



AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE
DEL MAR TIRRENO CENTRALE
NAPOLI - SALERNO - CASTELLAMMARE DI STABIA

AUTORITA' DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR TIRRENO CENTRALE - PORTO DI NAPOLI

PROLUNGAMENTO DELLA DIGA DUCA D'AOSTA A PROTEZIONE
DEL NUOVO TERMINAL CONTENITORI DI LEVANTE - II STRALCIO

Piano Nazionale
di Ripresa
e Resilienza



PROGETTO DEFINITIVO

Titolo elaborato :

Studio meteomarinario

Scala: Var.

1 9 0 0 2 A D R 0 0 3 0 0 M A R

Committente:



AUTORITA' DI SISTEMA PORTUALE
DEL MAR TIRRENO CENTRALE

Responsabile Unico del Procedimento:
Dott. Ing. Rosa PALMISANO

Mandataria



Via Monte Zebio, 40
00195 ROMA

PROGETTISTI

Responsabile integrazione
prestazioni specialistiche
Prof. Ing. Alberto NOLI

Mandanti



Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Controllato:	Validato:
	Luglio 2022	0	EMISSIONE	P. Contini	P. Contini	P. Contini

Le Società dell' RTI si riservano la proprietà di questo disegno con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta.
This document is property of RTI. Reproduction and divulgation forbidden without written permission

Visto del Committente:



AUTORITA' DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR TIRRENO CENTRALE
PORTO DI NAPOLI
PROLUNGAMENTO DIGA DUCA D'AOSTA A PROTEZIONE DEL NUOVO
TERMINAL CONTENITORI DI LEVANTE – II STRALCIO
PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO METEOMARINO

Indice

1. Introduzione	3
2. Metodologia e dati base	5
3. Inquadramento geografico	9
4. Fetch geografico ed efficace	10
5. Regime dei venti al largo di Napoli sulla base dei dati DICCA	16
6. Analisi delle registrazioni ondometriche della boa di Ponza	20
6.1 Confronto degli eventi sincroni al largo del promontorio di Ponza.....	22
6.2 Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Ponza.....	23
7. Clima di moto ondoso al largo del porto di Napoli	25
7.1 Curva di durata.....	28
7.2 Correlazione altezza significativa periodo di picco	29
8. Ricostruzione dell'evento del dicembre 2020	30
9. Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo.....	32
9.1 Preparazione del campione.....	32
9.2 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati.....	35
9.3 Statistica dei valori estremi.....	36
9.3.1 Settore di traversia principale.....	36
9.3.2 Settore di traversia secondario.....	37
10. Clima di moto ondoso sottocosta	39
10.1 Griglia di calcolo.....	39

10.2 Condizioni al contorno e ipotesi di calcolo.....	40
10.3 Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda e direzione	41
10.4 Curva di durata.....	44
10.5 Propagazione nel punto sottocosta P0.....	45
11. Analisi delle variazioni del livello del mare	49
11.1 Premessa e metodologia seguita	49
11.2 Serie storica dei livelli misurata dalla stazione RMN di Napoli	49
11.3 Marea astronomica ed analisi armonica dei livelli misurati.....	50
11.4 Analisi del residuo (componente meteorologica).....	52
12. Conclusioni.....	54

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

1. Introduzione

La presente relazione specialistica aggiorna ed integra l'analogo studio specialistico meteomarino già condotto nell'ambito del Progetto Definitivo inerente i lavori del "Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante - I Stralcio", al fine di revisionare ed impostare i parametri meteomarini di progetto cui fare riferimento per i calcoli di stabilità idraulica e strutturale delle opere inerenti anche il II stralcio per un prolungamento complessivo di 270 m a levante.

In particolare, l'aggiornamento è stato condotto estendendo le serie storiche del moto ondoso, del vento e dei livelli di marea di ulteriori tre anni rispetto ai precedenti studi, i quali coprivano dal 1979 al 2018, fino a comprendere quindi integralmente l'anno 2021. In tal modo si è analizzata anche la mareggiata eccezionale verificatasi nel dicembre del 2020 che ha causato ingenti danni alla porzione di diga di più remota realizzazione.

In particolare, l'obiettivo dello studio è la definizione:

- (i) delle forzanti meteomarine (moto ondoso) necessarie per effettuare le verifiche idraulico-strutturali delle opere in progetto;
- (ii) delle onde di modellazione per le considerazioni in merito all'evoluzione dei fondali e della spiaggia di Vigliena;
- (iii) del regime dei venti;
- (iv) delle variazioni dei livelli (marea astronomica e metereologica).

Lo studio ha pertanto riguardato i seguenti aspetti:

- inquadramento geografico del paraggio e definizione del settore di traversia che lo contraddistingue;
- determinazione dell'area di generazione efficace per il moto ondoso;
- definizione delle caratteristiche di moto ondoso, a largo e in prossimità del sito in esame per mezzo di idonea modellistica numerica per l'analisi quantitativa del regime di moto ondoso;
- valutazione, su base statistica, della legge di distribuzione dei valori estremi di moto ondoso al largo in modo da poter definire l'evento di progetto associato ad un determinato tempo di ritorno;
- definizione del clima anemometrico al largo ed in costa;
- definizione del regime dei livelli ed analisi degli estremi congiunti moto ondoso-livelli.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

Come descritto nel seguito, i risultati delle analisi statistiche eseguite sulla serie storica estesa al 2021, confermano i precedenti e di conseguenza possono ritenersi invariati i parametri meteomarini di progetto utilizzati in precedenza.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

2. Metodologia e dati base

Per la definizione delle condizioni di moto ondoso al largo di Napoli sono state prese in esame le fonti di dati maggiormente attendibili e attualmente disponibili:

- dati di moto ondoso ricostruiti in ri-analisi (hindcasting) tra il 1979 e il 2021 per l'intero bacino del mediterraneo dal MetOcean Group del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova ("**dati del DICCA**" nel prosieguo) con il modello di generazione e propagazione del moto ondoso WaveWatch III, con una risoluzione spaziale pari a 0.1° ed una risoluzione temporale pari a 1 ora; tale database, allo stato attuale, è unico nel suo genere data la grande accuratezza spaziale delle serie storiche di moto ondoso ricostruite e l'arco temporale delle stesse serie storiche che risulta essere pari a 42 anni;
- registrazioni ondometriche direzionali (da luglio 1989 a giugno 2005) effettuate dalla boa posta al largo di Ponza con cadenza trioraria appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale gestita dall' Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale ("**ISPRA**" nel prosieguo, già A.P.A.T.).

La seguente Tabella 2-1 riassume quanto sopra riportato.

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	DICCA 42-Year Wave Hindcast	Dati di vento e di moto ondoso ricostruiti con il modello di generazione e propagazione WWIII al largo di Napoli	40.71° N 14.21° E	1979 2021
2	DICCA 42-Year Wave Hindcast	Dati di vento e di moto ondoso ricostruiti con il modello di generazione e propagazione WWIII al largo di Napoli	41.16°N 12.94°E	1979 2021
3	Rete Ondametrica Nazionale (RON). Boa di Ponza	Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica di Ponza (RON 1.0-2.0)	40.86°N 12.85°E	1989 2007

Tabella 2-1 – Fonti considerate per lo studio meteomarino

In Figura 2-1 è riportata l'ubicazione del punto 3561 di cui alla serie di dati del DICCA sopra descritta. La figura mette in evidenza il punto scelto assieme ai diversi punti limitrofi di discretizzazione spaziale per i quali sono fornite le serie storiche ricostruite. Il punto 3561 è stato scelto per la sua posizione ottimale e la sua rappresentatività delle condizioni "al largo" del Golfo di Napoli.

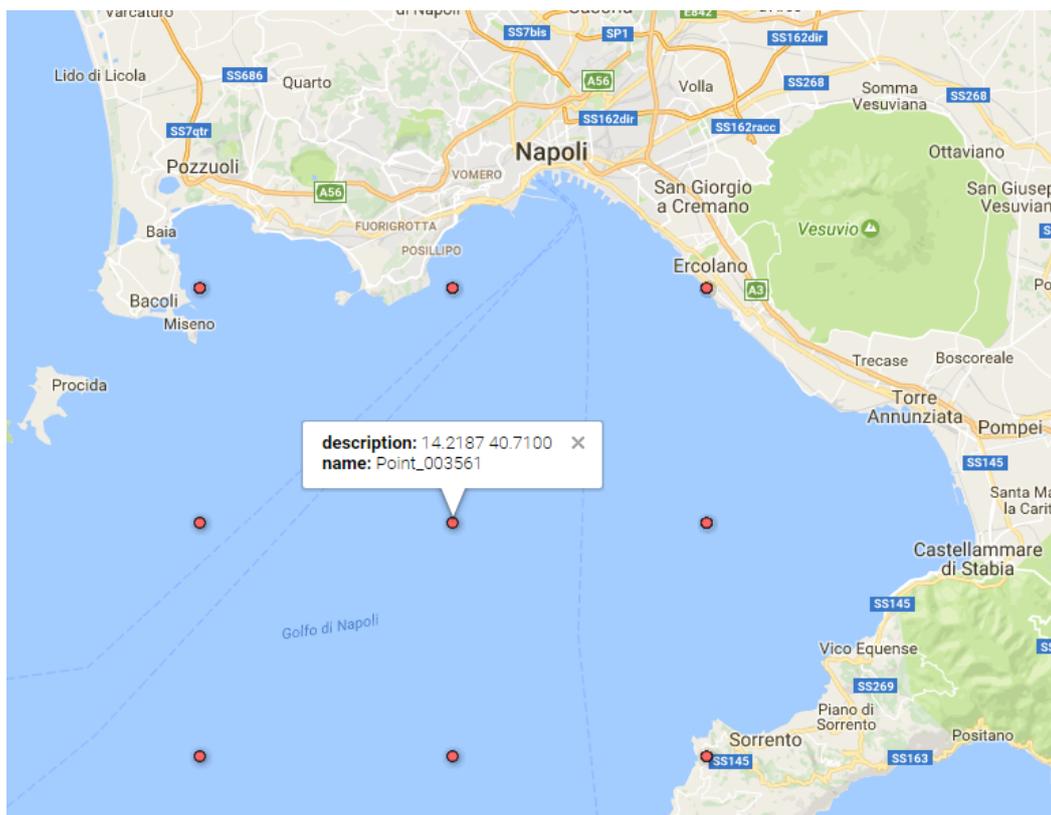


Figura 2-1 – Punto della rete MeteOcean dal DICCA, Università di Genova.

In Figura 2-2 è riportata la localizzazione della stazione ondametrica di Ponza e del punto di ricostruzione DICCA considerati nel presente studio.

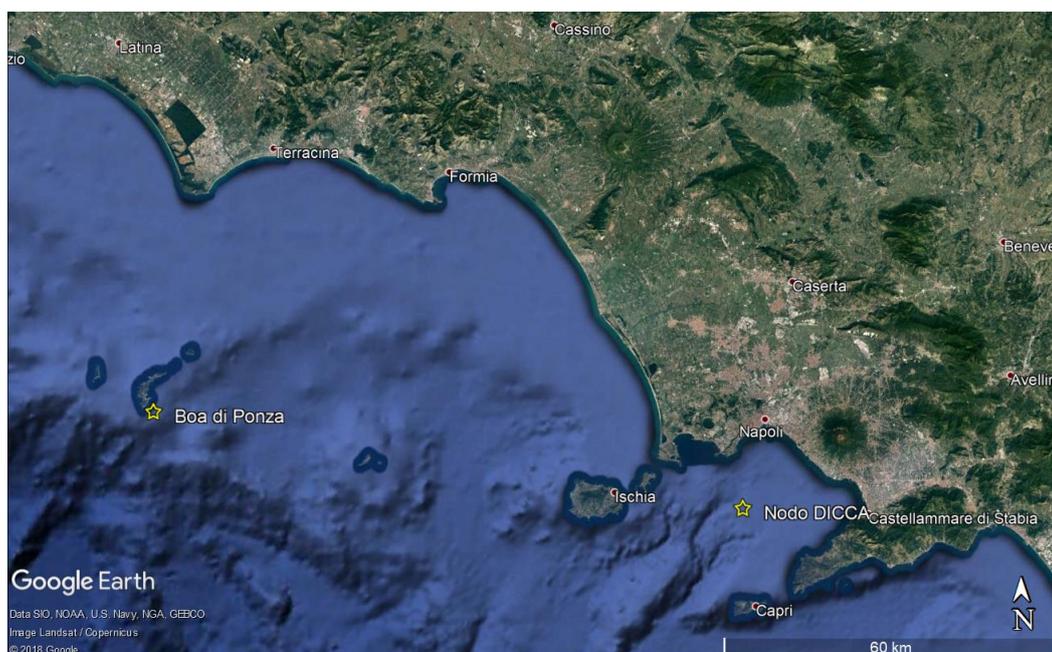


Figura 2-2 – Localizzazione della stazione ondametrica RON di Ponza e del punto di ricostruzione DICCA.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

Precedentemente alla disponibilità dei dati del DICCA, la boa di Ponza è stata sovente utilizzata per valutare le condizioni di moto ondoso in diversi paraggi della zona costiera del Tirreno Centrale e Meridionale, utilizzando modelli concettuali di trasposizione, stimolati dalla necessità di calibrare i modelli di previsione del moto ondoso in zone con fetch molto diversi ma omogenei dal punto di vista meteorologico. Tuttavia, la brevità della serie storica e il rendimento non elevato della stazione hanno sempre costituito una limitazione concettuale per la ricostruzione statistica delle serie trasposte, specialmente degli eventi estremi (vedi descrizione dello stato di mare a Ponza riportata nel paragrafo 6).

Si è ritenuto pertanto più rappresentativo il clima di moto ondoso ricostruito al largo del paraggio in base alla serie storica del DICCA nel punto di coordinate 40.71°N - 14.2187°E, poiché consente di disporre di una serie di dati di moto ondoso avente 42 anni di durata con un rendimento costante e non affetto dalle metodiche di trasposizione, che seppur consolidate non possono preferirsi ai dati “locali”.

Si è quindi proceduto alla valutazione del regime di moto ondoso al largo del Porto di Napoli ed alla valutazione della legge di distribuzione dei valori estremi di moto ondoso sulla base dell’analisi statistica delle altezze d’onda al colmo delle mareggiate estratte dalla serie storica del DICCA, in funzione dei settori di traversia che caratterizzano il paraggio, applicando la metodologia proposta da Goda (1988).

Si mette in evidenza che la serie storica così ricostruita sarà comunque oggetto di opportuna validazione con i dati ondametrici *nel* golfo di Napoli che sono in corso di acquisizione (dati della boa ondametrica dell’Università degli Studi della Campania), appena questi ultimi saranno disponibili. Il confronto sarà poi incluso in un opportuno aggiornamento del presente Studio Meteomarino. Contestualmente al fine di verificare la serie storica dei dati del DICCA, si è proceduto a confrontare i dati della boa di Ponza con il punto della serie DICCA più prossimo alla posizione della boa.

Per l’analisi dei livelli di marea astronomica e meteorologica si è fatto riferimento alla stazione idrometrica ubicata nel Porto di Napoli della Rete Mareografica Nazionale dell’ISPRA, la cui ubicazione nel porto è riportata nella seguente Figura 2-3.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

La serie di dati disponibili copre il periodo da ottobre 2010 a giugno 2022.

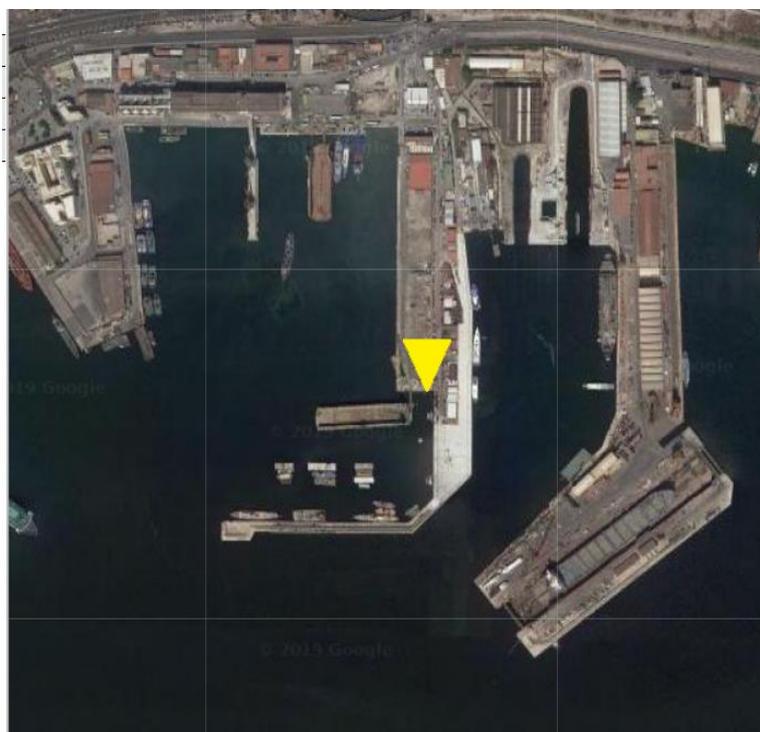


Figura 2-3 – Ubicazione del mareografo di Napoli dell'ISPRA all'interno del Porto di Napoli - presso il molo Carmine.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

3. Inquadramento geografico

Il porto di Napoli è ubicato nell'omonima baia, rappresentata in Figura 3-1. Compreso tra il monte di Procida e la penisola sorrentina, risulta geograficamente esposto agli eventi meteomarini (moto ondoso e vento) provenienti dal II° e III° quadrante.

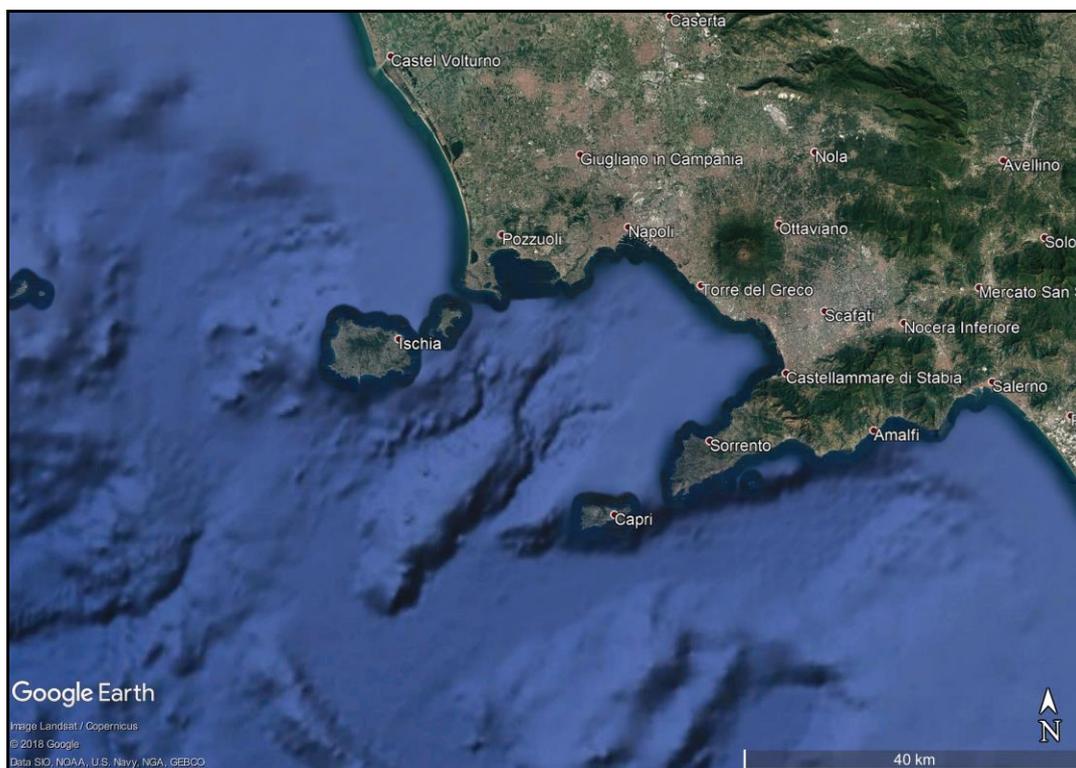


Figura 3-1 – Inquadramento geografico Baia di Napoli

4. Fetch geografico ed efficace

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

In Figura 4-1 è mostrato il fetch geografico (tracciato con passo angolare di 1°) per il punto di coordinate 40.71°N, 14.2187°E, posizionato all'interno della baia di Napoli ad una distanza di circa 8 miglia nautiche dal porto di Napoli.

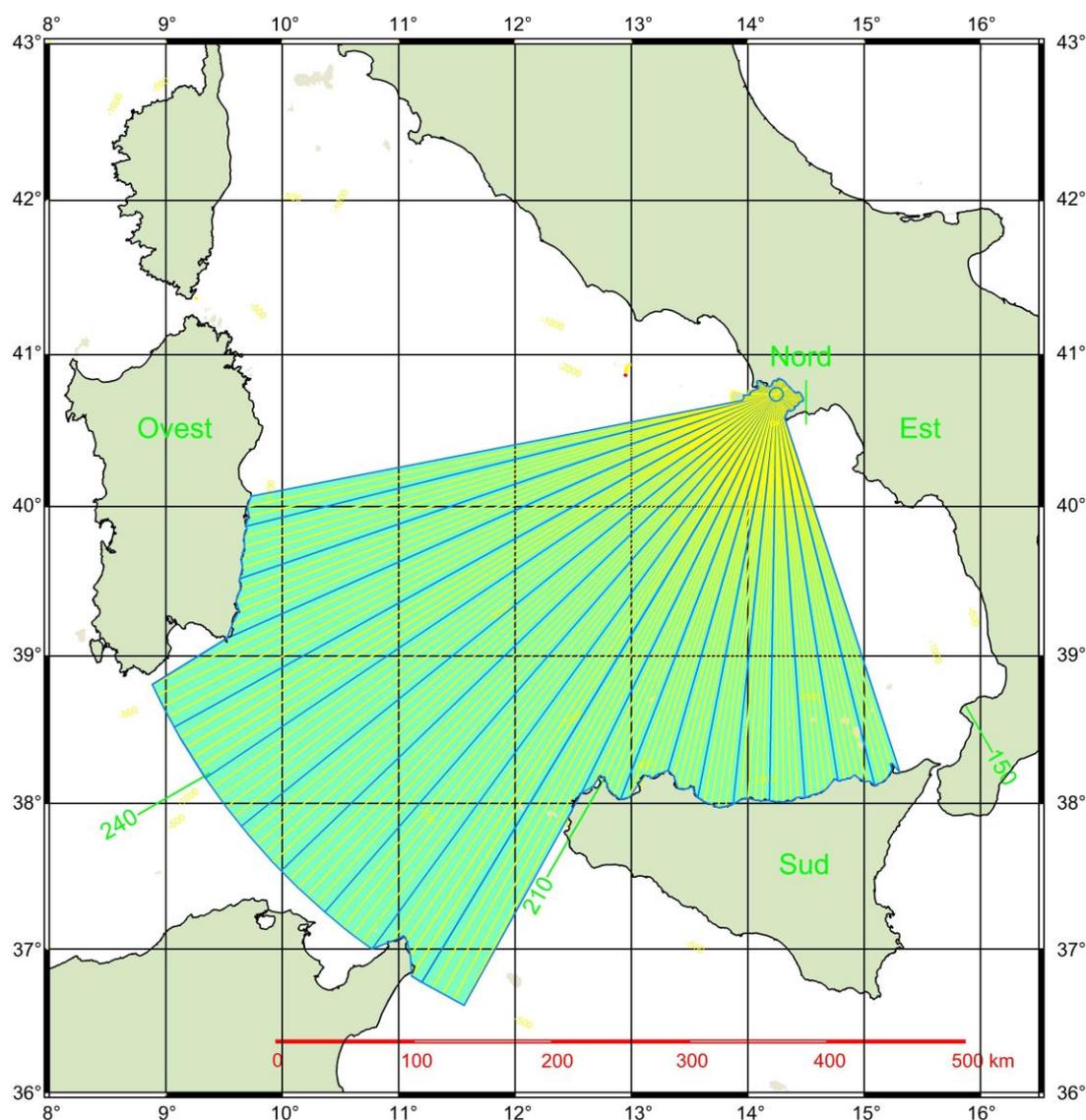


Figura 4-1 - Fetch geografici della Baia di Napoli.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarinario. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

Il paraggio risulta esposto al mare aperto per il settore di traversia compreso tra le direzioni 160°N e 259°N. Il fetch geografico a Sud (160°N e 206°N) risulta limitato dalla costa tirrenica della Sicilia settentrionale, con un'estensione di circa 300 km. Tra Ovest-SudOvest ed Ovest il fetch è delimitato dalla costa orientale della Sardegna con un'estensione di circa 400 km.

All'interno del settore compreso tra 210°N e 250°N il fetch risulta non limitato geograficamente, pertanto la sua estensione è stata limitata a 500 km, in considerazione della massima estensione che hanno le perturbazioni cicloniche che usualmente si generano nel bacino del Mar Mediterraneo.

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

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

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

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

$F_{e,w}$: lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕ_w ;

F_i : lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima ϕ_i ;

ϕ_w : direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso;

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

- θ ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = \pm 45^\circ$ mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = \pm 90^\circ$);
- n termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n = 4$).

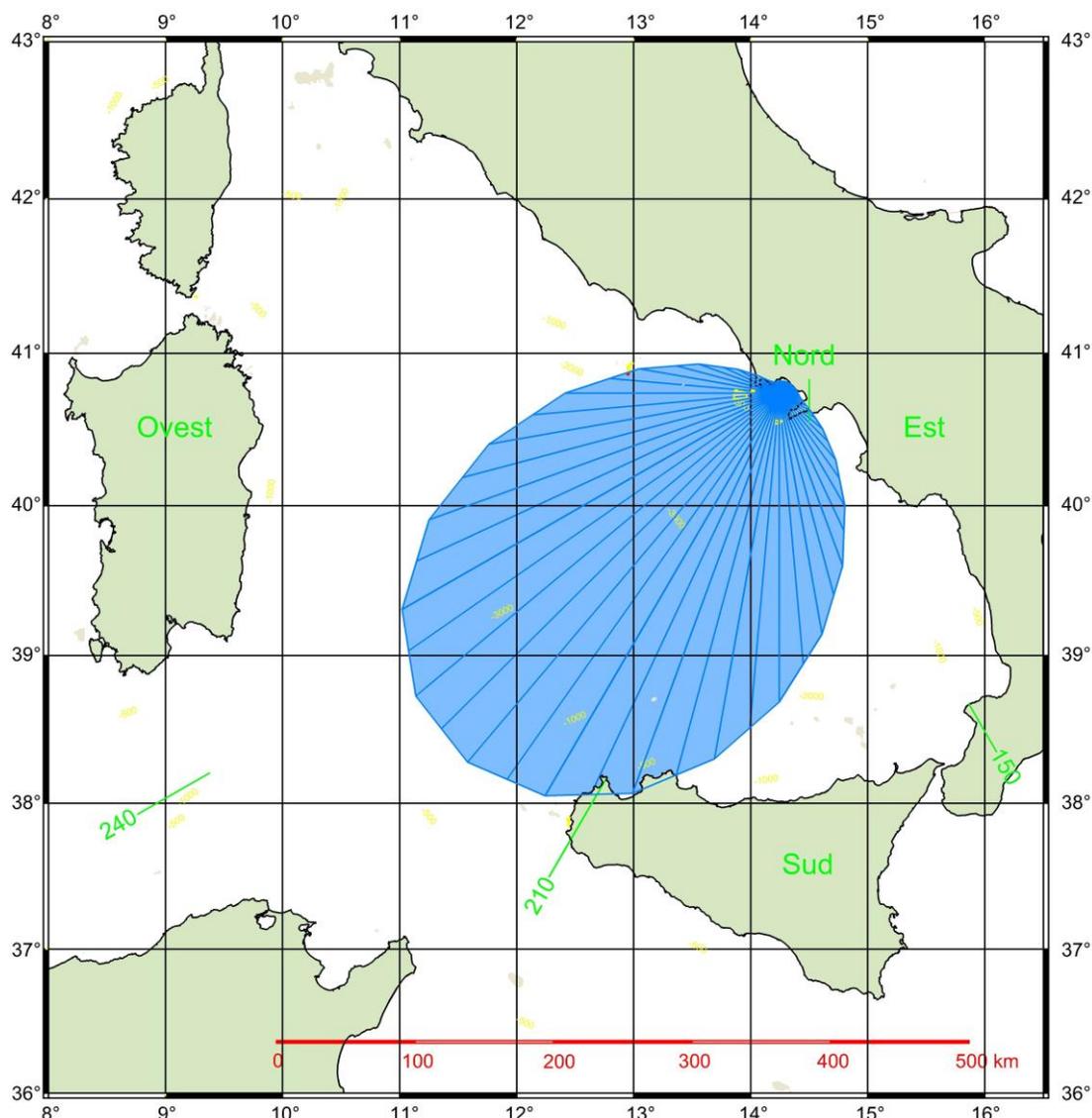


Figura 4-2 – Fetch efficaci della Baia di Napoli.

L'espressione di $F_{e,w}$ deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e dai successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991). Il calcolo del fetch efficace è

stato eseguito utilizzando l'applicativo ENIF (sviluppato dalla Modimar s.r.l.), che risolve la precedente equazione.

I risultati dell'elaborazione sono riportati graficamente nel diagramma polare di Figura 4-2. La Figura 4-3 mostra il confronto fra i fetch geografici e quelli efficaci, mentre la Figura 4-4 mostra l'andamento della direzione del vento e quella del moto ondoso da esso generato, in valore assoluto e differenziale. L'esame della Figura 4-3 e della Figura 4-4 mostra che gli eventi di vento di compresi fra 120° e 170° così come gli eventi fra 270° e 300° Nord abbiano potenziale di generare moto ondoso pur se significativamente schermati geograficamente, ricevendo energia dalle direzioni contigue: la significativa maggiore deviazione angolare vento-moto ondoso di Figura 4-4 per tali intervalli lo conferma. Di contro la dispersione energetica direzionale su ampi fetch geografici, così come previsto dai citati autori, attenua gli eventi con direzione del vento compresa fra 170° e 270° .

In figura 5.3 e 5.4 sono riportati comparativamente i valori dell'estensione dei fetch geografici ed efficaci di cui alle figure precedenti, in funzione della direzione. Le colonne evidenziate con la scala dei blu fanno riferimento al fetch geografico. La massima estensione di questo appartiene all'intervallo $200^\circ\text{N} - 250^\circ\text{N}$ (pari a circa 500 km). Le colonne evidenziate dalla scala di rosa fanno riferimento al calcolo del fetch efficace. La massima estensione è relativa all'intervallo $210^\circ\text{N} - 230^\circ\text{N}$ (attorno a circa 330 Km). L'applicazione del modello numerico ha consentito inoltre di definire la legge di deviazione tra la direzione media del vento e la direzione del moto ondoso generato.

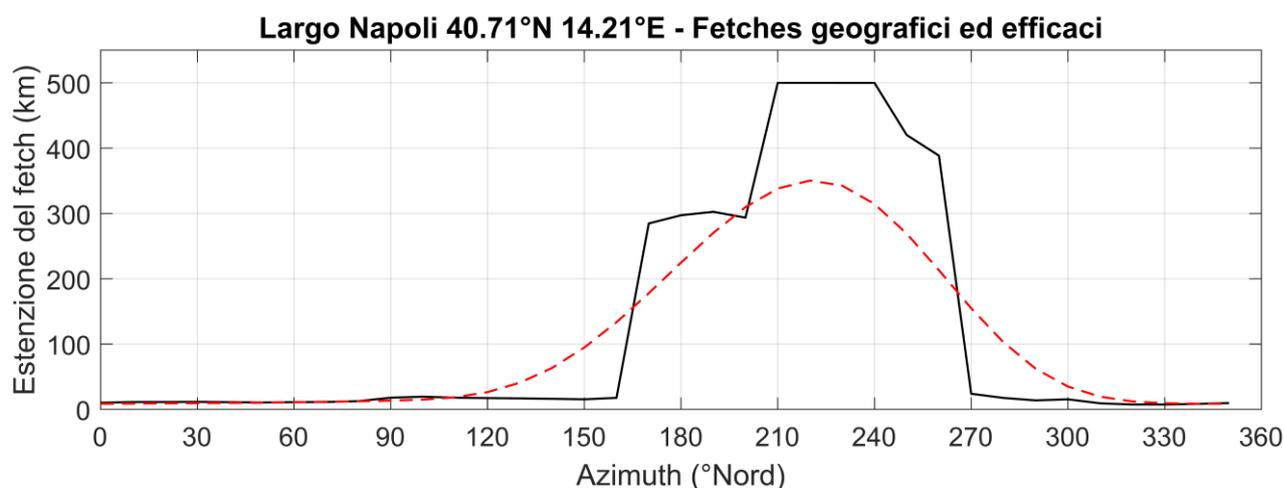


Figura 4-3 – confronto fra Fetch geografici (linea nera continua) ed efficaci (linea rossa tratteggiata).

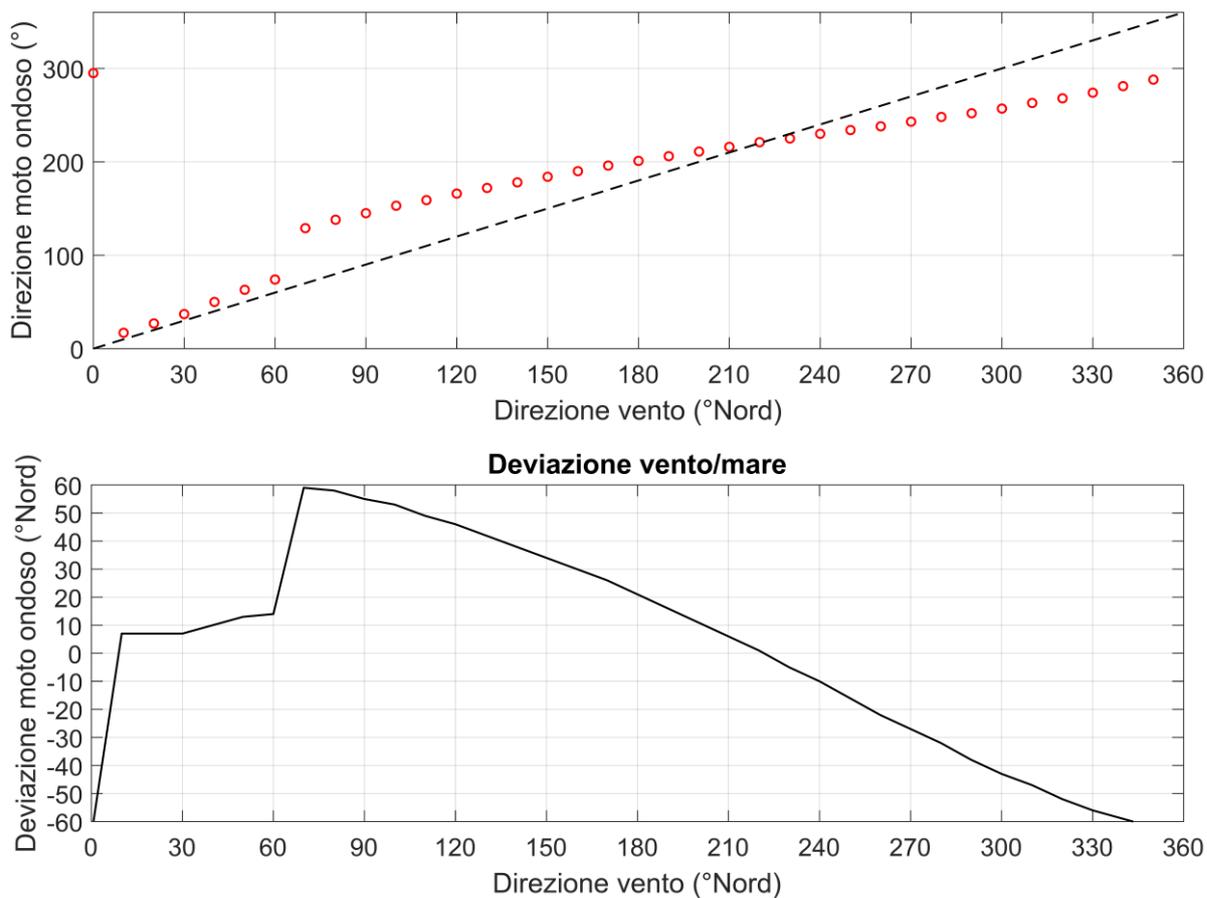


Figura 4-4 – Deviazione fra direzione del vento (linea nera tratteggiata) e direzione del moto ondoso generato (simboli circolari rossi vuoti).

Tabella 4-1 Fetch geografici, efficaci e deviazione direzione vento/mare al largo di Napoli nel punto di coordinate 40.71°N - 14.2187°E.

Azimuth	Fetch Geografico	Fetch Efficace	Deviazione vento/mare	Azimuth	Fetch Geografico	Fetch Efficace	Deviazione vento/mare
(°N)	(km)	(km)	(gradi)	(°N)	(km)	(km)	(gradi)
0	8.7	-65.0	10.2	180	297.3	224.6	21.0
10	8.9	7.0	11.3	190	302.6	270.1	16.0
20	9.3	7.0	11.3	200	293.6	309.7	11.0
30	9.6	7.0	11.5	210	500.0	338.2	6.0
40	9.9	10.0	11.1	220	500.0	350.3	1.0
50	10.3	13.0	10.6	230	500.0	342.6	-5.0
60	10.9	14.0	11.1	240	500.0	314.5	-10.0
70	11.6	59.0	11.3	250	420.1	269.1	-16.0
80	12.5	58.0	12.6	260	388.4	213.0	-22.0
90	13.4	55.0	17.9	270	23.9	154.8	-27.0
100	15.0	53.0	19.5	280	17.6	102.7	-32.0
110	18.6	49.0	17.9	290	13.8	62.2	-38.0
120	26.4	46.0	17.3	300	15.4	35.0	-43.0
130	40.8	42.0	16.8	310	9.3	19.4	-47.0
140	63.4	38.0	16.2	320	7.5	12.2	-52.0
150	94.6	34.0	15.4	330	7.5	9.5	-56.0
160	133.5	30.0	17.7	340	8.4	8.7	-59.0
170	177.8	26.0	284.7	350	9.7	8.5	-62.0

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

5. Regime dei venti al largo di Napoli sulla base dei dati DICCA

Per la definizione del regime dei venti che caratterizzano il golfo ed il porto di Napoli sono stati presi in considerazione i dati di vento orari, alla quota +10 m sul l.m.m., ricostruiti al largo di Napoli dal DICCA i quali coprono il periodo storico 1979-2021.

La serie storica dei dati di vento del DICCA ricostruita al largo di Napoli è stata suddivisa per classi di direzione e velocità del vento (Tabella 5-1). In termini di frequenza di accadimento (Tabella 5-2) i venti regnanti (più frequenti) provengono dai settori di libeccio (210°N – 240°N) e da levante (75°N – 105°N) con una frequenza complessiva rispettivamente pari a 19.37% e 16.82%.

Le calme (stati di vento con velocità inferiore a 2 m/s) di scarso interesse ai fini della generazione del moto ondoso, si verificano con frequenza pari al 12.47%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiore a 16 m/s, si verificano in media poche ore all'anno e provengono prevalentemente dal settore di Libeccio. In misura minore si possono verificare venti intensi dai settori di Ponente.

L'esame della distribuzione stagionale dei venti (Figura 5-1) rivela una congruenza tra il regime dei venti estivi ed invernali, contraddistinti da una marcata prevalenza di venti da Libeccio con velocità generalmente inferiore a 10m/s.

Tabella 5-1 – Suddivisione dei dati di vento del DICCA ricostruiti al largo di Napoli (1979-2021)

Direzione di provenienza °N	Classi di velocità del vento												Tot	
	calme	1.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00		> 20.00
10	366	1004	2671	1749	1030	682	351	177	79	8	2			8119
20	316	974	2738	1606	1037	644	415	167	61	13	7	2		7978
30	353	944	2635	1671	1054	668	397	216	74	36	8	2		8056
40	352	989	2823	1826	1178	724	508	230	96	29	11	1		8766
50	307	899	3001	2071	1220	778	557	247	95	29	11			9215
60	369	1007	3106	2665	1444	880	575	313	104	27	4	1		10494
70	349	977	3465	3082	1876	991	614	365	131	41	14	2		11905
80	354	1025	3345	3739	2587	1240	823	450	183	69	20	4		13835
90	312	1012	3297	3964	3229	1567	950	538	194	56	9	4		15128
100	334	931	3086	3893	3388	1745	885	402	129	47	12	6		14852
110	319	958	2906	3547	3035	1446	693	282	115	31	9	3		13341
120	334	888	2749	3090	2406	1176	469	232	103	23	8	7		11478
130	317	956	2540	2480	1930	815	317	139	56	19	6	5		9575
140	286	876	2221	1915	1282	418	154	95	27	10	4	2		7288
150	300	916	2028	1408	794	242	107	47	17	4	2			5865
160	301	887	1797	1093	574	242	147	54	13	3				5111
170	296	926	1683	1039	555	342	255	89	30	4				5219
180	308	897	1720	1014	676	487	306	113	16		1			5538
190	275	874	1854	1156	947	675	452	177	51	9	1			6471
200	305	1003	2252	1605	1442	1125	704	347	148	45	20	5		8996
210	299	1030	2585	2481	2478	1890	1298	702	350	172	85	27		13370
220	347	1167	3221	3611	3642	2867	1983	1016	456	197	79	29		18586
230	299	1196	3445	3884	3908	3294	2043	893	317	122	52	5		19453
240	342	1164	3388	3422	3350	2306	1213	500	150	23	22	5		15880
250	325	1150	3062	2698	2150	1144	453	165	33	3	6	4		11189
260	325	1088	2589	1984	1085	538	197	81	20	2	2			7911
270	353	1096	2445	1713	910	414	205	85	24	5				7250
280	333	1062	2473	1764	1124	550	262	91	32	16				7707
290	345	1023	2544	2098	1583	566	236	85	12	2	2			8496
300	337	1118	2695	2765	2357	944	314	117	23	6				10676
310	346	1026	3103	3460	2974	1544	628	260	115	35	4			13495
320	315	1034	3363	3716	2934	1742	997	488	190	78	23	10		14880
330	338	1073	3428	3068	2230	1315	802	397	147	47	15	5		12860
340	332	985	3100	2494	1727	939	516	212	51	13	2	4		10371
350	329	991	2880	1970	1350	706	385	164	40	7				8822
360	711	1009	2765	1824	1123	643	320	158	60	15	2			8630
N° eventi	12129	36155	99003	87565	66609	38289	21531	10094	3742	1246	443	133		376806

Tabella 5-2 – Frequenza di accadimento dei venti ricostruiti al largo di Napoli dal DICCA (periodo 1979-2021)

Direzione di provenienza *N	Classi di velocità del vento													Tot	> 2.00
	calme	1.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	> 20.00		
10	0.097	0.266	0.709	0.464	0.273	0.181	0.093	0.047	0.021	0.002	0.001			2.154	1.790
20	0.084	0.258	0.726	0.426	0.275	0.171	0.110	0.044	0.016	0.003	0.002	0.001		2.117	1.775
30	0.094	0.250	0.699	0.443	0.280	0.177	0.105	0.057	0.020	0.010	0.002	0.001		2.138	1.794
40	0.093	0.262	0.749	0.484	0.313	0.192	0.135	0.061	0.025	0.008	0.003	0.000		2.326	1.970
50	0.081	0.239	0.796	0.549	0.324	0.206	0.148	0.066	0.025	0.008	0.003			2.445	2.125
60	0.098	0.267	0.824	0.707	0.383	0.233	0.153	0.083	0.028	0.007	0.001	0.000		2.784	2.419
70	0.093	0.259	0.919	0.818	0.498	0.263	0.163	0.097	0.035	0.011	0.004	0.001		3.159	2.807
80	0.094	0.272	0.887	0.992	0.686	0.329	0.218	0.119	0.049	0.018	0.005	0.001		3.671	3.306
90	0.083	0.268	0.875	1.052	0.857	0.416	0.252	0.143	0.051	0.015	0.002	0.001		4.014	3.663
100	0.089	0.247	0.819	1.033	0.899	0.463	0.235	0.107	0.034	0.012	0.003	0.002		3.942	3.606
110	0.085	0.254	0.771	0.941	0.805	0.384	0.184	0.075	0.031	0.008	0.002	0.001		3.540	3.201
120	0.089	0.236	0.729	0.820	0.638	0.312	0.124	0.062	0.027	0.006	0.002	0.002		3.047	2.723
130	0.084	0.254	0.674	0.658	0.512	0.216	0.084	0.037	0.015	0.005	0.002	0.001		2.542	2.204
140	0.076	0.232	0.589	0.508	0.340	0.111	0.041	0.025	0.007	0.003	0.001	0.001		1.934	1.626
150	0.080	0.243	0.538	0.374	0.211	0.064	0.028	0.012	0.005	0.001	0.001			1.556	1.233
160	0.080	0.235	0.477	0.290	0.152	0.064	0.039	0.014	0.003	0.001				1.356	1.041
170	0.079	0.246	0.446	0.276	0.147	0.091	0.068	0.024	0.008	0.001				1.385	1.060
180	0.082	0.238	0.456	0.269	0.179	0.129	0.081	0.030	0.004		0.000			1.469	1.150
190	0.073	0.232	0.492	0.307	0.251	0.179	0.120	0.047	0.014	0.002	0.000			1.717	1.412
200	0.081	0.266	0.597	0.426	0.383	0.298	0.187	0.092	0.039	0.012	0.005	0.001		2.388	2.041
210	0.079	0.273	0.686	0.658	0.657	0.501	0.344	0.186	0.093	0.046	0.023	0.007		3.554	3.202
220	0.092	0.310	0.855	0.958	0.966	0.761	0.526	0.270	0.121	0.052	0.021	0.008		4.938	4.537
230	0.079	0.317	0.914	1.030	1.037	0.874	0.542	0.237	0.084	0.032	0.014	0.001		5.162	4.765
240	0.091	0.309	0.899	0.908	0.889	0.612	0.322	0.133	0.040	0.006	0.006	0.001		4.214	3.815
250	0.086	0.305	0.812	0.716	0.570	0.303	0.120	0.044	0.009	0.001	0.002	0.001		2.969	2.578
260	0.086	0.289	0.687	0.526	0.288	0.143	0.052	0.021	0.005	0.001	0.001			2.099	1.724
270	0.094	0.291	0.649	0.454	0.241	0.110	0.054	0.023	0.006	0.001				1.923	1.539
280	0.088	0.282	0.656	0.468	0.298	0.146	0.070	0.024	0.008	0.004				2.045	1.675
290	0.092	0.271	0.675	0.557	0.420	0.150	0.063	0.023	0.003	0.001	0.001			2.254	1.891
300	0.089	0.297	0.715	0.734	0.625	0.250	0.083	0.031	0.006	0.002				2.832	2.446
310	0.092	0.272	0.823	0.918	0.789	0.410	0.167	0.069	0.031	0.009	0.001			3.580	3.216
320	0.084	0.274	0.892	0.986	0.778	0.462	0.264	0.129	0.050	0.021	0.006	0.003		3.950	3.592
330	0.090	0.285	0.909	0.814	0.592	0.349	0.213	0.105	0.039	0.012	0.004	0.001		3.413	3.039
340	0.088	0.261	0.822	0.662	0.458	0.249	0.137	0.056	0.014	0.003	0.001	0.001		2.752	2.403
350	0.087	0.263	0.764	0.523	0.358	0.187	0.102	0.044	0.011	0.002				2.340	1.990
360	0.189	0.268	0.734	0.484	0.298	0.171	0.085	0.042	0.016	0.004	0.001			2.289	1.833
Freq(%)	3.218	9.592	26.265	23.231	17.671	10.158	5.712	2.678	0.993	0.331	0.118	0.035		100	87.191
Freq cumulate		12.809	39.074	62.305	79.976	90.134	95.846	98.524	99.517	99.847	99.965	100			

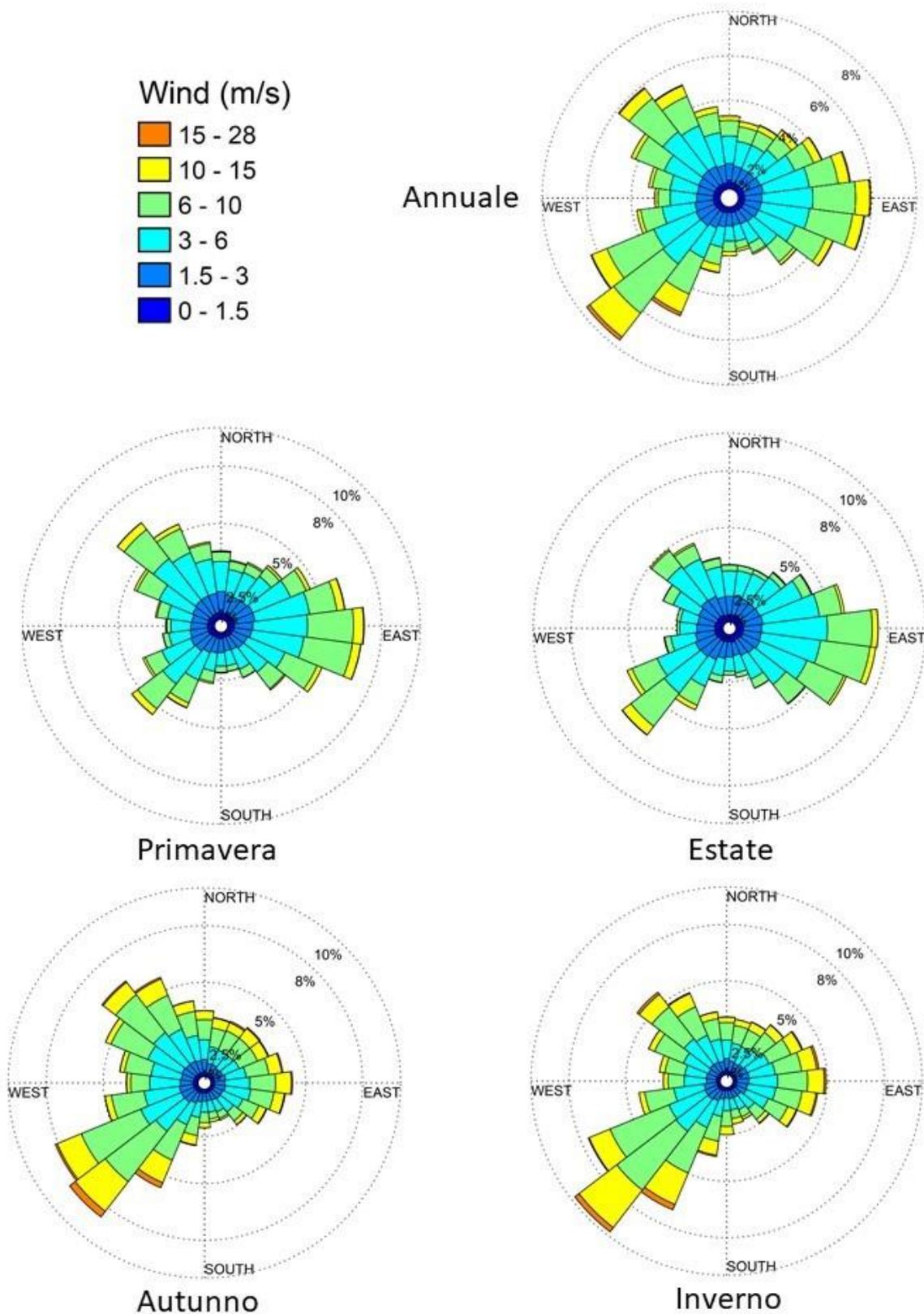


Figura 5-1 – Rose dei venti annuale (in alto a destra) e stagionali (riportate in basso) riferite al periodo 1979-2021.

6. Analisi delle registrazioni ondametriche della boa di Ponza

La stazione ondametrica di Ponza appartenente alla RON (Rete Ondametrica Nazionale gestita dall'ISPRA) ha iniziato ad operare nel luglio 1989.

Tra il 1989 ed il 2002 (RON 1.0) ha operato una boa a disco del tipo WAVEC della società olandese Datawell posizionata in corrispondenza delle coordinate 40.86°N, 12.95°E a Sud dell'Isola di Ponza su fondali di circa 100 m. Dal 2002, a seguito di un importante rinnovamento della rete di misura (RON 2.0), è stata adottata una boa ondametrica del tipo TRIAXYS, prodotta dalla società canadese AXYS, che ha operato fino a luglio del 2007.

Nel periodo indicato il rendimento complessivo dell'ondametro è risultato pari al 82.6%, ma come si evince dal rendimento annuale riportato in Figura 6-1, nel periodo 2005 – 2007 l'ondametro ha avuto diversi periodi di inattività con rendimenti molto bassi.

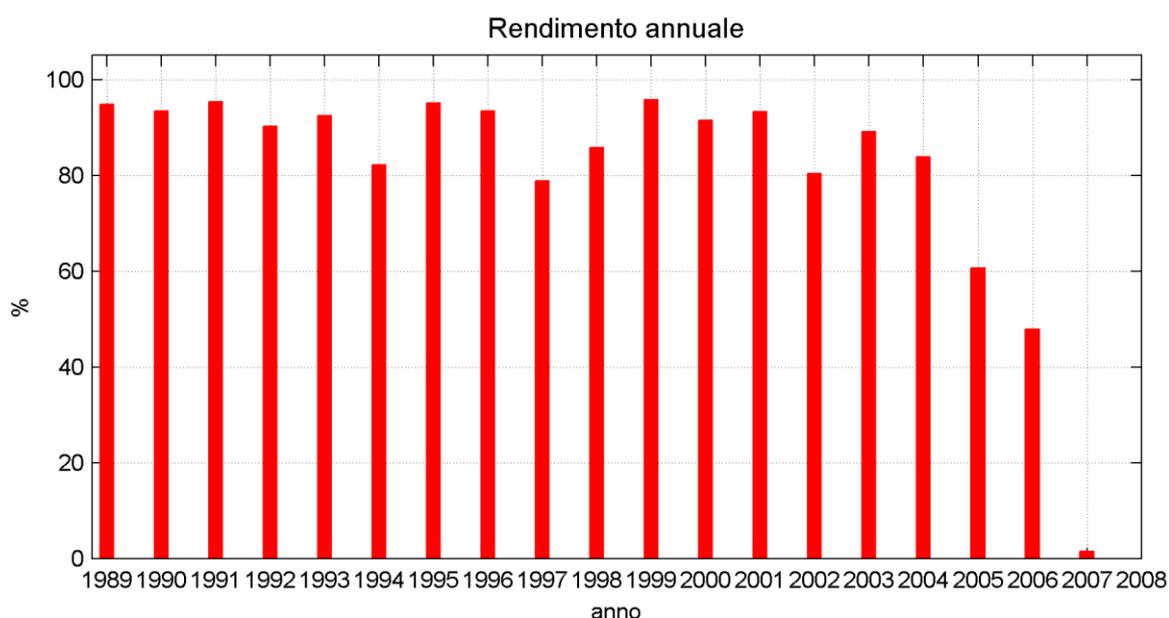


Figura 6-1 – Rendimento della boa ondametrica RON di Ponza – luglio 1989 – luglio 2007

A fine 2009 la rete ondametrica è stata rinnovata (RON 3.0) con l'adozione di boe meteo-ondametriche del tipo WatchKeeper, prodotte dalla società canadese AXYS. La boa di Ponza ha ripreso ad operare da fine dicembre 2009 fino ad agosto 2014 ma con un rendimento scarso e con ripetuti malfunzionamenti.

Pertanto nel presente studio sono state prese in considerazione le misure di moto ondoso (H_s , T_p , T_m , Dir) registrate con cadenza trioraria dalla boa di Ponza tra il luglio 1989 e giugno 2005.

In Figura 6-2 è rappresentata la distribuzione direzionale e la frequenza di accadimento degli stati di mare con $H_s > 0.5$ m registrati dall'ondametro.

Gli eventi di moto ondoso prevalenti provengono da Ponente e in misura minore da Libeccio e da Levante.

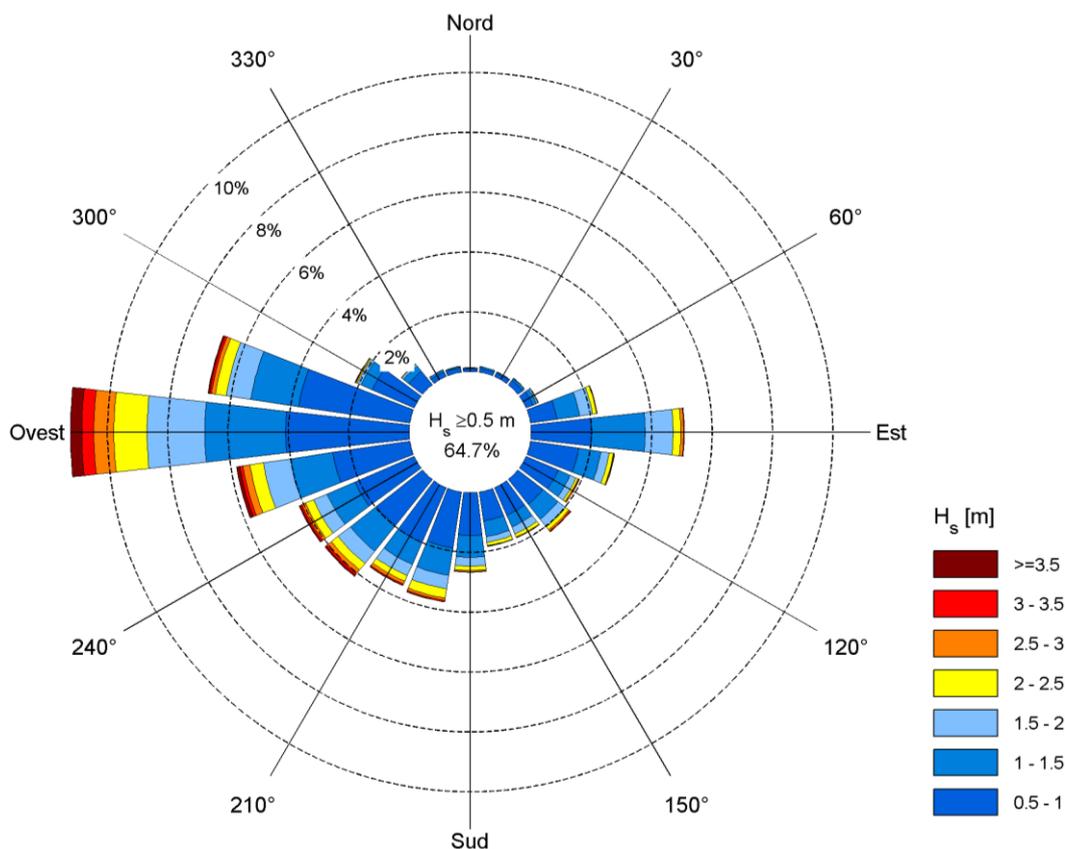


Figura 6-2 – frequenza di accadimento direzionale degli stati di moto ondoso con $H_s > 0.5$ m registrati dalla boa di Ponza (luglio 1989-giugno 2005).

Tenuto conto che la boa ondometrica di Ponza ricade nella stessa area di generazione delle onde che appartengono al largo al settore di traversia principale del sito di interesse, si è deciso di determinare la necessità o meno di effettuare una calibrazione dei dati del DICCA per il sito in esame, effettuando un confronto tra i dati del DICCA e i dati misurati dalla boa ondometrica di Ponza. Il punto DICCA selezionato è riportato in Tabella 2-1.

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

Il primo confronto, di seguito indicato come “confronto sincrono”, fornisce delle indicazioni sull'errore che viene mediamente commesso con la tecnica di ricostruzione

del moto ondoso in rianalisi. La seconda metodologia di confronto, di seguito indicata “confronto asincrono”, è di interesse per valutare l'eventuale necessità di calibrare i valori di H_s raggiunti al culmine delle singole mareggiate necessari per analizzare gli stati di mare estremi e quindi per definire la correlazione H_s – tempo di ritorno.

Queste tecniche di confronto, sviluppate teoricamente da De Girolamo et al. (2017), si basano sul concetto che gli errori, tra le misure e i dati ricostruiti, valutati nello stesso istante, errori sincroni, risentono spesso di un errore legato alla tempistica (timing) con cui si sviluppa l'evento meteomarino. Tale errore può essere eliminato facendo ricorso al confronto asincrono, ovvero confrontando i valori di H_s 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.

6.1 Confronto degli eventi sincroni al largo del promontorio di Ponza

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

I risultati del confronto sincrono, mostrati nel grafico di destra della Figura 6-3, evidenziano che mediamente i dati ricostruiti dal DICCA tendono a sottostimare leggermente i dati misurati.

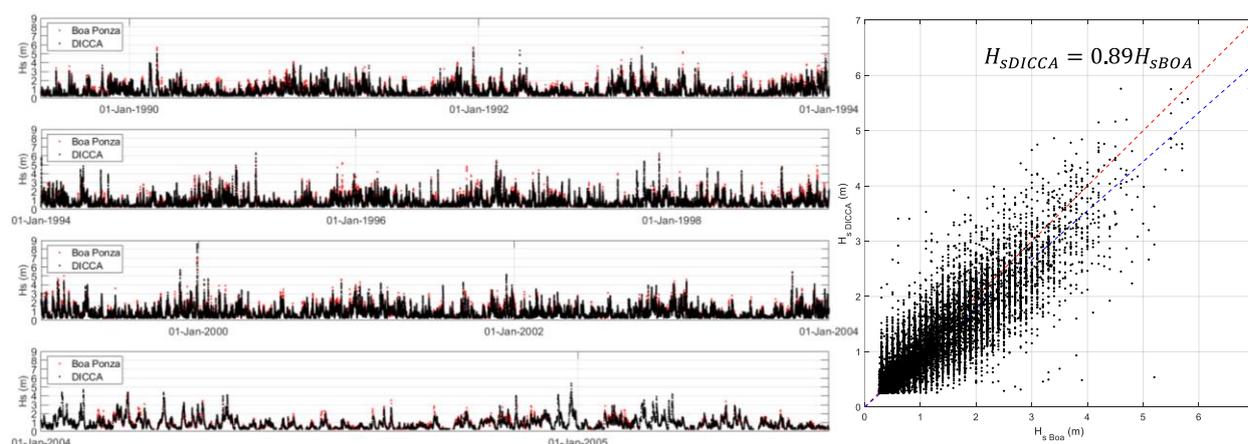


Figura 6-3 confronto dei dati di moto ondoso ricostruita dal DICCA con i dati sincroni registrati dalla boa ondometrica di Ponza per il periodo 1989-2007.

6.2 Confronto degli eventi estremi asincroni al largo di Ponza

Nei grafici polari di Figura 6-4 sono riportati i valori di H_s 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 ondometrica di Ponza (grafico polare di sinistra) e dalla serie di dati di moto ondoso DICCA (grafico polare 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:

- altezza d'onda H_s sopra la soglia di $H_s \geq 1.0$ m per più di 12 ore;
- altezza d'onda H_s al colmo superiore alla soglia $H_s \geq 2.0$ 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.

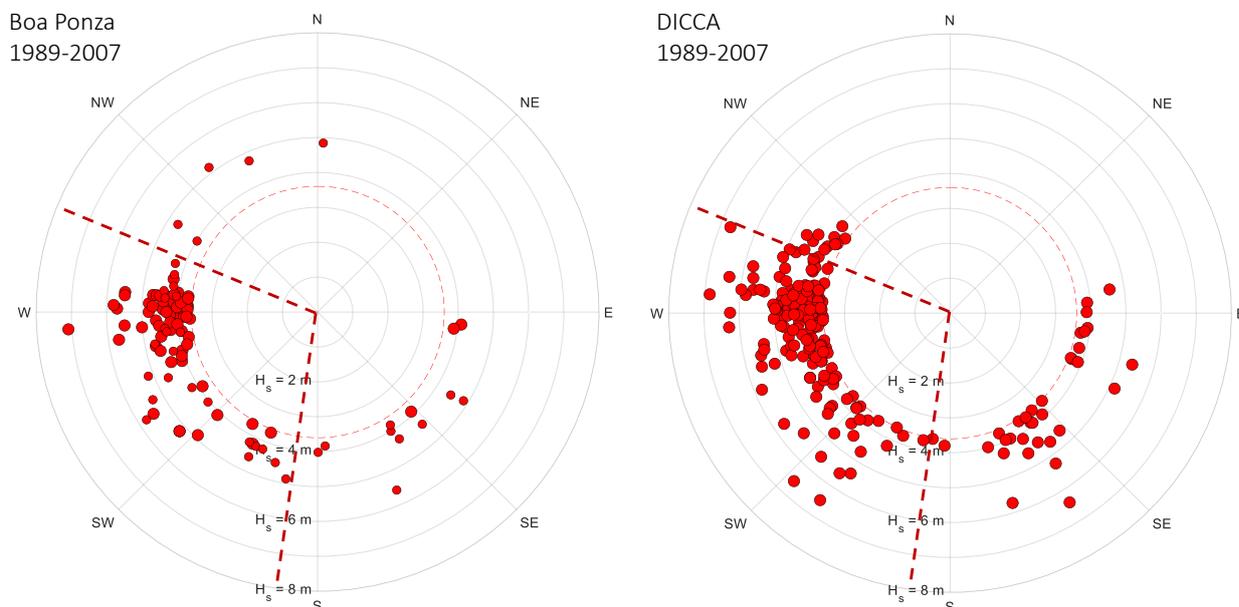


Figura 6-4 Distribuzione dei valori di altezza d'onda H_s al colmo delle mareggiate registrate dalla Boa di Ponza (sinistra) e ricostruita dal DICCA (destra) nel medesimo periodo.

Il campione delle mareggiate coesistenti è stato ulteriormente ristretto limitando il confronto agli eventi che presentano al loro culmine valori $H_s \geq 3.6$ m, ottenendo un totale di 74 eventi, ovvero circa 4 mareggiate per ogni anno in cui si è effettuato il confronto.

I grafici polari di Figura 6-4 mostrano che dal punto di vista direzionale i due set di dati risultano molto simili.

Nella Figura 6-5 gli stessi dati sono confrontati prendendo in esame solo i valori di H_s riportando in ordinata i valori del DICCA ed in ascissa i valori misurati dalla boa ondometrica. Il confronto mostra un andamento sostanzialmente identico tra i due campioni statistici e pertanto si è deciso di non applicare alcun coefficiente di calibrazione per la serie storica dei dati ricostruiti in prossimità del Porto di Napoli.

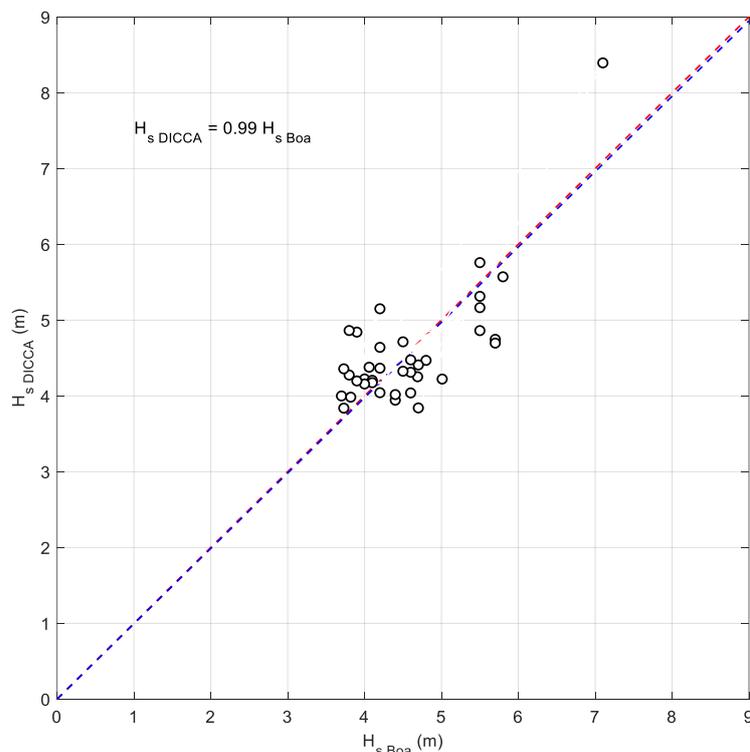


Figura 6-5 Confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate con $H_s > 3.6$ m registrati dalla boa di Ponza tra il 1989 e il 2007 e quelli ricostruiti dal DICCA in prossimità della boa.

7. Clima di moto ondoso al largo del porto di Napoli

In Figura 7-1 viene mostrata la rosa ondometrica annuale. Tale diagramma, ottenuto utilizzando i dati dell'intera serie storica del DICCA, mostra la presenza di due settori di traversia, rispettivamente:

- Settore principale compreso tra 195°N e 285°N
- Settore secondario compreso tra 150°N e 195°N

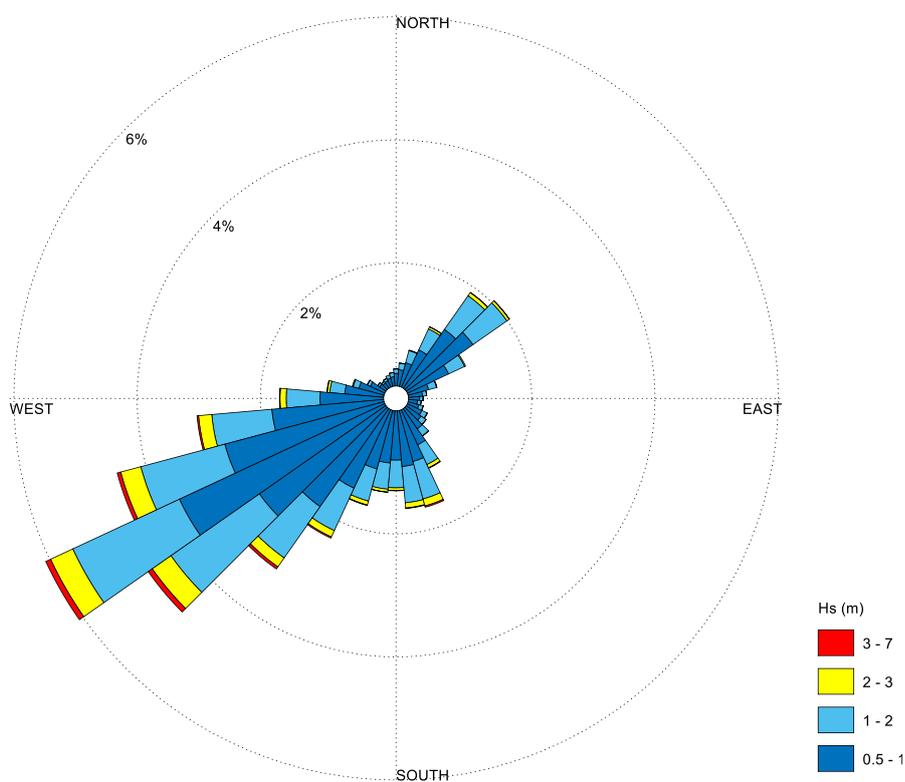


Figura 7-1 – Rosa ondometrica annuale. Dati del DICCA, intera serie storica (1979-2021).

La Tabella 7-2 riporta in forma numerica la rosa ondometrica climatica mostrata in Figura 7-1.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarinario. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

Direzione d'onda °N	Numero di eventi (H _s)														Tot
	Altezza d'onda (m)														
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	> 5.5		
10	292	650	1008	339	64	6									2359
20	444	990	1506	631	138	25	12								3746
30	583	1567	2521	1096	326	101	36	1							6231
40	712	2381	4406	1979	541	189	51	3							10262
50	817	2782	4994	2020	519	139	39	5							11315
60	757	2138	2795	897	183	50	14								6834
70	565	1332	1308	411	92	7	7	5							3727
80	471	929	869	203	45	5	2								2524
90	405	685	683	162	46	3	1								1985
100	434	623	556	178	52	3	0								1846
110	491	679	693	208	59	11	0								2141
120	749	1201	994	254	94	20	6								3318
130	1590	1777	1120	295	74	9	2								4867
140	2297	1802	1514	413	116	14	4								6160
150	2649	2029	2375	979	360	147	74	20	3	7					8643
160	3033	2400	3247	1564	815	331	113	45	22	10	3				11583
170	2880	2477	3434	1580	653	232	88	17	11	5					11377
180	2329	2321	3032	1271	428	134	31	11	2						9559
190	2229	2488	3229	1231	377	147	30	7	3	1					9742
200	2285	2928	3724	1469	572	179	70	18	6	8	1				11260
210	3317	4101	5328	2054	809	320	112	42	18	9	3	2			16115
220	6495	6668	7353	2769	1067	484	185	98	27	23	6	5			25180
230	8394	8062	9465	4628	1978	1000	402	175	76	40	4	2			34226
240	13757	12375	13899	5063	2136	1045	455	184	76	50	9	5			49054
250	13022	9860	10122	3581	1743	875	397	144	41	22	9	3			39819
260	11717	7517	6900	2510	1176	586	229	63	9	3	7	4	6		30727
270	8907	5358	3899	1441	633	253	126	22	3	7	1	1			20650
280	4729	3658	2405	651	270	118	35	15	7	2	1	1			11892
290	1973	2469	1597	274	96	26	9	8	1	2					6455
300	982	1535	978	142	59	20									3716
310	547	949	470	115	26	4									2111
320	323	629	375	103	28	5									1463
330	280	472	425	147	18	1									1343
340	239	447	508	193	20										1407
350	229	457	569	231	25	2									1513
360	259	483	778	248	19	2									1789
N° di eventi	101182	99219	109079	41330	15657	6493	2530	883	305	189	43	23	6		376939

Tabella 7-1 – Numero di eventi di moto ondoso al largo di Napoli suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione, ricostruiti dal DICCA. Periodo di riferimento 1979-2021.

Gli stati di mare più frequenti presentano generalmente altezza d'onda compresa tra 0.5 < H_s < 1.5 m. Le calme (stati di mare di altezza significativa H_s inferiore a 0.5 m) si verificano in media il 53% del tempo, circa 193 giorni/anno.

La suddivisione degli eventi per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 7-1) e le conseguenti frequenze di accadimento delle classi riportate in Tabella 7-2 rivelano che gli stati di moto ondoso più significativi (H_s maggiore di 0.5 m) si presentano da Libeccio (circa 57%) e da Scirocco (circa 13%) con una frequenza di accadimento complessiva pari al 69.8%. Dal settore di Libeccio si presentano inoltre gli eventi con altezza d'onda significativa più elevata. Molto meno frequenti risultano gli stati di mare da Grecale e da Maestrale, con valori di H_s generalmente inferiori a 2.5 – 3.0 m. Durante il corso dell'anno il regime di moto ondoso presenta poca variabilità.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarinario. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

Gli stati di mare caratterizzati da altezza superiore a 2 m si verificano in media 238 ore/anno. La persistenza degli stati di mare con $H_s > 3.0$ m si riduce a 34 ore/anno e circa 7 ore/anno per altezze d'onda ancora maggiori, cioè con $H_s > 4.0$ m.

Direzione d'onda °N	Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa														Tot
	Altezza d'onda (m)														
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 4.50	4.50 5.00	5.00 5.50	> 5.5		
10	0.077	0.172	0.267	0.090	0.017	0.002									0.626
20	0.118	0.263	0.400	0.167	0.037	0.007	0.003								0.994
30	0.155	0.416	0.669	0.291	0.086	0.027	0.010	0.000							1.653
40	0.189	0.632	1.169	0.525	0.144	0.050	0.014	0.001							2.722
50	0.217	0.738	1.325	0.536	0.138	0.037	0.010	0.001							3.002
60	0.201	0.567	0.741	0.238	0.049	0.013	0.004								1.813
70	0.150	0.353	0.347	0.109	0.024	0.002	0.002	0.001							0.989
80	0.125	0.246	0.231	0.054	0.012	0.001	0.001								0.670
90	0.107	0.182	0.181	0.043	0.012	0.001	0.000								0.527
100	0.115	0.165	0.148	0.047	0.014	0.001									0.490
110	0.130	0.180	0.184	0.055	0.016	0.003									0.568
120	0.199	0.319	0.264	0.067	0.025	0.005	0.002								0.880
130	0.422	0.471	0.297	0.078	0.020	0.002	0.001								1.291
140	0.609	0.478	0.402	0.110	0.031	0.004	0.001								1.634
150	0.703	0.538	0.630	0.260	0.096	0.039	0.020	0.005	0.001	0.002					2.293
160	0.805	0.637	0.861	0.415	0.216	0.088	0.030	0.012	0.006	0.003	0.001				3.073
170	0.764	0.657	0.911	0.419	0.173	0.062	0.023	0.005	0.003	0.001					3.018
180	0.618	0.616	0.804	0.337	0.114	0.036	0.008	0.003	0.001						2.536
190	0.591	0.660	0.857	0.327	0.100	0.039	0.008	0.002	0.001	0.000					2.585
200	0.606	0.777	0.988	0.390	0.152	0.047	0.019	0.005	0.002	0.002	0.000				2.987
210	0.880	1.088	1.413	0.545	0.215	0.085	0.030	0.011	0.005	0.002	0.001	0.001			4.275
220	1.723	1.769	1.951	0.735	0.283	0.128	0.049	0.026	0.007	0.006	0.002	0.001			6.680
230	2.227	2.139	2.511	1.228	0.525	0.265	0.107	0.046	0.020	0.011	0.001	0.001			9.080
240	3.650	3.283	3.687	1.343	0.567	0.277	0.121	0.049	0.020	0.013	0.002	0.001			13.014
250	3.455	2.616	2.685	0.950	0.462	0.232	0.105	0.038	0.011	0.006	0.002	0.001			10.564
260	3.108	1.994	1.831	0.666	0.312	0.155	0.061	0.017	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002		8.152
270	2.363	1.421	1.034	0.382	0.168	0.067	0.033	0.006	0.001	0.002		0.000			5.478
280	1.255	0.970	0.638	0.173	0.072	0.031	0.009	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000			3.155
290	0.523	0.655	0.424	0.073	0.025	0.007	0.002	0.002	0.000	0.001					1.712
300	0.261	0.407	0.259	0.038	0.016	0.005									0.986
310	0.145	0.252	0.125	0.031	0.007	0.001									0.560
320	0.086	0.167	0.099	0.027	0.007	0.001									0.388
330	0.074	0.125	0.113	0.039	0.005	0.000									0.356
340	0.063	0.119	0.135	0.051	0.005										0.373
350	0.061	0.121	0.151	0.061	0.007	0.001									0.401
360	0.069	0.128	0.206	0.066	0.005	0.001									0.475
Freq. Accadimento	26.843	26.322	28.938	10.965	4.154	1.723	0.671	0.234	0.081	0.050	0.011	0.006	0.002		100

Tabella 7-2 - Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso, al largo di Napoli ricostruiti dal DICCA, suddivisi per altezza e direzione. Periodo di riferimento 1979-2021.

Le rose ondamiche stagionali, rappresentate escludendo stati di mare caratterizzati da $H_s < 0.5$ m, mostrano come gli eventi più severi siano caratteristici della stagione autunnale e invernale. Pur tuttavia, la direzione di provenienza del moto ondoso rimane costante al variare delle stagioni.

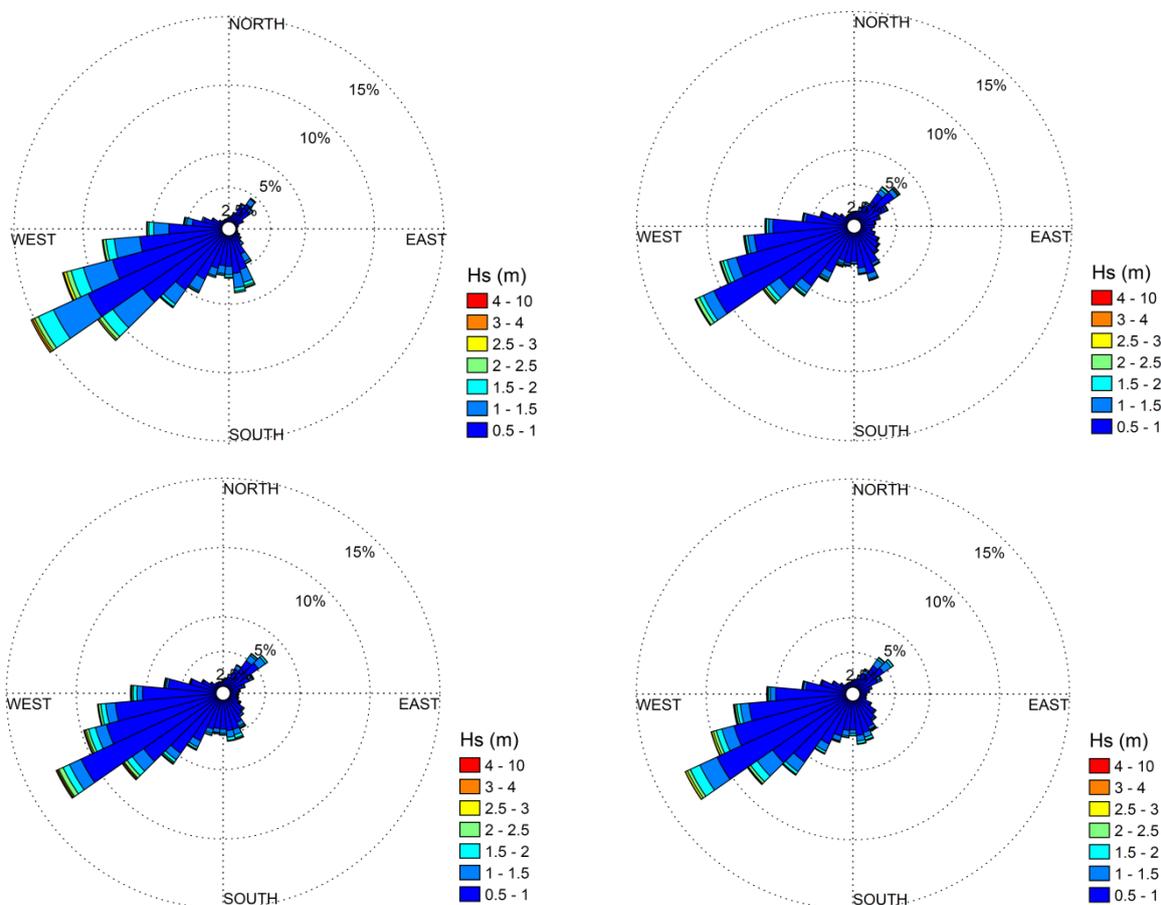


Figura 7-2 – Rose ondametrickhe stagionali (serie storica dal 1979 al 2021).

7.1 Curva di durata

Al fine di rappresentare la persistenza degli eventi di moto ondoso si può far riferimento alla curva di durata riportata in Figura 7-3. La curva è ottenuta ordinando la serie storica e determinando così la durata media annua associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa. Con riferimento alla Figura 7-3 si osserva in particolare:

- durata media degli eventi con $H_s \geq 1.0$ m circa 1567 ore/anno,
- durata media degli eventi con $H_s \geq 2.0$ m circa 243 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 7 ore/anno.

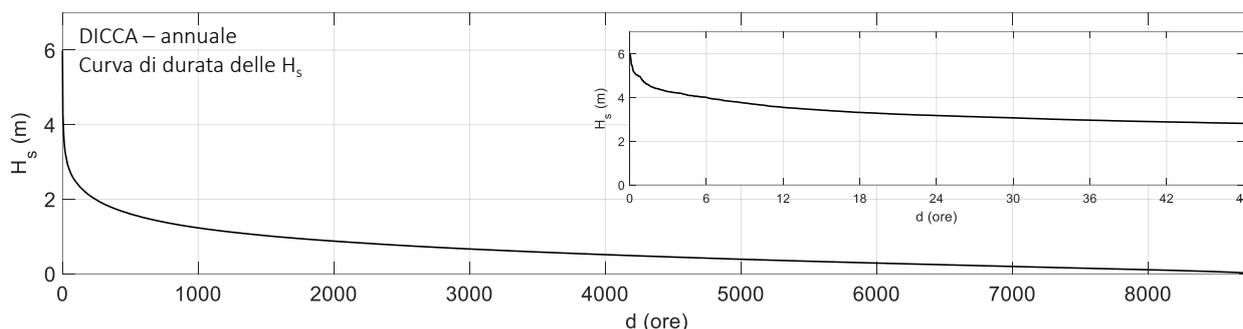


Figura 7-3 – Curva di durata degli eventi di moto ondoso al largo di Napoli.

7.2 Correlazione altezza significativa periodo di picco

L'analisi di correlazione, riportata nel grafico di Figura 7-4 relativo a tutti i valori di H_s e T_p forniti dal DICCA, ha permesso di definire una legge del tipo $T_p = a \cdot (H_s)^b$ per la determinazione del periodo di picco da associare ai valori estremi di altezza d'onda. Il valore di a risulta pari a 5.82, il valore di b risulta invece pari a 0.36, cosicché:

$$T_p = 5.82 \cdot H_s^{0.36}$$

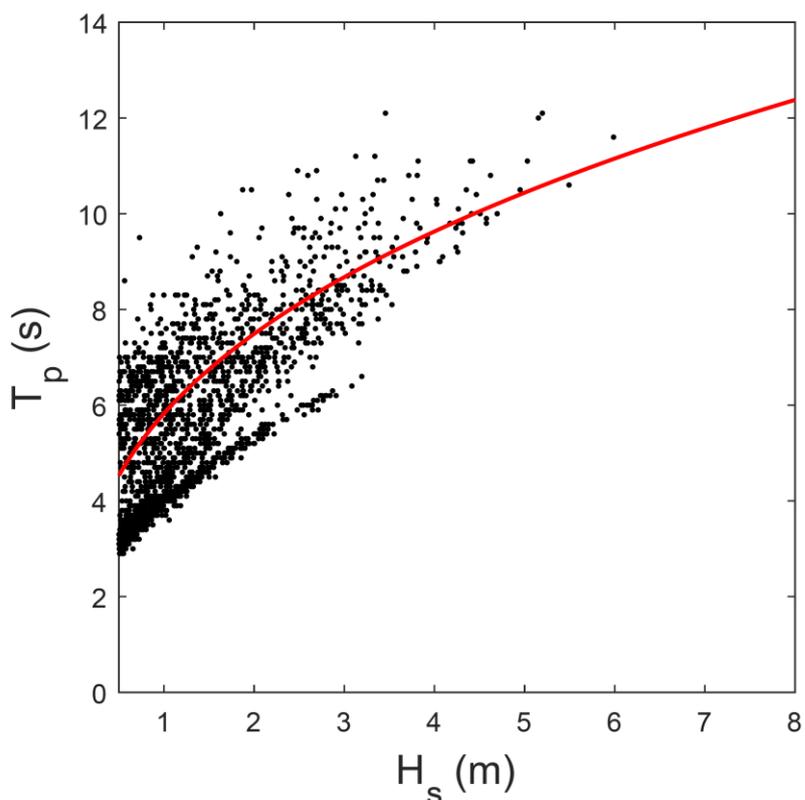


Figura 7-4 – Correlazione altezza significativa periodo di picco.

8. Ricostruzione dell'evento del dicembre 2020

In Figura 8-1 è riportato un estratto della serie storica delle altezze d'onda significative riferite all'anno 2020, anno durante il quale si sono verificati ingenti danni alla diga Duca d'Aosta.

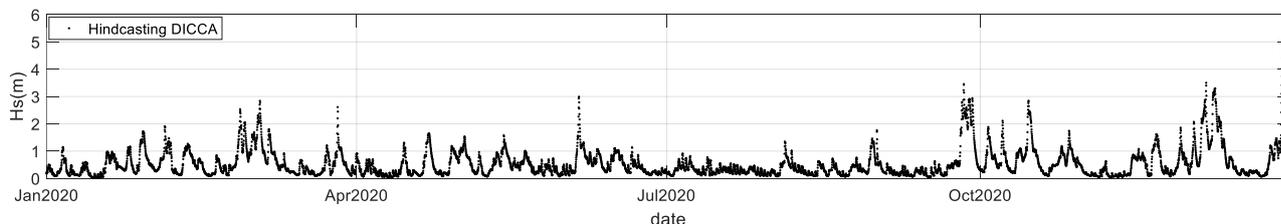


Figura 8-1 Serie storica delle altezze d'onda significativa H_s per l'anno 2020

La massima altezza d'onda significativa della serie di dati ricostruiti in ri-analisi si è verificata il 28 dicembre 2020. Il picco della mareggiata si è verificato alle ore 18.00. Di seguito si riporta il dettaglio della mareggiata che ha indotto ingenti danni alla diga del porto di Napoli.

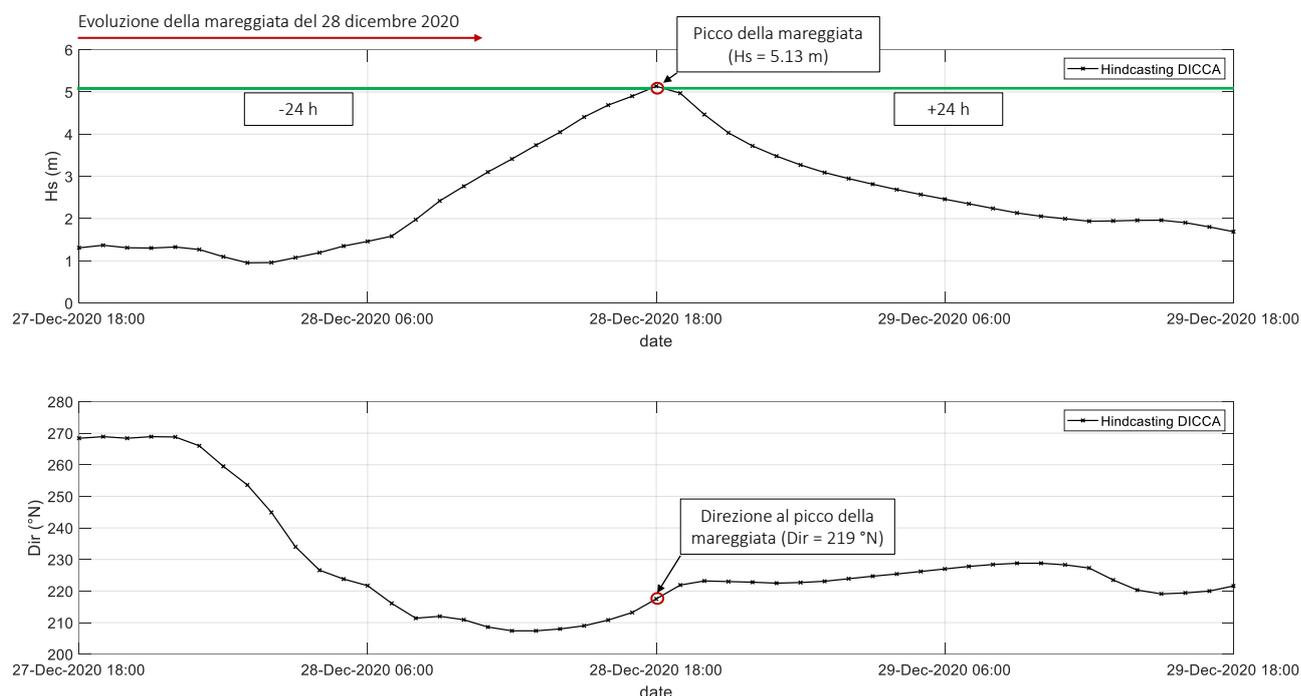


Figura 8-2 Evoluzione dell'evento del dicembre 2020 in termini di altezza d'onda significativa H_s (riportato nel grafico superiore) e della direzione del moto ondoso (riportata nel grafico inferiore).

Come possibile osservare dalla Figura 8-2, l'evento che ha causato gravi danni alla diga del Porto di Napoli è caratterizzato da un'altezza d'onda significativa al culmine di 5.13 m. La direzione di provenienza della mareggiata subisce una rotazione durante

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

l'evoluzione dell'evento. Questa risulta complessivamente compresa tra 260°N e circa 210°N (settore di Ponente/Libeccio). Come più avanti evidenziato, la mareggiata del dicembre 2020, pur costituendo un evento eccezionale, dal punto di vista statistico è risultato, al largo del porto di Napoli, il quinto evento estremo per intensità.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

9. Statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo

Per determinare l'onda di progetto al largo è stata eseguita l'analisi statistica dei valori estremi estratti dalla serie storica dei dati di ricostruzione del DICCA a largo della baia di Napoli, nel punto di coordinate 40.71°N, 14.2187°E.

La serie oraria ricostruita tra il 1979 e il 2021 consente di operare con campione di dati molto numeroso ed un elevato numero di anni ($K = 42$ anni).

9.1 Preparazione del campione

L'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso richiede necessariamente di definire dei criteri al fine di selezionare un campione di dati rappresentativo delle mareggiate più significative per eseguire un'analisi di inferenza statistica.

Per eseguire l'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso risulta necessario selezionare preliminarmente dei dati che rispondano al doppio requisito di essere tra loro statisticamente omogenei e indipendenti.

È regola caratterizzare una mareggiata assegnandole i valori di altezza significativa, periodo e direzione corrispondenti al massimo, ovvero al culmine, dell'intensità raggiunta durante il singolo evento estremo.

Per l'individuazione delle mareggiate (evento estremo) all'interno della serie temporale, costituita da K anni di registrazione, si considerano le successioni di stati di mare caratterizzate da una persistenza dell'altezza significativa sopra la soglia di $H_s > 1.0$ m maggiore a 12 ore consecutive e valore di altezza d'onda al colmo $H_s \geq 2.5$ m. Per il settore di mezzogiorno, che presenta mareggiate di minore intensità, il valore al colmo è stato ridotto ad $H_s \geq 2.0$ m e la durata a 9 ore.

L'indipendenza tra le singole mareggiate viene assicurata imponendo un valore di soglia per l'intervallo che intercorre tra due mareggiate successive. Generalmente tale intervallo, come raccomandato da Mathiesen (Mathiesen et al., 1994), è pari a 48 ore.

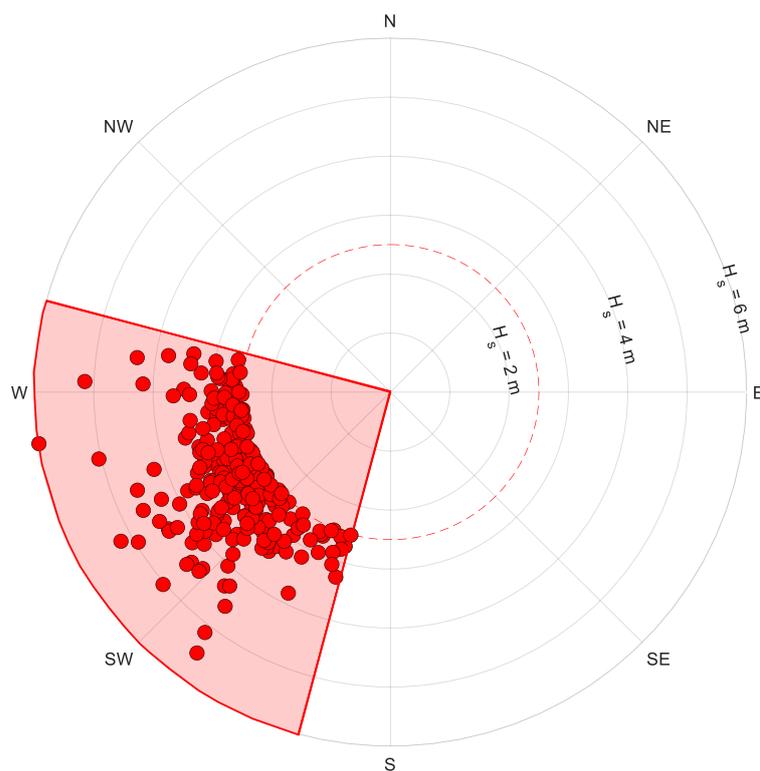


Figura 9-1 – Valori al colmo delle mareggiate al largo di Napoli nel periodo 1979–2021 ricostruite dal DICCA per il settore di traversia principale (195- 285°N).

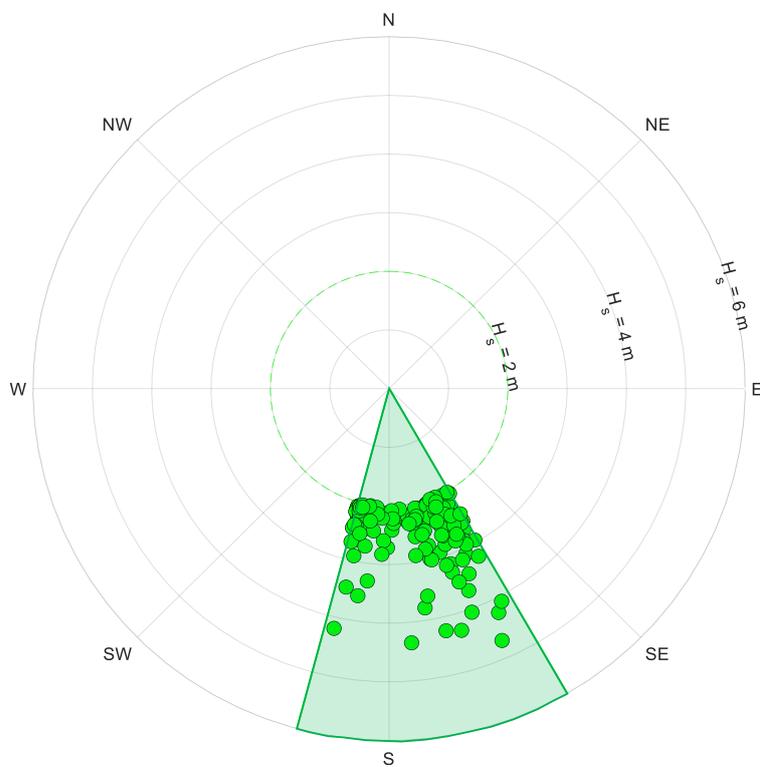


Figura 9-2 Valori al colmo delle mareggiate al largo di Napoli nel periodo 1979–2021 ricostruite dal DICCA per il settore di traversia secondario (150-195°N).

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

In Tabella 9-2 sono riportati i primi venti eventi estremi ordinati per intensità decrescente.

Tabella 9-1 Tabella dei primi venti eventi estremi

N° Evento	Data	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
1	1999-12-28 17:00	6.0	11.6	261.6
2	2004-12-27 06:00	5.5	10.6	216.4
3	1987-01-12 03:00	5.2	12.1	240.9
4	1979-12-31 18:00	5.2	12.0	272.0
5	2020-12-28 18:00	5.1	10.1	217.5
6	2019-12-22 22:00	5.0	11.2	257.0
7	2012-11-29 16:00	5.0	11.1	229.6
8	1986-02-10 12:00	5.0	10.5	239.1
9	1979-12-22 04:00	4.7	10.0	156.1
10	1995-05-13 23:00	4.6	10.8	244.3
11	1992-03-26 15:00	4.6	9.9	217.5
12	1997-12-03 14:00	4.6	9.8	248.7
13	2015-01-30 11:00	4.5	10.0	229.6
14	2010-01-01 19:00	4.5	10.4	240.6
15	2021-01-24 13:00	4.4	9.3	226.7
16	1980-11-28 07:00	4.4	11.1	229.3
17	2007-01-24 14:00	4.4	10.0	237.7
18	1989-02-26 12:00	4.4	11.1	238.2
19	2018-10-29 22:00	4.4	10.5	226.6
20	1987-11-24 22:00	4.3	9.6	220.4
21	1994-01-01 21:00	4.3	9.8	277.8
22	2004-03-24 13:00	4.3	10.1	244.8
23	2017-12-28 10:00	4.3	9.8	237.4
24	1993-12-26 07:00	4.3	9.2	219.5
25	1980-01-15 12:00	4.2	9.3	154.2
26	2008-11-28 14:00	4.2	9.7	166.9
27	1987-01-15 08:00	4.2	12.1	232.6
28	2019-12-13 19:00	4.2	9.2	251.8
29	2007-02-13 08:00	4.2	9.8	271.9
30	2016-02-28 18:00	4.1	9.1	152.4
31	1999-11-19 09:00	4.1	9.0	230.6
32	1986-01-31 19:00	4.1	8.8	159.9
33	2010-12-18 02:00	4.1	9.0	233.6
34	1992-12-06 04:00	4.0	10.2	241.9
35	2013-11-20 01:00	4.0	10.3	222.9
36	2011-12-17 00:00	3.9	9.5	235.7
37	2003-02-04 13:00	3.9	9.4	232.9
38	2021-11-26 22:00	3.9	10.0	234.7
39	2014-01-21 05:00	3.8	11.1	224.0
40	2012-10-29 03:00	3.8	10.8	237.2

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarinario. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

9.2 Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati

Tra le distribuzioni statistiche per l'analisi dei valori estremi, la distribuzione di probabilità di non superamento (funzione di ripartizione) di Weibull (limitata inferiormente) si adatta particolarmente bene agli eventi estremi di moto ondoso. La distribuzione è rappresentata dalla seguente funzione:

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

in cui X è la variabile aleatoria, x il valore di non superamento mentre A , B sono i parametri della distribuzione e k è il parametro di forma della distribuzione.

La valutazione dei parametri della distribuzione richiede la preliminare stima della frequenza campionaria dei dati.

Per fare questo 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 formula di Gringorten¹:

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

In seguito, introducendo la variabile ridotta:

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

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

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

Ottenuta la funzione di probabilità di non superamento è possibile valutare il corrispondente valore al colmo della mareggiata corrispondente ad un tempo di ritorno assegnato.

Tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

¹ I valori dei parametri α e β sono forniti da Goda (1988), per la distribuzione Weibull sono $\alpha = 0.20 + 0.27/\sqrt{k}$, $\beta = 0.20 + 0.23/\sqrt{k}$

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

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

si possono stimare le altezze d'onda significative al colmo associate a diversi tempi di ritorno.

9.3 Statistica dei valori estremi

I risultati delle analisi statistiche svolte sui campioni di valori di H_s al colmo delle mareggiate, rappresentativi dei due settori di traversia individuati, sono presentati nei grafici e nelle tabelle dei paragrafi a seguire.

9.3.1 Settore di traversia principale

Applicando il metodo POT per il settore A (195-285 °N), utilizzando una soglia di 2.5 m sono stati selezionati NT = 300 eventi di mareggiata con un valore medio di 3.1 m ed una deviazione standard di 0.65 m.

La mareggiata più intensa appartenente alla serie storica si è verificata nel dicembre del 1999 con un valore di altezza significativa al colmo $H_s = 5.98$ m proveniente da ponente (261°) e periodo 11.6 s. Il secondo evento più elevato si è verificato a fine dicembre del 2004, con $H_s = 5.49$ m $T_p = 10.6$ s proveniente da libeccio (~216°N).

In Figura 9-3 è mostrato il risultato dell'adattamento dei valori al colmo di mareggiata alla distribuzione tipo Weibull 1.0 che è risultata quella che meglio si adatta al campione.

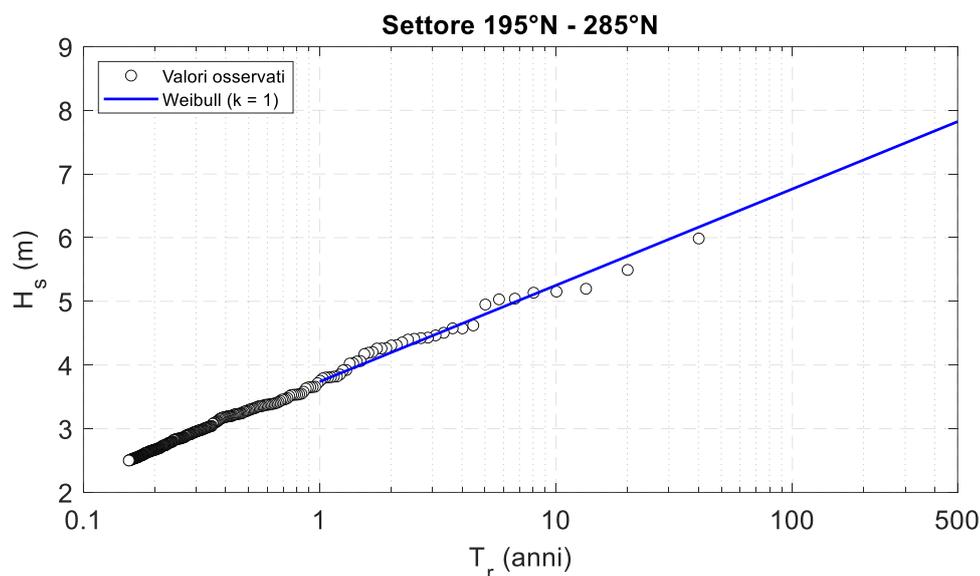


Figura 9-3 – Settore di traversia 195-285°N. Adattamento alla legge di distribuzione tipo Weibull 1.0 dei valori al colmo delle mareggiate estratte dalla serie storica del DICCA tra il 1979-2021.

9.3.2 Settore di traversia secondario

Per il settore secondario, fissata la soglia di 2.0 m, sono stati selezionati $N_T=156$ eventi con un valore medio di 3.07 m ed una deviazione standard di 0.59 m.

In Figura 9-4 è mostrato il risultato dell'adattamento dei valori al colmo di mareggiata alla distribuzione tipo Weibull 1.0 che è risultata quella che meglio si adatta al campione.

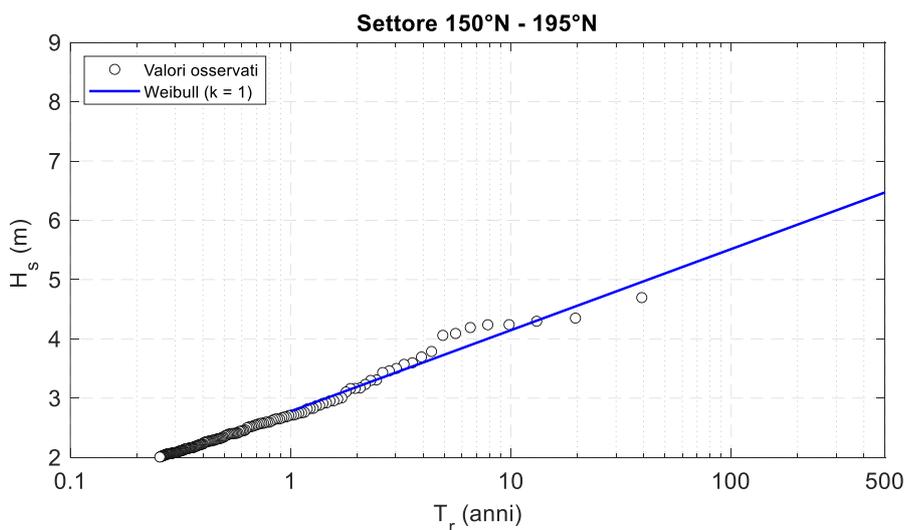


Figura 9-4 - Settore di traversia 150-195°N. Adattamento alla legge di distribuzione tipo Weibull 1.0 dei valori al colmo delle mareggiate estratte dalla serie storica del DICCA tra il 1979-2021.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

T_r (anni)	H_s (m)
2	4.2
5	4.8
10	5.3
20	5.7
50	6.3
100	6.8
250	7.4

T_r (anni)	H_s (m)
2	3.2
5	3.7
10	4.1
20	4.6
50	5.1
100	5.5
250	6.1

Tabella 9-2 – Tabella riassuntiva delle altezze d'onda con associato tempo di ritorno T_r . Sulla sinistra sono riportati i risultati relativi al settore principale (195 – 285 °N) sulla destra quelli relativi al settore secondario (150 – 195°N).

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

10. Clima di moto ondoso sottocosta

Per definire le condizioni di moto ondoso che si vengono a realizzare in prossimità della nuova testata della Diga Duca d'Aosta, si è propagato il moto ondoso da largo verso riva utilizzando un opportuno modello matematico.

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

Per quanto riguarda i meccanismi che possono alterare la propagazione delle onde su fondali via via decrescenti, che collegano il mare aperto alla zona di intervento, la sufficiente regolarità dell'andamento delle linee batimetriche che caratterizzano il Golfo di Napoli ha permesso di ritenere che essi siano costituiti in modo dominante dalla rifrazione e dallo shoaling e che possono essere ritenuti trascurabili i processi diffrattivi (diffrazione esterna e interna).

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

Sulla base delle considerazioni appena effettuate si è scelto in primis, per la propagazione sotto costa della serie di dati di moto ondoso, di utilizzare il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE, sviluppato dalla società MODIMAR srl.

Il modello numerico MEROPE risolve la rifrazione inversa spettrale dei fronti d'onda a partire da un punto utilizzando una griglia di calcolo costruita sulla base dei dati batimetrici del paraggio in esame.

10.1 Griglia di calcolo

In Figura 21 è rappresentato il dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni effettuate con il modello MEROPE, definito sulla base dei dati batimetrici desunti dalla carta nautica del paraggio (CN 11).

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

Il suddetto dominio ha dimensioni 28000x18000 m, ed è numericamente definito da una griglia regolare con passo di discretizzazione di 25 m in entrambe le direzioni, per un totale di 1121x721 nodi. La griglia è orientata con l'asse verticale a 40° Nord.

All'interno della griglia di calcolo è stato selezionato un punto di propagazione, indicato in Figura 10-1 dal punto in rosso. La posizione è stata scelta in modo tale che il punto si trovi in prossimità del prolungamento della diga Duca d'Aosta. Tale punto è posizionato in corrispondenza della batimetrica -24 m sul l.m.m. Il punto in verde è rappresentativo del punto di hindcasting del DICCA, il quale è posizionato in corrispondenza della batimetrica -200 m sul l.m.m.

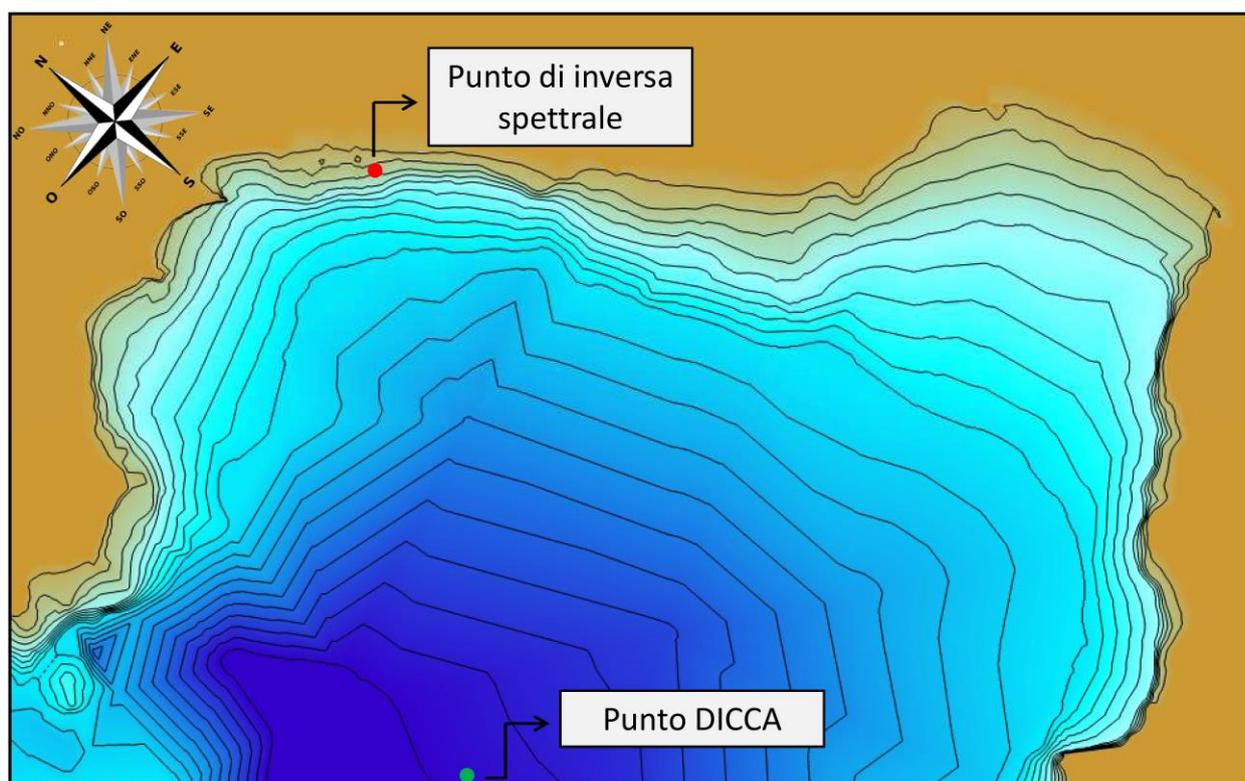


Figura 10-1 – Griglia di calcolo utilizzata dal modello di inversa spettrale MEROPE

10.2 Condizioni al contorno e ipotesi di calcolo

Per i punti scelti sono stati calcolati 20 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spazati di 0.5°, sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia effettivo sottocosta (245 °N – 320 °N).

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022						
		19	002	A	DR	003	00	MAR

I 4.000 piani d'onda inversi (20x200) così calcolati hanno consentito di costruire un data-base di correlazione. Mediante questo data-base l'intera serie storica dei dati DICCA al largo della baia di Napoli è stata propagata sotto costa nel punto prescelto. Per simulare la dispersione dell'energia in frequenza e direzione si è utilizzata la funzione densità spettrale:

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

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

La funzione $G(f, \theta)$ viene esplicitata nel modello 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".

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

L'applicazione del modello MEROPE ha consentito di propagare nel punto di inversa spettrale P0 tutti gli stati di mare della serie storica 1979-2021 al largo e di valutare pertanto le caratteristiche di clima di moto ondoso in prossimità della nuova testata della diga Duca d'Aosta.

La rosa del moto ondoso di Figura 10-2 mostra la distribuzione direzionale su base annuale degli stati di moto ondoso di altezza superiore a 0.5 m ottenute nel punto P0.

La Figura 10-3 mette a confronto il regime ondometrico annuale a largo e a riva (in prossimità della diga Duca d'Aosta). Come è possibile notare gli eventi, durante il processo di propagazione largo/riva, subiscono una rotazione verso la direzione 210 – 220 °N, con una contestuale fortissima attenuazione degli eventi che provengono dal secondo quadrante.

La Tabella 10-1 riporta i dati rappresentati nella Figura 10-2: del più ampio spettro direzionale di provenienza al largo del Golfo di Napoli, le mareggiate provengono solamente dal settore 180 °N – 240 °N.

In Tabella 10-2, Tabella 10-3, Tabella 10-4, Tabella 10-5 si riportano i valori climatici nelle quattro stagioni, rispettivamente dalla Primavera all'Inverno.

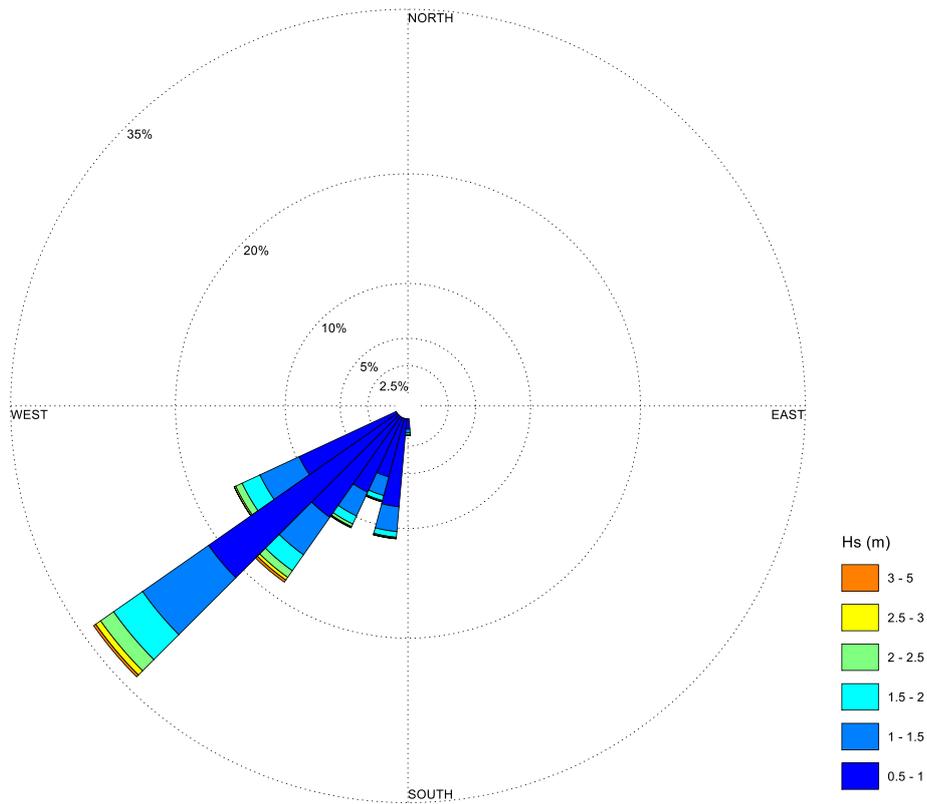


Figura 10-2 – Punto sotto costa P0 – Distribuzione degli eventi di moto ondoso con altezza d'onda superiore a 0.5 m.

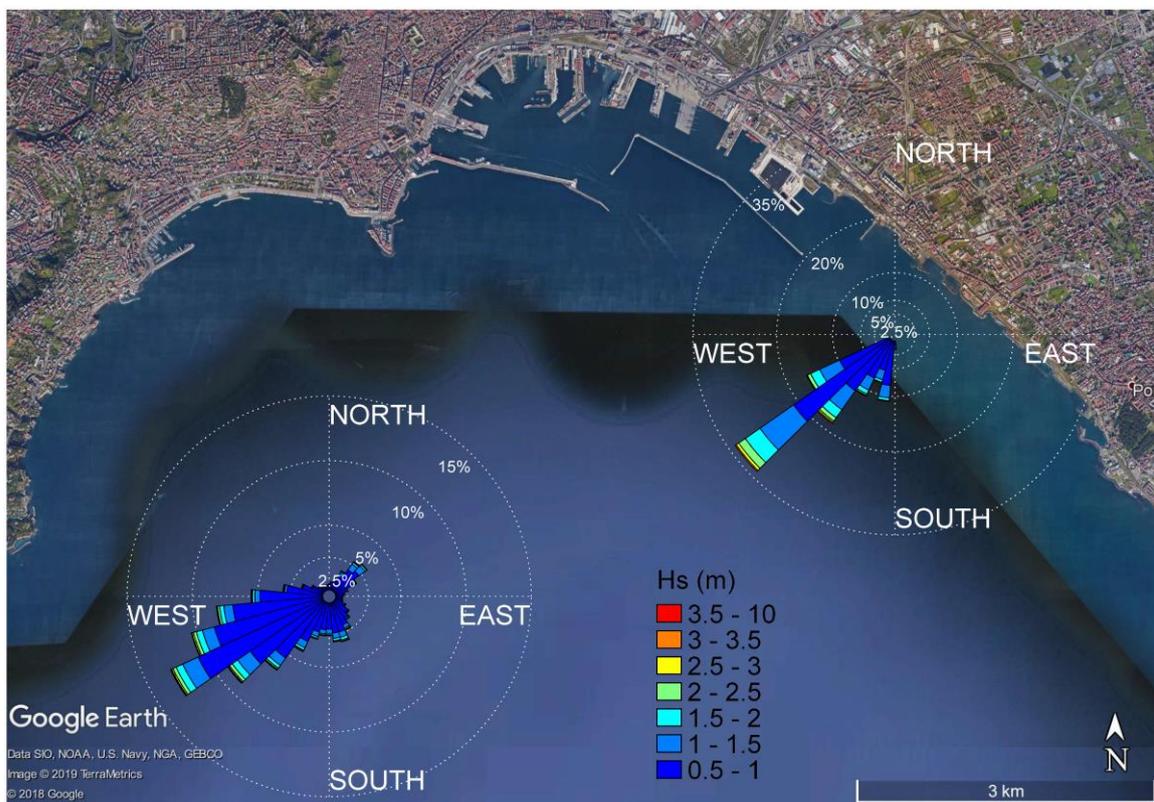


Figura 10-3 - Combinazione delle rose ondometriche a largo e propagata al piede della struttura.

Dir °Nord	Altezza d'onda significativa (m)											Tot	H _s > 0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	> 6		
0												0	0
15												0	0
30												0	0
45												0	0
60												0	0
75												0	0
90												0	0
105												0	0
120												0	0
135												0	0
150												0	0
165	3.37204	0.07446	0.06586	0.00364								3.5	0.0695
180	9.12328	3.61728	2.98285	0.88761	0.2449	0.0503	0.01688	0.00397				16.9	4.2
195	2.42089	2.90342	3.2294	1.03686	0.3005	0.06983	0.02416	0.00761	0.0053	0.00099		10.0	4.7
210	12.2279	8.64705	7.6532	2.52183	1.01966	0.40376	0.15786	0.06321	0.0235	0.00596		32.7	11.8
225	19.894	6.78546	5.82372	1.95062	0.83035	0.23729	0.06354	0.01092	0.00232	0.00132		35.6	8.9
240	1.23444											1.2	0.0
255												0	0
270												0	0
285												0	0
300												0	0
315												0	0
330												0	0
345												0	0
Tot	48.273	22.028	19.755	6.401	2.395	0.761	0.262	0.086	0.031	0.008	0.0	100.0	29.7
Tot. Cumulato	70.300	90.055	96.456	98.851	99.612	99.875	99.961	99.992	100.000	100.000	100.000		

Tabella 10-1 – Punto sottocosta P0. Tabella climatica annuale.

Dir °Nord	Altezza d'onda significativa (m)											Tot	H _s > 0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	> 5		
150												0	0
165	0.797617	0.026503	0.061841									0.89	0.061841
180	7.512999	3.782372	2.698268	0.512393	0.138826	0.00631						14.65	3.36
195	2.799233	3.293957	2.885052	0.538896	0.044172	0.020193	0.001262					9.58	3.49
210	15.77313	10.65803	7.371649	1.827452	0.431622	0.148922	0.064365	0.008834	0.005048			36.29	9.86
225	22.16291	8.184411	5.618658	1.408451	0.408905	0.126205	0.045434					37.95	7.61
240	0.636075											0.64	0.00
255												0	0
Tot	49.68	25.95	18.64	4.29	1.02	0.30	0.11	0.01	0.01	0.00	0.000	100.0	24.4
Tot. Cumulato	75.6	94.3	98.5	99.6	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

Tabella 10-2 - Punto sottocosta P0. Tabella climatica primavera.

Dir °Nord	Altezza d'onda significativa (m)											Tot	H _s > 0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	> 5		
150												0	0
165	1.27349	0.01027										1.28	0
180	7.47407	1.51998	0.67398	0.12581								9.79	0.80
195	2.65867	2.37625	1.60599	0.21054	0.01669							6.87	1.83
210	16.6453	8.72317	4.28392	0.53148	0.12709	0.02182	0.00128					30.33	4.97
225	36.1045	9.60511	4.44054	0.57513	0.22594	0.03466	0.00385					50.99	5.28
240	0.73046											0.73	0.00
255												0	0
Tot	64.89	22.23	11.00	1.44	0.37	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.000	100.0	12.9
Tot. Cumulato	87.1	98.1	99.6	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

Tabella 10-3 - Punto sottocosta P0. Tabella climatica estate.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo		Titolo elaborato: Studio Meteomarinario. Data: luglio 2022						
			19	002	A	DR	003	00	MAR

Dir °Nord	Altezza d'onda significativa (m)											Tot	H _s > 0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	> 5		
150												0	0
165	6.223	0.1097	0.06501	0.00271								6.40	0.06771
180	13.0608	4.95267	4.62764	1.61568	0.39681	0.12189	0.02844	0.0149				24.82	6.81
195	2.24407	3.27063	4.61138	2.0477	0.76518	0.20179	0.08397	0.02167	0.00271	0.00406		13.25	7.74
210	7.91723	7.29289	8.54968	3.60514	1.80528	0.79904	0.33045	0.13272	0.03792	0.0149		30.49	15.28
225	8.84221	4.16447	6.33541	2.49055	1.1674	0.34535	0.09616	0.02438	0.00948	0.00542		23.48	10.47
240	1.56151											1.56	0.00
255												0	0
Tot	39.85	19.79	24.19	9.76	4.13	1.47	0.54	0.19	0.05	0.02	0.000	100.0	40.4
Tot. Cumulato		59.6	83.8	93.6	97.7	99.2	99.7	99.9	100.0	100.0	100.0		

Tabella 10-4 - Punto sottocosta P0. Tabella climatica autunno.

Dir °Nord	Altezza d'onda significativa (m)											Tot	H _s > 0.5
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 1.00	1.00 1.50	1.50 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	> 5		
150												0	0
165	5.57663	0.16154	0.14328	0.01264								5.89	0.15592
180	8.63604	4.34331	4.11996	1.38362	0.47338	0.08007	0.04214	0.0014				19.08	6.10
195	1.92302	2.6647	3.95561	1.44683	0.41438	0.06462	0.01405	0.00983	0.01967			10.51	5.92
210	7.91965	7.73002	10.7234	4.34893	1.83593	0.69532	0.25425	0.1208	0.05478	0.00983		33.69	18.04
225	11.0943	4.86164	7.0347	3.49909	1.61118	0.47057	0.11518	0.02107				28.71	12.75
240	2.11266											2.11	0.00
255												0	0
Tot	37.26	19.76	25.98	10.69	4.33	1.31	0.43	0.15	0.07	0.01	0.000	100.0	43.0
Tot. Cumulato		57.0	83.0	93.7	98.0	99.3	99.8	99.9	100.0	100.0	100.0		

Tabella 10-5 - Punto sottocosta P0. Tabella climatica inverno.

10.4 Curva di durata

In merito alla persistenza degli eventi di moto ondoso si può far riferimento alla curva di durata rappresentata in Figura 10-4. Dall'analisi della serie storica è stato possibile determinare la durata media annuale associata a diverse soglie di altezza d'onda significativa:

durata media degli eventi con $H_s \geq 1.0$ m circa 800 ore/anno

durata media degli eventi con $H_s \geq 2.0$ m circa 80 ore/anno

durata media degli eventi con $H_s \geq 3.0$ m circa 9 ore/anno

durata media degli eventi con $H_s \geq 4.0$ m circa 1 ora/anno

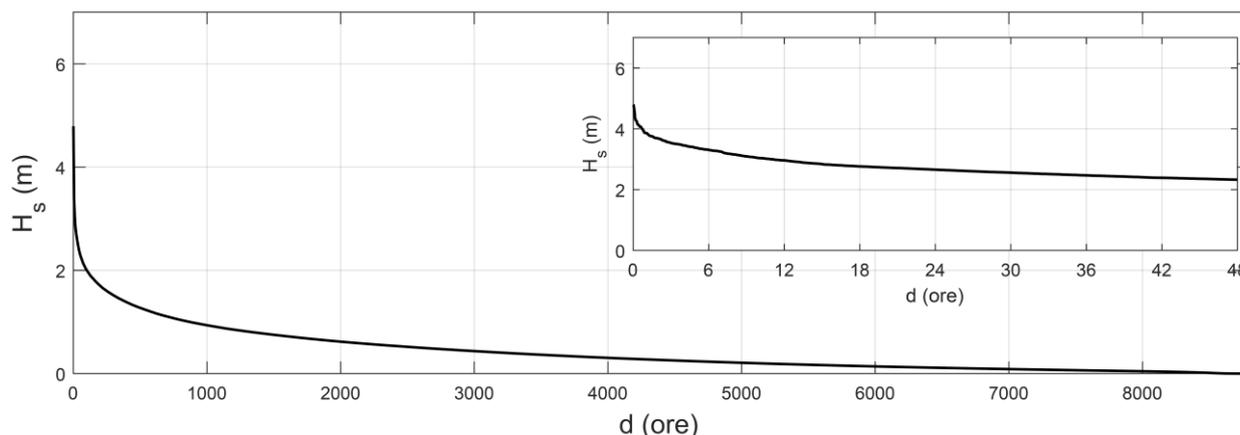


Figura 10-4 – Curva di durata degli eventi di moto ondoso nel punto di inversa spettrale

10.5 Propagazione nel punto sottocosta P0

I diagrammi riportati in Figura 10-5 e Figura 10-6 mostrano la correlazione largo/riva per gli spettri di moto ondoso più rappresentativi. Nella Figura 10-5 è rappresentato il campo di variazione del coefficiente di rifrazione e shoaling, $K = K_r \cdot K_s = H_s/H_{s0}$, rappresentativo del rapporto tra i valori di altezza d'onda nel punto di propagazione ed al largo, in funzione della direzione al largo e del periodo di picco dello spettro dell'onda. Nella Figura 10-6 è riportata la direzione del moto ondoso sottocosta in funzione della direzione del moto ondoso al largo per i diversi periodo di picco dello spettro dell'onda.

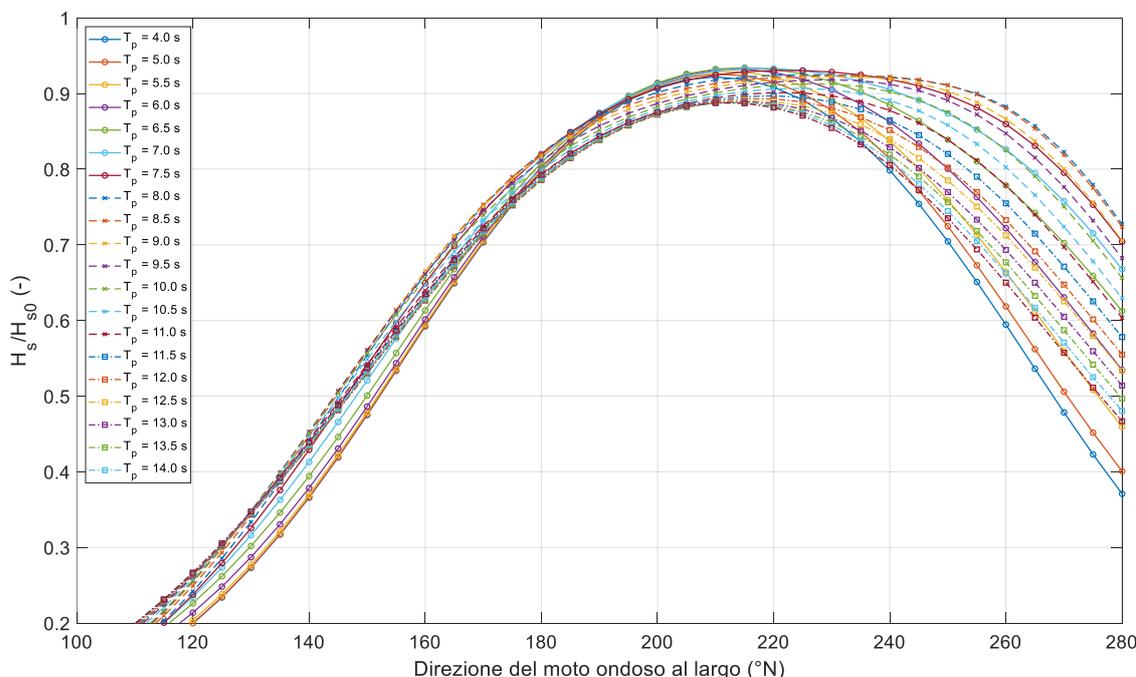


Figura 10-5 – Diagramma correlazione largo riva. Rapporto tra H_s/H_{s0} in funzione della direzione del moto ondoso a largo.

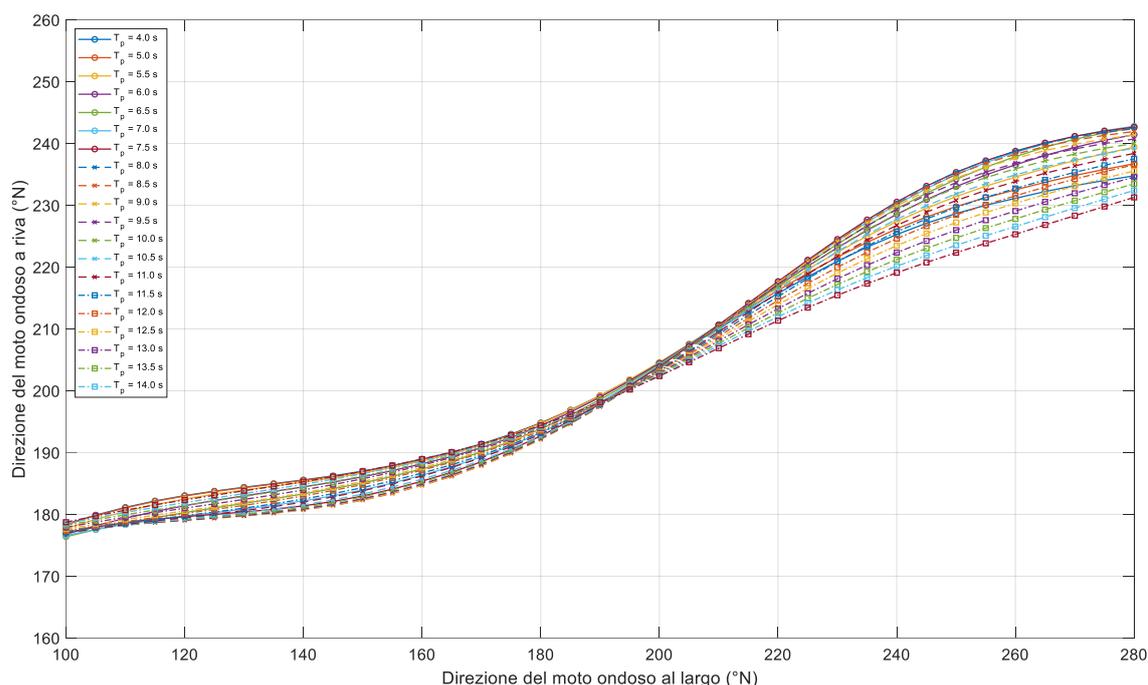


Figura 10-6 - Diagramma correlazione largo riva. Rapporto tra direzione del moto ondoso a largo e a riva.

L'andamento molto appiattito del grafico di Figura 10-6 illustra ulteriormente il restringimento del settore di traversia sottocosta già osservato nelle rose e nelle tabelle precedenti: tutte le direzioni provenienti da 100°N a 180°N gradi circa sull'asse delle ascisse (al largo) si trovano ad un'ordinata approssimativamente uguale o maggiore di 180°N (a riva). Analogamente: tutte le direzioni di provenienza maggiori di 240°N sull'asse delle ascisse (al largo) si trovano ad un'ordinata sempre inferiore 235°N (a riva).

In Figura 10-7 è mostrato (attraverso l'utilizzo della mappa a colori) il campo di variazione del coefficiente di rifrazione e shoaling $K = K_r \cdot K_s = H_s / H_{s0}$ rappresentativo del rapporto tra i valori di altezza d'onda nel punto di propagazione e al largo, in funzione della direzione al largo e del periodo di picco dello spettro dell'onda. La figura fornisce in modo immediato e compatto i valori di attenuazione d'onda.

La direzione 210°N presenta lo stesso valore di attenuazione per tutti i periodi ed è quello che si propaga praticamente con direzione inalterata.

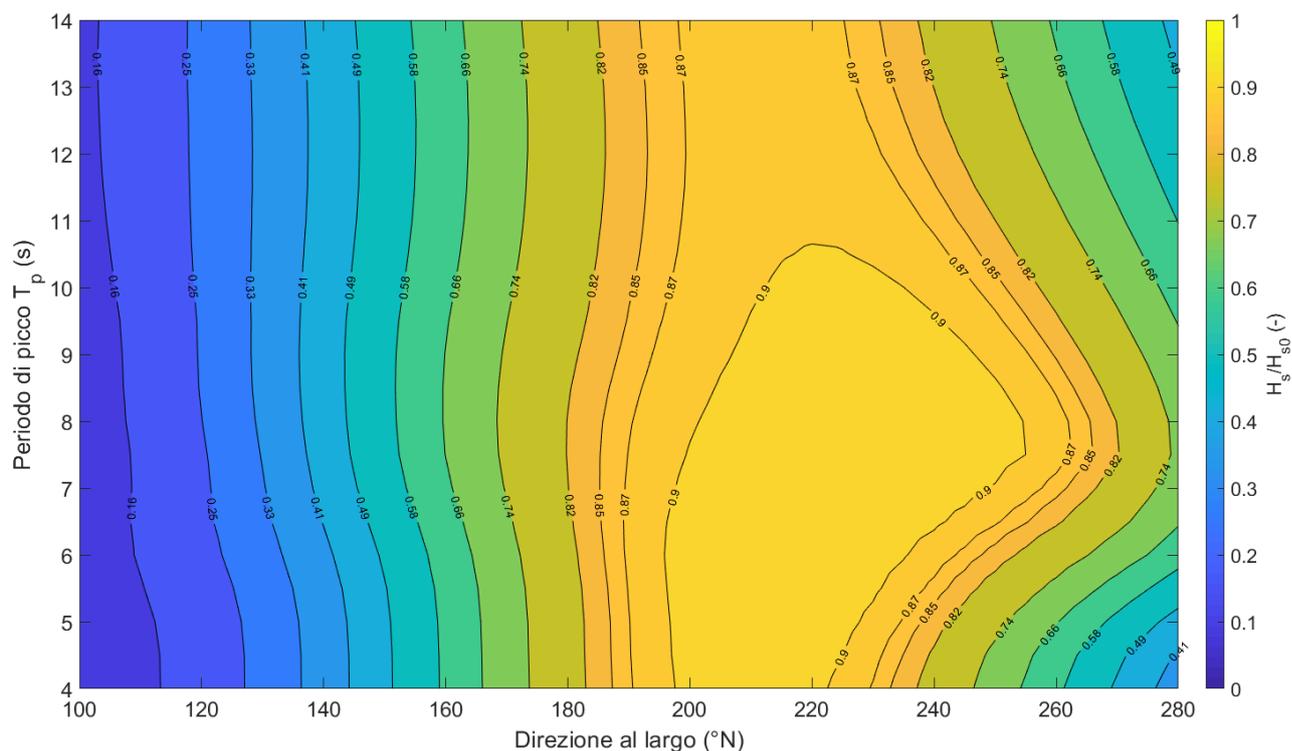


Figura 10-7 – Diagramma di correlazione largo riva per gli spettri più rappresentativi.

In Tabella 10-6 sono riportate in maniera sintetica le informazioni fornite nelle precedenti tre figure per le mareggiate estreme di progetto: per ogni tempo di ritorno T_r viene fornito il valore di altezza significativa al largo (tabella di sinistra) e sottocosta o “a riva” (tabella di destra), periodo di picco (tabella di sinistra) e rapporto tra altezza significativa a riva e altezza significativa a largo (tabella di destra).

Nella parte superiore, le informazioni si riferiscono al settore di traversia principale, nella parte inferiore sono relative al settore di traversia secondario.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

Tr (anni)	H _{s0} (m)	T _{p0} (s)
2	4.2	9.8
5	4.8	10.2
10	5.3	10.6
20	5.7	10.9
50	6.3	11.3
100	6.8	11.6
250	7.4	11.9

Tr (anni)	H _{sr} (m)	H _{sr} /H _{s0} (-)
2	3.8	0.912
5	4.3	0.906
10	4.7	0.901
20	5.1	0.898
50	5.6	0.895
100	6.0	0.893
250	6.6	0.891

Tr (anni)	H _s (m)	T _{p0} (s)
2	3.2	8.8
5	3.7	9.4
10	4.1	9.7
20	4.6	10.0
50	5.1	10.5
100	5.5	10.8
250	6.1	11.1

Tr (anni)	H _{sr} (m)	H _{sr} /H _{s0} (-)
2	2.9	0.921
5	3.4	0.915
10	3.8	0.911
20	4.1	0.906
50	4.6	0.901
100	5.0	0.898
250	5.4	0.895

Tabella 10-6 – Propagazione largo/riva per il settore di traversia principale e secondario delle onde di progetto.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

11. Analisi delle variazioni del livello del mare

11.1 Premessa e metodologia seguita

Le variazioni del livello del mare in prossimità della costa sono dovute a varie cause inquadrabili nei seguenti fenomeni:

- variazioni dovute alla componente astronomica della marea (assimilabili a deterministiche);
- variazioni dovute alla componente meteorologica della marea (tipo probabilistico) indotte essenzialmente da due fenomeni: (i) effetto barometrico inverso e (ii) azione esercitata dal vento sulle masse d'acqua ("wind set-up"); in presenza di aree cicloniche (perturbazioni atmosferiche), la componente meteorologica della marea dà luogo ad un aumento del livello del mare; tale aumento è comunemente indicato con il termine sovrizzo di tempesta ("storm surge");
- aumento del livello del mare indotto dal moto ondoso dal moto ondoso frangente ("wave set-up").

In questa sezione sono analizzate le variazioni di livello dovute alla marea astronomica e alla componente meteorologica, il wave set-up sarà analizzato in seguito con l'ausilio di un modello numerico di propagazione del moto ondoso.

11.2 Serie storica dei livelli misurata dalla stazione RMN di Napoli

La stazione mareografica più vicina al sito in esame è quella situata presso il porto di Napoli, nel punto di coordinate 40°50' N, 14°16' E, facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita dall'ISPRA.

Sono state acquisite e analizzate le misure di livello dal 2010 al 2022 con un intervallo temporale di acquisizione variabile tra 1 ora e 20 minuti.

Come è possibile osservare dalla Figura 11-1, il rendimento del mareografo risulta molto alto e costante tra il 2010 e il 2015. Si segnalano quindi tre anni di malfunzionamento (tra il 2016 e parzialmente il 2019). Dal 2020 lo strumento ha ripreso un normale funzionamento.

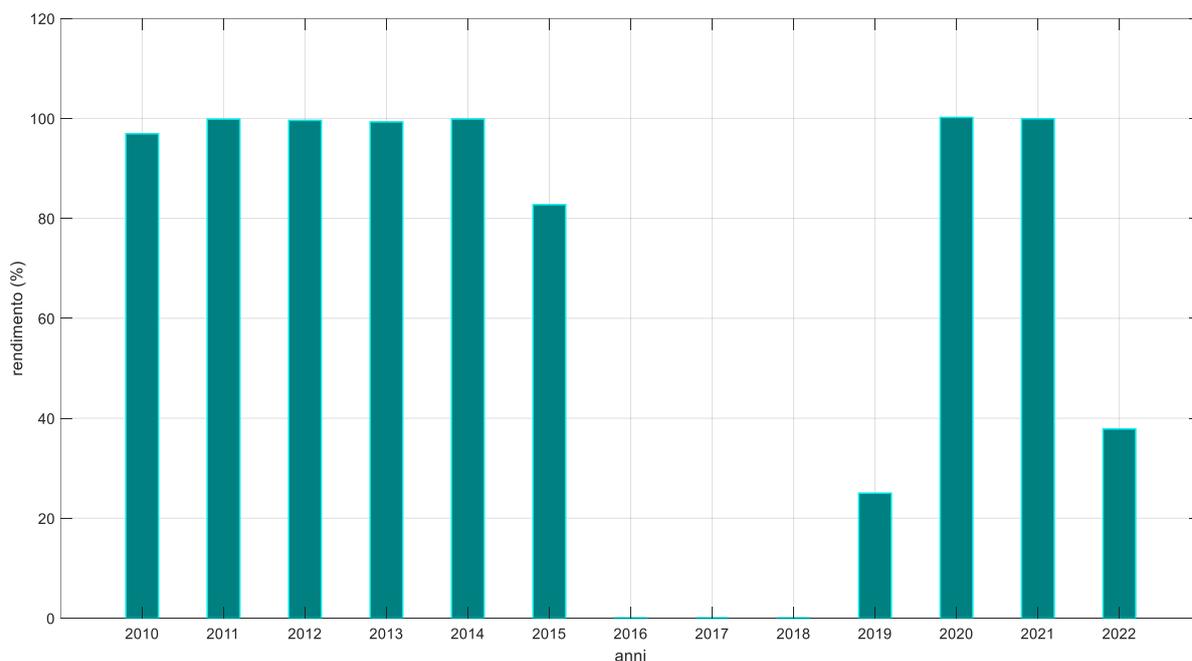


Figura 11-1 Rendimento mareografo tra l'anno 2010 e il 2022.

11.3 Marea astronomica ed analisi armonica dei livelli misurati

Nel grafico di Figura 11-2 sono riportate le misure di livello registrate dal 2010 al 2022. I livelli rappresentati sono riferiti allo zero dello strumento (che in generale non è detto che coincida con il livello medio del mare).

Tali misure sono state processate mediante l'algoritmo Matlab T-TIDE (Pawlowicz et al., 2002), comunemente utilizzato a livello mondiale per l'analisi armonica delle misure di livello. Le costanti armoniche sono quindi state utilizzate per la generazione della serie storica della sola componente astronomica di marea nel periodo di riferimento.

La Figura 11-3 mostra per l'intero periodo di misura il 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).

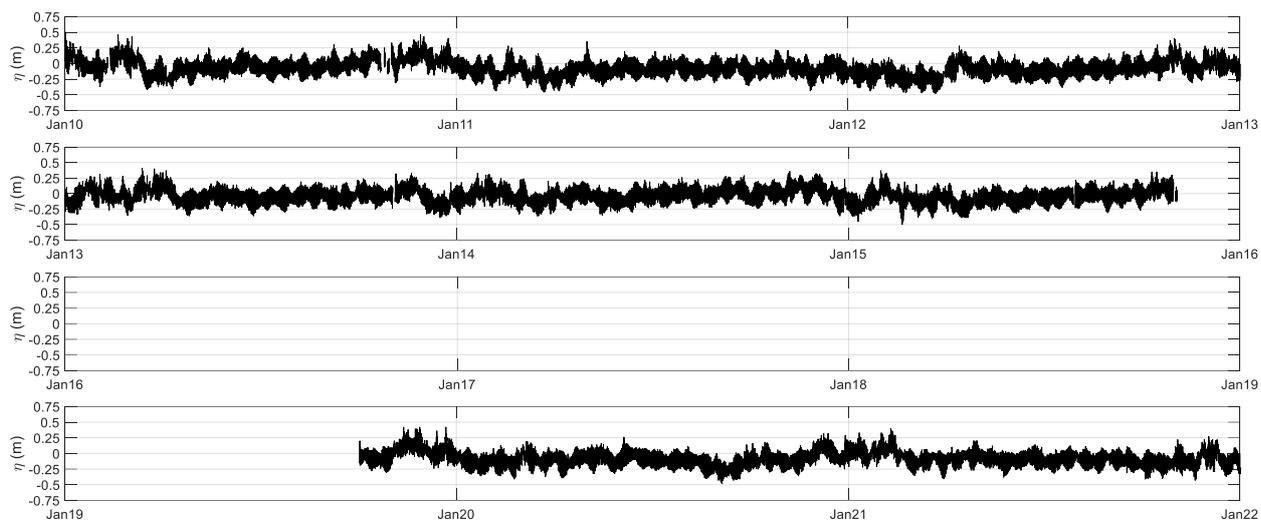


Figura 11-2 – Livelli registrati dalla stazione mareografica di Napoli relativi al periodo di misura 2010-2022

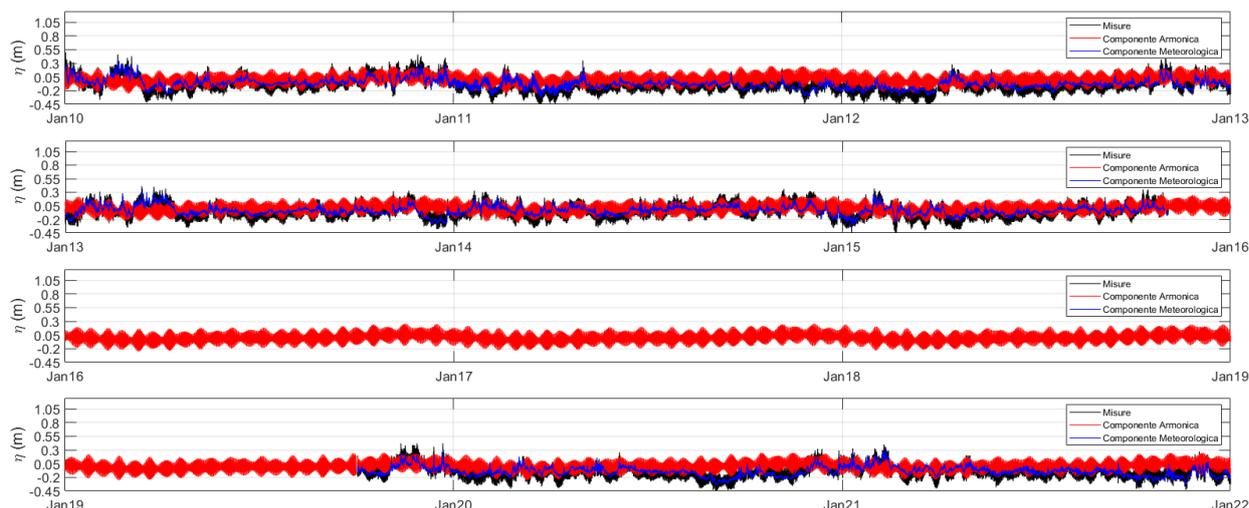


Figura 11-3 – Analisi della serie storica delle misure di livello misurate presso la stazione RMN di Napoli: identificazione delle componenti armonica e meteorologica.

La marea astronomica è di tipo misto semidiurno con due alte e due basse maree, di ampiezza diversa. L'ampiezza di marea risulta molto contenuta con escursioni di livello comprese mediamente tra +/-6 cm. Durante le fasi sigiziali si ha un aumento dell'ampiezza della marea che può raggiungere occasionalmente +/-12 cm.

I valori riportati in Tabella 11-1 presentano i livelli di marea sintetici di riferimento.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

Tabella 11-1 Livelli di marea presso la stazione di Napoli. Ricostruzione livelli di marea su 12 anni sulla base delle costanti armoniche di marea determinate analizzando le misure di livello.

		Zero – Strumento (m)	L.M.M. (m)
Highest Astronomical Tide	HAT	0.19	0.26
Mean High Water Spring	MHWS	0.11	0.18
Mean Higher High Water	MHHW	0.05	0.12
Mean Sea Level	MSL	-0.07	0.00
Mean Lower Low Water	MLLW	-0.17	-0.10
Mean Low Water Spring	MLWS	-0.25	-0.18
Lowest Astronomical Tide	LAT	-0.33	-0.26

11.4 Analisi del residuo (componente meteorologica)

Una volta identificata la serie storica della sola componente meteorologica (residuo) è stata effettuata l'analisi dei valori estremi di tale forzante. L'analisi degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando il metodo dei picchi sopra soglia (POT) con valore di soglia del sovrizzo meteorologico pari a +0.1 m sul l.m.m. Anche in questo caso la distribuzione di probabilità che meglio approssima i dati è risultata essere la distribuzione di Weibull ($k = 1$).

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

In Figura 11-4 viene riportato l'andamento del sovrizzo meteorologico in funzione del tempo di ritorno, mentre i valori significativi per tempi di valori dei tempi di ritorno di riferimento sono riportati in Tabella 11-2.

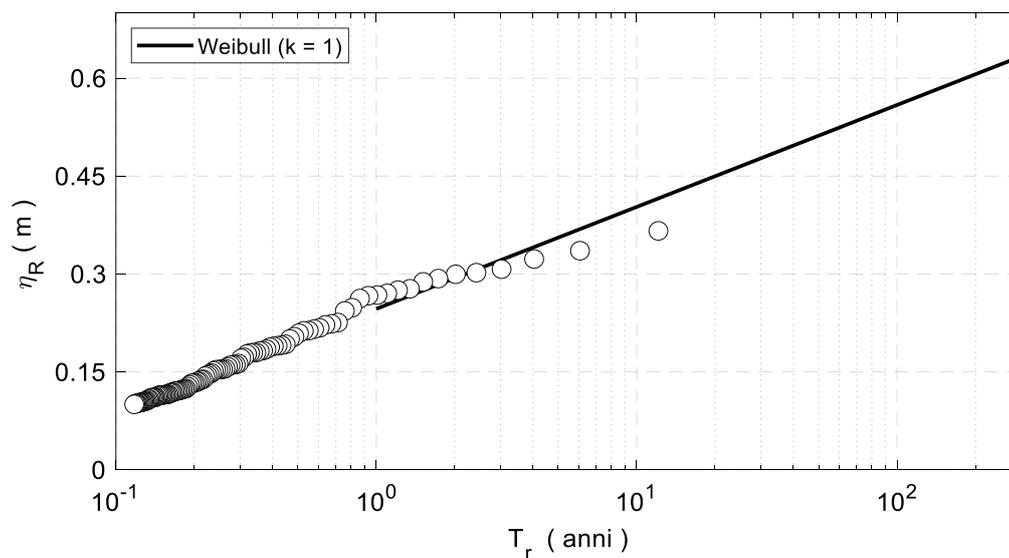


Figura 11-4 – Adattamento dei massimi residui di marea mensili con la legge tipo Weibull (soglia a 0.1 m) nel Porto di Napoli.

Tr (anni)	Livello (m)
2	0.29
5	0.36
10	0.40
20	0.45
50	0.51
100	0.56
250	0.62

Tabella 11-2 – Valori relativi ai valori di sovrizzo in relazione al tempo di ritorno per il porto di Napoli.

	Porto di Napoli Prolungamento Diga Duca D'Aosta a protezione del nuovo Terminal contenitori di Levante II° Stralcio – Progetto Definitivo	Titolo elaborato: Studio Meteomarino. Data: luglio 2022					
		19	002	A	DR	003	00

12. Conclusioni

Per l'aggiornamento dello Studio Meteomarino già condotto (2019) nell'ambito della progettazione definitiva del I Stralcio dei lavori di prolungamento (a levante) della Diga Duca d'Aosta si è fatto riferimento alla stessa serie di dati in rianalisi gestiti dal centro di ricerca del DICCA dell'Università di Genova.

Sulla base della serie storica dei dati di vento e moto ondoso aggiornata acquisendo i dati sino a tutto il 2021 sono state condotte nuovamente le analisi relative alle condizioni medio climatiche ed estreme di esposizione del moto ondoso al largo del porto di Napoli senza però riscontrare variazioni significative rispetto a quanto già desunto in occasione del precedente studio meteomarino.

Si è anche esaminata in dettaglio la mareggiata che a dicembre 2020 ha causato danni all'esistente Diga Duca d'Aosta verificando con dati oggettivi che per durata, direzione di provenienza e massimi valori di altezza d'onda significativa può essere associata ad una frequenza di accadimento decennale.