto ampia essendo compresa tra un minimo di circa 25 cm in un secolo (2.5 mm/anno) ad un massimo di circa 98 cm (9.8 mm/anno).

Quindi in una visione molto prudentiale si potrebbe ipotizzare per il 2100 un incremento massimo del livello marino pari a poco meno di un metro. Per una previsione a breve termine, con un tempo di riferimento di 25 anni, è possibile affermare il massimo innalzamento del livello medio del mare non superi i 30 cm.

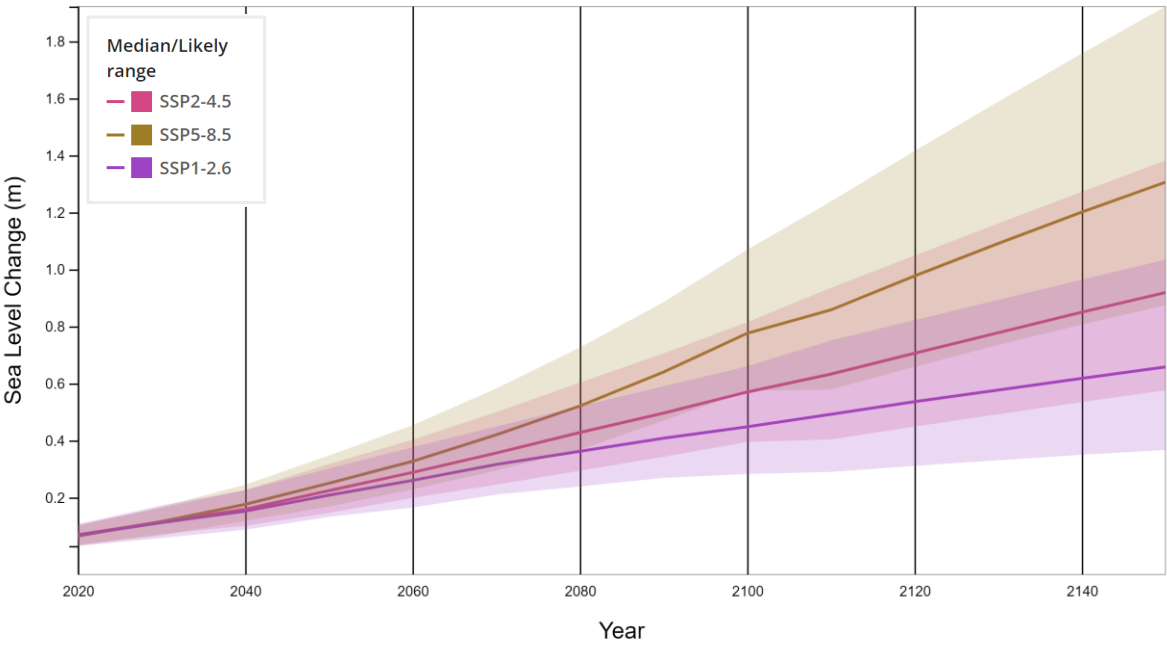


Figura 11.1 - Previsione per il Global Sea Level Rise fornita dall'IPCC.