

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

CUP C39B18000060006

CIG 7690329440

RIF. PERIZIA

**P.3062**

TITOLO PROGETTO

### NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO SAMPIERDARENA

TITOLO ELABORATO:

**STUDIO DELLE CONDIZIONI METEOMARINE**

ELABORATO N°:

MI046R-PF-D-I-R-020-01

NOME FILE:

MI046R-PF-D-I-R-020-01.docx

DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
4/6/2021	M.Del Bianco	P.De Girolamo	A.Lizzadro
REVISIONE	N°	DATA	DESCRIZIONE
	00	30/4/2021	EMISSIONE PER APPROVAZIONE
	01	4/6/2021	REVISIONE A SEGUITO VERIFICA RINA CHECK

PROGETTISTI	PROGETTAZIONE
<p>Mandatario:  Responsabile dell'integrazione delle prestazioni specialistiche Dott. Ing. Antonio Lizzadro</p> <p>      <b>STUDIO BALLERINI</b> INGEGNERI ASSOCIATI      <b>EPF</b>      <b>ALBERTO ALBERT</b> INGEGNERE </p>	<p> Dott. Ing. Antonio Lizzadro</p>

D.E.C.	VERIFICATO	VALIDATO R.U.P.	IL RESP. DELL'ATTUAZIONE
Ing. Francesca Arena	RINA CHECK	Ing. Marco Vaccari	Dott. Umberto Benezzoli
.....	.....	.....	.....

## AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE OCCIDENTALE

### **REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO DI SAMPIERDARENA**

### **PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA**

#### **Studio delle condizioni meteomarine**

**INDICE**

1	PREMESSE	13
1.1	Introduzione	13
1.2	Obiettivi dello studio	13
1.3	Contenuto del presente rapporto	13
1.4	Metodologia di lavoro per la definizione delle onde estreme	14
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	17
2.1	Fetch geografico ed efficace	20
3	REVISIONE DEGLI STUDI PREGRESSI IN RELAZIONE ALLA DEFINIZIONE DELLE ONDE ESTREME	25
3.1	Premessa	25
3.2	Studi eseguiti prima del 2008	26
3.3	Studi eseguiti dopo il 2008	30
3.4	Conclusioni	32
4	DATI METEOMARINI UTILIZZATI	34
4.1	A. Dati di vento	34
4.2	B. Dati di moto ondoso	34
4.3	C. Dati mareografici	37
5	REGIME DEI VENTI	38
5.1	Regime anemometrico al largo	39
5.2	Regime anemometrico sottocosta	44
5.3	Analisi dei valori estremi di vento	58
6	ANALISI DEI DATI ONDAMETRICI DISPONIBILI	60
6.1	Caratteristiche delle serie di dati ondametrici disponibili	60
6.2	Registrazioni ondametriche della boa RON di La Spezia	61
6.3	Registrazioni ondametriche della boa di Capo Mele	67
6.4	Dati ondametrici non direzionali registrati dalla boa di Genova Nervi	73
6.5	Dati in ricostruzione forniti dal DICCA	73
6.6	Conclusioni	83
7	CONFRONTO E CALIBRAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI RICOSTRUITI DAL DICCA	84
7.1	Introduzione	84
7.2	Confronto tra gli eventi sincroni al largo di La Spezia	84
7.3	Confronto tra gli eventi estremi asincroni al largo di La Spezia	85
7.4	Confronto asincrono tra gli eventi estremi al largo di Capo Mele	89
7.5	Conclusioni	92
8	ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSI AL LARGO	93
8.1	Individuazione del modello probabilistico per i dati selezionati	94
8.2	Metodo POT (Peaks Over Threshold)	95
8.3	Periodo di picco associato alle mareggiate	103
8.4	Conclusioni	104

**Studio delle condizioni meteomarine**

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

9	CLIMA DEL MOTO ONDOSO AL LARGO	105
9.1	Generazione del moto ondoso: correlazione vento/onda	105
9.2	Distribuzione degli eventi per classi di altezza d'onda significativa e direzione	106
9.3	Distribuzione degli eventi in relazione al periodo di picco del moto ondoso	111
10	PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA	113
10.1	Introduzione	113
10.2	Griglia di calcolo	114
10.3	Propagazione nel punto sottocosta P1 con il modello MEROPE	115
10.4	Clima di moto ondoso sottocosta	116
10.5	Propagazione sottocosta degli eventi estremi di moto ondoso con il modello MEROPE	123
11	APPLICAZIONE DEL MODELLO SWAN PER LA PROPAGAZIONE DEGLI STATI DI MARE ESTREMI	125
12	ANALISI DEI LIVELLI	135
12.1	Introduzione	135
12.2	Misure di livello del mareografo RMN di Genova	135
12.3	Tavole di marea I.I.M.M.	141
13	CORRENTI	142
14	CAMBIAMENTI CLIMATICI	146
14.1	Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Genova	146
14.2	Variazioni a lungo termine delle onde estreme a Genova	148

**BIBLIOGRAFIA**

APPENDICE A: Confronto tra i dati di moto ondoso in ricostruzione ECMWF – Copernicus e i dati in ricostruzione del DICCA al largo di Genova.

APPENDICE B: Ricostruzione della mareggiata del Febbraio 1955

APPENDICE C: Confronto tra le misure dell'ondametro ENEL Genova Nervi e i dati di moto ondoso ricostruiti sottocosta con il modello MEROPE

APPENDICE D: I modelli matematici per la propagazione delle onde dal largo a costa MEROPE, SWAN

ELENCO FIGURE

Figura 2-1. Inquadramento geografico del sito in esame.	18
Figura 2-2. inquadramento geografico del golfo di genova con indicazione dei punti di ricostruzione del moto ondoso dicca wave model, utilizzati per la definizione del clima di moto ondoso al largo di genova e per il confronto con i dati delle stazioni ondametriche ron di la spezia e arpal capo mele.	19
Figura 2-3. Batimetria del Golfo di Genova	20
Figura 2-4. Fetch geografico al largo del golfo di genova punto di coordinate 44.04°N - 8.74°E.	21
Figura 2-5. Fetch efficace al largo del golfo di genova punto di coordinate 44.04°N - 8.74°E.	23
Figura 2-6. Estensione dei fetches e legge di deviazione vento/mare al largo di genova nel punto di coordinate 44.04°N - 8.74°E.	24
Figura 3-1. Correlazione $H_s-T_r$ a largo del Porto di Genova (Boccotti, 1986)	28
Figura 4-1. Sezioni del cassone speciale costruito per il rilevamento della pressione esercitata dall'onda sulla parete verticale fino a quota -10.00.	36
Figura 4-2. Esempio di registrazione ondametrica effettuata sul cassone speciale della diga foranea di genova (Fonte: Annali dei lavori pubblici già giornale del genio civile - anno 1932)	36
Figura 5-1. Localizzazione delle diverse fonti di dati anemometrici utilizzate per la definizione del regime dei venti al largo e sottocosta.	38
Figura 5-2. Distribuzione direzionale dei venti ricostruiti dal DICCA al largo del Golfo di Genova nel punto 000323 di coordinate 44.04°N - 8.74°E (periodo di riferimento 1979-2018)	42
Figura 5-3. Velocità media su base mensile dei venti in ricostruzione forniti dal DICCA al largo del Golfo di Genova nel punto 000323 (periodo di riferimento 1979-2018)	42
Figura 5-4. Distribuzione dei venti forniti dal medatlas al largo di genova. coordinate 44°N-9°E. periodo di riferimento 1992-2001.	43
Figura 5-5. Rendimento dell'anemometro installato presso la stazione mareografica RMN di Genova (periodo di riferimento 1998-2019)	45
Figura 5-6. Diagramma di distribuzione direzionale dei venti osservati alla stazione mareografica RMN di Genova (gen.1999 - nov. 2019)	47
Figura 5-7. Distribuzione direzionale dei venti registrati dalla stazione RMN di Genova su base oraria 0:00, 6:00, 12:00, 18:00 (UTC) (periodo di riferimento 1999-2019).	48
Figura 5-8. Durata cumulativa media delle velocità del vento osservate presso la stazione RMN di Genova (gen. 1999-Nov. 2019). La curva nera rappresenta la durata cumulata complessiva.	49
Figura 5-9. Distribuzione delle velocità del vento, in metri al secondo, registrate dalla stazione meteorologica di genova-sestri dal 1963 al 2007. elaborazione dati da: "vento e porti - Analisi statistica dei dati storici di vento registrati dalle stazioni anemometriche".	50

Figura 5-10. Distribuzione direzionale dei dati vento synop per la stazione di genova-sestri periodo di riferimento gen 2008-dic 2019.	52
Figura 5-11. Durata cumulativa delle velocità del vento osservate presso la stazione di genova sestri (gen 2008-dic 2019). La curva nera rappresenta la durata cumulata complessiva.	54
Figura 5-12. Distribuzione dei venti misurati dalla stazione meteorologica ARPAL di punta vagno. periodo di riferimento 2015-2019.	55
Figura 5-13. Durata cumulativa delle velocità del vento osservate presso la stazione arpal di punta vagno (2015-2019). La curva nera rappresenta la durata cumulata complessiva.	57
Figura 5-14. adattamento dei valori estremi annuali di vento registrati dalla stazione meteo genova-sestri (1963-2007) alla distribuzione di probabilità dei valori estremi tipo I di gumbel. Estratto da "vento e porti - Analisi statistica dei dati storici di vento registrati dalle stazioni anemometriche".	59
Figura 6-1. Localizzazione e dettagli delle diverse fonti di dati di moto ondoso utilizzate per lo studio meteomarino	60
Figura 6-2. Rendimento annuale della boa ondometrica RON di La Spezia luglio 1989 - dicembre 2014.	63
Figura 6-3. Rendimento mensile della boa ondometrica RON di La Spezia luglio 1989 - dicembre 2014.	64
Figura 6-4. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa $H_s$ registrata dalla boa RON di La Spezia nel periodo 1989-2000 e nel periodo 2010-2014.	64
Figura 6-5. Distribuzione delle altezze d'onda massime associate agli eventi di mareggiata osservati dalla Boa RON di La Spezia nel periodo 1989-2014.	66
Figura 6-6. altezza d'onda significativa $H_s$ misurata dalla stazione ondometrica di Capo Mele (periodo febbraio 2012 - dicembre 2018).	68
Figura 6-7. Rendimento annuale della boa ondometrica di Capo Mele febbraio 2012 - dicembre 2018.	69
Figura 6-8. Rendimento mensile della boa ondometrica di Capo Mele febbraio 2012 - dicembre 2018.	69
Figura 6-9. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa $H_s$ registrata dalla boa ondometrica di Capo Mele. periodo di riferimento febbraio 2012 - settembre 2019	70
Figura 6-10. Distribuzione delle altezze d'onda massime associate agli eventi di mareggiata osservati dalla boa di Capo Mele periodo 2012-2018.	72
Figura 6-11. Evento meteo marino del 29-30 ottobre 2018 registrazioni della boa ondometrica arpal di Capo Mele.	72
Figura 6-12. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa $H_s$ ricostruita dal DICCA nel punto P_000323 al largo del Golfo di Genova - periodo di riferimento 1979-2018.	75
Figura 6-13. Distribuzione delle altezze d'onda al colmo delle mareggiate ricostruite al largo del golfo di genova dal dicca nel punto 000323 periodo 1978 - 2018.	76
Figura 6-14. Localizzazione del punto dicca di ricostruzione del moto ondoso in prossimità di capo mele.	77

Figura 6-15. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa $H_s$ ricostruita dal DICCA nei punti P_000354 e P_000391 al largo di capo mele - periodo 1979-2018.	78
Figura 6-16. Distribuzione delle altezze d'onda al colmo delle mareggiate ricostruite al largo di capo mele nel punto DICCA 000354 periodo feb. 2012 - dic. 2018	79
Figura 6-17. Localizzazione del punto DICCA di ricostruzione del moto ondoso al largo di la spezia.	80
Figura 6-18. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa $H_s$ ricostruita dal DICCA nel punto P_000367 al largo di La Spezia - periodo di riferimento 1979-2018	80
Figura 6-19. Distribuzione delle altezze d'onda massime associate agli eventi di mareggiata ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia nel periodo 1979-2018	81
Figura 7-1. Confronto dei dati di moto ondoso ricostruiti dal DICCA (HP) utilizzando i dati sincroni registrati dalla boa ondometrica RON di La Spezia (HM) nel periodo 1989-2014.	85
Figura 7-2. Distribuzione dei valori di altezza d'onda $H_s$ al colmo delle mareggiate registrate dalla boa RON di La Spezia (sinistra) e ricostruite dal DICCA (destra) nel periodo 1989 - 2014.	86
Figura 7-3. Confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate (con $H_s > 3.0$ m) registrati dalla boa RON di La Spezia tra il 1989 ed il 2014 e quelli ricostruiti dal DICCA con il modello WWIII in prossimità della boa. (a) correlazione direzione Boa/direzione WWIII (b) correlazione $H_s$ Boa/ $H_s$ WWIII.	88
Figura 7-4. Confronto asincrono tra i valori di periodo di picco $T_p$ al colmo delle mareggiate (con $H_s > 3.0$ m) registrati dalla boa RON di La Spezia tra il 1989 ed il 2014 e quelli ricostruiti dal DICCA con il modello WWIII	89
Figura 7-5. Distribuzione dei valori di altezza d'onda $H_s$ al colmo delle mareggiate registrate dalla boa Arpal di Capo Mele (sinistra) e ricostruite dal DICCA (destra) nel periodo 2012 - 2018.	90
Figura 7-6. Confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate (con $H_s > 2.0$ m) registrati dalla boa ARPAL di Capo Mele tra il 2012 ed il 2018 e quelli ricostruiti dal DICCA con il modello WWIII in prossimità della boa.(a) correlazione direzione Boa/direzione WWIII (b) correlazione $H_s$ Boa/ $H_s$ WWIII.	91
Figura 8-1 - Genova largo dati calibrati - distribuzione direzionale dei valori di $H_s$ al colmo delle mareggiate ricostruite nel periodo 1979-2018	96
Figura 8-2. Genova largo dati calibrati - valori massimi di $H_s$ osservati all'interno del settore di traversia 105-180 °N durante le mareggiate ricostruite nel periodo 1979-2018	97
Figura 8-3 - Mean Residual Life Plot - settore A: 180 - 240°N	99
Figura 8-4 - Mean Residual Life Plot - settore B: 105 - 180°N	99
Figura 8-5 - Mean Residual Life Plot - Overall: 90 - 270°N	99
Figura 8-6 - Genova largo – Settore A: 180 - 240°N. valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno secondo le diverse	

distribuzioni statistiche - metodo P.O.T. (periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)	100
Figura 8-7 - Genova largo – Settore A: 105 -180°N. valori dell'altezza d'onda significativa in funzione del tempo di ritorno secondo le diverse distribuzioni statistiche - metodo P.O.T. (periodo:1 gennaio 1979 - 31 dicembre 2018)	101
Figura 8-8 - Genova largo – Settore overall: 90-270°N. valori di $H_s$ in funzione del tempo di ritorno per le diverse distribuzioni statistiche - metodo P.O.T. (periodo: 1979 - 2018)	102
Figura 8-9. Correlazione per i valori $H_s-T_p$ al colmo delle mareggiate per il settore di traversia 180-240°n	103
Figura 8-10. Correlazione per i valori $H_s-T_p$ al colmo delle mareggiate per il settore di traversia 105-180 °n	103
Figura 9-1. Stati di moto ondoso con $H_s > 2.0$ m e $U_w > 6.0$ m/s appartenenti alla serie storica DICCA al largo del Golfo di Genova (1979-2018). [Sinistra] Diagramma di correlazione tra la direzione del vento e la direzione del moto ondoso. I punti in rosso indicano la legge di deviazione vento/mare ottenuta dall'elaborazione del fetch efficace.[Destra] Correlazione tra l'altezza d'onda $H_s$ e la velocità del vento $U_w$ .	105
Figura 9-2. Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso ricostruiti dal DICCA al largo di Genova. Periodo di riferimento (1979-2018)	109
Figura 9-3. durata cumulativa degli eventi di moto ondoso al largo in funzione dell'altezza d'onda significativa $H_s$ .	109
Figura 9-4. Distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa $H_s$ nel punto di ricostruzione dicca 000323al largo di genova su base stagionale (periodo di riferimento 1979-2018)	110
Figura 9-5. Frequenza di accadimento del periodo di picco $T_p$ .	111
Figura 9-6. Distribuzione congiunta dei valori $H_s$ e $T_p$ e legge di adattamento per i dati di moto ondoso ricostruiti dal DICCA al largo di Genova. In alto settore di traversia principale (180 - 240 °N). In basso settore di traversia secondario (105 - 180°N)	112
Figura 10-1. Griglia di calcolo utilizzata per la modellazione della propagazione del moto ondoso con i modelli merope e swan ed indicazione della posizione del punto P1 all'esterno del porto di Genova.	115
Figura 10-2. Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso propagati sottocosta nel punto P1 con il modello di inversa spettrale	117
Figura 10-3. Durata cumulativa su base annuale dell'altezza d'onda nel punto sottocosta p1.	118
Figura 10-4. Distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso propagati sottocosta nel punto P1 con il modello di inversa spettrale su base stagionale.	121
Figura 11-1. Griglie di calcolo utilizzate per le simulazioni condotte con il modello numerico Swan	126
Figura 11-2 – Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=100$ anni – direzione al largo 180° N	127

Figura 11-3 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_R = 100$ anni Direzione al largo $210^\circ N$ .	128
Figura 11-4 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_R = 100$ anni Direzione al largo $240^\circ N$ .	128
Figura 11-5 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=250$ anni – direzione al largo $180^\circ N$	129
Figura 11-6 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=250$ anni – direzione al largo $210^\circ N$	129
Figura 11-7 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=250$ anni – direzione al largo $240^\circ N$	130
Figura 11-8 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=100$ anni – direzione al largo $150^\circ N$	130
Figura 11-9 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=100$ anni – direzione al largo $170^\circ N$	131
Figura 11-10 – Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=250$ anni – direzione al largo $150^\circ N$	131
Figura 11-11 - Risultato della propagazione dello stato di mare ottenuto con il modello SWAN. $T_r=250$ anni – direzione $170^\circ N$	132
Figura 11-12 - Altezza d'onda significativa ottenuta nel punto P1 in funzione della direzione di provenienza al largo per gli stati di mare estremi con tempo di ritorno $t_r$ 100 anni e $t_r$ 250 anni.	134
Figura 11-13 – Direzione del moto ondoso ottenuta nel punto p1 in funzione della direzione di provenienza al largo per gli stati di mare estremi con tempo di ritorno $t_r$ 100 anni e $t_r$ 250 anni..	134
Figura 12-1. Rendimenti mensili della stazione mareografica RMN di GENOVA. periodo di riferimento Dicembre 1998 - Dicembre 2019.	136
Figura 12-2. Misure di livello effettuate nell'anno 2018 dalla stazione RMN di Genova.	137
Figura 12-3. Ricostruzione della marea astronomica (in rosso) e valori residui (in blu) sulla base dei livelli misurati (in nero) dalla stazione RMN di Genova per l'anno 2018	138
Figura 12-4. Ricostruzione della marea astronomica effettuata per la stazione mareografica di genova per il mese di dicembre 2018 applicando le costanti armoniche ottenute.	139
Figura 12-5. Analisi statistica dei valori massimi mensili di livello residuo (Block Maxima) osservati alla stazione mareografica RMN di Genova (periodo di riferimento 1998-2018). I livelli sono riferiti al livello medio mare (MSL)	140
Figura 13-1. Carte delle correnti superficiali per i mesi di gennaio e luglio. estratte dalla pubblicazione 3068 "atlante delle correnti superficiali dei mari d'italia" redatta dall'istituto idrografico della marina italiana.	142
Figura 13-2. Valore medio della corrente superficiale ricostruita per il mese di gennaio 2018.	143
Figura 13-3. Valore medio della corrente superficiale ricostruita per il mese di Luglio 2018.	144

---

Figura 14-1. Previsione per il global sea level rise fornita dall'IPCC.	147
Figura 14-2. previsioni minime e massime dell'innalzamento del mare a Marsiglia, Trieste e Genova (da Vecchio et al. 2019)	148
Figura 14-3. Stima della variazione di $H_s$ al 2100 dovuta ai possibili cambiamenti climatici in un punto al largo di Genova effettuata dal dicca di genova. (fonte: trends and variability of waves under scenario rcp8.5 in the mediterranean sea - G.Besio, L.Mentaschi, F. De Leo - 12 <sup>nd</sup> international workshop on waves, storm surges and coastal hazards)	149

ELENCO TABELLE

Tabella 2-1. fetch geografici, efficaci e deviazione direzione vento/mare al largo di genova nel punto di coordinate 44.04°n - 8.74°e.	24
Tabella 3-1. Elenco degli studi di riferimento per la definizione delle onde estreme	25
Tabella 3-2 - Risultati della statistica degli eventi estremi ottenuta da Boccotti (1986) al largo di Genova.	28
Tabella 3-3 - Condizioni di moto ondoso incidenti utilizzati da DHI (2003) per lo studio di agitazione interna portuale di Calata Sanità e Bettolo. Tabella estratta dal documento originale.	29
Tabella 3-4 - Statistica ottenuta a largo di Genova dal DHI 2010 sulla base della serie storica CREST	31
Tabella 3-5 - Statistica ottenuta a largo di Genova dal DHI 2010 sulla base della serie storica CREST incrementata con i valori della deviazione standard riportati nella Tabella 3-4.	31
Tabella 4-1. Fonte e descrizione dei dati di vento	34
Tabella 4-2. Fonte e descrizione dei dati di moto ondoso	35
Tabella 4-3. Fonte e descrizione dei dati mareografici	37
Tabella 5-1. Numero di eventi per classi di direzione e velocità dei venti. punto DICCA 000323 al largo del Golfo di Genova (periodo di riferimento 1979-2018)	40
Tabella 5-2. Frequenza di accadimento dei venti. punto DICCA 000323 al largo del Golfo di Genova (periodo di riferimento 1979-2018)	41
Tabella 5-3. Frequenza di accadimento dei venti fornita dal medatlas al largo di genova nel punto di coordinate 44°N-9°E (periodo di riferimento 1992-2001)	44
Tabella 5-4. Suddivisione per classi di provenienza e velocità dei venti registrati dall'anemometro della stazione RMN di Genova (periodo di riferimento gen.1999-nov.2019)	45
Tabella 5-5. Frequenza di accadimento dei venti (velocità e direzione di provenienza) registrati alla stazione mareografica rmn di Genova - (periodo di riferimento gen.1999 - nov.2019)	46
Tabella 5-6. Numero di eventi registrati e frequenza di accadimento degli stati di vento osservati dall'anemometro di genova-sestri nel periodo 1963-2007. rielaborato da "vento e porti - Analisi statistica dei dati storici di vento registrati dalle stazioni anemometriche".	50
Tabella 5-7. numero di eventi registrati dalla stazione meteorologica di genova-sestri nel periodo 2008-2019 (dati synop) e relativa frequenza di accadimento.	52
Tabella 5-8. numero di eventi registrati dalla stazione meteorologica arpal genova-punta vagno nel periodo 2015-2019 e relativa frequenza di accadimento.	55
Tabella 6-1. Analisi del rendimento della boa RON di La Spezia. Periodo di riferimento 1989 - 2014	63
Tabella 6-2. Eventi di mareggiata con altezza d'onda al colmo $H_s \geq 5.0$ m osservati dalla Boa RON di La Spezia nel periodo 1989-2000 e nel periodo 2010-2014.	66
Tabella 6-3. Analisi del rendimento della boa ondometrica di Capo Mele tra il 2012 e il 2019.	69

Tabella 6-4. Eventi di mareggiata più intensi osservati dalla boa di Capo Mele nel periodo 2012-2018.	70
Tabella 6-5. Eventi di mareggiata più intensi ricostruiti dal dicca nel punto 000323 al largo del golfo di genova	75
Tabella 6-6. Eventi di mareggiata più intensi ricostruiti dal dicca nel punto 000354 al largo di capo mele nel periodo Feb.2012 - Dic.2018.	78
Tabella 6-7. Eventi di mareggiata più significativi ricostruiti dal DICCA al largo di La Spezia nel periodo 1979-2018.in grassetto sono indicate le due mareggiate più elevate. In blu sono indicate le due mareggiate più elevate osservate dalla boa ron di la spezia. In viola è evidenziata la mareggiata del 29-30 ottobre 2018.	82
Tabella 7-1. Parametri statistici relativi all'errore tra i valori estremi di $H_s$ registrati dalla boa RON di La Spezia (HM), quelli ricostruiti dal DICCA (HP) e quelli ottenuti con la procedura di calibrazione (HC).	88
Tabella 7-2. Parametri statistici relativi all'errore tra i valori $T_p$ associati alle mareggiate registrate dalla boa RON di La Spezia (TM) e quelli ricostruiti dal DICCA ( $T_p$ ) e quelli ottenuti con la procedura di calibrazione (TC).	89
Tabella 7-3. Parametri statistici relativi all'errore tra i valori estremi di $H_s$ registrati dalla boa ARPAL di Capo Mele (HM), quelli ricostruiti dal DICCA (HP) e quelli ottenuti con la procedura di calibrazione (HC).	91
Tabella 8-1. Numero totale di eventi $N_i$ per i campioni dei valori estremi selezionati per i settori di traversia A (180-240 °N) , B (105-180°N) ed Overall (90-270 °N), valori di soglia $H_s$ per il troncamento degli estremi (metodo p.o.t.), numero di eventi sopra soglia N.	98
Tabella 8-2. Valori estremi di moto ondoso al largo del golfo di Genova in funzione del tempo di ritorno.	104
Tabella 9-1. Numero di eventi di moto ondoso annuali al largo di Genova suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza. Periodo di riferimento 1979-2018.	107
Tabella 9-2. Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso annuali al largo di Genova, suddivisi per classi di altezza significativa e direzione. Periodo di riferimento 1979-2018.	108
Tabella 10-1. Numero di eventi di moto ondoso propagati a riva con il modello merope all'esterno del porto di Genova, appartenenti alla serie storica 1979-2018, suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza.	117
Tabella 10-2. Frequenza di accadimento relativa degli eventi di moto ondoso all'esterno del porto di Genova. Periodo di riferimento 1979-2018.	118
Tabella 10-3. Frequenza di accadimento relativa degli eventi di moto ondoso invernali all'esterno del porto di Genova. Periodo di riferimento 1979-2018.	119
Tabella 10-4. Frequenza di accadimento relativa degli eventi di moto ondoso all'esterno del porto di Genova in primavera. Periodo di riferimento 1979-2018.	119
Tabella 10-5. Frequenza di accadimento relativa degli eventi di moto ondoso all'esterno del porto di Genova in estate. Periodo di riferimento 1979-2018.	120

---

Tabella 10-6. Frequenza di accadimento relativa degli eventi di moto ondoso all'esterno del porto di Genova in autunno. Periodo di riferimento 1979-2018.	120
Tabella 10-7. Valore atteso per il periodo di picco $T_p$ per gli stati di mare propagati sottocosta.	122
Tabella 10-8. Eventi estremi sottocosta nel punto di inversa spettrale P1 Settore di traversia 180 - 240 °N	123
Tabella 10-9. Eventi estremi sottocosta nel punto di inversa spettrale P1 Settore di traversia 105 - 180 °N	124
Tabella 11-1. Stati di mare estremi propagati con il modello swan	127
Tabella 11-2 - Condizioni di moto ondoso estreme nel punto sottocosta P1 ottenute con il modello SWAN - settore di traversia principale.	133
Tabella 11-3 - Condizioni di moto ondoso estreme nel punto sottocosta P1 ottenute con il modello SWAN relativi al settore di traversia secondario.	133
Tabella 12-1. Livelli di marea astronomica per il porto di genova	139
Tabella 12-2. Valori di livello residuo attesi nel porto di genova in funzione del tempo di ritorno. I livelli sono riferiti al livello medio mare (MSL)	141

## **1 PREMESSE**

### **1.1 Introduzione**

Il presente lavoro relativo alle condizioni meteomarine del sito d'interesse è stato redatto nell'ambito della fase 1 del servizio relativo all'esame della fattibilità delle alternative progettuali per la realizzazione della nuova diga foranea.

Lo studio è stato eseguito dalla Modimar S.r.l. ed è stato curato agli Ingg. Marco Del Bianco, Myrta Castellino e Giuseppe Vella con il coordinamento tecnico-scientifico del Prof. Ing. Paolo De Girolamo, del Prof. Ing. Leopoldo Franco e dell'Ing. Paolo Contini.

### **1.2 Obiettivi dello studio**

Il presente Studio Meteomarino costituisce il documento di riferimento per qualsiasi analisi specialistica di tipo marittimo afferente il progetto della nuova diga foranea del Porto di Genova.

Gli obiettivi generali dello studio sono quelli di definire dal punto di vista statistico (valori medi ed estremi) i principali parametri meteomarini che condizionano la progettazione portuale, ovvero:

- il moto ondoso;
- le variazioni del livello del mare;
- il vento;
- le correnti.

Un ulteriore obiettivo del presente studio è quello di cercare di stimare per il sito in esame quali effetti potrebbero avere i futuri cambiamenti climatici sul moto ondoso e sulle variazioni del livello del mare.

### **1.3 Contenuto del presente rapporto**

Il presente studio è stato pertanto rivolto ad analizzare i seguenti aspetti:

- inquadramento geografico del sito al largo e definizione del settore di traversia che lo contraddistingue. Determinazione dell'area di generazione efficace per il moto ondoso;
- caratterizzazione generale dei dati meteomarini disponibili e loro fonte;
- revisione degli studi pregressi;
- analisi dei dati di vento disponibili e del clima anemometrico;
- analisi dei dati di moto ondoso disponibili;
- calibrazione dei dati di moto ondoso al largo;
- analisi delle caratteristiche del moto ondoso al largo e sottocosta;

- analisi dei valori estremi di moto ondoso, su base statistica, per la definizione della legge di distribuzione dei valori estremi al largo e sottocosta;
- analisi dei dati mareografici e definizione delle variazioni di livello attese;
- analisi delle correnti;
- influenza dei cambiamenti climatici sul livello medio marino e sulle condizioni ondometriche;
- ricostruzione della mareggiata storica del Febbraio 1955.

#### **1.4 Metodologia di lavoro per la definizione delle onde estreme**

Dal punto di vista meteomarino l'aspetto più delicato per la progettazione delle opere in questione è costituito dalla definizione delle condizioni estreme di moto ondoso a cui la nuova diga foranea potrà essere soggetta durante la sua vita economica. A tal riguardo la criticità principale è costituita dal fatto che la nuova diga sarà posta su fondali elevati, tali da poter ritenere che i fenomeni dissipativi – costituiti essenzialmente dal frangimento - non possano limitare l'altezza delle onde estreme che interesseranno l'opera.

Per questa ragione per lo sviluppo del presente studio si è posta una particolare attenzione alla metodologia da impiegare per la definizione delle onde estreme con l'obiettivo di implementare un metodo che consentisse di utilizzare le più aggiornate ed affidabili fonti di informazione di dati meteomarini oggi disponibili per il sito in esame.

A tal fine si è ritenuto importante eseguire, preliminarmente alla redazione dello studio, una revisione critica degli studi eseguiti nel passato finalizzati alla definizione delle onde estreme a largo del Porto di Genova. Questo lavoro, riportato nel Capitolo 3, ha consentito di censire sia le sorgenti di dati utilizzati dagli stessi studi e quindi disponibili per il sito in esame, sia le metodologie di analisi adottate nel passato.

Le principali conclusioni a cui si è pervenuti sono di seguito sintetizzate:

- a) l'analisi statistica che ha fornito le condizioni di moto ondoso estreme maggiormente gravose per il Porto di Genova, è quella eseguita negli anni '80 del secolo scorso da Boccotti, la quale è stata basata sulla serie storica, dedotta dal KNMI, delle osservazioni degli stati del mare eseguite "a vista" dalle navi in transito nel Mar Ligure tra il 1961 e il 1980. Le principali limitazioni di questi dati sono costituite, oltre che dal livello di approssimazione intrinseco di questo tipo di rilevazione visuale e dalla possibile mancanza di eventi estremi per ridotta presenza (all'epoca) di navi in mare aperto, da due ulteriori fattori riconducibili: (i) alla irregolarità del tempo di campionamento dei dati; (ii) alla scarsa rappresentatività geografica degli stessi dati (tipicamente raccolti solo lungo le rotte principali). In particolare il secondo aspetto è legato al primo poiché al fine di aumentare la popolazione dei dati da analizzare e

quindi di ridurre il loro tempo di campionamento, generalmente si tende ad aumentare la superficie di mare utilizzata per selezionare il campione di dati da sottoporre ad analisi statistica che nel presente caso è stata estesa all'intero Mar Ligure. Operando in tal modo in un bacino semichiuso come il Mar Ligure, dove le aree di generazione delle onde ("fetch") sono condizionate dalla presenza delle coste, si introducono nella base dati, osservazioni eseguite in condizioni di "fetch" fortemente dissimili una dall'altra e di conseguenza si riduce la rappresentatività geografica degli stessi dati;

- b) a partire dal 2008 per Genova si è iniziato a far riferimento a serie storiche ondamiche *ricostruite in re-analisi*, rese disponibili dai principali centri meteorologici mondiali. Queste serie storiche - grazie ai rilevanti lavori di ricostruzione dei dati raccolti nel passato eseguiti dagli stessi centri meteorologici - hanno progressivamente incrementato la loro estensione temporale fino a superare quelle che caratterizzano i "data base" delle osservazioni "a vista" che per contro, a ragione della loro maggiore imprecisione, non sono stati più aggiornati. Inoltre è stata progressivamente migliorata la copertura geografica e la risoluzione temporale dei "data base" in re-analisi;
- c) finora nessuno studio redatto per il Porto di Genova ha utilizzato in modo complementare le due fonti di dati di moto ondoso oggi disponibili che per affidabilità statistica risultano sicuramente molto superiori rispetto alle osservazioni "a vista" eseguite delle navi in transito. Queste due fonti di dati sono costituite:
- dai dati ondamiche ricostruiti in re-analisi dai centri meteorologici mondiali;
  - dalle misure ondamiche dirette;
- d) le misure dirette di moto ondoso eseguite a largo del Porto di Genova risultano frammentarie e di scarsa qualità. Fortunatamente per il Golfo di Genova sono disponibili due serie storiche rilevate dalle boe ondamiche direzionali di La Spezia e di Capo Mele che risultano di ottima affidabilità, sia per continuità ed estensione temporale delle misure, sia per la modalità di acquisizione delle stesse. Inoltre queste due stazioni, seppur non localizzate a largo del Porto di Genova, rientrano pienamente all'interno dell'area di generazione delle onde che interessano lo stesso Porto;
- e) gli studi pregressi non hanno preso in esame la mareggiata che si è verificata a Genova il 19 febbraio del 1955, la quale provocò ingenti danni al Porto di Genova.

Quindi a conclusione di questa analisi si è deciso di impostare lo studio meteomarinario e in particolare l'analisi delle onde estreme, facendo riferimento alle due tipologie di fonti di dati di moto ondoso oggi disponibili che offrono la migliore affidabilità statistica, ovvero ai dati ondamiche ricostruiti in re-analisi e alle misure ondamiche dirette.

Per quanto riguarda la prima si è fatto riferimento ai dati del DICCA dell'Università di Genova, i quali coprono, con cadenza oraria e con una ottima risoluzione geografica, circa 40 anni (dal 1979 al 2018)<sup>1</sup>. A giudizio del RTP attualmente questi dati costituiscono una delle fonti maggiormente attendibili per il Mediterraneo<sup>2</sup>.

Per quanto riguarda la seconda si è fatto riferimento alle misure fornite dalle boe ondamiche direzionali di La Spezia (facente parte della RON gestita dall'ISPRA) e Capo Mele (gestita dall'ARPAL), le quali, come sopra accennato, risultano particolarmente affidabili. Le due stazioni offrono rispettivamente circa 20 anni e 8 anni di rilevazioni eseguite su fondali nell'ordine dei 100 m, quindi assimilabili ad acqua profonda. Peraltro le rilevazioni eseguite dalle due stazioni di misura sono perfettamente sovrapponibili con i dati forniti in re-analisi dal DICCA e, come detto, rientrano all'interno dell'area geografica dove avviene la generazione delle onde che interessano il Porto di Genova.

Da un punto di vista metodologico si è operato come segue.

Sono state acquisite dal DICCA le serie storiche di moto ondoso e vento ricostruite in re-analisi per tre punti localizzati: (i) a largo del Porto di Genova; (ii) in prossimità dell'ondametro di La Spezia, posto a levante di Genova; (iii) in prossimità di Capo Mele, posto a ponente di Genova.

Dopo aver analizzato, come descritto in dettaglio nel seguito, le tre basi dati di moto ondoso in re-analisi, quelle relative a Capo Mele e a La Spezia sono state confrontate, per i periodi di misura comune, con le relative misure di moto ondoso eseguite dalle stesse stazioni ondamiche. In particolare il confronto è stato eseguito seguendo due approcci. Il primo (definito "*confronto sincrono*") è stato condotto confrontando i valori di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) provenienti dalle misure con quelli ricostruiti, relativi allo stesso istante temporale. Questo confronto consente di valutare lo *scostamento medio tra le misure e i dati ricostruiti*.

Il secondo confronto (definito "*confronto asincrono*") è stato rivolto a valutare in modo specifico i valori di  $H_s$  raggiunti al culmine delle mareggiate più intense registrate dagli ondametri con quelle ricostruite in re-analisi. In questo caso i valori di  $H_s$  posti a confronto sono relativi allo stesso evento meteorologico ma non sono necessariamente riferiti allo stesso istante temporale, ragione per cui è definito confronto asincrono. Questo secondo

---

<sup>1</sup> Si osserva che i dati del DICCA, aggiornati a conclusione di ogni anno, sono stati acquisiti fino all'anno 2018, antecedente alla data di avvio dello studio avvenuta nel 2019.

<sup>2</sup> Per quanto riguarda i dati di moto ondoso in rianalisi, durante lo sviluppo del progetto si è resa disponibile una nuova fonte di dati, quella prodotta dall'ECMWF denominata ERA5 sviluppata nell'ambito del progetto europeo "Copernicus". Per completezza è stata effettuata una analisi di questi nuovi dati che sono stati confrontati con quelli acquisiti dal DICCA. Il confronto, che ha confermato la qualità dei dati del DICCA, è riportato in Appendice A.

confronto, a differenza del precedente, *risulta mirato a confrontare le onde estreme fornite dalle due tipologie di dati*. I risultati forniti dal *confronto sincrono* hanno mostrato che mediamente i valori di  $H_s$  ricostruiti in re-analisi sottostimano i valori misurati di circa il 10%. Questo risultato era emerso anche dallo studio del DHI eseguito nel 2017 come evidenziato nel paragrafo 2.3.2.

La seconda tipologia di confronto, che in precedenza non era stata mai eseguita per il sito in esame, ha evidenziato che la sottostima fornita dai valori ricostruiti in re-analisi dei valori raggiunti al culmine delle mareggiate rispetto a quelli misurati, risulta mediamente superiore rispetto alla sottostima evidenziata dal confronto sincrono risultando pari a circa il 13% per l'ondametro di Capo Mele e pari a circa il 16% per l'ondametro di La Spezia. Sulla base di questi risultati si è deciso, utilizzando un approccio cautelativo e tenendo presente che l'ondametro di La Spezia presenta una estensione temporale delle misure molto superiore rispetto a quella relativa all'ondametro di Capo Mele, di incrementare i valori raggiunti al culmine delle mareggiate forniti al largo di Genova dalla corrispondente serie storica ricostruita in re-analisi dal DICCA, di circa il 16% al fine di tenere conto della sottostima individuata.

Questa correzione è stata applicata solo per la definizione delle onde estreme a largo di Genova.

Per quanto riguarda il “regime (clima) ondametrico” a correzione dei valori di altezza d'onda è stata ritenuta ininfluenza per la definizione del regime del moto ondoso in prossimità dell'imboccatura portuale che fornisce la frequenza di accadimento delle classi di direzione e altezza d'onda significativa.

Applicando un modello numerico di propagazione del moto ondoso a tutti i dati di moto ondoso appartenenti alla serie storica DICCA al largo di Genova sono stati trasferiti sottocosta in un punto posto all'esterno del porto di Genova su profondità di -75 m s.l.m. ad una distanza di circa 2 km dalla diga foranea. Questo ha consentito di definire il clima di moto ondoso all'esterno del porto. Per i dati propagati sottocosta è stata effettuata una validazione mediante confronto dei dati ricostruiti sottocosta per alcune mareggiate con quelli misurati da una boa non direzionale CNR-ENEL attiva dal 1978 al 1982 a Nervi su fondali di 35 m.

L'applicazione dei modelli numerici ha inoltre permesso di propagare in prossimità della diga foranea del porto di Genova gli stati di mare estremi.

## **2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO**

Il paraggio costiero di Genova, oggetto del presente studio meteomarinario, posizionato in un punto baricentrico dell'omonimo golfo che si apre sul Mar Ligure (Figura 2-1), è

geograficamente esposto agli eventi di moto ondoso provenienti dal II° e dal III° quadrante (SudEst e SudOvest).

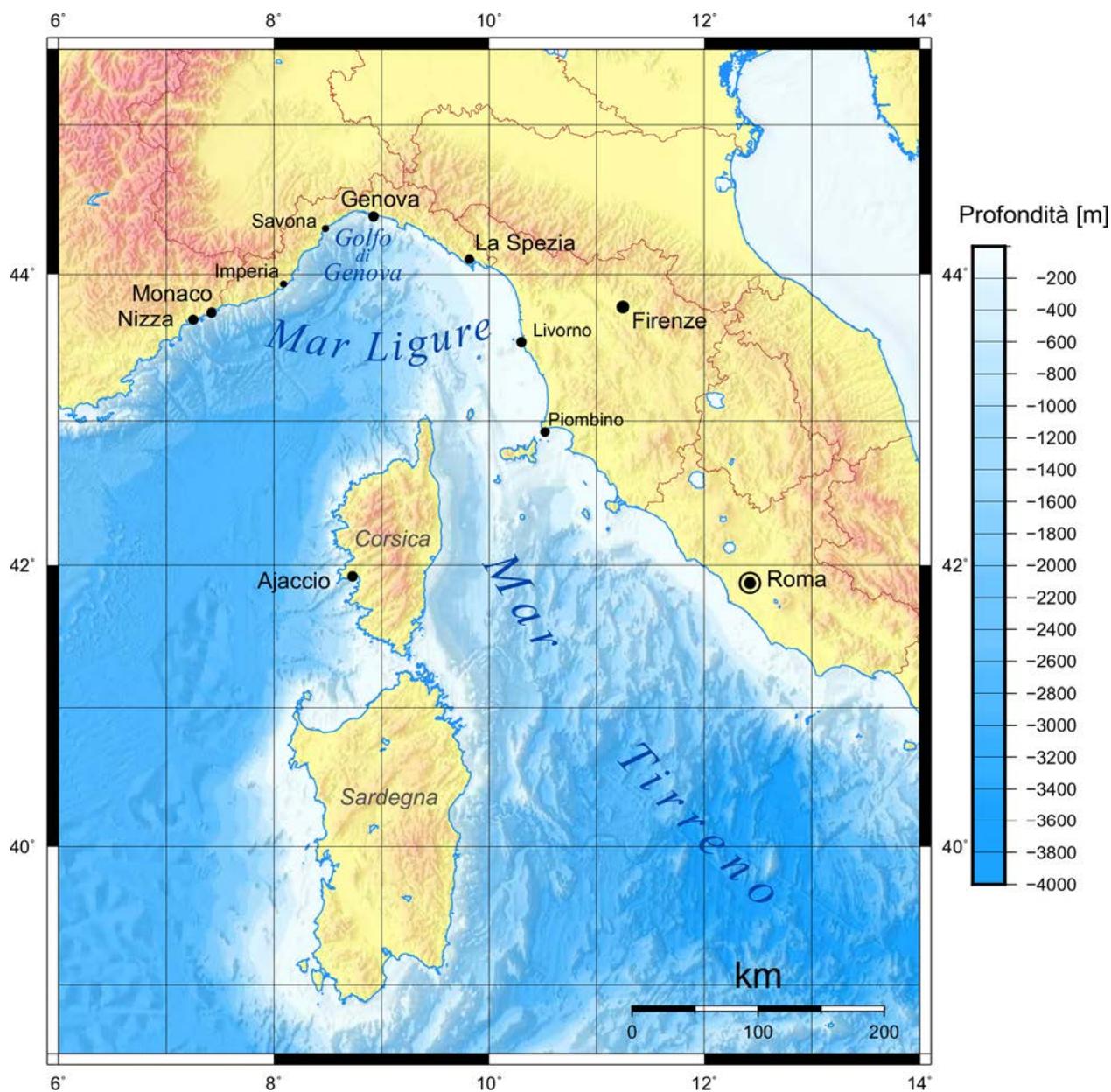


FIGURA 2-1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL SITO IN ESAME.

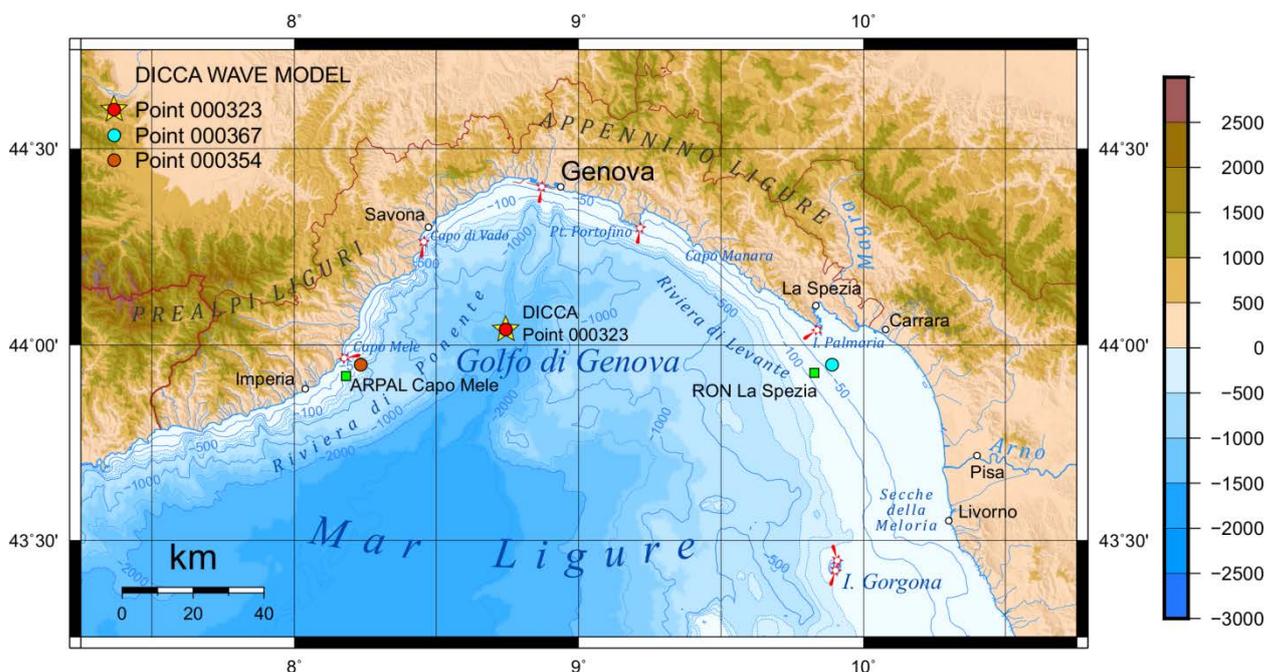


FIGURA 2-2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL GOLFO DI GENOVA CON INDICAZIONE DEI PUNTI DI RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO DICCIA WAVE MODEL, UTILIZZATI PER LA DEFINIZIONE DEL CLIMA DI MOTO ONDOSO AL LARGO DI GENOVA E PER IL CONFRONTO CON I DATI DELLE STAZIONI ONDAMETRICHE RON DI LA SPEZIA E ARPAL CAPO MELE.

Il Golfo di Genova (vedi Figura 2-2) costituisce la porzione settentrionale del Mar Ligure, delimitata ad Ovest da Capo Mele e ad Est dall'Isola della Palmaria. Il litorale della Riviera di Levante prospiciente all'Appennino Ligure, risulta impervio, con pareti a picco sul mare (ad esempio le famose Cinque Terre), e piccole insenature con spiagge a “tasca” (pocket beaches) di modesta estensione.

Lungo la Riviera di Levante, le Prealpi Liguri si protendono verso il mare modellando una costa alta e rocciosa, intervallata da tratti di costa bassa dove si possono trovare brevi falcate sabbiose (Albenga, Loano, Finale Ligure, Savona), spesso protette da interventi di difesa costiera.

Allontanandosi da costa i fondali precipitano velocemente, raggiungendo profondità di 30-50 m già a poche centinaia di metri dalla costa, la quota di -100 m sul l.m.m. si incontra mediamente a circa 3 km dalla costa.

Il piattaforma continentale è di modesta larghezza: infatti la batimetrica -200 m sul l.m.m. che la delimita si trova ad una distanza dalla costa compresa tra 25 e 30 km.

Nella Figura 2-3 sono evidenziati due lunghi canyon sottomarini, tra di loro paralleli, che incidono la piattaforma continentale al largo del Porto di Genova.

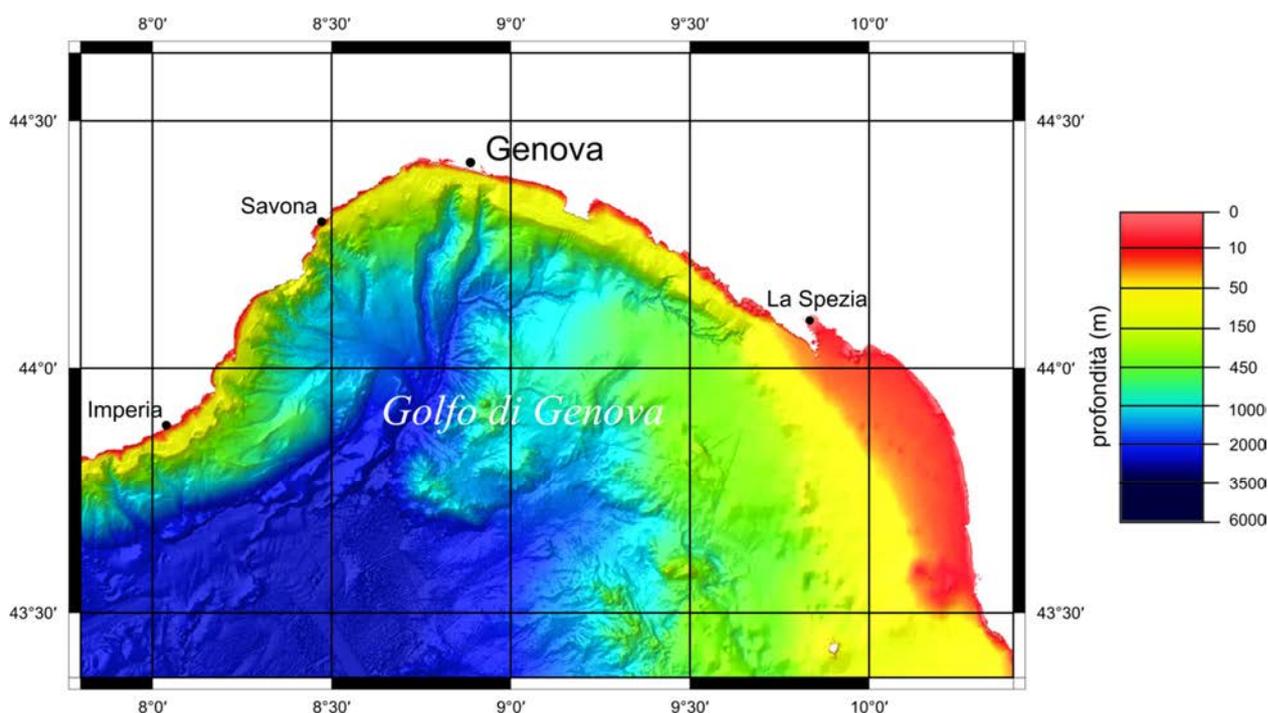


FIGURA 2-3. BATIMETRIA DEL GOLFO DI GENOVA

## 2.1 Fetch geografico ed efficace

Una prima valutazione delle condizioni di esposizione “potenziale” al moto ondoso del sito in esame può essere effettuata sulla base dell’esposizione geografica, rappresentativa dell’estensione della superficie marina dove possono essere generate le onde ad opera dell’azione del vento (“fetch”).

In Figura 2-4 sono rappresentati i fetch geografici (tracciati con passo angolare di 1°) per il punto di coordinate 44.04°N, 8.74°E, posizionato al largo di Genova ad una distanza di circa 42 km dalla costa su profondità di circa 1600 m sul l.m.m. in corrispondenza del punto di ricostruzione del moto ondoso DICCA (vedi rif B.4 Tabella 4-2).

Considerando l’estensione massima delle perturbazioni in Mediterraneo, i “fetch geografici”, tracciati graficamente in Figura 2-4 e rappresentati numericamente nella Tabella 2-1, sono stati limitati a 500 km. Come si evince dalla figura, il Golfo di Genova è caratterizzato da due traversie geografiche principali costituite dal Libeccio e dallo Scirocco, il quale, rispetto al primo, risulta di larghezza inferiore essendo schermato dalla costa di Levante della Liguria, dalle isole dell’Arcipelago Toscano e dalla Corsica.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

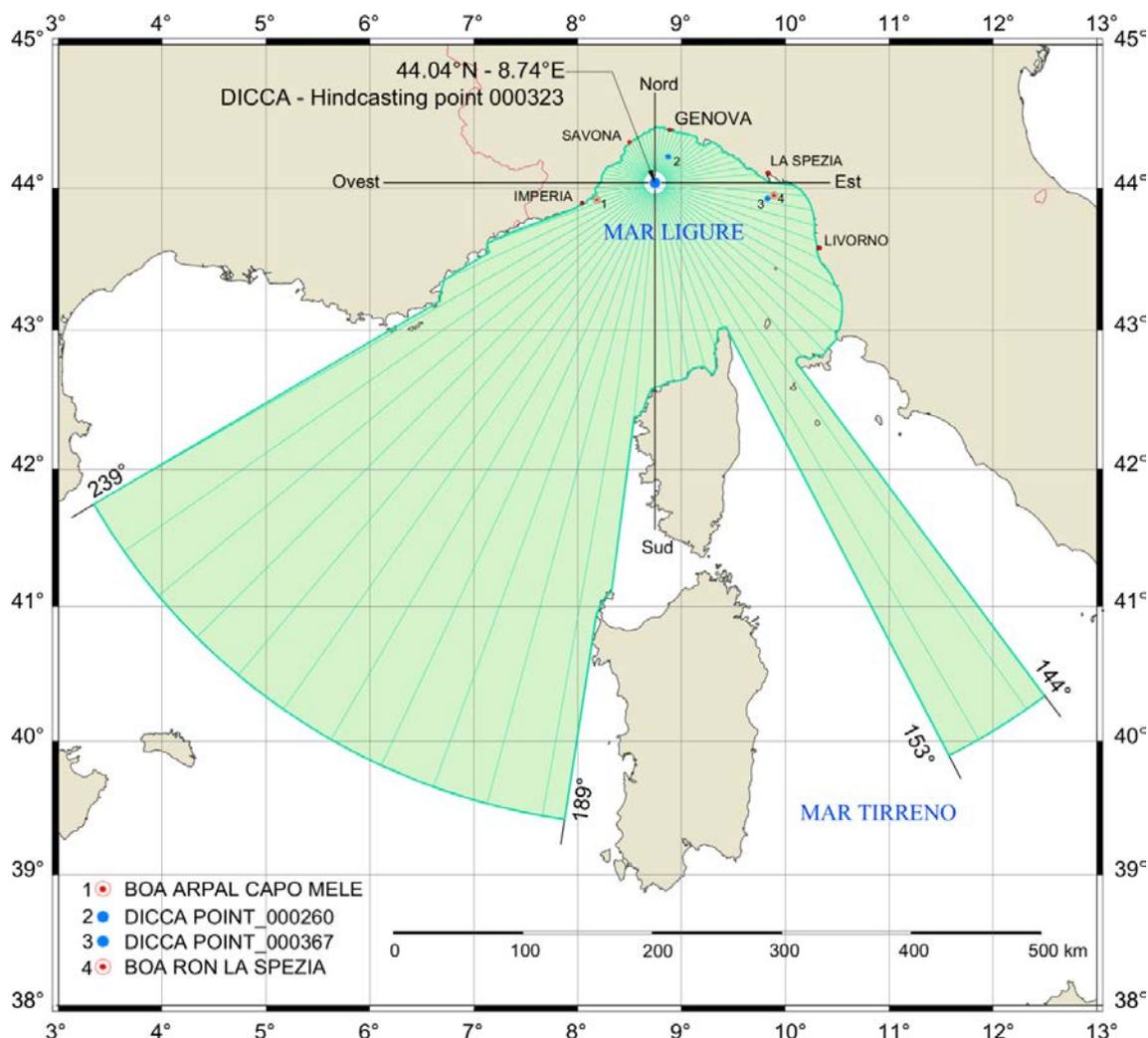


FIGURA 2-4. FETCH GEOGRAFICO AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA  
PUNTO DI COORDINATE 44.04°N - 8.74°E.

Il *fetch efficace*, a differenza di quello geografico, tiene conto del fatto che durante il processo di trasferimento di energia dal vento alle onde e quindi durante la generazione del moto ondoso, gli stati di mare generati presentano energia dispersa in direzione.

La dispersione direzionale dell'energia avviene in un settore angolare di ampiezza pari a  $\pm\theta$  rispetto alla direzione  $\phi_w$  lungo la quale agisce il vento. Tale fenomeno modifica l'estensione del fetch geografico e in generale lo riduce in assenza di coste.

In condizioni di mare aperto dove non sono presenti coste in grado di limitare il processo di generazione delle onde, la direzione media delle onde generate tende a coincidere con quella di azione del vento.

In presenza di bacini chiusi o semichiusi, le coste non solo modificano le lunghezze delle aree di generazione relative alle direzioni poste a cavallo della direzione di azione del vento  $\phi_w$  determinando una ulteriore modifica della lunghezza del fetch, ma causano anche la

Pag. 21 di 172

rotazione tra la direzione di azione del vento e la direzione media di propagazione delle onde generate. Questo secondo effetto tende progressivamente ad aumentare al diminuire dell'angolo formato tra la direzione di azione del vento e la linea di costa, determinando valori massimi di deviazione tra la direzione del vento e quella delle onde quando il vento spirava parallelamente alla costa.

Pertanto il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione sulla quale può spirare il vento,  $\phi_w$ , risulta funzione anche dei valori dei *fetch* geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata poste nel settore direzionale  $\pm\theta$  rispetto a  $\phi_w$ .

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

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

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

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

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

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

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

$\theta$  ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di  $\theta = \pm 45^\circ$  mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta = \pm 90^\circ$ );

$n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n = 4$ ).

L'equazione deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991). Il calcolo del fetch efficace è stato eseguito utilizzando l'applicazione ENIF<sup>3</sup>, che risolve la precedente equazione e fornisce come risultato combinato l'estensione del fetch efficace e la deviazione direzione vento/direzione mare.

<sup>3</sup> Il software per ambiente windows ENIF per il calcolo automatico dei fetch efficaci è stato sviluppato e commercializzato dalla società MODIMAR s.r.l.

## Studio delle condizioni meteomarine

I risultati dell'elaborazione sono riportati graficamente nel diagramma polare di Figura 2-5 e Figura 2-6.

In Tabella 2-1 sono riportati i valori dell'estensione dei fetch in funzione della direzione. I massimi fetch efficaci si hanno tra le direzioni 190°N e 230°N, con un'estensione media di 327 km ed un massimo di circa 345 km in direzione SudOvest (210°N).

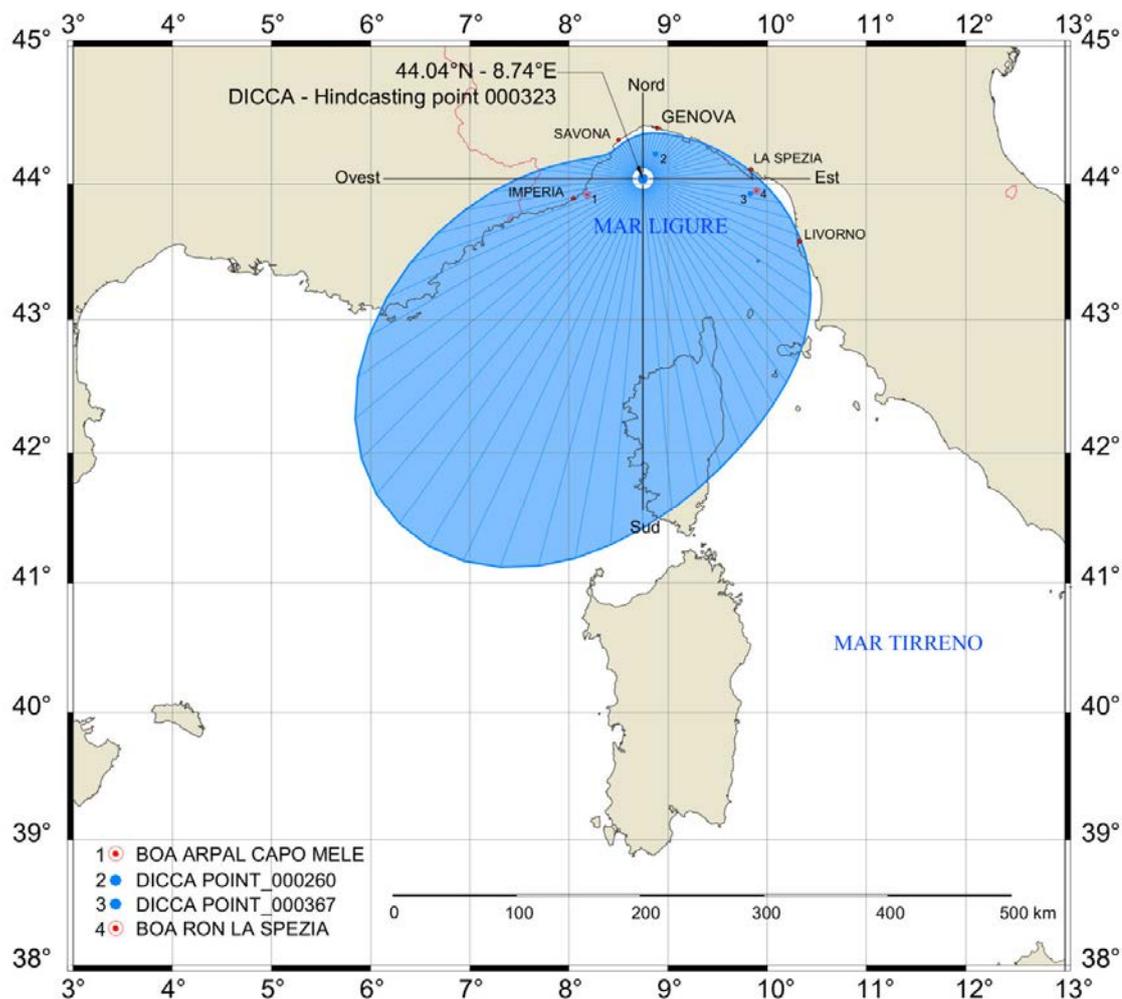


FIGURA 2-5. FETCH EFFICACE AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA  
PUNTO DI COORDINATE 44.04°N - 8.74°E.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 2-1. FETCH GEOGRAFICI, EFFICACI E DEVIAZIONE DIREZIONE VENTO/MARE AL LARGO DI GENOVA NEL PUNTO DI COORDINATE 44.04°N - 8.74°E.

Azimuth Vento	Fetch geografico	Fetch efficace	Deviazione vento/mare	Azimuth Vento	Fetch geografico	Fetch efficace	Deviazione vento/mare
[°Nord]	[km]	[km]	[gradi]	[°Nord]	[km]	[km]	[gradi]
0	43.2	36.2	8.0	180	159.7	284.7	15.0
10	42.8	37.6	10.0	190	500.0	313.9	10.0
20	42.6	39.4	17.0	200	500.0	336.8	5.0
30	44.1	41.7	25.0	210	500.0	345.7	0.0
40	47.2	45.1	30.0	220	500.0	334.9	-6.0
50	46.3	50.0	34.0	230	500.0	303.4	-11.0
60	57.1	56.8	34.0	240	500.0	255.6	-17.0
70	62.6	66.1	33.0	250	137.8	200.0	-23.0
80	70.9	78.2	30.0	260	45.7	146.0	-28.0
90	87.7	93.9	27.0	270	42.0	100.9	-34.0
100	123.2	113.0	24.0	280	40.6	68.2	-39.0
110	132.4	134.3	21.0	290	37.2	47.9	-43.0
120	162.1	155.7	19.0	300	31.2	37.5	-47.0
130	182.2	175.5	18.0	310	33.0	33.4	-51.0
140	176.6	193.6	19.0	320	35.9	32.6	-54.0
150	500.0	211.4	21.0	330	37.1	33.0	-55.0
160	133.9	231.5	21.0	340	37.7	33.9	7.0
170	151.0	256.0	18.0	350	39.5	35.0	7.0

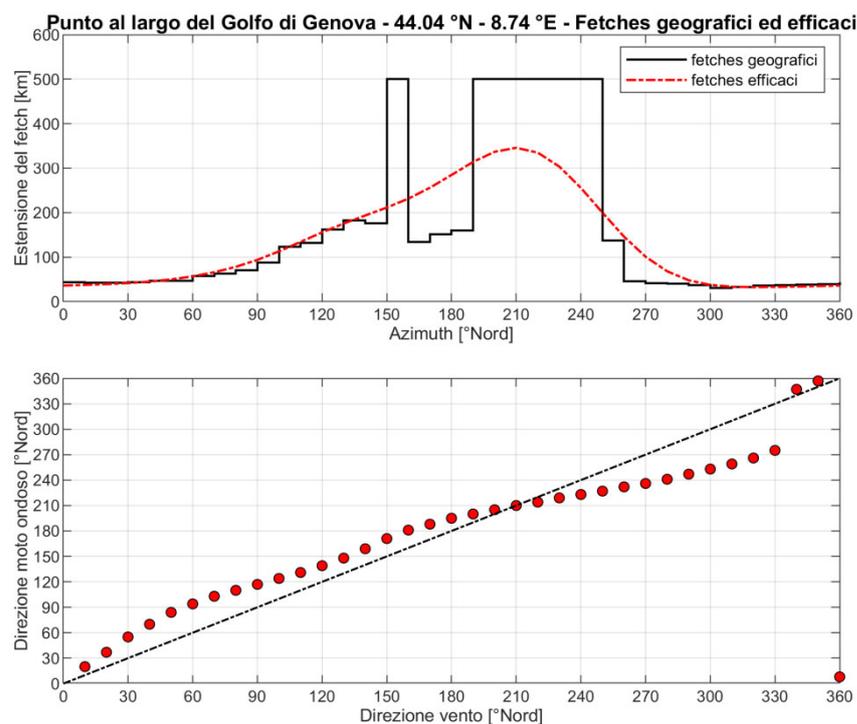


FIGURA 2-6. ESTENSIONE DEI FETCHES E LEGGE DI DEVIAZIONE VENTO/MARE AL LARGO DI GENOVA NEL PUNTO DI COORDINATE 44.04°N - 8.74°E.

### 3 REVISIONE DEGLI STUDI PREGRESSI IN RELAZIONE ALLA DEFINIZIONE DELLE ONDE ESTREME

#### 3.1 Premessa

Preliminarmente all'esecuzione del presente studio, è stata condotta l'analisi degli studi disponibili finalizzati alla definizione delle onde estreme al largo del Porto di Genova. Gli studi esaminati, forniti dalla AdSP, sono elencati nella Tabella 3-1.

TABELLA 3-1. ELENCO DEGLI STUDI DI RIFERIMENTO PER LA DEFINIZIONE DELLE ONDE ESTREME

- Boccotti, P. (1986 a), *Studio per la definizione del clima ondoso nel paraggio del Porto di Voltri*, Istituto di Idraulica Università di Genova n. 06/86, 29/10/1986, Committente Polytecnica Arris S.p.a;
- Boccotti, P. (1986 b), *Previsione delle onde per i mari italiani. Parte I: un'impostazione del problema con particolare riferimento al mar Ligure*, XX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Padova, 8-10 settembre 1986;
- Boccotti, P. (1986 c), *Previsione delle onde per i mari italiani. Parte II: confronti tra i livelli ondosi da diversi settori, in differenti aree, a vari livelli del periodo di ritorno*, XX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Padova, 8-10 settembre 1986;
- DHI (2003), *Numerical modelling of Wave Agitation at Calata Sanità and Calata Bettolo*, Final Report, August 2003, Committente: Autorità Portuale di Genova.
- DICAT - Università degli Studi di Genova, (2008) *Criteri per la determinazione del clima ondoso al largo della costa ligure*. Relazione n. 24/2008, Committente Regione Liguria – Progettazione Opere Marittime;
- D'Appolonia (2008), *Ipotesi di riutilizzo dello smarino della Gronda*, Doc. No. 07-578-H1 Rev. 0 – Aprile 2008, Committente: Autorità Portuale di Genova.
- DHI (2010), *Ripristino mantellata esterna diga foranea e molo duca degli Abruzzi – Studio meteo marino a supporto della progettazione*, ottobre 2010, Committente: Autorità Portuale di Genova;
- DHI (2017), *Relazione Specialistica di modellazione dell'agitazione ondosa*, settembre 2017, Committente: Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale.

L'analisi degli studi ha evidenziato che quelli eseguiti in data antecedente al 2008 sono stati basati su serie storiche di dati di moto ondoso ottenute mediante osservazioni visive degli stati di mare (anche dette “osservazioni a vista”), talvolta confrontate con misure dirette ondametriche di estensione temporale comunque limitata e inferiore rispetto alle prime.

A partire dal 2008 si è iniziato a far riferimento a serie storiche ondametriche *ricostruite in re-analisi*, rese disponibili dai principali centri meteorologici mondiali. Queste serie storiche - grazie ai rilevanti lavori di ricostruzione dei dati raccolti nel passato eseguiti dagli stessi centri meteorologici - hanno progressivamente incrementato la loro estensione temporale fino a superare quelle che caratterizzano i “data base” delle osservazioni visive che per contro, a ragione della loro maggiore imprecisione, non sono stati più aggiornati.

Inoltre è stata progressivamente migliorata la copertura geografica e la risoluzione temporale dei “data base” in re-analisi. Per queste ragioni si è deciso di suddividere il presente paragrafo in due parti, ovvero studi eseguiti prima e dopo il 2008.

### **3.2 Studi eseguiti prima del 2008**

#### **3.2.1 Boccotti (1986) e DICCA (2008)**

Per analizzare gli studi eseguiti prima del 2008 per il litorale ligure e in particolare per il Porto di Genova, conviene far riferimento in primo luogo al documento DICAT (2008) dove sono analizzati gli studi eseguiti in precedenza. In particolare il documento ha per oggetto la determinazione del clima ondoso al largo della costa ligure.

Nell’ambito di questo studio sono stati analizzati criticamente anche i dati disponibili per la definizione del clima ondoso a largo della Liguria, la quale è stata suddivisa in quattro zone: per ciascuna zona lo studio fornisce le curve di previsione degli eventi estremi di moto ondoso ritenute al tempo ottimali. In base a tale suddivisione, il Porto di Genova rientra nella Zona 2, compresa tra Capo Manara e Capo di Vado.

Per le finalità del presente lavoro si ritiene opportuno riportare i dati allora esistenti per la costa ligure i quali sono stati suddivisi nelle seguenti categorie:

- a) dati strumentali (misure dirette eseguite in sito);
- b) dati ricostruiti con modelli numerici (dati ricostruiti in re-analisi);
- c) dati visuali (misure indirette eseguite in sito).

Alla prima categoria di dati appartengono:

- [1] i dati acquisiti dalla boa accelerometrica direzionale RON (Rete Ondametrica Nazionale) di La Spezia dal 1989 al 2001. Questi dati non sono stati utilizzati per la zona 2 in quanto ritenuti geograficamente poco rappresentativi per una applicazione diretta alla stessa zona;
- [2] i dati di moto ondoso non direzionali misurati presso l’Isola del Porto Petroli (piattaforma localizzata su circa 50 m di profondità nella posizione 44° 25’ Nord e 8° 50’ Est) disponibili tra il 1998 e il 2001 e tra il 2004 e il 2006. Nel documento si dichiara che questi dati, pur essendo di interesse per la zona 2, presentano parecchie interruzioni;
- [3] i dati di moto ondoso non direzionali eseguiti presso la Stazione Meteorologica di METEOFRENCE al largo di Nizza (profondità di oltre 2000 m alla distanza di oltre 50 km dalla costa nella posizione 43° 24’ N e 7° 48’ Est) disponibili tra il 1998 e il 2006. Nel documento si dichiara che questi dati sono di interesse per la zona 4;
- [4] i dati direzionali di moto ondoso della stazione meteomarina del CNR (boa ODAS nella posizione 43° 49’ Nord e 9° 7’ 30’’ Est) che ha funzionato ad intervalli irregolari (i

dati sono stati resi disponibili dal Luglio 2006 al Giugno 2007), giudicati dallo studio non sufficienti per eseguire una indagine statistica;

[5] i dati non direzionali eseguiti negli anni '80 con funzionamento saltuario a largo di Genova Nervi (profondità 35 m).

Alla seconda categoria di dati appartengono:

[6] i dati dell'Atlante MEDATLAS (consorzio europeo di cui faceva parte CNR-ISMAR) costituito da dati esaorari ricostruiti dal 1989 al 1999 mediante il modello numerico di terza generazione WAM e tarati con dati dell'archivio ECMWF (European Center for Medium Range Forecast);

[7] i dati ricostruiti da UKMO (United Kingdom Meteorological Office) relativi agli anni 1987-1998 sulla base del modello di previsione di seconda generazione UKMO (European Forecasting Model);

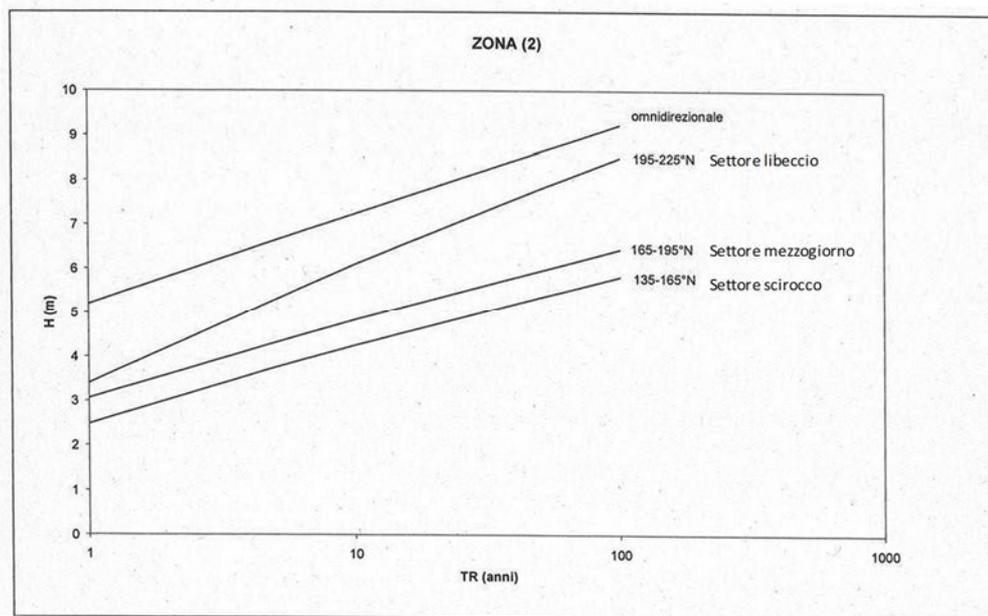
Alla terza categoria di dati appartengono:

[8] i dati visuali eseguiti da navi in transito nel Mar Ligure appartenenti all'archivio del Reale Istituto Meteorologico Olandese (KNMI) negli anni 1961-1980.

Per la zona 2 in cui ricade, come detto, il Porto di Genova, nelle conclusioni dello studio si dichiara di ritenere appropriato proporre per le curve di previsione degli eventi estremi quelle elaborate da Boccotti (1986 a, b, c) sulla base dei dati visuali del KNMI (1961-1980). Le curve di previsione di Boccotti (correlazione altezza d'onda significativa  $H_s$  con il tempo di ritorno  $T_r$ ) riportate in Figura 3-1, sono riferite ad una boa virtuale localizzata a circa 5 km dalla costa su una profondità di circa 100 m. La correlazione  $H_s$ - $T_r$  viene definita sia con riferimento alla statistica omnidirezionale, sia ai seguenti settori di traversia:

- 135-165° N (Scirocco);
- 165-195° N (Mezzogiorno);
- 195-225° N (Libeccio).

***Mari omnidirezionali.*** Per quanto riguarda la statistica omnidirezionale la curva di Figura 3-1 si riferisce alla curva di Weibull a due parametri avendo ipotizzato una durata media delle mareggiate triangolari equivalenti pari a 72 ore.

FIGURA 3-1. CORRELAZIONE  $H_s$ - $T_R$  A LARGO DEL PORTO DI GENOVA (BOCCOTTI, 1986)

**Mari direzionali.** Boccotti individua settori di ampiezza 30 gradi e ipotizza che durante la mareggiata la direzione resti costante, ovvero rimanga nello stesso settore, per tutto il tempo in cui l'altezza d'onda significativa si mantiene sopra una soglia assegnata, che assume pari a 2,0 m. Suggerisce quindi di adottare, per ciascuno dei settori di provenienza, due coefficienti relativi alla funzione di probabilità di superamento che si mantiene comunque maggiore della Weibull a due parametri ottenuta per il mare omidirezionale. Omettendo di riportare le relazioni analitiche che consentono di ottenere le curve di Figura 3-1 per le quali si rimanda al documento originale, nella Tabella 3-2 si riassumono i risultati ottenuti.

TABELLA 3-2 - RISULTATI DELLA STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI OTTENUTA DA BOCCOTTI (1986) AL LARGO DI GENOVA.

Settore		Tr (anni)	1	5	10	50	100
Omidirezionale	Tr (anni)	1	5	10	50	100	
	$H_s$ (m)	5,2	6,6	7,2	8,6	9,2	
135-165° N (Scirocco)	Tr (anni)	1	5	10	50	100	
	$H_s$ (m)	2,5	3,8	4,3	5,4	5,8	
165-195°N (Mezzogiorno)	Tr (anni)	1	5	10	50	100	
	$H_s$ (m)	3,1	4,3	4,8	6,0	6,4	
195-225°N (Libeccio)	Tr (anni)	1	5	10	50	100	
	$H_s$ (m)	3,4	5,3	6,1	7,8	8,5	

**Studio delle condizioni meteomarine****3.2.2 DHI (2003)**

Nel 2003 il DHI ha eseguito uno studio di agitazione interna portuale per la Calata Sanità e la Calata Bettolo del Porto di Genova, prendendo in esame gli stati di mare incidenti sulle opere foranee del porto riportati Tabella 3-3. Nel documento non è specificato come sono stati dedotti gli stati di mare.

**TABELLA 3-3 - CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI INCIDENTI UTILIZZATI DA DHI (2003) PER LO STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA PORTUALE DI CALATA SANITÀ E BETTOLO. TABELLA ESTRATTA DAL DOCUMENTO ORIGINALE.**

Offshore wave direction	Recurrence period	Significant wave height, $H_{m0}$ (m)	Peak period, $T_p$ (s)
SE	1 year	2.9	8.5
SE	10 years	4.5	10.5
SE	50 years	5.6	12.0
S	1 year	3.4	9.0
S	10 years	5.1	11.0
S	50 years	6.3	12.5
SW	1 year	3.1	9.5
SW	10 years	5.3	12.5
SW	50 years	6.5	14.5

Si ritiene che un confronto diretto tra la Tabella 3-3 e la Tabella 3-2 non sia corretto in quanto mentre la prima si riferisce ad una profondità molto prossima alla diga foranea del porto, la seconda si riferisce a condizioni di acqua profonda stimate su un fondale di circa 100 m a 5 km dalla costa. Comunque confrontando le tabelle si osserva che lo studio del DHI fornisce condizioni di moto ondoso inferiori rispetto a quelle di Boccotti per il settore di libeccio e condizioni leggermente superiori per scirocco e mezzogiorno.

**3.2.3 D'Appolonia (2008)**

Lo studio di D'Appolonia (2008) prende in esame numerose fonti di dati.

Per quanto riguarda le misure dirette di moto ondoso eseguite presso l'Isola del Porto Petroli (vedi [2] DICAT, 2008), D'Appolonia conferma l'elevata mancanza di dati (circa il 92%) rilevata anche dal DICAT (2008) e dichiara che questi dati sono scarsamente attendibili perché le misure sono influenzate dalla presenza della struttura di sostegno della stessa piattaforma.

Per quanto riguarda le osservazioni a vista lo studio, oltre ai dati del KNMI analizzati anche dallo studio DICAT (2008), prende in esame anche quelli del SSMO ("Summary of Synoptic Meteorologic Observations) raccolti dall' U.S. Naval Weather Service Command nel 1978 e relativi al periodo compreso tra il 1910 e il 1970.

Lo studio evidenzia che le osservazioni a vista forniscono dati soggettivi che generalmente tendono a sovrastimare le onde più alte e a sottostimare quelle più basse.

Nell'ambito dello studio viene eseguito un confronto tra le altezze d'onda significativa caratterizzate da un tempo di ritorno di 100 anni ottenute prendendo in esame le seguenti basi di dati: SSMO; KNMI (non calibrato); KNMI calibrato e ondometro La Spezia.

Lo studio conclude che i dati del KNMI non calibrati, presi in esame da Boccotti (1986), forniscono valori estremi di moto ondoso sovrastimati rispetto ai risultati forniti dalle altre fonti di dati, i quali invece presentano tra di loro valori confrontabili. Tenendo peraltro conto che i dati misurati dalla boa ondometrica direzionale RON di La Spezia (vedi [1] DICAT, 2008) contengono anche la direzione del moto ondoso, D'Appolonia decise di far riferimento per le analisi statistiche ai dati forniti dalla boa RON.

### **3.3 Studi eseguiti dopo il 2008**

Più recentemente il DHI ha eseguito due studi, il primo nel 2010, l'ultimo nel 2017.

Come indicato nella premessa questi studi, a differenza dei precedenti, fanno riferimento a serie storiche di moto ondoso ricostruite sulla base di serie storiche di campi di vento a loro volta ricostruiti in re-analisi a partire dai modelli meteorologici a grande scala.

#### **3.3.1 DHI (2010)**

Senza entrare nel dettaglio, nel 2010 il DHI mette a confronto due tipi di serie storiche di moto ondoso ricostruite: la prima è quella fornita dal modello UKMO del Met-Office (centro meteorologico inglese) che copriva un arco di tempo di 20 anni con cadenza trioraria; la seconda è quella fornita dalla CREST S.r.l. che copriva, con cadenza oraria, un arco di tempo anch'esso ventennale, dal 1989 al 2008. Sulla base della serie storica del CREST, giudicata dai redattori dello studio più attendibile rispetto all'altra, il DHI perviene alle onde estreme riportate nella Tabella 3-4 dove sono indicate anche le deviazioni standard da associare ai valori delle  $H_s$ .

Il DHI, tenendo conto che i dati del CREST presentano un certo margine di incertezza non essendo stati calibrati con misure dirette di moto ondoso eseguite nel sito di interesse, ritiene opportuno cautelativamente considerare come valori di riferimento per l'altezza d'onda significativa con assegnato tempo di ritorno, le stime centrali riportate nella Tabella 3-4, incrementate dell'intero intervallo pari alla deviazione standard, ottenendo i valori riportati nella Tabella 3-5.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 3-4 - STATISTICA OTTENUTA A LARGO DI GENOVA DAL DHI 2010 SULLA BASE DELLA SERIE STORICA CREST

*Analisi statistica degli eventi estremi: Valori di altezza d'onda significativa (Hs) e deviazione standard (ST.D) in funzione del periodo di ritorno T.*

T	Omni		SE		S		SO	
	Hs	D.ST	Hs	D.ST	Hs	D.ST	Hs	D.ST
[anni]	[m]							
50	6.32	0.43	3.30	0.39	3.30	0.35	6.32	0.43
100	6.59	0.50	3.55	0.47	3.52	0.41	6.59	0.50
200	6.85	0.58	3.79	0.56	3.72	0.49	6.85	0.58

TABELLA 3-5 - STATISTICA OTTENUTA A LARGO DI GENOVA DAL DHI 2010 SULLA BASE DELLA SERIE STORICA CREST INCREMENTATA CON I VALORI DELLA DEVIAZIONE STANDARD RIPORTATI NELLA TABELLA 3-4.

*Valori di altezza d'onda significativa e periodo di picco al largo, già incrementati dell'intero intervallo di deviazione standard.*

	T	Hs	Tp
	anni	[m]	[m]
SE	50	3.69	8.9
	100	4.02	9.2
	200	4.35	9.4
S	50	3.65	8.9
	100	3.93	9.1
	200	4.21	9.3
SO	50	6.75	10.8
	100	7.09	11
	200	7.42	11.2

Confrontando i risultati statistici riportati in Tabella 3-5 con quelli di Tabella 3-2, si osserva che i risultati del DHI (2010) risultano decisamente inferiori rispetto a quelli ottenuti da Boccotti.

### 3.3.2 DHI (2017)

In questo studio il DHI utilizza come serie storica di moto ondoso di riferimento quella, denominata Mediterranean Wind Wave Model (MWM), ricostruita per l'intero bacino del Mediterraneo, prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste.

Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica basata su due modelli. Il primo è costituito dal modello atmosferico WRF-ARW, mentre il secondo dal modello spettrale di moto ondoso di terza generazione MIKE 21 SW del DHI. Il database di moto ondoso prodotto e utilizzato per lo studio, copre 37 anni (dal 1979 al 2015) con una cadenza temporale oraria. I dati anemometrici e ondometrici sono stati validati

mediante confronti con anemometri ed ondometri, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda eseguite da satellite.

La base dati utilizzata dal modello atmosferico WRF-ARW è costituita dai dati atmosferici ricostruiti in re-analisi a scala globale denominati CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) prodotta da NCEP che è un consorzio di nove centri meteorologici statunitensi che dipendono da NWS (National Weather Service) della NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) del Dipartimento del Commercio degli Stati Uniti d'America.

Nello studio viene riportato il clima medio annuale direzionale a largo di Genova ma non viene definita la correlazione statistica tra altezza d'onda significativa e tempo di ritorno. Si dichiara solo che i valori massimi di  $H_s$  ricostruiti raggiungono circa i 5,0 m.

Nello studio del DHI (2017) viene riportata la validazione del database di moto ondoso ricostruito che è stata eseguita effettuando un *confronto sincro* con i dati satellitari e con i dati misurati dalla boa RON di La Spezia.

I risultati del confronto mostrano che:

- il moto ondoso ricostruito sottostima i dati satellitari;
- il moto ondoso ricostruito sottostima i dati misurati dalla boa di La Spezia (SYM\_SLOPE 0,9 e BIAS -0,09).

### **3.4 Conclusioni**

L'analisi degli studi pregressi effettuati per il paraggio di Genova ha mostrato che i risultati ottenuti da Boccotti negli anni '80 per le onde estreme al largo di Genova, basati sulle osservazioni a vista eseguite dalle navi in transito nel Mar Ligure, non sono stati finora mai superati in termini di caratteristiche estreme delle onde dai risultati ottenuti dagli studi eseguiti nel seguito, basati su dati di moto ondoso in ricostruzione i quali hanno anche evidenziato che i dati in ricostruzione presentano in generale una sottostima dei parametri di moto ondoso.

A riguardo delle analisi effettuate da Boccotti su osservazioni a vista del moto ondoso occorre far presente che, oltre al livello di approssimazione intrinseco in questo tipo di rilevazione, questa tipologia di dati presenta, come evidenziato da De Girolamo e Noli, 2019 ("Ingegneria dei Trasporti Navali", edizioni Egaf) due ulteriori limitazioni che sono costituite dalla:

- (i) irregolarità del tempo di campionamento dei dati;
- (ii) scarsa rappresentatività geografica dei dati.

Il secondo aspetto è legato al primo in quanto, al fine di aumentare la popolazione dei dati da analizzare e quindi di ridurre il loro tempo di campionamento, generalmente si tende ad aumentare la superficie dell'area utilizzata per selezionare il campione di dati da sottoporre ad analisi statistica. Operando in tal modo in bacini chiusi o semichiusi come il Mar Ligure, dove le aree di generazione delle onde ("fetch") sono fortemente condizionate dalla presenza della "terraferma", si introducono nella base dati di riferimento osservazioni eseguite in condizioni di "fetch" fortemente dissimili una dall'altra e di conseguenza si riduce la rappresentatività geografica degli stessi dati.

Si evidenzia in questa sede che, nonostante le limitazioni sopra illustrate, dovute al fatto che all'epoca non erano disponibili altre tipologie di dati ondametrici, i risultati delle analisi statistiche eseguite da Boccotti hanno costituito il principale riferimento per le attività di progettazione del Porto di Genova negli ultimi 35 anni e sono stati pertanto tenuti in considerazione per la redazione del presente studio.

Una seconda conclusione riguarda il fatto che finora nessuno studio ha utilizzato in modo complementare le due fonti di dati di moto ondoso oggi disponibili che, per affidabilità statistica, risultano sicuramente molto superiori rispetto alle osservazioni visive eseguite dalle navi in transito. Queste due fonti di dati sono costituite:

- dai dati ondametrici ricostruiti in re-analisi dai centri meteorologici mondiali;
- dalle misure ondametriche dirette.

Si evidenzia infine che gli studi finora eseguiti non hanno preso in esame la mareggiata che si è verificata a Genova il 19 febbraio del 1955 la quale provocò ingenti danni al Porto di Genova.

## 4 DATI METEOMARINI UTILIZZATI

### 4.1 A. Dati di vento

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati di vento, costituiti da serie storiche, acquisiti e analizzati precisando se si tratta di dati ricostruiti (in re-analisi) mediante modelli meteorologici o di dati provenienti da misure dirette. Per ogni tipologia di dato si riporta la fonte, la descrizione sintetica del dato, la posizione geografica alla quale il dato si riferisce.

TABELLA 4-1. FONTE E DESCRIZIONE DEI DATI DI VENTO

Dati in ricostruzione				
Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
A.1	Università di Genova Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) MeteOcean WWIII 40-Year Wave Hindcast  www3.dicca.unige.it/meteocean	Dati di vento ricostruiti con il modello di circolazione atmosferico WRF-ARW al largo di Genova	8.74 °E 44.04 °N	1979 2018
A.2	CNR-ISMAR	MedAtlas Wind and Wave Mediterranean Atlas	9.00 °E 44.00 °N	1992 2001
Dati misurati				
Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
A.3	Rete Mareografica Nazionale (RMN) Stazione di Genova  http://dati.isprambiente.it/	Dati di vento misurati dalla stazione mareografica RMN di Genova	08.922°E 44.409°N	1998 2018
A.4	Stazione WMO 16120 Aeroporto di Genova-Sestri	Dati di vento SYNOP misurati dalla stazione WMO dell'aeroporto di Genova Sestri	8.85°E 44.40°N	2008 2019
A.5	ARPAL Regione Liguria www.cartografiarl.regione.liguria.it	Dati di vento della stazione meteo di Genova Punta Vagno	8.95°E 44.39°N	2013 2019

### 4.2 B. Dati di moto ondoso

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati di moto ondoso, costituiti da serie storiche, acquisiti e analizzati specificando se si tratta di dati ricostruiti (in re-analisi) mediante modelli numerici che si basano su dati meteorologici o di dati provenienti da misure dirette. Per ogni tipologia di dato si riporta la fonte, la descrizione sintetica del dato, la posizione geografica alla quale il dato si riferisce.

**Studio delle condizioni meteomarine**

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**TABELLA 4-2. FONTE E DESCRIZIONE DEI DATI DI MOTO ONDOSI**

<b>Dati misurati</b>				
<b>Rif.</b>	<b>Fonte dati</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Periodo</b>
B.1	Rete Ondametrica Nazionale (RON) Boa di La Spezia <a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>	Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica di La Spezia (RON 1.0-2.0-3.0)	9.827 °E 43.929 °N	1989 2014
B.2	Agenzia Regionale per la Protezione dell' Ambiente Ligure (ARPAL) <a href="https://www.arpal.gov.it/">https://www.arpal.gov.it/</a>	Dati di moto ondoso misurati dalla boa ondametrica di Capo Mele	8.182°E 43.920 °N	2012 2019
B.3	ENEL-CNR	Dati di moto ondoso non direzionali misurati dalla boa ondametrica di Genova Nervi	9°2'30" E 44°22'0"N	1978 1982
<b>Dati in ricostruzione</b>				
<b>Rif.</b>	<b>Fonte dati</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Posizione</b>	<b>Periodo</b>
	Università di Genova Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale MeteOcean DICCA WWIII 40-Year Wave Hindcast <a href="http://www3.dicca.unige.it/meteocean">www3.dicca.unige.it/meteocean</a>	Dati di moto ondoso ricostruiti con il modello di generazione e propagazione WWIII		
B.4	Dicca MeteOcean	Point_000323 al largo del Golfo di Genova	8.74 °E 44.04 °N	1979 2018
B.5	Dicca MeteOcean	Point_000367 al largo di La Spezia	9.88 °E 43.95 °N	1979 2018
B.6	Dicca MeteOcean	Point_000354 al largo di Capo Mele	8.234 °E 43.86 °N	2012 2018

È interessante osservare che proprio al porto di Genova furono effettuate le prime misure strumentali dirette di moto ondoso a livello mondiale: negli anni 1929-32 furono installati piezometri a diverse quote su due cassoni della diga foranea (allora Molo Principe Umberto), come illustrato in Figura 4-1 e in Figura 4-2.

È davvero un peccato che poi, nonostante si tratti del principale porto italiano, non siano stati installati e gestiti in modo continuativo stazioni di misura del vento e delle onde al largo delle dighe a mare, i cui dati sono così preziosi per il progetto delle opere marittime e la gestione dei lavori e delle attività portuali.

## Studio delle condizioni meteomarine

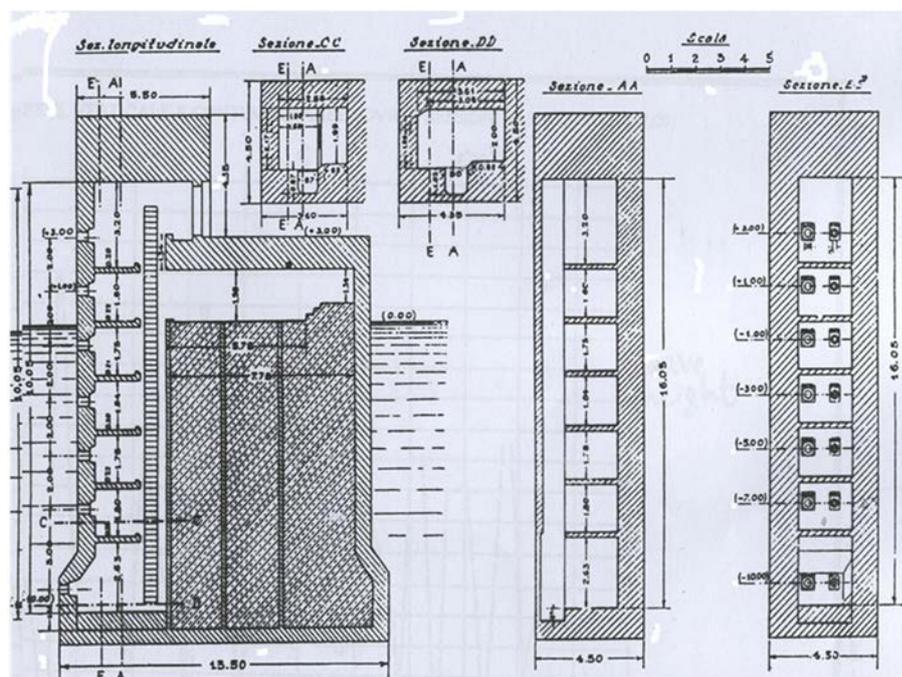


FIGURA 4-1. SEZIONI DEL CASSONE SPECIALE COSTRUITO PER IL RILEVAMENTO DELLA PRESSIONE ESERCITATA DALL'ONDA SULLA PARETE VERTICALE FINO A QUOTA -10.00.

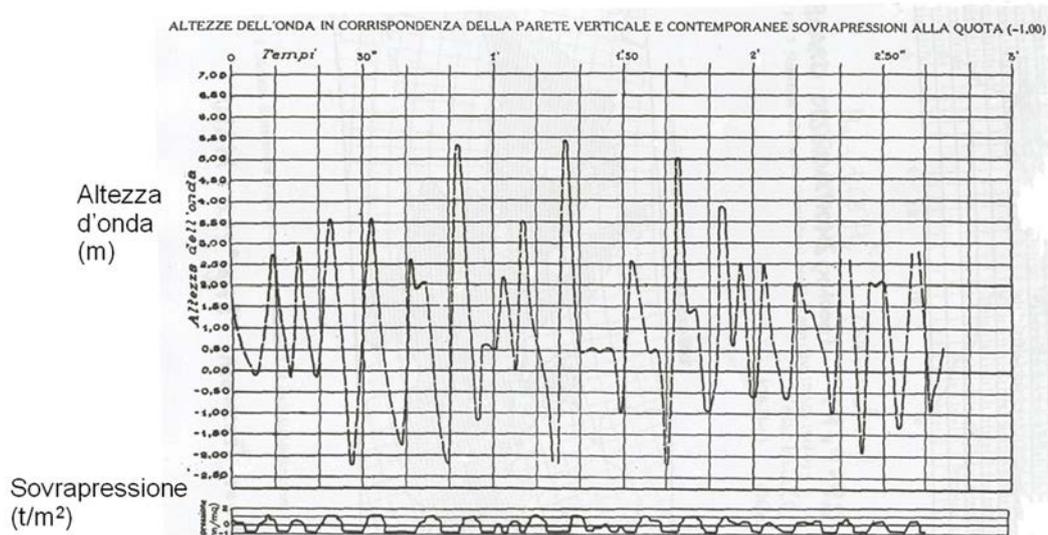


FIGURA 4-2. ESEMPIO DI REGISTRAZIONE ONDAMETRICA EFFETTUATA SUL CASSONE SPECIALE DELLA DIGA FORANEA DI GENOVA (FONTE: ANNALI DEI LAVORI PUBBLICI GIÀ GIORNALE DEL GENIO CIVILE - ANNO 1932)

**Studio delle condizioni meteomarine****4.3 C. Dati mareografici**

Si riporta nella seguente tabella l'elenco dei dati mareografici, costituiti da serie storiche, acquisiti e analizzati. Per ogni tipologia di dato si riporta la fonte, la descrizione sintetica del dato, la posizione geografica alla quale il dato si riferisce.

**TABELLA 4-3. FONTE E DESCRIZIONE DEI DATI MAREOGRAFICI**

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
C.1	Rete Mareografica Nazionale (RMN) Stazione di Genova <a href="http://dati.isprambiente.it/">http://dati.isprambiente.it/</a>	Dati di livello misurati dalla stazione mareografica RMN di Genova	08.922°E 44.409°N	1998 2019
C.2	Istituto Idrografico Marina Militare Italiana	Dati di livello misurati dalla stazione mareografica di Genova	08°55'33"E 44°24'21"N	1960 2018
C.2	Istituto Idrografico Marina Militare Italiana	Costanti armoniche di marea per il porto di Genova		

## 5 REGIME DEI VENTI

La conoscenza del regime anemometrico è di interesse in campo portuale per vari aspetti applicativi. Ad esempio il vento influenza la manovrabilità delle navi, genera il moto ondoso, fornisce un contributo alla circolazione idrodinamica costiera. Nell'ambito del presente progetto, inoltre, il regime anemometrico è stato utilizzato per il dimensionamento di generatori eolici da posizionare sulla nuova diga foranea.

A causa della presenza dell'Appennino Ligure, nel Golfo di Genova il vento è influenzato dall'orografia, per cui le caratteristiche anemometriche in costa possono risultare diverse rispetto a quelle di largo.

Per l'analisi del regime dei venti al largo si è fatto riferimento ai dati ricostruiti in ri-analisi forniti dal DICCA (vedi Tabella 4-1 - rif. A.1) e dal MedAtlas (vedi Tabella 4-1 - rif. A.2) mentre in costa si è fatto riferimento alle misure anemometriche dirette effettuate dalla stazione ISPRA-RMN di Genova, dalla stazione meteo dell'aeroporto di Genova-Sestri e dalla stazione meteo ARPAL di Punta Vagno. L'ubicazione dei punti dove sono state ricostruite le condizioni anemometriche a largo e degli anemometri in costa è mostrata in Figura 5-1.

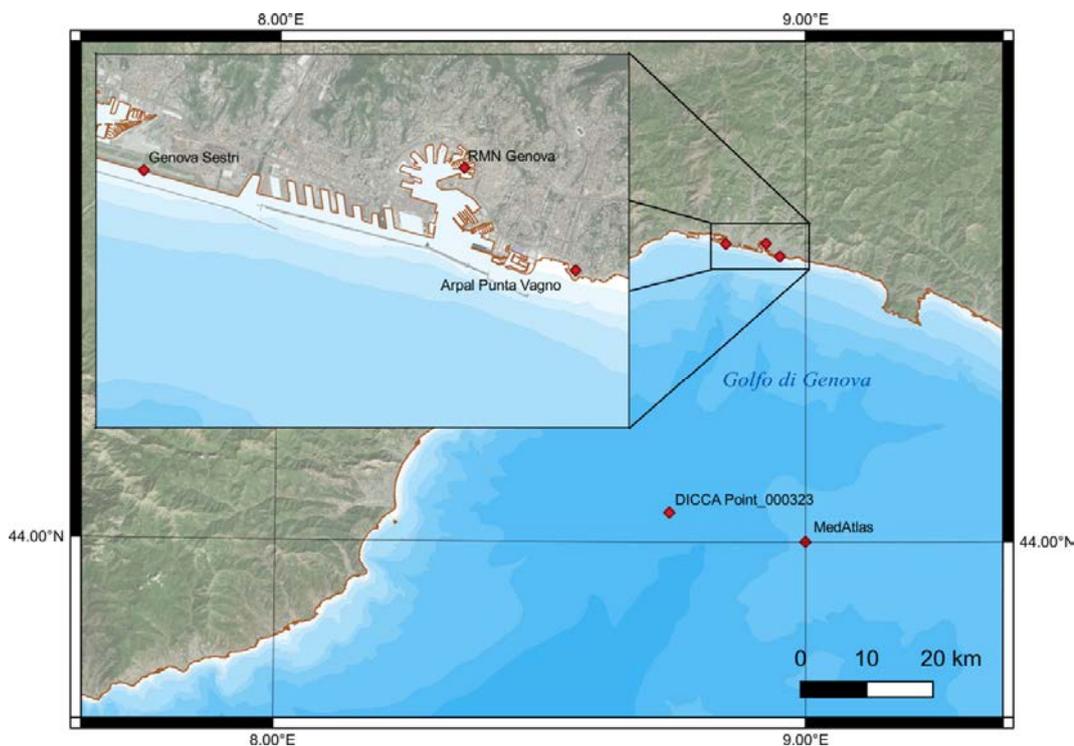


FIGURA 5-1. LOCALIZZAZIONE DELLE DIVERSE FONTI DI DATI ANEMOMETRICI UTILIZZATE PER LA DEFINIZIONE DEL REGIME DEI VENTI AL LARGO E SOTTOCOSTA.

## **5.1 Regime anemometrico al largo**

### 5.1.1 Dati in ricostruzione forniti dal DICCA

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università di Genova nell'ambito del progetto MeteOcean ha implementato una procedura di rianalisi del evento e del moto ondoso per tutto il Mediterraneo a partire dal 1979 con cadenza oraria.

Il vento, fornito a 10 metri di altezza sul livello del mare, è stato ricostruito utilizzando il modello di circolazione atmosferica non idrostatico WRF-ARW.

Per il modello WRF è stato definito un unico dominio computazionale di 328x265 punti, che copre il Mediterraneo occidentale e centrale con una risoluzione orizzontale di 10 km. Le condizioni iniziali e al contorno per le simulazioni atmosferiche con il modello WRF fanno riferimento al database di rianalisi del CFSR (Climate Forecast System Reanalysis del NOAA-USA).

I modelli numerici di circolazione atmosferica, generazione e propagazione del moto ondoso sono stati oggetto di un accurato processo di validazione e ottimizzazione (vedi articoli pubblicati dal DICCA riportati in bibliografia) basato sul confronto con le misure ondometriche delle boe italiane (RON) e spagnole (REDEXT). In realtà il confronto è rivolto prevalentemente al moto ondoso, ma essendo i dati di moto ondoso fortemente correlati ai dati di vento si può assumere che la qualità di questi confronti possa essere estesa al vento.

Dal database del DICCA è stata acquisita la serie storica oraria dei dati di vento in ricostruzione (a quota +10 m s.l.m.m.) nel punto di 000323 di coordinate 44.04°N - 8.74°E al largo del Golfo di Genova dal 1979 al 2018.

In Tabella 5-1 sono riportati i risultati dell'analisi climatica dei dati di vento, ovvero il numero di eventi della serie storica oraria suddivisi per classi di direzione di provenienza e velocità del vento. Gli stessi risultati espressi sottoforma di frequenza campionaria di accadimento sono riportati nella Tabella 5-2 e in forma grafica nella Figura 5-2. Nella Figura 5-3 è riportata la velocità media mensile dei venti.

Queste analisi mostrano che i venti regnanti (più frequenti) provengono dal settore di Tramontana (0 °N) e da Libeccio (210 °N) con una frequenza di accadimento degli stati di vento con velocità superiore a 2.0 m/s rispettivamente pari al 35.4% e al 11.7%.

I venti dominanti (più intensi), con velocità del vento superiori a 14 m/s (vento forza 7 superiore a 30 nodi), si verificano in media poche ore all'anno e provengono prevalentemente dal settore di Tramontana e dal settore di Libeccio.

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 13.7%.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

L'intensità media dei venti, come mostrato nel grafico di Figura 5-3, risulta più elevata nei mesi invernali (gennaio, febbraio, marzo) e autunnali (ottobre, novembre, dicembre) con valori medi di velocità compresi tra 6.0 e 7.5 m/s. In primavera e in estate la velocità del vento si riduce assumendo valori compresi in media tra 4.0 e 5.0 m/s.

TABELLA 5-1. NUMERO DI EVENTI PER CLASSI DI DIREZIONE E VELOCITÀ DEI VENTI.  
PUNTO DICCA 000323 AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA (PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018)

Direzione di provenienza ° N	Classi di velocità del vento [m/s]												Tot
	calm	1.00 2.00	2.00 4.00	4.00 6.00	6.00 8.00	8.00 10.00	10.00 12.00	12.00 14.00	14.00 16.00	16.00 18.00	18.00 20.00	>20.00	
0	455	1462	4776	7691	12567	14193	11266	6767	2638	768	186	36	62805
15	470	1633	5759	8263	7940	4324	2094	1033	409	114	30	6	32075
30	496	1628	5625	5115	2639	1147	536	224	69	11	0	1	17491
45	459	1739	5106	3189	1398	579	261	93	39	13	0	0	12876
60	488	1672	4403	2563	1133	374	152	56	19	5	3	0	10868
75	462	1762	4273	2550	1169	332	91	36	14	10	6	0	10705
90	498	1807	4360	2870	1524	432	134	51	19	9	5	1	11710
105	511	1852	4263	2923	1637	523	168	86	50	15	3	1	12032
120	540	1794	4244	2344	1382	423	167	87	22	2	1	0	11006
135	537	1940	4064	1708	814	262	109	48	24	8	0	0	9514
150	573	1952	3855	1386	581	232	92	58	15	7	2	0	8753
165	533	1974	4330	1622	500	159	95	36	21	4	0	0	9274
180	513	1972	4757	2460	795	264	159	89	37	6	0	1	11053
195	492	1821	4963	3200	1821	746	371	134	52	18	2	0	13620
210	456	1666	4536	3788	3121	2005	1068	450	143	36	5	0	17274
225	420	1527	3860	3109	2539	1897	1380	887	558	216	57	20	16470
240	424	1293	3120	2812	2047	1073	707	549	466	325	147	48	13011
255	393	1092	2472	1998	1487	758	372	251	159	63	21	6	9072
270	778	981	1927	1056	442	191	88	25	8	1	0	0	5497
285	369	922	1464	648	229	82	26	13	1	1	0	0	3755
300	380	895	1410	579	229	101	41	20	8	2	1	0	3666
315	351	888	1553	749	405	202	132	98	56	6	4	1	4445
330	390	1058	2151	1532	1234	966	609	417	201	75	23	1	8657
345	430	1237	3264	3788	5074	6027	6578	5195	2504	732	148	29	35006
<b>N° di eventi</b>	<b>11418</b>	<b>36567</b>	<b>90535</b>	<b>67943</b>	<b>52707</b>	<b>37292</b>	<b>26696</b>	<b>16703</b>	<b>7532</b>	<b>2447</b>	<b>644</b>	<b>151</b>	<b>350635</b>

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 5-2. FREQUENZA DI ACCADIMENTO DEI VENTI. PUNTO DICCA 000323 AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA (PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018)

Direzione di provenienza ° N	Velocità del Vento [m/s]												Tot	>2 m/s
	calm	1.00 2.00	2.00 4.00	4.00 6.00	6.00 8.00	8.00 10.00	10.00 12.00	12.00 14.00	14.00 16.00	16.00 18.00	18.00 20.00	>20.00		
0	0.13	0.42	1.36	2.19	3.58	4.05	3.21	1.93	0.75	0.22	0.05	0.01	17.9	17.4
15	0.13	0.47	1.64	2.36	2.26	1.23	0.60	0.29	0.12	0.03	0.01	0.00	9.1	8.5
30	0.14	0.46	1.60	1.46	0.75	0.33	0.15	0.06	0.02	0.00		0.00	5.0	4.4
45	0.13	0.50	1.46	0.91	0.40	0.17	0.07	0.03	0.01	0.00			3.7	3.0
60	0.14	0.48	1.26	0.73	0.32	0.11	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00		3.1	2.5
75	0.13	0.50	1.22	0.73	0.33	0.09	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00		3.1	2.4
90	0.14	0.52	1.24	0.82	0.43	0.12	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	3.3	2.7
105	0.15	0.53	1.22	0.83	0.47	0.15	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	3.4	2.8
120	0.15	0.51	1.21	0.67	0.39	0.12	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00		3.1	2.5
135	0.15	0.55	1.16	0.49	0.23	0.07	0.03	0.01	0.01	0.00			2.7	2.0
150	0.16	0.56	1.10	0.40	0.17	0.07	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00		2.5	1.8
165	0.15	0.56	1.23	0.46	0.14	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00			2.6	1.9
180	0.15	0.56	1.36	0.70	0.23	0.08	0.05	0.03	0.01	0.00		0.00	3.2	2.4
195	0.14	0.52	1.42	0.91	0.52	0.21	0.11	0.04	0.01	0.01	0.00		3.9	3.2
210	0.13	0.48	1.29	1.08	0.89	0.57	0.30	0.13	0.04	0.01	0.00		4.9	4.3
225	0.12	0.44	1.10	0.89	0.72	0.54	0.39	0.25	0.16	0.06	0.02	0.01	4.7	4.1
240	0.12	0.37	0.89	0.80	0.58	0.31	0.20	0.16	0.13	0.09	0.04	0.01	3.7	3.2
255	0.11	0.31	0.71	0.57	0.42	0.22	0.11	0.07	0.05	0.02	0.01	0.00	2.6	2.2
270	0.22	0.28	0.55	0.30	0.13	0.05	0.03	0.01	0.00	0.00			1.6	1.1
285	0.11	0.26	0.42	0.18	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00			1.1	0.7
300	0.11	0.26	0.40	0.17	0.07	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00		1.0	0.7
315	0.10	0.25	0.44	0.21	0.12	0.06	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	1.3	0.9
330	0.11	0.30	0.61	0.44	0.35	0.28	0.17	0.12	0.06	0.02	0.01	0.00	2.5	2.1
345	0.12	0.35	0.93	1.08	1.45	1.72	1.88	1.48	0.71	0.21	0.04	0.01	10.0	9.5
<b>Tot</b>	3.26	10.43	25.82	19.38	15.03	10.64	7.61	4.76	2.15	0.70	0.18	0.04	100	86.3
<b>Tot. Cumulato</b>		13.69	39.51	58.88	73.91	84.55	92.16	96.93	99.08	99.77	99.96	100.00		

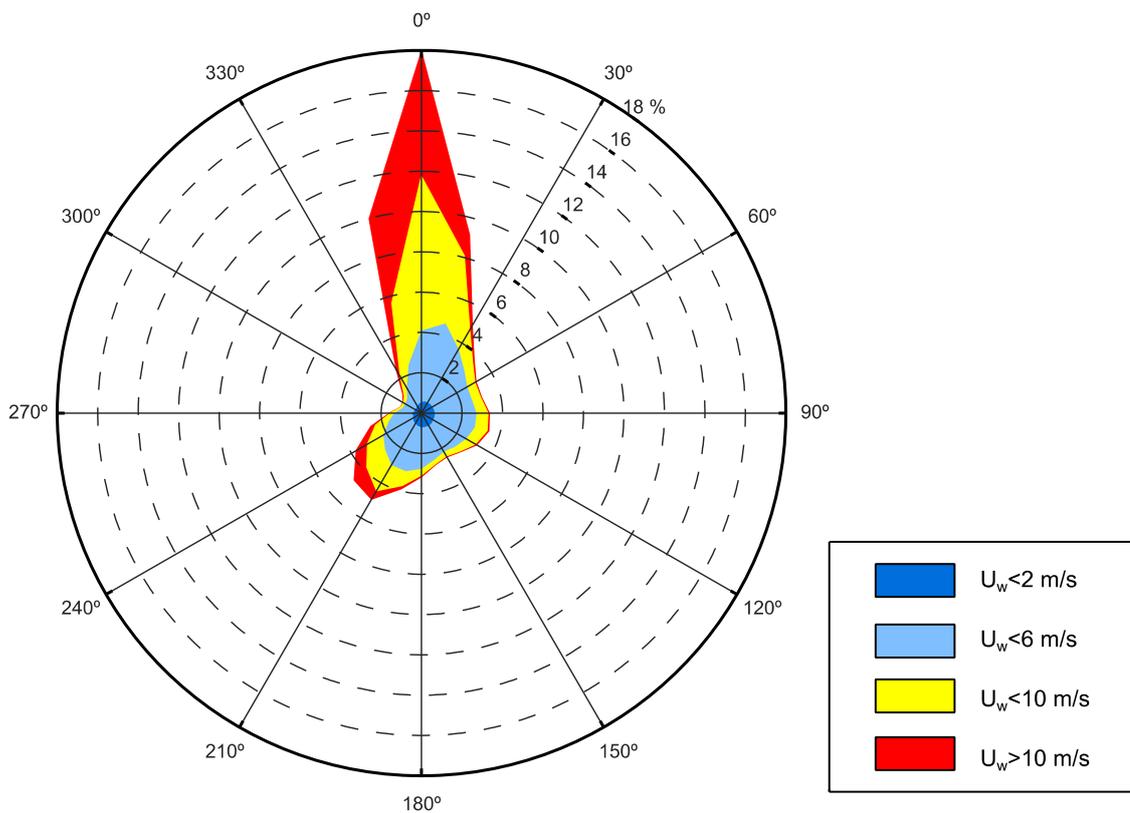


FIGURA 5-2. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEI VENTI RICOSTRUITI DAL DICCA AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA NEL PUNTO 000323 DI COORDINATE 44.04°N - 8.74°E (PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018)

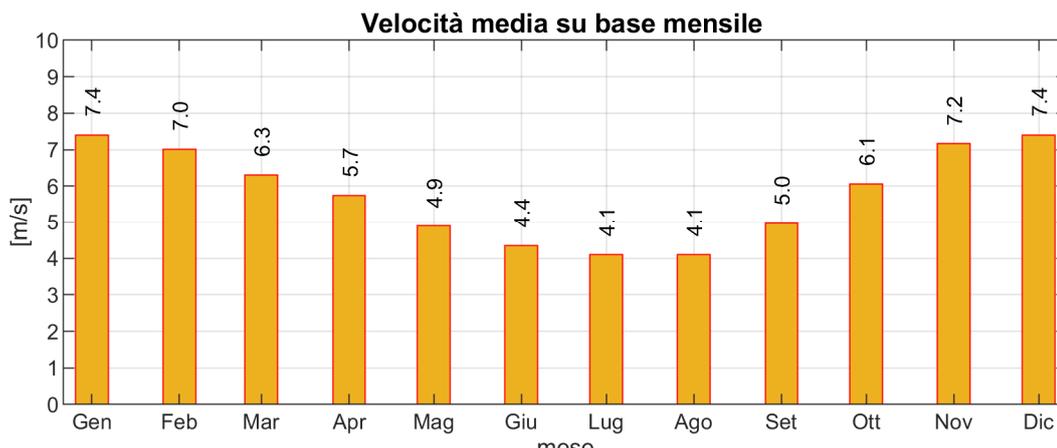


FIGURA 5-3. VELOCITÀ MEDIA SU BASE MENSILE DEI VENTI IN RICOSTRUZIONE FORNITI DAL DICCA AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA NEL PUNTO 000323 (PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018)

### 5.1.2 Dati in ricostruzione forniti dal MedAtlas

A conclusione di un progetto internazionale di ricerca condotto tra il 1999 e il 2004 il CNR-ISMAR, in collaborazione con altri enti della Francia e della Grecia, ha redatto l'Atlante elettronico dei venti e delle onde del Mediterraneo MedAtlas (Wind and Wave Mediterranean Atlas).

Il MedAtlas fornisce i dati statistici di vento e di moto ondoso in corrispondenza di una griglia, i cui nodi sono distanziati di  $1^\circ$  facendo riferimento ai dati di moto ondoso e di vento, alla quota di 10 m sul l.m.m., ottenuti in re-analisi dal centro meteorologico europeo ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecast). I dati forniti dal modello numerico sono stati calibrati utilizzando le misure satellitari di vento e di moto ondoso e quelle delle boe ondametriche. Il periodo di riferimento si estende per 10 anni dal 1992 al 2001.

Dal database del MedAtlas sono stati estratti i dati relativi al punto di ricostruzione posizionato in corrispondenza delle coordinate  $44.0^\circ\text{N} - 9.0^\circ\text{E}$ . Le corrispondenti frequenze di accadimento degli stati di vento, suddivisi per classi di direzione e velocità, sono riportate in Tabella 5-3 e nel diagramma polare di Figura 5-4.

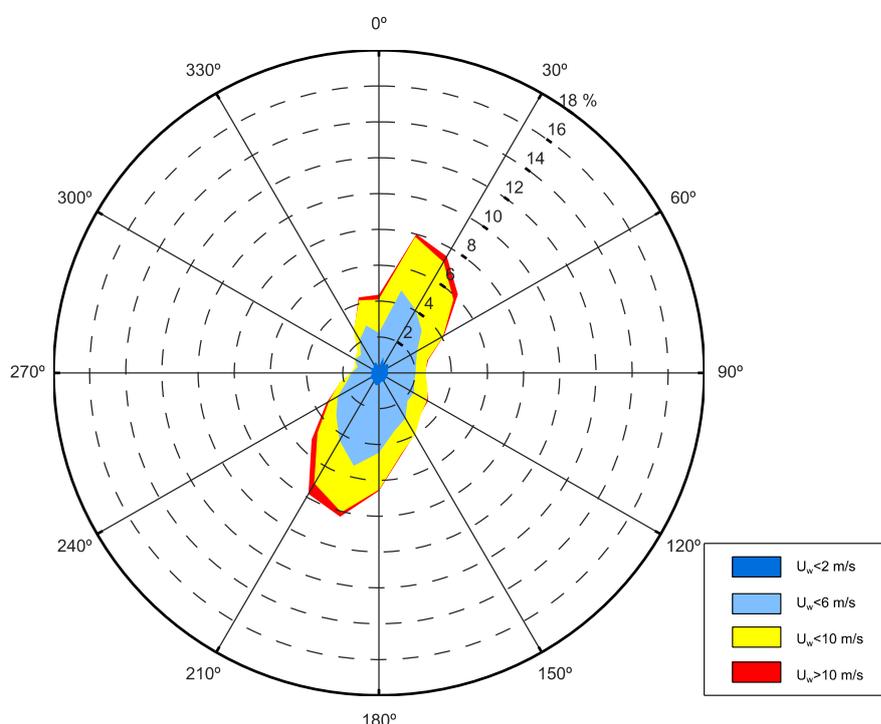


FIGURA 5-4. DISTRIBUZIONE DEI VENTI FORNITI DAL MEDATLAS AL LARGO DI GENOVA. COORDINATE  $44^\circ\text{N}-9^\circ\text{E}$ . PERIODO DI RIFERIMENTO 1992-2001.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 5-3. FREQUENZA DI ACCADIMENTO DEI VENTI FORNITA DAL MEDATLAS AL LARGO DI GENOVA NEL PUNTO DI COORDINATE 44°N-9°E (PERIODO DI RIFERIMENTO 1992-2001)

Direzione Vento ° Nord	Velocità del Vento [m/s]																Tot	>2 m/s
	0.00 1.00	1.00 2.00	2.00 3.00	3.00 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	6.00 7.00	7.00 8.00	8.00 9.00	9.00 10.00	10.00 12.00	12.00 14.00	14.00 16.00	16.00 18.00	18.00 20.00			
0	0.10	0.20	0.41	0.41	0.61	0.51	0.51	0.41	0.30	0.30	0.30	0.20	0.10			4.36	4.1	
15	0.20	0.71	0.71	0.91	1.22	1.01	1.01	0.71	0.51	0.30	0.51	0.20				8.00	7.1	
30	0.20	0.30	0.71	0.81	1.11	0.91	0.81	0.71	0.61	0.41	0.51	0.20	0.10	0.10		7.50	7.0	
45	0.20	0.51	0.51	0.71	0.81	0.61	0.61	0.51	0.41	0.41	0.51	0.30	0.10			6.18	5.5	
60	0.20	0.41	0.61	0.51	0.41	0.30	0.41	0.41	0.30	0.20	0.30	0.10				4.15	3.5	
75	0.10	0.41	0.51	0.41	0.30	0.41	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10				2.84	2.3	
90	0.20	0.30	0.41	0.41	0.41	0.30	0.20	0.20	0.10							2.53	2.0	
105	0.10	0.41	0.41	0.41	0.41	0.30	0.30	0.10	0.10	0.10	0.10					2.74	2.2	
120	0.10	0.41	0.51	0.51	0.30	0.41	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10				3.14	2.6	
135	0.10	0.41	0.51	0.51	0.41	0.30	0.41	0.20	0.20	0.10	0.10					3.24	2.7	
150	0.20	0.41	0.61	0.61	0.61	0.51	0.41	0.30	0.10	0.10	0.10					3.95	3.3	
165	0.10	0.41	0.61	0.91	0.81	0.51	0.41	0.30	0.20	0.20	0.20	0.10				4.76	4.3	
180	0.20	0.51	0.91	1.01	1.01	0.81	0.71	0.41	0.41	0.20	0.30	0.10				6.59	5.9	
195	0.20	0.51	0.91	1.52	1.32	0.91	0.81	0.61	0.41	0.41	0.41	0.20	0.10			8.31	7.6	
210	0.20	0.41	0.91	1.01	0.91	0.91	0.81	0.51	0.41	0.41	0.61	0.41	0.20	0.10		7.80	7.2	
225	0.20	0.30	0.71	0.91	0.71	0.51	0.41	0.30	0.20	0.20	0.30	0.20	0.20	0.10		5.27	4.8	
240	0.10	0.51	0.61	0.61	0.51	0.30	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10			3.34	2.7	
255	0.10	0.30	0.51	0.51	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10						2.23	1.8	
270	0.10	0.41	0.41	0.30	0.20	0.10										1.52	1.0	
285	0.10	0.30	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10									1.32	0.9	
300	0.10	0.41	0.41	0.30	0.20	0.10										1.52	1.0	
315	0.10	0.30	0.41	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10								1.62	1.2	
330	0.20	0.41	0.51	0.41	0.30	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10					2.74	2.1	
345	0.10	0.51	0.61	0.51	0.61	0.41	0.51	0.30	0.20	0.10	0.30	0.10	0.10			4.36	3.7	
<b>Tot</b>	3.55	9.73	13.68	14.69	13.78	10.84	9.32	6.69	5.07	3.95	4.96	2.43	1.01	0.30	0.00	100	86.7	
<b>Tot. Cumulato</b>		13.27	26.95	41.64	55.42	66.26	75.58	82.27	87.34	91.29	96.25	98.68	100	100	100			

Il confronto tra la Figura 5-4 e la Figura 5-2 mostra che i dati del MedAtlas concordano con quelli del DICCA per quanto riguarda la frequenza di accadimento dei venti provenienti da Libeccio mentre sottostimano la frequenza dei venti provenienti da settentrione. Ai fini del presente lavoro si è ritenuto opportuno utilizzare per il vento a largo i dati del DICCA che risultano sicuramente più affidabili dal punto di vista statistico rispetto a quelli del MedAtlas ricostruiti circa 20 anni fa.

## 5.2 Regime anemometrico sottocosta

Come mostrato di seguito, i dati forniti dalle stazioni meteo in costa mostrano qualche differenza rispetto al regime dei venti al largo a causa della orografia della costa ligure e della sua posizione planimetrica arcuata.

Nel seguito sono riportati i risultati delle analisi condotte sui dati delle due stazioni più rappresentative per il porto di Genova, quella ISPRA nel porto vecchio e quella ENAV-

AM dell'aeroporto di Sestri. Sono stati anche esaminati i dati di vento della rete meteo ARPAL (es. Punta Vagno dal 2013 e Porto Vecchio dal 2016) che però presentano una limitata copertura temporale ed una carente risoluzione direzionale.

### 5.2.1 Dati registrati dall'anemometro ISPRA-RMN

All'interno del Bacino Porto Vecchio del porto di Genova presso il pontile Spinola è localizzata la stazione mareografica gestita da ISPRA appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN) di Genova.

La stazione è dotata di un anemometro che misura la velocità e la direzione del vento a quota +10 m s.l.m. con cadenza di acquisizione di 10 minuti. La serie storica delle misure orarie, acquisita dal portale della rete mareografica nazionale, si estende da Dicembre 1998 a Novembre 2019. Il rendimento annuale dell'anemometro mostrato in Figura 5-5 risulta piuttosto elevato. Limitando l'analisi dei dati al periodo compreso tra Gennaio 1999 e Novembre 2019 si ha a disposizione un intervallo temporale di 20 anni con rendimento medio pari all'84%.

In Tabella 5-4 sono riportati i dati di vento registrati dall'anemometro RMN di Genova nel periodo di riferimento Gen. 1999 - Novembre 2019 suddivisi per classi di direzione di provenienza (30°) e velocità (m/s). La Tabella 5-5 riporta la corrispondente frequenza di accadimento dei dati registrati.

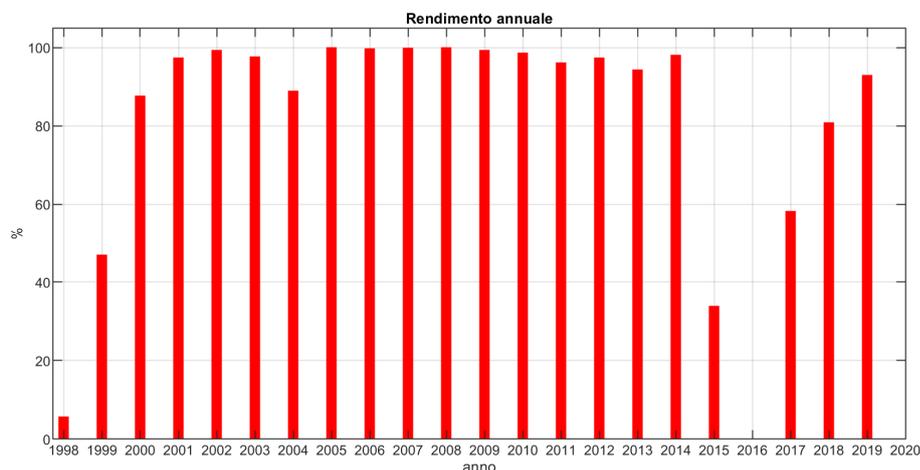


FIGURA 5-5. RENDIMENTO DELL'ANEMOMETRO INSTALLATO PRESSO LA STAZIONE MAREOGRAFICA RMN DI GENOVA (PERIODO DI RIFERIMENTO 1998-2019)

TABELLA 5-4. SUDDIVISIONE PER CLASSI DI PROVENIENZA E VELOCITÀ DEI VENTI REGISTRATI DALL'ANEMOMETRO DELLA STAZIONE RMN DI GENOVA

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

(PERIODO DI RIFERIMENTO GEN.1999-NOV.2019)

Numero di eventi registrati dalla stazione ISPRA RMN di GENOVA (1999-2019)

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N											Tot	
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300		330
0	1	2686	2320	2996	2877	2646	1888	1976	2375	2069	1765	1694	2801	28093
1	2	1954	2015	4642	4484	3348	2909	4208	6241	3103	966	762	1279	35911
2	4	4748	5458	6319	2306	3586	9827	6218	6645	3207	962	673	1342	51291
4	6	5882	6447	1640	287	672	4093	763	565	358	582	504	566	22359
6	8	3964	4581	220	43	93	627	73	129	60	399	335	158	10682
8	10	1941	1803	51	12	9	74	12	22	18	206	132	47	4327
10	12	654	512	7	7	3	4	3	4	4	68	33	20	1319
12	14	134	75	1	15	7	2	0	1	0	4	8	6	253
14	16	23	10	3	3	13	1	0	2	0	0	1	1	57
16	18	8	11	2	1	4	1	2	2	0	2	0	0	33
18	20	2	2	1	0	1	2	1	2	1	0	0	0	12
20	40	0	1	0	0	0	0	1	2	0	2	2	0	8
		21996	23235	15882	10035	10382	19428	13257	15990	8820	4956	4144	6220	154345

TABELLA 5-5. FREQUENZA DI ACCADIMENTO DEI VENTI (VELOCITÀ E DIREZIONE DI PROVENIENZA) REGISTRATI ALLA STAZIONE MAREOGRAFICA RMN DI GENOVA - (PERIODO DI RIFERIMENTO GEN.1999 - NOV.2019)

Frequenza di accadimento dei venti registrati dalla stazione ISPRA RMN di GENOVA (1999-2019)

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N											Tot	Cum	
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300			330
0	1	1.74	1.50	1.94	1.86	1.71	1.22	1.28	1.54	1.34	1.14	1.10	1.81	18.20	18.20
1	2	1.27	1.31	3.01	2.91	2.17	1.88	2.73	4.04	2.01	0.63	0.49	0.83	23.27	41.5
2	4	3.08	3.54	4.09	1.49	2.32	6.37	4.03	4.31	2.08	0.62	0.44	0.87	33.23	74.7
4	6	3.81	4.18	1.06	0.19	0.44	2.65	0.49	0.37	0.23	0.38	0.33	0.37	14.49	89.2
6	8	2.57	2.97	0.14	0.03	0.06	0.41	0.05	0.08	0.04	0.26	0.22	0.10	6.92	96.1
8	10	1.26	1.17	0.03	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.13	0.09	0.03	2.80	98.9
10	12	0.42	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.85	99.8
12	14	0.09	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00		0.00		0.00	0.01	0.00	0.16	99.9
14	16	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00		0.00			0.00	0.00	0.04	100.0
16	18	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00			0.02	100.0
18	20	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				0.01	100.0
20	40		0.00					0.00	0.00		0.00	0.00		0.01	100.0
		14.25	15.05	10.29	6.50	6.73	12.59	8.59	10.36	5.71	3.21	2.68	4.03	100	

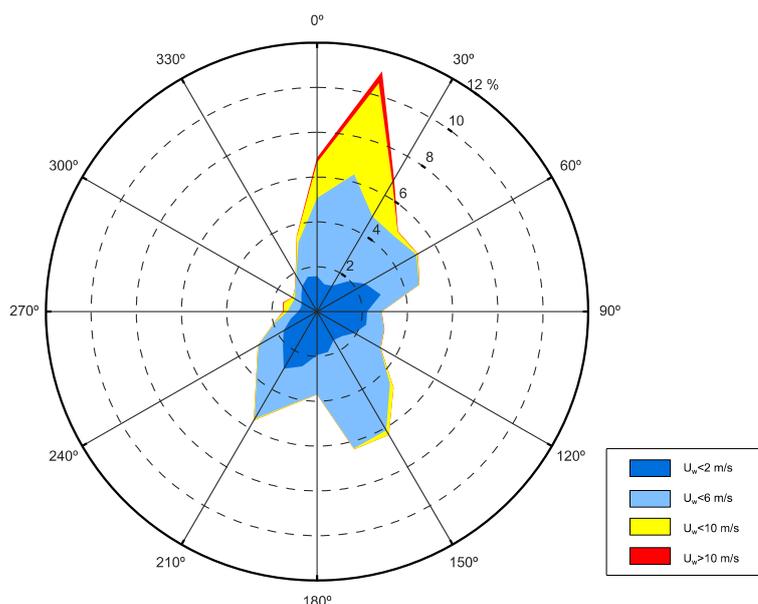


FIGURA 5-6. DIAGRAMMA DI DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEI VENTI OSSERVATI ALLA STAZIONE MAREOGRAFICA RMN DI GENOVA (GEN.1999 - NOV. 2019)

La distribuzione direzionale della frequenza di accadimento su base annuale riportata graficamente in Figura 5-6 in forma polare, mostra una prevalenza di stati di vento provenienti dal settore N-NE, di cui una significativa percentuale ha una velocità compresa tra 6 e 10 m/s, e dai settore di SudEst e SudOvest di intensità più moderata.

Il confronto tra il regime anemometrico misurato in costa dalla stazione RMN-ISPRA (Figura 5-6) con quello ottenuto a largo dai dati del DICCA (Figura 5-2) mostra una sostanziale congruenza tra i dati, con una diminuzione della frequenza di accadimento degli stati di vento provenienti da settentrione ed un aumento della frequenza del vento proveniente da Scirocco che in costa, a differenza che a largo, tende a superare di poco la frequenza dei venti proveniente da Libeccio.

Oltre che dall'orografia, il regime dei venti osservato dalla stazione anemometrica RMN di Genova è certamente condizionato dalle differenze di temperatura superficiale della terra e del mare che dà luogo, specialmente nel periodo estivo, alle brezze termiche provenienti da terra nelle ore notturne e da mare nelle ore diurne. La presenza di questi venti di origine termica è individuabile dalla distribuzione direzionale degli stati di vento ottenuta per prefissati orari: 0:00, 6:00, 12:00 e 18:00 (UTC) e rappresentata nei grafici polari di Figura 5-7.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

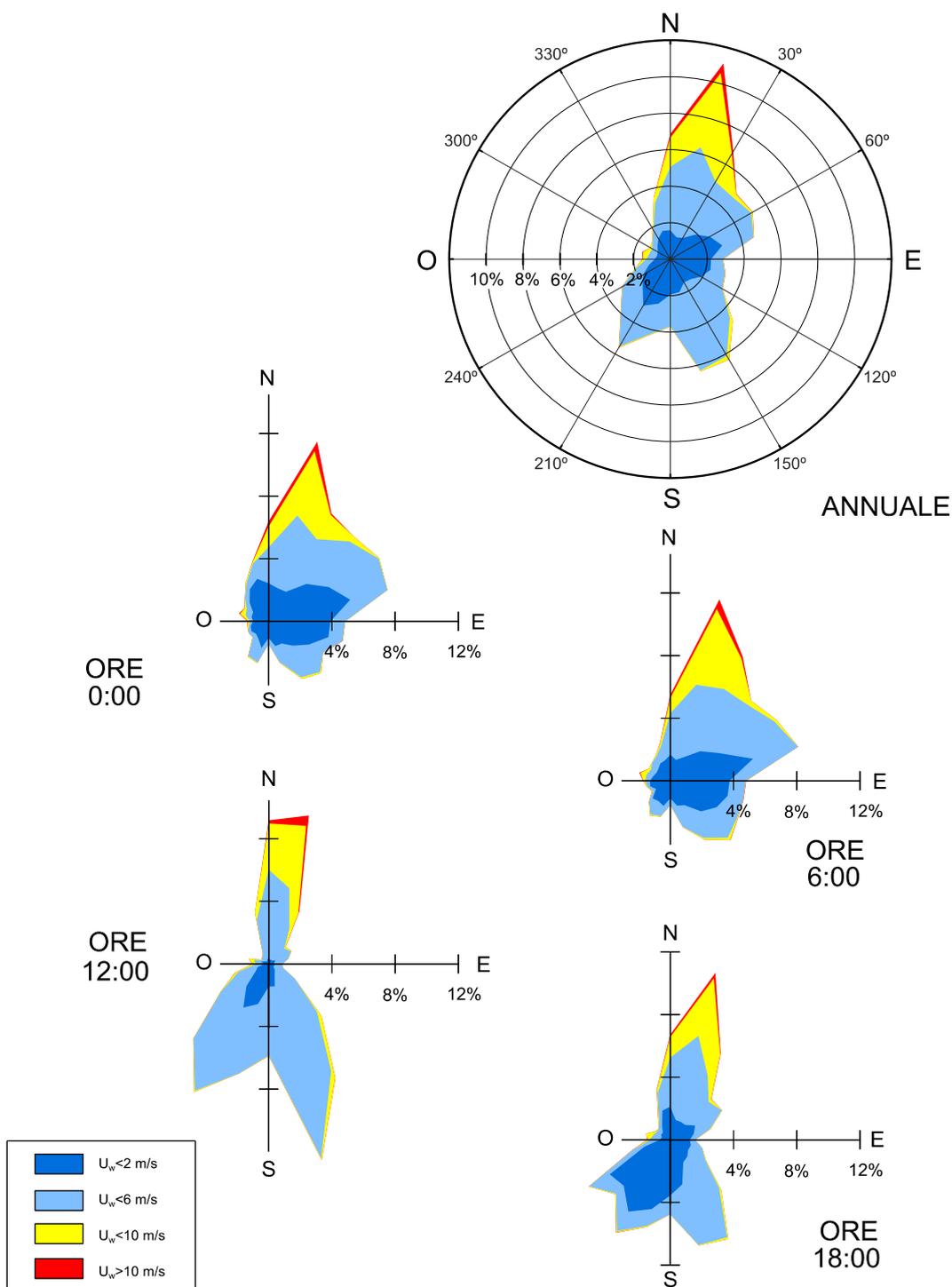


FIGURA 5-7. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEI VENTI REGISTRATI DALLA STAZIONE RMN DI GENOVA SU BASE ORARIA 0:00, 6:00, 12:00, 18:00 (UTC) (PERIODO DI RIFERIMENTO 1999-2019).

## Studio delle condizioni meteomarine

Assumendo che il campione di dati analizzato sia rappresentativo dell'intero regime dei venti presso la stazione RMN di Genova, ipotizzando pertanto che gli eventi non osservati dalla stazione nei periodi di mancato funzionamento siano distribuiti in modo simile ai dati analizzati, è stato possibile determinare le curve di durata cumulata mostrate in Figura 5-8 da cui si ottiene una durata media complessiva degli eventi con  $U_w \geq 10.0$  m/s pari a circa 95 ore per anno ed una durata media degli eventi con  $U_w \geq 15.0$  m/s pari a 4.0 ore per anno. I venti osservati alla stazione RMN di Genova presentano una persistenza di eventi sopra la soglia  $U_w > 10$  m/s più elevata nel I° quadrante, pari a 79 ore per anno.

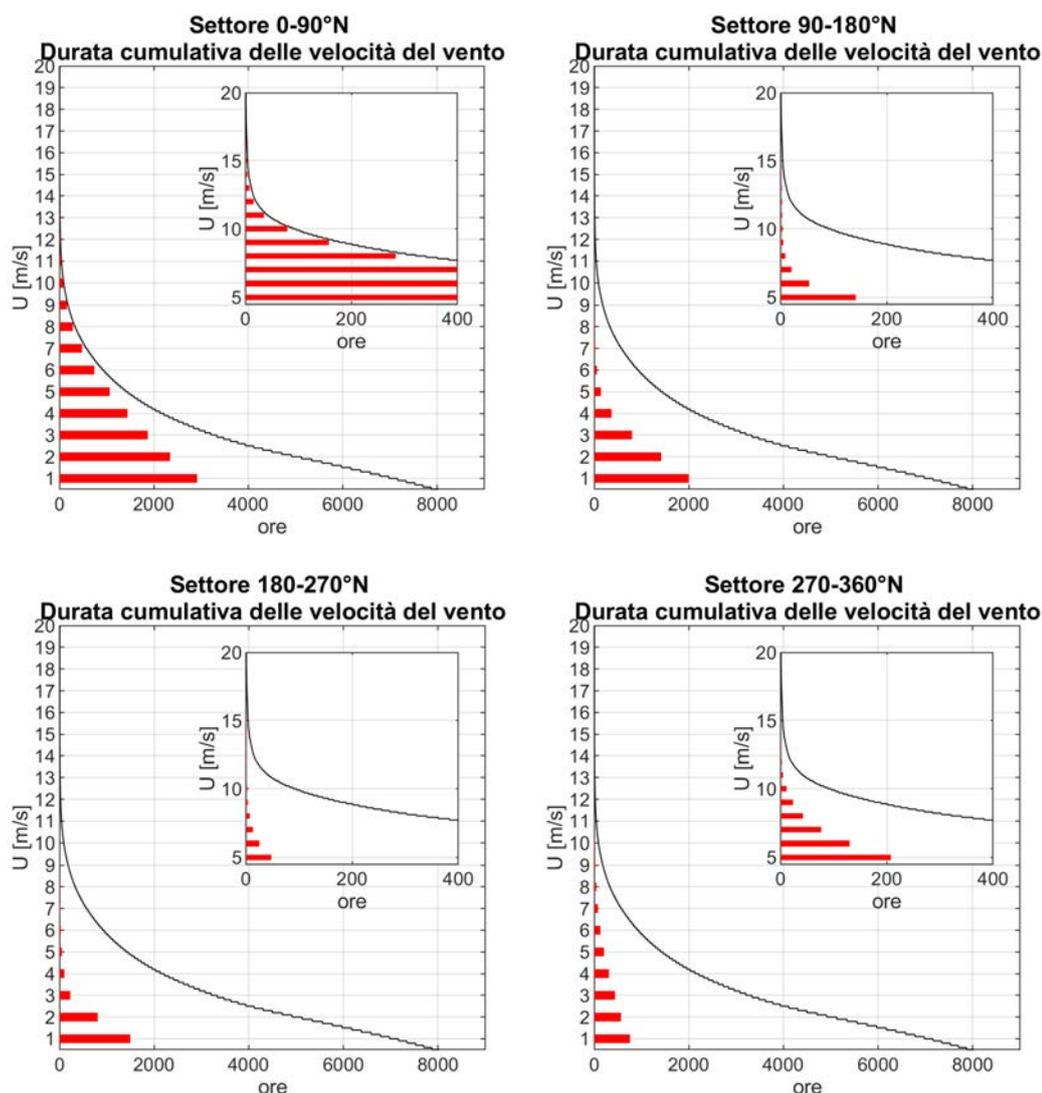


FIGURA 5-8. DURATA CUMULATIVA MEDIA DELLE VELOCITÀ DEL VENTO OSSERVATE PRESSO LA STAZIONE RMN DI GENOVA (GEN. 1999-NOV. 2019). LA CURVA NERA RAPPRESENTA LA DURATA CUMULATA COMPLESSIVA.

### 5.2.2 Dati osservati dalla stazione meteorologica di GENOVA-SESTRI

La stazione meteorologica di Genova/Sestri Ponente è una stazione storica di riferimento del servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare e a servizio dell'aeroporto civile di Genova. La stazione è identificata con il codice WMO 16120 (codice 120 per l'Aeronautica Militare) ed è attualmente posizionata al margine della pista di atterraggio dell'aeroporto nel punto di coordinate 44.4091°N 8.85145°E a quota +3.0 m s.l.m.. I venti sono misurati a quota +10 m s.l.m..

Una trattazione esaustiva dei dati anemometrici registrati a partire dal 1963 fino al 2007 dalla stazione meteo di Genova-Sestri è contenuta nel rapporto "*Analisi statistica dei dati storici di vento registrati dalle stazioni anemometriche*" redatto dall'Università di Genova nell'ambito del progetto europeo VENTO e PORTI.

La Tabella 5-6 riporta la ripartizione degli eventi osservati dal 1963 al 2007 per classi di direzione di provenienze e velocità del vento desunta dal rapporto VENTO e PORTI.

La conseguente distribuzione direzionale della frequenza di accadimento delle velocità del vento è mostrata in forma polare nella seguente Figura 5-9.

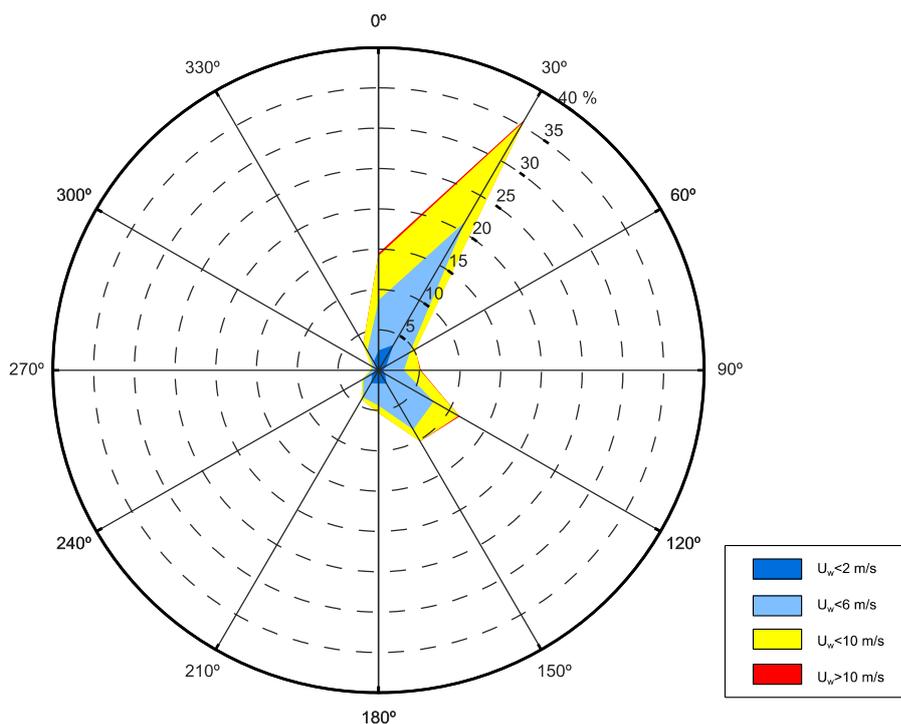


FIGURA 5-9. DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ DEL VENTO, IN METRI AL SECONDO, REGISTRATE DALLA STAZIONE METEOROLOGICA DI GENOVA-SESTRI DAL 1963 AL 2007. ELABORAZIONE DATI DA: "VENTO E PORTI - ANALISI STATISTICA DEI DATI STORICI DI VENTO REGISTRATI DALLE STAZIONI ANEMOMETRICHE".

TABELLA 5-6. NUMERO DI EVENTI REGISTRATI E FREQUENZA DI ACCADIMENTO DEGLI STATI DI VENTO OSSERVATI DALL'ANEMOMETRO DI GENOVA-SESTRI NEL PERIODO 1963-

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

## 2007. RIELABORATO DA "VENTO E PORTI - ANALISI STATISTICA DEI DATI STORICI DI VENTO REGISTRATI DALLE STAZIONI ANEMOMETRICHE".

Numero di eventi registrati dall'anemometro di Sestri 1963-2007

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N												dir. ind.	Tot
		0 30	30 60	60 90	90 120	120 150	150 180	180 210	210 240	240 270	270 300	300 330	330 360		
0	1	355	237	93	58	104	133	149	130	68	60	75	237	5	1704
1	2	2170	3487	1016	508	837	1870	1555	1798	873	363	308	1020	13	15818
2	3	1811	3894	1095	564	1439	2577	1417	1278	734	252	184	589	69	15903
3	4	1416	4586	1030	711	1938	1906	617	454	339	146	104	312	142	13701
4	5	1460	4820	794	675	1963	1377	457	198	153	67	89	302	133	12488
5	6	1705	4724	502	657	1725	869	331	125	67	31	97	377	136	11346
6	7	1783	4877	353	687	1564	756	303	96	40	33	74	320	87	10973
7	8	1589	3977	201	518	883	417	220	56	25	13	47	264	58	8268
8	9	1057	2717	119	386	589	229	146	40	10	6	31	163	38	5531
9	10	717	1798	61	219	332	135	115	37	8	6	16	108	19	3571
10	11	386	974	27	140	178	80	66	21	1	2	9	79	4	1967
11	12	211	454	6	96	110	50	35	19	4	0	8	46	3	1042
12	13	127	164	3	44	58	26	22	10	3	4	5	30	2	498
13	14	39	70	1	24	35	12	12	3	0	1	4	17	0	218
14	15	28	22	0	21	17	7	6	2	0	0	5	12	0	120
15	16	20	4	0	8	11	1	3	1	0	0	2	15	0	65
16	17	4	0	0	8	2	1	2	1	0	0	0	5	0	23
17	18	7	2	0	2	3	0	0	0	0	0	0	5	0	19
18	19	5	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	3	0	12
19	20	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	1	0	6
20	21	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
		14891	36808	5301	5328	11791	10446	5456	4270	2325	984	1060	3905	709	103274

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N												Tot	Cum
		0 30	30 60	60 90	90 120	120 150	150 180	180 210	210 240	240 270	270 300	300 330	330 360		
0	1	0.34	0.23	0.09	0.06	0.10	0.13	0.14	0.13	0.07	0.06	0.07	0.23	1.6	1.6
1	2	2.10	3.38	0.98	0.49	0.81	1.81	1.51	1.74	0.85	0.35	0.30	0.99	15.3	16.9
2	3	1.75	3.77	1.06	0.55	1.39	2.50	1.37	1.24	0.71	0.24	0.18	0.57	15.3	32.3
3	4	1.37	4.44	1.00	0.69	1.88	1.85	0.60	0.44	0.33	0.14	0.10	0.30	13.1	45.4
4	5	1.41	4.67	0.77	0.65	1.90	1.33	0.44	0.19	0.15	0.06	0.09	0.29	12.0	57.4
5	6	1.65	4.57	0.49	0.64	1.67	0.84	0.32	0.12	0.06	0.03	0.09	0.37	10.9	68.2
6	7	1.73	4.72	0.34	0.67	1.51	0.73	0.29	0.09	0.04	0.03	0.07	0.31	10.5	78.8
7	8	1.54	3.85	0.19	0.50	0.86	0.40	0.21	0.05	0.02	0.01	0.05	0.26	7.9	86.7
8	9	1.02	2.63	0.12	0.37	0.57	0.22	0.14	0.04	0.01	0.01	0.03	0.16	5.3	92.0
9	10	0.69	1.74	0.06	0.21	0.32	0.13	0.11	0.04	0.01	0.01	0.02	0.10	3.4	95.5
10	11	0.37	0.94	0.03	0.14	0.17	0.08	0.06	0.02	0.00	0.00	0.01	0.08	1.9	97.4
11	12	0.20	0.44	0.01	0.09	0.11	0.05	0.03	0.02	0.00		0.01	0.04	1.0	98.4
12	13	0.12	0.16	0.00	0.04	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.5	98.9
13	14	0.04	0.07	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00		0.00	0.00	0.02	0.2	99.1
14	15	0.03	0.02		0.02	0.02	0.01	0.01	0.00			0.00	0.01	0.1	99.2
15	16	0.02	0.00		0.01	0.01	0.00	0.00	0.00			0.00	0.01	0.1	99.3
16	17	0.00			0.01	0.00	0.00	0.00	0.00				0.00	0.0	99.3
17	18	0.01	0.00		0.00	0.00							0.00	0.0	99.3
18	19	0.00	0.00		0.00							0.00	0.00	0.0	99.3
19	20	0.00				0.00						0.00	0.00	0.0	99.3
20	21								0.00					0.0	99.3
		14.42	35.64	5.13	5.16	11.42	10.11	5.28	4.13	2.25	0.95	1.03	3.78	99.3	

Nell'ambito del presente studio le informazioni relative ai venti, desunte dal rapporto VENTO e PORTI, sono state integrate con i dati SYNOP emessi con cadenza trioraria dalla stazione meteorologica di Genova Sestri nel periodo Gennaio 2008 - Dicembre 2019.

La serie, su un totale di 35057 misure potenziali, è costituita di 29618 registrazioni da cui si ottiene un rendimento del 84.4%.

Lo stato di vento più intenso registrato dalla stazione meteo nel periodo 2008-2019 si è verificato in occasione della tempesta del 29-30 Ottobre 2018 in occasione della quale si è registrato un vento massimo di velocità di 22.6 m/s proveniente da mezzogiorno-scirocco. La Tabella 5-7 riporta il numero di eventi acquisiti suddivisi per classi di provenienza e velocità del vento. Il diagramma di distribuzione direzionale di Figura 5-10 conferma per la stazione di Genova Sestri una netta prevalenza di venti provenienti da Grecale (frequenza di accadimento 47%), a cui seguono, per frequenza di apparizione, gli eventi provenienti da Scirocco (19%).

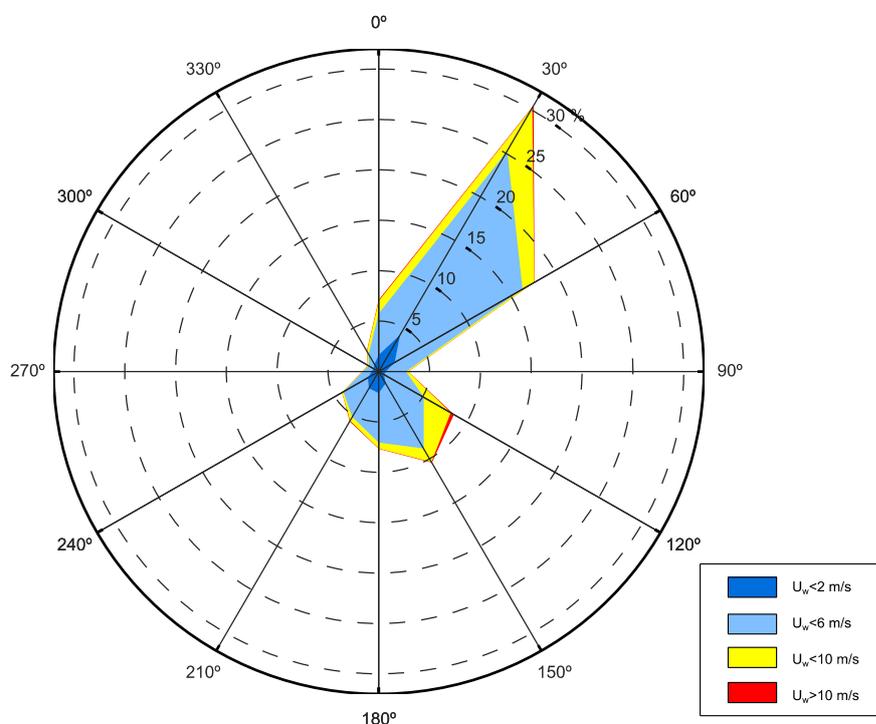


FIGURA 5-10. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEI DATI VENTO SYNOP PER LA STAZIONE DI GENOVA-SESTRI PERIODO DI RIFERIMENTO GEN 2008-DIC 2019.

TABELLA 5-7. NUMERO DI EVENTI REGISTRATI DALLA STAZIONE METEOROLOGICA DI GENOVA-SESTRI NEL PERIODO 2008-2019 (DATI SYNOP) E RELATIVA FREQUENZA DI

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

## ACCADIMENTO.

Numero di eventi registrati dall'anemometro di Genova-Sestri 2008-2019 (Dati SYNOP)

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N												Tot
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
0	1	49	42	26	30	31	37	56	47	31	43	36	42	470
1	2	436	1198	506	176	144	364	583	525	334	163	133	204	4766
2	4	742	4571	2654	411	551	1371	1109	816	700	212	124	196	13457
4	6	478	1675	1650	176	786	845	342	164	134	48	42	147	6487
6	8	269	1120	352	50	638	387	139	86	31	18	20	81	3191
8	10	95	353	45	13	274	69	34	37	9	0	9	19	957
10	12	19	62	7	2	73	19	8	18	1	1	3	5	218
12	14	13	5	2	1	23	4	2	3	0	0	0	1	54
14	16	0	3	0	0	6	0	0	1	0	0	0	0	10
16	18	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
18	20	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	3
20	40	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
		2101	9030	5242	859	2530	3097	2273	1699	1240	485	367	695	29618

Frequenza di accadimento dei venti registrati a Genova-Sestri 2008-2019 (Dati SYNOP)

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N												Tot	Cum
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330		
0	1	0.17	0.14	0.09	0.10	0.10	0.12	0.19	0.16	0.10	0.15	0.12	0.14	1.59	1.59
1	2	1.47	4.04	1.71	0.59	0.49	1.23	1.97	1.77	1.13	0.55	0.45	0.69	16.09	17.7
2	4	2.51	15.43	8.96	1.39	1.86	4.63	3.74	2.76	2.36	0.72	0.42	0.66	45.44	63.1
4	6	1.61	5.66	5.57	0.59	2.65	2.85	1.15	0.55	0.45	0.16	0.14	0.50	21.90	85.0
6	8	0.91	3.78	1.19	0.17	2.15	1.31	0.47	0.29	0.10	0.06	0.07	0.27	10.77	95.8
8	10	0.32	1.19	0.15	0.04	0.93	0.23	0.11	0.12	0.03		0.03	0.06	3.23	99.0
10	12	0.06	0.21	0.02	0.01	0.25	0.06	0.03	0.06	0.00	0.00	0.01	0.02	0.74	99.8
12	14	0.04	0.02	0.01	0.00	0.08	0.01	0.01	0.01				0.00	0.18	99.9
14	16		0.01			0.02			0.00					0.03	100.0
16	18					0.01								0.01	100.0
18	20					0.00			0.01					0.01	100.0
20	40		0.00				0.00							0.01	100.0
		7.09	30.49	17.70	2.90	8.54	10.46	7.67	5.74	4.19	1.64	1.24	2.35	100	

Sotto l'ipotesi che gli eventi non osservati nei periodi di mancato funzionamento dello strumento siano comunque rappresentati, in termini di frequenza di accadimento, dal campione analizzato è possibile ricavare le curve di durata rappresentate in Figura 5-11. Dai diagrammi di Figura 5-11 si può ricavare che la durata complessiva degli stati di vento con  $U_w \geq 10$  m/s osservati all'aeroporto di Genova Sestri nel periodo 2008-2019 è pari a circa 85 ore/anno. I venti provenienti dal II° quadrante presentano una persistenza sopra la soglia di 10 m/s maggiore, pari a circa 50 ore/anno.

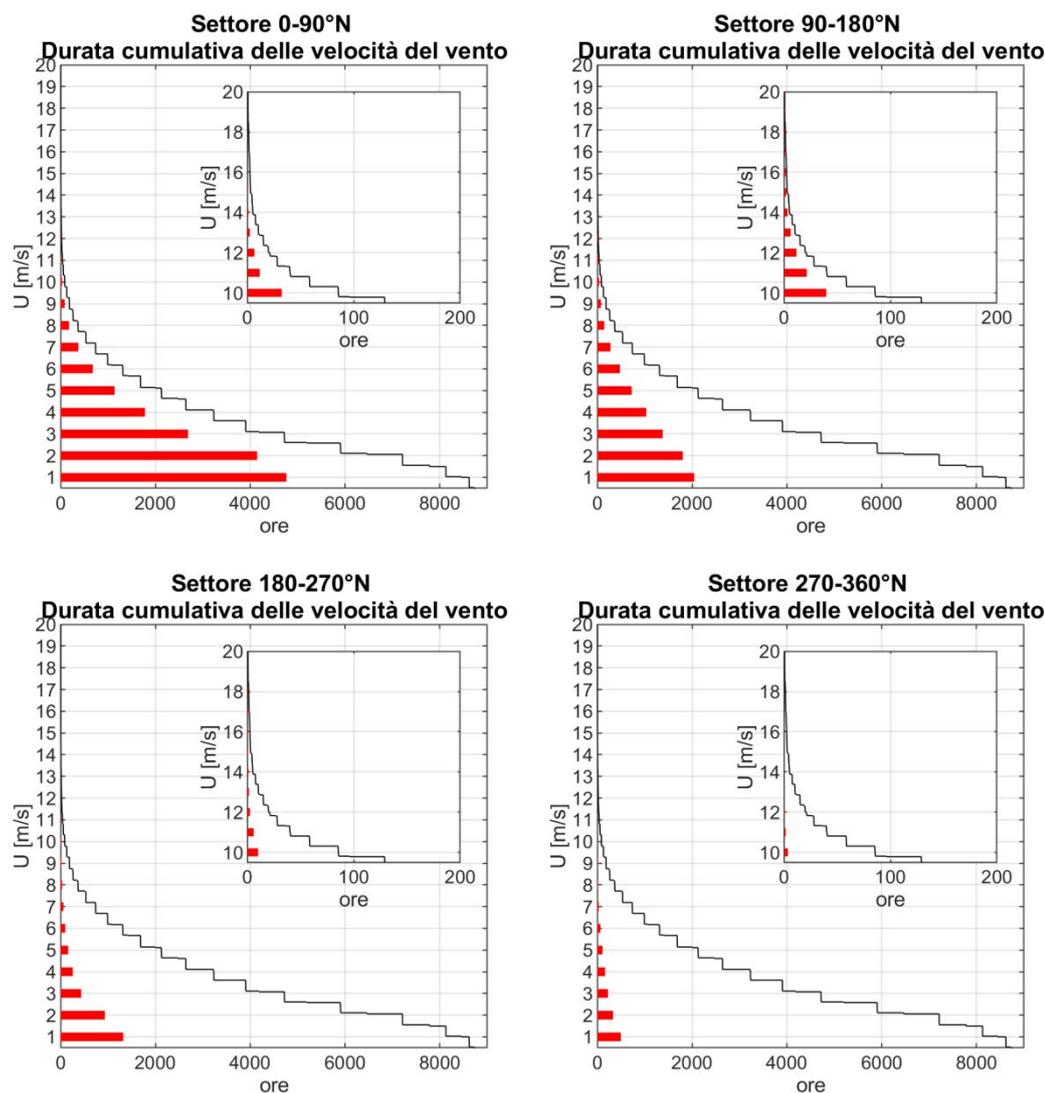


FIGURA 5-11. DURATA CUMULATIVA DELLE VELOCITÀ DEL VENTO OSSERVATE PRESSO LA STAZIONE DI GENOVA SESTRI (GEN 2008-DIC 2019). LA CURVA NERA RAPPRESENTA LA DURATA CUMULATA COMPLESSIVA.

### 5.2.3 Dati osservati dall'anemometro ARPAL di Punta Vagno

L'ARPAL Regione Liguria ha installato un anemometro in prossimità di Punta Vagno, a levante dell'imboccatura del porto di Genova.

La stazione è dotata di un anemometro che misura la velocità e la direzione del vento a quota +10 m s.l.m..

Dal portale della rete di monitoraggi dell'ARPAL è stata acquisita la serie di misure anemometriche che si estende da Gennaio 2015 a Dicembre 2019.

Il vento massimo osservato dalla stazione di Punta Vagno si è verificato in occasione della tempesta del 29-30 Ottobre 2018 in cui è stata registrata una velocità di 23.7 m/s da scirocco.

La serie acquisita è costituita da 42733 misure con cadenza oraria con un rendimento pari al 97.5%.

In Tabella 5-8 sono riportati i venti appartenenti alla serie esaminata suddivisi per classi di direzione di provenienza (30°) e velocità (m/s).

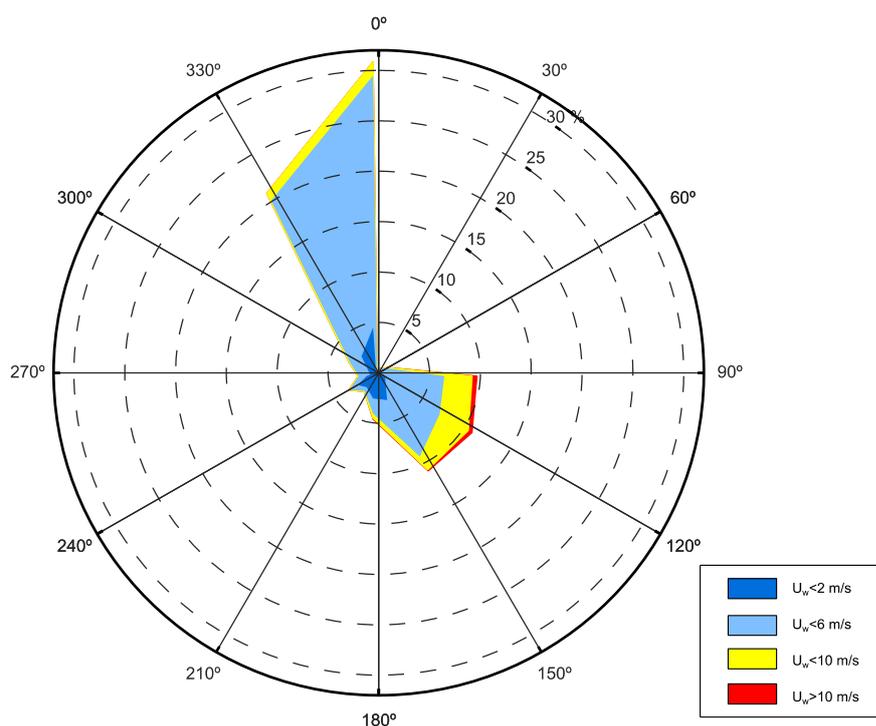


FIGURA 5-12. DISTRIBUZIONE DEI VENTI MISURATI DALLA STAZIONE METEOROLOGICA ARPAL DI PUNTA VAGNO. PERIODO DI RIFERIMENTO 2015-2019.

TABELLA 5-8. NUMERO DI EVENTI REGISTRATI DALLA STAZIONE METEOROLOGICA ARPAL GENOVA-PUNTA VAGNO NEL PERIODO 2015-2019 E RELATIVA FREQUENZA DI

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

## ACCADIMENTO.

Numero di eventi registrati dall'anemometro ARPAL di Genova-Punta Vagno 2015-2019

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N												Tot
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
0	1	484	40	31	82	72	142	131	121	152	38	12	59	1364
1	2	1578	206	246	424	538	1036	821	417	605	233	126	913	7143
2	4	7291	101	282	1280	1355	1816	443	149	344	252	649	5045	19007
4	6	3389	5	111	1213	1268	950	203	36	59	90	329	2568	10221
6	8	562	0	40	776	977	479	144	20	9	25	50	349	3431
8	10	18	0	13	392	416	163	51	10	5	1	10	12	1091
10	12	0	0	3	129	122	35	32	0	0	0	0	1	322
12	14	0	0	1	41	32	14	5	0	0	0	0	0	93
14	16	0	0	0	20	12	4	3	0	0	0	0	0	39
16	18	0	0	0	9	5	3	0	0	0	0	0	0	17
18	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	40	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	5
		13322	352	727	4367	4799	4644	1833	753	1174	639	1176	8947	42733

Frequenza di accadimento dei venti registrati dall'anemometro ARPAL di Genova-Punta Vagno 2015-2019

U <sub>w</sub> (m/s)		Classi di Direzione °N												Tot	Cum
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330		
0	1	1.13	0.09	0.07	0.19	0.17	0.33	0.31	0.28	0.36	0.09	0.03	0.14	3.19	3.2
1	2	3.69	0.48	0.58	0.99	1.26	2.42	1.92	0.98	1.42	0.55	0.29	2.14	16.72	19.9
2	4	17.06	0.24	0.66	3.00	3.17	4.25	1.04	0.35	0.80	0.59	1.52	11.81	44.48	64.4
4	6	7.93	0.01	0.26	2.84	2.97	2.22	0.48	0.08	0.14	0.21	0.77	6.01	23.92	88.3
6	8	1.32		0.09	1.82	2.29	1.12	0.34	0.05	0.02	0.06	0.12	0.82	8.03	96.3
8	10	0.04		0.03	0.92	0.97	0.38	0.12	0.02	0.01	0.00	0.02	0.03	2.55	98.9
10	12			0.01	0.30	0.29	0.08	0.07					0.00	0.75	99.6
12	14			0.00	0.10	0.07	0.03	0.01						0.22	99.9
14	16				0.05	0.03	0.01	0.01						0.09	99.9
16	18				0.02	0.01	0.01							0.04	100.0
18	20													0.00	100.0
20	40				0.00	0.00	0.00							0.01	100.0
		31.17	0.82	1.70	10.22	11.23	10.87	4.29	1.76	2.75	1.50	2.75	20.94	100	

Nei diagrammi di Figura 5-13 sono riportate le curve di durata cumulata della velocità del vento osservata alla stazione di Punta Vagno per ogni quadrante di provenienza. La durata complessiva dei venti con  $U_w \geq 10$  m/s risulta pari a 97 ore/anno mentre la soglia  $U_w \geq 15$  m/s viene superata circa 8 ore/anno. I diagrammi evidenziano chiaramente che la persistenza dei venti sopra la soglia di 10 m/s risulta predominante nel II° quadrante.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

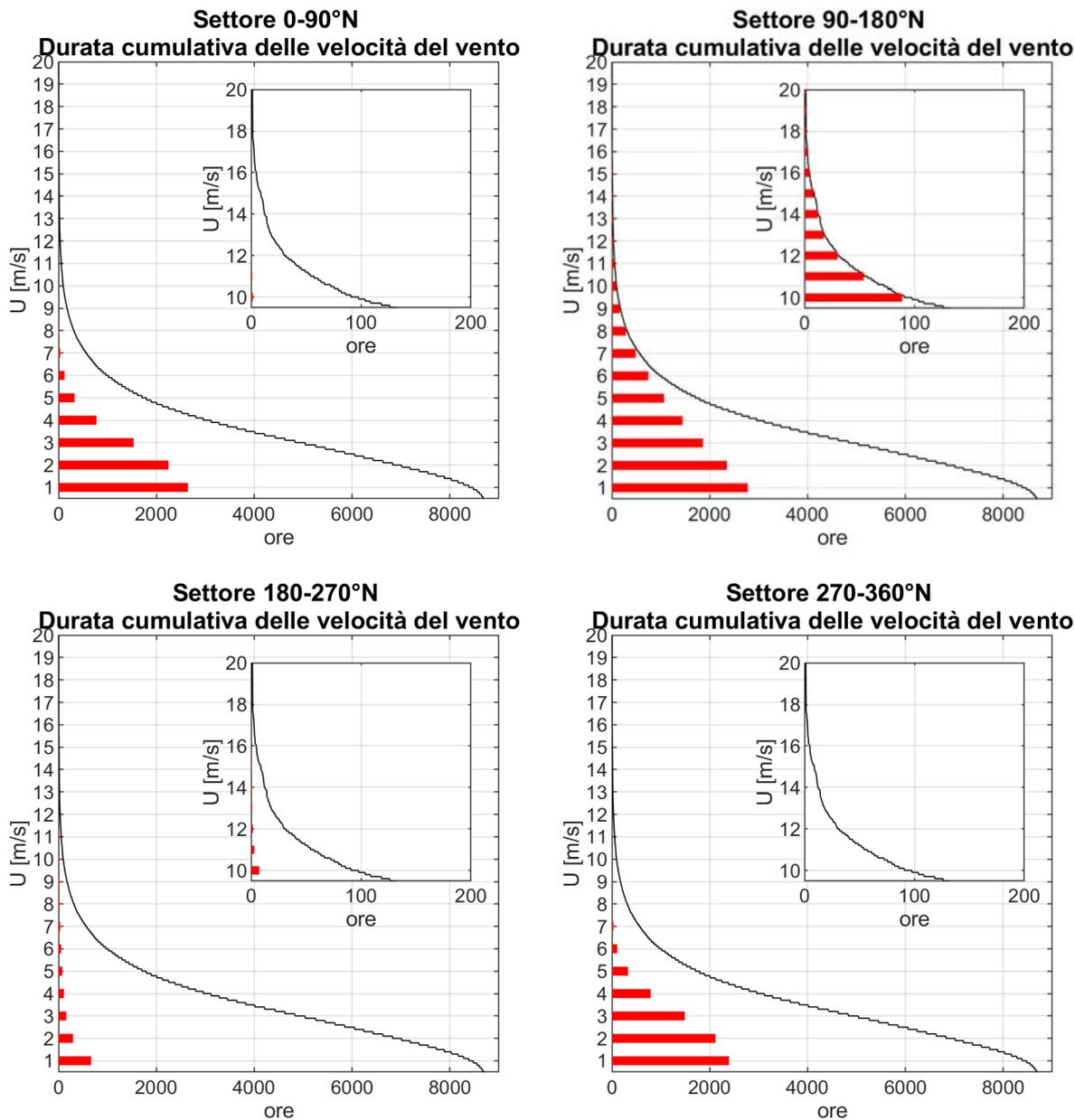


FIGURA 5-13. DURATA CUMULATIVA DELLE VELOCITÀ DEL VENTO OSSERVATE PRESSO LA STAZIONE ARPAL DI PUNTA VAGNO (2015-2019). LA CURVA NERA RAPPRESENTA LA DURATA CUMULATA COMPLESSIVA.

### **5.3 Analisi dei valori estremi di vento**

Per la valutazione delle condizioni di vento associate ad eventi estremi si è fatto riferimento ai risultati presentati nella relazione "*Analisi statistica dei dati storici di vento registrati dalle stazioni anemometriche*" redatta dall'Università di Genova nell'ambito del progetto europeo VENTO e PORTI.

Nell'ambito dello studio VENTO e PORTI è stata condotta un'analisi statistica dei valori estremi per le misure effettuate dal 1963 al 2007 presso l'aeroporto di Genova-Sestri. L'estensione temporale della serie storica esaminata ha consentito di effettuare un'analisi su un campione dati piuttosto numeroso.

Per valutare la distribuzione di probabilità del massimo valore annuale del vento  $V$ , è stata applicata sia una analisi asintotica del I tipo di Gumbel, sia una analisi di processo utilizzando la distribuzione generalizzata di Pareto.

La Figura 5-14, estratta dal rapporto VENTO e PORTI, mostra l'adattamento dei massimi valori annuali di vento alle distribuzioni di probabilità ottenute a seguito dell'analisi asintotica e dell'analisi di processo.

I valori del massimo vento annuale  $V$  atteso all'aeroporto di Genova in funzione del tempo di ritorno  $T_r$ , riportati in Figura 5-14, sono stati calcolati prendendo a riferimento la distribuzione asintotica del I tipo di Gumbel.

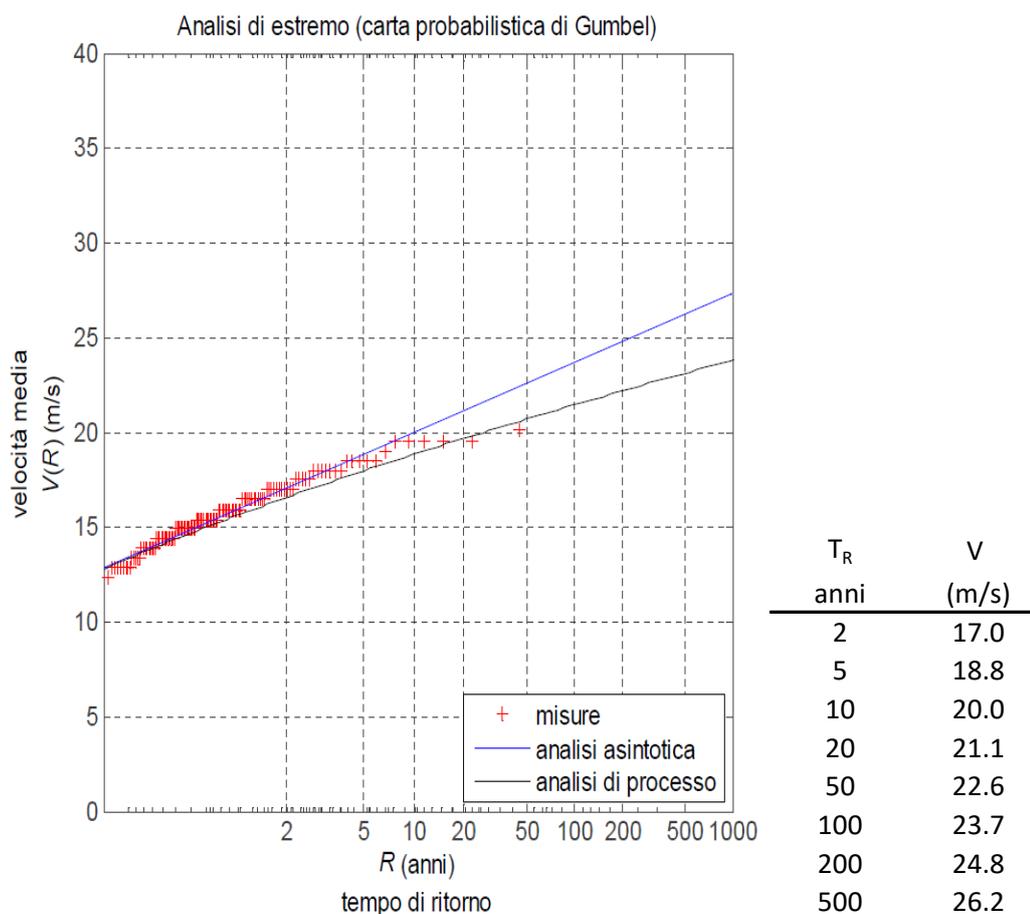


FIGURA 5-14. ADATTAMENTO DEI VALORI ESTREMI ANNUALI DI VENTO REGISTRATI DALLA STAZIONE METEO GENOVA-SESTRI (1963-2007) ALLA DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ DEI VALORI ESTREMI TIPO I DI GUMBEL. ESTRATTO DA "VENTO E PORTI - ANALISI STATISTICA DEI DATI STORICI DI VENTO REGISTRATI DALLE STAZIONI ANEMOMETRICHE".

## 6 ANALISI DEI DATI ONDAMETRICI DISPONIBILI

### 6.1 Caratteristiche delle serie di dati ondometrici disponibili

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso al largo del paraggio in esame si è fatto riferimento ai dati di moto ondoso di seguito descritti (per la localizzazione delle stazioni di misura o ricostruzione si veda la Figura 6-1):

- registrazioni ondometriche direzionali (effettuate tra il 1989 ed il 2014) effettuate dalla boa posta al largo La Spezia appartenente alla Rete Ondometrica Nazionale acquisite dall'ISPRA (vedi Tabella 4-2 - rif. B.1);
- registrazioni ondometriche direzionali (da ottobre 2012 a Settembre 2019) effettuate dalla boa ondometrica posta al largo di Capo Mele appartenente alla rete di misura della Regione Liguria (vedi Tabella 4-2 - rif. B.2);
- registrazioni ondometriche non direzionali (da Aprile 1978 a Settembre 1982) effettuate dalla boa ondometrica CNR/ENEL posta al largo di Nervi (vedi Tabella 4-2 - rif B.3);
- dati di moto ondoso in re-analisi ricostruiti tra il 1979 ed il 2018 per il mediterraneo dal DICCA con il modello di generazione e propagazione del moto ondoso WaveWatch III (WWIII). Dal database generato dal DICCA sono state acquisite le serie temporali estratte nei seguenti punti:
  - P\_000323 (vedi Tabella 4-2 - rif. B.4) al largo del Golfo di Genova;
  - P\_000367 al largo di La Spezia (vedi Tabella 4-2 - rif B.5);
  - P\_000354 al largo di Capo Mele (vedi Tabella 4-2 - rif. B.6).

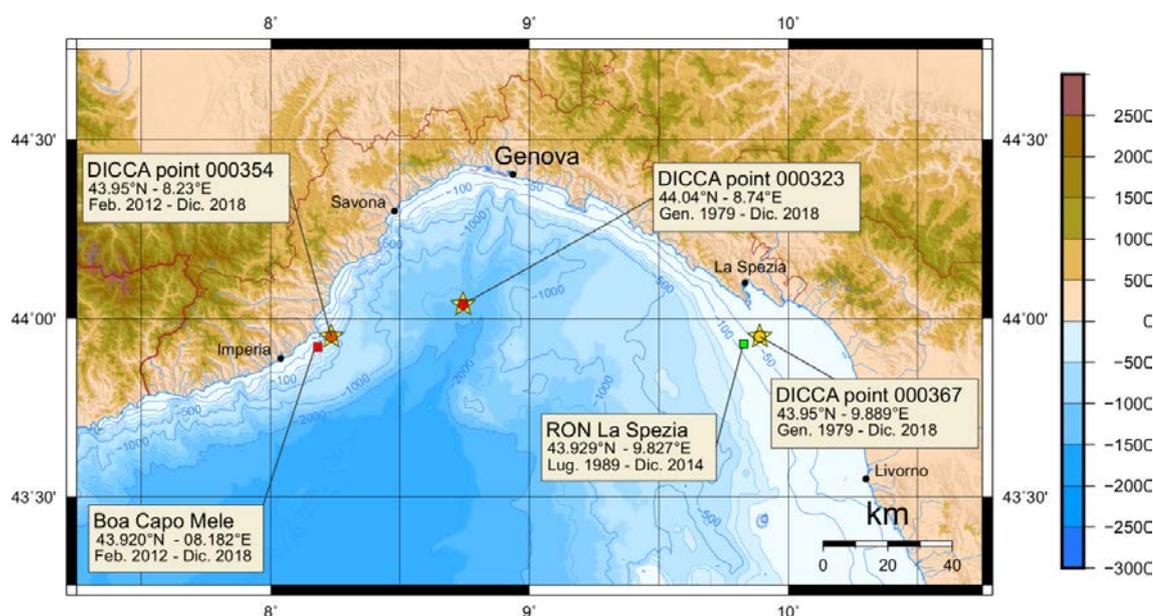


FIGURA 6-1. LOCALIZZAZIONE E DETTAGLI DELLE DIVERSE FONTI DI DATI DI MOTO ONDOSO UTILIZZATE PER LO STUDIO METEOMARINO

## 6.2 Registrazioni ondametriche della boa RON di La Spezia

La stazione ondametrica di La Spezia appartenente alla RON (Rete Ondametrica Nazionale gestita dall'ISPRA ex APAT) ha iniziato ad operare a Luglio 1989. Tra il 1989 ed il 2002 (RON 1.0) ha operato una boa ondametrica del tipo WAVEC della società olandese Datawell, con frequenza di acquisizione trioraria, posizionata in corrispondenza delle coordinate 43.929 °N, 9.828 °E, 10 km a Sud dell'Isola di Palmaria su fondali di circa 65 m.

I parametri di moto forniti dalla serie storica sono:

- altezza d'onda significativa spettrale ( $H_s$ );
- periodo medio spettrale del moto ondoso ( $T_m$ );
- periodo di picco spettrale del moto ondoso ( $T_p$ );
- direzione media di provenienza del moto ondoso (Dir).

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. In questo periodo la frequenza di acquisizione è stata semioraria.

A fine 2009, dopo un periodo di inattività di circa 3 anni, 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 La Spezia è rientrata in servizio a fine dicembre 2009 ed ha operato fino a dicembre 2014 con frequenza di acquisizione semioraria.

In Tabella 6-1 e nel grafico di Figura 6-2 è riportata l'analisi del rendimento dell'ondametro RON di La Spezia su base annuale tra il 1989 e il 2014, mentre in Figura 6-3 è riportato il rendimento mensile. I rendimenti sono stati calcolati estraendo dalla serie storica complessiva, costituita dai tre data-set, caratterizzati da una diversa frequenza di acquisizione, un'unica serie storica tri-oraria. Da questa serie storica si sono quindi calcolate le misure potenziali e quelle effettive ottenendo i rendimenti riportati in tabella. L'analisi del rendimento dell'ondametro porta a concludere che può risultare poco attendibile analizzare la serie storica nella sua totalità anche tenendo conto delle differenze di campionamento perché nel periodo 2001-2009 si sono verificate due lunghe interruzioni ed inoltre il rendimento dello strumento nel periodo 2002-2006 è risultato molto piccolo (55%).

**Studio delle condizioni meteomarine**

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

	<b>TOTALE</b>	<b>RON 1.0</b>	<b>RON 2.0</b>	<b>RON 3.0</b>
	Lug.1989 Dic. 2014	Lug.1989 Dic.2000	Lug.2002 Sett. 2006	Gen.2010 Dic.2014
Totale misure	52316	31143	7731	13407
Misure mancanti	22204	2473	7731	1201
Rendimento	70.2%	92.6%	55.7%	91.8%

Per eseguire l'analisi climatica del moto ondoso si è quindi proceduto ad analizzare separatamente due periodi di osservazione: RON 1.0 1989-2000 e RON 3.0 2010-2014.

In Figura 6-4 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  per le serie storiche di La Spezia RON 1.0 e RON 3.0 da cui si può osservare una forte prevalenza degli eventi di moto ondoso provenienti da Libeccio [210 - 240°N] che rappresentano circa il 30% degli stati di mare.

I risultati mostrati in Figura 6-4 mostrano che il clima di moto ondoso ottenuto per il periodo 1989-2000 non si discosta sostanzialmente rispetto al clima ottenuto per il periodo 2010-2014.

## Studio delle condizioni meteomarine

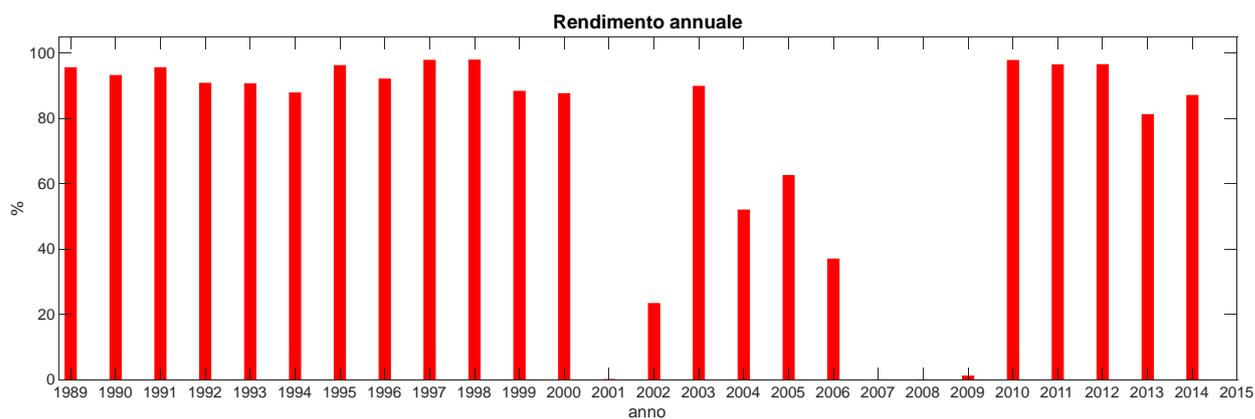
Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**TABELLA 6-1. ANALISI DEL RENDIMENTO DELLA BOA RON DI LA SPEZIA.  
PERIODO DI RIFERIMENTO 1989 - 2014**

RON La Spezia					
	Anno	Misure Potenziali	Misure sensore ondametrico		
			Presenti	Mancanti	Rendimento%
RON 1.0	1989	1472	1406	66	95.5
	1990	2920	2720	200	93.2
	1991	2920	2789	131	95.5
	1992	2928	2658	270	90.8
	1993	2920	2645	275	90.6
	1994	2920	2564	356	87.8
	1995	2920	2809	111	96.2
	1996	2928	2695	233	92.0
	1997	2920	2856	64	97.8
	1998	2920	2857	63	97.8
	1999	2920	2579	341	88.3
	2000	2928	2565	363	87.6
	2001	2920	1	2919	0.0
RON 2.0	2002	2920	681	2239	23.3
	2003	2920	2623	297	89.8
	2004	2928	1521	1407	51.9
	2005	2920	1826	1094	62.5
	2006	2920	1080	1840	37.0
periodo di inattività	2007	2920	0	2920	0.0
	2008	2928	0	2928	0.0
RON 3.0	2009	2920	34	2886	1.2
	2010	2920	2855	65	97.8
	2011	2920	2814	106	96.4
	2012	2928	2825	103	96.5
	2013	2920	2371	549	81.2
	2014	2920	2542	378	87.1



**FIGURA 6-2. RENDIMENTO ANNUALE DELLA BOA ONDAMETRICA RON DI LA SPEZIA  
LUGLIO 1989 - DICEMBRE 2014.**

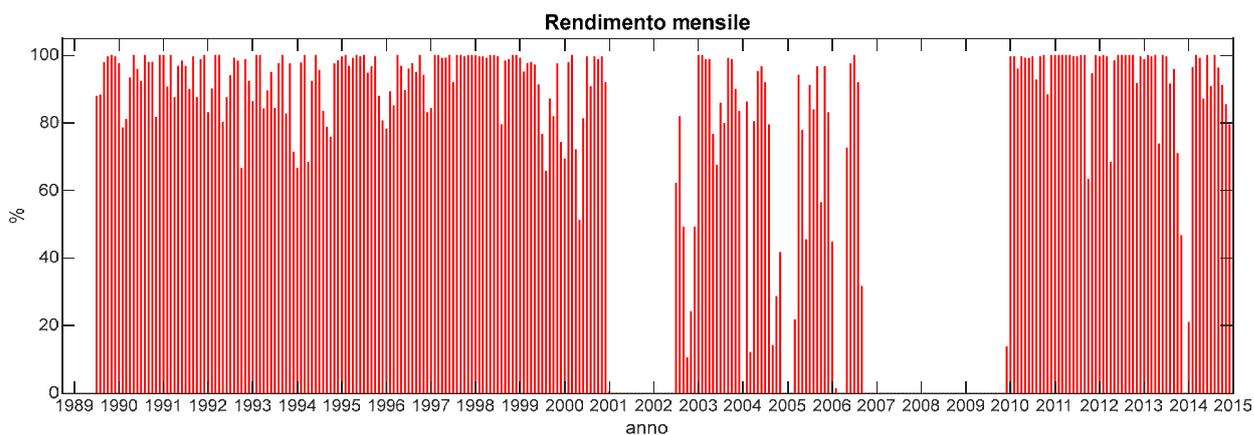


FIGURA 6-3. RENDIMENTO MENSILE DELLA BOA ONDAMETRICA RON DI LA SPEZIA LUGLIO 1989 - DICEMBRE 2014.

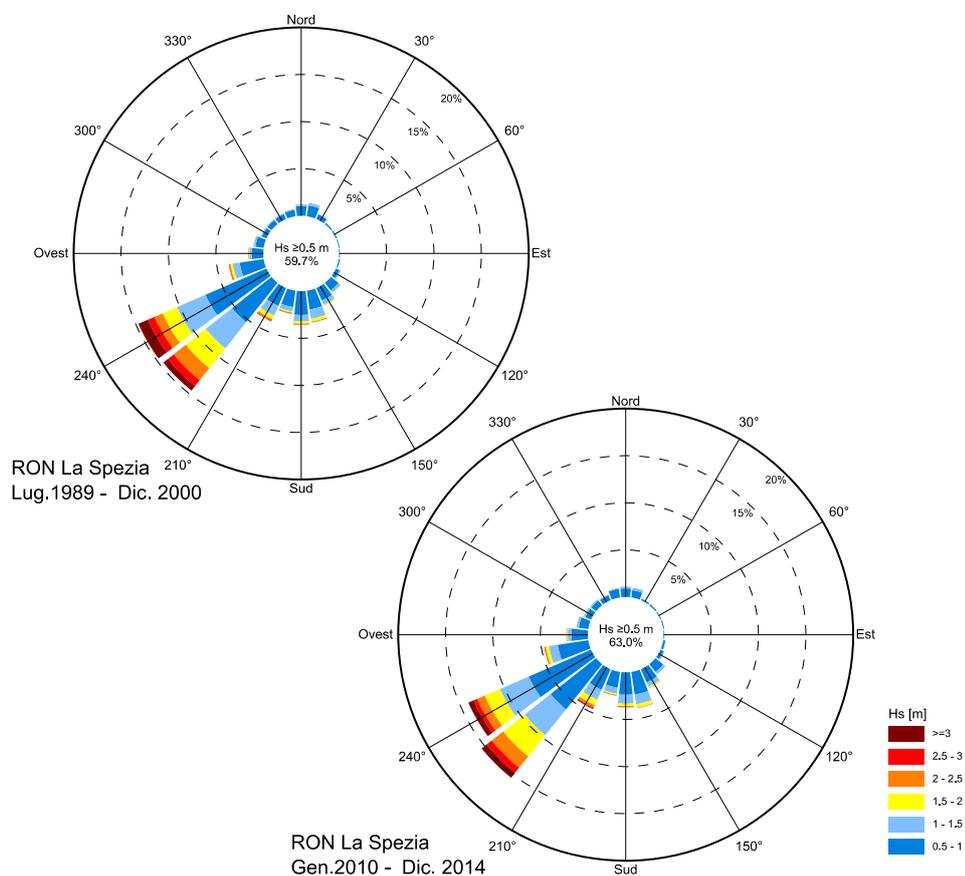


FIGURA 6-4. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  REGISTRATA DALLA BOA RON DI LA SPEZIA NEL PERIODO 1989-2000 E NEL PERIODO 2010-2014.

In Figura 6-5 è presentata la distribuzione polare dei valori di  $H_s$  registrati al culmine degli eventi di moto ondoso (mareggiate caratterizzate da valori di  $H_s \geq 2,0$  m) registrate dalla boa ondometrica RON di La Spezia relativa a tutto il suo periodo di funzionamento 1989-2014. Complessivamente in 25 anni di osservazioni (seppur discontinue) sono state individuate 420 mareggiate. Le altezze d'onda al colmo sono in maggior misura comprese tra 2 e 3 m e solo pochi eventi hanno avuto valori di  $H_s$  superiori a 5.0 m (16/420). La distribuzione direzionale dei colmi delle mareggiate individuate presenta una prevalenza di stati di mare compresi tra 210 e 250 °N che risulta pertanto il settore di traversia dominante. Il grafico mostra inoltre la corrispondenza tra la durata degli eventi di moto ondoso (durata sopra la soglia di  $H_s = 2,0$  m) e il valore di  $H_s$  al colmo delle mareggiate, che generalmente mostrano una durata compresa tra 50 e 100 ore.

In Tabella 6-2 sono riportati in ordine cronologico gli eventi di mareggiata registrati dalla boa di La Spezia contraddistinti da un valore di altezza d'onda al colmo  $H_s \geq 5.0$  m.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 6-2. EVENTI DI MAREGGIATA CON ALTEZZA D'ONDA AL COLMO  $H_s \geq 5.0$  M OSSERVATI DALLA BOA RON DI LA SPEZIA NEL PERIODO 1989-2000 E NEL PERIODO 2010-2014.

Data colmo	ora	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	Dir	Data Inizio	ora	Data fine	ora	Durata [ore]
27/02/1990	15:00	6.6	11.1	239	26/02/1990	6:00	02/03/1990	12:00	105
30/10/1990	03:00	5.4	10	235	26/10/1990	18:00	31/10/1990	6:00	111
18/10/1991	21:00	5.0	10	240	17/10/1991	9:00	20/10/1991	6:00	72
26/10/1992	03:00	5.3	10	241	24/10/1992	21:00	29/10/1992	0:00	102
16/12/1993	09:00	5.0	10	241	15/12/1993	6:00	18/12/1993	18:00	87
20/11/1996	21:00	5.7	11.1	233	16/11/1996	15:00	23/11/1996	18:00	174
09/02/1999	09:00	5.0	10	242	05/02/1999	3:00	11/02/1999	9:00	153
18/11/1999	21:00	5.2	10	238	17/11/1999	6:00	20/11/1999	21:00	90
26/12/1999	15:00	6.2	10	230	25/12/1999	6:00	28/12/1999	0:00	69
06/11/2000	15:00	5.6	9.1	191	03/11/2000	0:00	09/11/2000	12:00	159
04/02/2003	03:00	5.7	10.5	244	03/02/2003	6:00	06/02/2003	12:00	81
05/10/2003	06:00	6.5	10.5	240	03/10/2003	21:00	06/10/2003	12:00	66
23/02/2004	12:00	5.1	10	237	23/02/2004	3:00	25/02/2004	0:00	48
17/12/2011	06:00	5.8	11.8	230	12/12/2011	18:00	19/12/2011	0:00	153
28/10/2012	09:00	5.3	10.5	229	26/10/2012	18:00	30/10/2012	0:00	81
19/03/2013	00:00	5.8	9.5	238	17/03/2013	9:00	20/03/2013	15:00	81

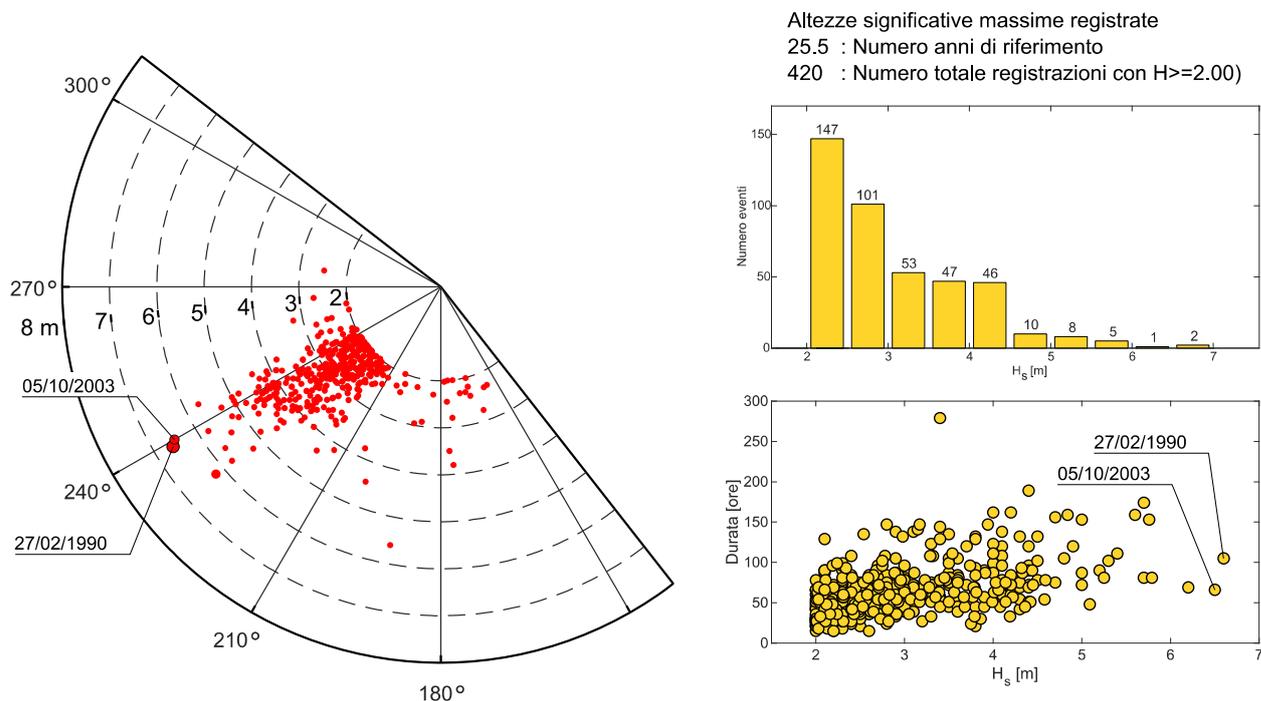


FIGURA 6-5. DISTRIBUZIONE DELLE ALTEZZE D'ONDA MASSIME ASSOCIATE AGLI EVENTI DI MAREGGIATA OSSERVATI DALLA BOA RON DI LA SPEZIA NEL PERIODO 1989-2014.

### **6.3 Registrazioni ondametriche della boa di Capo Mele**

L'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure (ARPAL) ha installato nel 2012 una boa ondametrica direzionale posizionata nel punto di coordinate 43.9209°N, 8.18213°E, 3.4 km a Sud-SudEst di Capo Mele, su fondali compresi tra -80 e -100 m s.l.m.. Lo strumento di misura ha iniziato ad operare nel 2012 ed ha acquisito dati direzionali di moto ondoso, con cadenza semioraria.

Il diagramma di Figura 6-6 mostra i valori di altezza d'onda significativa  $H_s$  misurati dall'ondametro nel periodo compreso tra Febbraio 2012 e Dicembre 2018 (data di acquisizione dei dati per la redazione del presente studio).

In Tabella 6-3 e nei grafici di Figura 6-7 e Figura 6-8 viene mostrato il rendimento della boa ondametrica di Capo Mele su base annuale e mensile. Complessivamente il rendimento risulta piuttosto contenuto, pari in media al 68.7%. Solo nei primi due anni di funzionamento il rendimento si è mantenuto sopra il 90%, in seguito il rendimento risulta modesto con un minimo nell'anno 2015 dove si è avuto un rendimento del 38.9%.

Nel diagramma polare di Figura 6-9 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento degli stati di mare osservati dalla boa ondametrica con altezza d'onda significativa  $H_s \geq 0.5$  m.

Nel diagramma polare di Figura 6-9 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  osservata dalla boa ondametrica di Capo Mele. Le osservazioni mostrano una prevalenza di stati di moto ondoso provenienti dal settore di Libeccio compreso tra 180 e 240 °N che rappresentano circa il 30% degli stati di mare registrati.

In Tabella 6-2 sono riportati, in ordine cronologico, i 10 eventi di mareggiata più elevati registrati dalla boa ARPAL di Capo Mele nel periodo di 2012-2018.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

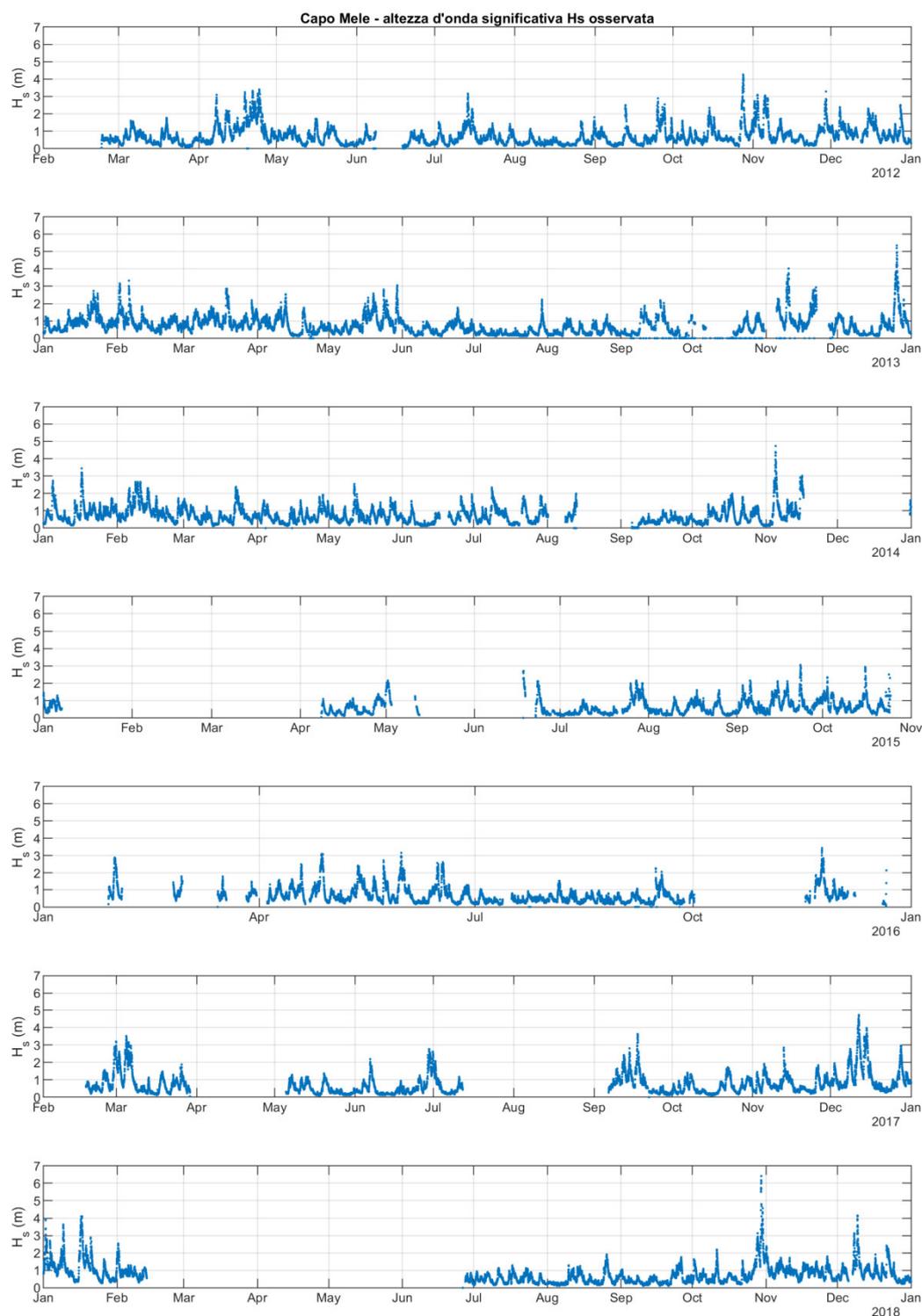


FIGURA 6-6. ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  MISURATA DALLA STAZIONE ONDAMETRICA DI CAPO MELE (PERIODO FEBBRAIO 2012 - DICEMBRE 2018).

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 6-3. ANALISI DEL RENDIMENTO DELLA BOA ONDAMETRICA DI CAPO MELE TRA IL 2012 E IL 2019.

Boa Ondametrica di Capo Mele				
Anno	Misure Potenziali	Misure sensore ondametrico		
		Presenti	Mancanti	Rendimento%
2012	15006	14344	662	95.6
2013	17520	15804	1716	90.2
2014	17520	13509	4011	77.1
2015	17520	6821	10699	38.9
2016	17568	9820	7748	55.9
2017	17520	10705	6815	61.1
2018	17520	10815	6705	61.7
<b>TOTALE</b>	<b>120174</b>	<b>81818</b>	<b>38356</b>	<b>68.7</b>

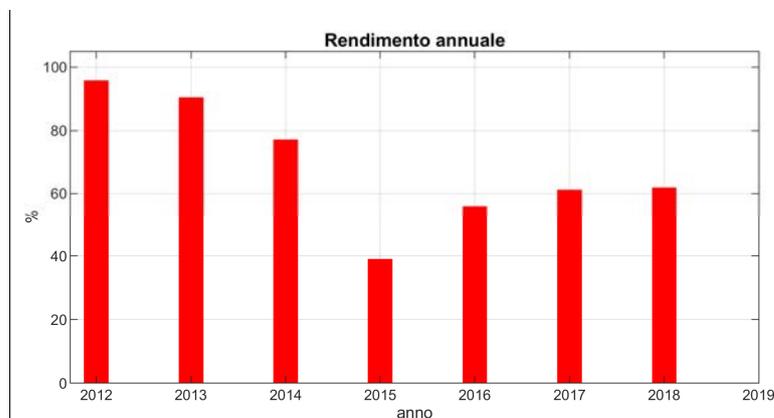


FIGURA 6-7. RENDIMENTO ANNUALE DELLA BOA ONDAMETRICA DI CAPO MELE FEBBRAIO 2012 - DICEMBRE 2018.

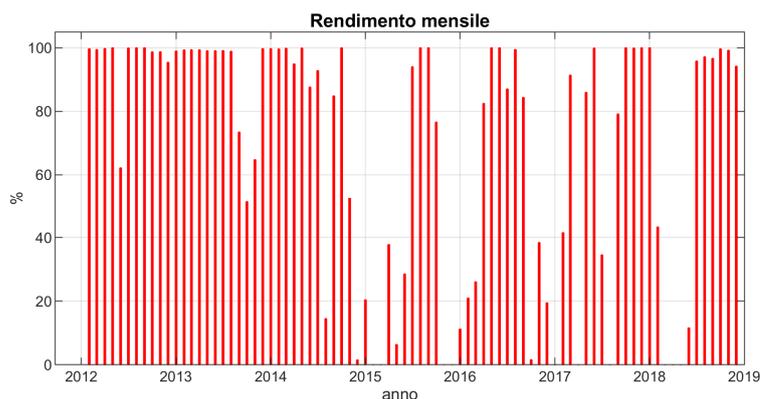


FIGURA 6-8. RENDIMENTO MENSILE DELLA BOA ONDAMETRICA DI CAPO MELE FEBBRAIO 2012 - DICEMBRE 2018.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

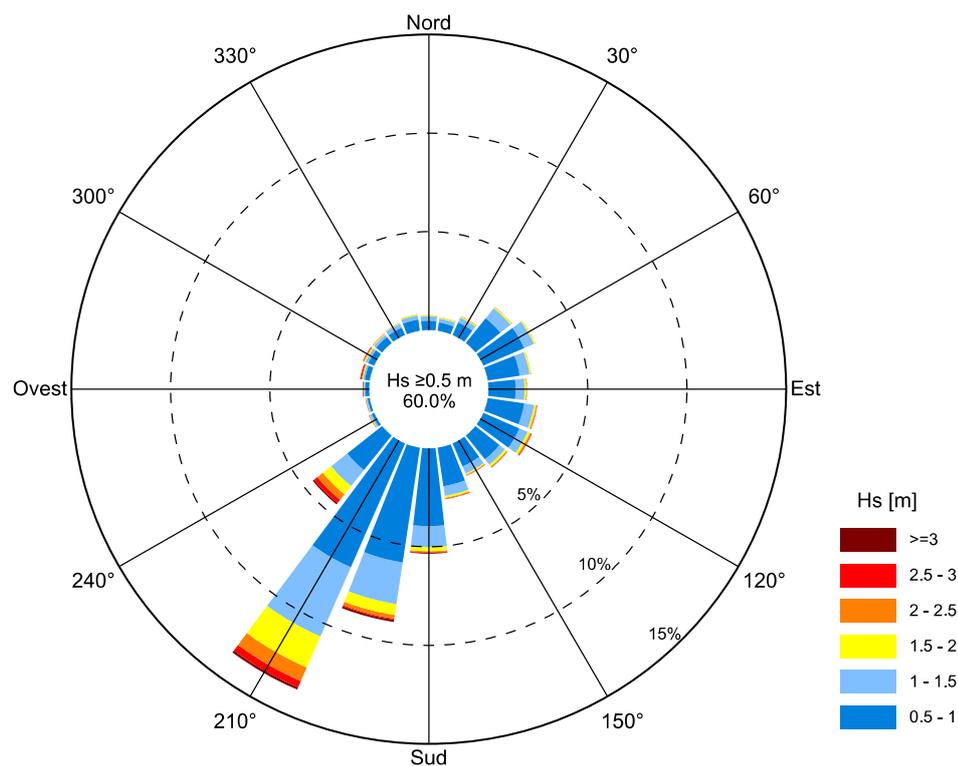


FIGURA 6-9. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  REGISTRATA DALLA BOA ONDAMETRICA DI CAPO MELE. PERIODO DI RIFERIMENTO FEBBRAIO 2012 - SETTEMBRE 2019

TABELLA 6-4. EVENTI DI MAREGGIATA PIÙ INTENSI OSSERVATI DALLA BOA DI CAPO MELE NEL PERIODO 2012-2018.

Data colmo	ora	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	Dir	Data inizio	ora	Data fine	ora	Durata [ore]
28/10/2012	3:00	4.26	9.6	217	27/10/2012	1:00	29/10/2012	2:00	50
10/11/2013	11:00	4.02	9.2	340	09/11/2013	10:00	12/11/2013	9:00	72
<b>26/12/2013</b>	<b>2:00</b>	<b>4.96</b>	<b>10.1</b>	<b>186</b>	<b>24/12/2013</b>	<b>17:00</b>	<b>28/12/2013</b>	<b>1:00</b>	<b>81</b>
05/11/2014	0:00	4.73	10.1	166	04/11/2014	0:00	06/11/2014	14:00	63
11/12/2017	21:00	4.65	9.5	191	10/12/2017	17:00	14/12/2017	20:00	100
14/12/2017	21:00	3.98	9.2	219	14/12/2017	21:00	17/12/2017	0:00	52
01/01/2018	21:00	3.87	8.3	218	01/01/2018	4:00	04/01/2018	20:00	89
17/01/2018	5:00	4.10	9.5	219	15/01/2018	22:00	20/01/2018	4:00	103
<b>29/10/2018</b>	<b>23:00</b>	<b>6.41</b>	<b>9.6</b>	<b>278</b>	<b>29/10/2018</b>	<b>16:00</b>	<b>30/10/2018</b>	<b>19:00</b>	<b>28</b>
09/12/2018	11:00	3.91	9.2	121	07/12/2018	22:00	10/12/2018	23:00	74

In Figura 6-10 è presentata la distribuzione direzionale dei colmi delle mareggiate (con  $H_s \geq 2,0$  m) registrate dalla boa ondometrica di Capo Mele nel periodo 2012 - 2018.

In poco più di sette anni di osservazioni (7.6) sono state osservate complessivamente 86 mareggiate. Le altezze d'onda al colmo sono in maggior misura comprese tra 2 e 3 m e solo pochi eventi hanno avuto valori di  $H_s$  superiori a 4.0 m (7/86).

La distribuzione direzionale dei colmi delle mareggiate individuate presenta una prevalenza di stati di mare compresi tra 180 e 240 °N. L'evento più elevato in termini di altezza d'onda, si è verificato durante la mareggiata del 28-30 Ottobre 2018 con  $H_s = 6.41$  m. Questo evento meteomarino, che ha interessato gran parte della costa ligure, ha prodotto ingenti danni specialmente ai porti del Golfo del Tigullio. L'evento in generale è iniziato con vento e moto ondoso proveniente da Scirocco che hanno progressivamente ruotato in senso antiorario verso Libeccio.

I dati registrati dall'ondametro durante la mareggiata (riportati in Figura 6-11) mostrano che nella fase di crescita la direzione media di provenienza si è mantenuta tra 240 e 270 °N per poi ruotare bruscamente a 278°N al colmo della mareggiata. Desta qualche perplessità la direzione del moto ondoso (278°N) registrata dallo strumento al culmine dell'evento in quanto, rispetto alla posizione dello strumento, le onde risultano provenire da terra. Probabilmente la direzione del moto ondoso, che in generale non costituisce una proprietà intrinseca delle onde e che viene dedotta dai movimenti della boa, ha risentito in questo caso delle onde riflesse dalla costa rocciosa. Questa interpretazione è avvalorata dal fatto che la boa si trova molto vicina alla costa fortemente riflettente.

Il grafico di Figura 6-10 mostra inoltre la corrispondenza tra la durata degli eventi di moto ondoso (durata sopra la soglia di  $H_s = 2,0$  m) e il valore di  $H_s$  al colmo delle mareggiate, con una durata compresa mediamente tra 50 e 100 ore.

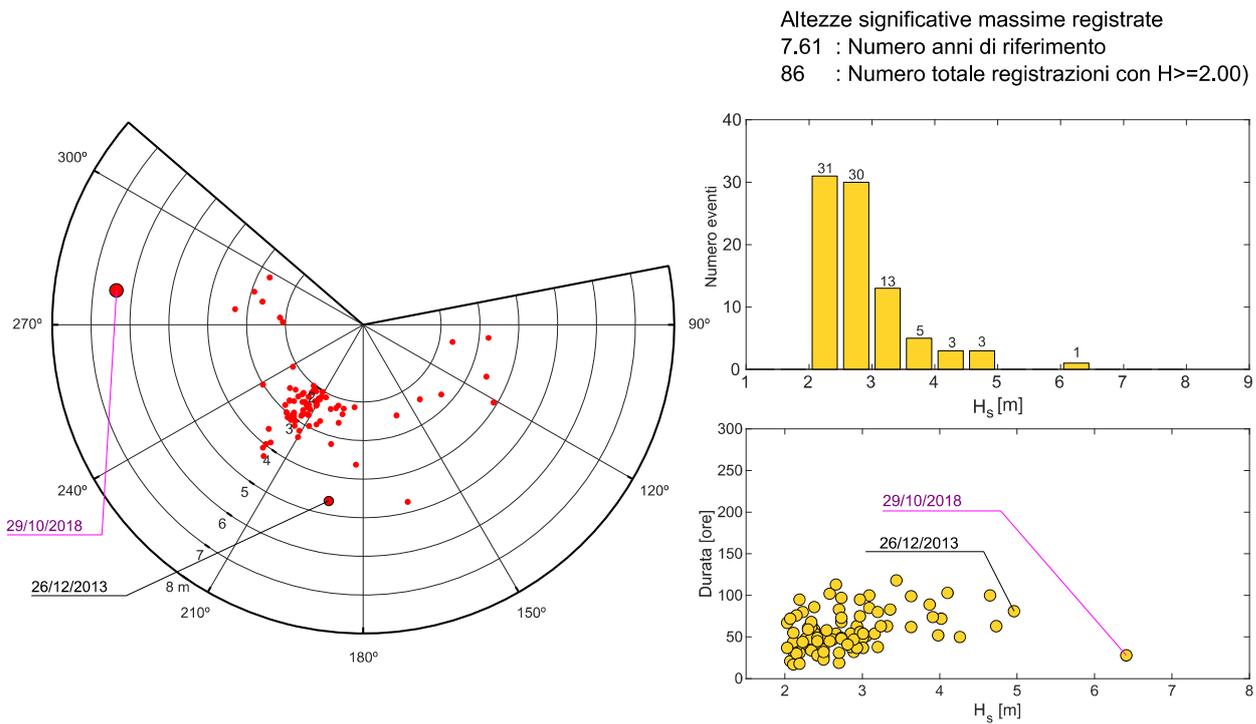


FIGURA 6-10. DISTRIBUZIONE DELLE ALTEZZE D'ONDA MASSIME ASSOCIATE AGLI EVENTI DI MAREGGIATA OSSERVATI DALLA BOA DI CAPO MELE PERIODO 2012-2018.

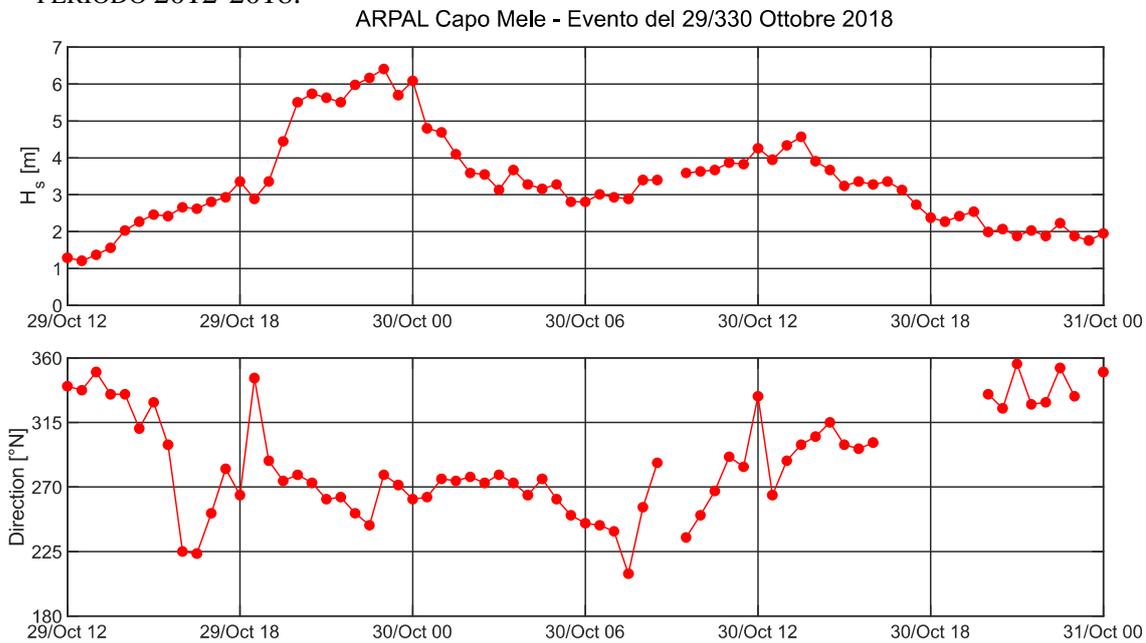


FIGURA 6-11. EVENTO METEO MARINO DEL 29-30 OTTOBRE 2018 REGISTRAZIONI DELLA BOA ONDAMETRICA ARPAL DI CAPO MELE.

#### 6.4 Dati ondametrici non direzionali registrati dalla boa di Genova Nervi

A fine anni '70 l'ENEL ha predisposto una rete di rilevamento del moto ondoso per effettuare uno studio della dinamica dei litorali dei litorali liguri.

Ad Aprile 1978 è stata installata una boa ondometrica Datawell non direzionale ormeggiata in prossimità di Genova Nervi, a circa 1500 m dalla costa su fondali di 35 m.

Dai tre rapporti originali di cui si dispone è possibile estrarre le seguenti informazioni:

- l'ondametro ha funzionato nel 1978 dal 7 Aprile al 25 Giugno e poi dal 25 Luglio a Dicembre, complessivamente ha effettuato 5358 registrazioni orarie pari all'83.1% del periodo di funzionamento;
- nel 1979 l'ondametro ha operato da Gennaio a Marzo e da Maggio a Settembre, gli altri mesi sono stati privi di informazioni per il disormeggio della boa. Complessivamente ha effettuato 4383 registrazioni, pari al 50% del totale;
- le misure di moto ondoso sono riprese a partire dal Novembre 1981. Durante l'anno 1982 l'ondametro ha funzionato in maniera alquanto discontinua, nel periodo gennaio - settembre le registrazioni sono state 5514.
- la massima altezza d'onda osservata si è verificata in data 10/1 1979 con un valore di  $H_{1/3}$  di 4.07 m;
- la frequenza di accadimento osservata per le diverse classi di altezza d'onda  $H_{1/3}$  è la seguente:

$H_{1/3}$ (cm)	50	100	150	200	250	300	350	400
Freq. accadimento	69.9	22.65	5.57	1.8	0.27	0.05	0.05	0.00
ore/anno	6123	1984	488	158	24	4	4	0

#### 6.5 Dati in ricostruzione forniti dal DICCA

Per il presente studio meteomarino sono state acquisite dal servizio MeteOcean del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova (DICCA), le serie storiche dei dati di vento e moto ondoso ottenuti utilizzando una procedura di ricostruzione del moto ondoso (hindcasting) a partire dai dati di vento ricostruiti in rianalisi.

La serie storiche acquisite nei punti precedentemente indicati al largo di Genova, La Spezia e Capo Mele, si estendono dal 1979 al 2018, e forniscono, con cadenza oraria, i parametri spettrali di moto ondoso ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $T_{m-1,0}$ , Dir) e i valori di direzione e intensità del vento.

Le serie storiche analizzate risultano dal punto di vista statistico molto robuste, si dispone infatti di un elevatissimo numero di dati (circa **350000 eventi**) con un rendimento prossimo al 100%.

MeteOcean utilizza il modello di generazione del moto ondoso di terza generazione WAVEWATCH III utilizzando una griglia di calcolo con passo di 10 km estesa. La forzante è rappresentata dal campo di vento ricostruito in rianalisi mediante il modello di circolazione atmosferica WRF applicato su scala ridotta al bacino del Mar Mediterraneo utilizzando come condizioni al contorno i dati in rianalisi forniti dal centro meteorologico americano NOAA-CFSR.

I dati prodotti dal DICCA costituiscono una delle fonti più attendibili per il Mediterraneo, a ragione delle seguenti motivazioni: (i) possiedono una risoluzione spaziale elevata; (ii) possiedono una risoluzione temporale elevata (1 ora); (iii) sono stati largamente controllati in numerosi punti del Mediterraneo mediante confronti con misure ondametriche dirette e i risultati dei confronti sono stati pubblicati in articoli scientifici.

#### 6.5.1 Dati di moto ondoso in ricostruzione al largo del Golfo di Genova

Il punto di ricostruzione del moto ondoso P\_000323, selezionato al largo del Golfo di Genova si trova in corrispondenza delle coordinate Lon: 8.74°, Lat: 44.04° su fondali di 1680 m.

In Figura 6-12 è rappresentata la distribuzione direzionale di  $H_s$  dei dati di moto ondoso in ricostruzione. Trascurando gli stati di mare provenienti da Nord, i quali evidentemente tendono ad annullarsi spostandosi verso la costa posta a Nord del punto di ricostruzione in analisi, il clima ondametrico a largo presenta una significativa bimodalità del moto ondoso incidente da largo.

Il settore di traversia prevalente risulta essere quello di Libeccio [210-240°N], per il quale si hanno i massimi fetch geografici ed efficaci con altezze d'onda comprese in media tra  $1.0 < H_s < 3.0$  m.

Il secondo settore di traversia è costituito dal moto ondoso proveniente da Scirocco-Mezzogiorno.

Gli eventi provenienti dal settore di Tramontana [345-15 °N] presentano una frequenza di accadimento significativa congruente con la rosa anemometrica locale già descritta in precedenza (vedi Figura 5-2).

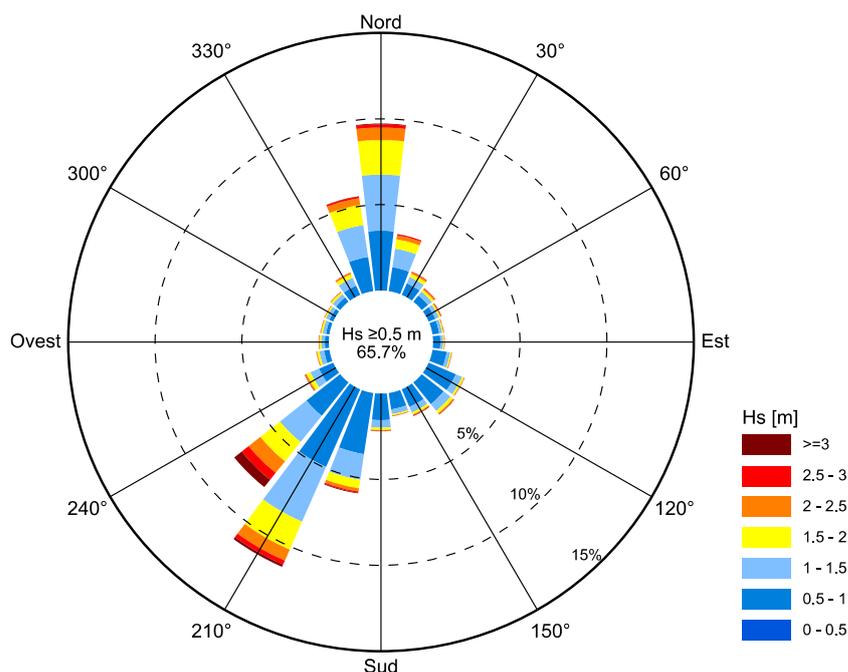


FIGURA 6-12. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  RICOSTRUITA DAL DICCA NEL PUNTO P\_000323 AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA - PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.

La Figura 6-13 mostra le mareggiate estratte dalla serie DICCA al largo del Golfo di Genova. In 40 anni di ricostruzione sono individuate 1066 mareggiate. Le altezze d'onda al colmo di ciascun evento sono in maggior misura comprese tra 2 e 3 m e solo un numero limitato di eventi hanno avuto al colmo valori di  $H_s$  superiori a 5.0 m (10/1066). Gli stati di mare estremi compresi tra le direzioni 210 e 240 °N risultano prevalenti.

Nel grafico sono indicati in nero gli eventi più elevati in termini di altezza d'onda  $H_s$  ed in viola l'evento estremo, già citato in precedenza, che si è abbattuto recentemente sulla riviera di Levante della Liguria a fine ottobre del 2018.

TABELLA 6-5. EVENTI DI MAREGGIATA PIÙ INTENSI RICOSTRUITI DAL DICCA NEL PUNTO

## 000323 AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA

Data colmo	ora	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir	Data Inizio	ora	Data fine	ora	Durata [ore]
26/02/1989	10:00	5.05	11.9	221	24/02/1989	7:00	01/03/1989	9:00	123
28/12/1999	5:00	5.63	10.6	226	25/12/1999	7:00	30/12/1999	15:00	129
20/02/2002	21:00	5.01	10.0	226	20/02/2002	13:00	22/02/2002	12:00	48
<b>21/03/2008</b>	<b>18:00</b>	<b>6.15</b>	<b>10.8</b>	<b>224</b>	<b>21/03/2008</b>	<b>11:00</b>	<b>23/03/2008</b>	<b>5:00</b>	<b>43</b>
30/10/2008	5:00	5.13	10.1	210	29/10/2008	1:00	01/11/2008	12:00	84
16/12/2011	17:00	5.51	10.1	221	13/12/2011	18:00	19/12/2011	12:00	139
20/11/2015	22:00	5.18	9.8	227	20/11/2015	16:00	22/11/2015	12:00	45
11/01/2016	22:00	5.15	10.0	228	06/01/2016	13:00	14/01/2016	10:00	190
11/12/2017	16:00	5.01	10.3	199	10/12/2017	1:00	13/12/2017	15:00	87
<b>29/10/2018</b>	<b>23:00</b>	<b>5.93</b>	<b>10.3</b>	<b>217</b>	<b>26/10/2018</b>	<b>20:00</b>	<b>01/11/2018</b>	<b>22:00</b>	<b>147</b>

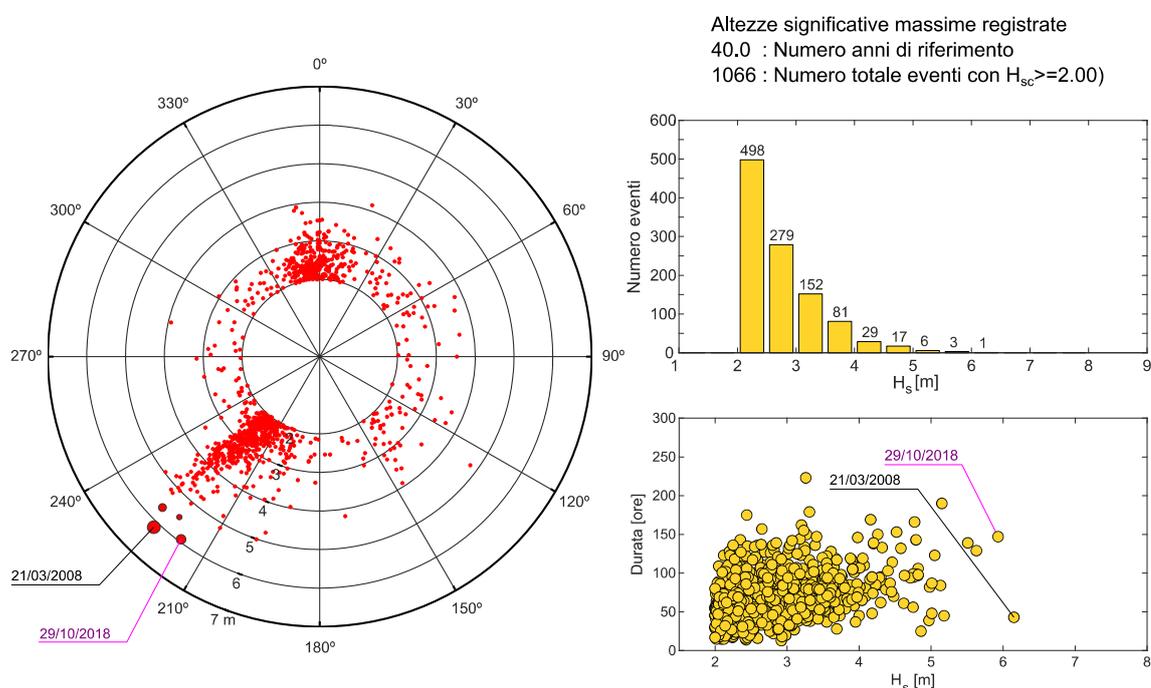


FIGURA 6-13. DISTRIBUZIONE DELLE ALTEZZE D'ONDA AL COLMO DELLE MAREGGIATE RICOSTRUITE AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA DAL DICCA NEL PUNTO 000323 PERIODO 1978 - 2018.

### 6.5.2 Dati di moto ondoso in ricostruzione al largo di Capo Mele

È stata acquisita la serie storia dei dati di moto ondoso in ricostruzione per un punto al largo di Capo Mele relativa al periodo Febbraio 2012 - Dicembre 2018 (periodo di funzionamento dell'ondametro ARPAL di Capo Mele).

Il punto DICCA P\_000354 è posizionato 5 km a SudEst di Capo Mele su fondali di 350 m e si trova ad una distanza di 4.5 km ad Est della Boa ARPAL di Capo Mele (vedi Figura 6-14).

Il diagramma polare di Figura 6-15 mostra la distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  per il punto DICCA al largo di Capo Mele.

Il clima di moto ondoso presenta una prevalenza di stati di mare provenienti da Libeccio e Mezzogiorno, con altezze d'onda comprese in genere tra  $0.5 < H_s < 2.0$  m ed una frequenza di accadimento complessiva del 33%. La serie di dati in ricostruzione mostra anche la prevalenza di stati di mare da Grecale che si presentano in media con una frequenza di accadimento prossima al 18%.

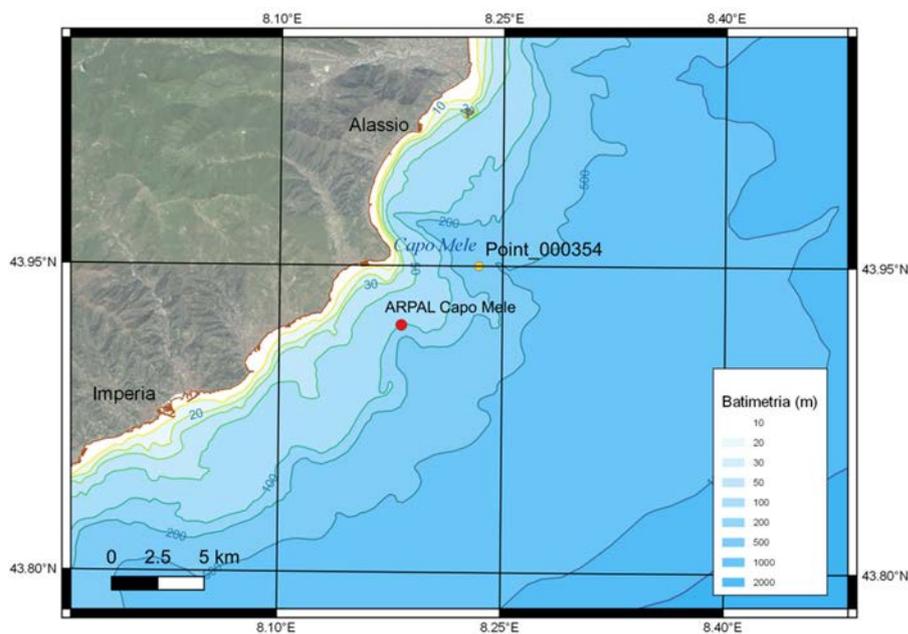


FIGURA 6-14. LOCALIZZAZIONE DEL PUNTO DICCA DI RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO IN PROSSIMITÀ DI CAPO MELE.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

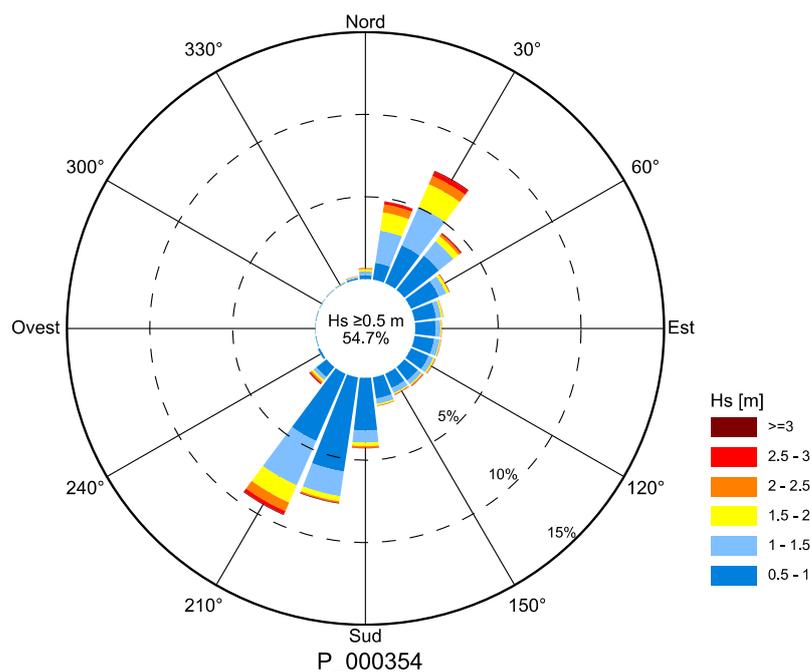


FIGURA 6-15. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  RICOSTRUITA DAL DICCA NEI PUNTI P\_000354 E P\_000391 AL LARGO DI CAPO MELE - PERIODO 1979-2018.

Nel periodo Febbraio 2012 - Dicembre 2018, nel punto 000354 al largo di Capo Mele, sono state ricostruite 131 mareggiate con altezza d'onda al colmo superiore ad  $H_s = 2.0$  m. I diagrammi di Figura 6-16 mostrano la distribuzione direzionale dei colmi di mareggiata, il numero di eventi e la durata in ore delle mareggiate al variare di  $H_s$ .

Le mareggiate più intense ottenute nel punto P\_000354 sono riportate in Tabella 6-6.

TABELLA 6-6. EVENTI DI MAREGGIATA PIÙ INTENSI RICOSTRUITI DAL DICCA NEL PUNTO 000354 AL LARGO DI CAPO MELE NEL PERIODO FEB.2012 - DIC.2018.

Data colmo	ora	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	Dir	Data Inizio	ora	Data fine	ora	Durata [ore]
18/03/2013	23:00	3.63	8.5	220	17/03/2013	11:00	19/03/2013	21:00	59
<b>26/12/2013</b>	<b>12:00</b>	<b>3.36</b>	<b>8.5</b>	<b>198</b>	<b>24/12/2013</b>	<b>15:00</b>	<b>27/12/2013</b>	<b>02:00</b>	<b>60</b>
05/02/2015	10:00	3.43	6.9	30	03/02/2015	15:00	08/02/2015	0:00	106
15/03/2015	17:00	3.43	8.6	109	15/03/2015	2:00	18/03/2015	4:00	75
02/10/2015	14:00	3.48	9.0	55	28/09/2015	3:00	04/10/2015	7:00	149
20/11/2015	21:00	3.79	9.1	217	20/11/2015	15:00	22/11/2015	1:00	35
11/01/2016	23:00	3.82	8.4	218	10/01/2016	11:00	13/01/2016	12:00	74
05/03/2016	6:00	3.46	7.8	190	04/03/2016	16:00	06/03/2016	13:00	46
18/01/2017	0:00	3.55	7.5	34	15/01/2017	3:00	20/01/2017	23:00	141
04/03/2017	17:00	3.88	9.4	209	04/03/2017	1:00	06/03/2017	23:00	71
11/12/2017	13:00	4.60	10.1	191	10/12/2017	15:00	12/12/2017	21:00	55
<b>29/10/2018</b>	<b>22:00</b>	<b>5.48</b>	<b>10.2</b>	<b>209</b>	<b>27/10/2018</b>	<b>6:00</b>	<b>01/11/2018</b>	<b>19:00</b>	<b>134</b>

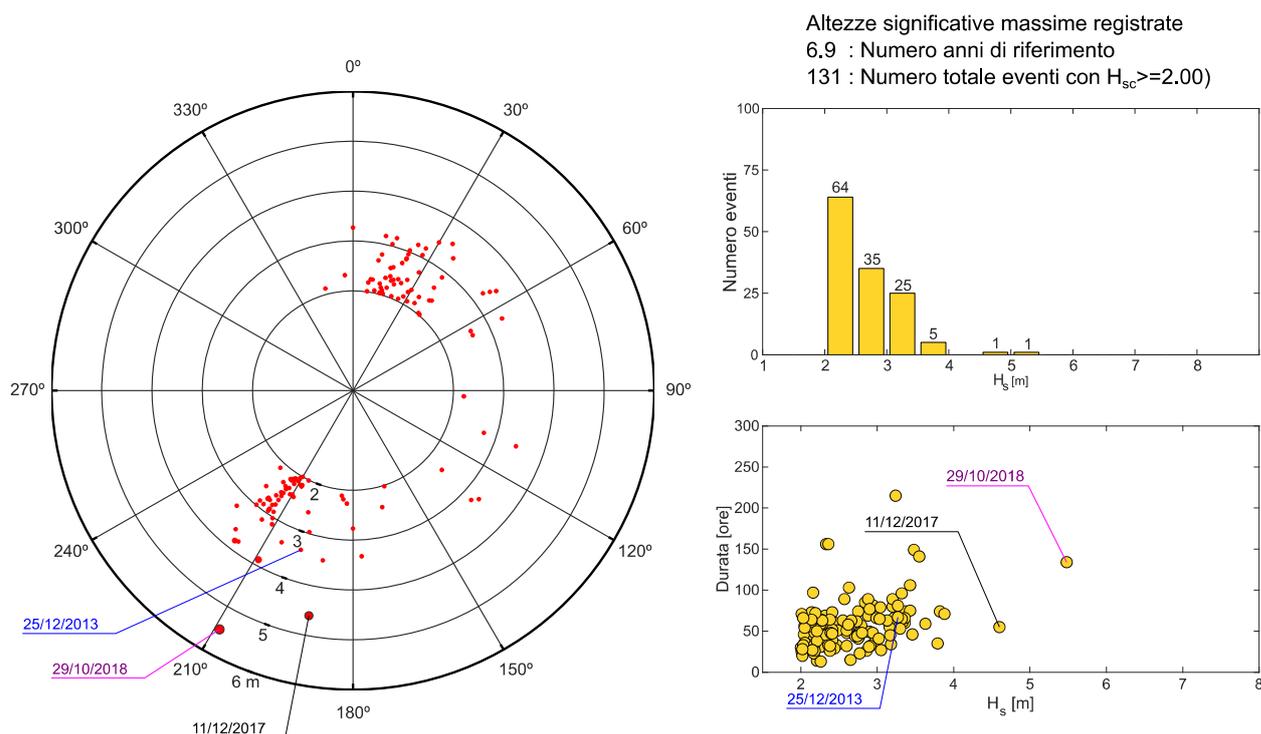


FIGURA 6-16. DISTRIBUZIONE DELLE ALTEZZE D'ONDA AL COLMO DELLE MAREGGIATE RICOSTRUITE AL LARGO DI CAPO MELE NEL PUNTO DICCA 000354 PERIODO FEB. 2012 - DIC. 2018

Anche in questo caso l'evento con valore al culmine di  $H_s$  più elevato ricostruito dal DICCA coincide con quello fornito dalla boa di Capo Mele e riguarda la mareggiata di fine ottobre 2018. La direzione al culmine di questo evento però proviene da  $209^\circ$  N. Ovviamente il modello di ricostruzione del DICCA non tiene conto delle onde riflesse dalla costa.

### 6.5.3 Dati di moto ondoso in ricostruzione al largo di La Spezia

Il punto DICCA P\_000367 (Lon:  $9.88^\circ$ , Lat:  $43.95^\circ$ ), posizionato al largo di La Spezia su fondali di 35 m, è poco distante dal luogo dove ha operato tra il 1989 e il 2014 l'ondametro RON di La Spezia e pertanto ha un'analogia esposizione al moto ondoso.

In Figura 6-4 è rappresentata la distribuzione direzionale di  $H_s$  da cui si può osservare, al pari di quanto osservato per i dati registrati dalla boa di La Spezia, una forte prevalenza degli eventi di moto ondoso provenienti da Libeccio [ $210-240^\circ$ N] che rappresentano complessivamente il 30.9% degli stati di mare.

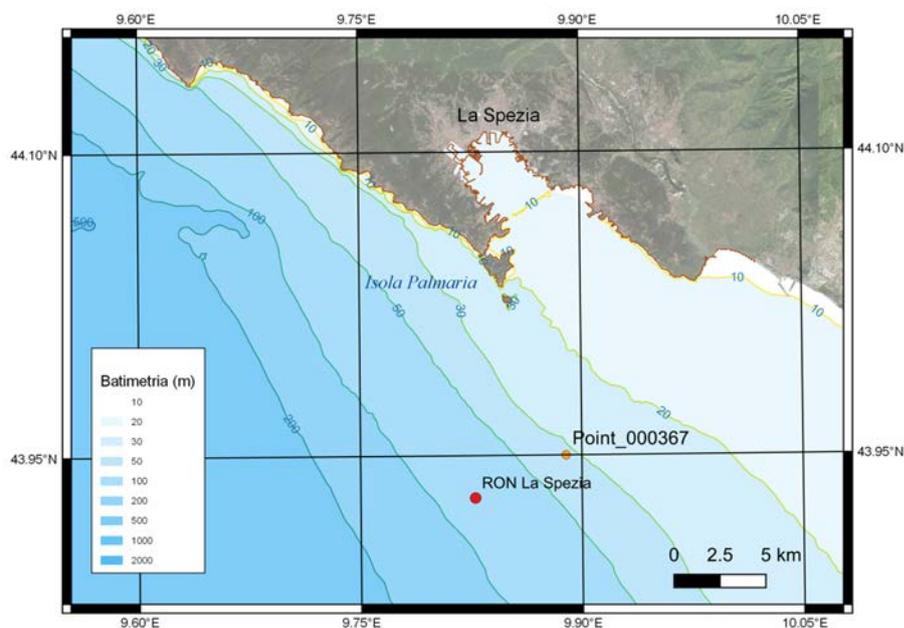


FIGURA 6-17. LOCALIZZAZIONE DEL PUNTO DICCA DI RICOSTRUZIONE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO DI LA SPEZIA.

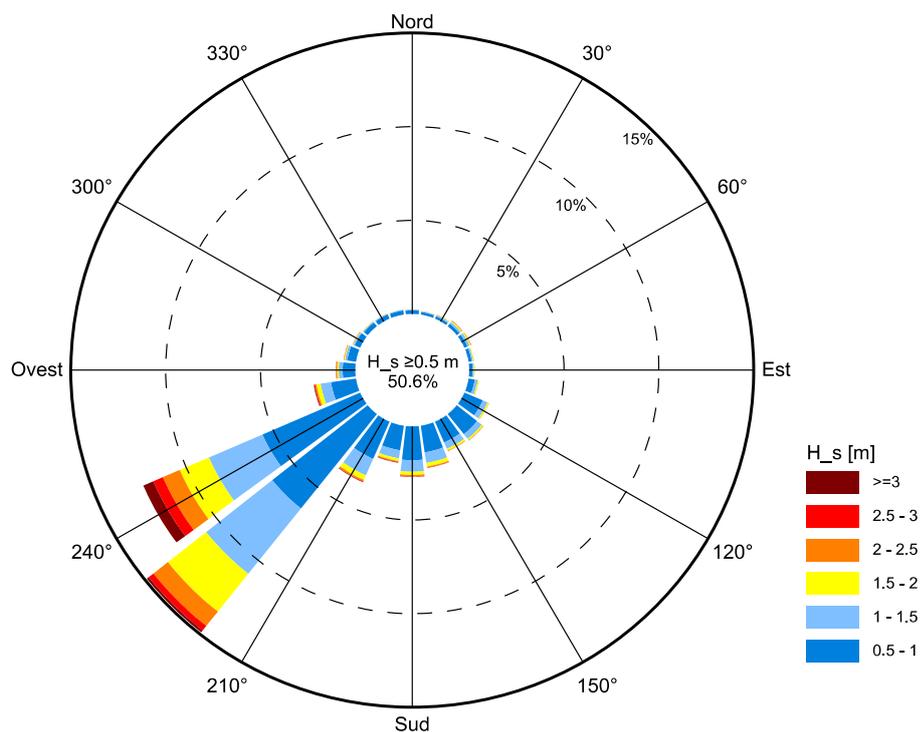


FIGURA 6-18. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  RICOSTRUITA DAL DICCA NEL PUNTO P\_000367 AL LARGO DI LA SPEZIA - PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018

In Figura 6-19 è presentata la distribuzione delle mareggiate estratte dalla serie DICCA al largo di La Spezia. Complessivamente in 40 anni di osservazioni sono individuate 737 mareggiate. Le altezze d'onda al colmo sono in maggior misura comprese tra 2 e 3 m e solo pochi eventi hanno avuto valori di  $H_s$  superiori a 5.0 m (5/737).

La distribuzione direzionale dei colmi delle mareggiate conferma una prevalenza di stati di mare compresi tra 210 e 250 °N, tuttavia, confrontando i risultati ottenuti con quelli relativi alla boa ondometrica di La Spezia, si osservano valori di altezza d'onda al colmo delle mareggiate inferiori.

Nella Tabella 6-7 sono riportate in ordine cronologico le 21 mareggiate più intense ricostruite dal DICCA. Nella tabella sono indicati in nero grassetto i due eventi più elevati in termini di altezza d'onda  $H_s$ , ricostruiti dal DICCA; invece in blu sono evidenziate le due mareggiate più intense registrate dall'ondametro RON (i valori della tabella corrispondono ovviamente a quelli ricostruiti dal DICCA). Infine in viola è evidenziato l'evento estremo che si è abbattuto sulla riviera di levante della Liguria a fine ottobre del 2018.

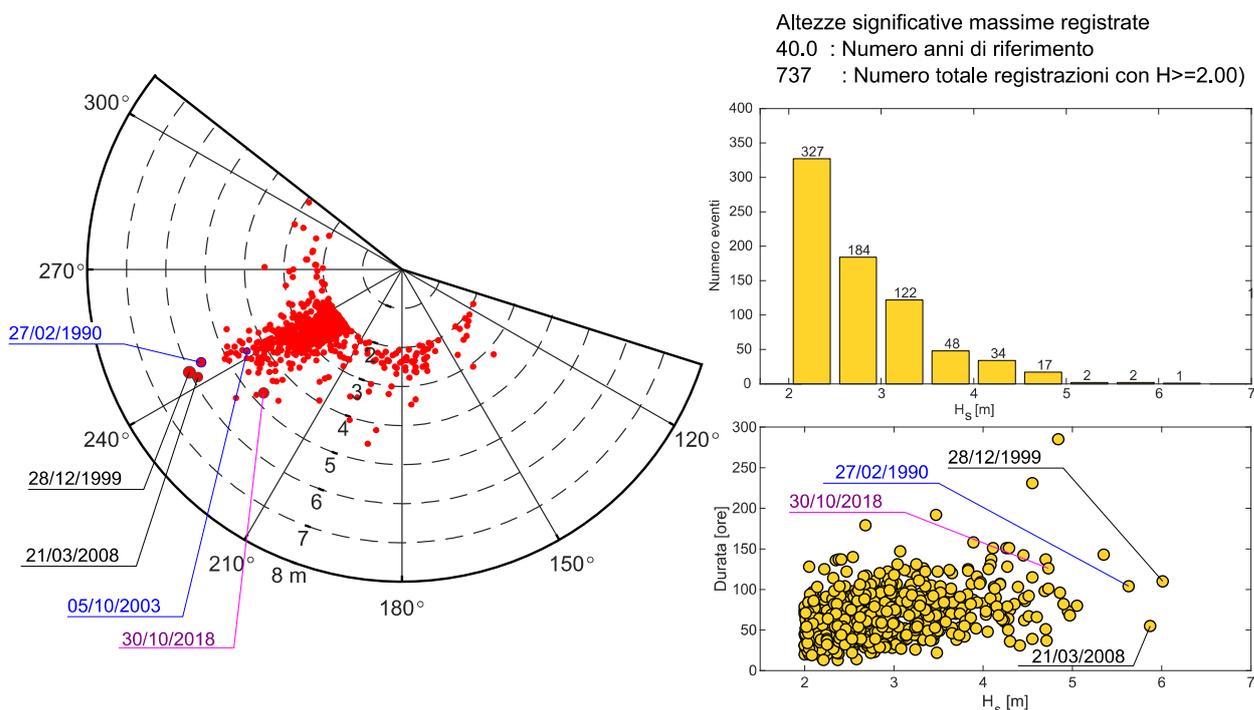


FIGURA 6-19. DISTRIBUZIONE DELLE ALTEZZE D'ONDA MASSIME ASSOCIATE AGLI EVENTI DI MAREGGIATA RICOSTRUITI DAL DICCA AL LARGO DI LA SPEZIA NEL PERIODO 1979-2018

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 6-7. EVENTI DI MAREGGIATA PIÙ SIGNIFICATIVI RICOSTRUITI DAL DICCA AL LARGO DI LA SPEZIA NEL PERIODO 1979-2018. IN GRASSETTO SONO INDICATE LE DUE MAREGGIATE PIÙ ELEVATE. IN BLU SONO INDICATE LE DUE MAREGGIATE PIÙ ELEVATE OSSERVATE DALLA BOA RON DI LA SPEZIA. IN VIOLA È EVIDENZIATA LA MAREGGIATA DEL 29-30 OTTOBRE 2018.

Data colmo	ora	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir	Data Inizio	ora	Data fine	ora	Durata [ore]
01/01/1979	8:00	4.7	9.6	251	01/01/1979	5:00	02/01/1979	17:00	37
16/12/1981	14:00	4.9	10.6	246	14/12/1981	5:00	18/12/1981	4:00	96
24/01/1986	7:00	5.1	10.3	243	22/01/1986	23:00	26/01/1986	6:00	80
26/02/1989	21:00	4.7	11.3	236	24/02/1989	4:00	01/03/1989	20:00	137
<b>27/02/1990</b>	<b>15:00</b>	<b>5.6</b>	<b>10.6</b>	<b>245</b>	<b>26/02/1990</b>	<b>7:00</b>	<b>02/03/1990</b>	<b>14:00</b>	<b>104</b>
26/10/1992	2:00	4.7	10.1	245	23/10/1992	14:00	27/10/1992	15:00	98
09/02/1999	7:00	4.7	10.1	243	07/02/1999	3:00	11/02/1999	7:00	101
<b>28/12/1999</b>	<b>5:00</b>	<b>6.0</b>	<b>10.9</b>	<b>244</b>	<b>25/12/1999</b>	<b>9:00</b>	<b>29/12/1999</b>	<b>22:00</b>	<b>110</b>
06/11/2000	13:00	4.6	9.2	191	30/10/2000	22:00	09/11/2000	12:00	231
08/11/2001	22:00	5.0	10.2	244	08/11/2001	1:00	11/11/2001	1:00	73
20/02/2002	23:00	4.6	10.8	240	20/02/2002	11:00	22/02/2002	1:00	39
04/02/2003	1:00	5.0	10	242	03/02/2003	9:00	06/02/2003	4:00	68
<b>05/10/2003</b>	<b>05:00</b>	<b>4.5</b>	<b>9.6</b>	<b>242</b>	<b>03/10/2003</b>	<b>21:00</b>	<b>06/10/2003</b>	<b>10:00</b>	<b>62</b>
<b>21/03/2008</b>	<b>19:00</b>	<b>5.9</b>	<b>11.5</b>	<b>242</b>	<b>21/03/2008</b>	<b>7:00</b>	<b>23/03/2008</b>	<b>13:00</b>	<b>55</b>
30/10/2008	6:00	4.9	10.5	229	29/10/2008	3:00	01/11/2008	12:00	82
05/12/2011	7:00	4.6	9.8	243	03/12/2011	12:00	08/12/2011	6:00	115
16/12/2011	18:00	5.4	10.5	232	12/12/2011	19:00	18/12/2011	17:00	143
28/10/2012	8:00	4.6	11.5	223	26/10/2012	16:00	29/10/2012	9:00	66
21/11/2015	1:00	4.7	10.8	242	20/11/2015	16:00	22/11/2015	18:00	51
12/01/2016	5:00	4.8	10.4	244	03/01/2016	8:00	15/01/2016	4:00	285
<b>30/10/2018</b>	<b>0:00</b>	<b>4.7</b>	<b>10.2</b>	<b>228</b>	<b>26/10/2018</b>	<b>22:00</b>	<b>01/11/2018</b>	<b>3:00</b>	<b>126</b>

## **6.6 Conclusioni**

Per quanto riguarda il moto ondoso, in relazione all'area geografica in esame, si può affermare che sono state individuate tutte le principali fonti di dati di interesse costituite da misure dirette o da ricostruzioni eseguite in re-analisi mediante i più affermati modelli meteorologici e di generazione di moto ondoso che operano a scala globale o regionale oggi esistenti.

Le serie storiche del DICCA, che coprono 40 anni coprendo tutto il 2018, sono indiscutibilmente quelle più robuste dal punto di vista statistico. Si evidenzia peraltro che coprendo il 2018 forniscono informazioni molto importanti sull'evento meteomarinico che a fine ottobre del 2018 ha colpito il Tirreno e il Mar Ligure. Tuttavia il loro confronto con le misure dirette di moto ondoso disponibili ha evidenziato una tendenza del dato ricostruito a sottostimare leggermente il dato misurato.

Per tale ragione utilizzando un approccio conservativo si è deciso di operare la calibrazione dei dati ricostruiti in re-analisi dal DICCA mediante confronto con i dati misurati di cui si tratta nel prossimo capitolo.

## 7 CONFRONTO E CALIBRAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI RICOSTRUITI DAL DICCA

### 7.1 Introduzione

Come di seguito illustrato, si sono utilizzati due approcci differenti per confrontare i dati di moto ondoso ricostruiti dal DICCA con quelli osservati dagli ondometri selezionati.

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 meteomarinico. 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 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.

### 7.2 Confronto tra gli eventi sincroni al largo di La Spezia

Per quanto riguarda la prima metodologia di analisi (confronto sincrono), i dati ricostruiti dal DICCA con il modello di WWIII al largo di La Spezia sono stati posti a confronto con i dati sincroni estratti dalla serie storica di misure effettuate dalla boa ondometrica di RON di La Spezia (1989-2014).

L'analisi condotta è basata sul calcolo della frequenza relativa dell'errore  $\Delta H = H_M - H_P$ , definito come la differenza tra la misura alla boa di La Spezia ( $H_M$ ) e il dato in rianalisi DICCA-WWIII ( $H_P$ ), e della frequenza del rapporto  $H_R$  tra le misure  $H_R = H_M / H_P$ .

La procedura è stata applicata selezionando i dati sincroni estratti dalle due serie storiche, per i periodi di tempo in comune, provenienti dal III° quadrante [180 - 270 °N] e caratterizzati da un'altezza d'onda significativa  $H_s \geq 0.5$  m.

In Figura 7-1 sono rappresentati i risultati della procedura di confronto che ha fornito una frequenza relativa dell'errore ( $P[\Delta H > 0]$ ) pari al 66.6% ed un coefficiente correttivo pari ad 1.10 (corrispondente al quantile  $q_{50\%}$  della frequenza relativa cumulata di  $H_R$ ).

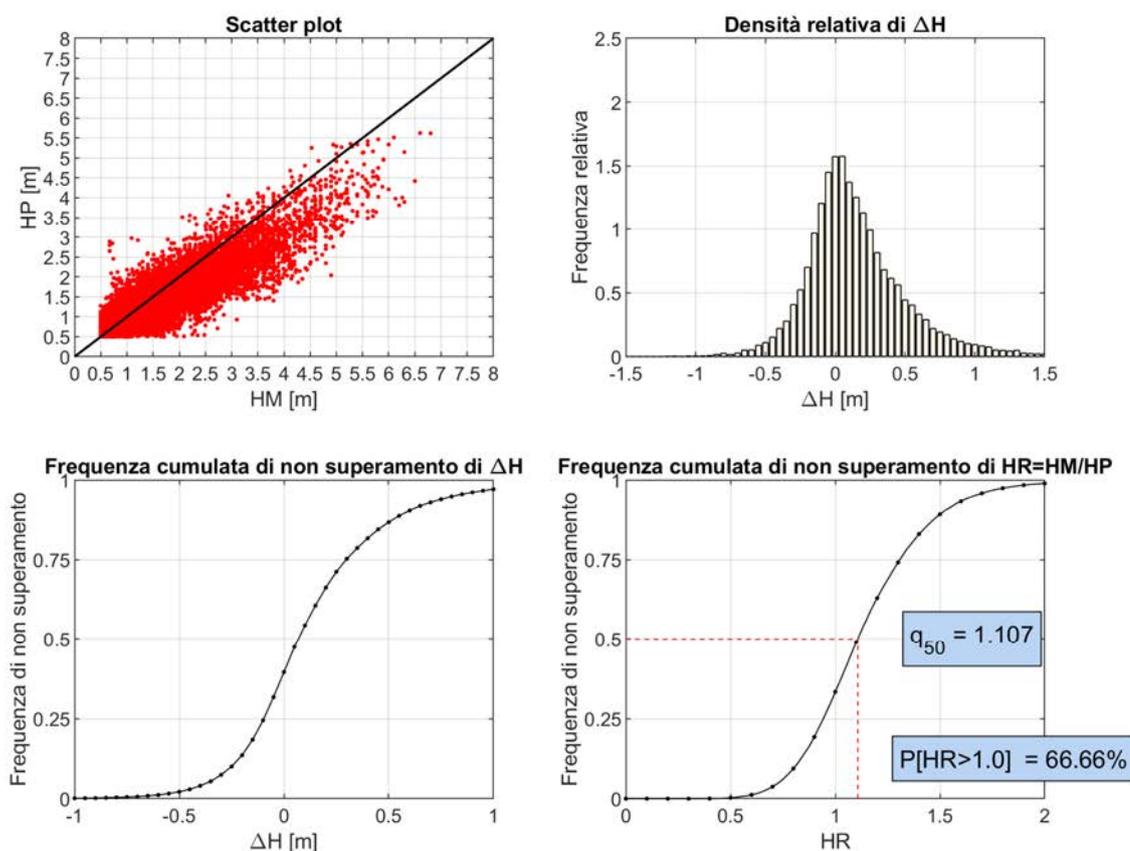


FIGURA 7-1. CONFRONTO DEI DATI DI MOTO ONDOSO RICOSTRUITI DAL DICCA (HP) UTILIZZANDO I DATI SINCRONI REGISTRATI DALLA BOA ONDAMETRICA RON DI LA SPEZIA (HM) NEL PERIODO 1989-2014.

### 7.3 Confronto tra gli eventi estremi asincroni al largo di La Spezia

Nei grafici di Figura 7-2 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 RON di La Spezia e dalla serie di dati di moto ondoso in ricostruzione al largo di La Spezia elaborata dal DICCA con il modello WWIII.

I dati fanno riferimento alle stesse mareggiate ma 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 definita 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.

Queste condizioni consentono di identificare eventi meteomarini estremi tra di loro indipendenti dal punto di vista meteorologico.

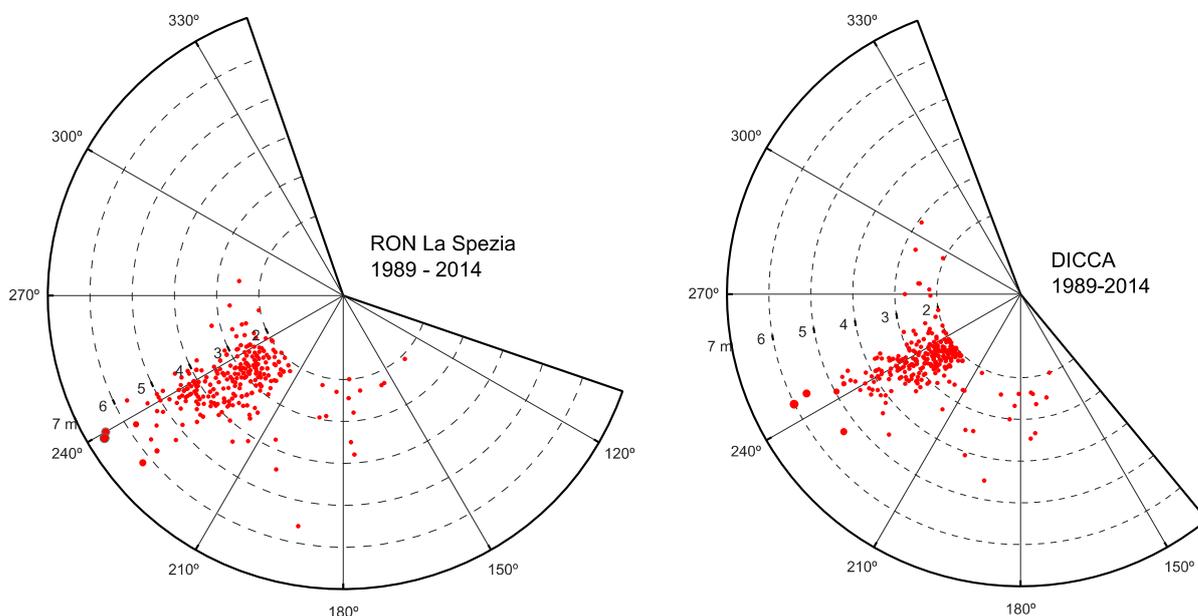


FIGURA 7-2. DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI ALTEZZA D'ONDA  $H_s$  AL COLMO DELLE MAREGGIATE REGISTRATE DALLA BOA RON DI LA SPEZIA (SINISTRA) E RICOSTRUITE DAL DICCA (DESTRA) NEL PERIODO 1989 - 2014.

Complessivamente nel periodo 1989 - 2014 l'ondametro RON-La Spezia ha misurato 420 eventi di mareggiata. Di questi 72 sono caratterizzati al colmo da  $H_s \geq 4.0$  m. La massima altezza d'onda significativa è stata misurata durante la mareggiata di fine febbraio dell'anno 1990 in occasione della quale si è registrato  $H_s = 6.60$  m.

Analizzando la serie degli stati di mare ricostruiti con il modello WWIII dal DICCA, all'interno dello stesso intervallo temporale (25 anni) sono state individuate 446 mareggiate di cui solo 36 con  $H_s \geq 4.0$  m.

Sulla base della sequenza dei valori al colmo delle mareggiate estratte dalle due serie è stato possibile verificare che la maggior parte delle mareggiate misurate dalla boa RON di La Spezia con  $H_s \geq 3.0$  m sono presenti anche nel database DICCA-WWIII ma generalmente con valori inferiori di  $H_s$  al colmo.

Il confronto tra le mareggiate registrate dalla boa RON di La Spezia e quelle ricostruite dal DICCA-WWIII ha portato alla selezione di 267 mareggiate coesistenti così distinte:

- 72 eventi con  $H_s \geq 4.0$  m (tutti gli eventi osservati dalla boa con  $H_s \geq 4.0$  m sono presenti nel database DICCA-WWIII);
- 85 eventi con  $3.0 \leq H_s < 4.0$  m (su un totale di 100 eventi registrati dalla boa tra i dati ricostruiti dal DICCA 15 eventi non risultano classificabili come mareggiate);

- 69 eventi con  $2.5 \leq H_s < 3.0$  m (su un totale di 101 eventi registrati dalla boa 32 non trovano corrispondenza nel database DICCA-WWIII);
- 43 eventi con  $2.0 \leq H_s < 2.5$  m (su un totale di 145 eventi registrati dalla boa 102 eventi per il modello DICCA-WWIII non sono classificabili come mareggiate e sono stati scartati).

La serie degli stati di mare ricostruiti con il modello DICCA-WWIII presenta nel periodo preso in esame un totale di 448 mareggiate. Nei periodi di mancato funzionamento della boa ondometrica posta al largo di La Spezia si sono verificate 179 mareggiate, ricostruite dal DICCA, così distinte:

- 11 eventi con  $H_s \geq 4.0$  m;
- 29 eventi con  $3.0 \leq H_s < 4.0$  m;
- 48 eventi con  $2.5 \leq H_s < 3.0$  m;
- 90 eventi con  $2.0 \leq H_s < 2.5$  m.

Ad ogni modo il numero di dati compresenti a disposizione evidenzia che il confronto è ben rappresentativo per le mareggiate più intense ( $H_s > 3.0$  m), mentre intorno alla soglia inferiore ( $H_s = 2.0$  m) aumenta il numero di eventi della serie DICCA che non supera al colmo la soglia di  $H_s = 2.0$  m e pertanto non è classificabile come mareggiata.

Il campione delle mareggiate coesistenti è stato analizzato fissando una soglia di  $H_s \geq 3.0$  m con un totale di 94 eventi, assicurando comunque un numero minimo di 3 mareggiate per anno.

Le analisi condotte, rappresentate in forma grafica in Figura 7-3, indicano una buona correlazione tra le direzioni del moto ondoso (grafico a) mentre per l'altezza significativa  $H_s$  al colmo (grafico b) i dati DICCA-WWIII risultano inferiori a quelli registrati dalla boa di La Spezia (differenza media -0.54 m e deviazione standard 0.52 m).

La retta di interpolazione  $HP = A + B \cdot HM$  (in rosso) è stata determinata con il metodo dei minimi quadrati imponendo il passaggio per l'origine ( $A=0$ ) ed ottenendo  $B = 0.8614$ .

A seguito di tale analisi è stato quindi individuato un **coefficiente correttivo pari a 1.16** ( $HC = HP \cdot B^{-1}$ ) da applicare ai valori di altezza d'onda significativa  $H_s$  al colmo delle mareggiate estratte dalla serie DICCA al largo di La Spezia.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 7-1. PARAMETRI STATISTICI RELATIVI ALL'ERRORE TRA I VALORI ESTREMI DI  $H_s$  REGISTRATI DALLA BOA RON DI LA SPEZIA (HM), QUELLI RICOSTRUITI DAL DICCA (HP) E QUELLI OTTENUTI CON LA PROCEDURA DI CALIBRAZIONE (HC).

Fonte dato	ID	Numero Mareggiate	Media $H_s$ [m]	dev.std $H_s$ [m]	BIAS [m]	MSE [m]	RMS [m]
RON La Spezia	HM	96	4.24	0.79			
DICCA La Spezia	HP	96	3.69	0.60	0.54	0.57	0.76
DICCA La Spezia Calibrata	HC	96	4.29	0.69	0.1	0.29	0.54

Incrementando i valori di  $H_s$  applicando il fattore correttivo (vedi Tabella 7-1) si ottiene un BIAS = 0.1, un errore quadratico medio MSE 0.29 m ed uno scarto quadratico medio RMS 0.54 m.

Lo stesso procedimento è stato applicato per il periodo di picco  $T_p$  (Figura 7-4). La retta di interpolazione  $T_p = A+B \cdot TM$  è stata determinata con il metodo dei minimi quadrati imponendo il passaggio per l'origine ( $A=0$ ) ottenendo  $B = 0.971$ . Il coefficiente di correzione per il periodo risulta essere 1.03 ( $TC = T_p \cdot B^{-1}$ ). In Tabella 7-2 sono riportati i parametri statistici ottenuti.

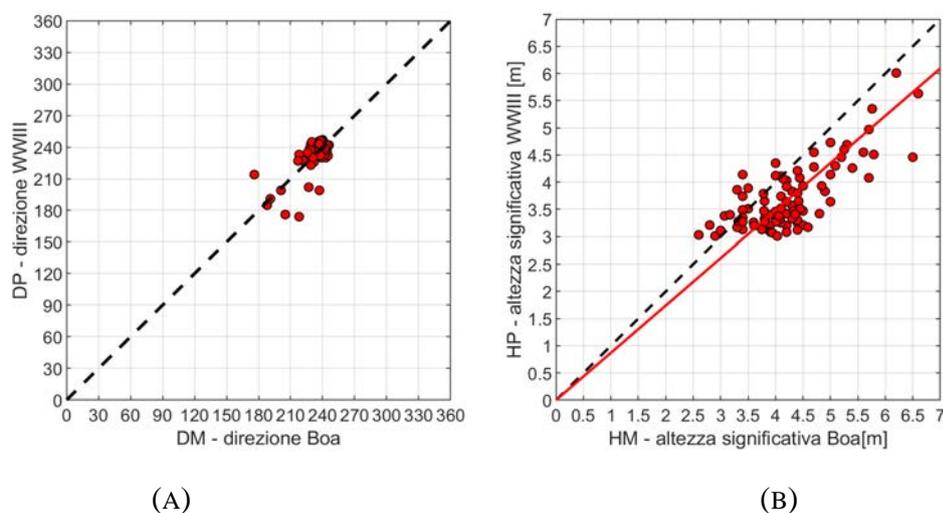


FIGURA 7-3. CONFRONTO ASINCRONO TRA I VALORI AL COLMO DELLE MAREGGIATE (CON  $H_s > 3.0$  M) REGISTRATI DALLA BOA RON DI LA SPEZIA TRA IL 1989 ED IL 2014 E QUELLI RICOSTRUITI DAL DICCA CON IL MODELLO WWIII IN PROSSIMITÀ DELLA BOA.

(A) CORRELAZIONE DIREZIONE BOA/DIREZIONE WWIII

(B) CORRELAZIONE  $H_s$  BOA/ $H_s$  WWIII.

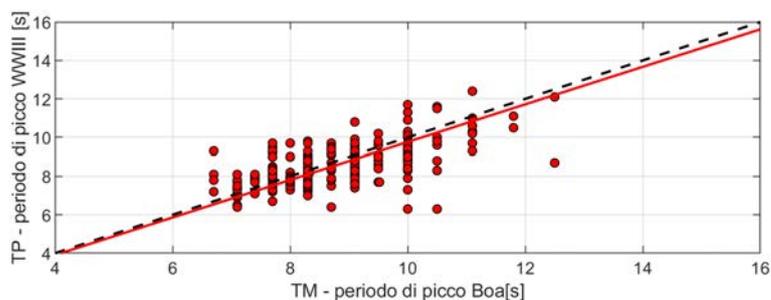


FIGURA 7-4. CONFRONTO ASINCRONO TRA I VALORI DI PERIODO DI PICCO  $T_P$  AL COLMO DELLE MAREGGIATE (CON  $H_s > 3.0$  M) REGISTRATI DALLA BOA RON DI LA SPEZIA TRA IL 1989 ED IL 2014 E QUELLI RICOSTRUITI DAL DICCA CON IL MODELLO WWIII

TABELLA 7-2. PARAMETRI STATISTICI RELATIVI ALL'ERRORE TRA I VALORI  $T_P$  ASSOCIATI ALLE MAREGGIATE REGISTRATE DALLA BOA RON DI LA SPEZIA (TM) E QUELLI RICOSTRUITI DAL DICCA ( $T_P$ ) E QUELLI OTTENUTI CON LA PROCEDURA DI CALIBRAZIONE (TC).

	ID	Numero Mareggiate	Media $T_p$ [s]	dev.std $T_p$ [s]	BIAS [s]	MSE [s]	RMS [s]
RON La Spezia	TM	94	9.52	0.99			
DICCA La Spezia	TP	94	9.21	0.88	0.31	0.79	0.89
DICCA La Spezia Calibrata	TC	94	9.49	0.91	0.0	0.28	0.53

#### 7.4 Confronto asincrono tra gli eventi estremi al largo di Capo Mele

Al pari di quanto effettuato per i dati di moto ondoso di La Spezia è stato effettuato il confronto tra gli eventi estremi ricostruiti al largo di Capo Mele dal DICCA con le misure di moto ondoso della Boa ARPAL di Capo Mele.

Dalla serie storica delle misure di moto ondoso della boa ondometrica ARPAL di Capo Mele sono state estratte 84 mareggiate relative al periodo Febbraio 2012 - Dicembre 2018. Nello stesso intervallo, per la serie DICCA al largo di Capo Mele temporale, sono state individuate, 131 mareggiate. I diagrammi polari di Figura 7-5 mostrano la distribuzione direzionale dei valori di  $H_s$  al colmo delle mareggiate individuate per le due fonti.

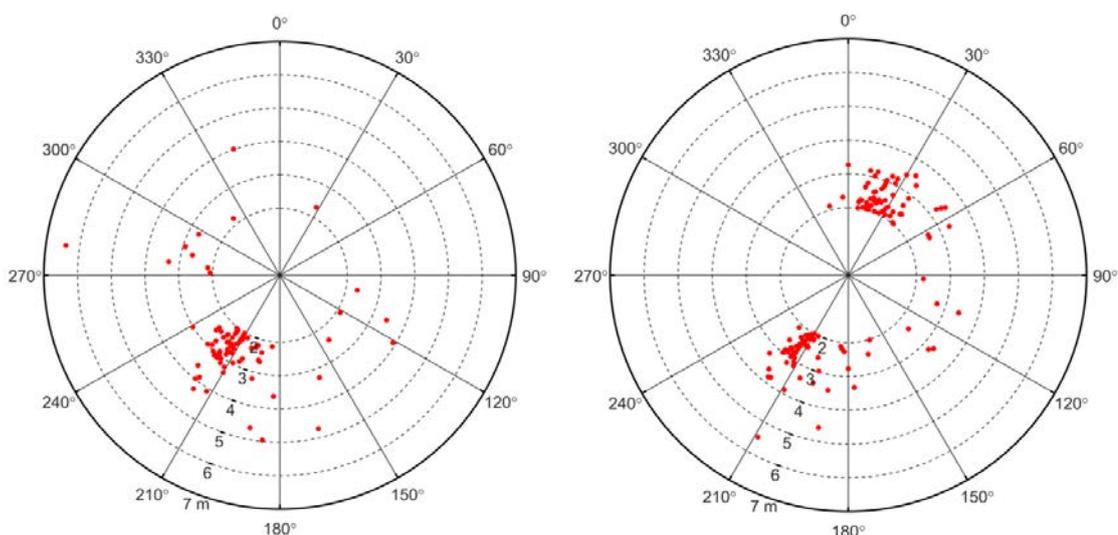


FIGURA 7-5. DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI ALTEZZA D'ONDA  $H_s$  AL COLMO DELLE MAREGGIATE REGISTRATE DALLA BOA ARPAL DI CAPO MELE (SINISTRA) E RICOSTRUITE DAL DICCA (DESTRA) NEL PERIODO 2012 - 2018.

Il confronto tra le mareggiate registrate dalla boa e quelle ricostruite dal DICCA-WWIII ha portato alla selezione di 52 mareggiate coesistenti così distinte:

- 7 eventi con  $H_s \geq 4.0$  m (tutti gli eventi osservati dalla boa con  $H_s \geq 4.0$  m sono presenti nel database DICCA-WWIII);
- 17 eventi con  $3.0 \leq H_s < 4.0$  m (su un totale di 18 eventi registrati dalla boa tra i dati ricostruiti dal DICCA 1 evento non risulta classificabile come mareggiata);
- 14 eventi con  $2.5 \leq H_s < 3.0$  m (su un totale di 28 eventi registrati dalla boa 14 non trovano corrispondenza nel database DICCA-WWIII);
- 14 eventi con  $2.0 \leq H_s < 2.5$  m (su un totale di 31 eventi registrati dalla boa 17 eventi per il modello DICCA-WWIII non sono classificabili come mareggiate e sono stati scartati).

I grafici riportati in Figura 7-6 mostrano il confronto asincrono dei valori di direzione e altezza d'onda significativa  $H_s$  al colmo delle mareggiate coesistenti.

La retta di interpolazione  $HP = A + B \cdot HM$ , indicata in rosso nel grafico (B) di Figura 7-6, è stata determinata con il metodo dei minimi quadrati imponendo il passaggio per l'origine ( $A=0$ ) ed ottenendo  $B = 0.887$  a cui corrisponde un **coefficiente di correzione pari a 1.13** ( $HC = HP \cdot B^{-1}$ ).

Come indicato in Tabella 7-3 i valori calibrati di  $H_s$  presentano  $BIAS = 0.1$ , errore quadratico medio  $MSE = 0.37$  m e scarto quadratico medio  $RMS = 0.61$  m.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

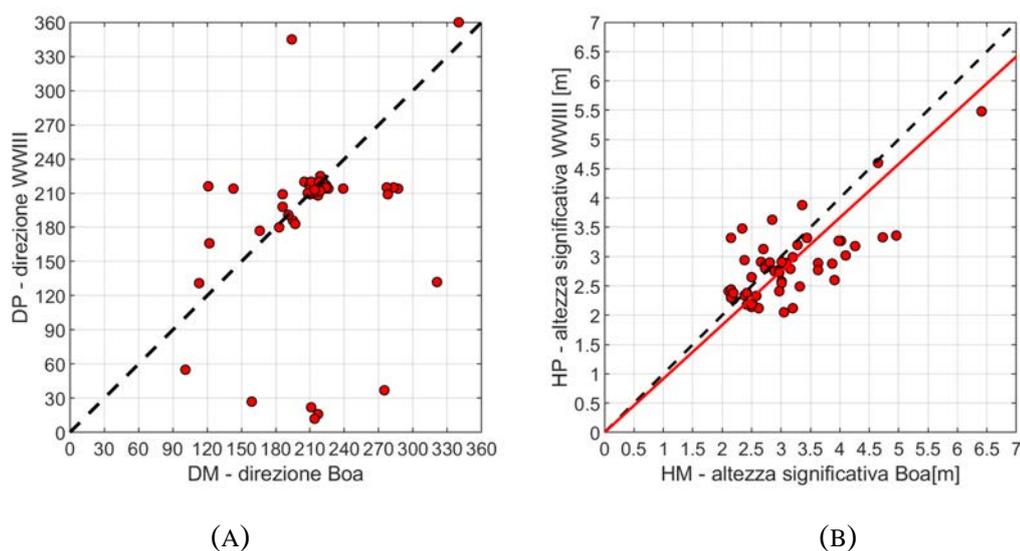


FIGURA 7-6. CONFRONTO ASINCRONO TRA I VALORI AL COLMO DELLE MAREGGIATE (CON  $H_s > 2.0$  M) REGISTRATI DALLA BOA ARPAL DI CAPO MELE TRA IL 2012 ED IL 2018 E QUELLI RICOSTRUITI DAL DICCA CON IL MODELLO WWIII IN PROSSIMITÀ DELLA BOA. (A) CORRELAZIONE DIREZIONE BOA/DIREZIONE WWIII (B) CORRELAZIONE  $H_s$  BOA/ $H_s$  WWIII.

TABELLA 7-3. PARAMETRI STATISTICI RELATIVI ALL'ERRORE TRA I VALORI ESTREMI DI  $H_s$  REGISTRATI DALLA BOA ARPAL DI CAPO MELE (HM), QUELLI RICOSTRUITI DAL DICCA (HP) E QUELLI OTTENUTI CON LA PROCEDURA DI CALIBRAZIONE (HC).

Fonte dato	ID	Numero Mareggiate	Media $H_s$ [m]	dev.std $H_s$ [m]	BIAS [m]	MSE [m]	RMS [m]
ARPAL Capo Mele	HM	52	3.11	0.84			
DICCA Capo Mele	HP	52	2.85	0.62	0.26	0.42	0.65
DICCA La Spezia Calibrata	HC	52	3.20	0.70	0.1	0.37	0.61

## **7.5 Conclusioni**

Le analisi condotte mostrano chiaramente che i dati ricostruiti in re-analisi dal DICCA risultano in generale congruenti sia con le misure ondametriche eseguite a La Spezia sia con quelle eseguite a Capo Mele, anche se gli eventi estremi del DICCA sono risultati mediamente sottostimati in corrispondenza dei due ondametri. Pertanto si è deciso di utilizzare i dati del DICCA per la definizione delle onde di progetto a largo di Genova applicando però un coefficiente correttivo rivolto ad annullare la sottostima individuata.

In questo contesto utilizzando un approccio cautelativo e tenendo presente che l'ondametro di La Spezia presenta una estensione temporale delle misure molto superiore rispetto a quella relativa all'ondametro di Capo Mele, si è deciso di incrementare i valori raggiunti al culmine delle mareggiate forniti al largo di Genova dalla corrispondente serie storica ricostruita in re-analisi dal DICCA, di circa il 16% (valore stimato su La Spezia) al fine di tenere conto della sottostima individuata.

## 8 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI MOTO ONDOSO AL LARGO

Per definire le condizioni di moto ondoso associate a prefissati tempi di ritorno è stata effettuata un'analisi statistica dei valori estremi ricostruiti al largo di Genova dal DICCA per il periodo che si estende dal 1979 al 2018. I dati di moto ondoso sono stati calibrati sulla base del confronto con i dati misurati dalla boa ondometrica RON di La Spezia adottando un coefficiente di correzione moltiplicativo pari a 1.16.

Per eseguire l'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso è necessario selezionare preliminarmente i dati in modo tale che rispondano al doppio requisito di risultare tra loro **omogenei e statisticamente indipendenti**.

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

Dal punto di vista pratico, l'*indipendenza statistica* si garantisce in primo luogo prendendo in esame per ogni singolo evento di mareggiata il valore di  $H_s$  raggiunto al culmine dell'evento stesso. Essa può essere assicurata sia utilizzando il metodo dei "massimi annuali", sia il metodo **POT (Peaks Over Threshold)** detto anche "della serie di durata parziale sopra soglia".

Nel primo caso il campione di riferimento è costituito dalla massima altezza d'onda significativa registrata o ricostruita ogni anno solare che viene poi associata al settore di provenienza considerato.

Applicando il metodo POT occorre preliminarmente definire la singola mareggiata, la quale viene poi caratterizzata dal valore di altezza d'onda significativa raggiunta al culmine dell'evento stesso insieme ai corrispondenti valori del periodo e della direzione delle onde. Una prima selezione delle mareggiate di solito in Mediterraneo viene effettuata individuando nella serie storica gli eventi che superano la soglia di circa  $H_s = 1.0$  m. In tal modo il singolo evento (mareggiata) ha inizio quando l'altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) supera per la prima volta il valore della soglia prestabilito e termina quando  $H_s$  assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica una rilevante rotazione della direzione di propagazione del moto ondoso (circa  $60^\circ$ ).

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

1. il colmo in termini di altezza d'onda significativa superiore a 2.0 m;
2. la durata dell'evento sia superiore ad almeno 12 h.

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

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

L'omogeneità dei dati viene invece assicurata raggruppando i dati in eventi caratterizzati da una simile genesi meteorologica. Ciò normalmente si traduce nel separare i valori massimi delle altezze d'onda registrati in distinti settori di provenienza degli stati di mare. La scelta dei settori di provenienza degli stati di mare richiede di analizzare le condizioni meteorologiche che si possono verificare nel sito di interesse in relazione alla sua esposizione geografica.

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

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

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

Distribuzione di Weibull:

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

Distribuzione di Gumbel:

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

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

La valutazione dei parametri della distribuzione richiede la preliminare stima della frequenza campionaria dei dati. Il campione dei dati viene ordinato in senso decrescente e per ogni  $m$ -esimo evento viene calcolata la frequenza campionaria di non superamento utilizzando la seguente formula generale (plotting position)<sup>4</sup>:

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

Introducendo la variabile ridotta:

<sup>4</sup> I valori dei parametri  $\alpha$  e  $\beta$  sono forniti da Goda (1988): per la distribuzione Weibull sono  $\alpha = 0.20 + 0.27/\sqrt{k}$ ,  $\beta = 0.20 + 0.23/\sqrt{k}$ ; per quella di Gumbel è utilizzata la formulazione di Gringorten con  $\alpha = 0.44$  e  $\beta = 0.12$

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

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

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

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:

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

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

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

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

Il criterio MIR (Minimum ratio of Residual correlation coefficient), proposto da Goda e Kobune (vedi Goda: "Random seas and design of maritime structures"), 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 il coefficiente di correlazione residuo medio ( $\Delta r_{mean}$ ), 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.

## 8.2 Metodo POT (Peaks Over Threshold)

Per individuare i settori di provenienza degli stati di mare si è fatto riferimento all'esposizione geografica del sito analizzata in precedenza la quale mostra chiaramente l'esistenza di due settori, ovvero: un **settore di Libeccio** dove le onde vengono generate da venti che provengono dal Mar di Corsica e dal Golfo del Leone ed un **settore Meridionale** dove le onde vengono generate da venti che spirano da Sud-SudEst nel Tirreno.

Sono stati individuati così due settori di traversia che caratterizzano il paraggio in esame:

- Settore A: settore tra 180 °N e 240 °N (settore di Libeccio);
- Settore B: settore tra 105 °N e 180 °N (settore di Mezzogiorno-Scirocco);

Nel diagramma polare di Figura 8-1 sono riportati i valori di  $H_s$  e direzione di provenienza del moto ondoso che si sono verificati al colmo delle singole mareggiate ricostruite e calibrate al largo di Genova relativi ai settori di Libeccio (settore A) e Scirocco-Mezzogiorno (settore B).

Tenendo conto dell'esposizione geografica del Golfo di Genova, gli stati di mare provenienti dal I° e IV° quadrante ( $0-90^\circ N$  e  $270-360^\circ N$ ) non risultano significativi al fine di definire le condizioni di moto ondoso estreme in prossimità del porto di Genova e pertanto non sono stati presi in esame.

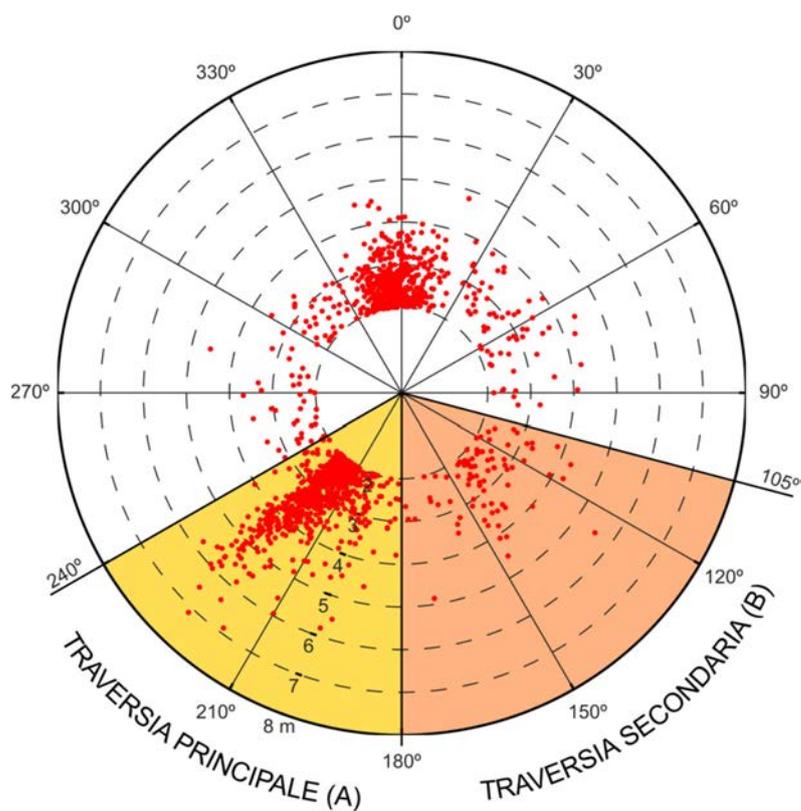


FIGURA 8-1 - GENOVA LARGO DATI CALIBRATI - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEI VALORI DI  $H_s$  AL COLMO DELLE MAREGGIATE RICOSTRUITE NEL PERIODO 1979-2018

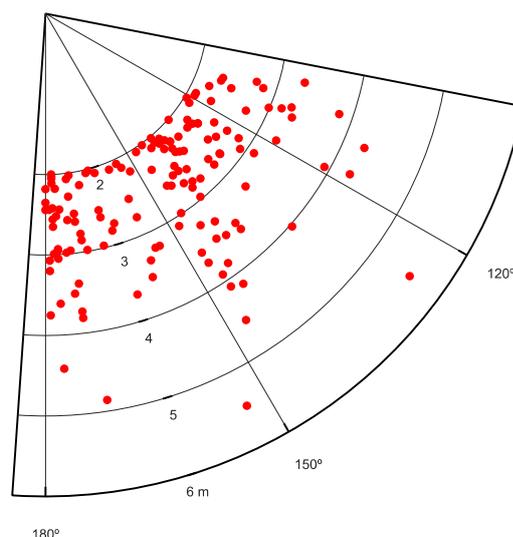


FIGURA 8-2. GENOVA LARGO DATI CALIBRATI - VALORI MASSIMI DI  $H_s$  OSSERVATI ALL'INTERNO DEL SETTORE DI TRAVERSA 105-180 °N DURANTE LE MAREGGIATE RICOSTRUITE NEL PERIODO 1979-2018

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

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

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

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

Per la definizione della soglia sono stati utilizzati 2 criteri: il primo criterio (Goda) prevede di scegliere un valore di soglia tale da poter includere nel campione un numero di eventi pari a circa 2 o 3 per anno.

Il secondo criterio permette di stimare graficamente il valore di soglia attraverso il metodo "Mean Residual Life plot" (MRL) (Coles 2001). Indicata con  $x_{(1)} \dots x_{(n_u)}$ , la sequenza del campione selezionato, i cui valori sono maggiori del valore di soglia " $u$ ", il MRL è definito come:

$$MRL = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} (x_i - u)$$

con  $n_u$  il numero degli eventi sopra la soglia.

Per ogni settore analizzato la soglia è stata individuata andando a selezionare il punto in cui la curva del MRL tende a discostarsi dall'andamento lineare. I valori di soglia così individuati sono riportati in Tabella 8-1.

Nelle Figura 8-3, Figura 8-4 e FIGURA 8-5 sono riportati gli andamenti del MRL per i diversi settori considerati incluso quello "overall", ovvero riferito ad un solo settore complessivo, dove sono evidenziati i valori di soglia da utilizzare nel metodo POT, prevedendo comunque almeno 2 eventi/anno. Nei campioni individuati all'interno di ciascun settore, è evidente l'andamento pressoché lineare del primo tratto della curva (con coefficienti di correlazione compresi tra il 94 e il 98%).

TABELLA 8-1. NUMERO TOTALE DI EVENTI  $N_T$  PER I CAMPIONI DEI VALORI ESTREMI SELEZIONATI PER I SETTORI DI TRAVERSIA A (180-240 °N) , B (105-180°N) ED OVERALL (90-270 °N), VALORI DI SOGLIA  $H_s$  PER IL TRONCAMENTO DEGLI ESTREMI (METODO P.O.T.), NUMERO DI EVENTI SOPRA SOGLIA  $N$ .

	$N_t$	Soglia $H_s$ (m)	$N$	$\nu$
Settore A 180 - 240 °N	697	3.75	169	0.24
Settore B 105 - 180 °N	153	2.50	93	0.60
Overall (90 - 270 °N)	808	3.75	181	0.22

I risultati dell'analisi dei valori estremi sono riportati nei grafici e nelle tabelle riportate in Figura 8-6 per il settore di traversia 180 - 240 °N, in Figura 8-7 per il settore 105-180 °N e in Figura 8-8 per il settore overall.

Per ogni settore di traversia viene riportato: il nume di totale di eventi, l'altezza di soglia individuata, il numero di eventi sopra soglia e l'elenco delle 5 mareggiate più intense.

Viene quindi riportato il risultato dell'analisi di adattamento dei valori estremi alle diverse distribuzioni prese in esame. Per ogni distribuzione sono riportati i valori estremi di moto ondoso ottenuti in funzione del tempo di ritorno e il relativo intervallo di confidenza. Infine sono riportati i parametri dell'analisi di correlazione A, B,  $r$  e il rapporto  $\Delta r / \Delta r_{mean}$  che, seguendo il criterio MIR proposto da Goda e Kobune, consente la selezione della distribuzione migliore tra quelle potenziali. Tra la diverse distribuzioni testate quella che presenta il valore minimo del rapporto  $\Delta r / \Delta r_{mean}$  risulta la migliore. Nel caso specifico la distribuzione Weibull  $k=1.0$  è risultata la migliore per tutti i campioni analizzati.

Si osservi che l'analisi statistica effettuata per il settore overall (90-270 °N) ha fornito valori del tutto equivalenti a quelli ottenuti per il settore di Mezzogiorno-Libeccio. Operando con un soglia di troncamento pari ad  $H_s = 3.75$  m il numero di eventi sopra soglia (181) risulta di poco superiore al numero di eventi (169) individuato per l'analisi del settore di Mezzogiorno-Libeccio.

**Studio delle condizioni meteomarine**

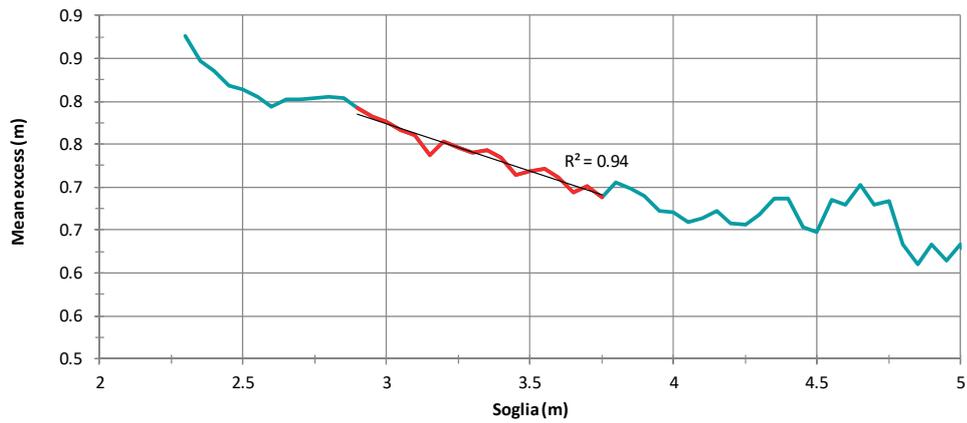


FIGURA 8-3 - MEAN RESIDUAL LIFE PLOT - SETTORE A: 180 - 240°N

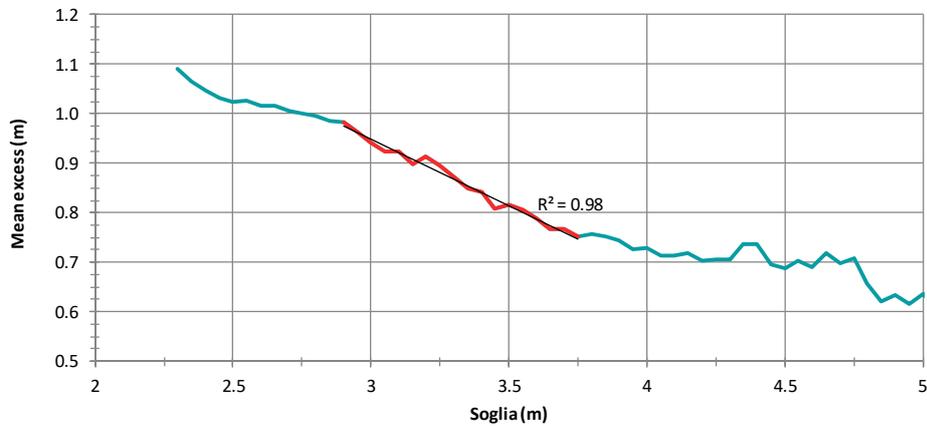


FIGURA 8-4 - MEAN RESIDUAL LIFE PLOT - SETTORE B: 105 - 180°N

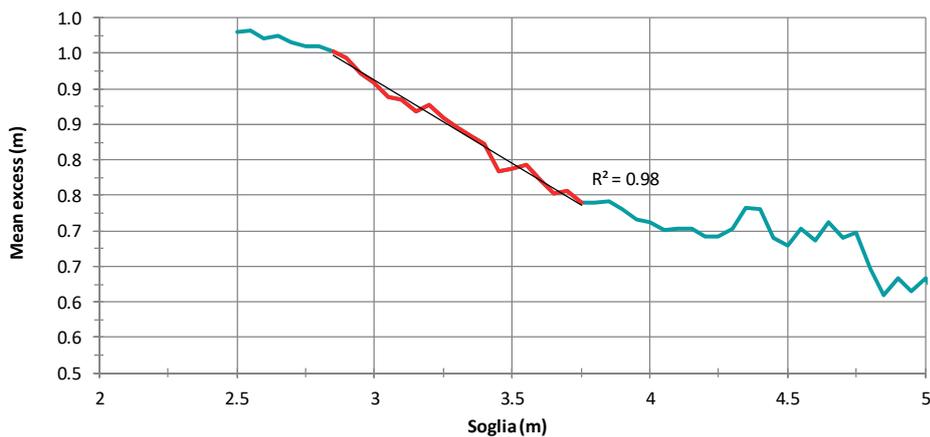


FIGURA 8-5 - MEAN RESIDUAL LIFE PLOT - OVERALL: 90 - 270°N

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**SETTORE A 180 - 240 °N**

Totale eventi: 697

Altezza di soglia: 3.75 m

Numero di eventi sopra la soglia N: 169

**Elenco delle 5 mareggiate più intense**

Data	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	TR
21/03/2008	7.1	11.0	224	75.7
29/10/2018	6.9	10.5	217	26.2
28/12/1999	6.5	10.8	226	15.9
16/12/2011	6.4	10.3	221	11.4
20/11/2015	6.0	10.0	227	8.9

T <sub>R</sub> (anni)	GUMBEL		WEI(.75)		WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)								
2	5.3	0.3	5.2	0.2	5.3	0.3	5.4	0.3	5.4	0.3
5	5.9	0.4	5.8	0.4	5.9	0.5	6.0	0.4	6.0	0.4
10	6.4	0.6	6.3	0.5	6.4	0.6	6.4	0.6	6.4	0.5
15	6.6	0.6	6.6	0.6	6.7	0.7	6.7	0.6	6.7	0.5
20	6.8	0.7	6.8	0.7	6.9	0.8	6.9	0.7	6.8	0.6
25	7.0	0.7	7.0	0.8	7.1	0.8	7.0	0.8	6.9	0.6
50	7.4	0.9	7.5	1.0	7.5	1.0	7.5	0.9	7.3	0.7
100	7.9	1.1	8.0	1.2	8.0	1.3	7.9	1.1	7.7	0.9
150	8.1	1.2	8.3	1.3	8.3	1.4	8.1	1.2	7.9	1.0
250	8.5	1.3	8.7	1.5	8.7	1.6	8.5	1.3	8.2	1.1
500	8.9	1.5	9.2	1.7	9.2	1.8	8.9	1.5	8.5	1.2
<b>A</b>	0.67		0.34		0.69		1.33		2.39	
<b>B</b>	2.94		3.35		2.84		2.04		0.85	
<b>r</b>	0.993		0.977		0.996		0.997		0.997	
<b>Δr/Δr<sub>mean</sub></b>	0.92		2.18		0.50		0.52		0.59	
<b>MIR</b>	NO		NO		SI		NO		NO	

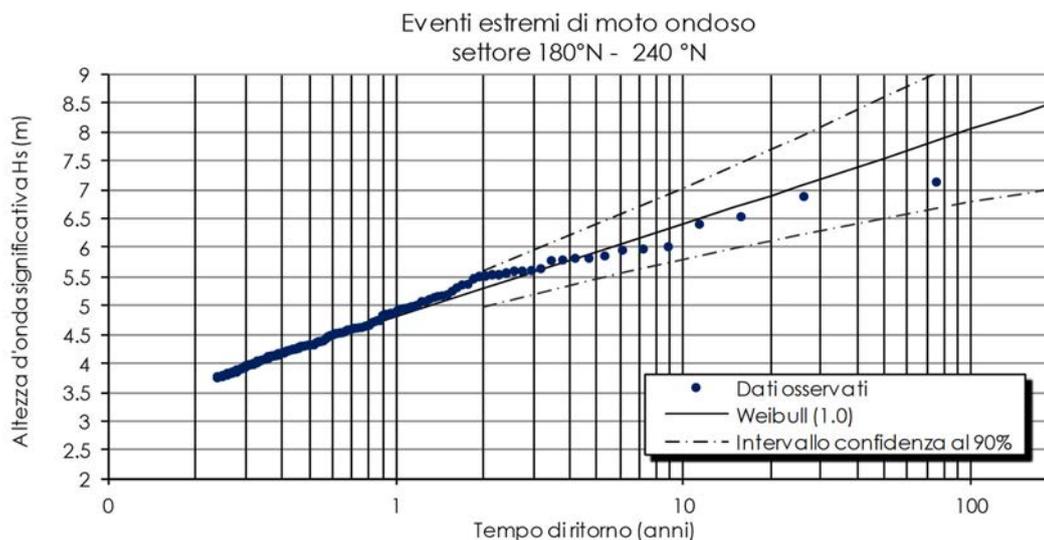


FIGURA 8-6 - GENOVA LARGO – SETTORE A: 180 - 240°N. VALORI DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO SECONDO LE DIVERSE DISTRIBUZIONI STATISTICHE - METODO P.O.T. (PERIODO:1 GENNAIO 1979 - 31 DICEMBRE 2018)

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**SETTORE B 105 - 180 °N**

Totale eventi: 153 Altezza di soglia: 2.50 m Numero di eventi sopra la soglia N: 93

## Elenco delle 5 mareggiate più intense

Data	valori al colmo			nel settore 105 - 180		
	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	H <sub>s</sub> [m]	Dir [°N]	TR
31/01/1986	5.55	8.9	126	5.55	120-130	75.6
29/10/2018	6.88	10.5	217	5.47	150-160	26.2
26/12/2013	4.86	9.5	171	4.86	170-180	15.8
04/11/2011	4.54	8.5	147	4.54	140-150	11.3
05/11/2014	4.61	9.4	191	4.42	170-180	8.8

T <sub>R</sub> (anni)	GUMBEL		WEI(.75)		WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i.(m)								
2	3.6	0.3	3.5	0.2	3.6	0.3	3.6	0.3	3.7	0.3
5	4.1	0.4	4.0	0.3	4.1	0.4	4.2	0.4	4.3	0.4
10	4.6	0.5	4.5	0.5	4.6	0.5	4.7	0.5	4.7	0.5
15	4.8	0.6	4.7	0.6	4.9	0.6	4.9	0.6	4.9	0.6
20	5.0	0.7	4.9	0.6	5.1	0.7	5.1	0.7	5.1	0.6
25	5.1	0.7	5.1	0.7	5.2	0.8	5.2	0.7	5.2	0.7
50	5.6	0.9	5.5	0.9	5.7	1.0	5.6	0.9	5.6	0.8
100	6.0	1.1	6.0	1.1	6.1	1.2	6.1	1.1	6.0	1.0
150	6.2	1.2	6.3	1.2	6.4	1.3	6.3	1.2	6.2	1.1
250	6.6	1.3	6.6	1.4	6.7	1.5	6.6	1.4	6.4	1.2
500	7.0	1.5	7.1	1.6	7.2	1.8	7.0	1.6	6.8	1.4
<b>A</b>	0.62		0.33		0.64		1.21		2.13	
<b>B</b>	1.89		2.21		1.79		1.11		0.11	
<b>r</b>	0.996		0.985		0.996		0.997		0.995	
<b>Δr/Δr<sub>mean</sub></b>	0.34		0.90		0.33		0.35		0.68	
<b>MIR</b>	NO		NO		SI		NO		NO	

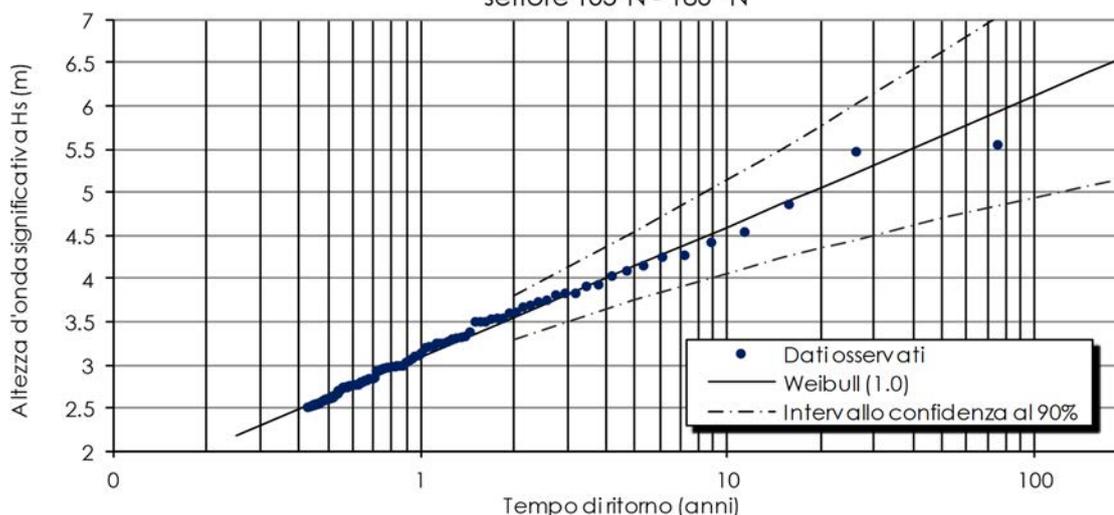
Eventi estremi di moto ondoso  
settore 105°N - 180 °N

FIGURA 8-7 - GENOVA LARGO – SETTORE A: 105 -180°N. VALORI DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO SECONDO LE DIVERSE DISTRIBUZIONI STATISTICHE - METODO P.O.T. (PERIODO:1 GENNAIO 1979 - 31 DICEMBRE 2018)

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**SETTORE OVERALL 90 - 270 °N**

Totale eventi: 808 Altezza di soglia: 3.75 m Numero di eventi sopra la soglia N: 181

## Elenco delle 5 mareggiate più intense

valori al colmo

Data	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]
21/03/2008	7.1	11.02	224
29/10/2018	6.9	10.51	217
28/12/1999	6.5	10.81	226
16/12/2011	6.4	10.3	221
20/11/2015	6.0	10.0	227

T <sub>R</sub> (anni)	GUMBEL		WEI(.75)		WEI(1.0)		WEI(1.4)		WEI(2.0)	
	H <sub>s</sub> (m)	c.i. (m)								
2	5.3	0.3	5.2	0.2	5.3	0.3	5.4	0.3	5.4	0.3
5	5.9	0.4	5.8	0.4	5.9	0.5	6.0	0.4	6.0	0.4
10	6.4	0.5	6.3	0.5	6.4	0.6	6.4	0.6	6.4	0.4
15	6.6	0.6	6.6	0.6	6.7	0.7	6.7	0.6	6.7	0.5
20	6.8	0.7	6.8	0.7	6.9	0.8	6.9	0.7	6.8	0.5
25	7.0	0.7	7.0	0.8	7.1	0.8	7.0	0.7	6.9	0.6
50	7.4	0.9	7.5	1.0	7.5	1.0	7.5	0.9	7.3	0.7
100	7.9	1.0	8.0	1.2	8.0	1.2	7.9	1.1	7.7	0.8
150	8.1	1.1	8.3	1.3	8.3	1.4	8.1	1.2	7.9	0.9
250	8.5	1.3	8.7	1.4	8.7	1.5	8.4	1.3	8.1	1.0
500	8.9	1.4	9.2	1.7	9.2	1.8	8.8	1.5	8.5	1.1
<b>A</b>	0.66		0.33		0.68		1.34		2.44	
<b>B</b>	2.81		3.27		2.73		1.88		0.62	
<b>r</b>	0.993		0.979		0.996		0.996		0.997	
<b>Δr/Δr<sub>mean</sub></b>	0.97		2.10		0.52		0.73		0.62	
<b>MIR</b>	NO		NO		SI		NO		NO	

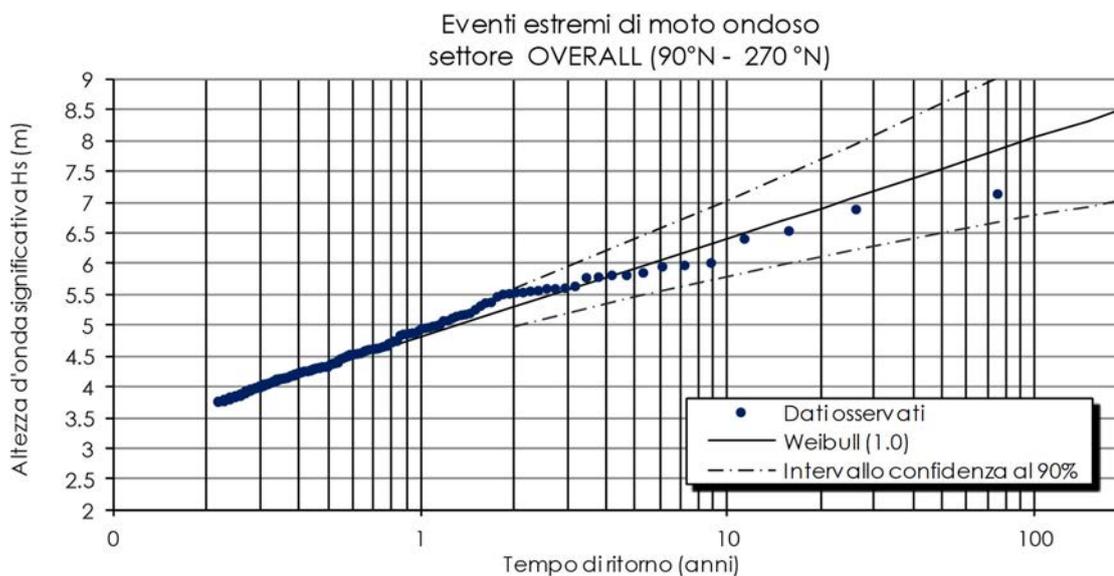


FIGURA 8-8 - GENOVA LARGO – SETTORE OVERALL: 90-270°N. VALORI DI H<sub>s</sub> IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO PER LE DIVERSE DISTRIBUZIONI STATISTICHE - METODO P.O.T. (PERIODO: 1979 - 2018)

### 8.3 Periodo di picco associato alle mareggiate

Analizzando la correlazione tra i valori di altezza d'onda  $H_s$  al colmo delle mareggiate e il periodo di picco  $T_p$  sono state definite due leggi di correlazione del tipo  $T_p = a \cdot H_s^b$  per i due settori di traversia individuati.

I risultati della regressione delle coppie  $H_s$ - $T_p$  sono mostrati in Figura 8-9 per il settore di traversia 180-240 °N ed in Figura 8-10 per il settore di traversia 105-180 °N.

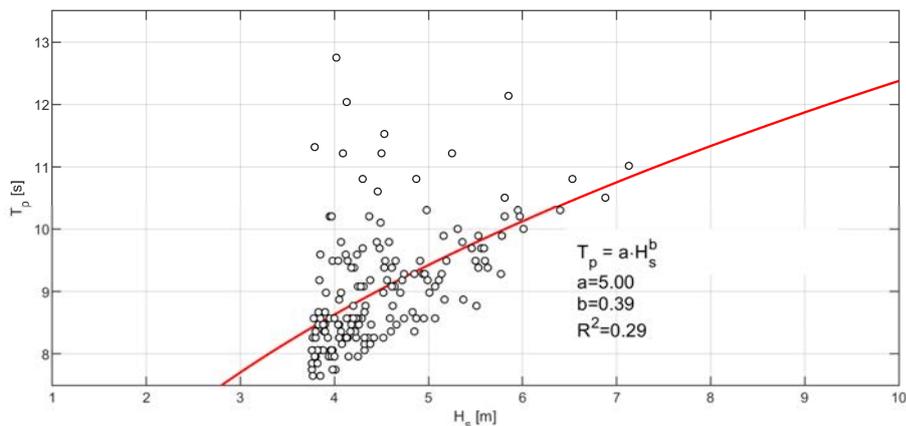


FIGURA 8-9. CORRELAZIONE PER I VALORI  $H_s$ - $T_p$  AL COLMO DELLE MAREGGIATE PER IL SETTORE DI TRAVERSIA 180-240°N

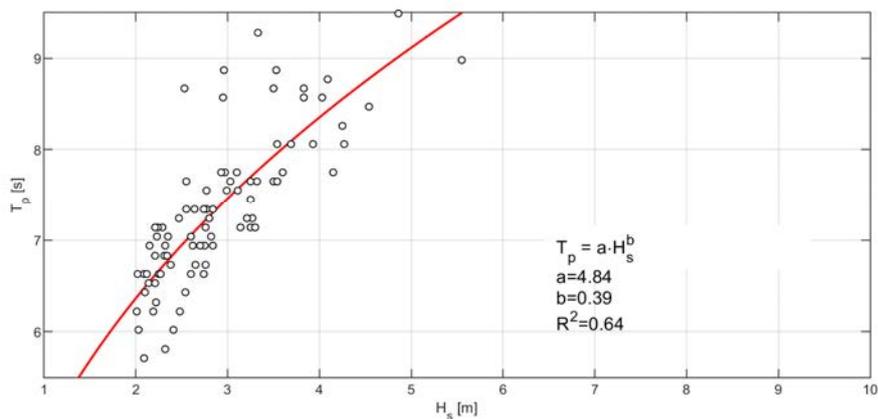


FIGURA 8-10. CORRELAZIONE PER I VALORI  $H_s$ - $T_p$  AL COLMO DELLE MAREGGIATE PER IL SETTORE DI TRAVERSIA 105-180 °N

## 8.4 Conclusioni

L'analisi degli eventi estremi, effettuata con il metodo POT, ha permesso di definire, per eventi ricostruiti con cadenza oraria, il valore dell'altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno e per i diversi settori di provenienza.

I valori dell'altezza significativa, determinati con il metodo POT ed associati al tempo ritorno di 2, 5, 10, 50, 100, 250 e 500 anni, suddivisi per settori di provenienza sono riportati nella seguente Tabella 8-2.

I valori del periodo di picco associati agli stati di mare estremi sono stati definiti sulla base della correlazione tra i valori  $H_s-T_p$  al colmo delle mareggiate illustrata al paragrafo 8.3.

Si osserva infine che nell'Appendice B è riportata la ricostruzione della mareggiata avvenuta nel mese di Febbraio del 1955 che causò ingenti danni al Porto di Genova. Le analisi eseguite mostrano che al culmine dell'evento meteomarinico l' $H_s$  ha raggiunto valori nell'ordine dei 7,0 m. In base alla statistica effettuata si può attribuire all'evento un tempo di ritorno di circa 25 anni.

TABELLA 8-2. VALORI ESTREMI DI MOTO ONDOSO AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO.

Tempo di ritorno	Settore 180 - 240 °N		Settore 105 - 180 °N		Overall (90 - 270 °N)	
	$H_s$	$T_p$	$H_s$	$T_p$	$H_s$	$T_p$
[anni]	[m]	[s]	[m]	[m]	[m]	[m]
2	5.3	9.6	3.6	7.9	5.3	9.6
5	5.9	10.0	4.1	8.4	5.9	10.0
10	6.4	10.3	4.6	8.8	6.4	10.3
50	7.5	11.0	5.7	9.5	7.5	11.0
100	8.0	11.3	6.1	9.8	8.0	11.3
250	8.7	11.6	6.7	10.2	8.7	11.6
500	9.2	11.9	7.2	10.5	9.2	11.9

## 9 CLIMA DEL MOTO ONDOSO AL LARGO

Nel presente capitolo viene descritto il clima di moto ondoso al largo del Golfo di Genova definito sulla base dei dati ondametrici **ricostruiti dal DICCA con il modello WWIII** nel punto 000323 di coordinate 44.04°N - 8.74°E per il periodo 1979-2018.

La serie storica contiene **350635** eventi, e fornisce, con cadenza oraria, i parametri spettrali di moto ondoso ( $H_s$ ,  $T_p$ , Dir), la velocità e la direzione del vento.

### 9.1 Generazione del moto ondoso: correlazione vento/onda

I grafici di Figura 9-1 mostrano la correlazione tra direzione del vento e la direzione del moto ondoso generato dal modello DICCA-WWIII e la correlazione tra l'altezza d'onda e la velocità del vento in generazione. L'analisi è stata condotta per stati di mare con  $H_s > 2.0$  m abbinati ad un vento di velocità minima di 6.0 m/s. Non sono stati presi inoltre in considerazione eventi di moto ondoso per i quali la direzione del vento risulta deviata rispetto a quella del moto ondoso di oltre 90 gradi.

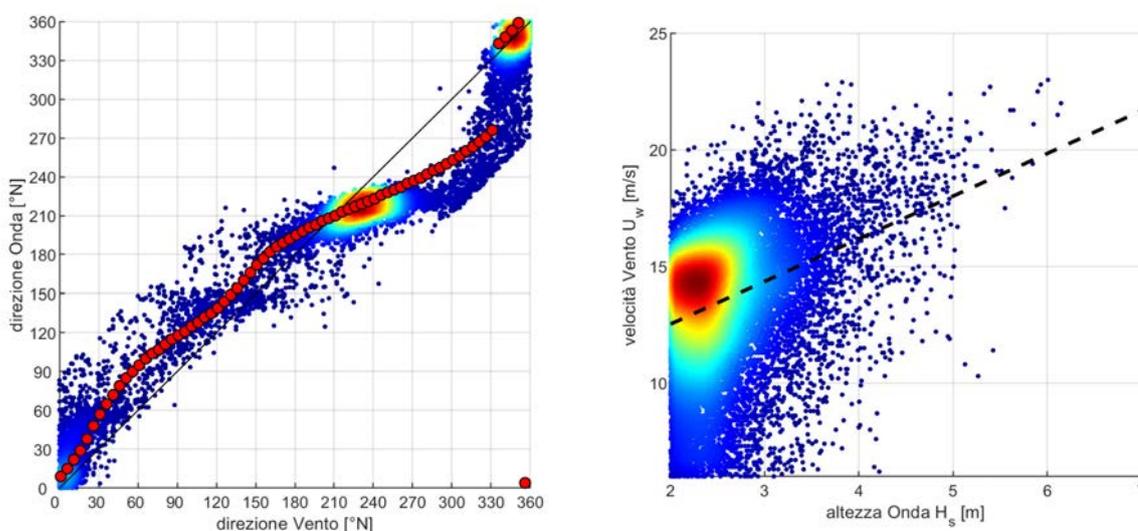


FIGURA 9-1. STATI DI MOTO ONDOSO CON  $H_s > 2.0$  m E  $U_w > 6.0$  m/s APPARTENENTI ALLA SERIE STORICA DICCA AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA (1979-2018).

[SINISTRA] DIAGRAMMA DI CORRELAZIONE TRA LA DIREZIONE DEL VENTO E LA DIREZIONE DEL MOTO ONDOSO. I PUNTI IN ROSSO INDICANO LA LEGGE DI DEVIAZIONE VENTO/MARE OTTENUTA DALL'ELABORAZIONE DEL FETCH EFFICACE. [DESTRA] CORRELAZIONE TRA L'ALTEZZA D'ONDA  $H_s$  E LA VELOCITÀ DEL VENTO  $U_w$ .

La retta di regressione lineare ottenuta per le coppie ( $U_w$ ,  $H_s$ ) ha equazione:

$$U_w = 1.83 \cdot H_s + 8.90.$$

I grafici mostrano anche una buona corrispondenza dei dati in ricostruzione alla legge di deviazione vento/mare definita sulla base dell'elaborazione dei fetch efficaci (punti in rosso).

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

Nella Figura 9-2, che coincide con la Figura 6-12 mostrata in precedenza, si riporta la rosa ondometrica di moto ondoso a largo. Nella Figura 9-3 è riportata la durata cumulata degli eventi di moto ondoso a largo in funzione di  $H_s$ . Nella Figura 9-4 sono mostrate le rose ondometriche stagionali.

La suddivisione degli eventi per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 9-1) e la conseguente frequenza di accadimento (Tabella 9-2) mostra che gli stati di moto ondoso più significativi (di altezza d'onda significativa  $H_s > 0.5$  m) si presentano più frequentemente da Libeccio (20.6%) il quale, presentando i valori più elevati di  $H_s$ , risulta essere il settore prevalente per il paraggio in esame.

I settori di Tramontana (18.6%) e Mezzogiorno (9.7%), presentano una frequenza di accadimento complessiva pari al 28.3%. Meno frequenti risultano gli stati di mare provenienti dagli altri settori, con valori di  $H_s$  generalmente inferiori a 2.0 m.

Gli stati di mare caratterizzati da altezza d'onda superiore a 2.0 m hanno una frequenza di accadimenti del 6.4% e si verificano in media 557 ore/anno.

Gli stati di mare con  $H_s > 3.0$  m hanno una frequenza di accadimento del 0.9% (81 ore/anno) e si presentano in maggior misura da Libeccio. Eventi di altezza d'onda  $H_s > 4.0$  m si verificano più raramente, la loro frequenza di apparizione è pari a 0.13% pari a circa 11 ore/anno.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**TABELLA 9-1. NUMERO DI EVENTI DI MOTO ONDOSO ANNUALI AL LARGO DI GENOVA  
SUDDIVISI PER CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA E DIREZIONE DI PROVENIENZA.  
PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.**

Numero di eventi di moto ondoso suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione

DICCA-WWIII Serie oraria ricostruita al largo di Genova (1979 - 2018)

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa $H_s$ [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	³ 6.5	
0	1154	4113	11958	11243	6905	2505	638	129	21	2	0	0	0	0	0	38668
15	547	2082	4822	3659	1845	774	223	37	2	1	0	0	0	0	0	13992
30	366	1201	2519	1404	713	339	107	21	0	0	0	0	0	0	0	6670
45	326	894	1610	992	466	275	126	24	1	0	0	0	0	0	0	4714
60	264	882	1467	765	300	153	90	34	4	1	0	0	0	0	0	3960
75	321	925	1384	575	235	75	34	13	9	0	0	0	0	0	0	3571
90	581	1305	1477	563	202	77	28	11	3	0	0	0	0	0	0	4247
105	1520	3129	2996	752	250	87	41	8	4	2	1	0	0	0	0	8790
120	3431	6151	6033	1390	398	87	42	25	3	0	2	0	0	0	0	17562
135	3972	5561	5576	1740	622	235	96	35	3	1	1	0	0	0	0	17842
150	3354	4166	3873	1228	433	159	98	52	26	5	3	0	0	0	0	13397
165	3055	3555	3404	974	274	107	32	12	3	4	2	0	0	0	0	11422
180	3157	4460	5567	1625	465	171	75	18	9	2	0	0	0	0	0	15549
195	5196	8482	12917	5476	1858	690	238	101	36	5	14	1	0	0	0	35014
210	8072	11505	17066	12311	6439	2600	967	357	95	34	15	4	2	0	0	59467
225	6846	6620	8484	6544	4751	2817	1732	1049	484	207	108	20	7	3	0	39672
240	1847	2083	3012	1808	835	284	90	21	6	2	2	0	0	0	0	9990
255	390	594	1082	951	442	146	43	6	0	0	0	0	0	0	0	3654
270	211	452	810	722	344	104	39	9	1	0	0	0	0	0	0	2692
285	199	352	717	683	347	95	29	5	2	0	0	0	0	0	0	2429
300	220	441	820	745	280	121	21	5	1	0	0	0	0	0	0	2654
315	251	577	1133	893	416	147	39	2	3	0	0	0	0	0	0	3461
330	366	1070	2119	1782	838	313	66	10	2	0	0	0	0	0	0	6566
345	968	3077	7444	6892	4373	1470	352	63	13	0	0	0	0	0	0	24652
<b>Tot</b>	<b>46614</b>	<b>73677</b>	<b>108290</b>	<b>65717</b>	<b>34031</b>	<b>13831</b>	<b>5246</b>	<b>2047</b>	<b>731</b>	<b>266</b>	<b>148</b>	<b>25</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>350635</b>

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 9-2. FREQUENZA DI ACCADIMENTO DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO ANNUALI AL LARGO DI GENOVA, SUDDIVISI PER CLASSI DI ALTEZZA SIGNIFICATIVA E DIREZIONE. PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.

Frequenza di accadimento degli eventi di moto ondosso. ANNUALE

DICCA-WWIII Serie oraria ricostruita al largo di Genova (1979 - 2018)

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		
0	0.3	1.2	3.4	3.2	2.0	0.7	0.2	0.04	0.01	0.00						11.0	9.5
15	0.2	0.6	1.4	1.0	0.5	0.2	0.06	0.01	0.00	0.00						4.0	3.2
30	0.1	0.3	0.7	0.4	0.2	0.10	0.03	0.01								1.9	1.5
45	0.09	0.3	0.5	0.3	0.1	0.08	0.04	0.01	0.00							1.3	1.0
60	0.08	0.3	0.4	0.2	0.09	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00						1.1	0.8
75	0.09	0.3	0.4	0.2	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00							1.0	0.7
90	0.2	0.4	0.4	0.2	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00							1.2	0.7
105	0.4	0.9	0.9	0.2	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00					2.5	1.2
120	1.0	1.8	1.7	0.4	0.1	0.02	0.01	0.01	0.00		0.00					5.0	2.3
135	1.1	1.6	1.6	0.5	0.2	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00					5.1	2.4
150	1.0	1.2	1.1	0.4	0.1	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00					3.8	1.7
165	0.9	1.0	1.0	0.3	0.08	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00					3.3	1.4
180	0.9	1.3	1.6	0.5	0.1	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00						4.4	2.3
195	1.5	2.4	3.7	1.6	0.5	0.2	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00				10.0	6.1
210	2.3	3.3	4.9	3.5	1.8	0.7	0.3	0.1	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00			17.0	11.4
225	2.0	1.9	2.4	1.9	1.4	0.8	0.5	0.3	0.1	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00		11.3	7.5
240	0.5	0.6	0.9	0.5	0.2	0.08	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00					2.8	1.7
255	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.04	0.01	0.00								1.0	0.8
270	0.06	0.1	0.2	0.2	0.10	0.03	0.01	0.00	0.00							0.8	0.6
285	0.06	0.1	0.2	0.2	0.10	0.03	0.01	0.00	0.00							0.7	0.5
300	0.06	0.1	0.2	0.2	0.08	0.03	0.01	0.00	0.00							0.8	0.6
315	0.07	0.2	0.3	0.3	0.1	0.04	0.01	0.00	0.00							1.0	0.8
330	0.1	0.3	0.6	0.5	0.2	0.09	0.02	0.00	0.00							1.9	1.5
345	0.3	0.9	2.1	2.0	1.2	0.4	0.1	0.02	0.00							7.0	5.9
<b>Tot</b>	<b>13.3</b>	<b>21.0</b>	<b>30.9</b>	<b>18.7</b>	<b>9.7</b>	<b>3.9</b>	<b>1.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>	<b>0.08</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>		<b>100.0</b>	<b>65.7</b>
<b>Tot. cumul.</b>		<b>34.3</b>	<b>65.2</b>	<b>83.9</b>	<b>93.6</b>	<b>97.6</b>	<b>99.1</b>	<b>99.7</b>	<b>99.9</b>	<b>99.9</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>		

Numero di eventi:

350635

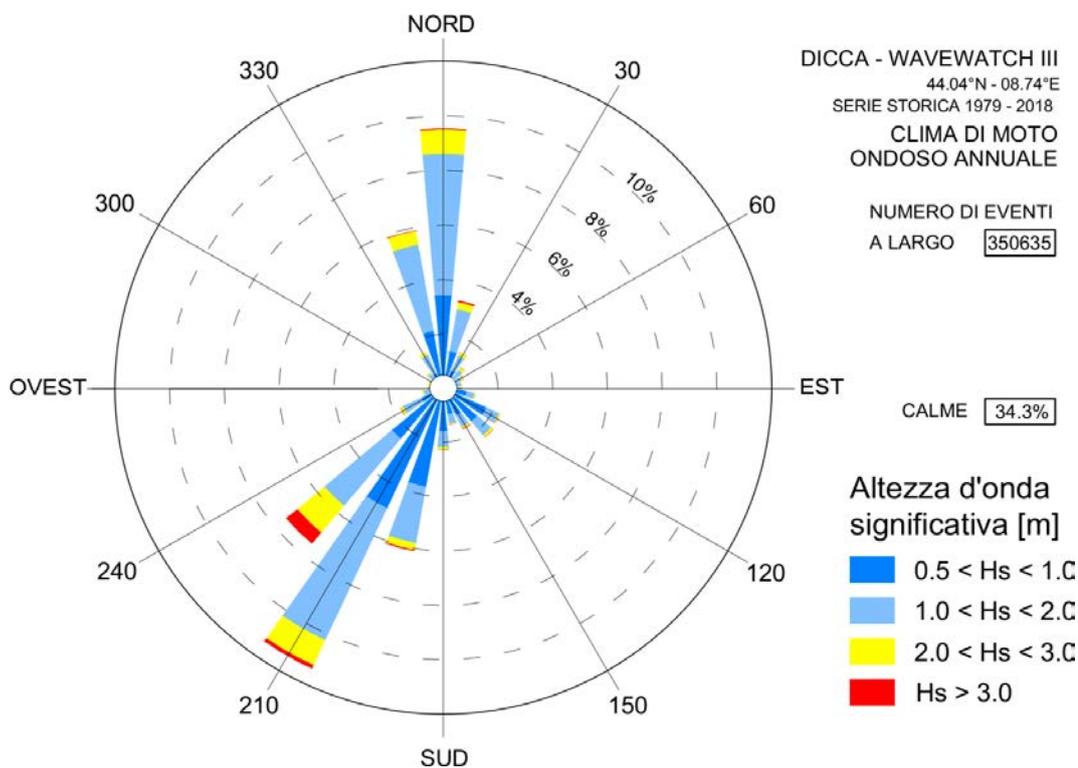


FIGURA 9-2. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO RICOSTRUITI DAL DICCA AL LARGO DI GENOVA. PERIODO DI RIFERIMENTO (1979-2018)

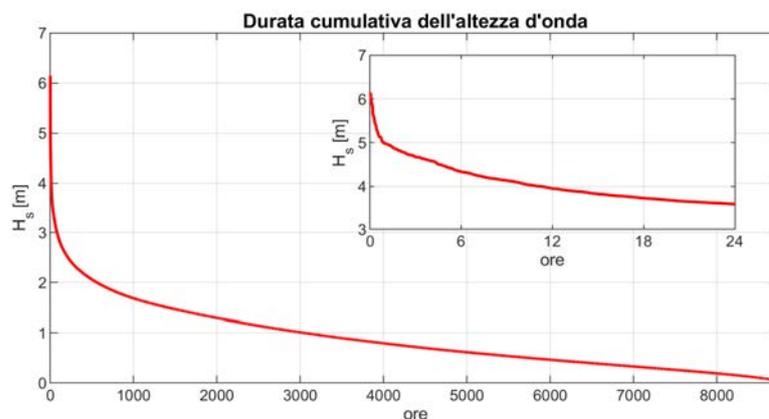


FIGURA 9-3. DURATA CUMULATIVA DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO AL LARGO IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$ .

Studio delle condizioni meteomarine

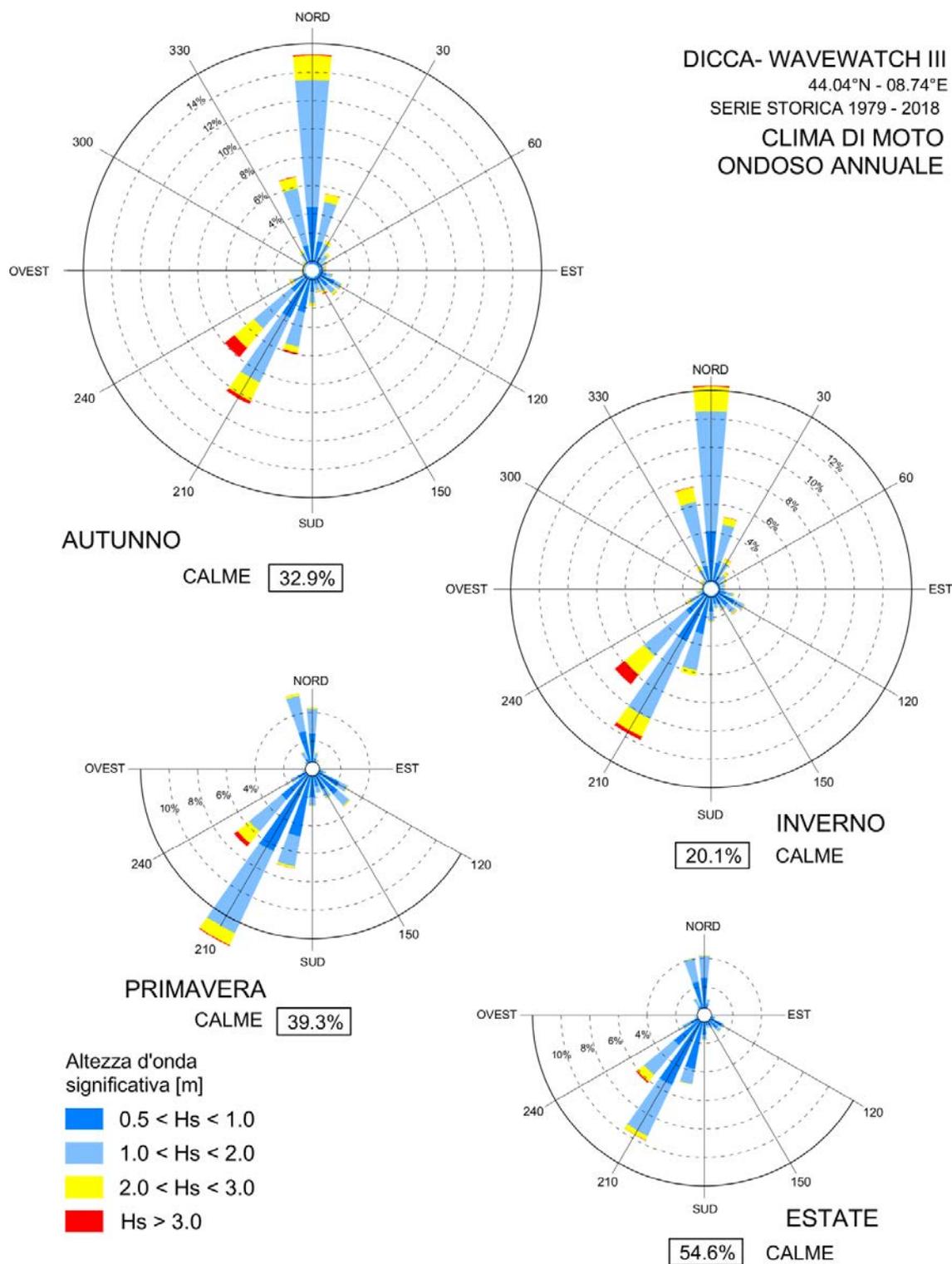


FIGURA 9-4. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELL'ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  NEL PUNTO DI RICOSTRUZIONE DICCA 000323AL LARGO DI GENOVA SU BASE STAGIONALE (PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018)

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

L'istogramma di Figura 9-5 riporta la frequenza di accadimento degli eventi di moto ondoso appartenenti alla serie storica DICCA al largo di Genova suddivisi in base a classi di periodo di picco  $T_p$  di ampiezza di un secondo tra 0 e 14 secondi.

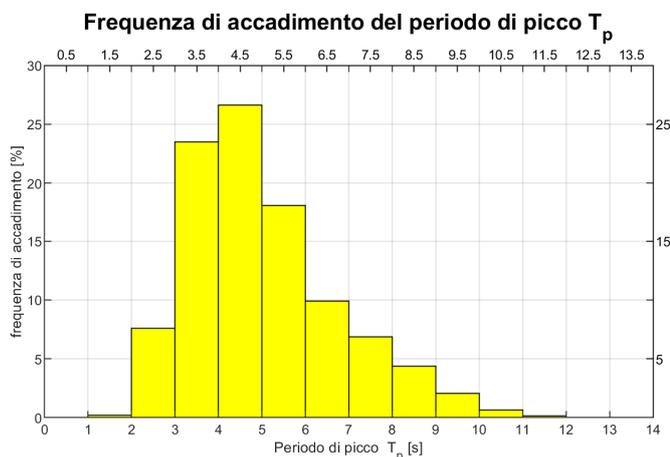


FIGURA 9-5. FREQUENZA DI ACCADIMENTO DEL PERIODO DI PICCO  $T_p$ .

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

I parametri  $a$  e  $b$  possono essere ricavati tramite il metodo dei minimi quadrati.

Per trovare la legge di dipendenza si è fatto riferimento a tutti gli eventi di moto ondoso con altezza d'onda significativa  $H_s \geq 0.5$  m distinti nei due settori di traversia:

- 180 - 240 °N settore di traversia di Mezzogiorno-Libeccio (settore di traversia principale)
- 105 - 180 °N settore di traversia di Scirocco-Mezzogiorno (settore di traversia secondario)

In Figura 9-6 sono riportate le funzioni di correlazione tra i valori di  $T_p$  e  $H_s$  al largo di Genova ottenute per i due settori di traversia.

Gli eventi provenienti da Mezzogiorno Libeccio sono caratterizzati da periodi di picco  $T_p$  generalmente più elevati ( $5.0 < T_p < 9.0$  s) mentre gli stati di mare provenienti da Mezzogiorno presentano valori del periodo di picco in prevalenza inferiori ( $3.0 < T_p < 7.0$  s). Le funzioni di correlazione ottenute si adattano bene ai valori medi climatici di moto ondoso, mentre per gli eventi estremi si è fatto riferimento alla correlazione  $H_s$ - $T_p$  effettuata sui colmi delle mareggiate presentata in precedenza.

## Studio delle condizioni meteomarine

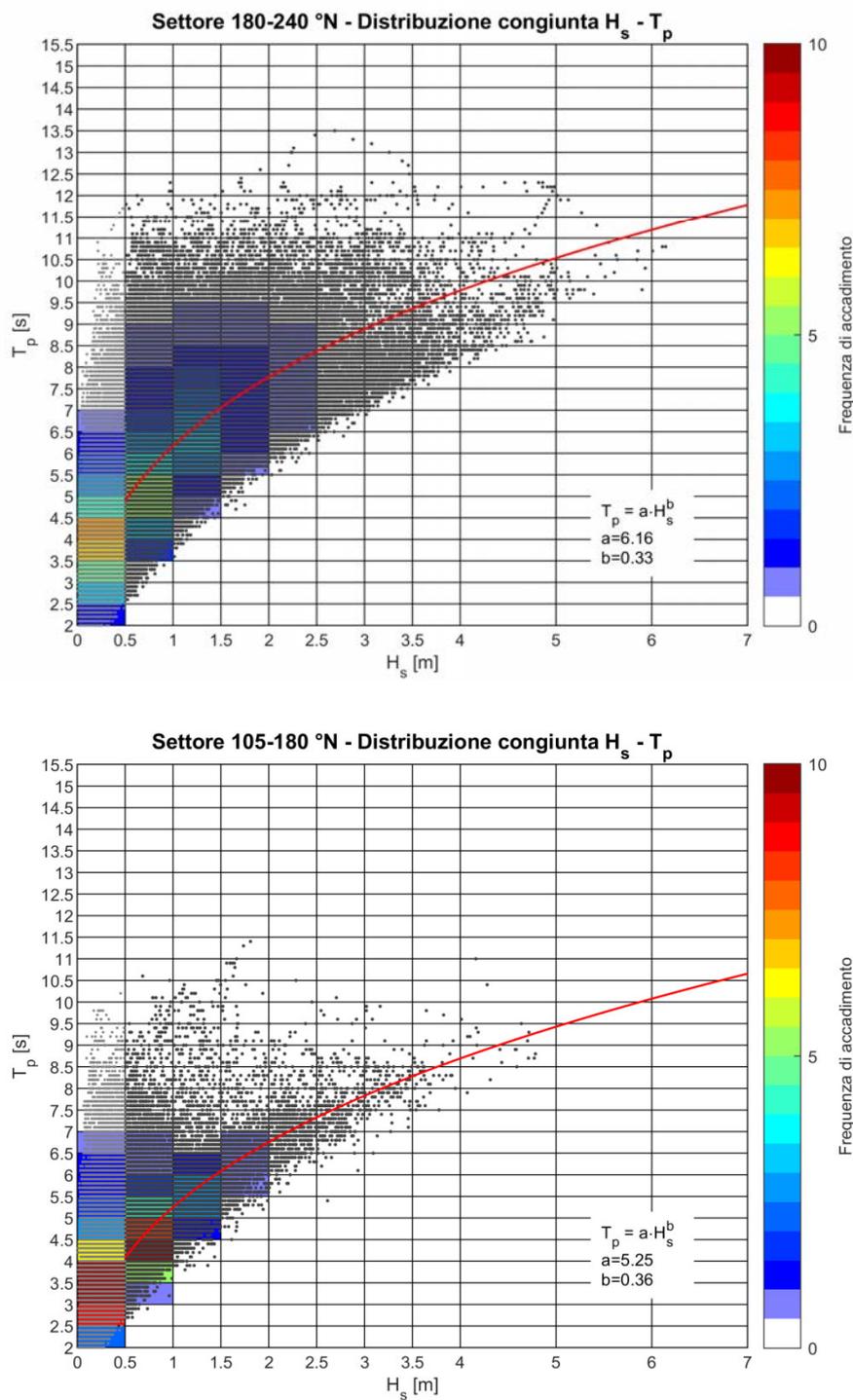


FIGURA 9-6. DISTRIBUZIONE CONGIUNTA DEI VALORI  $H_s$  E  $T_p$  E LEGGE DI ADATTAMENTO PER I DATI DI MOTO ONDOSO RICOSTRUITI DAL DICCA AL LARGO DI GENOVA. IN ALTO SETTORE DI TRAVERSA PRINCIPALE (180 - 240 °N). IN BASSO SETTORE DI TRAVERSA SECONDARIO (105 - 180°N)

## 10 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

### 10.1 Introduzione

Per definire le condizioni di moto ondoso in prossimità delle dighe portuali in progetto, imbasate su fondali inferiori a circa – 50,0 m, è risultato necessario propagare il moto ondoso da largo a riva.

La propagazione del moto ondoso è stata effettuata con due diversi modelli numerici: il codice MEROPE, sviluppato dalla Modimar S.r.l. e il codice SWAN, sviluppato da TUDelft.

Ambedue i codici simulano la propagazione di stati di mare descritti in termini spettrali (ovvero con energia dispersa in frequenza e direzione) e tengono conto dei fenomeni combinati di rifrazione e shoaling per batimetria comunque variabile nell'ipotesi di validità dell'approssimazione ottica-geometrica.

Il modello SWAN, è un modello di *propagazione diretta spettrale* di terza generazione. Il modello risolve l'equazione di conservazione dell'energia normalizzata rispetto alla frequenza delle onde (wave action) ed è dotato di una serie di termini in grado di tenere conto:

- *in acqua profonda*, dove prevale la generazione del moto ondoso ad opera del vento:
  - della interazione vento-onda (wind-wave interaction), ovvero del processo di generazione delle onde ad opera del vento;
  - della interazione non lineare tra le componenti spettrali dovuta all'interazione tra quadruplette di componenti armoniche (quadruplet interaction);
  - del frangimento in acqua profonda (white-capping);
- *in acqua bassa*, dove prevalgono i meccanismi dissipativi:
  - del frangimento in acqua bassa;
  - dell'attrito sul fondo;
  - delle interazioni non lineari in acqua bassa.

Il modello MEROPE è un modello di *propagazione inversa spettrale* ed è più semplice del modello SWAN poiché non tiene conto degli effetti non lineari tra le componenti spettrali, dei fenomeni rigenerativi delle onde ad opera del vento e dei fenomeni dissipativi in acqua profonda e bassa. Tuttavia MEROPE offre una serie di vantaggi:

- consente di propagare in un punto in costa una serie storica di stati di mare costituita anche da centinaia di migliaia di stati di mare;

- non ha problemi di stabilità numerica che invece caratterizzano SWAN il quale possiede una tendenza alla diffusione numerica dell'energia;
- non tenendo conto di fenomeni dissipativi dell'energia è sicuramente conservativo su profondità in cui le dissipazioni dell'energia non costituiscono un fenomeno dominante.

Pertanto si è deciso di applicare ambedue i modelli con le seguenti finalità:

- definire con MEROPE il clima ondometrico in prossimità delle nuove opere;
- definire con MEROPE e SWAN le onde estreme in prossimità delle nuove opere al fine di poter confrontare i risultati ottenuti.

Per quanto riguarda il punto in costa ove applicare MEROPE si è deciso di utilizzare un punto posto alla profondità di -75,0 m sul l.m.m. in posizione baricentrica rispetto alle nuove opere in progetto. A questa profondità i fenomeni dissipativi delle onde estreme risultano del tutto trascurabili.

## **10.2 Griglia di calcolo**

Per l'applicazione di entrambi i modelli numerici occorre definire una griglia di calcolo costruita sulla base dei dati batimetrici del paraggio in esame.

In Figura 10-1 è rappresentato il dominio di calcolo utilizzato per le simulazioni effettuate con il modello numerico di rifrazione, definito sulla base dei dati batimetrici forniti dal portale del progetto Europeo EMODNet opportunamente integrati sottocosta con i dati desunti dalle carte nautiche del paraggio in esame.

Il dominio ha dimensioni 140.000×60.000 m, ed è numericamente definito da una griglia regolare con passo di discretizzazione di 200 m in entrambe le direzioni, per un totale di 301×701 nodi. La griglia è orientata con l'asse verticale allineato con il Nord.

All'interno della griglia di calcolo è stato selezionato un punto di propagazione, indicato come punto P1 in Figura 10-1, posto sulla batimetrica -75 m sul l.m.m., nel punto di coordinate UTM 491300E, 4914230N ad una distanza di circa 2.0 km dalla nuova diga foranea.

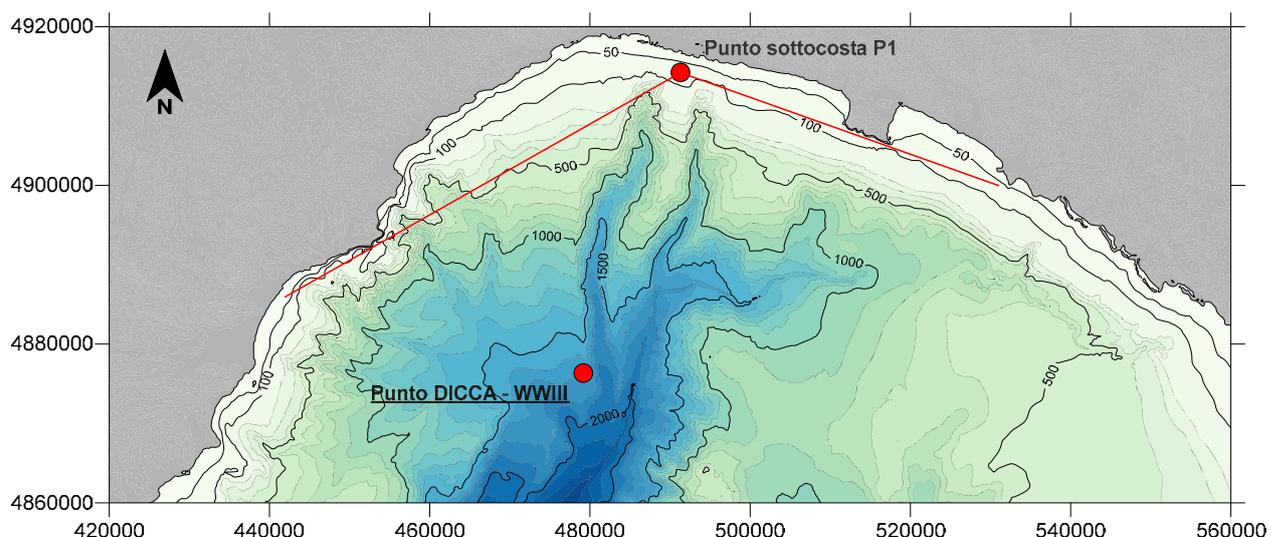


FIGURA 10-1. GRIGLIA DI CALCOLO UTILIZZATA PER LA MODELLAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON I MODELLI MEROPE E SWAN ED INDICAZIONE DELLA POSIZIONE DEL PUNTO P1 ALL'ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA.

### 10.3 Propagazione nel punto sottocosta P1 con il modello MEROPE

Il modello numerico di rifrazione inversa spettrale MEROPE riproduce i fenomeni di rifrazione e shoaling per stati di mare con energia distribuita in direzione e frequenza.

La propagazione viene effettuata applicando il metodo inverso per il tracciamento dei raggi. Utilizzando il codice MEROPE sono stati calcolati 20 piani d'onda per periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spaziatosi di  $0.5^\circ$ , sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia ( $100^\circ\text{N} - 240^\circ\text{N}$ ). I 4000 piani d'onda inversi ( $20 \times 200$ ) così calcolati hanno consentito di costruire un database di correlazione largo-riva.

Mediante questo database l'intera serie storica fornita dal DICCA al largo del Golfo di Genova è stata propagata nel punto sottocosta 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 sulla base dell'equazione fornita da Goda ponendo  $s_{\max} = 18$ .

#### **10.4 Clima di moto ondoso sottocosta**

Utilizzando il modello numerico di inversa spettrale MEROPE la serie storica dei dati di moto ondoso ricostruita dal DICCA a largo del Golfo di Genova è stata propagata sottocosta nel punto P1 precedentemente indicato.

Dei 350635 stati di mare al largo solo 276231 sono in grado di raggiungere il punto P1. Pertanto i dati di moto ondoso propagati sottocosta sono rappresentativi del 78.8% degli stati di mare potenziali a largo.

È interessante notare che i dati ricostruiti e propagati sottocosta presentano un soddisfacente confronto con quelli misurati, per alcuni eventi con  $H_s > 3$  m, dalla boa ENEL-CNR di Nervi di cui si dispone dei dati per il 1979 e per il 1982 (vedi APPENDICE C).

La suddivisione degli eventi propagati per classi di altezza significativa e direzione (Tabella 10-1) e la conseguente frequenza di accadimento relativa (Tabella 10-2) mostrano una netta prevalenza di stati di mare provenienti da Libeccio (30.2%). Dal settore di Libeccio si presentano inoltre gli eventi con altezza d'onda più elevata.

Gli stati di mare caratterizzati da altezza d'onda  $H_s \geq 2.0$  m hanno una frequenza di accadimento pari la 2.9% che si riduce allo 0.33% per gli stati di mare con  $H_s > 3.0$  m. Valori di altezza d'onda superiori a quattro metri,  $H_s > 4.0$  m, hanno una frequenza di accadimento marginale: 0.03%.

Il clima ondometrico è riportato in forma grafica nel diagramma polare di Figura 10-2.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

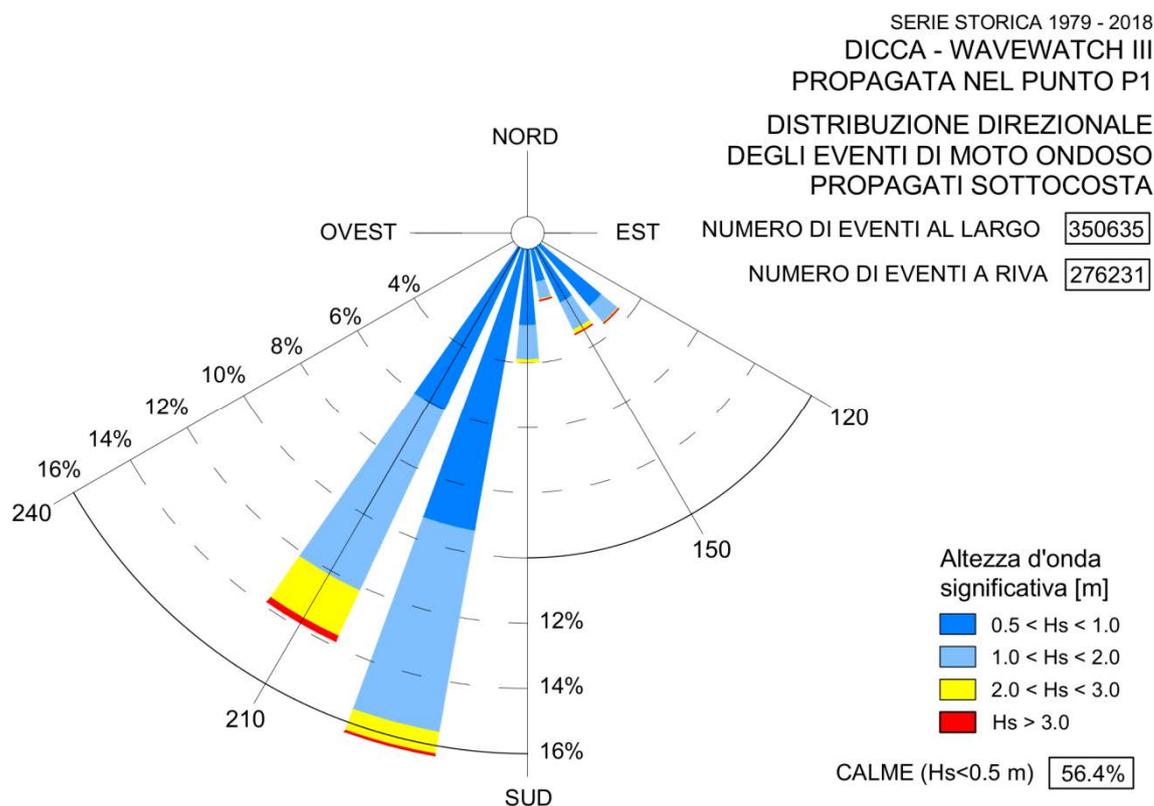


FIGURA 10-2. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO PROPAGATI SOTTOCOSTA NEL PUNTO P1 CON IL MODELLO DI INVERSA SPETTRALE

TABELLA 10-1. NUMERO DI EVENTI DI MOTO ONDOSO PROPAGATI A RIVA CON IL MODELLO MEROPE ALL'ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA, APPARTENENTI ALLA SERIE STORICA 1979-2018, SUDDIVISI PER CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA E DIREZIONE DI PROVENIENZA.

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	³ 6.5		
105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	23487	1567	415	54	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25536
135	12896	13986	8049	1447	335	102	49	5	2	1	0	0	0	0	0	0	36872
150	6045	7632	6460	1913	650	261	127	62	13	5	1	0	0	0	0	0	23169
165	3718	4528	4160	1183	297	130	39	9	4	6	1	0	0	0	0	0	14075
180	4126	6169	7779	2299	597	240	79	21	12	0	0	0	0	0	0	0	21322
195	11721	17576	25679	13110	4161	1442	429	158	44	16	10	1	0	0	0	0	74347
210	16202	13545	16614	10956	5916	2935	1291	358	143	41	7	1	0	0	0	0	68009
225	11416	1221	252	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12901
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Tot</b>	89611	66224	69408	30974	11968	5111	2014	613	218	69	19	2	0.00	0.00	0.00	0.00	276231
	<b>Totale eventi al largo</b>															350635	
	<b>percentuale eventi sottocosta</b>															78.8%	

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 10-2. FREQUENZA DI ACCADIMENTO RELATIVA DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO ALL'ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA. PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.

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	³ 6.5		
120	8.5	0.6	0.2	0.02	0.00	0.00										9.2	0.2
135	4.7	5.1	2.9	0.5	0.1	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00						13.3	3.6
150	2.2	2.8	2.3	0.7	0.2	0.09	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00					8.4	3.4
165	1.3	1.6	1.5	0.4	0.1	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00					5.1	2.1
180	1.5	2.2	2.8	0.8	0.2	0.09	0.03	0.01	0.00							7.7	4.0
195	4.2	6.4	9.3	4.7	1.5	0.5	0.2	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00				26.9	16.3
210	5.9	4.9	6.0	4.0	2.1	1.1	0.5	0.1	0.05	0.01	0.00	0.00				24.6	13.9
225	4.1	0.4	0.09	0.00												4.7	0.1
<b>Tot</b>	32.4	24.0	25.1	11.2	4.3	1.9	0.7	0.2	0.08	0.02	0.01	0.00				100.0	43.6
<b>Tot. cumul.</b>		56.4	81.5	92.8	97.1	98.9	99.7	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

Riferendo queste frequenze di accadimento alla durata complessiva della serie esaminata è possibile stimare una frequenza di apparizione in termini di giorni od ore per anno. A tal scopo è sufficiente moltiplicare le frequenze relative degli stati di mare ottenuti sottocosta per il 78.8% (percentuale degli stati di mare sottocosta relativa al totale del tempo) per ottenere una frequenza assoluta di accadimento.

Con riferimento al grafico di Figura 10-3, gli stati di mare di altezza d'onda  $H_s \geq 0.5$  m si verificano in media 125 giorni l'anno. Gli eventi superiori ad  $H_s \geq 2.0$  m si presentano in media 200 ore/anno mentre la frequenza degli eventi con  $H_s \geq 3.0$  m si riduce a circa un giorno per anno (23 ore/anno).

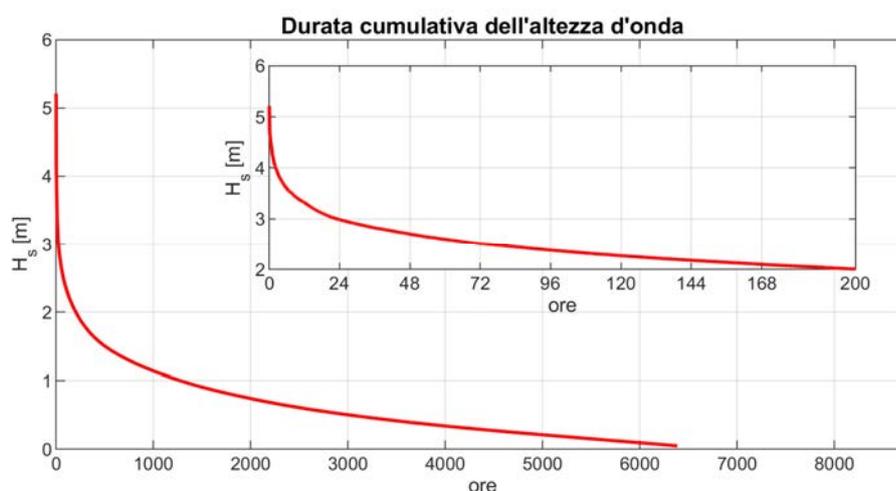


FIGURA 10-3. DURATA CUMULATIVA SU BASE ANNUALE DELL'ALTEZZA D'ONDA NEL PUNTO SOTTOCOSTA P1.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

Nelle seguenti tabelle e nei diagrammi polari di Figura 10-4 sono riportate le percentuali di accadimento su base stagionale (inverno, primavera, estate e autunno) degli eventi propagati sottocosta nel punto P1 da cui si evince che in autunno e in inverno il clima di moto ondoso risulta più severo. La frequenza delle calme si riduce dal 70% in estate al 49% in inverno. Gli stati di mare con  $H_s > 4.0$  m, assenti in primavera e in estate, si presentano in inverno con lo 0.05% di frequenza e in autunno con lo 0.09%. Ciò significa che in inverno la durata degli eventi con  $H_s \geq 4.0$  m è generalmente inferiore ad un'ora mentre in autunno risulta compresa tra 1 e 2 ore.

TABELLA 10-3. FREQUENZA DI ACCADIMENTO RELATIVA DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO INVERNALI ALL'ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA. PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa $H_s$ [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		
120	13.1	1.1	0.3	0.03	0.00											14.5	0.3
135	3.1	5.3	4.0	0.8	0.1	0.07	0.02	0.01	0.00	0.00						13.4	5.0
150	1.4	2.6	2.3	0.7	0.2	0.09	0.05	0.03		0.00						7.4	3.5
165	0.8	1.6	1.7	0.4	0.08	0.06	0.01	0.00		0.00						4.7	2.3
180	0.8	2.1	2.9	1.0	0.2	0.09	0.03	0.01	0.00							7.2	4.3
195	1.9	4.3	8.5	5.8	2.2	0.8	0.3	0.09	0.02							23.9	17.7
210	1.8	3.7	7.0	5.2	3.1	1.6	0.8	0.3	0.1	0.03	0.01					23.6	18.0
225	4.5	0.7	0.2	0.01												5.4	0.2
<b>Tot</b>	<b>27.3</b>	<b>21.4</b>	<b>26.9</b>	<b>14.0</b>	<b>6.0</b>	<b>2.7</b>	<b>1.1</b>	<b>0.4</b>	<b>0.2</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>					<b>100.0</b>	<b>51.3</b>
<b>Tot. cumul.</b>		<b>48.7</b>	<b>75.6</b>	<b>89.5</b>	<b>95.6</b>	<b>98.2</b>	<b>99.4</b>	<b>99.8</b>	<b>100.0</b>								

TABELLA 10-4. FREQUENZA DI ACCADIMENTO RELATIVA DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO ALL'ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA IN PRIMAVERA. PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa $H_s$ [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		
120	3.9	0.3	0.06	0.00												4.2	0.1
135	3.9	4.6	3.1	0.6	0.2	0.02										12.3	3.8
150	2.2	3.0	3.3	0.9	0.3	0.08	0.01									9.8	4.6
165	1.6	1.8	1.8	0.5	0.1	0.01	0.00									5.9	2.5
180	1.9	2.3	3.3	0.9	0.1	0.02	0.01	0.00								8.5	4.3
195	4.9	7.4	11.5	5.5	1.2	0.4	0.07	0.01	0.00							31.0	18.6
210	6.6	6.1	5.4	3.5	1.8	0.8	0.3	0.03	0.01							24.4	11.7
225	3.7	0.2	0.01													3.9	0.0
<b>Tot</b>	<b>28.6</b>	<b>25.8</b>	<b>28.4</b>	<b>11.9</b>	<b>3.6</b>	<b>1.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>							<b>100.0</b>	<b>45.6</b>
<b>Tot. cumul.</b>		<b>54.4</b>	<b>82.8</b>	<b>94.7</b>	<b>98.3</b>	<b>99.6</b>	<b>100.0</b>										

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

TABELLA 10-5. FREQUENZA DI ACCADIMENTO RELATIVA DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO ALL'ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA IN ESTATE. PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa $H_s$ [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	³ 6.5		
120	4.5	0.1	0.00													4.6	0.0
135	7.3	4.5	1.7	0.1	0.02	0.00										13.6	1.8
150	3.4	2.6	1.5	0.3	0.08	0.01										7.9	1.9
165	1.9	1.5	1.0	0.2	0.04											4.7	1.2
180	2.2	2.4	2.4	0.5	0.1	0.01										7.6	3.0
195	7.5	9.2	8.9	2.8	0.5	0.09	0.01									28.9	12.3
210	11.7	6.3	5.7	3.1	1.1	0.3	0.09	0.01	0.01							28.3	10.3
225	4.2	0.3	0.01													4.4	0.0
<b>Tot</b>	42.7	26.8	21.0	7.0	1.9	0.4	0.10	0.01	0.01							100.0	30.5
<b>Tot. cumul.</b>		69.5	90.5	97.6	99.5	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

TABELLA 10-6. FREQUENZA DI ACCADIMENTO RELATIVA DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO ALL'ESTERNO DEL PORTO DI GENOVA IN AUTUNNO. PERIODO DI RIFERIMENTO 1979-2018.

Dir. ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa $H_s$ [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	³ 6.5		
120	14.0	0.9	0.3	0.05	0.02	0.00										15.2	0.3
135	4.1	6.1	3.1	0.6	0.2	0.06	0.05	0.00								14.3	4.1
150	1.6	2.8	2.2	0.8	0.4	0.2	0.1	0.07	0.02	0.00	0.00					8.3	3.8
165	0.9	1.6	1.6	0.5	0.2	0.1	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00					5.1	2.5
180	1.0	2.0	2.8	1.0	0.4	0.2	0.09	0.02	0.02							7.5	4.6
195	2.1	4.0	8.0	5.1	2.3	0.9	0.3	0.2	0.05	0.02	0.02	0.00				22.9	16.9
210	2.3	3.1	6.2	4.4	2.8	1.7	0.8	0.2	0.07	0.04	0.00	0.00				21.6	16.3
225	4.2	0.6	0.2	0.01												5.0	0.2
<b>Tot</b>	30.2	21.1	24.3	12.5	6.3	3.3	1.4	0.5	0.2	0.07	0.02	0.00				100.0	48.7
<b>Tot. cumul.</b>		51.3	75.7	88.2	94.5	97.8	99.2	99.7	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

**Studio delle condizioni meteomarine**

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

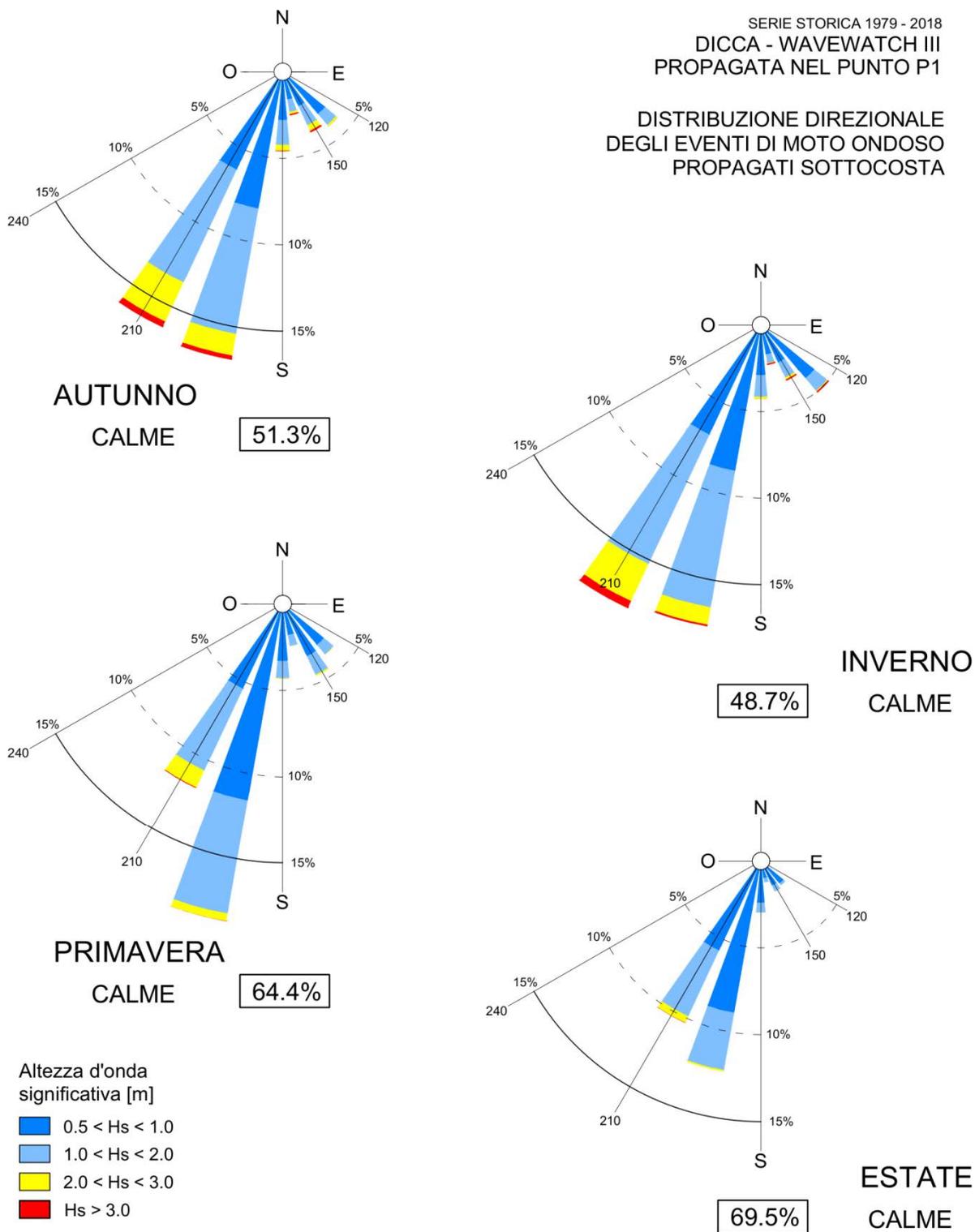


FIGURA 10-4. DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI DI MOTO ONDOSO PROPAGATI SOTTOCOSTA NEL PUNTO P1 CON IL MODELLO DI INVERSA SPETTRALE SU BASE STAGIONALE.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

In Tabella 10-7 è riportato il valore medio del periodo di picco  $T_p$  ottenuto suddividendo gli eventi della serie storica ricostruita sottocosta per classi di  $H_s$  e direzione di provenienza. I valori riportati tra parentesi indicano il valore della deviazione standard rispetto alla media calcolata. La tabella fornisce per ogni classe di direzione o per ogni classe di altezza d'onda il valore della moda (valore medio di  $T_p$  più frequente) ottenuto come media pesata in base al numero di eventi appartenenti ad ogni classe.

TABELLA 10-7. VALORE ATTESO PER IL PERIODO DI PICCO  $T_p$  PER GLI STATI DI MARE PROPAGATI SOTTOCOSTA.

Dir ° Nord	Classe di altezza d'onda significativa $H_s(m)$											Moda
	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	5.00 6.00	>6.00	
120	7.7 (1.1)	8.4 (0.8)	8.7 (1.1)	8.7 (0.6)								7.9
135	4.3 (0.9)	5.2 (0.9)	6.4 (0.9)	7.2 (0.6)	7.8 (0.8)	8.5 (0.7)	8.9 (0.6)	9.1 (0)	9.1 (0)			4.8
150	4.1 (1)	4.9 (0.8)	6 (0.7)	6.9 (0.7)	7.6 (0.5)	8.2 (0.6)	8.6 (0.5)	8.9 (0.5)	9.4 (0.4)			4.8
165	4.6 (1.3)	5.3 (1.1)	6.4 (1.1)	7.2 (1)	7.8 (0.7)	8.2 (0.8)	9.1 (0.9)	9.3 (0.7)	9.8 (0.5)			5.2
180	4.9 (1.3)	5.6 (1.1)	6.7 (1)	7.4 (1.1)	8.1 (0.9)	8.8 (1.1)	9.6 (1.3)	9.6 (1.1)	11.4 (0)			5.6
195	4.8 (1.1)	5.8 (1.1)	6.9 (1)	7.7 (1.1)	8.2 (1.1)	8.8 (1.1)	9.7 (1.1)	9.8 (1.1)	10.3 (0.5)	9.8 (0)		6.0
210	5.5 (2)	7.3 (1.8)	8.1 (1.3)	8.4 (1.2)	8.8 (1.1)	9.1 (1)	9.7 (0.9)	10 (0.8)	11 (1.1)	10.6 (0)		7.3
225	9.6 (2)	10.9 (1.9)	12.4 (2.4)									9.9
<b>Moda</b>	<b>4.9</b>	<b>6.0</b>	<b>7.2</b>	<b>8.0</b>	<b>8.5</b>	<b>9.0</b>	<b>9.5</b>	<b>9.9</b>	<b>10.6</b>	<b>10.2</b>	<b>0.0</b>	

Note:

1. Periodo di picco  $T_p$  espresso in secondi
2. Tra parentesi valore della deviazione standard in secondi
3. La moda (valore medio più frequente) è stata calcolata come la media pesata del valore medio ottenuto per ogni classe di altezza d'onda e direzione in base alla frequenza di accadimento

### 10.5 Propagazione sottocosta degli eventi estremi di moto ondoso con il modello MEROPE

Applicando il modello di inversa spettrale MEROPE i valori estremi di moto ondoso definiti al largo di Genova, associati ai tempi di ritorno 2, 5, 10, 50, 100 e 250 anni, sono stati propagati sottocosta in corrispondenza del punto P1.

Le Tabella 10-8 e Tabella 10-9 riportano i valori di altezza d'onda  $H_s$  e periodo di picco  $T_p$  ottenuti sottocosta per il settore di traversia principale (180 - 240 °N) e secondario (105-180 °N) per diversi tempo di ritorno e direzione al largo del moto ondoso al largo.

TABELLA 10-8. EVENTI ESTREMI SOTTOCOSTA NEL PUNTO DI INVERSA SPETTRALE P1 SETTORE DI TRAVERSIA 180 - 240 °N

Settore 180 - 240 °N						
al largo				sottocosta nel punto P1 (-75 m s.l.m.)		
TR [anni]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	Dir [°N]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	Dir [°N]
2	5.3	9.6	180	5.2	9.8	179
	5.3	9.6	210	4.8	9.8	203
	5.3	9.6	240	3.3	9.8	216
5	5.9	10.0	180	5.8	10.6	179
	5.9	10.0	210	5.4	10.6	203
	5.9	10.0	240	3.7	9.8	216
10	6.4	10.3	180	6.3	10.6	179
	6.4	10.3	210	5.9	10.6	203
	6.4	10.3	240	4.0	9.8	216
50	7.5	11.0	180	7.3	11.4	179
	7.5	11.0	210	6.8	11.4	203
	7.5	11.0	240	4.7	11.4	217
100	8.0	11.3	180	7.8	11.4	179
	8.0	11.3	210	7.3	12.3	203
	8.0	11.3	240	5.1	12.3	217
250	8.7	11.6	180	8.5	12.3	179
	8.7	11.6	210	7.9	12.3	203
	8.7	11.6	240	5.5	13.2	217
500	9.2	11.9	180	8.95	12.3	179
	9.2	11.9	210	8.40	12.3	203
	9.2	11.9	240	5.9	13.2	217

**Studio delle condizioni meteomarine****TABELLA 10-9. EVENTI ESTREMI SOTTOCOSTA NEL PUNTO DI INVERSA SPETTRALE P1  
SETTORE DI TRAVERSIA 105 - 180 °N**

Settore 105-180 °N						
al largo				sottocosta punto P1 (-75 m s.l.m.)		
TR [anni]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]
2	3.6	7.9	120	3.0	9.1	132
	3.6	7.9	150	3.5	8.5	153
5	4.1	8.4	120	3.5	9.1	132
	4.1	8.4	150	4.0	9.1	152
10	4.6	8.8	120	4.0	9.1	131
	4.6	8.8	150	4.5	9.1	152
50	5.7	9.5	120	5.0	9.1	131
	5.7	9.5	150	5.6	9.8	152
100	6.1	9.8	120	5.4	9.1	131
	6.1	9.8	150	5.9	10.6	152
250	6.7	10.2	120	5.9	10.6	131
	6.7	10.2	150	6.5	10.6	152
500	7.2	10.5	120	6.4	11.4	131
	7.2	10.5	150	7.0	10.6	152

## 11 APPLICAZIONE DEL MODELLO SWAN PER LA PROPAGAZIONE DEGLI STATI DI MARE ESTREMI

Gli stati di mare estremi definiti al largo associati ai tempi di ritorno di 100 e 250 anni sono stati altresì propagati sottocosta con il modello numerico SWAN. (Simulating WAVes Nearshore), sviluppato dal TU-Delft.

Per effettuare la propagazione degli eventi estremi sono state utilizzate, in funzione della direzione degli stati di mare propagati, le due griglie di calcolo rappresentate in Figura 11-1.

La griglia di calcolo 1, applicata per la propazione degli stati di mare provenienti da scirocco e mezzogiorno-libeccio, è orientata a Nord e presenta un'estensione di 140 km x 60 km con un passo di discretizzazione  $\Delta x = \Delta y = 200$  m; la griglia di calcolo 2, utilizzata per la simulazione degli stati di mare di libeccio-ponente, risulta orientata a 30° N, presenta un'estensione di 125,6 km x 59 km ed ha un passo di discretizzazione  $\Delta x = \Delta y = 200$  m.

Come condizione al contorno, lungo i lati della griglia di calcolo esposti al mare aperto, sono stati applicati gli spettri di moto ondoso tipo JONSWAP ( $\gamma=3.3$ ) per gli stati di mare estremi associati ai tempi di ritorno di 100 e 250 anni, provenienti dal settore di traversia principale e secondario.

Ad ogni stato di mare è stato associato un vento di velocità  $U_w$  e direzione  $Dir_w$ , compatibili con le condizioni di moto ondoso al largo. L'intensità del vento è stata definita sulla base della correlazione tra le coppie di valori ( $U_w, H_s$ ) dei dati di moto ondoso in ricostruzione forniti dal DICCA. La direzione è stata invece definita sulla base della legge di deviazione vento/mare ottenuta per il fetch efficace.

Le simulazioni sono state condotte in condizioni stazionarie utilizzando un campo di vento uniforme su tutto il dominio comprendendo i fenomeni di generazione dovuta al vento e di interazione non lineare tra le componenti spettrali del moto ondoso in acqua profonda. A scopo cautelativo le simulazioni sono state condotte senza attivare tutti i fenomeni dissipativi riprodotti potenzialmente dal modello (frangimento, attrito sul fondo, whitecapping etc...). Gli stati di mare simulati sono riepilogati in Tabella 11-1.

Per una corretta simulazione degli eventi estremi si è scelto di utilizzare un coefficiente di dispersione direzionale pari a:

- 30° per il settore di traversia principale;
- 40° per il settore di traversia secondario;

in accordo con quanto riscontrato per le mareggiate al largo di Genova.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

Nei grafici riportati nelle pagine a seguire sono presentati i risultati delle simulazioni condotte con il modello SWAN. I grafici riportano il campo di altezza d'onda significativa  $H_s$  (rappresentato con una scala di colori) ed il campo vettoriale di direzione del moto ondoso (frecche di colore nero). Le figure riportano inoltre il campo della direzione del vento (frecche di colore azzurro).

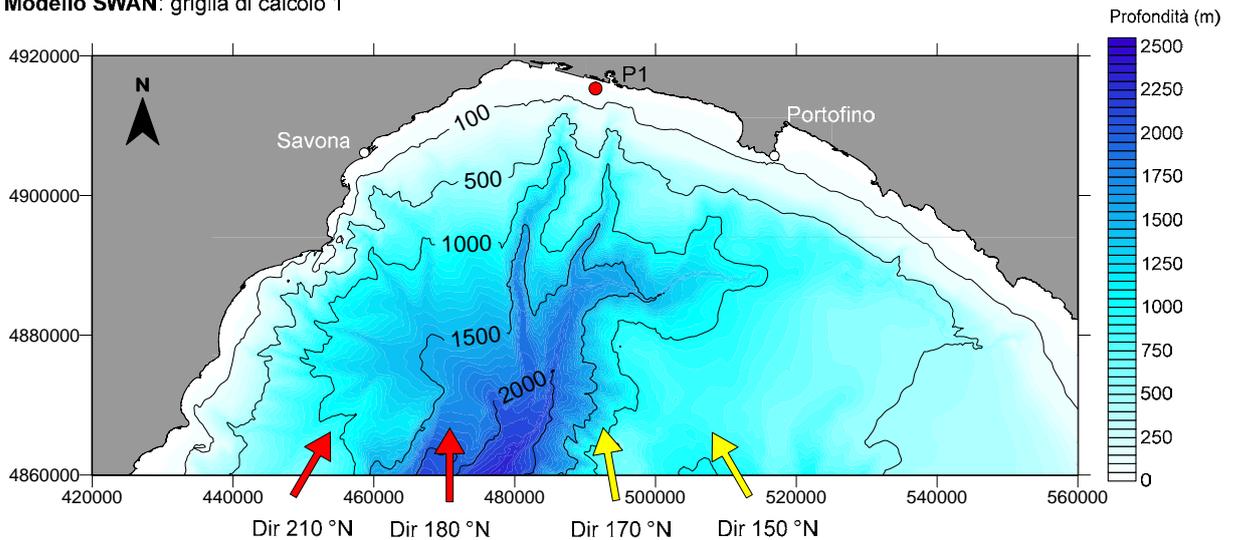
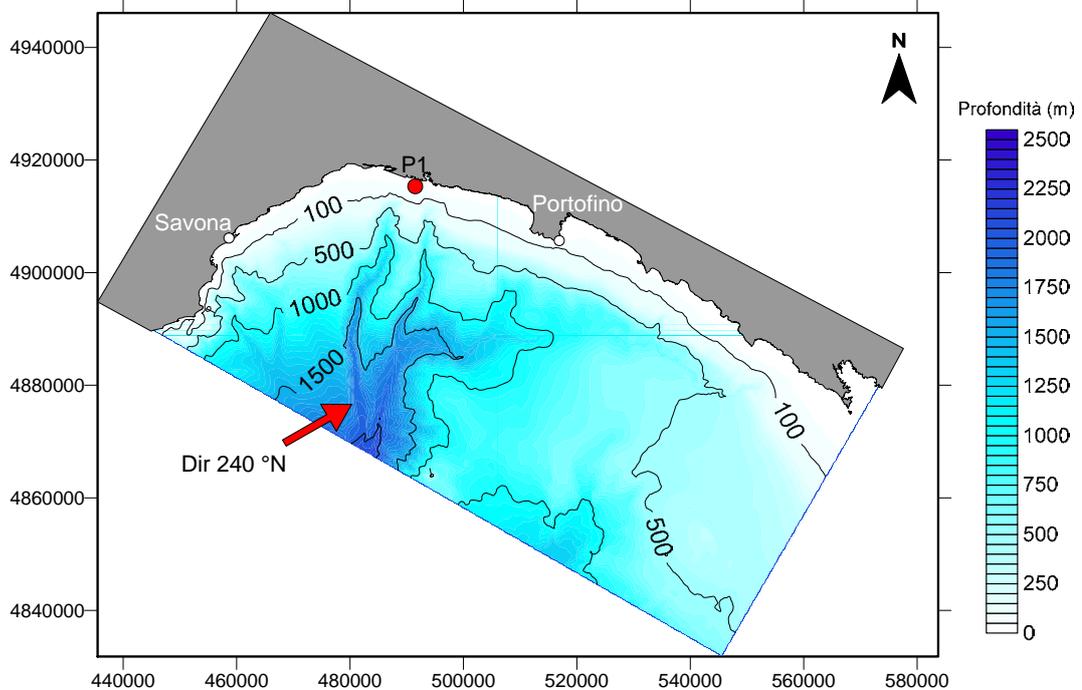
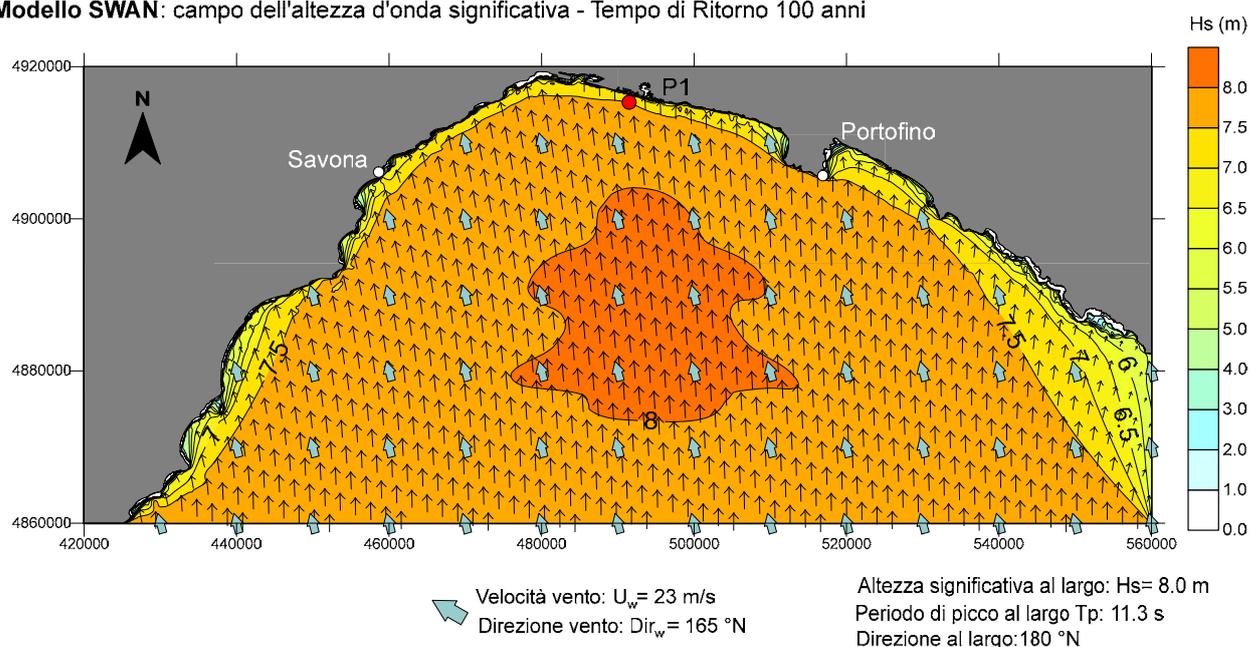
**Modello SWAN: griglia di calcolo 1****Modello SWAN: griglia di calcolo 2**

FIGURA 11-1. GRIGLIE DI CALCOLO UTILIZZATE PER LE SIMULAZIONI CONDOTTE CON IL MODELLO NUMERICO SWAN

TABELLA 11-1. STATI DI MARE ESTREMI PROPAGATI CON IL MODELLO SWAN

Stati di mare estremi propagati con il modello SWAN										
Tempo di ritorno	Settore 180 - 240 °N					Settore 105 - 180 °N				
TR [anni]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	U <sub>w</sub> [m/s]	Dir <sub>w</sub> [°N]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	U <sub>w</sub> [m/s]	Dir <sub>w</sub> [°N]
100	8.0	11.3	180	23	165	6.1	9.8	150	22	130
	8.0	11.3	210	23	210	6.1	9.8	170	22	150
	8.0	11.3	240	23	257					
250	8.7	11.6	180	24	165	6.7	10.2	150	24	130
	8.7	11.6	210	24	210	6.7	10.2	170	24	150
	8.7	11.6	240	24	257					

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 100 anni

FIGURA 11-2 – RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R=100$  ANNI – DIREZIONE AL LARGO  $180$ ° N

**Modello SWAN:** campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 100 anni

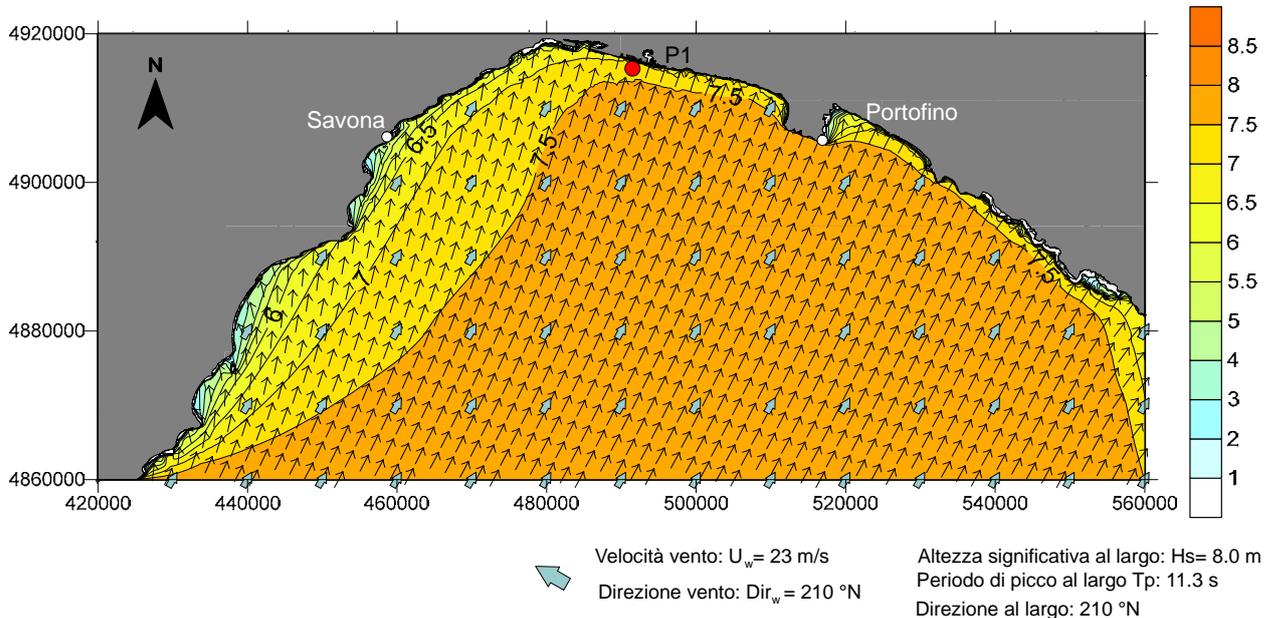


FIGURA 11-3 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R = 100$  ANNI DIREZIONE AL LARGO  $210^\circ N$ .

**Modello SWAN:** campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 100 anni

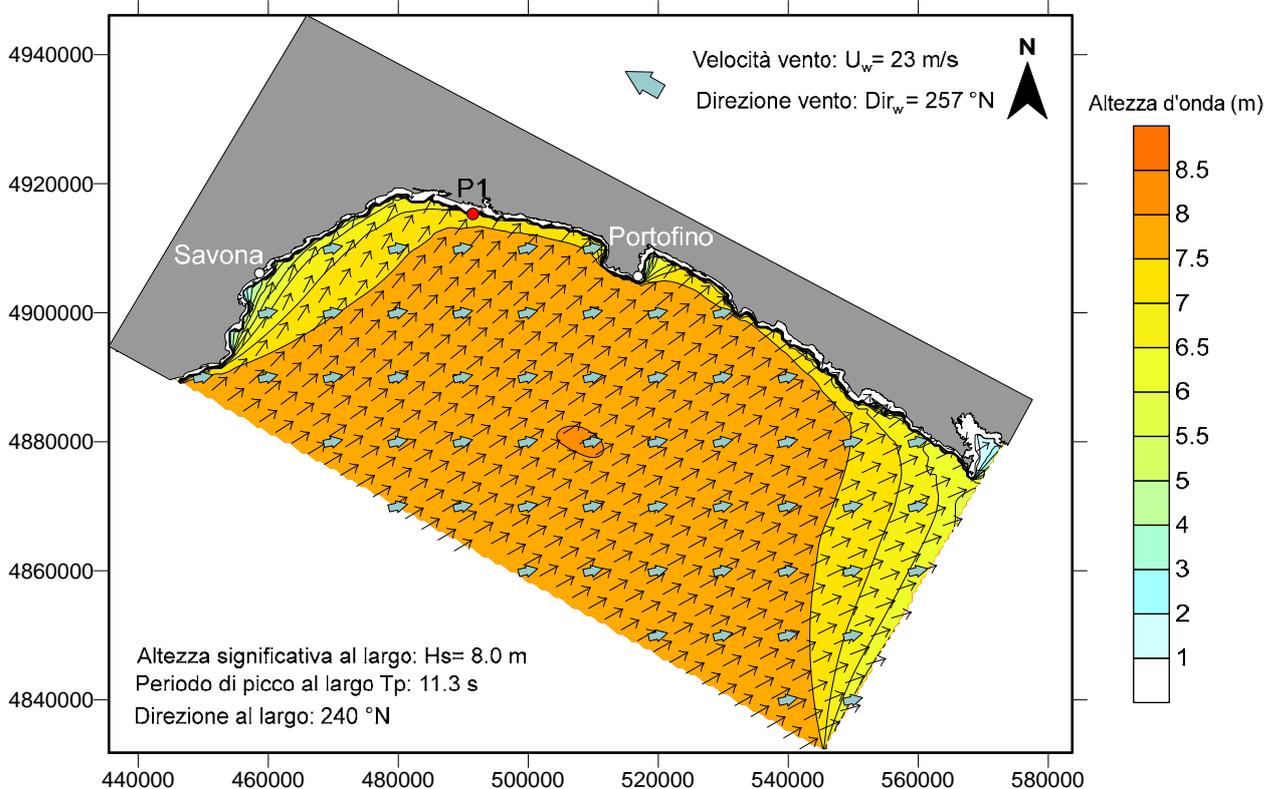


FIGURA 11-4 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R = 100$  ANNI DIREZIONE AL LARGO  $240^\circ N$ .

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 250 anni

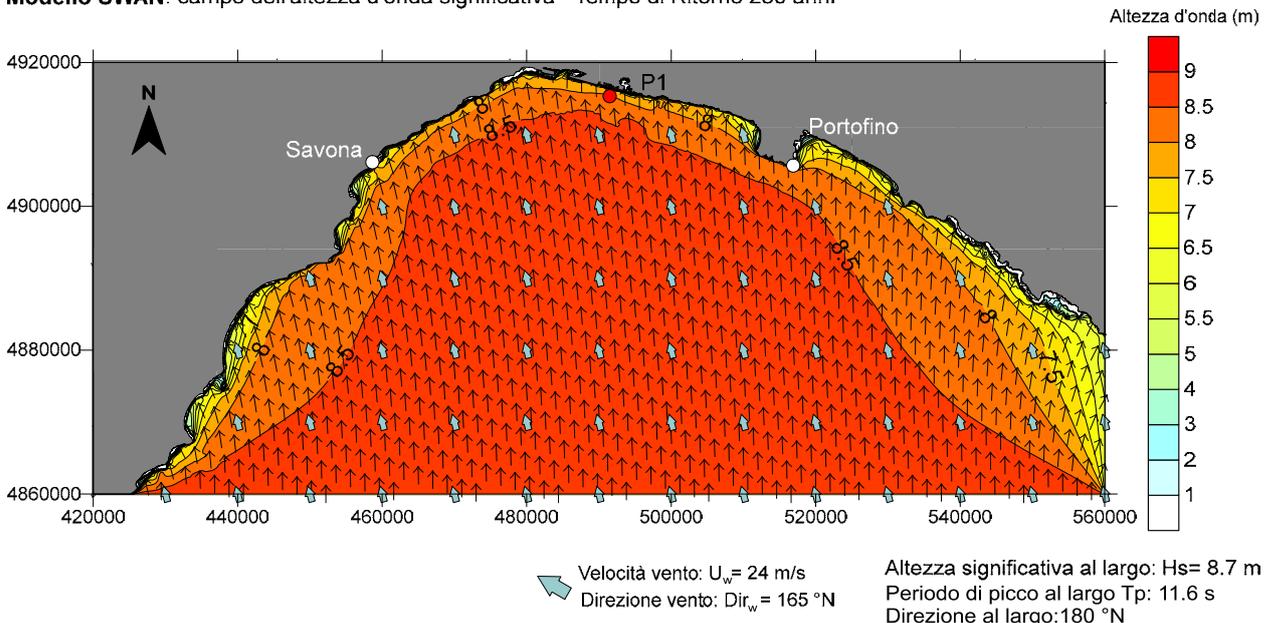


FIGURA 11-5 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R=250$  ANNI – DIREZIONE AL LARGO  $180^\circ N$

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 250 anni

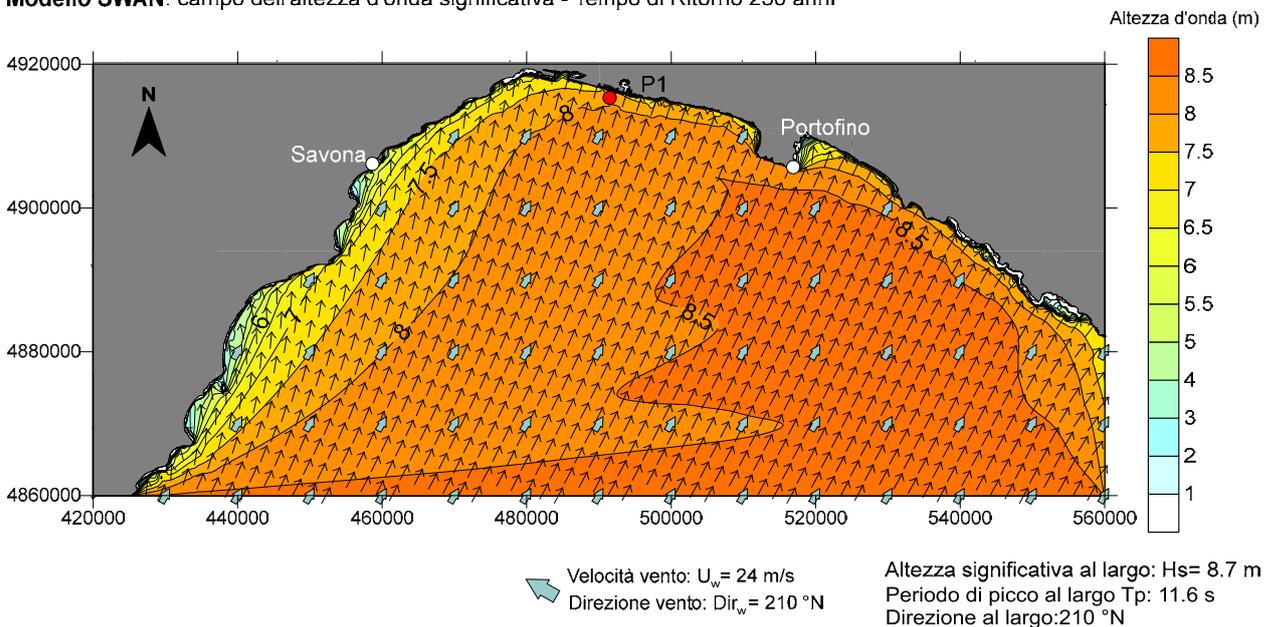


FIGURA 11-6 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R=250$  ANNI – DIREZIONE AL LARGO  $210^\circ N$

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 250 anni

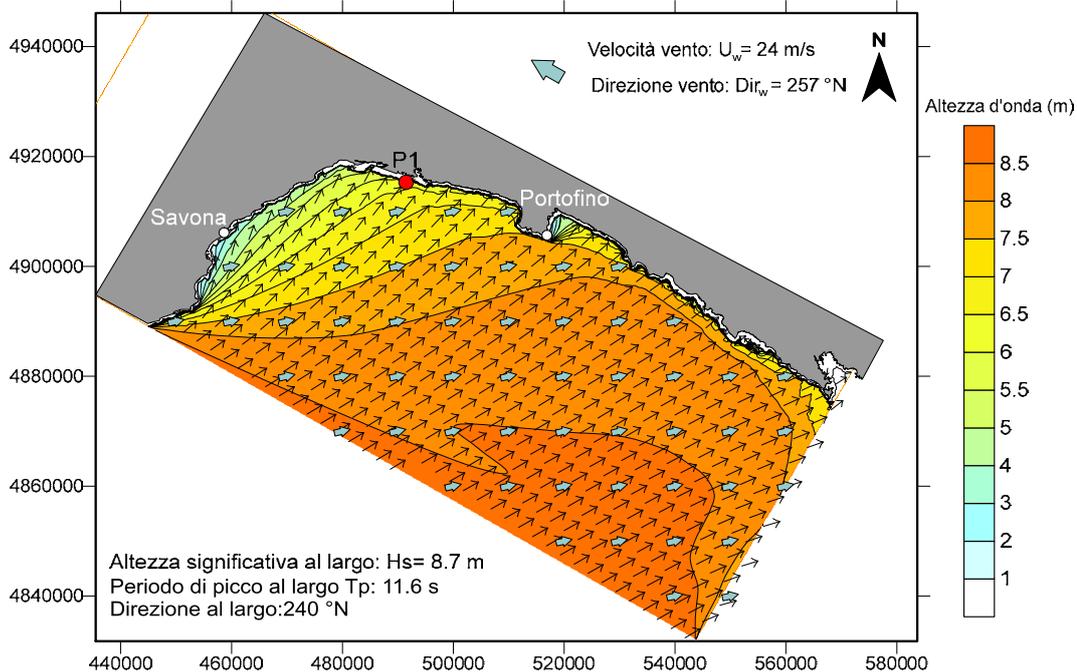


FIGURA 11-7 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R=250$  ANNI – DIREZIONE AL LARGO  $240^\circ N$

Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 100 anni

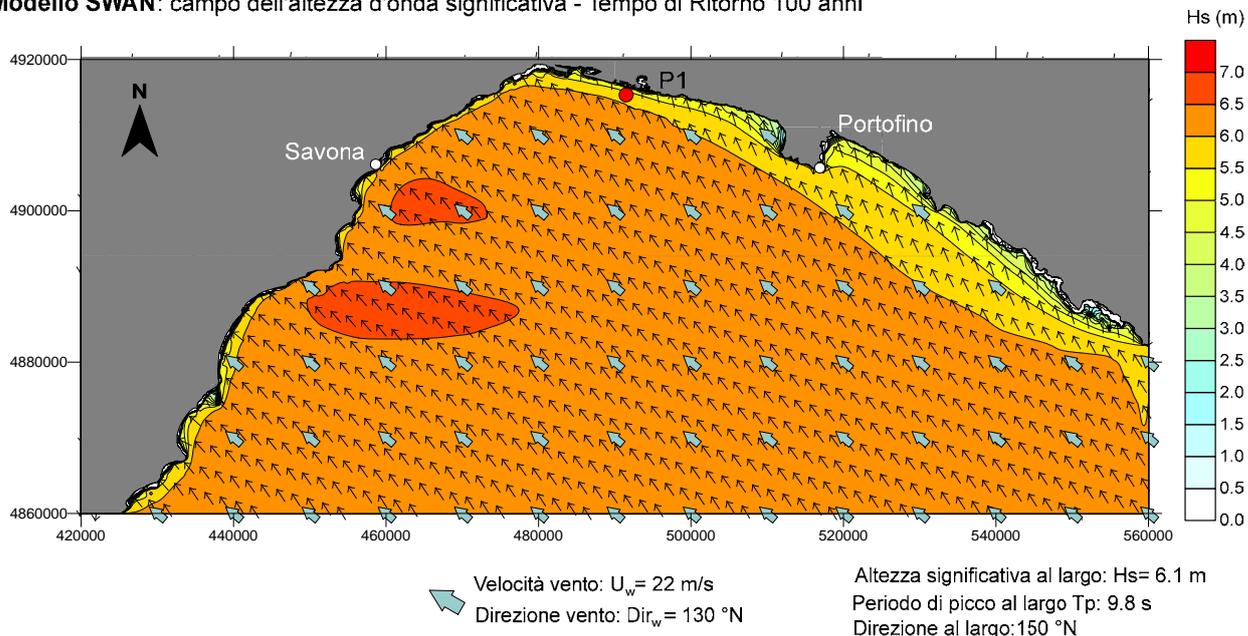


FIGURA 11-8 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R=100$  ANNI – DIREZIONE AL LARGO  $150^\circ N$

**Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 100 anni**

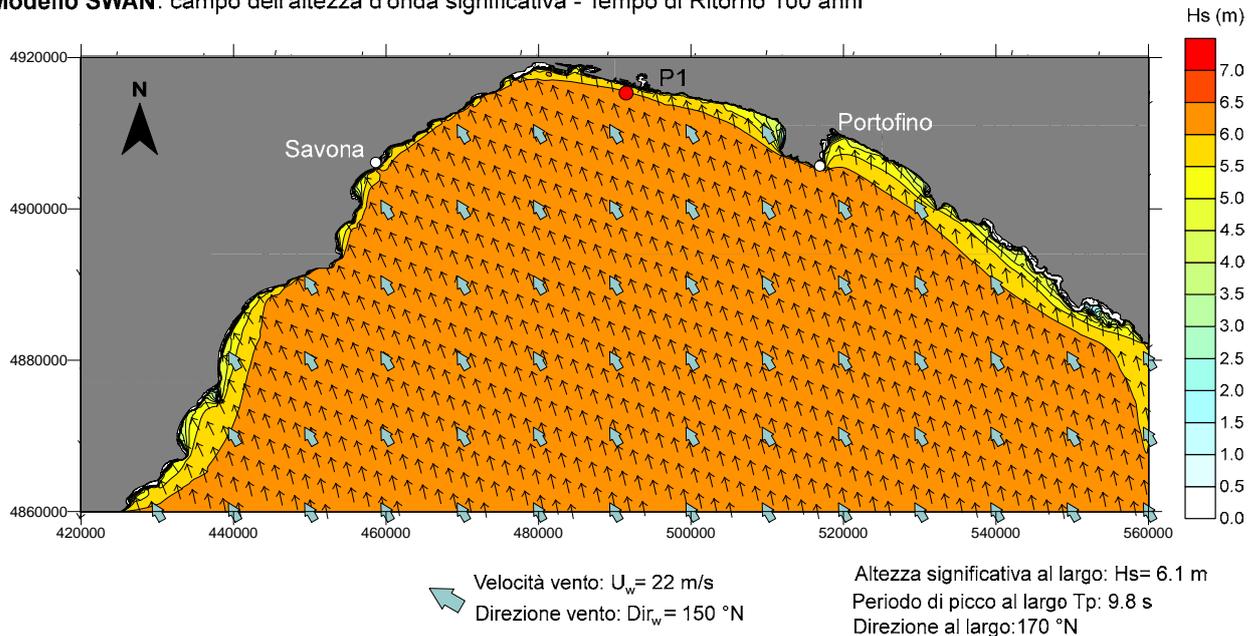


FIGURA 11-9 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R=100$  ANNI – DIREZIONE AL LARGO  $170^\circ N$

**Modello SWAN: campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 250 anni**

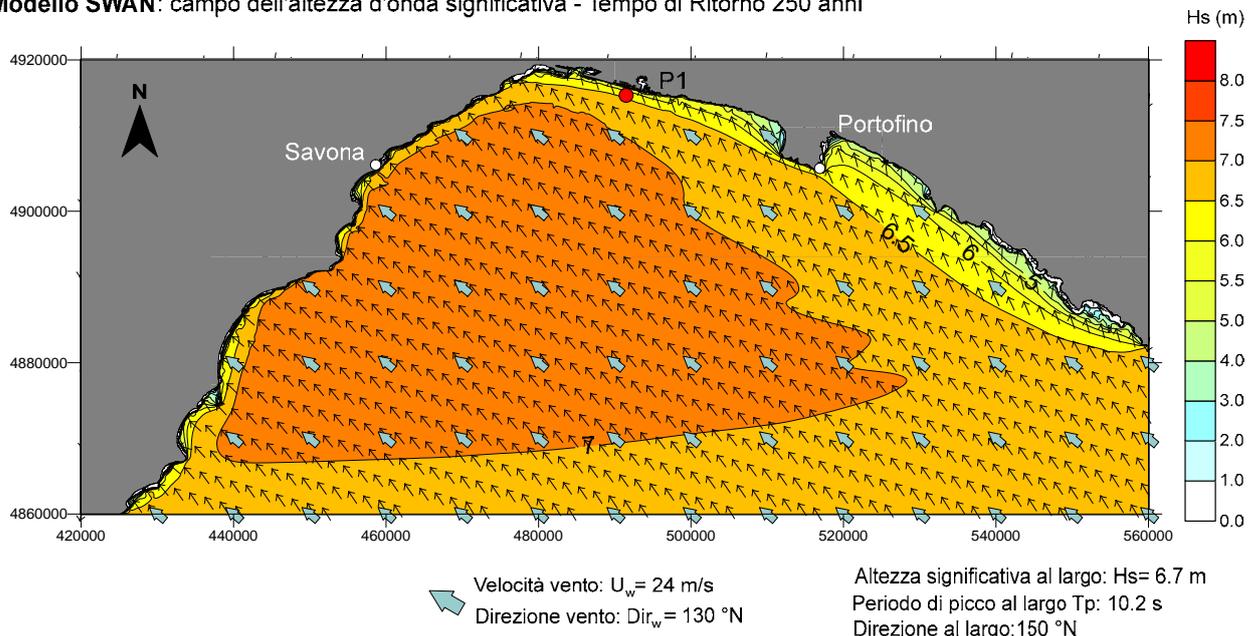


FIGURA 11-10 – RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN.  $T_R=250$  ANNI – DIREZIONE AL LARGO  $150^\circ N$

**Modello SWAN:** campo dell'altezza d'onda significativa - Tempo di Ritorno 250 anni

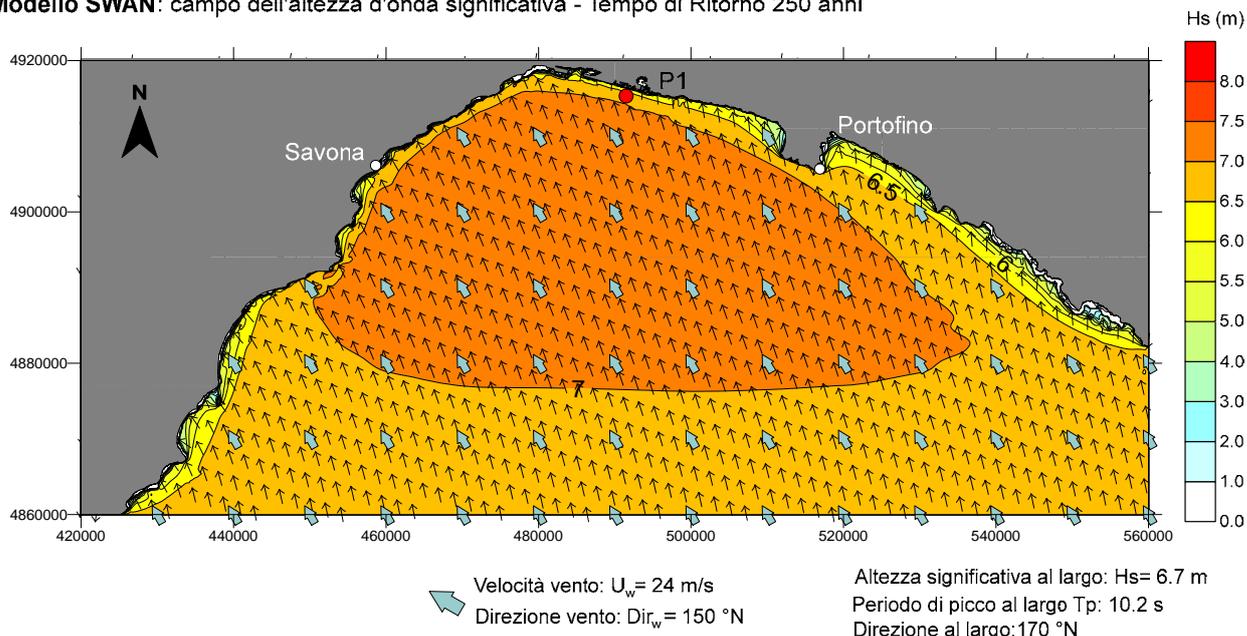


FIGURA 11-11 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELLO STATO DI MARE OTTENUTO CON IL MODELLO SWAN. TR=250 ANNI – DIREZIONE  $170^\circ \text{ N}$

In Tabella 11-2 ed in Tabella 11-3 sono riportati i valori di altezza d'onda significativa  $H_s$ , periodo di picco  $T_p$ , periodo medio spettrale  $T_{m-1,0}$  e direzione ottenuti nel punto di valutazione P1 relativi ai settori di traversia principale e secondario.

I grafici di Figura 11-12 e di Figura 11-13 riportano la variazione dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  nel punto di valutazione P1 e la direzione del moto ondoso in funzione della direzione di provenienza al largo per i due tempi di ritorno presi in esame.

Dai risultati ottenuti è possibile osservare un generale buon accordo con i valori ottenuti mediante l'utilizzo del modello numerico di inversa spettrale MEROPE a conferma che i fenomeni dissipativi, rigenerativi e non lineari del moto ondoso, trascurati dal modello MEROPE, tendono a bilanciarsi tra loro in questa in questa zona di propagazione delle onde.

Si può comunque affermare che il modello MEROPE fornisce mediamente nel presente caso risultati più conservativi rispetto a quelli forniti del modello SWAN.

**Studio delle condizioni meteomarine**

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**TABELLA 11-2 - CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO ESTREME NEL PUNTO SOTTOCOSTA P1 OTTENUTE CON IL MODELLO SWAN - SETTORE DI TRAVERSIA PRINCIPALE.**

Settore 180 - 240 °N						
al largo				sottocosta nel punto P1 (-75 m s.l.m.)		
TR	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir
[anni]	[m]	[s]	[°N]	[m]	[s]	[°N]
100	8.0	11.3	180	7.5	12.0	174
	8.0	11.3	210	7.2	12.0	201
	8.0	11.3	240	5.8	10.9	215
250	8.7	11.6	180	8.0	12.0	176
	8.7	11.6	210	7.7	12.0	202
	8.7	11.6	240	6.2	12.0	215

**TABELLA 11-3 - CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO ESTREME NEL PUNTO SOTTOCOSTA P1 OTTENUTE CON IL MODELLO SWAN RELATIVI AL SETTORE DI TRAVERSIA SECONDARIO.**

Settore 105-180 °N						
al largo				sottocosta punto P1 (-75 m s.l.m.)		
TR [anni]	H [m]	Tp [s]	Dir [°N]	H [m]	Tp [s]	Dir [°N]
100	6.1	9.8	120	4.8	10.1	145
	6.1	9.8	150	5.7	10.1	155
	6.1	9.8	170	6.0	10.1	167
250	6.7	10.2	120	5.3	10.6	145
	6.7	10.2	150	6.4	10.6	156
	6.7	10.2	170	6.7	10.6	165

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

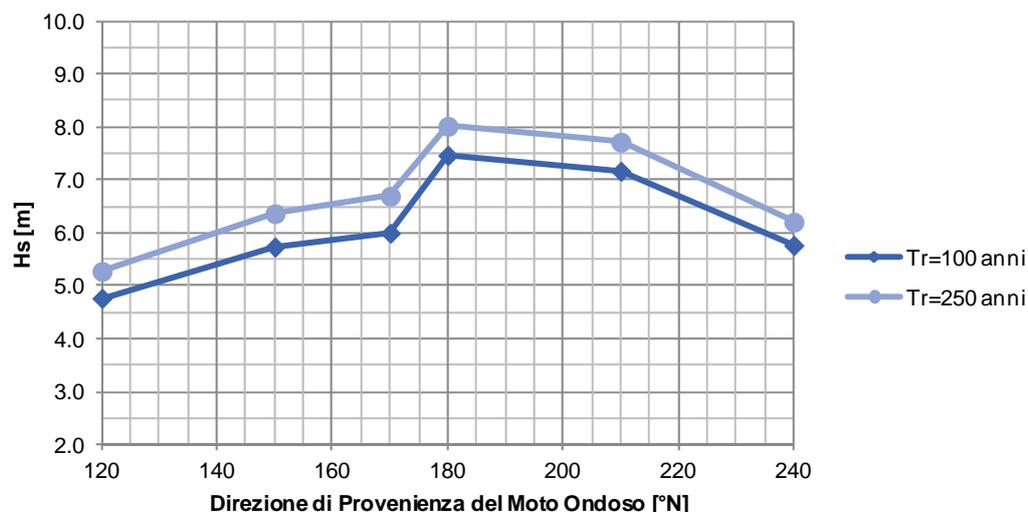


FIGURA 11-12 - ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA OTTENUTA NEL PUNTO P1 IN FUNZIONE DELLA DIREZIONE DI PROVENIENZA AL LARGO PER GLI STATI DI MARE ESTREMI CON TEMPO DI RITORNO TR 100 ANNI E TR 250 ANNI.

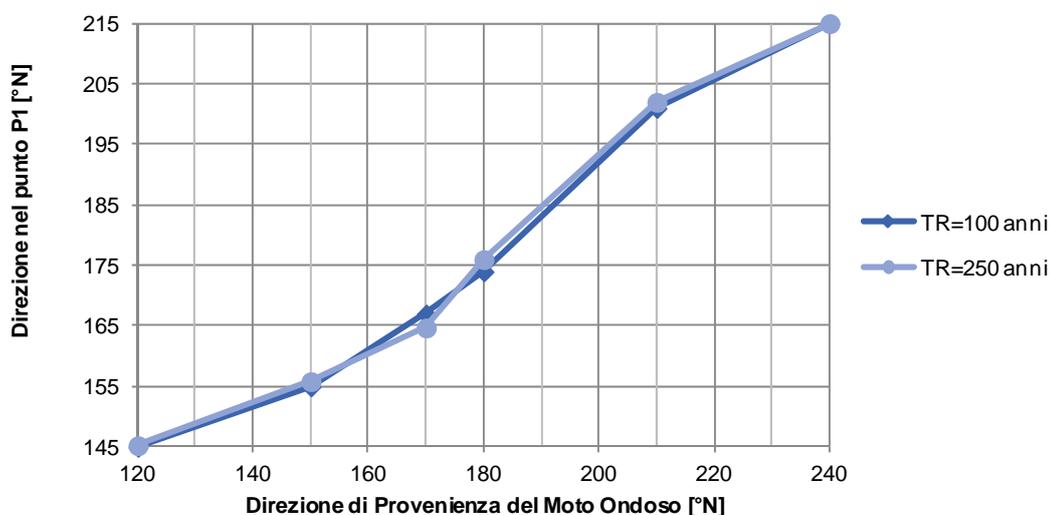


FIGURA 11-13 – DIREZIONE DEL MOTO ONDOSO OTTENUTA NEL PUNTO P1 IN FUNZIONE DELLA DIREZIONE DI PROVENIENZA AL LARGO PER GLI STATI DI MARE ESTREMI CON TEMPO DI RITORNO TR 100 ANNI E TR 250 ANNI..

## 12 ANALISI DEI LIVELLI

### 12.1 Introduzione

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

- **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. Poiché le variazioni atmosferiche non sono prevedibili in modo deterministico, queste variazioni si trattano in senso stocastico e quindi possono essere previste solo utilizzando approcci di tipo probabilistico. La componente meteorologica della marea è indotta essenzialmente da due fenomeni che si esplicano contemporaneamente: (i) l'effetto barometrico inverso e (ii) l'azione esercitata dal vento sulle masse oceaniche ("wind set-up"). In presenza di alte pressioni atmosferiche (aree anticicloniche) generalmente la velocità del vento è contenuta e prevale l'effetto barometrico inverso che da luogo ad un abbassamento del livello del mare. Abbassamenti del livello del mare si possono verificare anche in presenza di venti sostenuti che spirano dalla terra verso il mare aperto. Invece, in presenza di aree cicloniche (perturbazioni atmosferiche), con vento che spirano verso la costa, la componente meteorologica della marea dà luogo ad un aumento (sovralzo) del livello del mare. Tale aumento è comunemente indicato con il termine sovralzo di tempesta ("storm surge").

### 12.2 Misure di livello del mareografo RMN di Genova

Sul molo Ponte Spinola all'interno del Bacino Porto Vecchio, è presente il mareografo della stazione mareografica di Genova, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita da ISPRA.

Dal portale RMN sono stati acquisiti i dati di livello registrati con cadenza di 10 min da Dicembre 1998 a Dicembre 2019. Da questa serie di dati è stata estratta ed analizzata una serie temporale con cadenza oraria.

Il rendimento della stazione mareografica, ad eccezione del periodo di non funzionamento di circa 2 anni avvenuto tra Maggio 2015 e Maggio 2017, è stato piuttosto elevato come mostrato nel grafico di Figura 12-1.

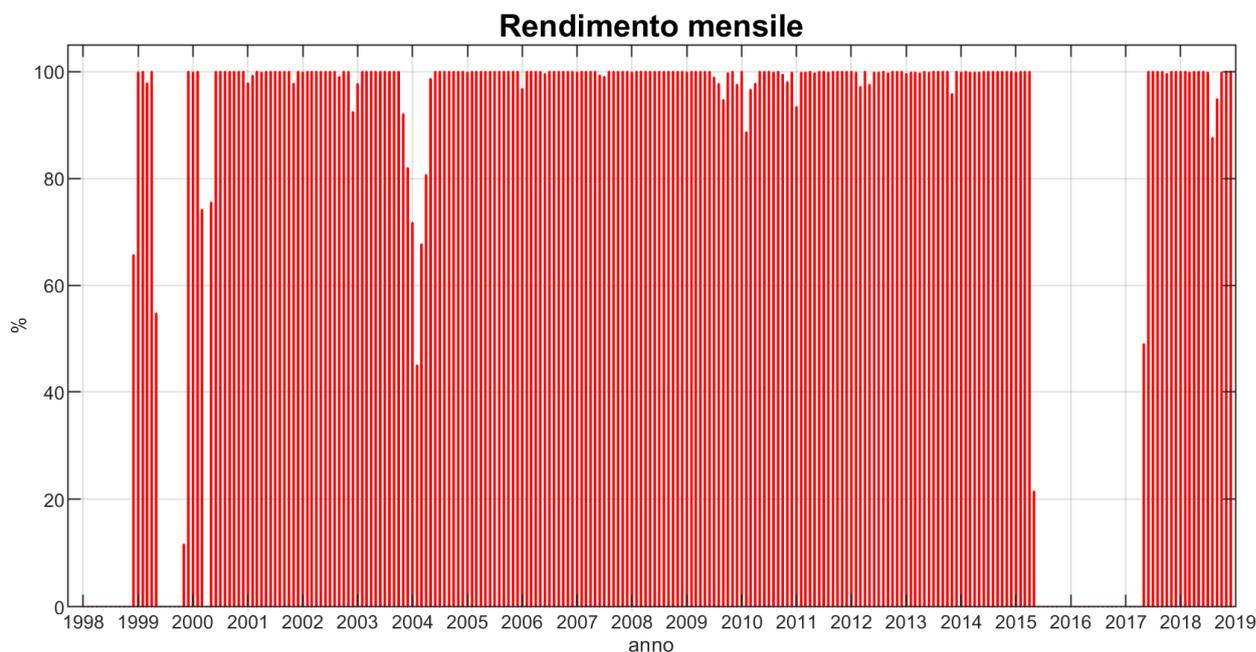


FIGURA 12-1. RENDIMENTI MENSILI DELLA STAZIONE MAREOGRAFICA RMN DI GENOVA. PERIODO DI RIFERIMENTO DICEMBRE 1998 - DICEMBRE 2019.

Utilizzando l'applicazione T\_TIDE<sup>5</sup> è stata effettuata l'analisi armonica delle misure al fine di calcolare le costanti armoniche che caratterizzano l'oscillazione nel paraggio in esame e scomporre così le misure in *componente astronomica* e *componente residua*.

Nel grafico di Figura 12-2 sono riportate, a titolo di esempio, le misure di livello registrate dal mareografo per l'anno 2018. I livelli rappresentati sono riferiti allo zero dello strumento (che non è detto coincida con lo zero del mare).

La Figura 12-3 mostra il risultato dell'analisi condotta sui livelli osservati nell'anno 2018. 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). Il grafico di Figura 12-3 mette in evidenza inoltre il livello del sovrizzo di tempesta registrato in occasione della mareggiata del 29-30 Ottobre 2018, che ha raggiunto +0.5m.

<sup>5</sup> Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, "Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE", Computers and Geosciences, 28 (2002), 929-937.

## Studio delle condizioni meteomarine

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

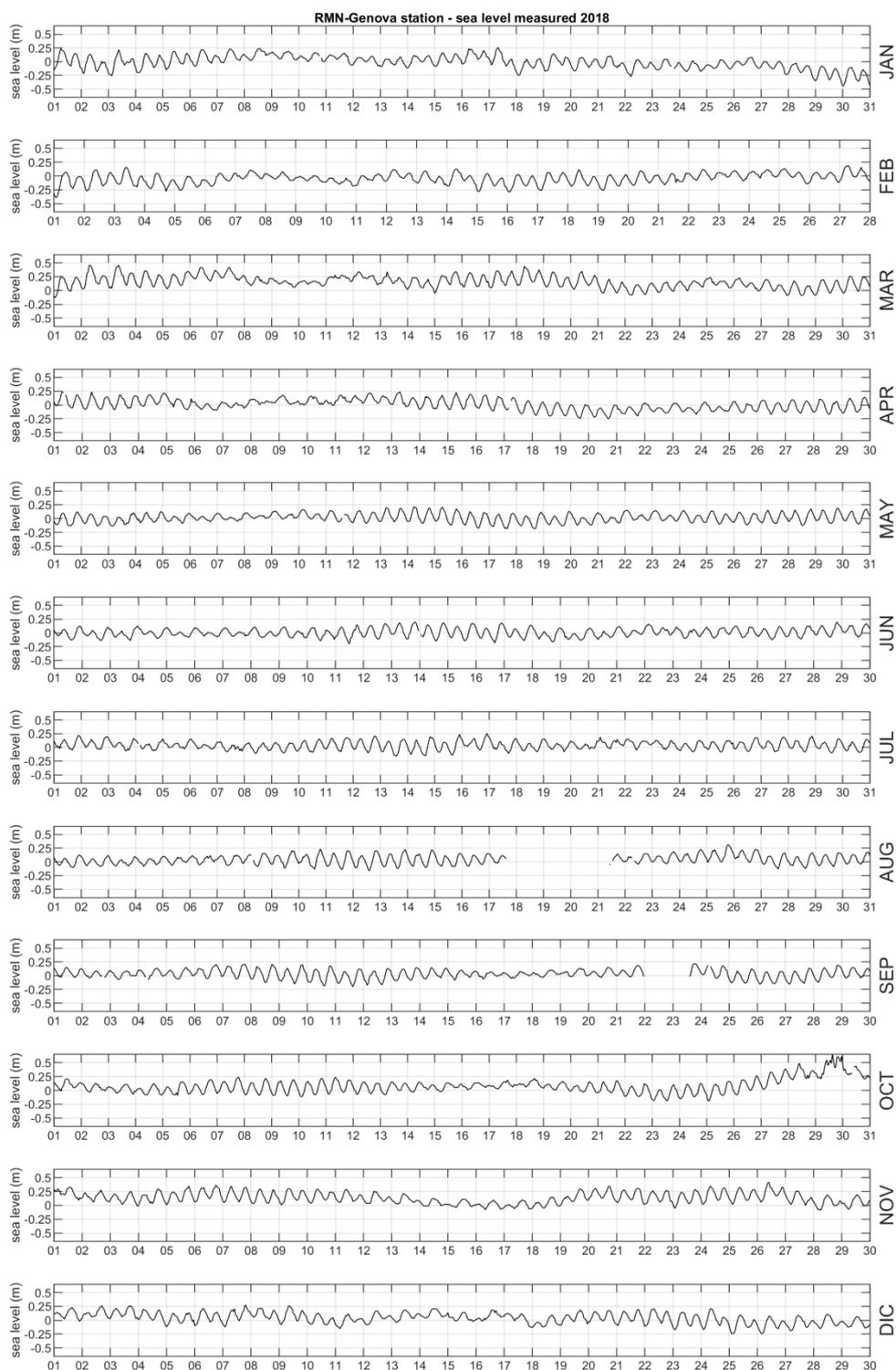


FIGURA 12-2. MISURE DI LIVELLO EFFETTUATE NELL' ANNO 2018 DALLA STAZIONE RMN DI GENOVA.

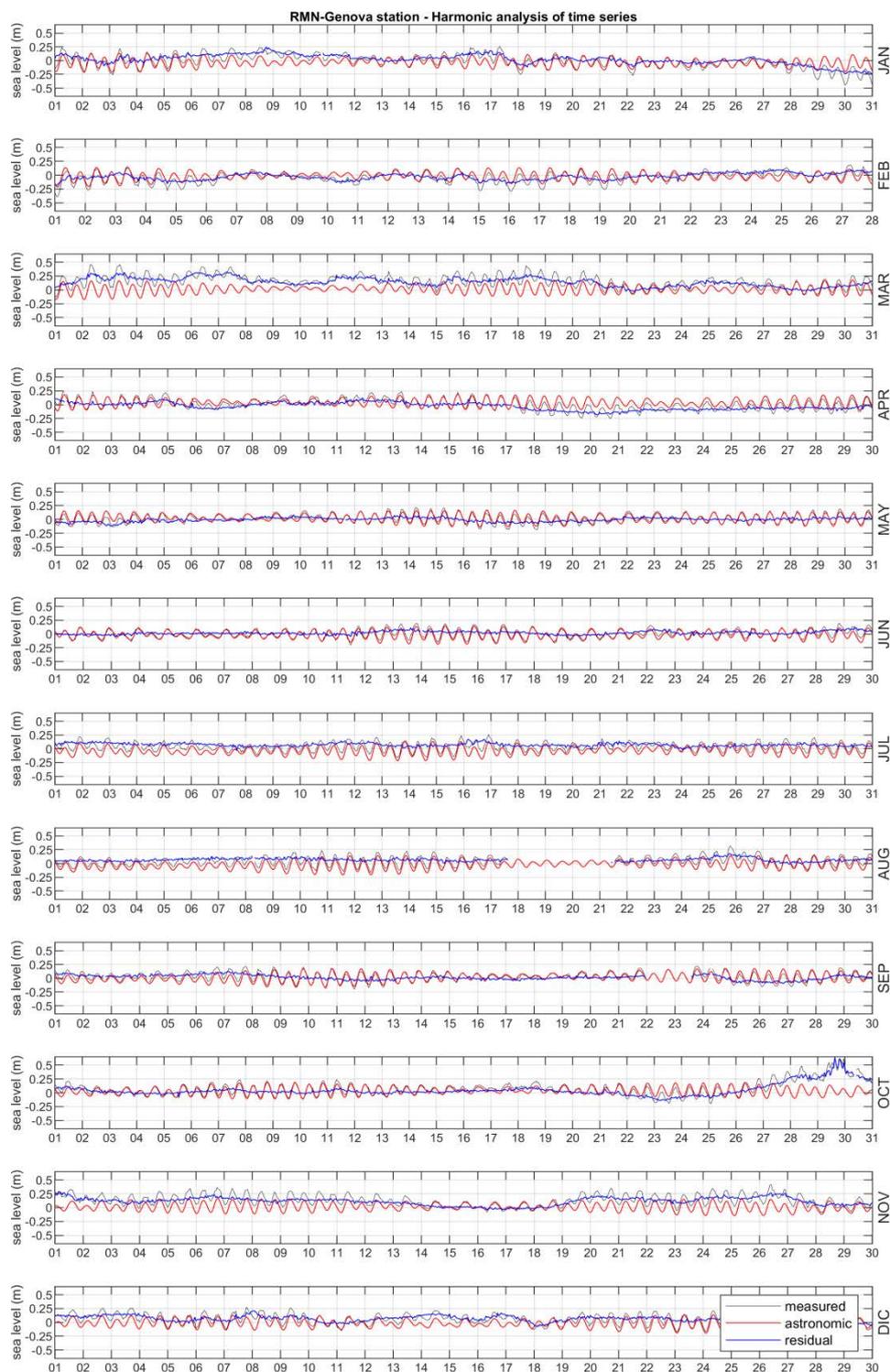


FIGURA 12-3. RICOSTRUZIONE DELLA MAREA ASTRONOMICA (IN ROSSO) E VALORI RESIDUI (IN BLU) SULLA BASE DEI LIVELLI MISURATI (IN NERO) DALLA STAZIONE RMN DI GENOVA PER L'ANNO 2018

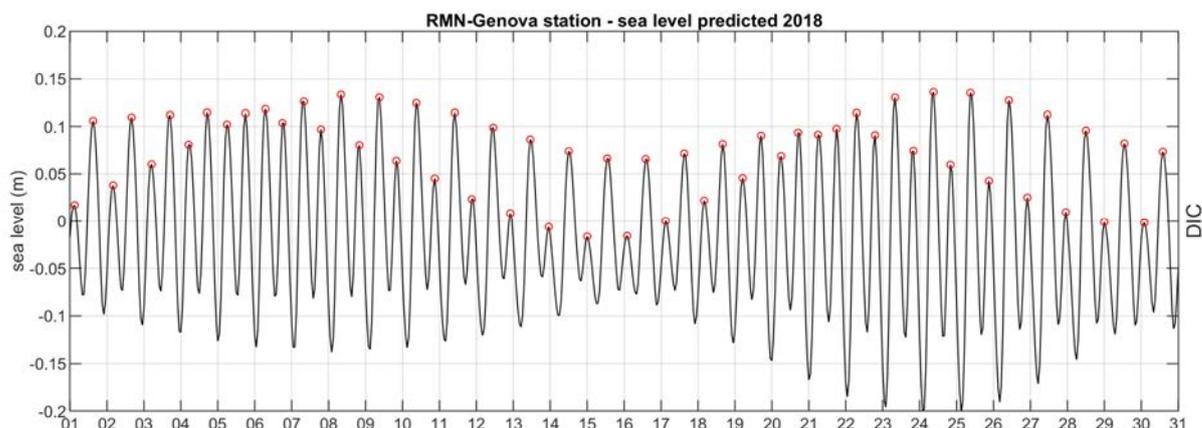


FIGURA 12-4. RICOSTRUZIONE DELLA MAREA ASTRONOMICA EFFETTUATA PER LA STAZIONE MAREOGRAFICA DI GENOVA PER IL MESE DI DICEMBRE 2018 APPLICANDO LE COSTANTI ARMONICHE OTTENUTE.

### 12.2.1 Marea astronomica

Il grafico di Figura 12-4 mostra in dettaglio la marea astronomica ricostruita per il mese di dicembre 2018 con le costituenti ottenute dall'analisi dei livelli.

La marea astronomica è di tipo misto semidiurno con due alte e due basse maree, di ampiezza diversa. L'ampiezza di marea risulta in media contenuta con escursioni di livello comprese mediamente tra +/- 10 cm (media delle alte maree giornaliere MHHW=0.12 m). Durante le fasi sizigiali si ha un aumento dell'ampiezza della marea che può raggiungere occasionalmente 15 cm (MHWS = +0.18 m).

La media delle alte e basse maree MHHW e MLLW è stata determinata calcolando la media dei più alti e più bassi livelli di marea che si verificano in un ciclo di marea.

La media delle alte e basse maree sizigiali è stata definita sulla base della curva di durata dei livelli di alta e bassa marea assumendo i livelli con frequenza di accadimento pari al 10%.

TABELLA 12-1. LIVELLI DI MAREA ASTRONOMICA PER IL PORTO DI GENOVA

Highest Astronomical Tide	HAT	+0.21 m
Mean High Water Spring	MHWS	+0.16 m
Mean Higher High Water	MHHW	+0.12 m
Mean Sea Level	MSL	0.00 m
Mean Lower Low Water	MLLW	-0.10 m
Mean Low Water Spring	MLWS	-0.16 m
Lowest Astronomical Tide	LAT	-0.21 m

### 12.2.2 Analisi dei livelli residui estremi

La serie dei valori di livello residuo, ottenuta depurando le registrazioni del mareografo RMN di Genova dalla componente astronomica di marea, è stata analizzata al fine di valutare la probabilità di accadimento dei valori estremi.

L'analisi dei valori estremi è stata condotta adottando la metodologia Block Maxima, andando ad individuare per intervalli di tempo uguali i valori massimi. nel caso specifico sono stati estratti i valori massimi mensili dal 1998 al 2018.

Il campione di valori estremi è stato successivamente oggetto di un'analisi di inferenza statistica al fine di determinare i parametri della legge di distribuzione dei valori estremi tipo Gumbel.

I risultati dell'analisi di adattamento del campione alla legge tipo Gumbel sono mostrati nel grafico di Figura 12-5.

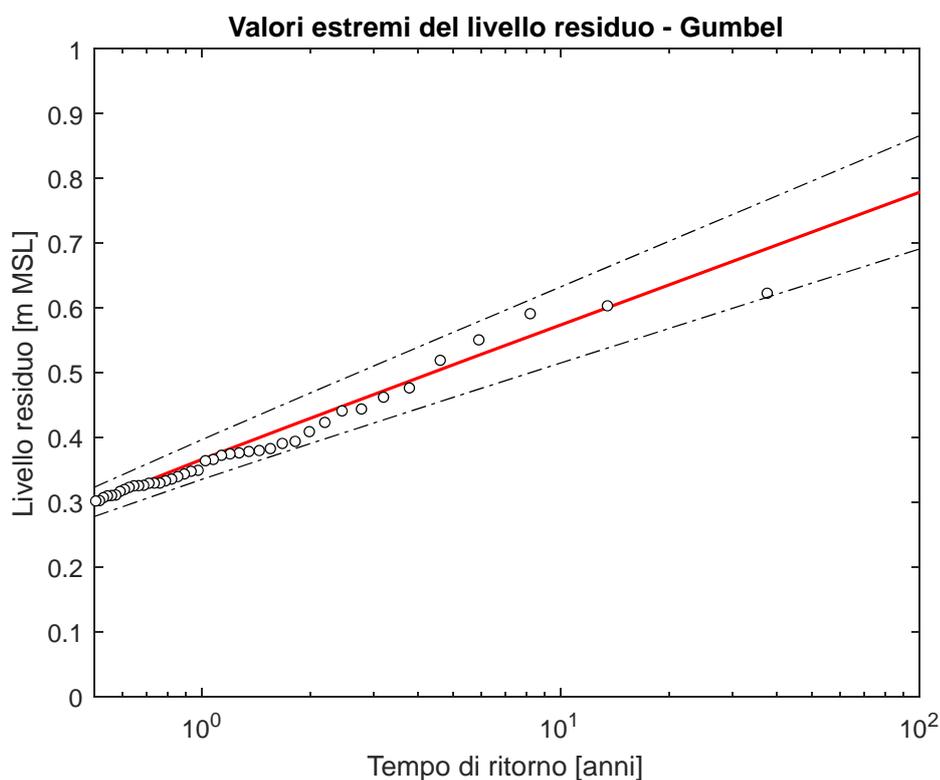


FIGURA 12-5. ANALISI STATISTICA DEI VALORI MASSIMI MENSILI DI LIVELLO RESIDUO (BLOCK MAXIMA) OSSERVATI ALLA STAZIONE MAREOGRAFICA RMN DI GENOVA (PERIODO DI RIFERIMENTO 1998-2018). I LIVELLI SONO RIFERITI AL LIVELLO MEDIO MARE (MSL)

**Studio delle condizioni meteomarine**

Rev.01

Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

**TABELLA 12-2. VALORI DI LIVELLO RESIDUO ATTESI NEL PORTO DI GENOVA IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO. I LIVELLI SONO RIFERITI AL LIVELLO MEDIO MARE (MSL)**

Tr (anni)	Livello residuo (m MSL)
1	0.37
2	0.43
5	0.51
10	0.57
25	0.66
50	0.72
100	0.78
250	0.86

**12.3 Tavole di marea I.I.M.M.**

Si riportano di seguito le costanti armoniche, ampiezza H e fase g, riportate dall'Istituto Idrografico della Marina per il porto di Genova. La tabella riporta inoltre il valore del parametro  $Z_0$  che indica la differenza tra il livello medio mare e il livello di riferimento degli scandagli (Chart Datum).

PORTO	Coordinate Geografiche		Costanti armoniche H in centimetri - g in gradi											$Z_0$ (m)
	Lat. °N	Lon. °E		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>	M <sub>S4</sub>		
GENOVA	44° 24'	8° 54'	H	8.5	3.3	1.7	0.9	3.6	1.6	1.2	0.6	0.4	0.15	
			g°	251	268	235	268	201	118	201	038	100		

### 13 CORRENTI

La circolazione generale nel Mar Mediterraneo è determinata dalle seguenti cause:

- le correnti di densità (circolazione termoalina) indotte dai gradienti della densità dell'acqua marina la quale è influenzata: (i) dalle variazioni stagionali della temperatura superficiale del mare e della salinità (bilancio tra evaporazioni, precipitazioni e afflussi fluviali); (ii) gli scambi con l'Oceano Atlantico (attraverso lo stretto di Gibilterra), con il Mar Rosso (attraverso il Canale di Suez) e con il Mar Nero (attraverso il Bosforo);
- la propagazione dell'onda di marea astronomica;
- le maree meteorologiche indotte dall'azione del vento e dai gradienti di pressione atmosferica.

Per quanto riguarda la circolazione termoalina, un quadro generale delle correnti superficiali nel mar Ligure può essere desunto dall'*Atlante delle correnti superficiali dei mari d'Italia* redatto dall'Istituto Idrografico della Marina Italiana di cui si riporta un estratto in Figura 13-1 relativo ai mesi di Gennaio e Luglio.

Le correnti superficiali presentano una circolazione antioraria con intensità variabile nel corso dell'anno da un minimo di 0.3 nodi (circa 0.15 m/s) ad un massimo di 1.0 nodo (circa 0.5 m/s).

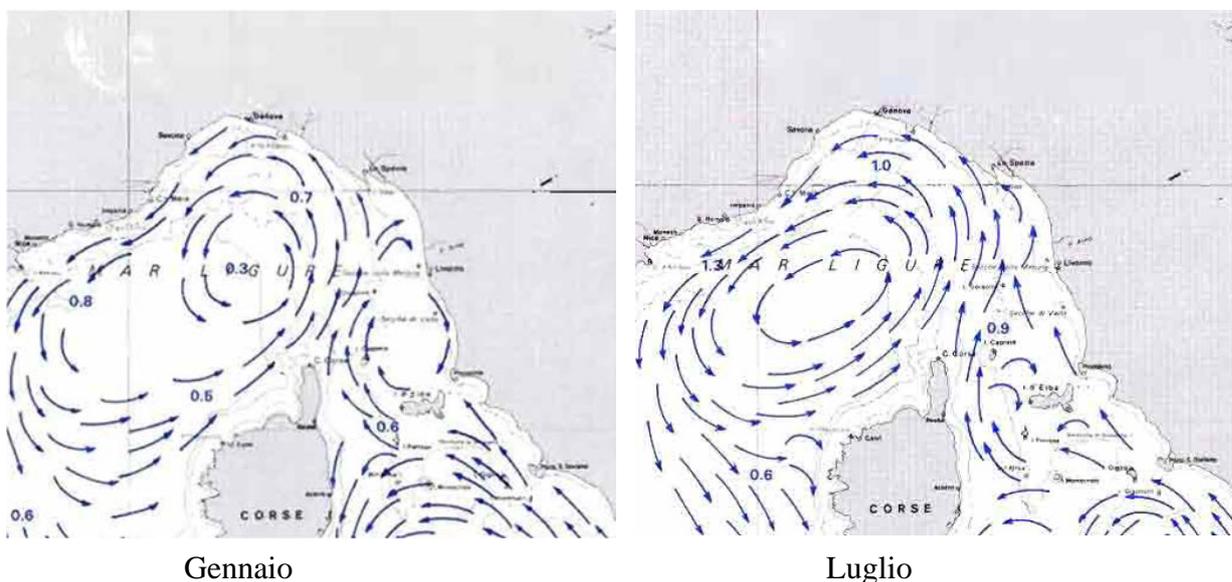


FIGURA 13-1. CARTE DELLE CORRENTI SUPERFICIALI PER I MESI DI GENNAIO E LUGLIO. ESTRATTE DALLA PUBBLICAZIONE 3068 "ATLANTE DELLE CORRENTI SUPERFICIALI DEI MARI D'ITALIA" REDATTA DALL'ISTITUTO IDROGRAFICO DELLA MARINA ITALIANA.

Il Servizio Europeo di Monitoraggio dell'Ambiente Marino (Marine Environment Monitoring Service - CMEMS) è una parte del Programma Europeo Copernicus finalizzato all'osservazione del pianeta (mari, atmosfera, terra), il monitoraggio del cambiamento climatico e il supporto per i servizi di emergenza e di sicurezza.

Dal database CMEMS sono stati presi in esame i dati del "Mediterranean Sea Physical Reanalysis (CMEMS MED-Physics)<sup>6</sup>" che forniscono i valori medi mensili della corrente marina ricostruita con un modello idrodinamico con risoluzione spaziale pari  $1/16^\circ$  (circa 6-7 km) con 72 livelli verticali.

A titolo di esempio in Figura 13-2 e in Figura 13-3 sono mostrati i campi di velocità media della corrente superficiale per i mesi di Gennaio 2018 e Luglio 2018 che confermano una circolazione superficiale anticiclonica di intensità compresa tra 0.1 e 0.5 m/s.

Da osservare che l'intensità della corrente superficiale tende a ridursi sensibilmente avvicinandosi alla costa.

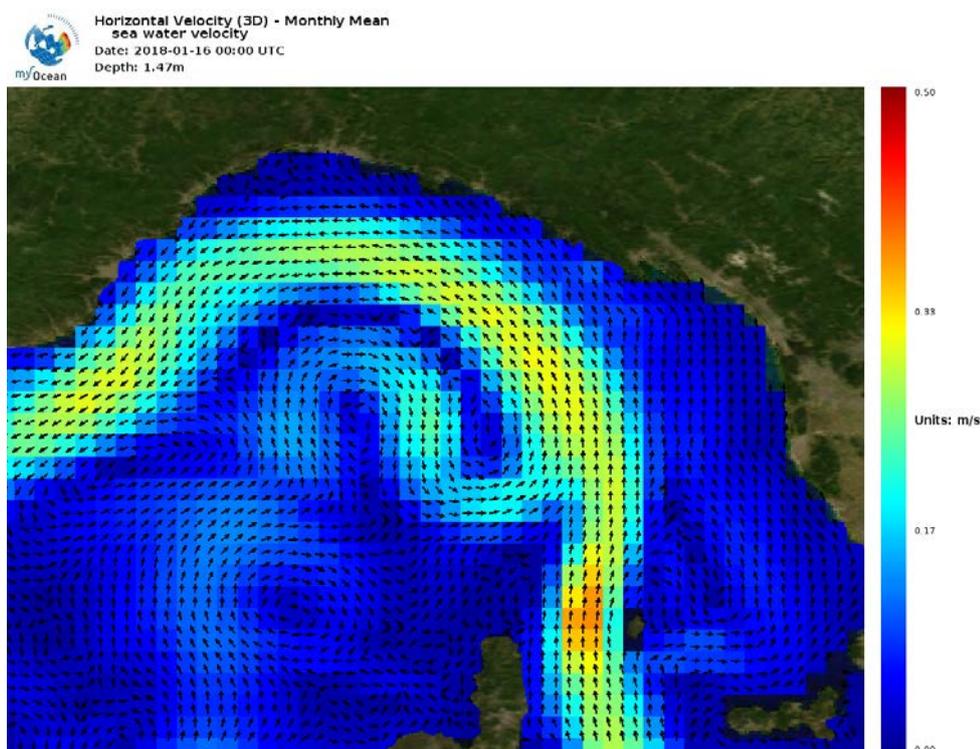


FIGURA 13-2. VALORE MEDIO DELLA CORRENTE SUPERFICIALE RICOSTRUITA PER IL MESE DI GENNAIO 2018.

<sup>6</sup> Citation: Simoncelli, S., Fratianni, C., Pinardi, N., Grandi, A., Drudi, M., Oddo, P., & Dobricic, S. (2019). Mediterranean Sea Physical Reanalysis (CMEMS MED-Physics) [Data set]. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS).  
[https://doi.org/10.25423/MEDSEA\\_REANALYSIS\\_PHYS\\_006\\_004](https://doi.org/10.25423/MEDSEA_REANALYSIS_PHYS_006_004)

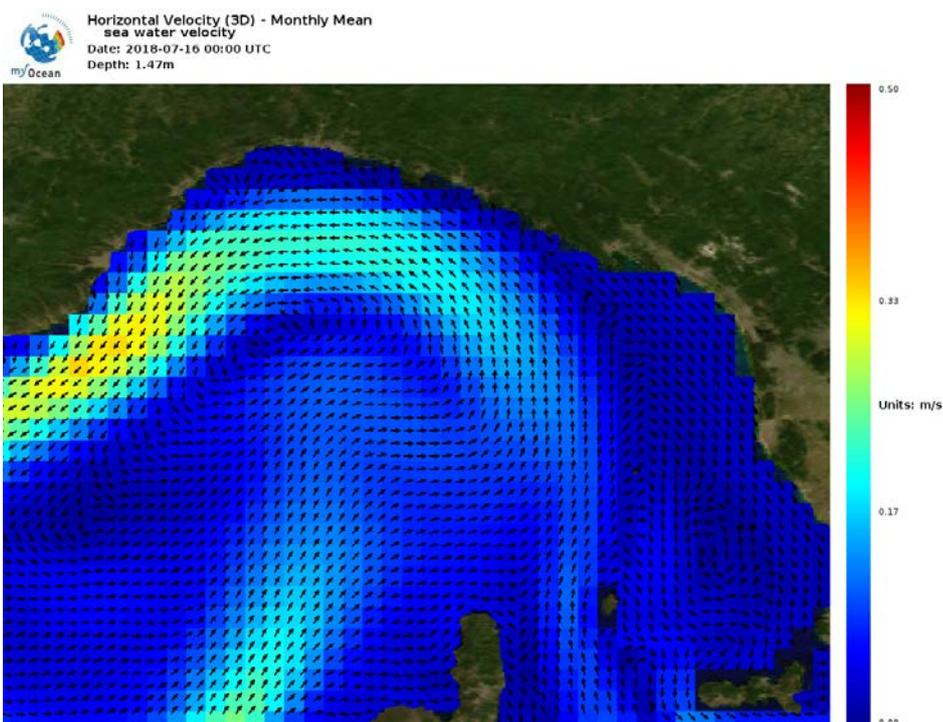


FIGURA 13-3. VALORE MEDIO DELLA CORRENTE SUPERFICIALE RICOSTRUITA PER IL MESE DI LUGLIO 2018.

Per quanto riguarda la propagazione dell'onda di marea astronomica, la conformazione batimetrica del sito in esame determina una limitata escursione dei livelli di marea astronomica e di conseguenza delle correnti ad essa associata.

Per il sito in esame e in prossimità delle opere portuali del Porto di Genova, le correnti di maggiore interesse ai fini della manovrabilità delle navi sono costituite da quelle indotte dall'azione del vento. Tali correnti sono influenzate oltre che dall'azione del vento anche dalla morfologia della costa, dei fondali e delle opere portuali, potendo quindi modificarsi in relazioni ad eventuali variazioni della conformazione planimetrica delle stesse opere portuali.

La revisione degli studi eseguiti nel passato, riportata all'inizio del presente rapporto, ha evidenziato che purtroppo non sono disponibili misure di corrente eseguite in prossimità dell'imboccatura di levante del Porto di Genova.

Le uniche misure di corrente sono state eseguite in corrispondenza della Piattaforma Isola, localizzata a Sud-Sud-Ovest della testata di ponente della diga posta a protezione della pista dell'aeroporto su fondali di circa -50 m sul l.m.m., e in corrispondenza del relitto della Haven a Sud-Sud-Est di Arenzano su fondali di circa -70 m sul l.m.m.

Le analisi di queste misure eseguite da D'Appollonia (2008)<sup>7</sup> per conto dell'Autorità Portuale di Genova hanno evidenziato che le correnti di marea sono deboli e che in prossimità della costa le correnti sono indotte prevalentemente dall'azione del vento. La direzione di queste correnti segue in generale la conformazione della costa e dei fondali. Per tale ragione si è deciso di approfondire questo aspetto sviluppando uno studio numerico di cui si tratta in un apposito documento.

---

<sup>7</sup> Doc. No. 07-578-H1, Aprile 2008, Studio Meteomarino eseguito per il progetto "Ipotesi di Riutilizzo dello Smarino della Gronda" per conto della ex Autorità Portuale di Genova, nell'ambito del quale sono riportate le analisi delle misure correntometriche disponibili per il sito di Genova.

## 14 CAMBIAMENTI CLIMATICI

È noto che le analisi statistiche dei vari fenomeni meteomarini 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 ed 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 al regime dei venti e delle onde nei diversi mari ed oceani.

### 14.1 Variazioni a lungo termine dei livelli del mare a Genova

Come illustrato nel cap. 12, le variazioni del livello marino a Genova sono molto modeste. Esse risultano peraltro misurate da lungo tempo (oltre un secolo) dal locale mareografo. Sono quindi ben note le variazioni storiche a lungo termine, che risultano peraltro legate ai soli fenomeni eustatici, essendo l'area di Genova non soggetta a fenomeni di subsidenza. 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" afferente alle Nazioni Unite (ONU), in relazione a possibili scenari sulle emissioni di anidride carbonica: lo scenario più ottimista è denominato RCP 2.6<sup>8</sup>, mentre quello più pessimista RCP8.5. La Figura 14-1 mostra la previsione di innalzamento del livello del mare per il nostro secolo fornita da 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.

---

<sup>8</sup> *Representative Concentration Pathways*, RCP andamento rappresentativo delle concentrazioni dei gas a effetto serra con ulteriore forzante radiativo espresso in W/m<sup>2</sup> alla fine del secolo. Esempio RCP 2.6 = ulteriore forzante radiativo di 2,6 W/m<sup>2</sup> alla fine del secolo.

La previsione 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).

Per quanto riguarda specificatamente il sito costiero di Genova si può fare riferimento al recente studio di Vecchio et al. 2019 che fornisce per il 2100 una previsione di innalzamento del livello medio mare compresa tra 0.34m (+/-0.31m) e 0.58 m (+/-0.35m) a seconda degli scenari suddetti. I valori tra parentesi rappresentano le bande di confidenza al 90% (vedi Figura 14-1).

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.

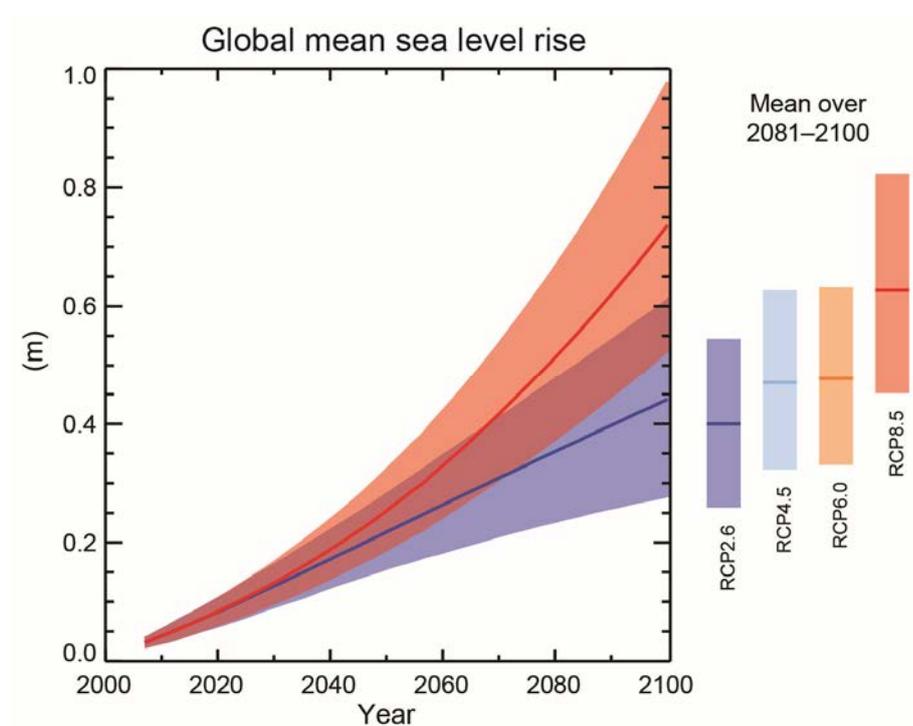


FIGURA 14-1. PREVISIONE PER IL GLOBAL SEA LEVEL RISE FORNITA DALL'IPCC.

**Studio delle condizioni meteomarine**

Rev.01 Data: Giugno 2021

El. MI046R-PF-D-I-R-020-01

Tide Gauge Station (Duration)	Sea Level (mm) RCP2.6		Sea Level (mm) RCP8.5	
	2050	2100	2050	2100
Marseille 1888–2009 (128 years)	182 ± 79	364 ± 167	208 ± 79	602 ± 240
Trieste 1901–2009 (138 years)	142 ± 82	336 ± 197	150 ± 86	523 ± 237
Genova 1931–1992 (92 years)	163 ± 150	337 ± 306	193 ± 156	581 ± 347

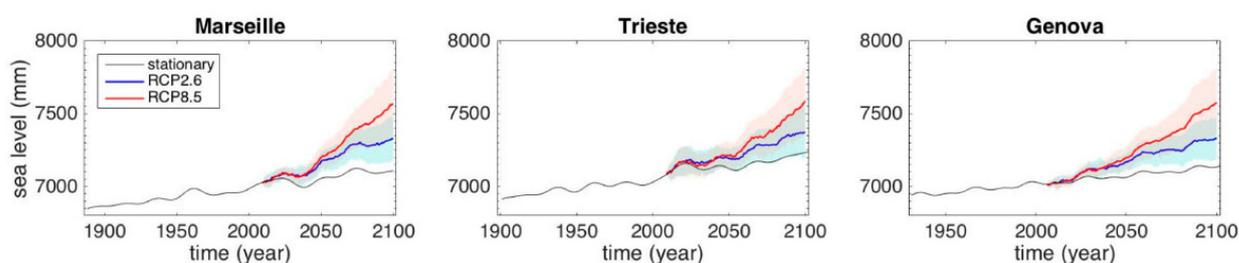
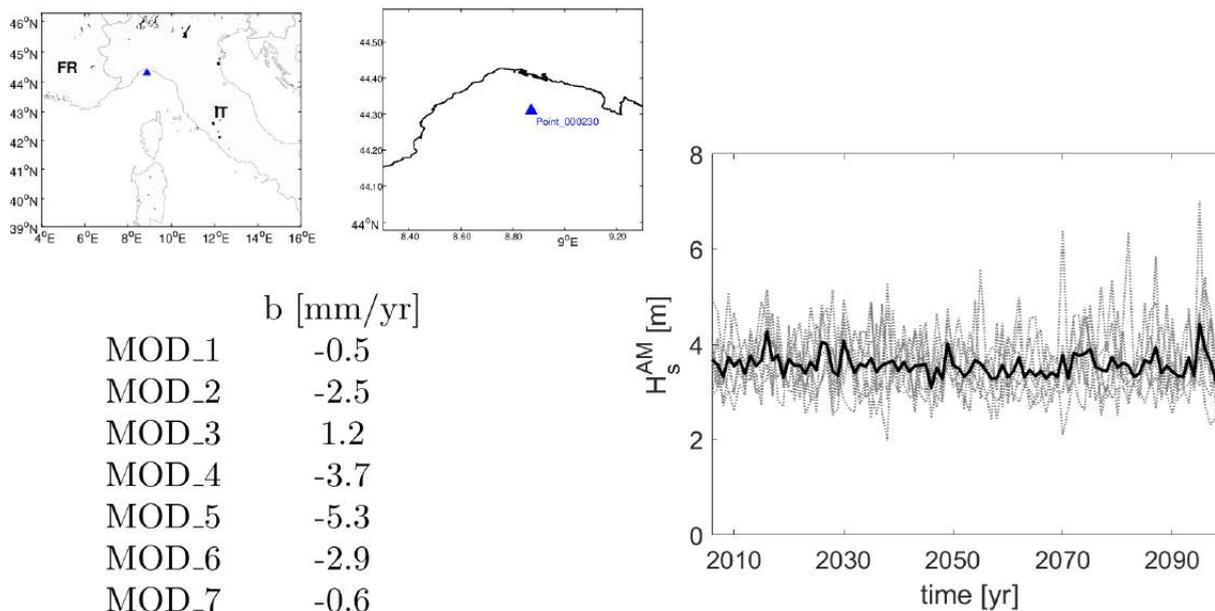


FIGURA 14-2. PREVISIONI MINIME E MASSIME DELL'INNALZAMENTO DEL MARE A MARSIGLIA, TRIESTE E GENOVA (DA VECCHIO ET AL. 2019)

### 14.2 Variazioni a lungo termine delle onde estreme a Genova

Come detto le previsioni sulle future variazioni delle probabilità di occorrenza di tempeste e mareggiate estreme sono molto incerte e complesse, in quanto legate alla frequenza, durata ed intensità dei venti ciclonici sul mare. Svitati studi oceanografici hanno evidenziato trend molto diversi e contrapposti nei diversi mari del mondo.

Per quanto riguarda il mar Mediterraneo ed il mar Ligure in particolare è stato effettuato recentemente uno studio statistico da Besio et al. 2019, che si proietta fino al 2100, e mostra una sostanziale stabilità del regime ondometrico, con una lieve riduzione (18 cm) della altezza d'onda significativa estrema (v. Figura 14-3).



- $b \simeq -2\text{mm/yr}$

- $\Delta H_s \simeq -18\text{cm}$

- $b \simeq -1.6\text{mm/yr}$

- $\Delta H_s \simeq -15\text{cm}$

FIGURA 14-3. STIMA DELLA VARIAZIONE DI  $H_s$  AL 2100 DOVUTA AI POSSIBILI CAMBIAMENTI CLIMATICI IN UN PUNTO AL LARGO DI GENOVA EFFETTUATA DAL DICCA DI GENOVA. (FONTE: TRENDS AND VARIABILITY OF WAVES UNDER SCENARIO RCP8.5 IN THE MEDITERRANEAN SEA - G.BESIO, L.MENTASCHI, F. DE LEO - 12<sup>nd</sup>INTERNATIONAL WORKSHOP ON WAVES, STORM SURGES AND COASTAL HAZARDS)

## **Bibliografia**

*Analisi statistica dei dati storici di vento registrati dalle stazioni anemometriche.* Progetto dell'Unione Europea VENTO E PORTI, La previsione del vento per la gestione e la sicurezza delle aree portuali. 2011

Mentaschi, Lorenzo & Besio, Giovanni & Cassola, Federico & Mazzino, A.. (2015). *Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea.* Ocean Modelling.

Mentaschi L., Besio G., Cassola F. & Mazzino A. (2014). *Un modello di re-analisi del moto ondoso nel Mediterraneo: prestazioni ed affidabilità.* Atti XXXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, pp. 397-398, Bari, 8-10 Settembre.

Sartini, L., Mentaschi, L. & Besio, G. (2014). *How an optimized meteocean modelling chain provided 30 years of wave hindcast statistics: the case of the Ligurian Sea.* In: Proc. of XXXIV International Conference on Coastal Engineering, Seoul, South Korea, 15-20 June.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F. & Mazzino, A. (2013). *Improving wave model validation based on RMSE.* 13th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazards, Banff, Canada, 28 October - 1 November.

Mentaschi L., Besio G., Cassola F. & Mazzino A., (2013). *Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea.* Journal of Coastal Research, SI 65, pp 1551-1556, JCR 65

P. De Girolamo, M. Di Rasio, G.M. Beltrami, G. Bellotti, D. Pasquali, *The use of wave forecasts for maritime activities safety assessment*, Applied Ocean Research, Volume 62, 2017.

AA.VV., *Ingegneria dei trasporti navali*, Edizioni EGAF, Ottobre 2019

Goda, Y. , *Random Seas and Design of Maritime Structures.* Advanced Series on Ocean Engineering. 2000

Giovanni Braca, Martina Bussettini, Barbara Lastoria, Stefano Mariani

ISPRA – Dipartimento Tutela delle Acque Interne e Marine – Servizio Monitoraggio e Idrologia delle Acque Interne – Settore Idrologia. *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici*. 2013

A.Vecchio, M.Anzidei, F.Serpelloni, F.Florindo, *Natural variability and vertical land motion in the Mediterranean sea-level records over the last two centuries and projections for 2100*. Water 2019

Giovanni Besio, Lorenzo Mentaschi & Francesco DeLeo *Trends and variability of waves under scenario RCP8.5 in the Mediterranean sea*, International Workshop on Waves, Storm Surges and Coastal Hazards, 2019

ENEL Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale

*Studio del moto ondoso lungo la costa tirrenica*

Rapporto Ondametri Anno 1978 - SI-493/79 - Luglio 1979

Rapporto Ondametro Genova Nervi Anno 1979 - SI-532/80 - Settembre 1980

Rapporto Ondametro Genova Nervi Anno 1982 - SI-621/83 - Febbraio 1983

**APPENDICE A****CONFRONTO TRA I DATI DI MOTO ONDOSO IN RICOSTRUZIONE  
COPERNICUS ERA5 E I DATI IN RICOSTRUZIONE DEL DICCA AL LARGO  
DI GENOVA**

La presente appendice allo studio meteomarino riporta le analisi aggiuntive svolte sui dati di moto ondoso in ricostruzione ERA5, resi disponibili durante lo sviluppo del presente progetto dal Centro Meteorologico Europeo (ECMWF) nell'ambito del Programma Copernicus della Comunità Europea.

ERA5 è la quinta generazione di dati in rianalisi prodotta dall'ECMWF per l'analisi del clima e delle condizioni meteorologiche a scala globale relativa agli ultimi 4 decenni. Attualmente i dati ufficiali sono disponibili a partire dal 1979 in poi.

ERA5 fornisce i valori di numerosi parametri che descrivono le condizioni atmosferiche, le condizioni oceaniche e le condizioni sulla superficie terrestre con cadenza oraria. I dati vengono forniti utilizzando una griglia di discretizzazione regolare Lat-Lon di 0,25 gradi con cui vengono interpolati i risultati dei modelli utilizzati.

Il punto ERA5 preso in esame al largo del Golfo di Genova è indicato nella seguente figura dove è riportata anche la posizione del punto DICCA point 000323 utilizzato per definire le condizioni di moto ondoso a largo per il presente progetto. Come si evince dalla figura i due punti sono molto prossimi uno all'altro.

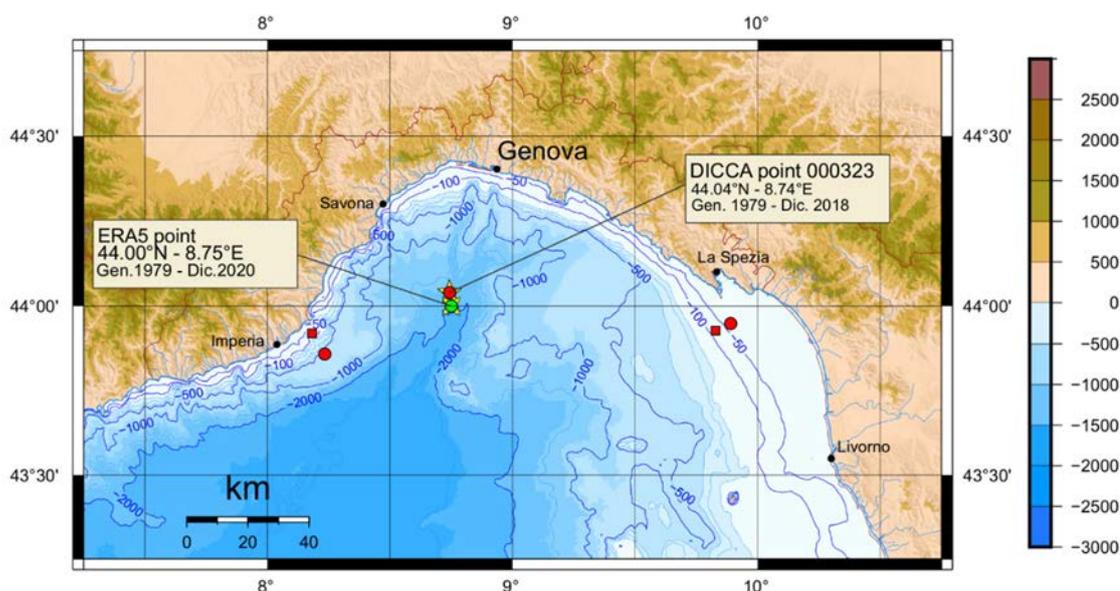


FIGURA A-1. PUNTI IN REANALISI ERA 5 E DICCA AL LARGO DI GENOVA.

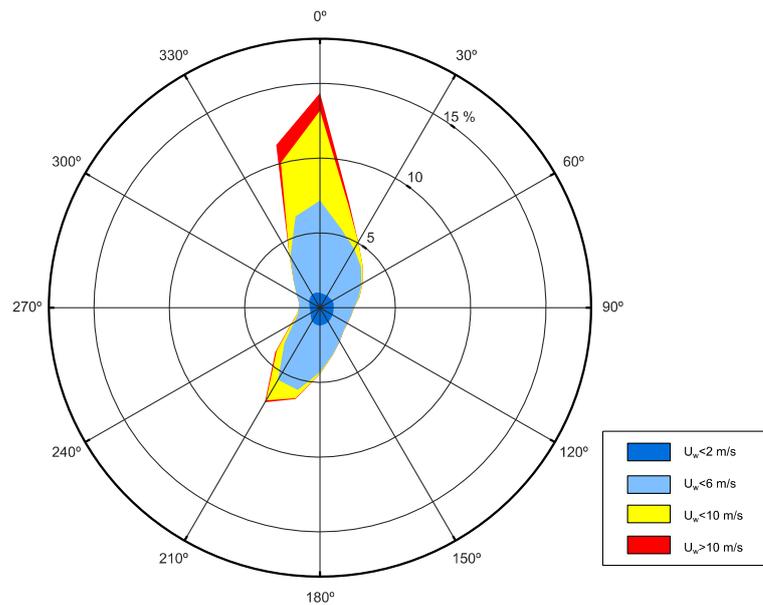


FIGURA A-2. REGIME DEI VENTI NEL PUNTO IN RIANALISI ERA5 AL LARGO DI GENOVA.

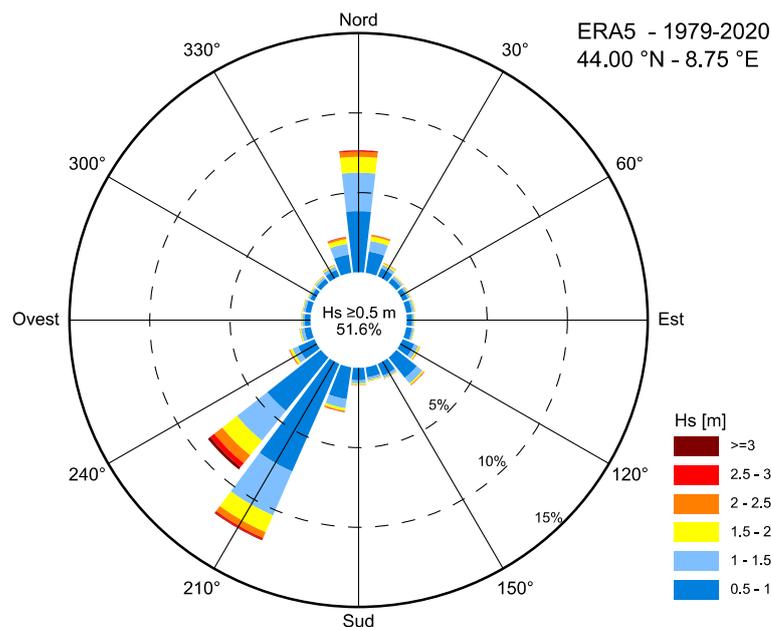


FIGURA A-3. REGIME DI MOTO ONDOSO NEL PUNTO IN RIANALISI ERA5 AL LARGO DI GENOVA.

Il regime dei venti e il regime annuale di moto ondoso, rappresentati nei diagrammi polari di figura A-2 e A-3, ottenuti dall'analisi dei dati ERA5 risultano coerenti con i risultati ottenuti dall'analisi dei forniti dal DICCA ma si osserva una sistematica sottostima sia dell'intensità dei venti che dell'altezza d'onda.

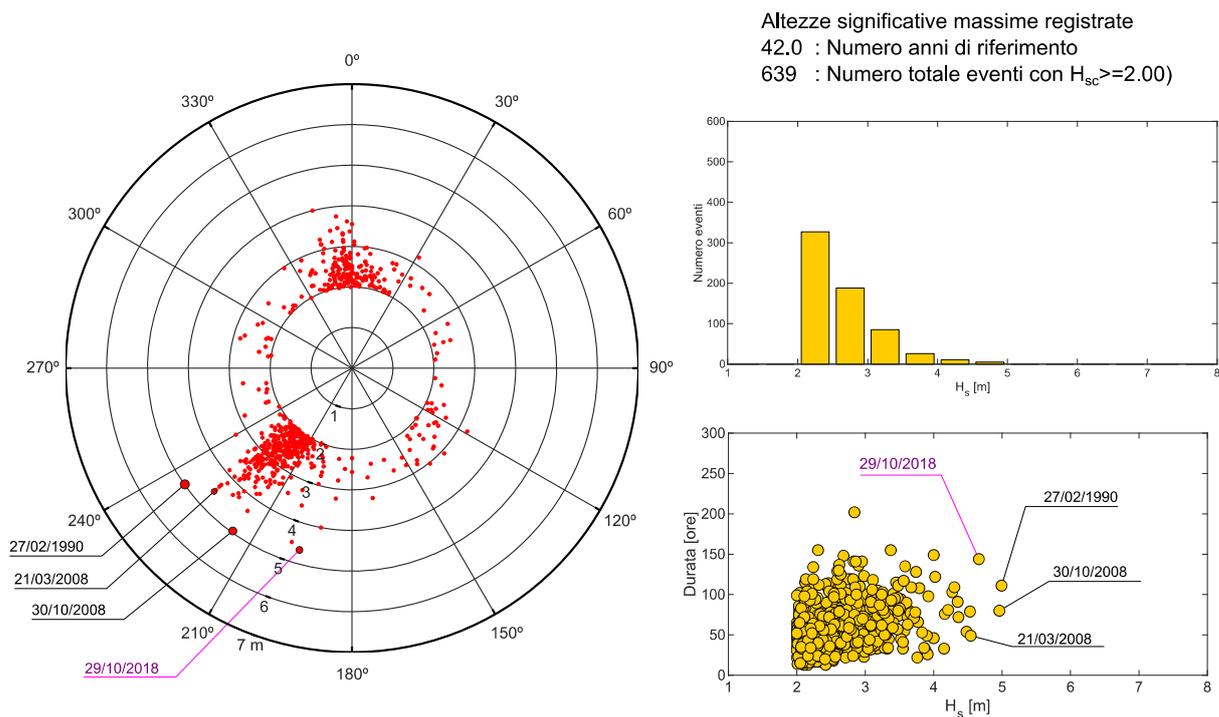


FIGURA A-4. DISTRIBUZIONE DELLE ALTEZZE D'ONDA MASSIME ASSOCIATE AGLI EVENTI DI MAREGGIATA FORNITI DA ERA5 (1979-2020) NEL PUNTO DI COORDINATE 44.00°N-8.75°E AL LARGO DI GENOVA.

Concentrando in questa sede l'attenzione sui valori di moto ondoso estremi, associati agli eventi di mareggiata (vedi figura A-4), si è proceduto ad effettuare un "confronto asincrono" con i valori forniti dal DICCA secondo le metodologie già illustrate in precedenza al Capitolo 7.

La metodologia di "confronto asincrono" è di interesse per valutare la correlazione tra valori di altezza d'onda al colmo delle mareggiate provenienti da fonti diverse (misure ondometriche, modelli in rianalisi) e può essere applicata per effettuare una calibrazione dei dati in ricostruzione forniti dai modelli di generazione e propagazione del moto ondoso. Questa tecnica di confronto si basa sul concetto che le differenze osservate tra due diverse misure, valutate nello stesso istante (errore sincrono), risentono spesso di un errore legato alla tempistica (timing) con cui viene ricostruito l'evento meteomarinario.

Tale errore può essere ridotto facendo ricorso al confronto asincrono, ovvero confrontando i valori di  $H_s$  al culmine delle mareggiate i quali possono avvenire anche in tempi diversi, purché appartenenti allo stesso evento estremo. L'applicazione di questa tecnica consente di confrontare, ed eventualmente calibrare, i dati di moto ondoso provenienti da due fonti diverse. Per ulteriori approfondimenti sull'argomento si veda De Girolamo e altri (2017). Seguendo questo approccio sono state dapprima identificate le principali mareggiate avvenute nel periodo 1979-2018 (periodo coperto da entrambi i database) per entrambe

le due serie storiche di moto ondoso ricostruite in rianalisi al largo di Genova. Per ciascun evento sono state quindi individuate le condizioni di moto ondoso, in termini di Hs, al culmine della mareggiata.

Come già detto si ribadisce che i valori al colmo delle mareggiate selezionati per il confronto sono riconducibili agli stessi eventi meteomarini, ma non sono necessariamente sincroni.

Nella tabella seguente sono riportati a titolo di esempio i 10 eventi di mareggiata più elevati ricostruiti al largo di Genova dal DICCA e da ERA5. I dati sono ordinati in ordine decrescente prendendo a riferimento i valori di Hs al colmo ricostruiti dal DICCA. La tabella riporta inoltre la data e l'orario del colmo di mareggiata e la direzione di provenienza.

TABELLA A-1. VALORI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA HS E DIREZIONE DI PROVENIENZA AL COLMO DEGLI EVENTI DI MAREGGIATA PIÙ ELEVATI RICOSTRUITI AL LARGO DI GENOVA DAL DICCA E DA ERA5.

DICCA point 00323			ERA5		
Data	Hs (m)	Dir	Data	Hs (m)	Dir
21/03/2008 18:00	6.15	224	21/03/2008 21:00	4.54	228
29/10/2018 23:00	5.93	217	29/10/2018 23:00	4.66	196
28/12/1999 05:00	5.63	226	28/12/1999 11:00	4.30	228
16/12/2011 17:00	5.51	221	16/12/2011 16:00	4.35	216
20/11/2015 22:00	5.18	227	21/11/2015 04:00	3.02	226
11/01/2016 22:00	5.15	228	12/01/2016 05:00	3.56	230
30/10/2008 05:00	5.13	210	30/10/2008 06:00	4.96	216
26/02/1989 10:00	5.05	221	26/02/1989 04:00	4.02	221
20/02/2002 21:00	5.01	226	21/02/2002 04:00	2.96	227
11/12/2017 16:00	5.01	199	11/12/2017 21:00	4.53	199

Nella seguente figura A-5 è riportato il confronto asincrono tra i valori al colmo delle mareggiate selezionate. In ordinata sono riportati i valori di Hs forniti da ERA5, mentre in ascissa i corrispondenti valori di Hs forniti dal DICCA. A seguito dell'analisi condotta è possibile riscontrare una generale sottostima dei valori di ERA5 rispetto a quelli forniti dal DICCA che, essendo prodotti con un modello di dettaglio a scala del bacino del Mar Mediterraneo, e essendo stati oggetto di analisi di validazione e calibrazione basate sul

confronto con misure di moto ondoso dirette effettuate da ondametri, rappresentano una validissima fonte di dati di moto ondoso per il sito in esame.

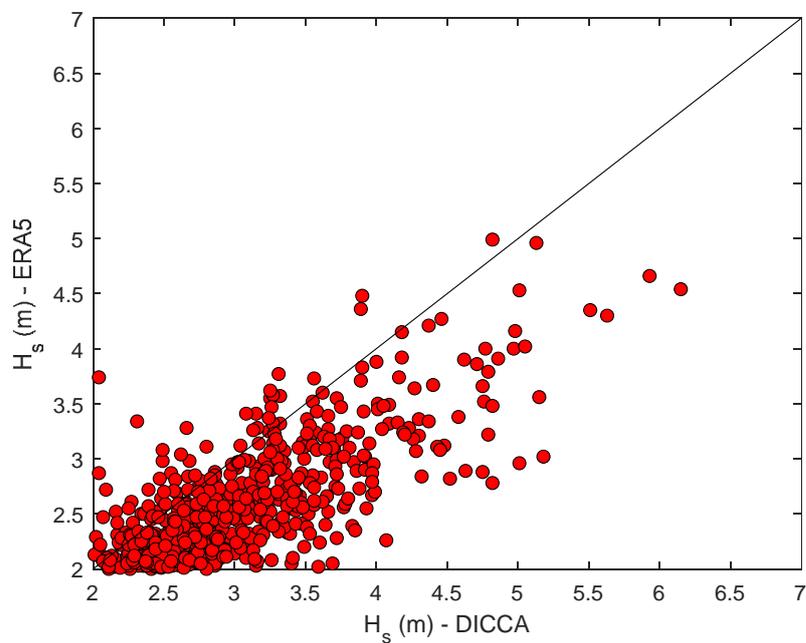


FIGURA A-5. CONFRONTO ASINCRONO TRA I VALORI DI  $H_s$  AL COLMO DELLE MAREGGIATE RICOSTRUITE DAL DICCA E DA ERA5

**APPENDICE B****RICOSTRUZIONE DELLA MAREGGIATA DEL FEBBRAIO 1955**

Tra il 18 e il 20 Febbraio 1955 una forte depressione barica localizzata sull'Europa centrale (con minimo di circa 985 mb) ha generato forti venti da Libeccio su tutto il bacino del Mar Mediterraneo Occidentale (vedi figura B-1).

Il 19 Febbraio 1955 una violenta mareggiata da Libeccio si abbatte sul litorale genovese provocando ingenti danni alle strutture portuali del porto di Genova, in particolare nel bacino di Sampierdarena, dove un tratto della diga foranea di circa 400 m viene abbattuto.

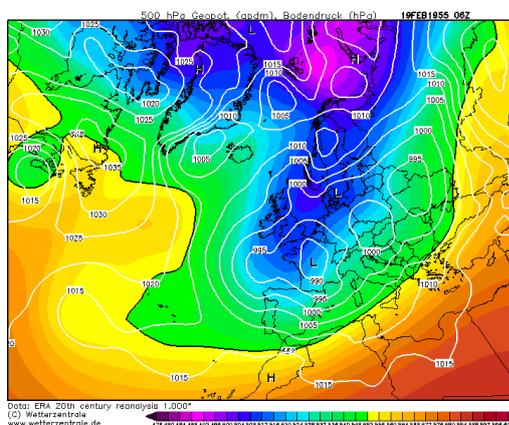


FIGURA B-1. ALTEZZA GEOPOTENZIALE IN REANALISI FORNITA DAL CENTRO METEOROLOGICO EUROPEO ECMWF PER IL 19 FEBBRAIO 1955 ALLE ORE 6:00

Per tale evento non si dispone di misure di moto ondoso e pertanto non è possibile risalire con certezza al valore di altezza d'onda a ridosso della diga foranea ne tantomeno al tempo di ritorno associato a tale evento.

Per una prima stima del valore di altezza d'onda significativa al largo di Genova verificatosi in occasione della mareggiata del 19 Febbraio 1955 è stata applicata una metodologia di ricostruzione del moto ondoso, basata sull'utilizzo di modelli numerici di generazione e propagazione del moto ondoso.

I recenti sviluppi nel campo della modellazione numerica consentono di disporre dei dati in ricostruzione di pressione, temperatura e vento anche per eventi avvenuti nel secolo scorso. Il progetto NCEP / NCAR Reanalysis 1<sup>9</sup>, dell'agenzia meteorologica statunitense NOAA, sta utilizzando un sistema di analisi all'avanguardia, basato sui dati meteorologici archiviati dal 1948 ad oggi, per effettuare una ricostruzione della circolazione atmosferica a scala globale.

<sup>9</sup> NCEP Reanalysis data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Sfruttando le capacità del modello generazione e propagazione SWAN, utilizzando come forzante il campo di vento fornito dal NCEP, sono state condotte delle simulazioni finalizzate alla ricostruzione del moto ondoso per l'evento del Febbraio 1955.

Dal database del NCEP sono stati acquisiti i dati di vento alla quota +10 m s.l.m. per il periodo che si estende dal 16 al 21 Febbraio 1955. I dati sono forniti su una griglia sferica regolare avente un passo di circa 2° (circa 170 km alla latitudine di 40°) ad intervalli di 6 ore e pertanto hanno un livello di accuratezza piuttosto scarso.

Le simulazioni con il modello SWAN sono state condotte utilizzando un dominio di calcolo esteso a tutto il bacino occidentale del Mar Mediterraneo discretizzato con una griglia regolare avente una risoluzione spaziale di 6' (circa 10 km). La simulazione è stata condotta in condizioni non stazionarie, con passo temporale di un'ora partendo da una condizione iniziale di calma.

I risultati, riportati da Figura A-2 a Figura A-5 nelle pagine a seguire, mostrano l'evoluzione del campo di vento sul bacino occidentale del Mediterraneo e il conseguente campo di altezza d'onda significativa ottenuto con il modello SWAN tra la mezzanotte del 17 e le 21 del 20 Febbraio ad intervalli di 6 ore.

I risultati, in termini di altezza significativa  $H_s$ , periodo di picco  $T_p$  e direzione di propagazione, ottenuti nel punto di coordinate 44.04°N, 8.74°E al largo di Golfo di Genova, coincidente con il punto di analisi DICCA al largo, sono mostrati in Figura A-6.

Al colmo della mareggiata, verificatasi alle ore 16:00 del giorno 19 Febbraio, si è ottenuto uno stato di mare con  $H_s = 6.0$  m,  $T_p = 12$  s e direzione di propagazione 240°N.

Dalle cronache del tempo si è appreso che il crollo della diga è avvenuto alle 15:45. La ricostruzione effettuata mostra in tal senso un buon accordo.

Il valore di altezza d'onda  $H_s$  ottenuto al colmo fornisce un ordine di grandezza della mareggiata. Non potendo effettuare calibrizioni, sulla velocità del vento  $U_w$  e su  $H_s$ , rimane un certo grado di incertezza per la stima effettuata.

Applicando a tale valore di  $H_s$  il coefficiente di calibrizione, pari a 1.16, ottenuto dal confronto asincrono tra i valori estremi ricostruiti dal DICCA e i valori estremi registrati dalla boa ondometrica di La Spezia, si ottiene:

$$H_{sc} = 1.16 \times H_s = 1.16 \times 6.0 \text{ m} = 7.00 \text{ m}$$

Tale valore risulta congruente con l'analisi dei valori estremi di moto ondoso effettuata al largo di Genova sulla base della quale è possibile assegnargli un tempo di ritorno di circa 25 anni.

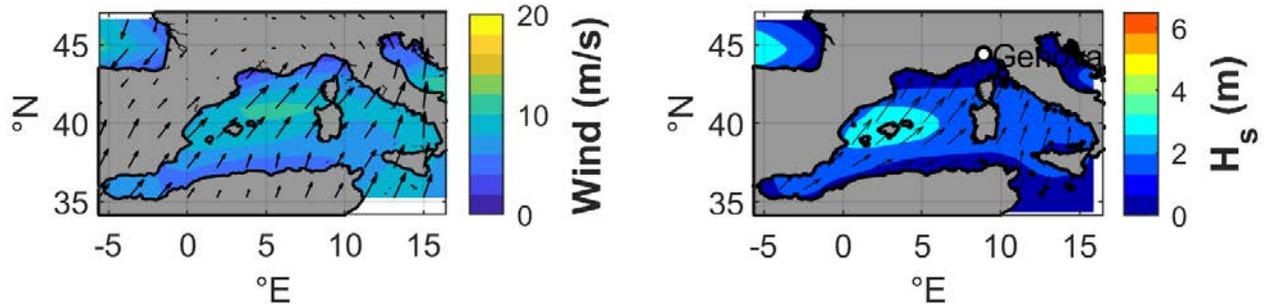
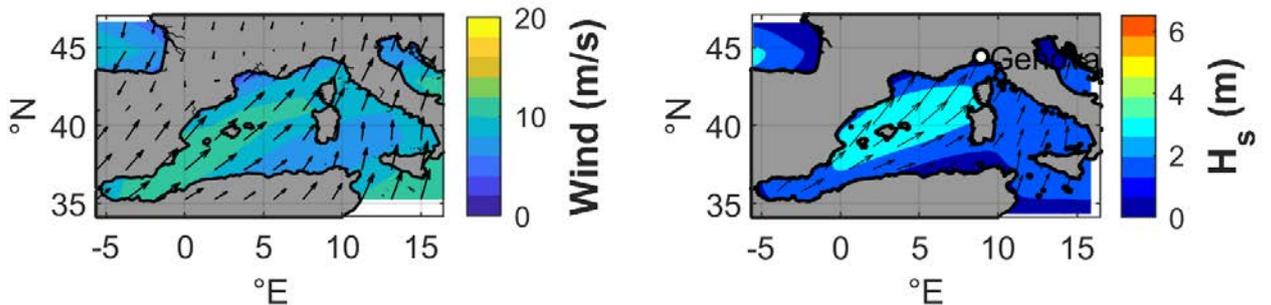
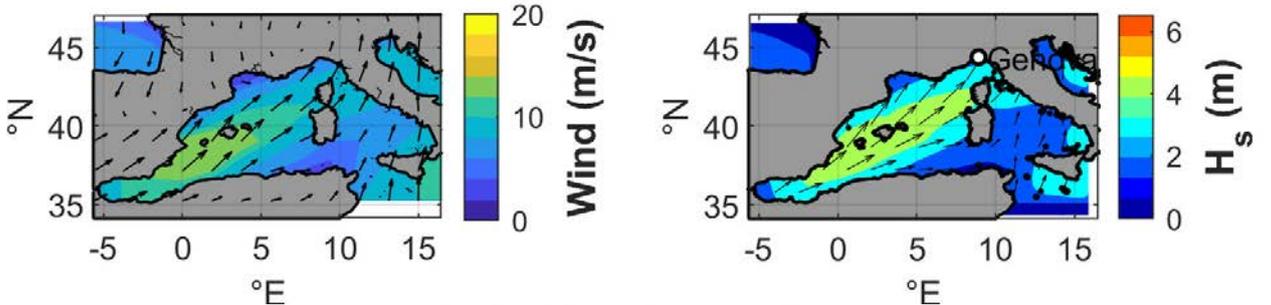
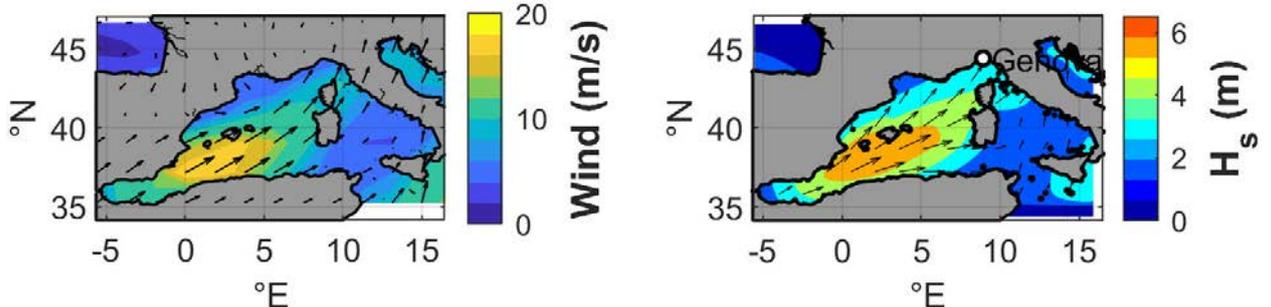
**1955/2/17 00:00:00****1955/2/17 06:00:00****1955/2/17 12:00:00****1955/2/17 18:00:00**

FIGURA B-2. CAMPI DI VENTO E DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  OTTENUTI A SEGUITO DELLA SIMULAZIONE CON IL MODELLO SWAN PER IL GIORNO 17 FEBBRAIO 1955

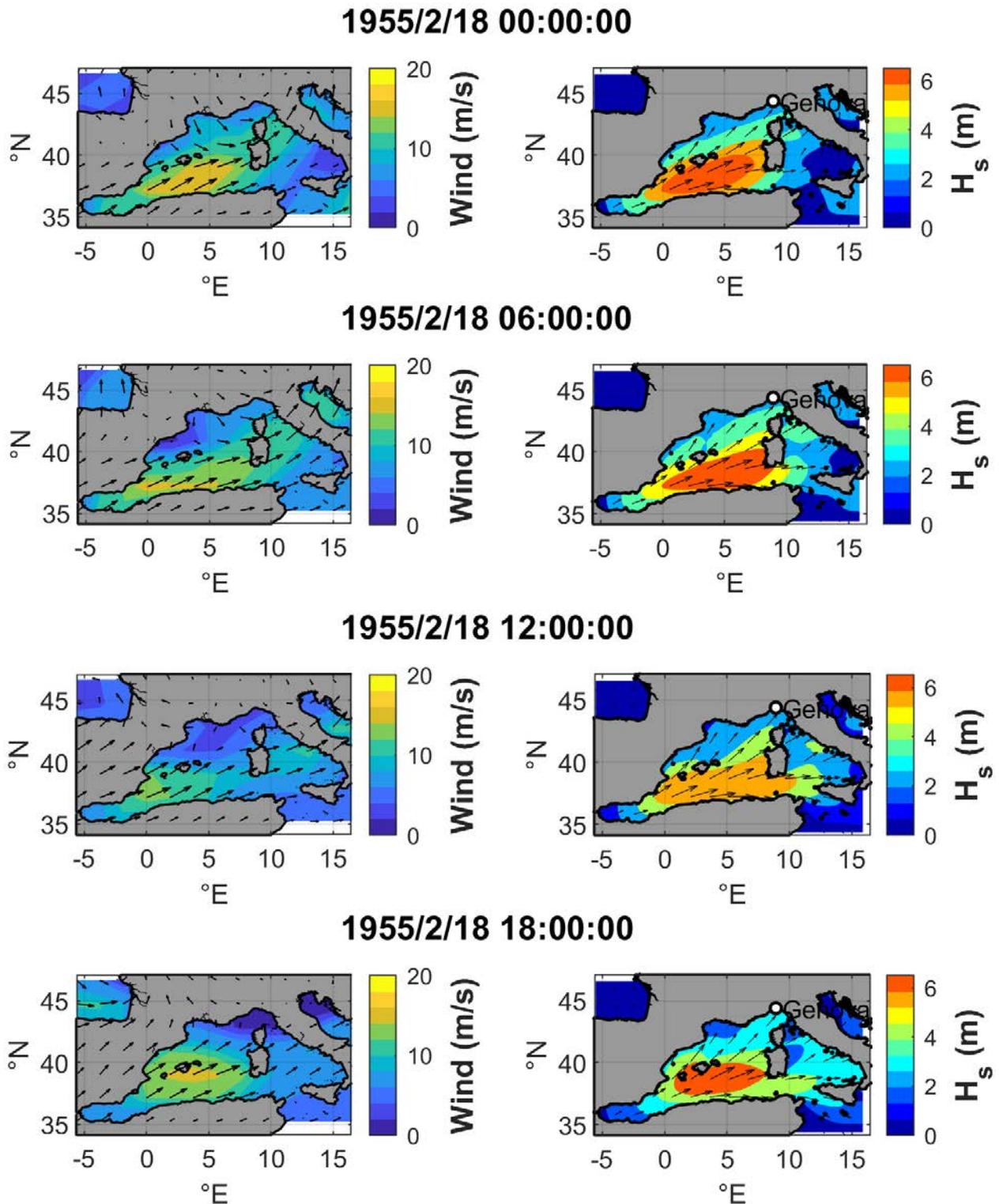


FIGURA B-3. CAMPI DI VENTO E DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  OTTENUTI A SEGUITO DELLA SIMULAZIONE CON IL MODELLO SWAN PER IL GIORNO 18 FEBBRAIO 1955

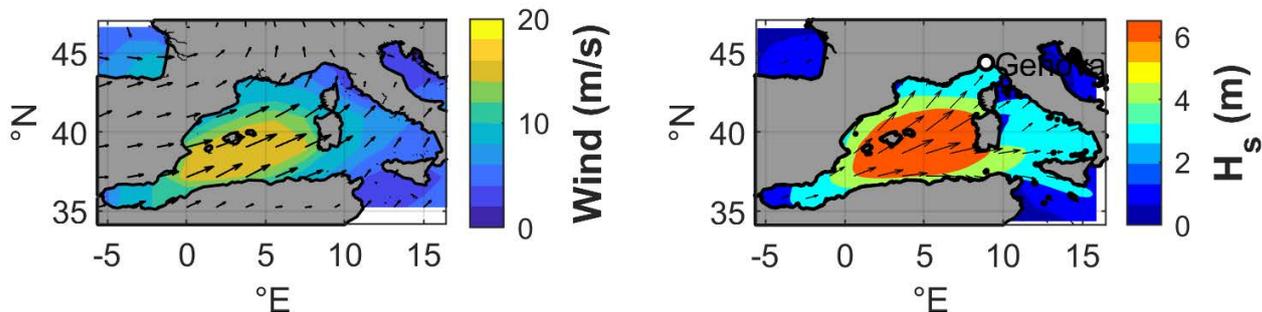
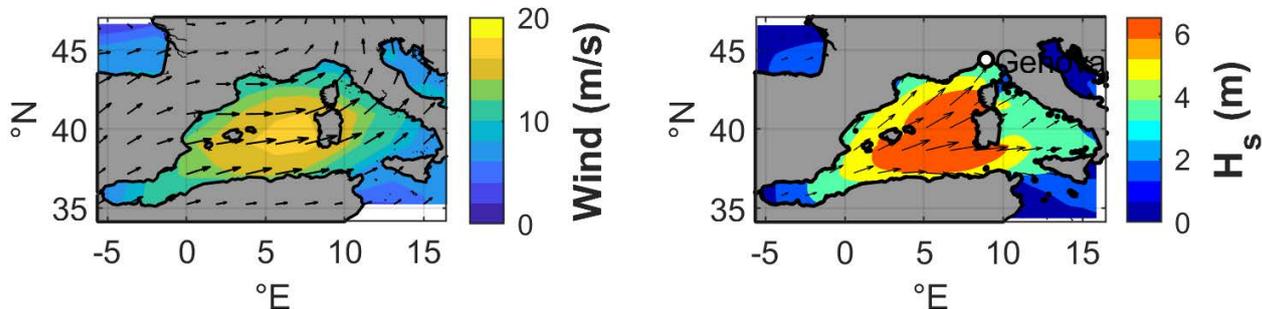
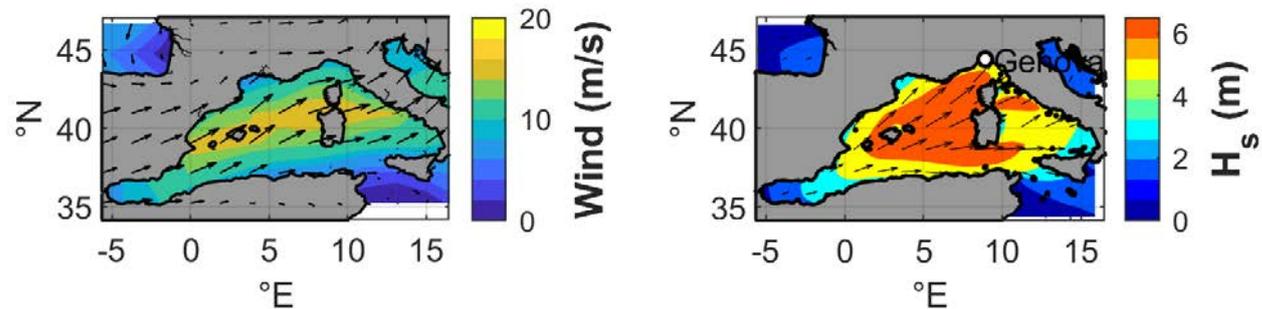
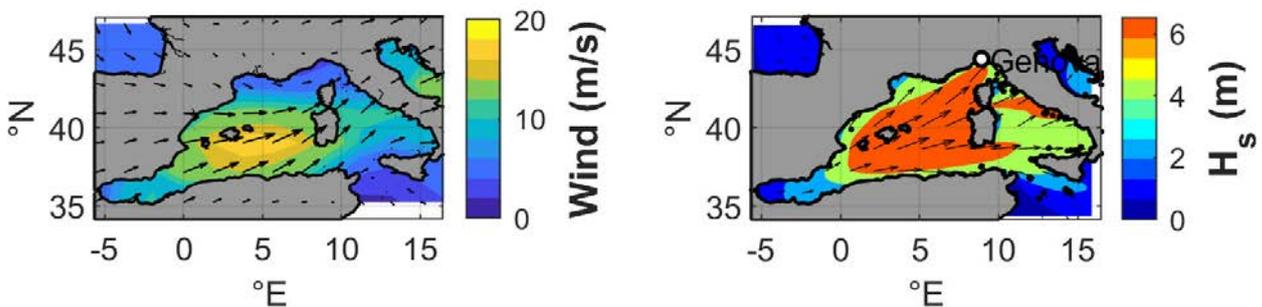
**1955/2/19 00:00:00****1955/2/19 06:00:00****1955/2/19 12:00:00****1955/2/19 18:00:00**

FIGURA B-4. CAMPI DI VENTO E DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  OTTENUTI A SEGUITO DELLA SIMULAZIONE CON IL MODELLO SWAN PER IL GIORNO 19 FEBBRAIO 1955

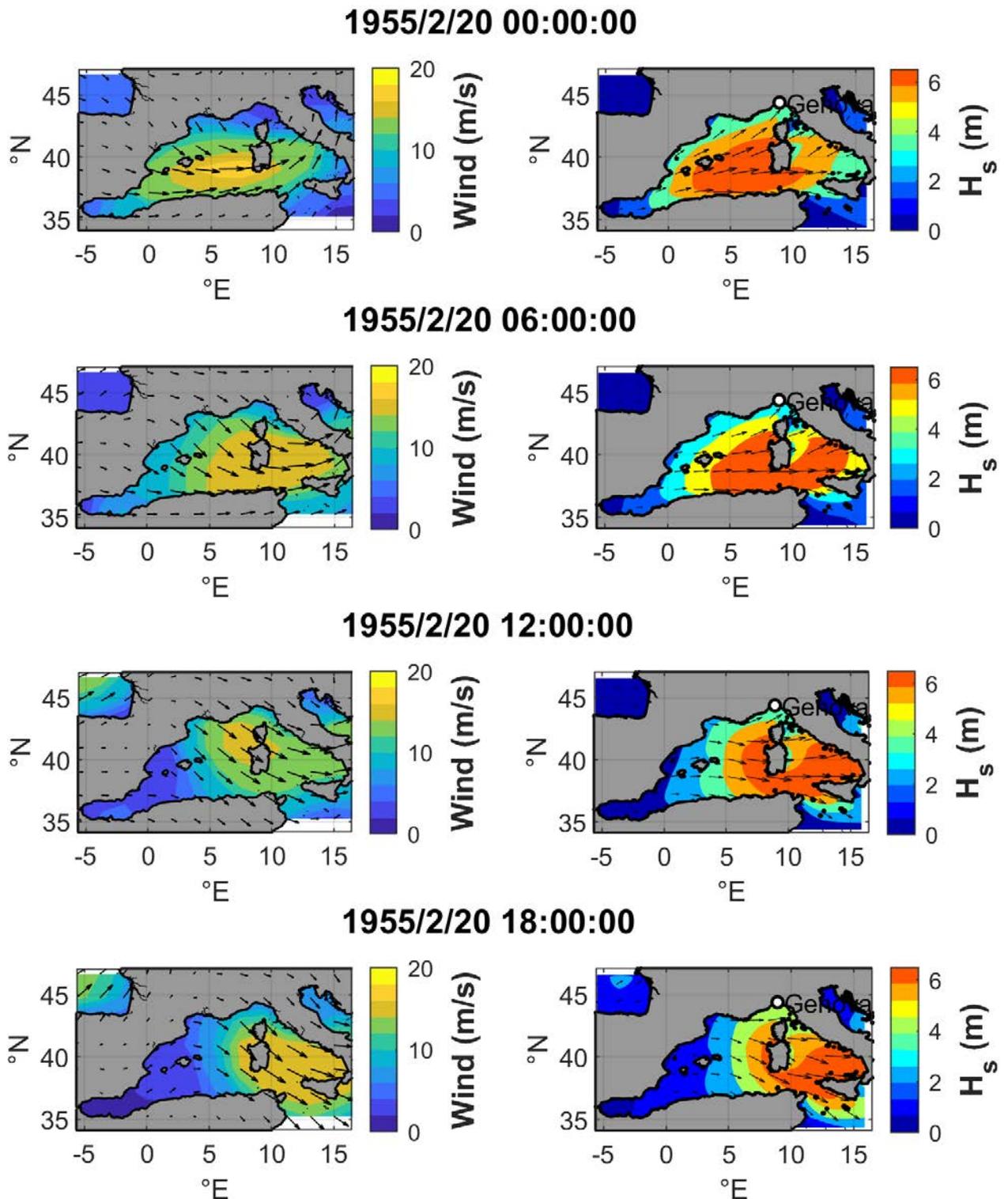


FIGURA B-5. CAMPI DI VENTO E DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$  OTTENUTI A SEGUITO DELLA SIMULAZIONE CON IL MODELLO SWAN PER IL GIORNO 20 FEBBRAIO 1955

## Studio delle condizioni meteomarine

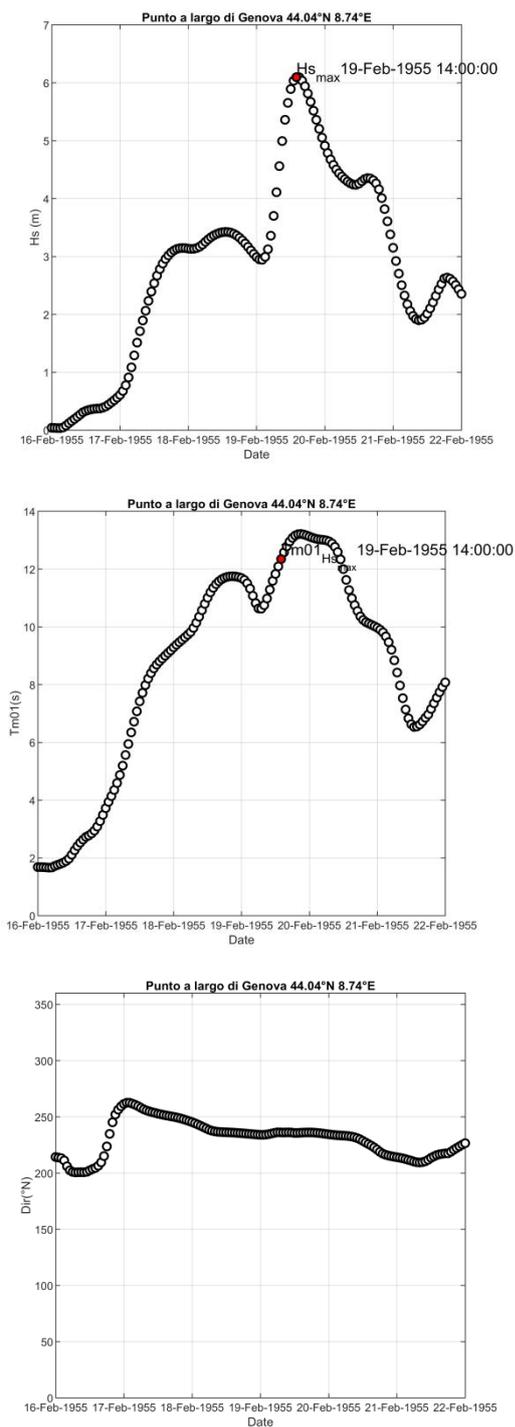


FIGURA B-6. EVOLUZIONE TEMPORALE DEI VALORI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA  $H_s$ , PERIODO DI PICCO  $T_p$  E DIREZIONE DI PROPAGAZIONE OTTENUTI CON IL MODELLO SWAN TRA IL 16 E IL 22 FEBBRAIO 1955 NEL PUNTO DI COORDINATE 40.04°N - 8.74°E AL LARGO DEL GOLFO DI GENOVA

**APPENDICE C****CONFRONTO TRA LE MISURE DELL'ONDAMETRO ENEL GENOVA NERVI E I DATI DI MOTO ONDOSO RICOSTRUITI SOTTOCOSTA CON IL MODELLO MEROPE**

A seguire viene presentato un confronto tra i dati di moto ondoso propagati sottocosta con il modello di inversa spettrale MEROPE nel punto sottocosta P1, appartenenti alla serie storica DICCA 1979-2018 al largo di Genova (rif.B.4), con le registrazioni effettuate dall'ondametro non direzionale ENEL di Genova Nervi tra il 1979 e il 1982 (rif. B.3).

In Figura C-1 è indicata la posizione dell'ondametro e del punto P1 al largo della diga foranea del porto di Genova.

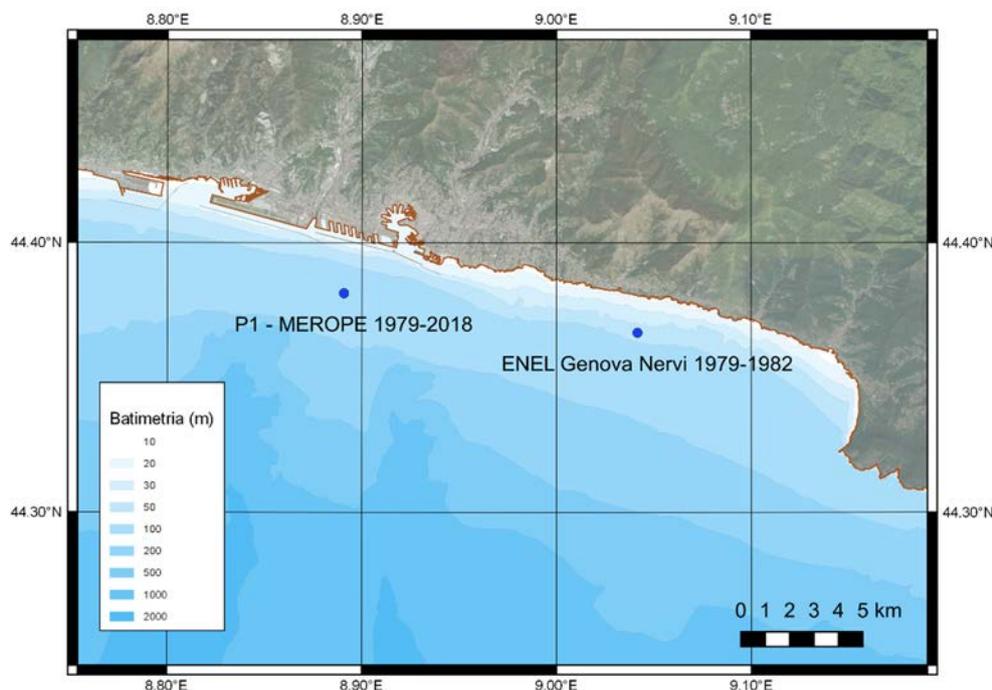


FIGURA C-1. LOCALIZZAZIONE DELLA BOA ONDAMETRICA ENEL DI GENOVA NERVI E DEL PUNTO P1 DI PROPAGAZIONE SOTTOCOSTA DEL MOTO ONDOSO CON IL MODELLO MEROPE

Dai rapporti cartacei originali sono stati estratti 4 eventi con altezza d'onda significativa  $H_{1/3} \geq 3.0$  m:

1. Evento ondoso dal 10 al 13 Gennaio 1979
2. Evento ondoso dal 27 Gennaio al 2 Febbraio 1979
3. Evento ondoso dal 13 Gennaio al 16 Giugno 1979
4. Evento ondoso dal 10 al 12 Marzo 1982

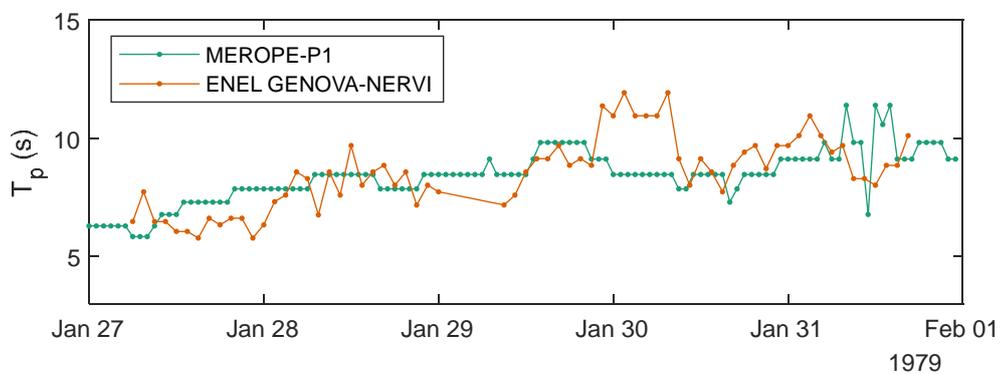
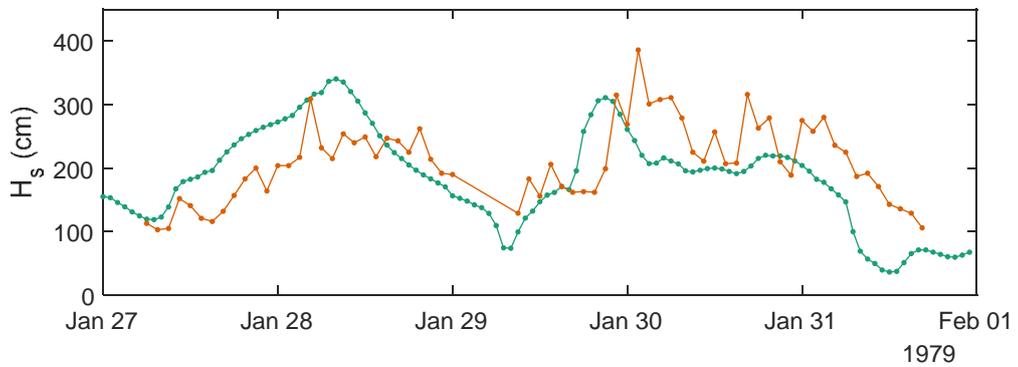
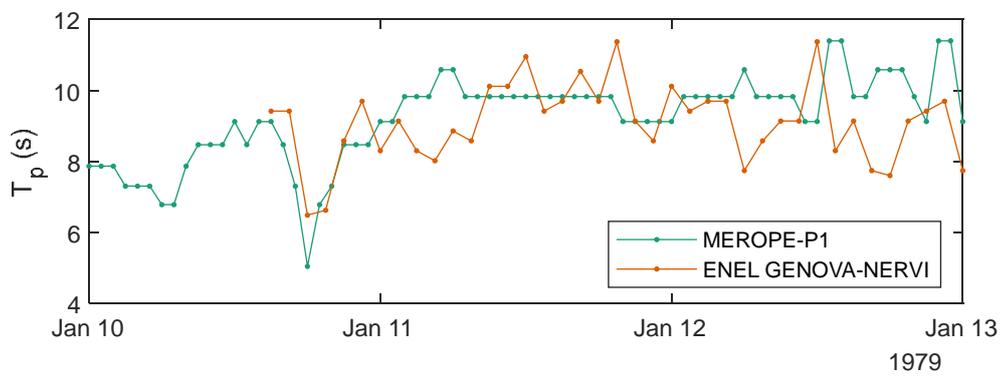
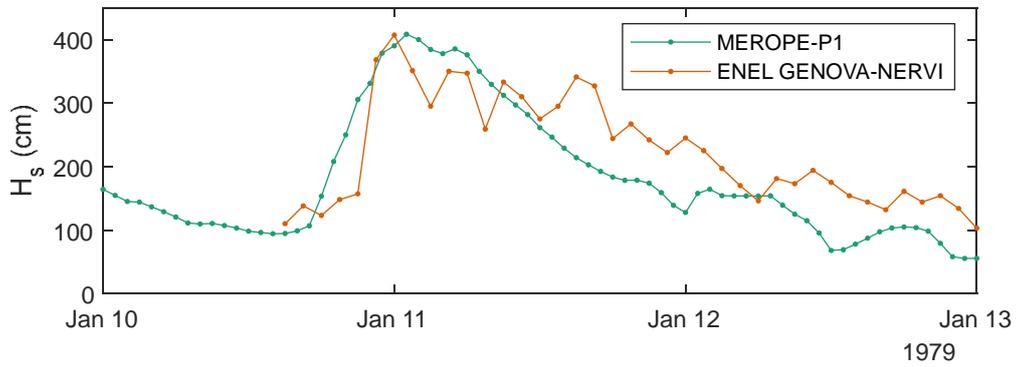
Nei grafici riportati a seguire, per ogni evento, è mostrato:

- il confronto sincrono tra l'altezza significativa  $H_{1/3}$  registrata dalla boa ondometrica ENEL di Genova Nervi e l'altezza d'onda significativa  $H_s$  ottenuta nel punto sottocosta P1 con il modello di propagazione MEROPE. Trattandosi di eventi estremi ai dati di moto ondoso propagati è stato applicato il fattore di calibrazione dell'altezza d'onda pari a 1.16 (vedi Capitolo 7);

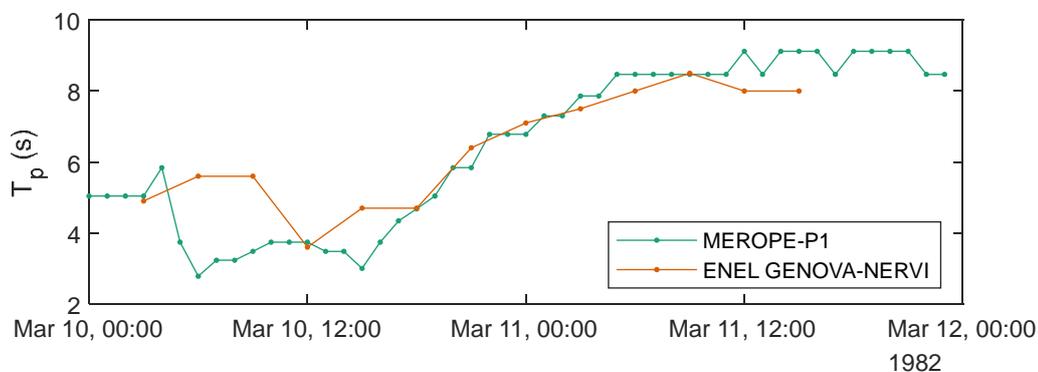
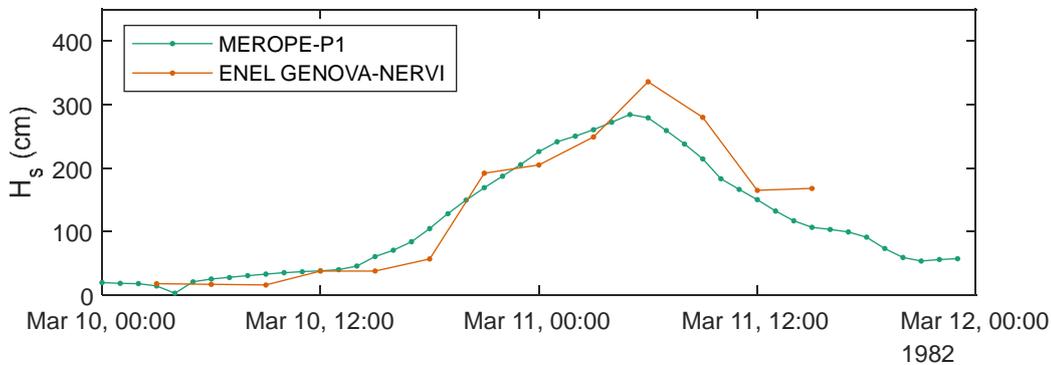
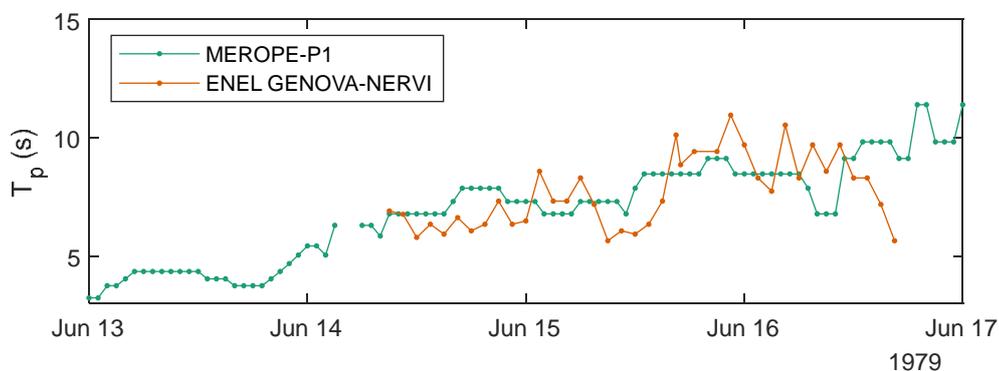
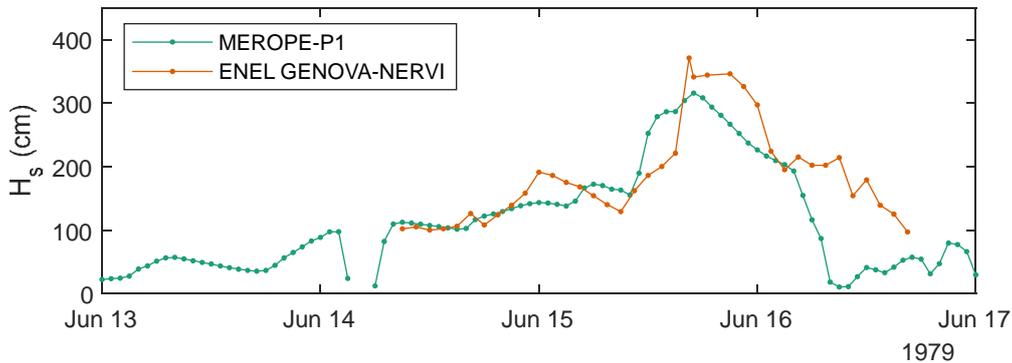
- il confronto sincrono tra il periodo di picco  $T_p$ , ricavato a partire dal valore del periodo  $T_z$  fornito dalla boa ondometrica con l'analisi zero-crossing, e il periodo di picco  $T_p$  degli stati di mare propagati sottocosta. Per calcolare il periodo di picco  $T_p$  a partire dal valore  $T_z$  è stata applicata la relazione sperimentale indicata nel rapporto ENEL:

$$T_p = 1.397 \times T_z - 0.223$$

**Studio delle condizioni meteomarine**



Studio delle condizioni meteomarine



**APPENDICE D: I modelli matematici per la propagazione delle onde dal largo a costa MEROPE, SWAN**

## Descrizione del modello numerico MEROPE

Propagandosi verso "riva" su fondali via via decrescenti, le onde subiscono una serie di trasformazioni geometriche e perdite di energia che alla fine conducono al loro frangimento (ciò avviene quando l'onda, deformata, diviene molto alta rispetto alla sua lunghezza e perciò "instabile" o comunque intercetta fondali bassi «incompatibili» con la sua altezza).

Prescindendo, perché comunque trascurabili, dalle perdite di energia che (fuori dalla zona dei frangenti) sono dovute all'attrito del fondo e, per fondi permeabili, alla percolazione, nonché dagli effetti indotti dalle correnti, dal vento e dalle riflessioni del fondo, le modifiche delle caratteristiche ondose durante la propagazione verso riva sono indotte essenzialmente dai fenomeni di rifrazione e di shoaling.

Il primo fenomeno (rifrazione) consiste in una trasformazione tridimensionale dovuta a variazioni di fondale lungo i fronti d'onda che comportano variazioni planimetriche di questi e, conseguentemente, a variazioni delle altezze d'onda per effetto della conservazione del flusso di energia fra "ortogonali" vicine.

Il secondo fenomeno (shoaling) è una trasformazione bidimensionale delle onde dovuta al solo effetto del fondale nella direzione di propagazione. L'effetto "fondale" modifica la celerità di gruppo e di conseguenza provoca dapprima una riduzione e poi un sostanziale aumento di altezza delle onde allorché queste avanzano su profondità di fondali decrescenti.

La simulazione di detti fenomeni può essere eseguita in modo efficace con il metodo della "rifrazione inversa spettrale" introdotto da Abernety e Gilbert (1975). Tale metodo fornisce risultati quantitativi esattamente nel punto di interesse, al contrario del metodo classico della rifrazione diretta.

MEROPE 2.3.0 è stato sviluppato dalla Modimar s.r.l. di Roma sulla base dell'impostazione teorica di Abernety e Gilbert (1975).

La differenza più appariscente rispetto al metodo tradizionale della rifrazione diretta, è rappresentata dalla costruzione dei raggi con un verso contrario a quello della propagazione delle onde. Tale impostazione fu introdotta da Dorrestein (1960): si costruisce un ventaglio di raggi relativi ad un dato periodo d'onda, che hanno tutti origine nel luogo della costa (o in prossimità) dove si desidera conoscere i risultati, partendo ognuno con una diversa direzione  $\phi$ . Si esegue la propagazione del raggio tenendo conto della rifrazione ricavando quindi la direzione  $\theta$  che i raggi possiedono quando raggiungono la regione di acque profonde.



Riportate in diagramma le molteplici coppie di valori  $\theta - \phi$  trovate, si ricava per ogni  $\theta$  il gradiente  $\partial\phi/\partial\theta$  da introdurre nella formula che conduce poi alle altezze sotto costa:

$$K_r = \sqrt{\frac{C_0}{C} \cdot \frac{\delta\phi}{\delta\theta}}$$

Rispetto al metodo convenzionale, si ha il vantaggio che i risultati sono ottenuti direttamente per il luogo che interessa, sulla costa, senza il problema di dover interpolare tra raggi calcolati da una parte o dall'altra del punto. Inoltre, un unico diagramma di rifrazione (per ciascun periodo) rappresenta i raggi relativi a tutte le direzioni di provenienza del moto ondoso al largo.

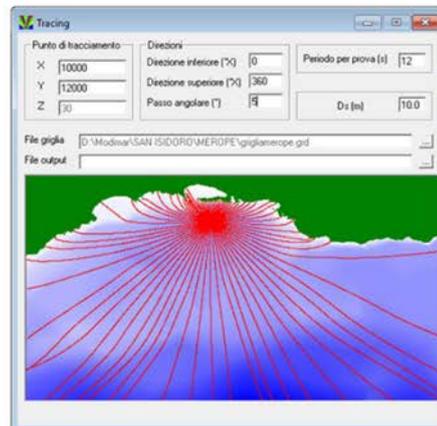
Dal punto di vista pratico, la costruzione inversa dei raggi non presenta problemi e si applica la stessa equazione della traiettoria del raggio del metodo convenzionale, con lievi modifiche di segni. Con la tecnica della proiezione inversa, non sarebbe necessario neppure conoscere il percorso dei singoli raggi poiché basta avere il diagramma di rifrazione  $\theta - \phi$  definito con incrementi di frequenza e  $\theta$  sufficientemente piccoli per riassumere tutti gli effetti della topografia sull'altezza e direzione delle onde nella loro propagazione verso un punto della costa. Si nota in genere che le curve  $\theta - \phi$ , dolci per valori alti delle frequenze, presentano discontinuità notevoli per le frequenze minori con conseguenti singolarità nel valore di  $K_r$ .

Ciò significa che questa tecnica (così come quella convenzionale) ha il difetto che la funzione altezza d'onda diventa indeterminata proprio in un campo di frequenze e direzioni di interesse non trascurabile. In pratica questo comporta che nel percorso dei raggi compaiono singolarità (caustiche) non giustificabili fisicamente, come per i piani d'onda tradizionali. Il fatto che usando spaziature sufficientemente grandi dei raggi questi difetti non siano evidenziati, non esclude

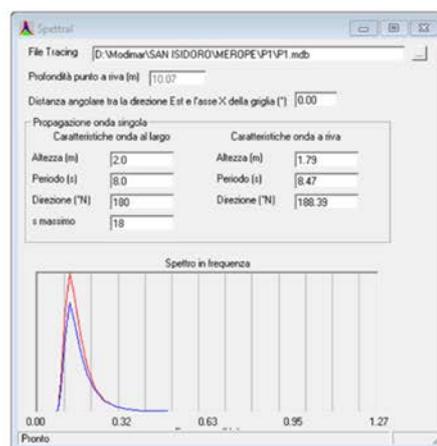
l'insufficienza del metodo.

È stato mostrato che a queste difficoltà si può ovviare abbandonando l'ipotesi che al largo il fronte d'onda si presenti con direzione d'onda e frequenza ben precise ed uniformi (onde monocromatiche), e considerando funzioni spettrali sia per la direzione che per la frequenza. Va mantenuta invece l'ipotesi di uniformità di fase.

L'importanza fondamentale dell'introduzione dello spettro d'energia bidimensionale associata a quello di proiezione inversa dei raggi, è che, a differenza del metodo tradizionale e di quello di Dorrestein, dà luogo a risultati univoci ed ovunque finiti, eliminando le singolarità già evidenziate.



*Modulo Tracing per il tracciamento inverso dei raggi in un generico punto sotto costa*



*Modulo Spettro per la propagazione degli spettri di moto ondoso da largo-a riva*

### **Riferimenti bibliografici**

*Dorrestein, R. (1960) Simplified method of determining refraction coefficients for sea waves, J. Geophys. Res. 65 (2), 637-642.*

*Abernethy, C. L. and Gilbert, G. (1975). Refraction of waves spectra. Report INT17, Hydraulic Research Station Wallingford, UK*



Modimar Srl – Via Monte Zebio 40 – 00195 – Roma  
tel. 063269461 – email: info@modimar.it

## descrizione del modello numerico SWAN

Il codice open source SWAN (Simulating Waves Nearshore) è un modello spettrale di terza generazione sviluppato dall'Università olandese "Delft University of Technology".

Il codice, che può essere scaricato ed utilizzato liberamente, consente di studiare la propagazione di stati di mare descritti da uno spettro di energia disperso in frequenza e direzione tenendo conto dei principali fenomeni fisici che intervengono su fondali intermedi e bassi in presenza dell'azione del vento. In particolare i fenomeni fisici presi in esame dal modello sono:

- propagazione del moto ondoso sia in condizioni stazionarie che in condizioni transitorie tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling indotti sia dal fondale che dalla presenza di correnti;
- generazione delle onde ad opera del vento;
- interazione non-lineare tra le componenti spettrali indotta da "triplette" e da "quadruplette";
- dissipazioni di energia per frangimento in acqua profonda e in acqua bassa;
- dissipazioni di energia per attrito sul fondo;
- sovrizzo del livello del mare indotto dalle onde frangenti;
- diffrazione del moto ondoso (approccio semplificato).

Il modello SWAN è un modello mediato sulla fase delle onde che risolve l'equazione di bilancio della densità di azione  $N = E/\sigma$  dove  $E(\sigma, \theta)$  è la densità di energia dello spettro con  $\sigma$  frequenza delle onde (osservata in un sistema di riferimento mobile che si sposta con la velocità della corrente) e  $\theta$  direzione di propagazione delle onde (direzione normale alla cresta delle onde di ciascuna componente spettrale). Si evidenzia che mentre la densità di azione  $N$  si conserva nella propagazione delle onde in presenza di una corrente pre-esistente (corrente ambientale), la stessa cosa non vale per la densità di energia  $E$ .

L'evoluzione nello spazio e nel tempo della densità di azione  $N$  è governata dall'equazione di bilancio dell'azione che può essere espressa nella seguente forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_z \left[ \left( \bar{c}_g + \bar{U} \right) N \right] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Il termine di sinistra dell'equazione esprime la parte cinematica dell'evoluzione delle onde. Il termine di destra esprime invece tutti i processi fisici che determinano:

- la generazione delle onde ad opera del vento (termini "sorgente");
- la dissipazione di energia delle onde (termini "pozzo")
- lo scambio di energia tra le componenti spettrali.

Questi processi sono riferiti alla densità di energia dello spettro.

Il secondo termine della parte sinistra dell'equazione esprime la propagazione dell'energia nello spazio geografico coincidente con il livello medio marino;  $c_g$  è celerità di gruppo definita dalla relazione:

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$$

e dalla relazione di dispersione:

$$\sigma^2 = g |\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)$$

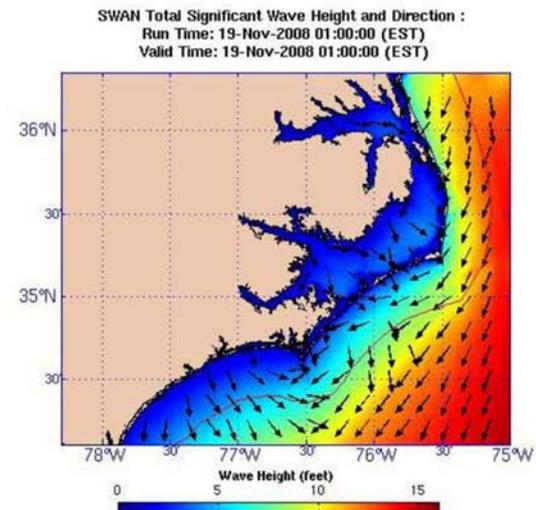
dove  $\vec{k}$  è il vettore numero d'onda e  $d$  è la profondità locale.

Il terzo termine della parte sinistra dell'equazione esprime l'effetto della variazione della frequenza  $\sigma$  indotta dalla variazione della profondità e dalla variazione della corrente. Il quarto termine della parte sinistra esprime l'effetto di rifrazione indotto dalla profondità e dalla corrente.

I termini  $c_\sigma$  e  $c_\theta$  sono le celerità di propagazione nel dominio della frequenza e della direzione.

Per maggiori dettagli sul codice SWAN ci si può riferire alla documentazione scientifica e tecnica del codice disponibile in rete.

<http://swanmodel.sourceforge.net/>  
<http://www.swan.tudelft.nl>



*Esempio di generazione e propagazione del moto ondoso con il modello SWAN*