Proponente:

"CALA CRAVIEU" Soc. Coop. a r.l.

Via Aurelia di ponente, 1/B - 17015 CELLE LIGURE (SV)

Oggetto:

INTERVENTI DI RIPRISTINO E RINFORZO DELLE OPERE DI DIFESA IN LOCALITA' "CALA CRAVIEU" A CELLE LIGURE (SV) DANNEGGIATE DALLA MAREGGIATA ECCEZIONALE DEL 29-30 OTTOBRE 2018

PROGETTO DEFINITIVO

Titolo elaborato:

STUDIO METEOMARINO

(a cura di LABIMA - DICEA - Università degli Studi di Firenze)

Progettisti:



STUDIOGAGGERO

SAVONA Via Pia, 130R
Tel 019 829463 - Fax 019 8386702 - Cell 335/303133
Email ing.gaggero@libero.it

STUDIOELB Ingegneri Associati
Corso Torino 17/6 sc.A - 16129 Genova Tel. 010.5740568 - fax : 010.4211059
e-mail: inge@studioelb.it - PEC: studio@pec.studioelb.it - C.F. e P. I.V.A.: 01933110999

0	18.12.2019	LABIMA	LABIMA	Emissione
Revisione	Data	Redatto da:	Controllato da:	Descrizione

Data:	Scala:		
18.12.2019		B25	R05

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
Laboratorio di Ingegneria Marittima



LABIMA
Laboratorio di Ingegneria Marittima
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA)
Università degli Studi di Firenze
Via Santa Marta 3 - 50139 FIRENZE

STUDIO METEOMARINO AL LARGO E PROPAGAZIONE A COSTA PER LA DETERMINAZIONE DELLE AZIONI DI PROGETTO DELL'OPERA DI DIFESA DI CALA CRAVIEU

COMMITTENTE:	CRAVIEU SOC. COOP.
RESPONSABILE SCIENTIFICO:	LORENZO CAPPIETTI
GRUPPO DI LAVORO:	LORENZO CAPPIETTI, IRENE SIMONETTI (DICEA)
VERSIONE:	03 – FINALE
DATA:	25/09/2019

INDICE

PREMESSA 1

1 OBIETTIVI E METODOLOGIA 2

2 MODELLI DI SIMULAZIONE NUMERICA 3

2.1 MODELLAZIONE AL LARGO: WW3-DICEA 3
2.2 PROPAGAZIONE A COSTA: MIKE21-SW 3

3 FONTI DEI DATI METEOMARINI 5

3.1 DATI ONDAMETRICI 5
3.2 DATI BAROMETRICI, MAREOGRAFICI E ANEMOMETRICI 7

4 DESCRIZIONE DEL PARAGGIO IN ESAME 8

4.1 SETTORI DI TRAVERSIA 8
4.2 FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI 9
4.3 CLIMA METEOMARINO AL LARGO 11
4.4 MOTO ONDOSO A COSTA 18
4.4.1 Moto sui fondali con profondità di 10 m 20
4.4.2 Moto ondoso a costa sui fondali a profondità 6 m 22
4.5 LIVELLI DEL MARE E PRESSIONI ATMOSFERICHE 26
4.6 RELAZIONE FRA ALTEZZE E PERIODI D'ONDA 30
4.7 SINTESI DEGLI ASPETTI RILEVANTI 32

5 ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI PRE-MAREGGIATA DI OTTOBRE 2018 34

5.1 METODOLOGIA DI ANALISI 34
5.2 EVENTI ESTERMI AL LARGO PRE-MAREGGIATA 36
5.2.1 Eventi estremi al largo per l'intero settore di traversia 37
5.2.2 Eventi estremi al largo per il settore di traversia principale 150-185°N 40
5.2.3 Eventi estremi al largo per il settore di traversia secondario 185-215°N 43
5.2.4 Eventi estremi al largo per il settore di traversia secondario 135-150°N 46
5.3 ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI A COSTA 48
5.3.1 Eventi estremi sui fondali a profondità 10 m 49
5.3.2 Eventi estremi sui fondali a profondità 6 m 50

6 ANALISI DELLA MAREGGIATA DEL 29 OTTOBRE 2018 53

6.1 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'EVENTO 53
6.1.1 Registrazione della mareggiata da ondametri nel mediterraneo e discussione dell'eccezionalità sulle relative serie storiche 53

6.1.2 Pressione e livelli nella zona: registrazioni disponibili *54*
6.1.3 Sintesi degli aspetti rilevanti *58*
6.2 RICOSTRUZIONE NUMERICA DELLA MAREGGIATA AL LARGO 59
6.3 PROPAGAZIONE DELLA MAREGGIATA A COSTA 63
6.4 SET-UP SUI FONDALI ANTISTANTI LA DIGA 65

7 AGGIORNAMENTO DELLA STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI CON LA MAREGGIATA DI OTTOBRE 2018 ..... **66**

7.1.1 Statistica annuale al largo di Cala Cravieu, per eventi provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N) *66*
7.1.2 Statistica annuale a costa, su fondale di 10 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N) *68*
7.1.3 Statistica annuale a costa, su fondale di 6 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N) *70*
7.1.4 Statistica stagionale a costa, su fondale di 6 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N) *72*

8 CONCLUSIONI **79**

BIBLIOGRAFIA **80**

ALLEGATO I - EVENTI ESTREMI PER ALTRI ONDAMETRI NELL'ALTO MEDITERRANEO **81**

ALLEGATO II – CONFRONTO FRA PREVISIONI DEI MODELLI E REGISTRAZIONI DELLE BOE ONDAMETRICHE **86**

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Localizzazione delle stazioni di misura utilizzate nel presente studio: ondametri, mareografi, stazioni meteo private. 6

Figura 2: Settori di traversia principale e secondario per il paraggio in esame (elaborazione di un'immagine da fonte Google Earth). 8

Figura 3: Fetch geografici con estensione massima limitata a 600 km per l'area di Cala Cravieu (SV) (elaborazione di un'immagine da fonte Google Earth). 10

Figura 4: Fetch efficaci per l'area di Cala Cravieu (SV) (elaborazione di un'immagine da fonte Google Earth). 10

Figura 5: Localizzazione del punto utilizzato quale riferimento per la determinazione delle condizioni meteomarine al largo di Cala Cravieu (SV). 12

Figura 6: Distribuzione annuale di direzionale e intensità dei venti al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 20°. 12

Figura 7: Distribuzione stagionale di direzionale e intensità dei venti al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 20°. 13

Figura 8: Rosa delle onde annuale al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°. 14

Figura 9: Rose delle onde stagionali al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°. 15

Figura 10: Localizzazione dei punti utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso in prossimità della diga di Cala Cravieu (SV). 18

Figura 11: Altezza significativa e direzione del moto ondoso nella propagazione dal largo a costa per due moti ondosi esemplificativi, con: altezza al largo H_{m0}=3.8 m, T_p=10.2 s e direzione di provenienza 156°N (in altro) e altezza al largo H_{m0}=3.0 m, T_p=9.5 s e direzione di provenienza 176°N (in basso). Puti in nero: punti di estrazione per l'analisi del moto ondoso a costa. 19

Figura 12: Rosa delle onde annuale sui fondali a profondità 10 m antistanti la diga di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°. 20

Figura 13: Rosa delle onde annuale sui fondali a profondità 6 m antistanti la diga di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°. 22

Figura 14: Rose delle onde stagionali sui fondali a profondità 6 m antistanti la diga di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°. 25

Figura 15: Livello idrometrico registrato dalla stazione di Genova nel periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019. 27

Figura 16: Pressione atmosferica misurata presso la stazione di Genova nel periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019. 29

Figura 17: Legame fra altezza significativa e periodo di picco per onde con altezza significativa superiore a 1 m. Dati relativi al punto al largo di Cala Cravieu, ottenuti tramite simulazione con il modello WW3-DICEA per il periodo 2000-2018. 31

Figura 18: Legame fra altezza significativa e periodo di per i moti ondosi sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu. Dati ottenuti tramite simulazione con il modello MIKE21-SW per il periodo 2000-2018. 31

Figura 19: Legame fra periodo medio $T_{m-1,0}$ e periodo di picco T_p per le onde con altezza significativa superiore a 1 m. Dati relativi al punto al largo di Cala Cravieu, ottenuti tramite simulazione con il modello WW3-DICEA per il periodo 2000-2018. 32

Figura 20: Esempio di individuazione dei picchi di altezza d'onda oltre la soglia di 2.5 m . 34

Figura 21: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Gumbel e Weibull al largo, settore 135-215°N. 38

Figura 22: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 135-215°N °N. 38

Figura 23: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 135-215°N (d). Risultati al largo di Cala Cravieu. 39

Figura 24: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Gumbel e di Weibull al largo, settore 150-185°N. 41

Figura 25: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 150-185°N. 41

Figura 26: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 150-185°N (d). Risultati al largo. 42

Figura 27: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Gumbel e di Weibull al largo, settore 185-215°N. 43

Figura 28: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 185-215°N. 44

Figura 29: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 185-215°N (d). Risultati al largo. 45

Figura 30: Regressione lineare per la stima dei parametri distribuzioni di Gumbel e Weibull al largo, settore 135-150°N. 46

Figura 31: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 135-150°N. 47

Figura 32: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 135-150°N (d). Risultati al largo di Cala Cravieu. 48

Figura 33: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel su fondale di 10 m per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). 49

Figura 34: Altezze d'onda significative su fondale di 10 m in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). 50

Figura 35: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel su fondale di 6 m per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). 51

Figura 36: Altezze d'onda significative su fondale di 6 m in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). 51

Figura 35: Pressione atmosferica registrata da mareografi dell'Alto Mediterraneo nella giornata del 29/10/2018. 55

Figura 36: Livello idrometrico registrato dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018. 56

Figura 37: Pressione atmosferica registrata dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018. 56

Figura 38: Componenti di marea, livelli registrati presso il mareografo di Genova e anomalia di marea. 57

Figura 39: Evoluzione temporale dell'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza del moto ondoso fra le ore 07 UTC del 29/10/2018 e le 17 UTC del 29/10/2018. 59

Figura 40: Evoluzione temporale dell'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza del moto ondoso fra le ore 19 UTC del 29/10/2018 e le 05 UTC del 30/10/2018. 60

Figura 41: Ricostruzione della mareggiata del 29 ottobre 2018 con il modello WW3-DICEA nel punto al largo di Cala Cravieu: altezza significativa (H_{m0}), direzione (Dir), periodo di picco (T_p) e periodo medio ($T_{m-1,0}$). 61

Figura 42: Altezza d'onda significativa per la mareggiata del 29 ottobre 2018 al largo di Cala Cravieu e sui fondali con profondità 6 m e 10 m antistanti la diga. 63

Figura 43: Direzione di provenienza del moto ondoso per la mareggiata del 29 ottobre 2018 al largo di Cala Cravieu e sui fondali con profondità 10 m. 64

Figura 44: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull al largo di Cala Cravieu per onde provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 67

Figura 45: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 67

Figura 46: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale d 10 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 69

Figura 47: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 69

Figura 48: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale d 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 70

Figura 49: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m , in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 71

Figura 50: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale. 72

Figura 51: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale. 73

Figura 52: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale. 74

Figura 53: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni

di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale. 74

Figura 54: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile. 75

Figura 55: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile. 76

Figura 56: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo. 77

Figura 57: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo..... 77

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Gestore, posizione, periodo di registrazione e frequenza di acquisizione dei dati per gli ondametri utilizzati nel presente studio. 5

Tabella 2: Settore di possibile provenienza del moto ondoso per gli ondametri utilizzati nel presente studio. 6

Tabella 3: Gestore, posizione, periodo di registrazione dei mareografi utilizzati nel presente studio. 7

Tabella 4: Fetch geografici ed efficaci al largo di Cala Cravieu (SV). 11

Tabella 5: Clima ondoso meteomarino al largo di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda. 16

Tabella 6: Clima ondoso meteomarino al largo di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di periodo e altezza d'onda. 16

Tabella 7: Clima ondoso meteomarino al largo di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e periodi d'onda. 17

Tabella 8: Clima ondoso meteomarino sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda. 21

Tabella 9: Clima ondoso meteomarino sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di periodo e altezza d'onda. 21

Tabella 10: Clima ondoso meteomarino sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e periodi d'onda. 21

Tabella 11: Clima ondoso annuale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda. 23

Tabella 12: Clima ondoso annuale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di periodo e altezza d'onda. ... 23

Tabella 13: Clima ondoso annuale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e periodi d'onda. . 24

Tabella 14: Clima ondoso invernale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda. 25

Tabella 15: Clima primaverile a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda. 26

Tabella 16: Clima estivo a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda. 26

Tabella 17: Clima autunnale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda. 26

Tabella 18: Valori minimi e massimi annuali del livello idrometrico registrati presso il mareografo di Genova per il periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019 (rispetto al livello medio del mare osservato nel periodo di riferimento). 28

Tabella 19: Valori minimi e massimi annuali di pressione atmosferica registrati presso il mareografo di Genova per il periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019. 29

Tabella 20: Parametri di analisi statistica al largo di Cala Cravieu per il settore 135-215°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull 37

Tabella 21: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-215°N ottenuta con la distribuzione di Gumbel. 38

Tabella 22: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-215°N ottenuta con la distribuzione di Weibull. 39

Tabella 23: Parametri di analisi statistica al largo per il settore 150-185°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull 40

Tabella 24: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 150-185°N ottenuta con la distribuzione di Gumbel. 41

Tabella 25: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 150-185°N ottenuta con la distribuzione di Weibull. 42

Tabella 26: Parametri di analisi statistica al largo per il settore 185-215°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull 43

Tabella 27: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 185-215°N N ottenuta con la distribuzione di Gumbel. 44

Tabella 28: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 185-215°N ottenuta con la distribuzione di Weibull. 44

Tabella 29: Parametri di analisi statistica al largo per il settore 135-150°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. 46

Tabella 30: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-150°N ottenuta con la distribuzione di Gumbel. 47

Tabella 31: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-150°N ottenuta con la distribuzione di Weibull. 47

Tabella 32: Parametri di analisi statistica su fondale di 10 m per le onde provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. 49

Tabella 33: Altezza d'onda significativa su fondale di 10 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. 50

Tabella 34: Altezza d'onda significativa su fondale di 10 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. 50

Tabella 35: Parametri di analisi statistica su fondale di 6 m per le onde provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. 51

Tabella 36: Altezza d'onda significativa su fondale di 6 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. 52

Tabella 37: Altezza d'onda significativa su fondale di 6 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. 52

Tabella 35: Tempo di ritorno della mareggiata del 29 ottobre 2018 per ondametri situati nell'area dell'Alto Mediterraneo. 54

Tabella 36: Parametri di analisi statistica al largo di Cala Cravieu per onde provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 67

Tabella 37: Altezza d'onda significativa al largo di Cala Cravieu per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 68

Tabella 38: Altezza d'onda significativa al largo di Cala Cravieu per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 68

Tabella 39: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 68

Tabella 40: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 69

Tabella 41: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018..... 70

Tabella 42: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018..... 70

Tabella 43: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 71

Tabella 44: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m , per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. 71

Tabella 45: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale. 72

Tabella 46: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale. 73

Tabella 47: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale. 73

Tabella 48: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale. 74

Tabella 49: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale. 75

Tabella 50: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale. 75

Tabella 51: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile. 75

Tabella 52: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile. 76

Tabella 53: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile. 76

Tabella 54: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo. 77

Tabella 55: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo. 78

Tabella 56: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo. 78

PREMESSA

In seguito alla mareggiata verificatasi nell'area nord-mediterranea in data 29 ottobre 2018, la società Cala Cravieu Soc. Coop., con sede legale a Celle Ligure in seguito indicata "Committente", ha stipulato una convenzione di ricerca con il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Firenze (UNIFI), finalizzata allo studio di dettaglio del clima meteomarino della zona e alla definizione delle azioni di progetto per l'opera di dIfesadi Cala Cravieu.

La presente relazione costituisce l'elaborato tecnico inerente agli studi previsti dall'accordo di convenzione di ricerca, svolta dal Laboratorio di Ingegneria Marittima (LABIMA) del DICEA dell'Università di Firenze.

1 OBIETTIVI E METODOLOGIA

La mareggiata avvenuta a fine ottobre 2018 ha causato danni rilevanti su vari paraggi della costa ligure. In particolare, l'opera di difesa di Cala Cravieu è stata fortemente danneggiata. Il Committente, come supporto alla progettazione per la ricostruzione della diga, ha richiesto quanto segue:

(i) Studio Meteomarino al largo, degli eventi estremi e della mareggiata del 28-29 ottobre 2019;

(ii) Propagazione a costa dal clima meteomarino al largo mediante simulazione numerica finalizzato alla definizione delle azioni di progetto;

Con la prima attività si è raggiunto, tramite studio teorico, l'obiettivo di quantificare la probabilità di ricorrenze di eventi meteomarini estremi, il loro tempo medio di ritorno e il rischio percentuale che durante un determinato orizzonte temporale possano verificarsi mareggiate più energetiche di quelle assunte alla base del progetto della nuova diga marittima e quindi possano aversi danni ritenuti non accettabili.

Con la seconda attività si sono determinate, tramite modellazioni numerica, le caratteristiche delle onde di progetto una volta propagatesi dal largo a costa tenendo conto dei fenomeni di shoaling, rifrazione e perdita di energia per attrito al fondo e frangimento.

Lo studio ha previsto l'utilizzo di dati registrati da ondametri, mareografi e stazioni meteorologiche (come descritto in dettaglio nella *Sezione 3*), nonché il ricorso a modelli numerici di ricostruzione del dato laddove non fossero disponibili registrazioni di campo nella località desiderata (è questo il caso sia dell'area in prossimità della diga di Cala Cravieu, sia della zona immediatamente al largo della stessa).

In particolare, la metodologia adottata ha previsto il ricorso a diversi livelli di modellistica numerica, caratterizzati da un grado crescente di risoluzione nei dintorni dell'area di interesse (come dettagliato in *Sezione 2*), finalizzati a fornire una descrizione completa delle caratteristiche rilevanti dell'evento meteo-marino del 29 ottobre 2019 e del clima meteomarino al largo e a costa, finalizzato alla determinazione delle azioni di progetto.

2 MODELLI DI SIMULAZIONE NUMERICA

Sono di seguito introdotti i modelli utilizzati per lo studio meteomarino al largo e per la propagazione dei moti ondosi a costa, nonché per la ricostruzione numerica della mareggiata del 29 ottobre 2018.

2.1 MODELLAZIONE AL LARGO: WW3-DICEA

Per la caratterizzazione del clima ondoso e per la ricostruzione della mareggiata al largo, è stato utilizzato un modello di simulazione numerica basato sul software WAVEWATCH III [1], un modello open source sviluppato dal NCEP–NOAA (*National Center for Environmental Prediction*). WAVEWATCH III è un modello di generazione e propagazione di onde marine, di terza generazione. Le equazioni che governano il modello simulano le variazioni, nel tempo e nello spazio, dello stato del mare (onde di superficie) come un processo multidirezionale e multifrequenza.

Il modello implementato presso il DICEA (in seguito indicato come WW3-DICEA) è stato calibrato e verificato specificamente per ottenere la ricostruzione storica e la previsione futura del moto ondoso del Mediterraneo [2]. Il dominio spettrale è stato impostato su 25 frequenze che variano da 0.05Hz a 0.5Hz, corrispondenti rispettivamente ad un periodo massimo e minimo di circa 20 e 2 secondi. Il modello è forzato con i dati di vento del CFSR (*Reanalysis Climate Forecast System*), disponibili dal sito web di NOMADS-NOAA [3].

Il modello WW3-DICEA è stato inizialmente utilizzato a scala dell'intero Mediterraneo (la cosiddetta modellazione di primo livello, in Figura 1), con una risoluzione della griglia è di 0.05° in latitudine e longitudine, corrispondente a circa 5km alle latitudini del Mar Mediterraneo. È stato successivamente realizzato un *downscaling* (modellazione di secondo livello) all'area dell'Alto Mediterraneo (nella zona compresa fra le latitudini 42°N-45°N e le longitudini 7°E-11°E).

I parametri caratteristici del moto ondoso (altezza significativa, direzione di provenienza delle onde, periodo medio e di picco) relativi al periodo 2000-2018 sono ottenuti dal modello con frequenza oraria.

2.2 PROPAGAZIONE A COSTA: MIKE21-SW

I moti ondosi a sono stati propagati a costa tramite il modello spettrale MIKE21-SW, sviluppato dal Danish Hydraulics Institute [4]. Date le caratteristiche del moto ondoso al largo (in termini di altezza, direzione e periodo) e la batimetria dell'area oggetto di studio, il modello MIKE21-SW permette di ricostruire le altezze d'onda

considerando i principali processi di interazione onda-fondale (rifrazione, abbattimento dell'altezza d'onda per effetto del frangimento e attrito al fondo).

Per la ricostruzione dei modelli digitali dei fondali necessari per le simulazioni numeriche sono stati utilizzati i dati forniti dal catalogo cartografico del Geoportale della Regione Liguria [5], integrati mediante i dati del rilievo batimetrico fornito dal Committente e la digitalizzazione delle carte nautiche per quanto riguarda i fondali a profondità maggiore.

Il modello MIKE21-SW è stato utilizzato su una maglia strutturata con risoluzione di 10 m su un dominio di circa 5x5 km intorno a Cala Cravieu.

3 FONTI DEI DATI METEOMARINI

Sono di seguito presentate le fonti dei dati meteomarini (dati ondametrici, mareografici, barometrici e anemometrici) utilizzati nel presente studio. Tali dati sono stati utilizzati sia per l'analisi del clima meteomarino nell'area in esame, sia per la caratterizzazione degli eventi estremi e la validazione dei modelli numerici impiegati per la ricostruzione della mareggiata del 29 ottobre 2018.

3.1 DATI ONDAMETRICI

Sono state recuperate le serie storiche di altezza significativa, direzione e periodo di picco degli ondametri situati nell'area dell'Alto Mediterraneo. Il gestore responsabile del dato, la posizione, il periodo di registrazione dei dati ondametrici e la frequenza di acquisizione degli stessi sono riportati in Tabella 1, Figura 1. In Tabella 2 è indicato il settore di possibile provenienza del moto ondoso al quale è esposto ciascun ondametro.

Tabella 1: Gestore, posizione, periodo di registrazione e frequenza di acquisizione dei dati per gli ondametri utilizzati nel presente studio.

Nome	Gestore	Lat	Long	Periodo di disponibilità dei dati		Frequenza
La Revellata **	CANDHIS	42° 34' 9"N	08° 39' 0"E	02/05/2013	10/07/2018	30 minuti
Cap Corse	CANDHIS	43° 03' 39.6"N	09°16' 30.6"E	16/03/1999	01/03/2011	30 minuti
Monaco **	CANDHIS	43° 42' 48.9"N	07° 25' 34.2"E	29/10/2014	09/07/2018	30 minuti
Nice	CANDHIS	43° 38' 5.7"N	07° 13' 44.7"E	04/06/2002	07/03/2016	30 minuti
Bastia	CANDHIS	42° 40' 26.4"N	09° 27' 16.2"E	13/09/2006	19/11/2008	30 minuti
Alistro **	CANDHIS	42° 15' 42"N	09° 38' 36"E	15/10/2013	23/05/2018	30 minuti
Capo Mele **	ARPAL	43° 55' 18"N	08° 10' 50"E	23/02/2012	ad oggi	30 minuti
Giannutri **	CFR	42° 14' 00.74"N	11° 02' 41.11" E	26/05/2009	7/12/2018	30 minuti
Gorgona **	CFR	43° 34' 05.6" N	09° 57' 21.37" E	01/10/2008	7/12/2018	30 minuti
Gombo **	CFR	43°43'33.96"N	10°15'11.40" E	29/07/2011	8/12/2018	30 minuti
La Spezia	ISPRA-RON	43°55.7' N	9°49.6' E	01/07/1989	23/01/2015	30 min / 3 ore
** Ondametri in per i quali sono disponibili i dati di registrazione della mareggiata del 29 ottobre 2018						

Tabella 2: Settore di possibile provenienza del moto ondoso per gli ondametri utilizzati nel presente studio.

Nome	Gestore	Lat	Long	SETTORE (inizio-fine)
La Revellata **	CANDHIS	42° 34’ 9’’N	08° 39’ 0’’E	190°N – 60°N
Cap Corse	CANDHIS	43° 03’ 39.6’’N	09°16’ 30.6’’E	210°N – 130°N
Monaco **	CANDHIS	43° 42’ 48.9’’N	07° 25’ 34.2’’E	70°N - 230°N
Nice	CANDHIS	43° 38' 5.7’’N	07° 13’ 44.7’’E	70°N – 220 °N
Bastia	CANDHIS	42° 40’ 26.4’’N	09° 27’ 16.2’’E	10°N – 150°N
Alistro **	CANDHIS	42° 15’ 42’’N	09° 38' 36’’E	350°N – 175°N
Capo Mele **	ARPAL	43° 55’ 18’’N	08° 10’ 50’’E	35°N – 235°N
Giannutri **	CFR	42° 14' 00.74"N	11° 02' 41.11" E	125°N – 330°N
Gorgona **	CFR	43° 34' 05.6" N	09° 57' 21.37" E	120°N – 350°N
Gombo **	CFR	43°43'33.96"N	10°15'11.40" E	170°N – 310°N
La Spezia	ISPRA-RON	43°55.7’ N	9°49.6’ E	150°N – 310°N

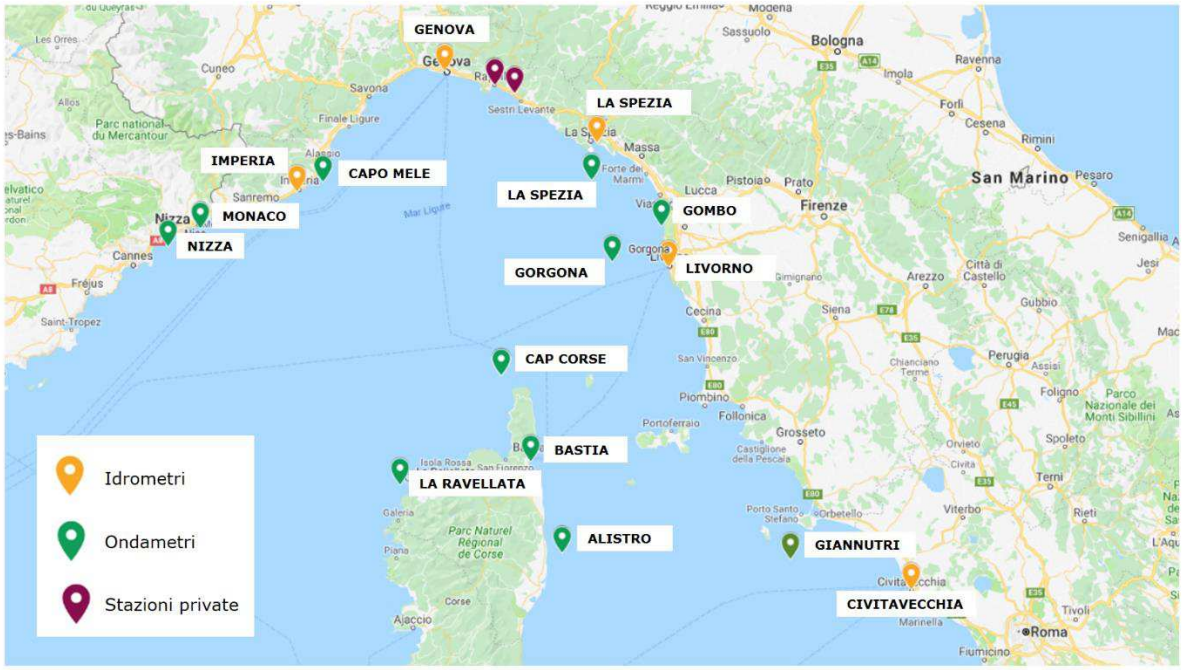


Figura 1: Localizzazione delle stazioni di misura utilizzate nel presente studio: ondametri, mareografi, stazioni meteo private.

3.2 DATI BAROMETRICI, MAREOGRAFICI E ANEMOMETRICI

Oltre ai dati ondametrici, un ulteriore parametro di importanza primaria per la ricostruzione della mareggiata, in quanto fondamentale nella determinazione dell'effettiva azione sollecitante indotta dalla mareggiata stessa sulle strutture a costa, è il livello del mare in prossimità del paraggio in esame.

Ai fini del presente studio, le principali cause di variazione del livello del mare possono essere ricondotte alle seguenti: variazioni della pressione atmosferica, effetto dei venti foranei, sopralzo dovuto a moti ondosi frangenti (il cosiddetto "set-up") ed escursioni mareali. La principale fonte di dati barometrici e di livello utilizzata nel presente studio è costituita dalle stazioni delle Rete Mareografica Nazionale, gestite da ISPRA (*Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale*). In particolare, si è fatto riferimento alle registrazioni dei mareografi di Imperia, Genova, La Spezia, Livorno, Porto Torres e Civitavecchia Figura 1, Tabella 3), sia per caratterizzare l'evento del 29 ottobre 2018, sia per contestualizzare tale evento nell'ambito delle serie storiche di registrazioni disponibili.

Tabella 3: Gestore, posizione, periodo di registrazione dei mareografi utilizzati nel presente studio.

Nome	Gestore	Lat	Long	Periodo di disponibilità dei dati	
Imperia	ISPRA	43°52' 42.02''N	08° 01' 07.91''E	01/01/2010	ad oggi
Genova	ISPRA	44° 24' 36.46''	08° 55' 31.86''E	01/01/2010	ad oggi
La Spezia	ISPRA	44° 05' 47.8''N	09° 51' 27.52''E	01/01/2010	23/01/2015
Livorno	ISPRA	43° 32' 46.63''N	10° 17' 57.62''E	01/01/2010	ad oggi
Porto Torres	ISPRA	40° 50' 31.94''N	08° 24' 14.09''E	01/01/2010	ad oggi
Civitavecchia	ISPRA	42° 05' 38.25''N	11° 47' 22.73''E	01/01/2010	ad oggi

4 DESCRIZIONE DEL PARAGGIO IN ESAME

4.1 SETTORI DI TRAVERSIA

La zona al largo di Cala Cravieu è aperta ai moti ondosi provenienti da un settore di traversia ampio circa 80°, che parte dai 135°N e arriva fino ai 215°N. Questo settore può essere utilmente suddiviso nei tre sotto-settori seguenti, in ragione delle differenti peculiarità dei relativi moti ondosi (vedi paragrafo 4.3) in termini sia di intensità che di frequenza (Figura 2):

1) 150°N-185°N, il settore di traversia principale;
2) 185°N-215°N, un primo settore di traversia secondario;
3) 135°N-150°N, un secondo settore di traversia secondario.

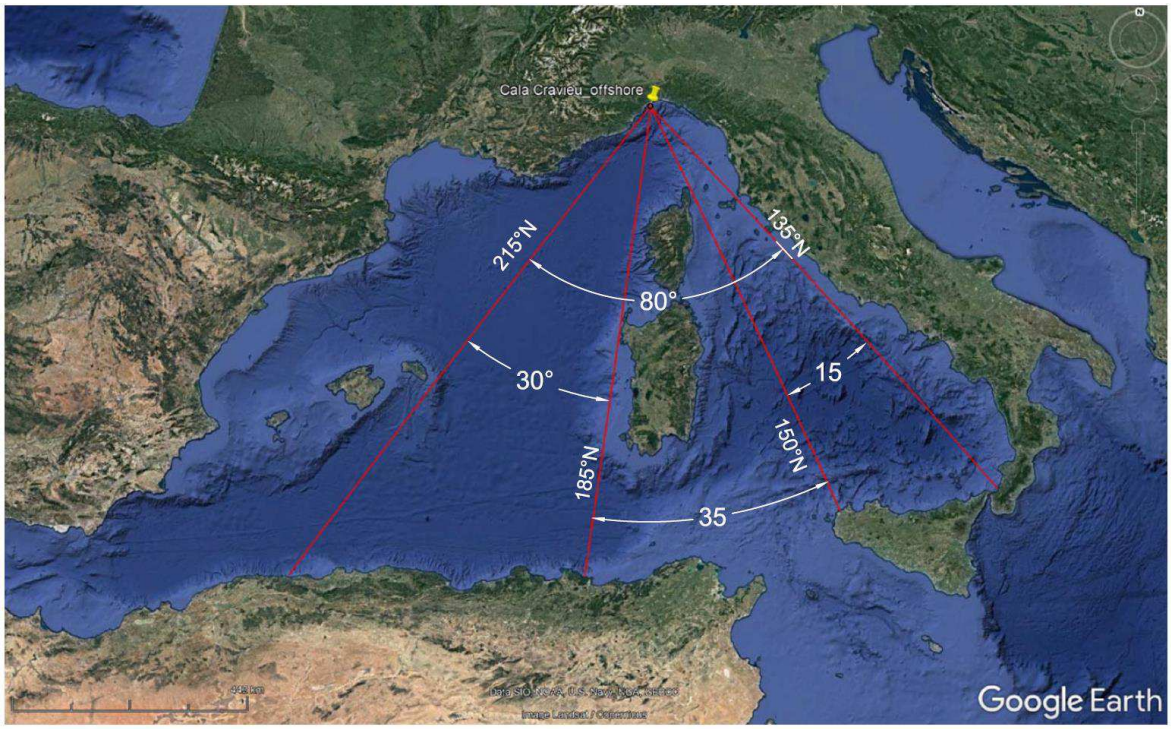


Figura 2: Settori di traversia principale e secondario per il paraggio in esame (elaborazione di un'immagine da fonte Google Earth).

Il settore di traversia principale, compreso tra 150-185°N, è limitato ad ovest dalla Sardegna e ad Est dalla Corsica, vede quindi fetch geografici piuttosto limitati, con un'estensione massima pari a 380 km circa ad ovest e 160 km circa ad est. Su tale settore, tuttavia, insistono venti frequenti e intesi (Figura 6 e Figura 7). I fetch

efficaci massimi, inoltre, si hanno per le direzioni comprese all'interno di questo settore principale (Tabella 4).

Il settore secondario 185°N-215°N è delimitato dalla Corsica e dalla Sardegna in corrispondenza dei 185°N e dalla costa Ligure, con punto di tangenza vicino a Imperia, in corrispondenza dei 215°N; il settore è per buona parte completamente libero da schermature dovute ad isole e terre emerse in generale. I fetch geografici del settore principale raggiungono i 900 km, arrivando fino alle coste del Nord Africa. Il secondo settore secondario, compreso fra 150-135°N, vede fetch geografici sono limitati dalle isole dell'arcipelago toscano. Nonostante le schermature, le lunghezze dei fetch geografici sono, anche in questo settore secondario, rilevanti (superiori agli 800 km).

4.2 FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI

Il fetch efficace rende conto delle variazioni dei fetch geografici in direzioni adiacenti, nonché della variabilità nella direzione del vento, al fine di fornire una migliore rappresentazione dell'area complessiva di generazione delle onde. Per la determinazione dei fetch efficaci è stata utilizzata la procedura proposta da Saville [6]. Il metodo di Saville si basa sulle seguenti ipotesi:

(i) il vento trasferisce energia alla superficie del mare nella propria direzione di provenienza e in tutte quelle appartenenti ad un settore con ampiezza di circa ±45° rispetto a tale direzione di provenienza;

(ii) l'energia trasmessa dal vento lungo le varie direzioni è proporzionale al coseno dell'angolo formato da ogni direzione rispetto a quella di provenienza del vento, elevato ad una data potenza *n*;

(iii) le onde sono completamente assorbite nell'impatto con le linee di costa.

Il fetch efficace per un'assegnata direzione *i*, $F_{eff,i}$, è dato da una media pesata dei fetch geografici (equidistanziati di 5° in un intorno di 45° a destra ed a sinistra della direzione in esame) ai quali si attribuisce un peso pari al $\cos^n(\Theta)$ (Eq. 1).

$$F_{eff,i} = \frac{\sum F_\Theta \cdot \cos^n(\Theta)}{\sum \cos^{n-1}(\Theta)} \qquad (1)$$

dove F_Θ è la lunghezza del fetch geografico corrispondente alla direzione Θ per la quale si calcola il fetch efficace. Nel calcolo dei fetch efficaci, qualora i fetch geografici siano maggiori di 600 km, questi sono stati limitati a tale valore massimo, inteso come il limite superiore della dimensione delle perturbazioni atmosferiche responsabili del processo di generazione del moto ondoso che nel Mediterraneo. I fetch efficaci così calcolati sono riportati in Figura 4 e Tabella 4.

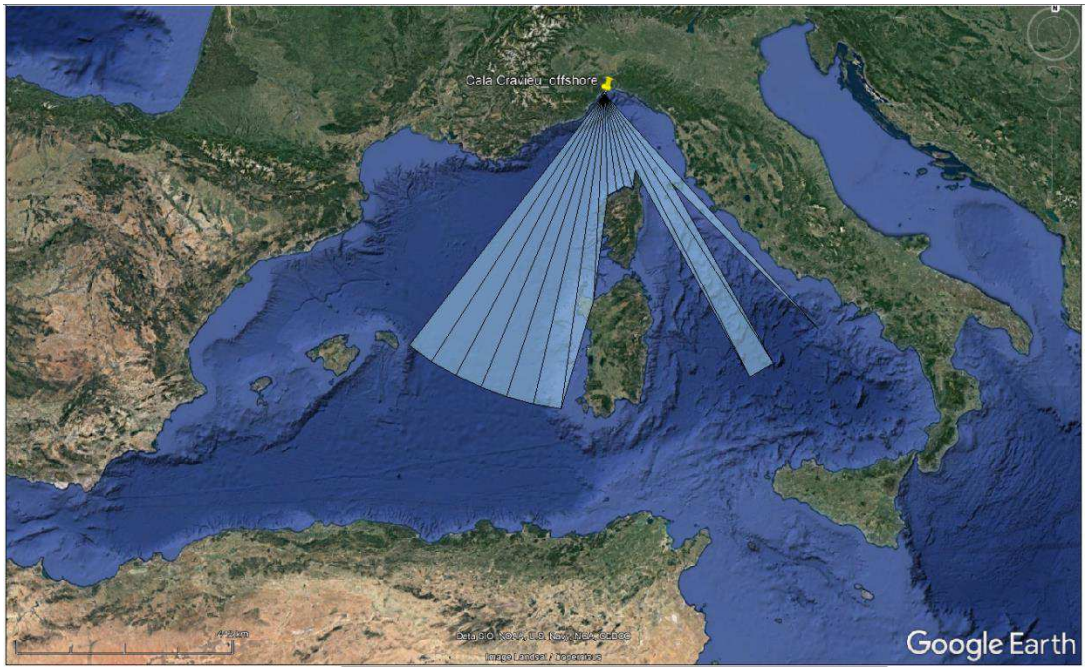


Figura 3: Fetch geografici con estensione massima limitata a 600 km per l'area di Cala Cravieu (SV) (elaborazione di un'immagine da fonte Google Earth).



Figura 4: Fetch efficaci per l'area di Cala Cravieu (SV) (elaborazione di un'immagine da fonte Google Earth).

Tabella 4: Fetch geografici ed efficaci al largo di Cala Cravieu (SV).

Direzione [°N]	Fetch geografico [km]	Fetch efficace [km]
215	600	263
210	600	286
205	600	304
200	600	318
195	600	336
190	600	352
185	600	357
180	387	367
175	190	361
170	185	351
165	178	326
160	186	300
155	155	274
150	600	249
145	600	223
140	210	198
135	600	173

4.3 CLIMA METEOMARINO AL LARGO

L'analisi del clima meteomarino al largo è stata condotta con riferimento al punto di coordinate 44.30°N (latitudine), 8.55°E (longitudine), detto nel seguito «al largo di Cala Cravieu». Tale punto è situato ad una distanza dalla costa di circa 4 km, su un fondale con profondità di circa 100 m (Figura 5).

Per l'analisi di venti caratteristici in mare aperto all'interno dell'area di generazione relativa al paraggio in esame, si è fatto riferimento ai dati di vento forniti dal CFSR (*Reanalysis Climate Forecast System*) dell'agenzia federale statunitense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Il clima ondoso nel punto al largo di Cala Cravieu è stato caratterizzato tramite l'applicazione del modello WW3-DICEA (descritto in *Sezione 2.1).* della presente relazione), che ha permesso di ottenere dati orari di altezze d'onda significative (H_{m0}), direzione di provenienza delle onde (Dir), periodo $T_{m-1,0}$, e periodo di picco T_p relativi al periodo 2000-2018.

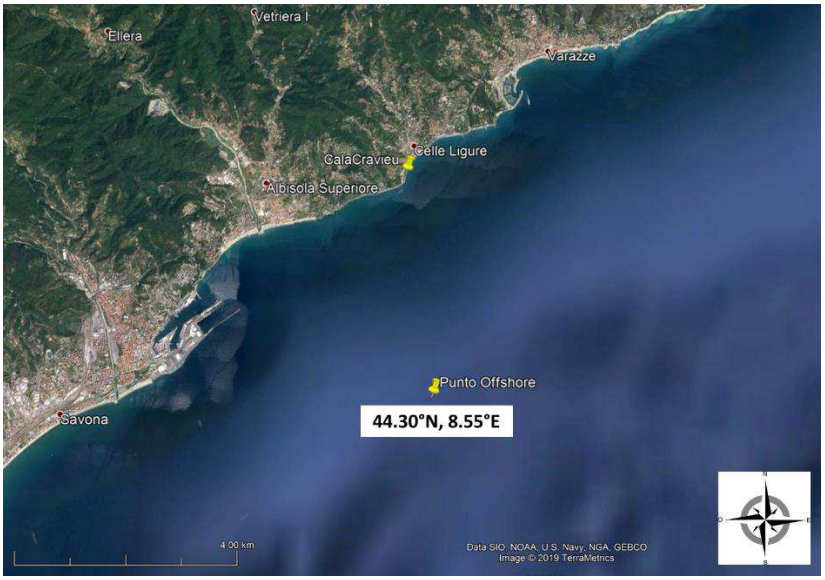


Figura 5: Localizzazione del punto utilizzato quale riferimento per la determinazione delle condizioni meteomarine al largo di Cala Cravieu (SV).

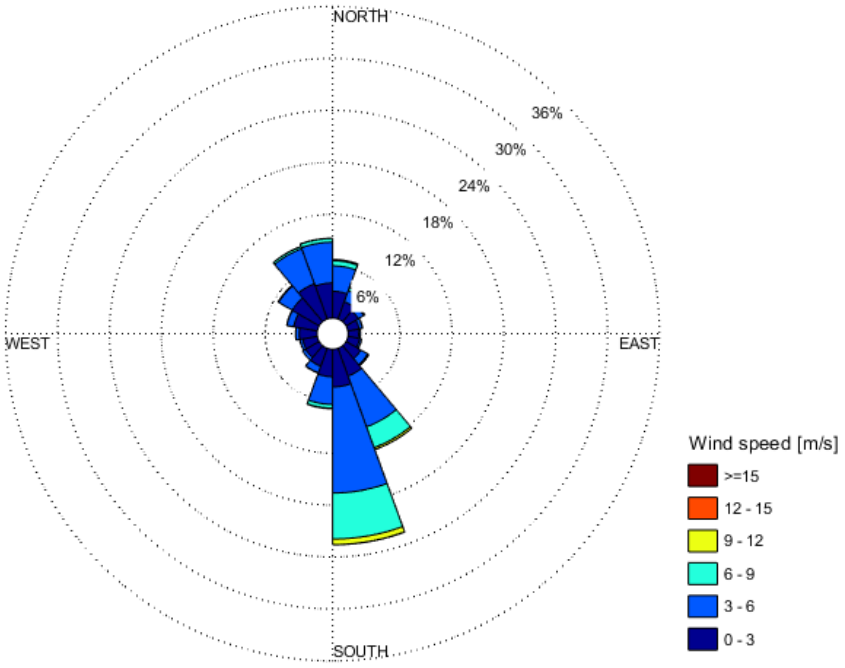


Figura 6: Distribuzione annuale di direzionale e intensità dei venti al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 20°.

I venti foranei più intensi e più frequenti nel punto al largo di Cala Cravieu (Figura 6) provengono primariamente dai settori 140-160°N, centrato sui 150°N (per il 12% del tempo circa) e 160-180°N, centrato sui 170°N (per il 24% del tempo). Durante la stagione invernale (Figura 7), i venti hanno direzione di provenienza compresa fra 140-180°N con frequenza ancora maggiore (complessivamente per circa il 50% del tempo circa). In estate, i venti hanno intensità massime inferiori a 9 m/s e provengono con maggiore frequenza dalle direzioni 300-360°N (Figura 7).

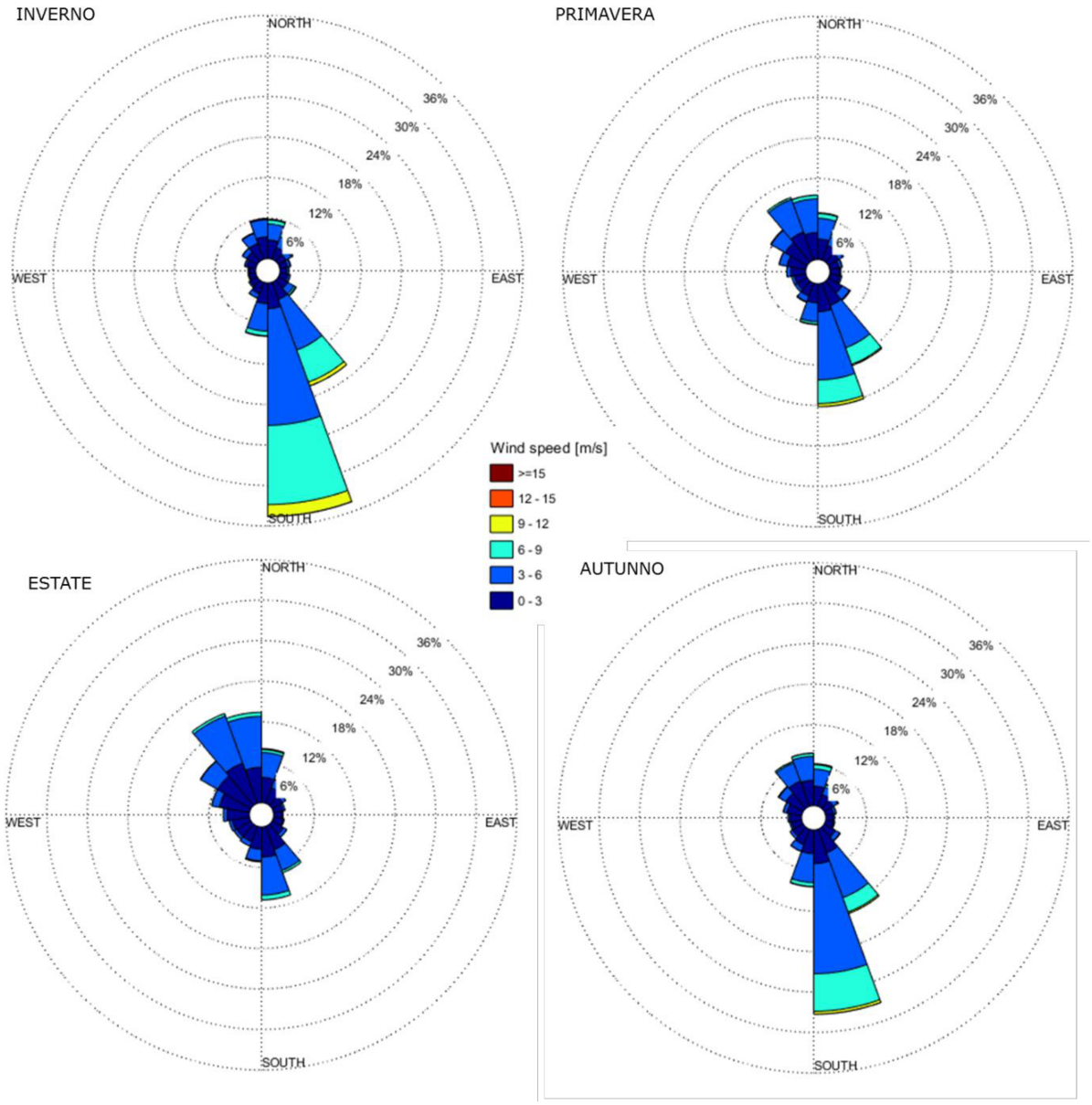


Figura 7: Distribuzione stagionale di direzionale e intensità dei venti al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 20°.

I moti ondosi più intensi provengono dal settore di traversia principale 150°N-185°N, dal quale le onde provengono per oltre il 30% del tempo (Figura 8). In maggior dettaglio, i moti ondosi più frequenti provengono dal settore di apertura 30° centrato sui 180°N (Figura 8 e Figura 9, Tabella 5), dal quale le onde provengono il 46% circa del tempo), e dal settore di apertura 30° centrato sui 150°N (34.12% del tempo). Onde con altezza significativa maggiore di 4 m provengono soltanto da questi due settori. In particolare, i moti ondosi più intensi possono superare i 5m di altezza significativa (con periodi di picco T_p compresi fra 10 e 12s, Tabella 6).

Si nota, inoltre, che dai settori centrati sui 120°N, 150°N, 180°N e 210°N possono provenire anche moti ondosi con altezza significativa di circa 4 m e periodi di picco fino a 12 s (Tabella 5, Tabella 6 e Tabella 7). Moto ondosi con periodi così lunghi possono determinare condizioni particolarmente critiche nei confronti della tracimazione delle opere marittime.

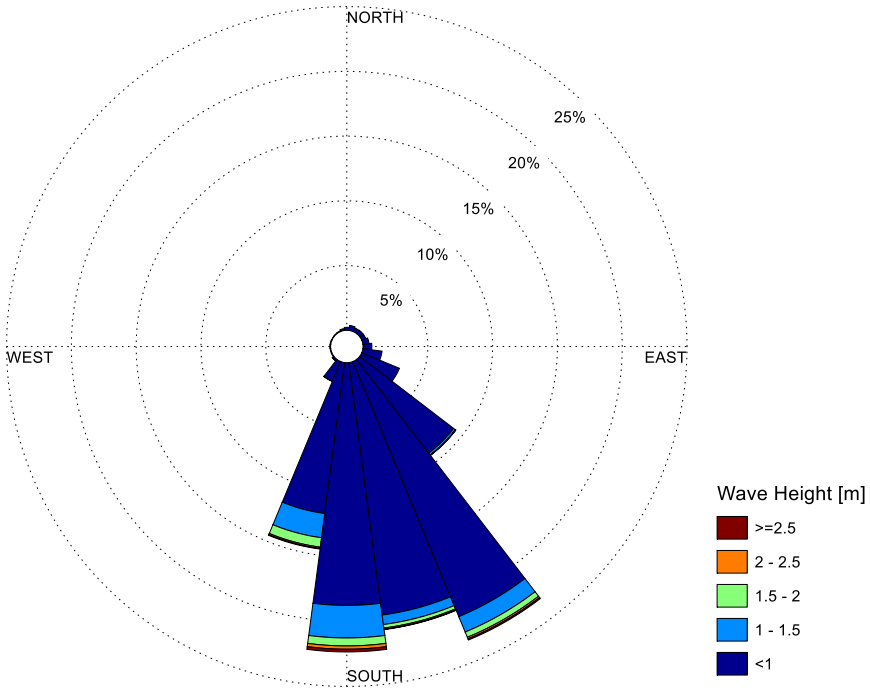


Figura 8: Rosa delle onde annuale al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°.

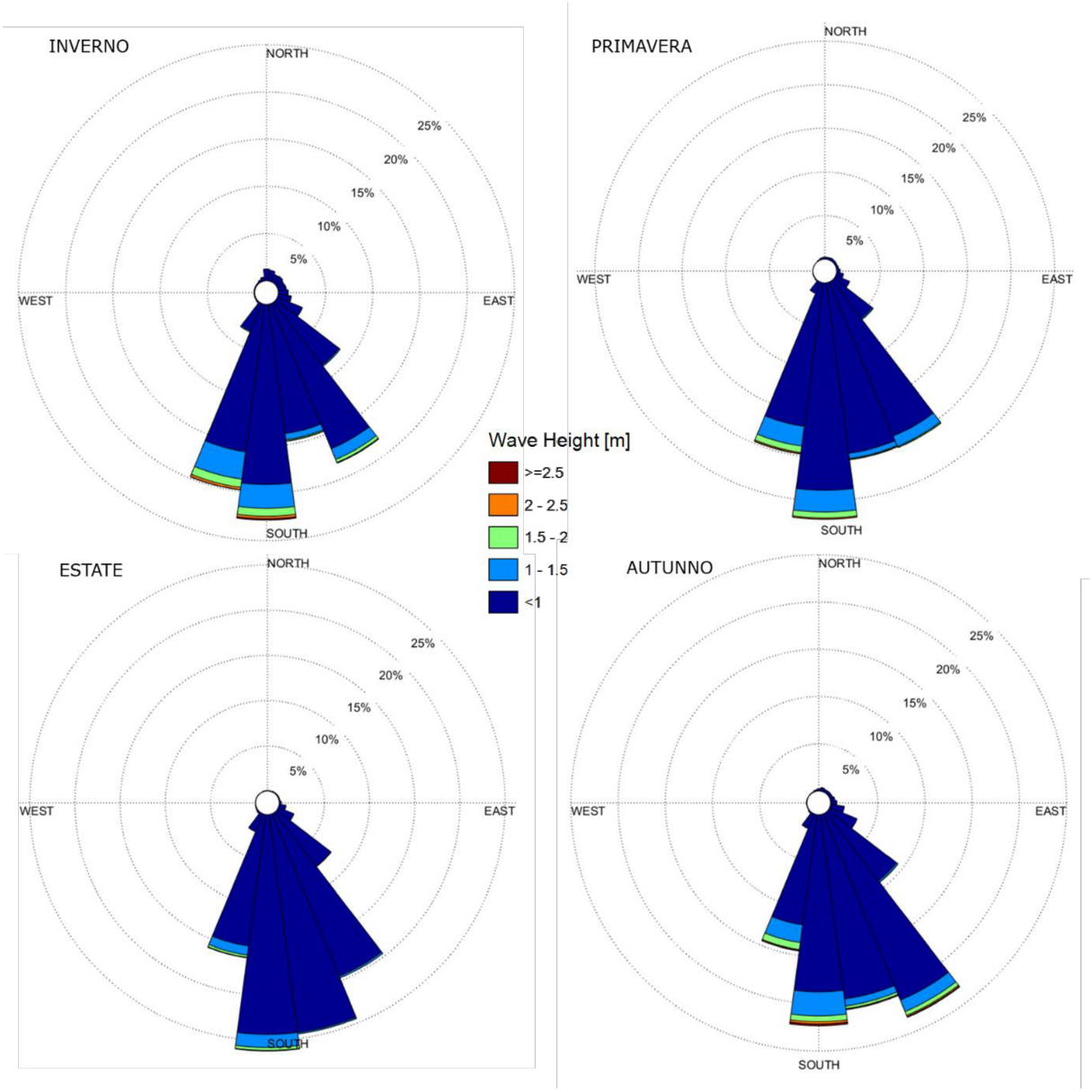


Figura 9: Rose delle onde stagionali al largo di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°.

Tabella 5: Clima ondoso meteomarino al largo di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)							
DIR (°N)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	**TOTALE**
0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.8**
30.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.8**
60.0	0.8	*	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.8**
90.0	1.3	*	0.0	0.0	0.0	0.0	**1.3**
120.0	5.7	*	0.0	*	*	0.0	**5.7**
150.0	34.1	1.7	0.1	*	*	*	**35.9**
180.0	40.4	5.3	0.4	*	*	*	**46.2**
210.0	7.4	0.6	*	*	0.0	0.0	**8.0**
240.0	0.2	*	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.2**
270.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.1**
300.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.1**
330.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.2**
TOTALE	**91.8**	**7.6**	**0.5**	**0.0**	**0.0**	*	**100.0**

* Percentuale < 0.01

Tabella 6: Clima ondoso meteomarino al largo di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di periodo e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)							
T_p (s)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	**TOTALE**
< 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
2 – 4	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**24.8**
4 – 6	44.5	0.3	*	0.0	0.0	0.0	**44.9**
6 – 8	14.0	4.0	0.1	*	0.0	0.0	**18.1**
8 – 10	6.7	2.6	0.3	*	*	0.0	**9.7**
10 – 12	1.6	0.6	0.1	*	*	*	**2.3**
12 – 14	0.2	0.1	*	0.0	0.0	0.0	**0.2**
>14	*	*	0.0	0.0	0.0	0.0	*****
TOTALE	**91.8**	**7.6**	**0.5**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**100.0**

Tabella 7: Clima ondoso meteomarino al largo di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e periodi d'onda.

	Periodo di picco T_p (s)								
Dir (°N)	< 2	2 – 4	4 – 6	6 – 8	8 – 10	10 – 12	12 – 14	>14	**TOTALE**
0	0.0	0.7	*	*	*	*	*	0.0	**0.8**
30	0.0	0.6	0.0	0.1	*	*	*	0.0	**0.8**
60	0.0	0.5	0.1	0.1	*	*	*	0.0	**0.8**
90	0.0	0.8	0.3	0.1	*	*	*	0.0	**1.3**
120	0.0	3.1	2.1	0.4	0.1	*	*	0.0	**5.7**
150	0.0	10.0	19.2	4.9	1.5	0.3	*	*	**35.9**
180	0.0	7.1	20.9	11.2	5.9	1.0	0.1	*	**46.2**
210	0.0	1.6	2.2	1.2	1.9	1.0	0.1	*	**8.0**
240	0.0	0.1	0.1	*	*	*	*	*	**0.2**
270	0.0	*	*	*	*	*	*	0.0	**0.1**
300	0.0	0.1	*	*	*	*	0.0	0.0	**0.1**
330	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.2**
TOTALE	**0.0**	**24.8**	**44.9**	**18.1**	**9.7**	**2.3**	**0.2**	**0.0**	**100.0**

* Percentuale < 0.01

4.4 MOTO ONDOSO A COSTA

L'analisi del clima meteomarino in prossimità della costa è stata condotta con riferimento ai seguenti punti (Figura 10):

(i) Punto con latitudine 44°20'13''N, longitudine 8°32'45''E, su un fondale di 10 m, ad una distanza di circa 200 m dalla diga di Cala Cravieu;

(ii) Punto con latitudine 44°20'13''N, longitudine 8°32'37''E, su un fondale di circa 6 m, posto in prossimità del piede della diga di Cala Cravieu.

Nelle propagazioni del moto ondoso a costa, è stato considerato cautelativamente un sopralzo di 0.7 m, come richiesto dal Committente.

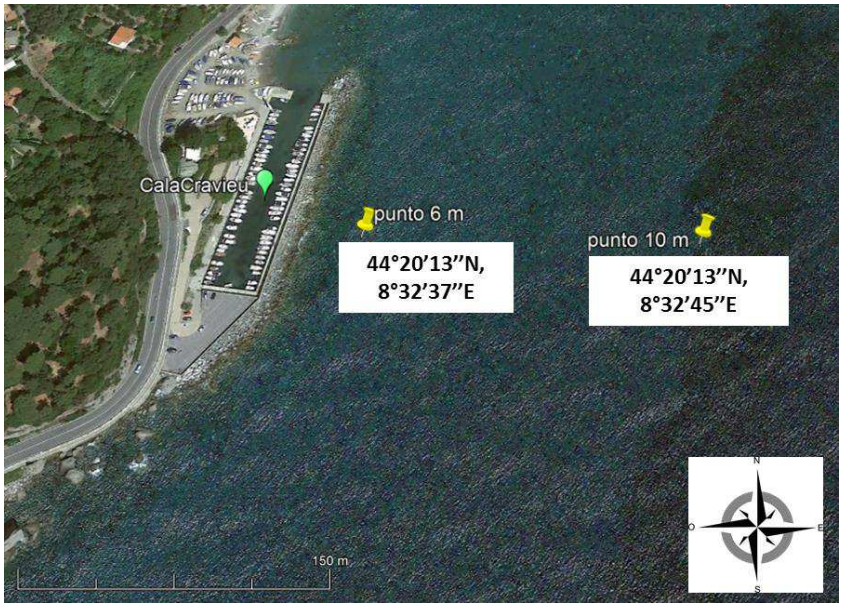


Figura 10: Localizzazione dei punti utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso in prossimità della diga di Cala Cravieu (SV).

La ricostruzione del moto ondoso in tali punti è stata effettuata propagando verso costa la serie storica di dati orari dei moti ondosi al largo relativi al periodo 2000-2018 con il modello MIKE21-SW (*Sezione 2.2*)[1]. Un esempio di tale propagazione è fornito in Figura 11.

[1] Sono stati propagati a costa i moti ondosi orari relativi al periodo 2000-2018, per come analizzati nel precedente paragrafo, con esclusione di quelli con altezza significativa inferiore a 1 m e periodo inferiore a 4 s o superiore a 20 s.

Il modello utilizzato consente di tener conto dei processi trasformazione dell'onda nella propagazione a costa dovuti a rifrazione, abbattimento dell'altezza d'onda per effetto del frangimento e attrito al fondo.

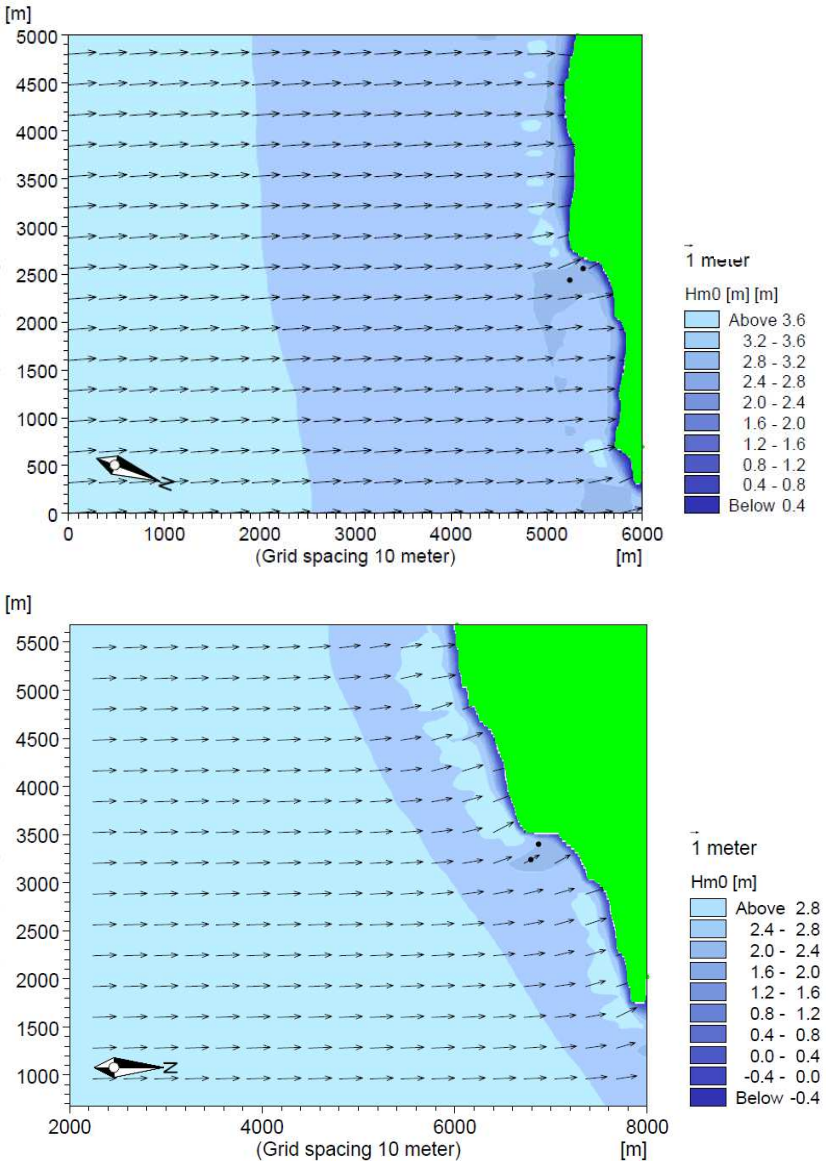


Figura 11: Altezza significativa e direzione del moto ondoso nella propagazione dal largo a costa per due moti ondosi esemplificativi, con: altezza al largo H_{m0}=3.8 m, T_p=10.2 s e direzione di provenienza 156°N (in altro) e altezza al largo H_{m0}=3.0 m, T_p=9.5 s e direzione di provenienza 176°N (in basso). Puti in nero: punti di estrazione per l'analisi del moto ondoso a costa.

4.4.1 **Moto sui fondali con profondità di 10 m**

Il moto ondoso nei fondali a profondità 10 m antistanti la diga di Cala Cravieu (punto con latitudine 44°20’13’’N, longitudine 8°32’45’’E) ha provenienza principale dal settore 135-165°N (centrato sui 150°N), dal quale le onde provengono per oltre il 95% del tempo circa (Tabella 8).

La simulazione della propagazione dei moti ondosi dal largo a costa rivela l’effetto di marcati fenomeni di rifrazione che intervengono prima che le onde raggiungano Cala Cravieu (evidenti, soprattutto, per le onde con direzione al largo di 170-215°N). Tali fenomeni portando i fronti d’onda ad avere direzione prossima a quella delle dighe foranee.

Gli effetti congiunti di rifrazione, frangimento e attrito al fondo determinano un abbassamento considerevole dell’altezza d’onda rispetto ai valori al largo. Sui fondali aventi profondità di circa 10 m le massime altezze d’onda significative per il periodo 2000-2018 risultano di circa 4.5 m (Tabella 8). Onde con altezza significativa maggiore di 2 m hanno una frequenza percentuale inferiore al 2%.

Le tabelle bivariate di periodi di picco e altezze d’onda significativa a costa sono riportate in Tabella 9, le tabelle bivariate di direzione e periodo in Tabella 10.

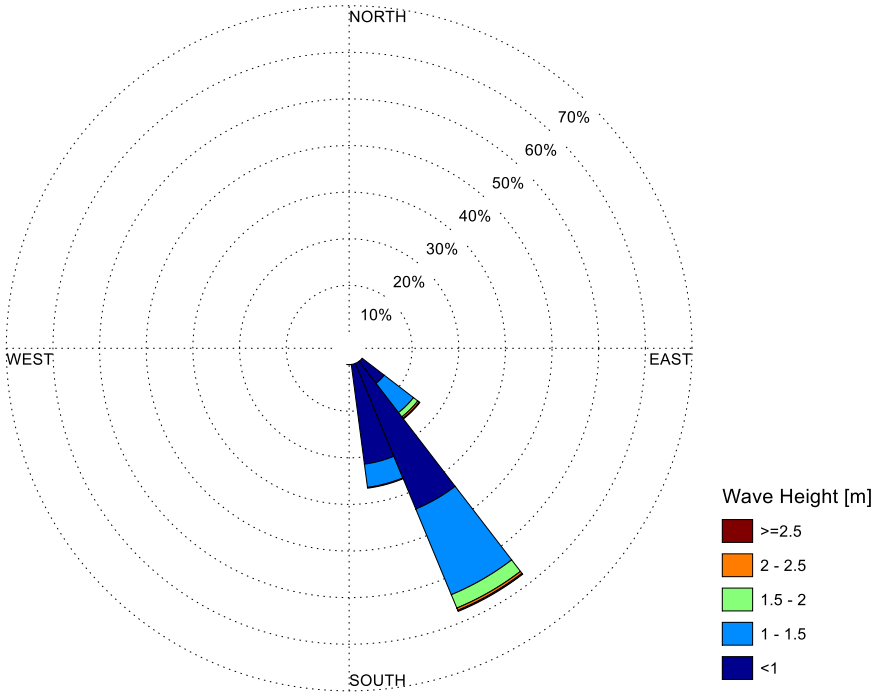


Figura 12: Rosa delle onde annuale sui fondali a profondità 10 m antistanti la diga di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°.

Tabella 8: Clima ondoso meteomarino sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)						
DIR (°N)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	**TOTALE**
60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
120.0	0.1	*	*	*	0.0	**0.1**
150.0	59.9	36.7	1.2	0.1	*	**97.9**
180.0	1.4	0.6	*	*	0.0	**2.0**
210.0	*	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**61.4**	**37.3**	**1.2**	**0.1**	**0.0**	**100.0**

* Percentuale < 0.01

Tabella 9: Clima ondoso meteomarino sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di periodo e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)						
T_p (s)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	**TOTALE**
4 – 6	11.8	4.2	0.0	0.0	0.0	**16.0**
6 – 8	44.7	25.0	0.2	*	0.0	**69.9**
8 – 10	4.5	7.6	0.9	0.1	0.0	**13.1**
10 – 12	0.3	0.4	*	0.0	0.0	**0.8**
12 – 14	*	*	0.0	0.0	0.0	**0.1**
>14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**61.4**	**37.3**	**1.2**	**0.1**	**0.0**	**100.0**

* Percentuale < 0.01

Tabella 10: Clima ondoso meteomarino sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e periodi d'onda.

	Periodo di picco T_p (s)						
Dir (°N)	4 – 6	6 – 8	8 – 10	10 – 12	12 – 14	>14	**TOTALE**
60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
120	0.1	*	*	*	0.0	0.0	**0.1**
150	13.9	69.9	13.1	0.8	0.1	0.0	**97.9**
180	2.0	*	*	0.0	0.0	0.0	**2.0**
210	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**16.0**	**69.9**	**13.1**	**0.8**	**0.1**	**0.0**	**100.0**

4.4.2 **Moto ondoso a costa sui fondali a profondità 6 m**

Il moto ondoso propagatosi fino ai fondali con profondità 6 m, nel punto di coordinate 44°20’13’’N, 8°32’37’’E al piede della diga di Cala Cravieu, mostra un ulteriore rotazione verso est dei fronti d’onda rispetto a quanto osservato sui fondali di 10 m (paragrafo 4.4.1). In particolare, la frequenza relativa delle onde provenienti dal settore angolare di apertura 15° centrato sui 160°N passa dal 25% sui fondali di 10 m (Figura 12) al 3% sui fondali di 6 m (Figura 13), mentre quella delle onde provenienti dal settore di 15° centrato sui 135°N aumenta dal 15% (fondale di 10 m) al 27% (fondale di 6 m).

Complessivamente, sul fondale di 6 m, i moti ondosi hanno provenienza principale dal settore centrato sui 150°N, dal quale le onde provengono per oltre l’89% del tempo (Tabella 11). Su tale fondale, le massime altezze d’onda significative per il periodo 2000-2018 risultano di circa 4 m (Tabella 11).

Onde con altezza significativa maggiore di 2 m giungono a costa con una frequenza percentuale inferiore al 2%. Le tabelle bivariate annuali di periodi di picco e altezze d’onda significativa sono riportate in Tabella 12, quelle bivariate di direzione e periodo in Tabella 13. Onde con altezza significativa fino a 4 m posso verificarsi in corrispondenza di periodi di picco fino a 12 s (Tabella 12).

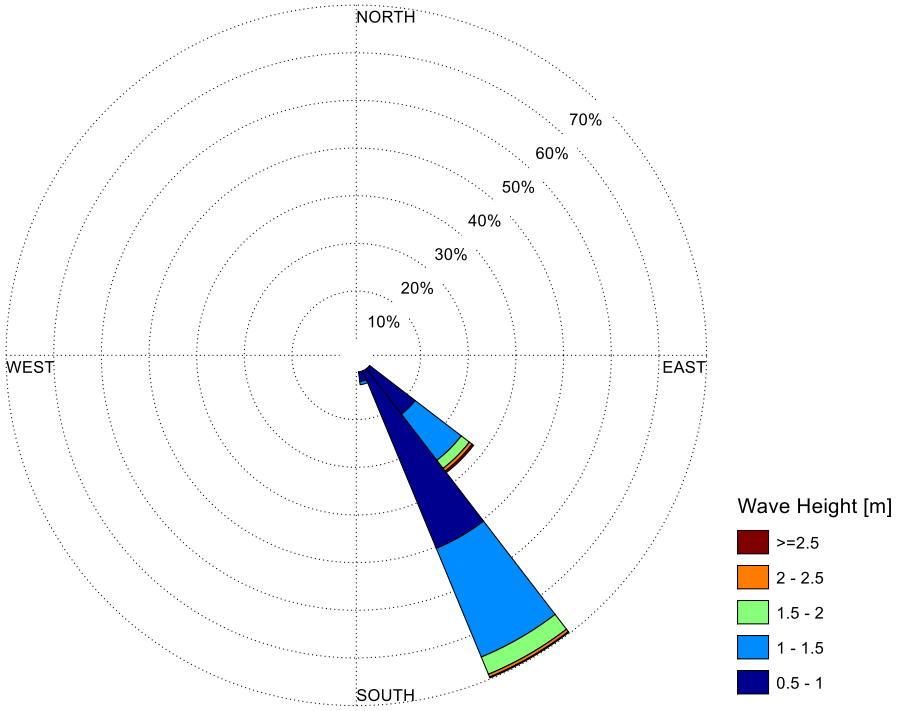


Figura 13: Rosa delle onde annuale sui fondali a profondità 6 m antistanti la diga di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°.

La diga di Cala Cravieu si estende in direzione 37°N per i primi 50 m in prossimità della radice (nel tratto sovrastante l'attuale area parcheggi), mentre per i successivi 140 m la diga ha direzione 9°N circa (Figura 10). È da notare come la direzione principale di provenienza del moto ondoso al piede della diga (i.e. dal settore 130-160°N) risulti inclinata di 30°-60° rispetto alla direzione perpendicolare alla diga stessa.

Tabella 11: Clima ondoso annuale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda.

	Altezza significativa H_{m0} (m)				
Dir (°N)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	TOTALE
90.0	*	*	0.0	0.0	*
120.0	3.6	6.5	0.4	0.1	10.6
150.0	50.9	37.1	1.4	0.1	89.4
180.0	*	0.0	0.0	0.0	*
210.0	*	*	0.0	0.0	
TOTALE	54.5	43.6	1.8	0.2	100.0

Tabella 12: Clima ondoso annuale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di periodo e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)						
T_p (s)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	**TOTALE**
4 – 6	12.2	3.9	0.0	0.0	0.0	**16.0**
6 – 8	38.8	30.7	0.4	0.0	0.0	**69.9**
8 – 10	3.2	8.5	1.3	0.1	0.0	**13.1**
10 – 12	0.3	0.4	0.0	*	0.0	**0.8**
12 – 14	*	*	0.0	0.0	0.0	**0.1**
>14	0.0	*	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**54.5**	**43.6**	**1.8**	**0.2**	**0.0**	**100.0**

*percentuale minore di 0.1%

Tabella 13: Clima ondoso annuale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e periodi d'onda.

Periodo di picco T_p (s)							
Dir (°N)	4 – 6	6 – 8	8 – 10	10 – 12	12 – 14	>14	**TOTALE**
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
120.0	1.6	6.5	1.9	0.6	0.1	0.0	**10.6**
150.0	14.4	63.5	11.2	0.2	0.0	0.0	**89.4**
180.0	*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	*****
210.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**16.0**	**69.9**	**13.1**	**0.8**	**0.1**	**0.0**	**100.0**

*percentuale minore di 0.1%

La serie temporale dei dati d'onda propagata fino al fondale di 6 m è stata analizzata anche tenendo conto della stagionalità (Figura 14, Tabella 14, Tabella 15, Tabella 16, Tabella 17).

Le stagioni dell'anno (stagioni meteorologiche) si intendono così suddivise:

- Inverno: dicembre-gennaio-febbraio;
- Primavera: marzo-aprile-maggio;
- Estate: giugno-luglio-agosto;
- Autunno: settembre-ottobre-novembre.

In inverno (Tabella 14) e in autunno (Tabella 17) la direzione prevalente delle onde si conferma essere dal settore 130-160°N, con l'88% e l'80% degli eventi registrati, rispettivamente. In queste stagioni, le massime altezze significative registrate sono di circa 4 m. La frequenza di accadimento di altezze d'onda comprese fra i 3 e i 4 m è dello 0.2% circa.

In primavera (Tabella 15) e in estate (Tabella 16) le onde provengono dal settore 130-160°N con frequenza superiore al 90%. Le massime altezze significative sono inferiori ai 3 m: il massimo registrato nel periodo 2000-2018 è di 2.15 m in estate e 2.2 m in primavera. La frequenza di accadimento di altezze d'onda comprese fra i 2 m e i 3 m è dello 0.4%. In queste stagioni, sui fondali di 6 m, si sono verificati periodi di picco fino ai 13 s circa.

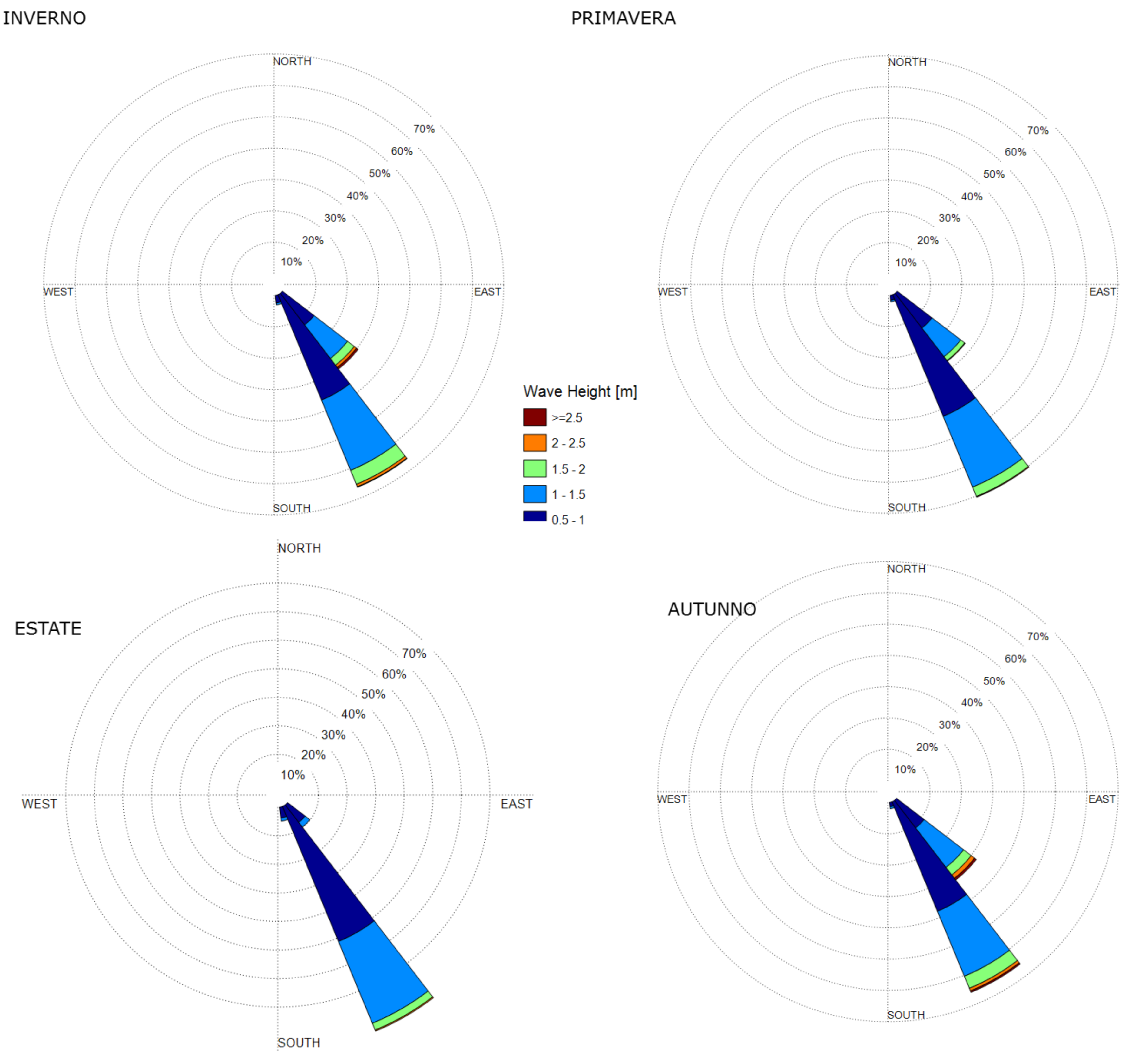


Figura 14: Rose delle onde stagionali sui fondali a profondità 6 m antistanti la diga di Cala Cravieu (SV). Settori angolari di apertura pari a 15°.

Tabella 14: Clima ondoso invernale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)					
DIR (°N)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	**TOTALE**
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
120.0	3.8	7.2	0.4	0.1	**11.6**
150.0	47.7	38.7	1.9	0.2	**88.4**
180.0	*	0.0	0.0	0.0	*
210.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**51.6**	**45.9**	**2.3**	**0.2**	**100.0**

*percentuale minore di 0.1%

Tabella 15: Clima primaverile a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)					
DIR (°N)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	**TOTALE**
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
120.0	3.4	5.9	0.1	0.0	**9.7**
150.0	54.6	35.2	0.4	0.0	**90.3**
180.0	*	0.0	0.0	0.0	**
210.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0**
TOTALE	**57.8**	**35.3**	**0.4**	**0.0**	**100.0**

*percentuale minore di 0.1%

Tabella 16: Clima estivo a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)					
DIR (°N)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	**TOTALE**
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
120.0	1.5	0.8	*	0.0	**2.3**
150.0	61.3	36.0	0.4	0.0	**97.7**
180.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
210.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**62.8**	**36.7**	**0.4**	**0.0**	**100.0**

*percentuale minore di 0.1%

Tabella 17: Clima autunnale a costa, sui fondali a profondità 6 m al piede della diga di Cala Cravieu (SV): Frequenza percentuale relativa a classi di direzione e altezza d'onda.

Altezza significativa H_{m0} (m)					
DIR (°N)	0 – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	**TOTALE**
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
120.0	3.8	7.2	0.4	*	**11.5**
150.0	47.7	38.6	1.9	0.2	**80.4**
180.0	*	0.0	0.0	0.0	**
210.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
TOTALE	**51.6**	**45.8**	**2.3**	**0.2**	**100.0**

4.5 LIVELLI DEL MARE E PRESSIONI ATMOSFERICHE

L'efficacia di un'opera marittima nei confronti della tracimazione del moto ondoso e dell'agitazione interna ad un bacino portuale deve essere valutata sia in relazione ai moti ondosi che incidono sul paraggio in esame sia ai livelli del mare raggiunti localmente, sui fondali antistanti l'opera, in occasione delle mareggiate.

Sono, di seguito, analizzati i dati relativi alla stazione mareografica di Genova (le cui caratteristiche e posizione sono riportare in Figura 1 e Tabella 3). La stazione è dotata di caposaldi altimetrici. Ogni caposaldo è riferito al livello medio del mare misurato a Genova dall'antico mareografo Thompson. La distanza tra tale stazione e il paraggio in esame è relativamente piccola (circa 30 km) in rapporto alle distanze caratteristiche delle variazioni di pressione atmosferica o di marea astronomica. Le misure acquisite presso tale stazione, quindi, possono ritenersi sufficientemente rappresentative anche per la zona di Cala Cravieu. I livelli registrati dal mareografo tengono conto direttamente del contributo dovuto alla marea astronomica, della variazione di pressione atmosferica e del sopralzo indotto dai venti foranei.

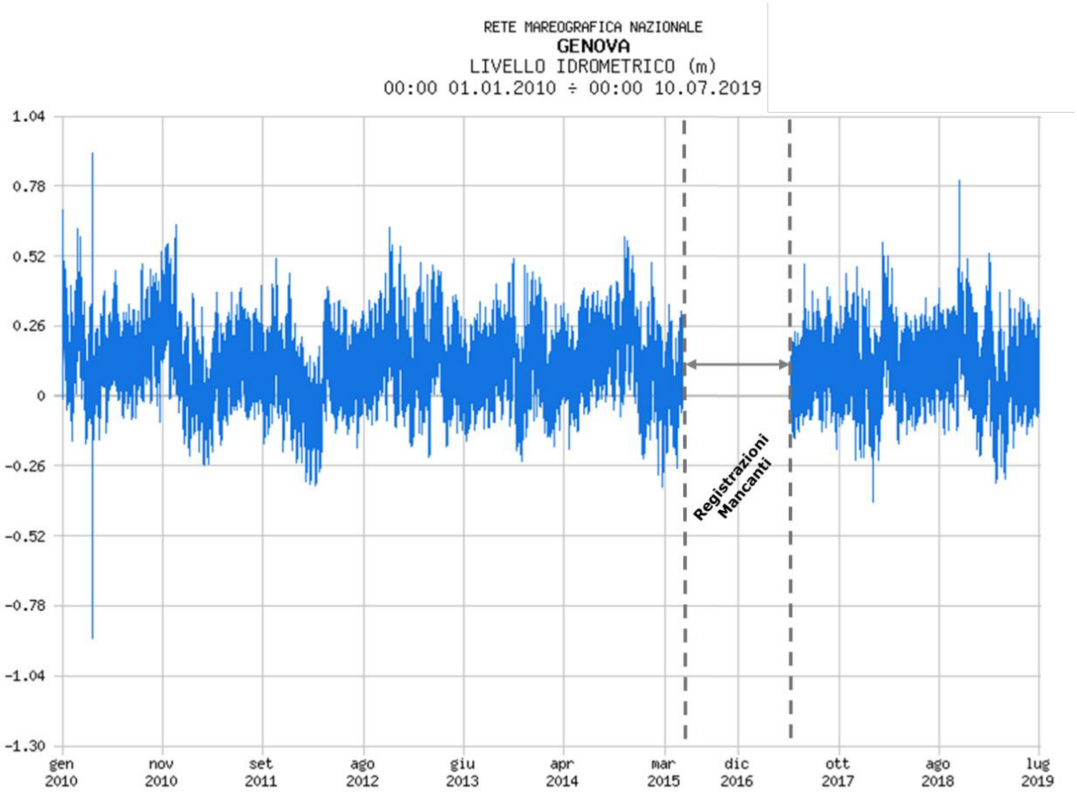


Figura 15: Livello idrometrico registrato dalla stazione di Genova nel periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019.

In Figura 15 è riportata la serie storica del livello idrometrico registrato dalla stazione di Genova nel periodo 2010-2019[2]. Il valore medio del livello del mare registrato presso la stazione per il periodo di riferimento risulta h_{med}=0.11 m (Figura 15). In

[2] In tale intervallo temporale, si riscontra una mancanza di dati dovuta a non operatività della stazione mareografica per l'intero periodo 7/05/2015-16/05/2017. Per il 2019, i dati sono disponibili fino al 10 luglio.

Tabella 18 sono riportati i valori di livello del mare massimo e minimo annuali nel periodo 2010-2019, relativi al livello medio nello stesso periodo.

Il più alto livello del mare durante il periodo analizzato è stato pari a +68 cm (misurato rispetto a rispetto al valore medio del periodo h_{med}), valore raggiunto durante la mareggiata del 29 ottobre 2018. Il minimo livello del mare registrato è stato pari a -49 cm (rispetto al medio mare h_{med}).

Tabella 18: Valori minimi e massimi annuali del livello idrometrico registrati presso il mareografo di Genova per il periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019 (rispetto al livello medio del mare osservato nel periodo di riferimento).

Anno	Livello min. [cm]	Livello max. [cm]
2010	-29	58
2011	-36	40
2012	-44	51
2013	-34	40
2014	-31	48
2015*	-44	38
2016	--	--
2017**	-34	37
2018	**-49**	**68**
2019**	-43	42

* dati dal 01/01/2015 al 07/05/2015
** dati dal 16/05/2017 al 31/12/2017
*** dati dal 01/01/2019 al 10/07/2019

Il valore medio della pressione atmosferica nel periodo di riferimento è pari a 1014 mbar (Figura 16). In Tabella 19, si riportano i valori minimi e massimi annuali di pressione atmosferica registrati.

Il minimo barico per il paraggio in esame è pari a circa 978 mbar (registrato in data 30 gennaio 2015). Tale valore risulta inferiore di 36 mbar rispetto al valore medio dello stesso periodo. Assumendo, in prima approssimazione, un sopralzo del mare pari a 1cm per ogni mbar di bassa pressione, è possibile affermare che il contributo delle basse pressioni all'innalzamento del mare, nel periodo 01/01/2010-10/07/2019, sia arrivato fino ad un massimo di circa 36 cm.

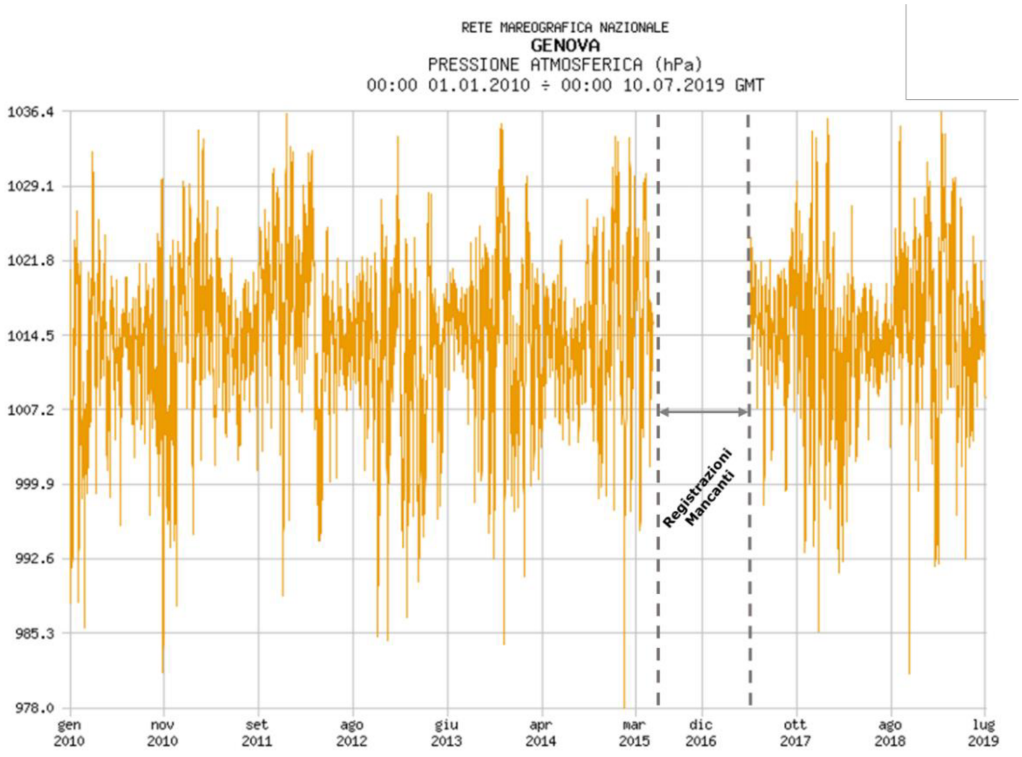


Figura 16: Pressione atmosferica misurata presso la stazione di Genova nel periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019.

Tabella 19: Valori minimi e massimi annuali di pressione atmosferica registrati presso il mareografo di Genova per il periodo 1 gennaio 2010 – 10 luglio 2019.

Anno	Pressione min. [mbar-hPa]	Pressione max. [mbar-hPa]
2010	981	1032
2011	989	**1036**
2012	985	1033
2013	984	1035
2014	990	1034
2015*	**978**	1034
2016	--	--
2017**	985	1035
2018	981	**1036**
2019***	991	**1036**

* dati dal 01/01/2015 al 07/05/2015
** dati dal 16/05/2017 al 31/12/2017
*** dati dal 01/01/2019 al 10/07/2019

4.6 RELAZIONE FRA ALTEZZE E PERIODI D'ONDA

Non esistono relazioni universalmente valide per la definizione di un periodo (sia esso medio o di picco) da associare alle onde significative estreme, in quanto la relazione altezza-periodo è influenzata da fattori locali quali la morfologia e l'orografia dell'area in esame.

L'analisi delle caratteristiche specifiche del moto ondoso al largo di Cala Cravieu, condotta sui dati ottenuti da simulazione numerica con il modello WW3-DICEA, mostra come onde con altezze significative di circa 4 m possano verificarsi con periodi di picco T_p compresi fra 9 e 12 s, mentre onde con altezza superiore a 5m possano avere periodi compresi fra 10 e 12 s circa.

Lo scatter plot di altezze e periodi al largo (Figura 17) mostra come sia possibile individuare, per la definizione dei periodi da associare ai valori estremi di altezza d'onda, una relazione che meglio si adatta ai dati di moto ondoso per il sito in esame avente la seguente espressione:

$$Tp = 7.3 Hs^{0.26} \quad (2)$$

Una relazione più conservativa, che considera la possibilità di occorrenza di periodi più elevati (associabili, quindi, a condizioni particolarmente gravose dal punto di vista della tracimazione delle opere marittime) in corrispondenza dei valori estremi di altezza significativa è fornita dalla relazione seguente (Figura 17):

$$Tp = 0.4 Hs^2 - 3.3 Hs + 18.5 \quad (3)$$

La relazione fra altezze e periodi ottenuta per i moti ondosi al largo di Cala Cravieu (Eq. 2) può, in prima approssimazione, essere considerata rappresentativa anche per il moto ondoso in prossimità della diga (Figura 18).

Il legame fra periodo $T_{m-1,0}$ e periodo di picco T_p, specificatamente verificato con i dati al largo di Cala Cravieu (Figura 19), può essere espresso con buona approssimazione dalla seguente relazione:

$$Tp = 1.156 T_{m-1,0} \quad (4)$$

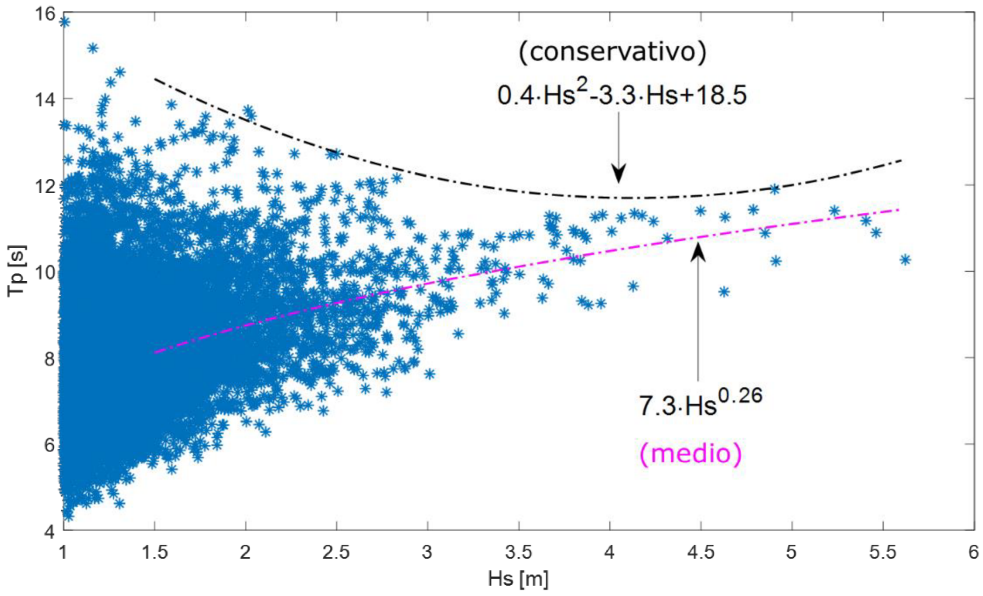


Figura 17: Legame fra altezza significativa e periodo di picco per onde con altezza significativa superiore a 1 m. Dati relativi al punto al largo di Cala Cravieu, ottenuti tramite simulazione con il modello WW3-DICEA per il periodo 2000-2018.

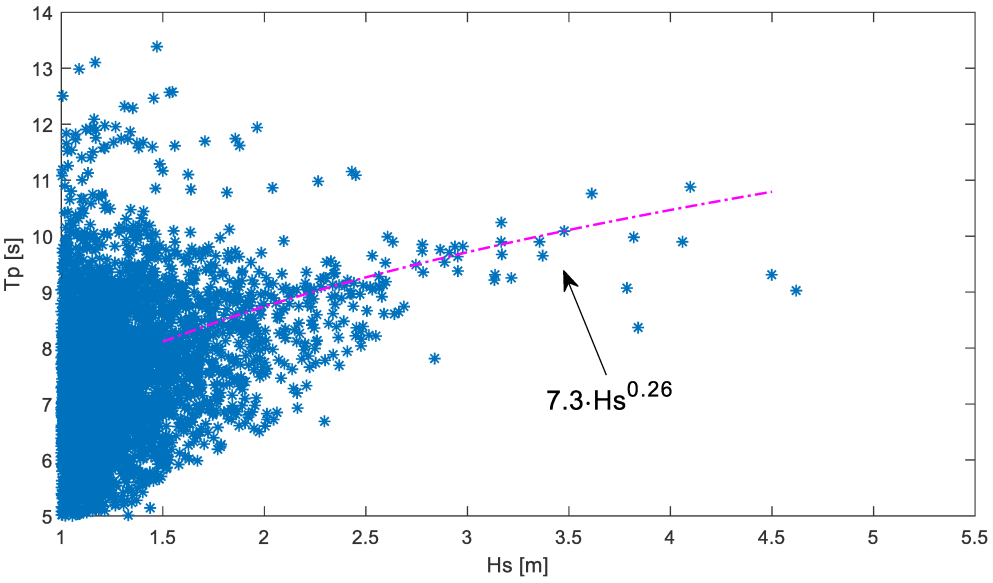


Figura 18: Legame fra altezza significativa e periodo di per i moti ondosi sui fondali con profondità 10 m antistanti Cala Cravieu. Dati ottenuti tramite simulazione con il modello MIKE21-SW per il periodo 2000-2018.

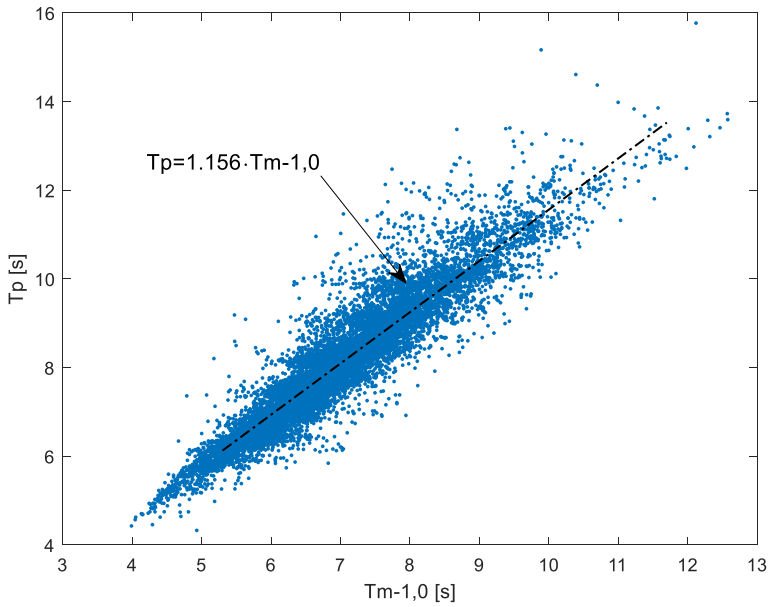


Figura 19: Legame fra periodo medio $T_{m-1,0}$ e periodo di picco T_p per le onde con altezza significativa superiore a 1 m. Dati relativi al punto al largo di Cala Cravieu, ottenuti tramite simulazione con il modello WW3-DICEA per il periodo 2000-2018.

4.7 SINTESI DEGLI ASPETTI RILEVANTI

In questa sezione è stato presentato il paraggio in esame, con analisi volte a fornire il contesto di base per l'inquadramento del clima ondoso sito-specifico. In estrema sintesi, si sottolineano i seguenti aspetti fondamentali:

- Il paraggio è esposto ai settori 150-185°N (principale), 185°N-215°N (secondario) e 135°N-185°N (secondario).
- Al largo, i moti ondosi che provengono dal settore principale hanno mostrato altezze significative superiori a 5 m associate a periodi di picco fino a 12 s circa (in base alle analisi delle serie storiche di dati di hindcast relative al periodo 2000-2018).
- La serie storica del moto ondoso propagato fino ai fondali con profondità 6 m antistanti la diga di Cala Cravieu mostra massime altezze significative pari a circa 4 m, con direzione di provenienza prevalente dal settore 130-160°N, dal quale le onde provengono per circa il 90% del tempo circa.

- La direzione principale di provenienza del moto ondoso al piede della diga di Cala Cravieu (i.e. dal settore 130-160°N centrato sui 150°N) risulta inclinata di 30°-60° rispetto alla direzione perpendicolare alla diga stessa.
- Relativamente al periodo 2000-2018, in primavera e in estate, sul fondale di 6 m non si sono presentate onde con altezza significativa superiore ai 3 m.
- I livelli del mare, registrati dal mareografo di Genova hanno raggiunto un valore minimo ed uno massimo rispettivamente di +68 cm e -49 cm rispetto al medio mare locale (nel periodo 2010-2018).
- Le pressioni registrate presso la stazione mareografica di Genova nel periodo 2000-2018 hanno mostrato un minimo ed un massimo barico di, rispettivamente, 978 mbar e 1036 mbar.

5 ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI PRE-MAREGGIATA DI OTTOBRE 2018

In questa Sezione sono presentati i risultati dell'analisi degli eventi estremi condotta per il clima ondoso caratteristico della zona di Cala Cravieu, al largo e a costa. In particolare, sono riportate di seguito le statistiche effettuate escludendo dall'analisi la mareggiata del 29 ottobre 2018 (dette nel seguito "pre-mareggiata").

Si noti che la statistica al largo documentata in questa sezione è stata condotta sia sull'intero settore di traversia, sia sui singoli sotto-settori (principale e secondari), al fine di fornire una base per la successiva discussione delle caratteristiche specifiche dell'evento del 29 ottobre anche in termini dell'eventuale eccezionalità della direzione di provenienza del moto ondoso.

L'aggiornamento della statistica, con l'inclusione dell'evento del 29 ottobre, è fornito nella successiva *Sezione 7*.

5.1 METODOLOGIA DI ANALISI

L'analisi statistica è stata effettuata con il metodo detto POT (*Peak Over Threshold*). Con questo metodo, gli eventi estremi utilizzati nell'analisi vengono individuati come picchi al di sopra di un valore soglia (un esempio in Figura 20).

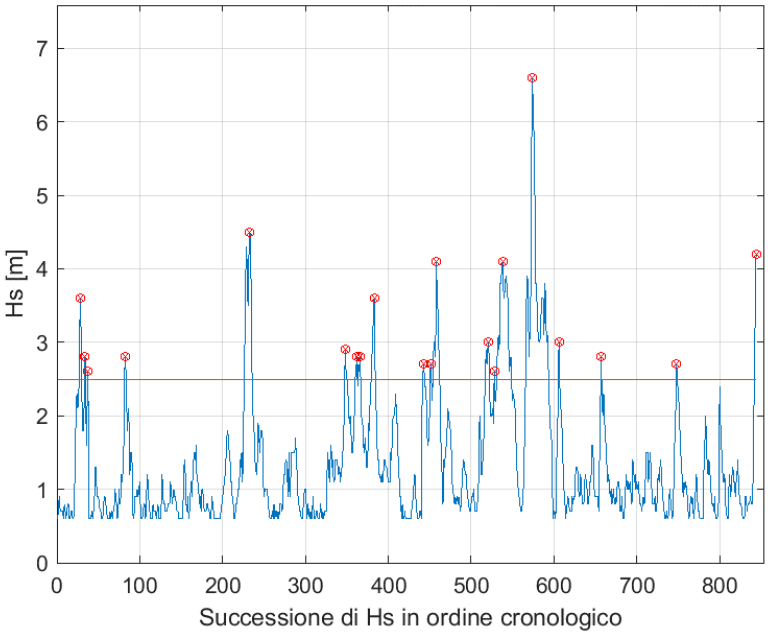


Figura 20: Esempio di individuazione dei picchi di altezza d'onda oltre la soglia di 2.5 m.

Nelle analisi documentate nel presente rapporto tecnico, il valore della soglia è stato, di volta in volta, adottato in seguito ad una preliminare analisi di sensitività che ha mostrato la sostanziale ininfluenza, sui risultati finali, della scelta della soglia nell'intorno del valore scelto. Per ciascuno dei picchi così ottenuti è calcolata la probabilità campionaria (P*) che la relativa altezza d'onda (H) non venga superata.

Come funzioni interpolanti degli eventi estremi sono state utilizzate, alternativamente, la distribuzione di Gumbel (Eq. 5) e quella di Weibull (Eq. 6).

$$P=exp\left[-exp\left(-\frac{H-\gamma}{\beta}\right)\right] \tag{5}$$

$$P=1-exp\left[-\left(\frac{H-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \tag{6}$$

dove i coefficienti β e γ sono i parametri di scala e di posizione delle funzioni di Gumbel e Weibull (indicati, nel seguito, con β_G/β_W e γ_G/γ_W rispettivamente). α è il parametro di forma della funzione di Weibull, assunto con valore pari a 1 in tutte le analisi riportate nel presente rapporto tecnico.

Per entrambe le funzioni interpolanti, i coefficienti β e γ sono stati determinati mediante regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P*, H). Note le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, sono state calcolate le altezze d'onda per fissati tempi di ritorno nonché per fissati livelli di rischio e orizzonti temporali del progetto.

Il tempo di ritorno è il valor medio dell'intervallo di tempo che intercorre fra due superamenti successivi di un valore di altezza d'onda fissato ed è legato alla probabilità P dalla relazione:

$$P=1-\frac{1}{\lambda T_R} \tag{7}$$

dove il coefficiente λ è il numero medio di eventi estremi in un anno (i.e. il numero di mareggiate, con altezza maggiore del valore soglia, che mediamente si sono presentate in un anno) su cui si basa l'analisi statistica.

Dato i legami fra P e H forniti dalle distribuzioni di Gumbel e di Weibull, vengono determinate le relazioni che forniscono il valore di altezza d'onda associato ad un assegnato tempo di ritorno T_R:

$$H_{T_{R\,Gumbel}} = \gamma_G - \beta_G \, ln\left(ln\frac{1}{P} \right) = \gamma_G - \beta_G \, ln\left(-ln\left(1-\frac{1}{\lambda T_R} \right) \right) \tag{8}$$

$$H_{T_{R\,Weibull}} = \gamma_W + \beta_W \left(-ln\left(1-P\right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} = \gamma_W + \beta_W \left(-ln\left(\frac{1}{\lambda T_R} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right) \tag{9}$$

Nel progetto di un'opera, l'altezza d'onda di progetto viene comunemente scelta sulla base di un tempo di ritorno ritenuto accettabile. È tuttavia è necessario fornire anche una misura del rischio che negli anni a seguire il valore dell'altezza d'onda di progetto possa essere superato, con conseguenti danneggiamenti dell'opera. È quindi possibile dare una quantificazione statistica del rischio, inteso come probabilità che una certa altezza d'onda venga superata entro un prefissato orizzonte temporale *n*, esprimendo il legame fra la probabilità (P) ed il rischio (R) come:

$$R = 1 - P^{\lambda \cdot n} \tag{10}$$

Dalla definizione della probabilità secondo la distribuzione adottata si ottiene l'altezza d'onda in funzione dell'orizzonte di progetto e del rischio di superamento come descritto nelle Eq. 11 e 12 per le distribuzioni di Gumbel e di Weibull:

$$H_{R_{Gumbel}} = \gamma_G - \beta_G \, ln\left(-ln\, P\right) = \gamma_G - \beta_G \, ln\left(-ln\left(\sqrt[\lambda n]{1-R} \right) \right) \tag{11}$$

$$H_{R_{Weibull}} = \gamma_W + \beta_W \left(-ln\left(1-P\right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} = \gamma_W + \beta_W \left(-ln\left(1-\sqrt[\lambda n]{1-R} \right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} \tag{12}$$

5.2 EVENTI ESTERMI AL LARGO PRE-MAREGGIATA

La metodologia di analisi decritta in *Sezione 5.1* è stata applicata alla serie storica di dati di *hindcasting* ottenuti dal modello numerico WW3-DICEA e caratterizzanti il punto al largo di Cala Cravieu (coordinate 44.30°N, 8.55°E, Figura 5). L'analisi relativa al periodo gennaio 2000 – settembre 2018 è stata eseguita per:

(i) Intero settore di traversia, di apertura 80°, compreso fra 135-215°N;
(ii) Settore di traversia principale, di apertura 35°, compreso fra 150-185°N;
(iii) Settore di traversia secondario, di apertura 30°, compreso fra 185-215°N;
(iv) Settore di traversia secondario, di apertura 15°, compreso fra 135-150°N.

Per ciascun settore, oltre all'analisi di altezze d'onda significative associate a diversi tempi di ritorno e conseguenti livelli di rischio per dato orizzonte di progetto, si sono effettuate analisi statistiche di base dei parametri caratteristici delle mareggiate: (i) direzione, (ii) durata e (iii) periodo.

Le stesse analisi sono state ripetute, al fine di avere un termine di confronto e controllo dei risultati, per serie storiche di dati disponibili dalle registrazioni degli ondametri più prossimi all'area in esame (ondametri di La Spezia, Gorgona e Gombo, descritti in Tabella 1 e Tabella 2). Tali risultati sono riportati, rispettivamente, nelle *schede I.1, I.2 e I.3* dell'*ALLEGATO I*.

5.2.1 **Eventi estremi al largo per l'intero settore di traversia**

Per l'intero settore 135-215°N, l'analisi degli eventi estremi è stata condotta individuando, quali estremi, i picchi di altezza d'onda significativa superiori alla soglia $H_{threshold}$ assunta pari a 2 m. I coefficienti β e γ delle distribuzioni di Gumbel e di Weibull, come determinati mediante regressione lineare in scala logaritmica (Figura 21) sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P*, H) sono riportati in Tabella 20.

Le altezze d'onda significative in acque alte relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, sono riportate in Tabella 21 e Tabella 22. Le curve di isorischio sono riportate in Figura 22.

Considerando l'intero settore 135-215°N, l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a Hs=4.4 m con la distribuzione di Gumbel e ad Hs=4.8 m con quella di Weibull. L'onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha Hs=4.7 m con la distribuzione di Gumbel (Tabella 21), Hs=5.1 m con quella di Weibull.

Al largo, la massima durata delle mareggiate registrate nel periodo 2000-2018 è stata di circa 30 ore (tale valore è associato ad una frequenza di accadimento relativa inferiore al 3%).

Tabella 20: Parametri di analisi statistica al largo di Cala Cravieu per il settore 135-215°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
2.00	0.38	0.49	2.19	1.93	6.52

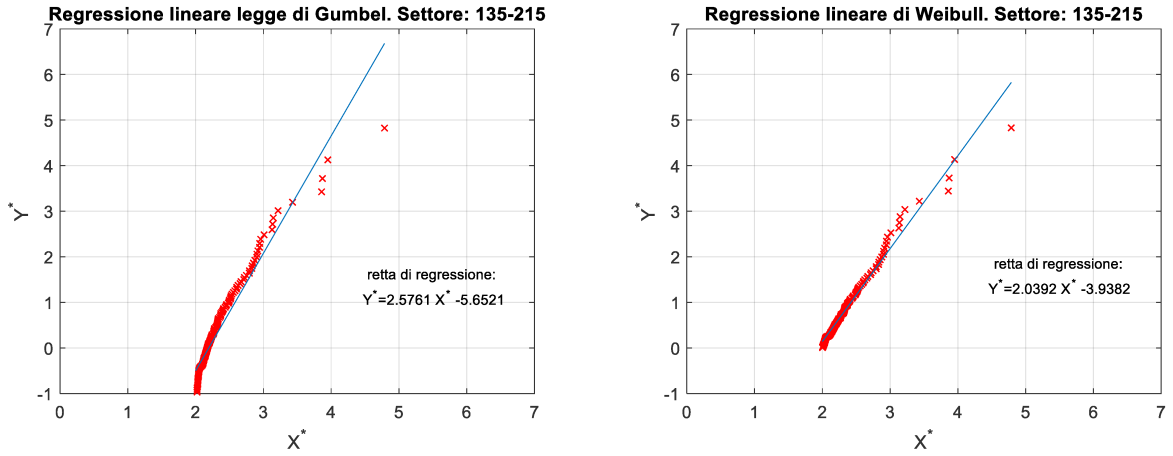


Figura 21: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Gumbel e Weibull al largo, settore 135-215°N.

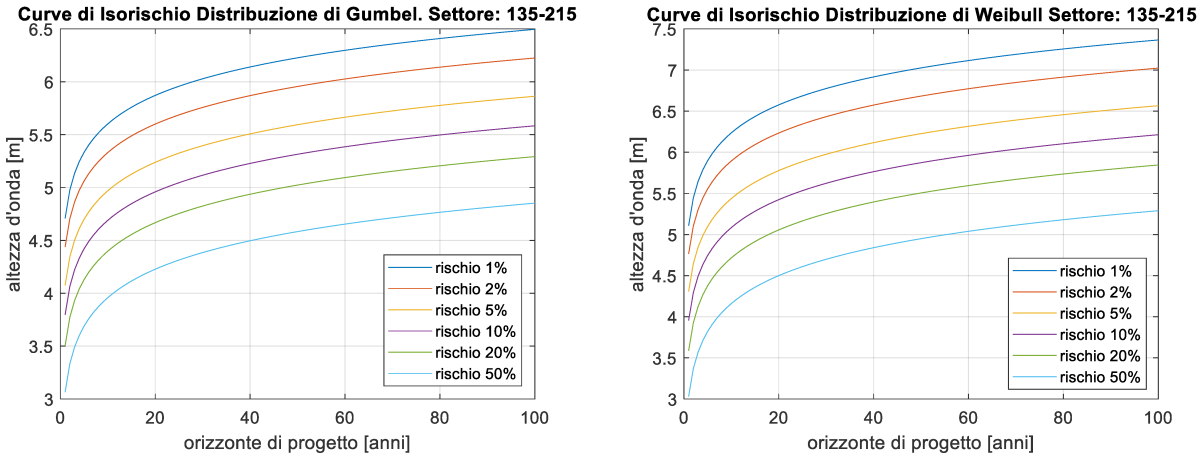


Figura 22: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 135-215°N °N.

Tabella 21: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-215°N ottenuta con la distribuzione di Gumbel.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7

Tabella 22: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-215°N ottenuta con la distribuzione di Weibull.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.9	3.2	3.6	4.0	4.3	4.8	5.1

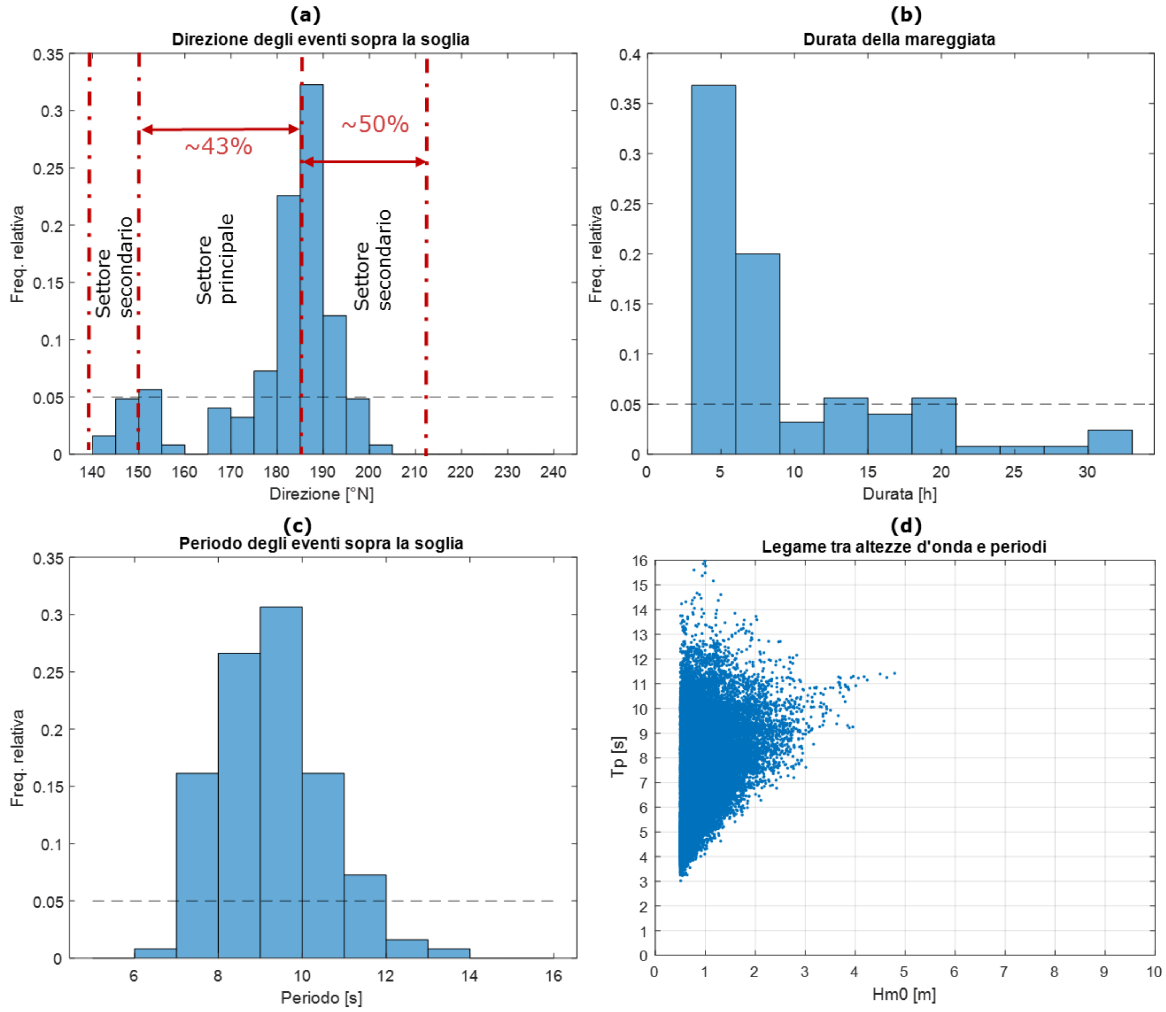


Figura 23: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 135-215°N (d). Risultati al largo di Cala Cravieu.

La probabilità che eventi con altezze significative al di sopra della soglia provengano dal settore di traversia principale è del 43% circa (Figura 23,a). Nel 50% dei casi, gli eventi sopra soglia provengono invece dal settore di traversia secondario 185-215°N. È tuttavia da evidenziare come gli eventi sopra soglia provenienti dal settore principale

siano mediamente di intensità più elevata. Solo il 7% degli eventi sopra soglia proviene dal settore secondario.

Considerando l'intero settore di traversia, è possibile osservare come le onde con altezza significativa maggiore di 4 m si sono presentate con periodi di picco T_p compresi fra 9 e 12 (Figura 23,d). Nel caso di onde minori di 3 m si osserva la presenza di periodi di picco T_p fino ai 16 s.

La durata media della mareggiata (Figura 23,a), definita come persistenza nel tempo dei valori di altezza significativa al di sopra della soglia $H_{threshold}$, è di circa 7 ore. Complessivamente, dall'intero settore di traversia (135-215°N), la frequenza relativa di mareggiate con durata superiore alle 20 ore è del 5% circa.

5.2.2 Eventi estremi al largo per il settore di traversia principale 150-185°N

Per il solo settore di traversia principale 150-185°N, ed adottando un valore della soglia $H_{threshold}$ pari a 1.7 m[3] (Tabella 26), l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a Hs=4.4 m (Gumbel) o Hs=4.8 m (Weibull), mentre l'onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha altezza significativa Hs=4.7 m (Gumbel) o Hs=5.1m (Weibull) (Tabella 27, Tabella 28).

Onde con altezza significativa maggiore di 4 m si sono presentate con periodi di picco T_p compresi fra i 9 e i 12 s (Figura 29,c e Figura 29,d) e per le onde con altezza significativa minore di 3 m possono verificarsi periodi di picco T_p fino ai 16 s (particolarmente critici dal punto di vista della tracimazione delle dighe foranee). Per questo settore, la durata media della mareggiata (Figura 29,a) è di circa 6.4 ore. Complessivamente, dal settore 150-185°N, la frequenza relativa di mareggiate con durata superiore alle 20 ore è del 5% circa (Figura 29,b).

Tabella 23: Parametri di analisi statistica al largo per il settore 150-185°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.7	0.42	0.54	1.93	1.63	6.6

[3] Per il settore principale, la soglia è stata abbassata da 2 a 1.7 m in modo da ottenere un numero di picchi sopra soglia λ=6.6, confrontabile con quello ottenuto per l'analisi statistica dall'intero settore nella Sezione 5.2.1. Ciò consente di condurre le analisi dai due settori su un numero simile di picchi sopra soglia.

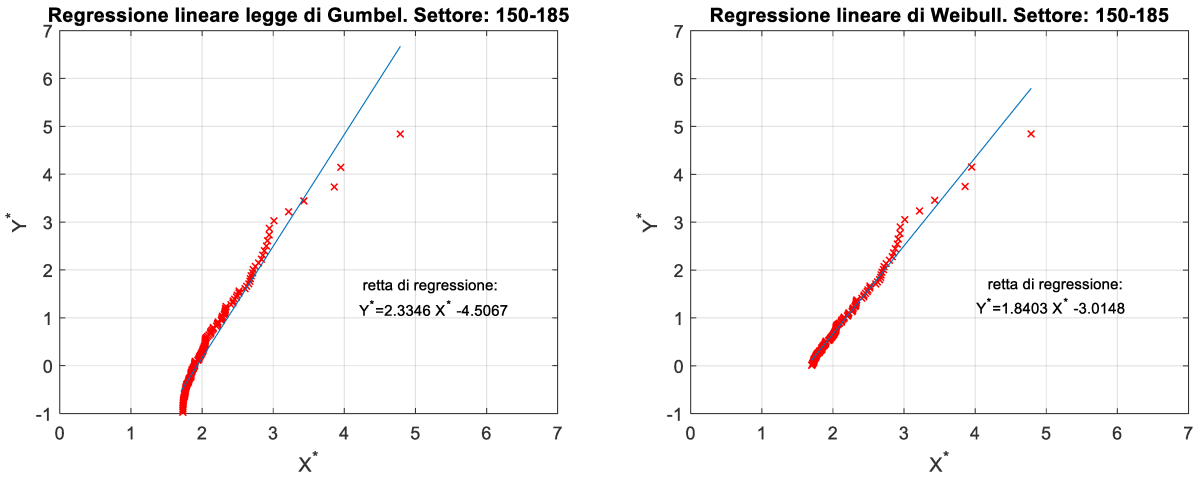


Figura 24: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Gumbel e di Weibull al largo, settore 150-185°N.

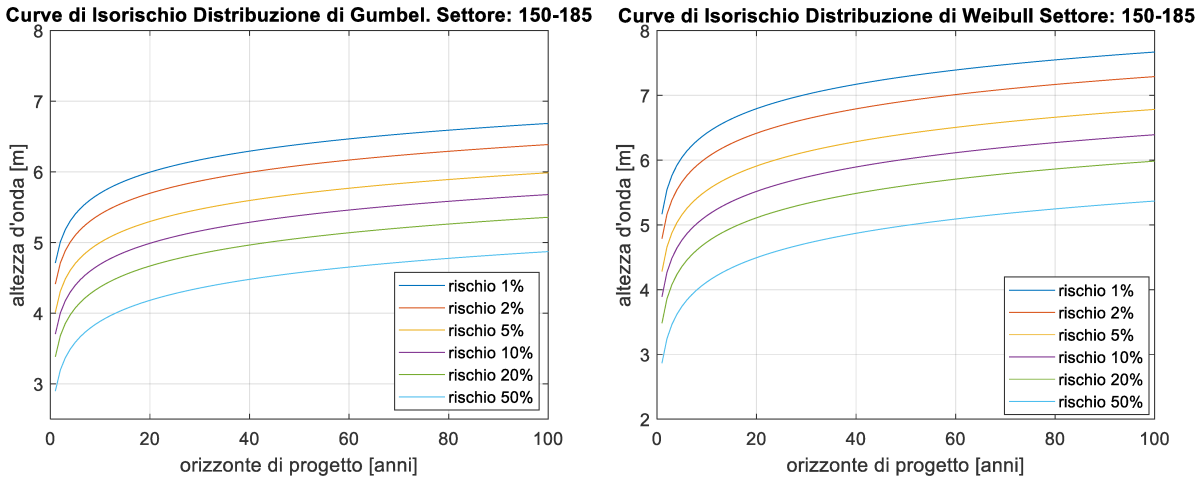


Figura 25: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 150-185°N.

Tabella 24: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 150-185°N ottenuta con la distribuzione di Gumbel.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.7	3.0	3.4	3.7	4.0	4.4	4.7

Tabella 25: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 150-185°N ottenuta con la distribuzione di Weibull.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.7	3.0	3.5	3.9	4.3	4.8	5.1

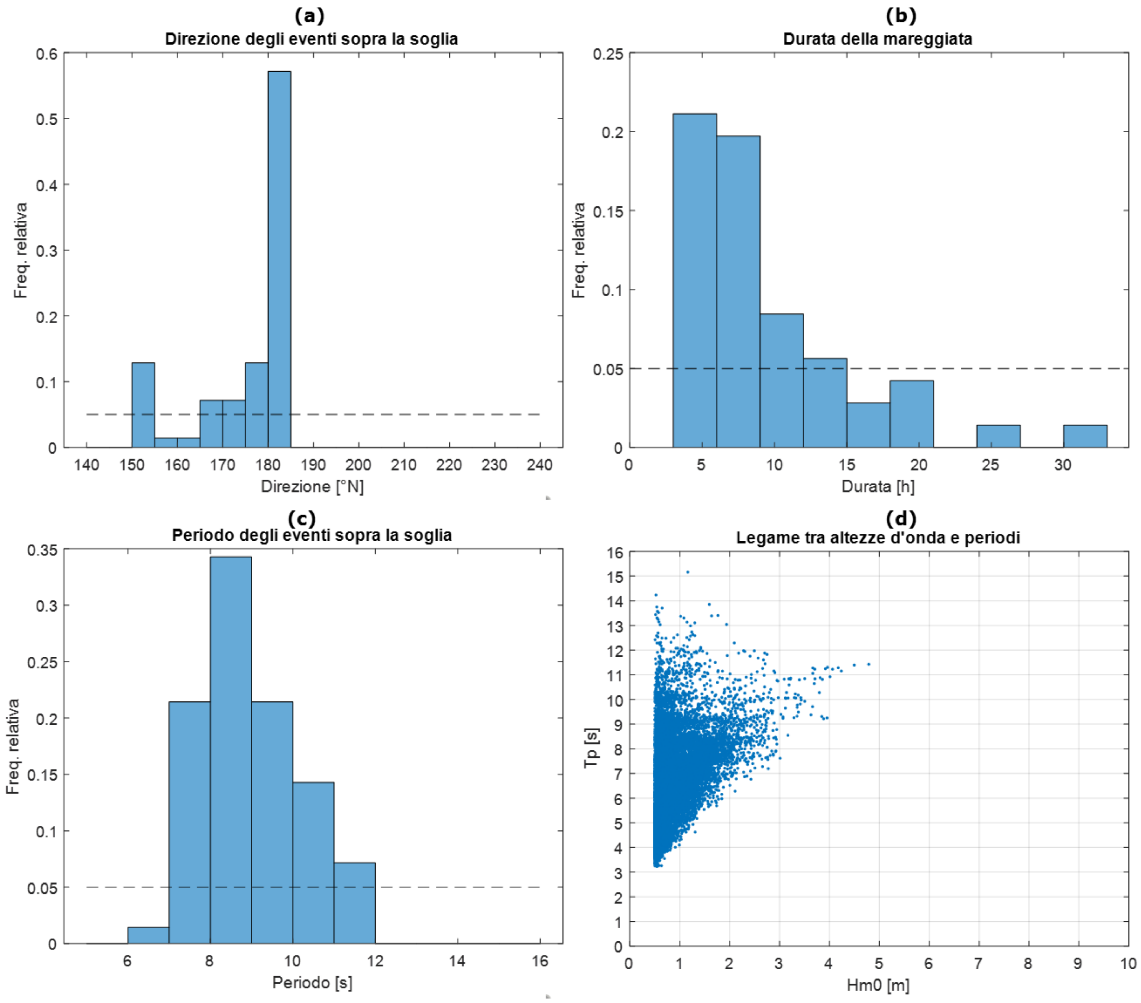


Figura 26: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 150-185°N (d). Risultati al largo.

5.2.3 Eventi estremi al largo per il settore di traversia secondario 185-215°N

Limitando l'analisi al solo settore di traversia 185-215°N, ed adottando un valore della soglia $H_{threshold}$ pari a 1.8 m (Tabella 26), l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a Hs=4.0 m (Gumbel) o Hs=4.3 m (Weibull), mentre l'onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha altezza significativa Hs=4.2 m (Gumbel) o Hs=4.6 m (Weibull) (Tabella 27, Tabella 28).

Come osservato in precedenza per l'intero settore, le onde con altezza significativa maggiore di 4 metri si sono presentate con periodi di picco T_p compresi fra i 9 e i 12 s (Figura 29,c e Figura 29,d) e per le onde con altezza significativa minore di 3 m possono verificarsi periodi di picco T_p fino ai 16 s (particolarmente critici dal punto di vista della tracimazione delle dighe foranee).

Per questo settore, la durata media della mareggiata (Figura 29,a) è di circa 5.8 ore. Complessivamente, dal settore 185-215°N, la frequenza relativa di mareggiate con durata superiore alle 20 ore è del 3% circa (Figura 29,b).

Tabella 26: Parametri di analisi statistica al largo per il settore 185-215°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.8	0.34	0.43	1.96	1.73	6.5

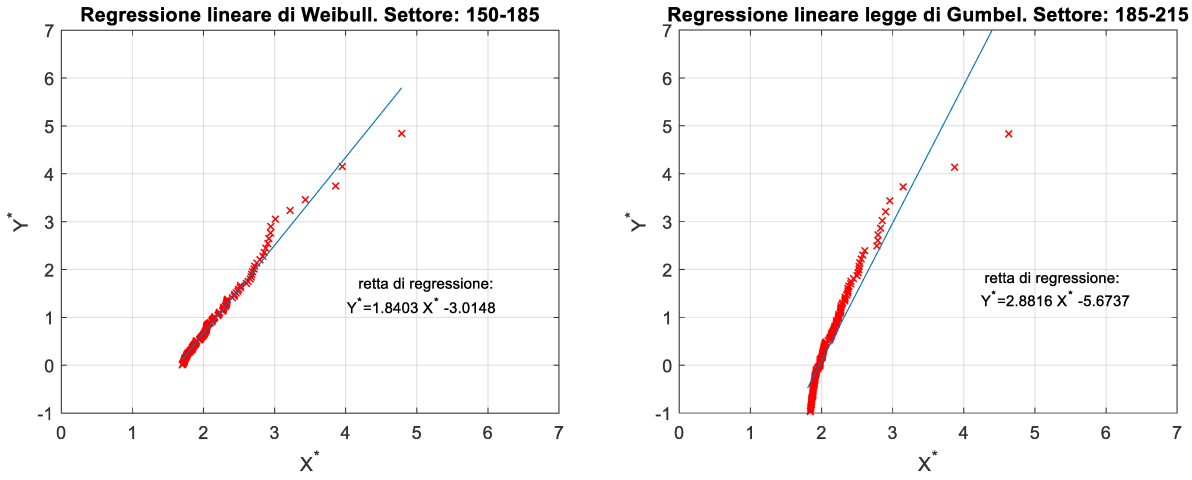


Figura 27: Regressione lineare per la stima dei parametri delle distribuzioni di Gumbel e di Weibull al largo, settore 185-215°N.

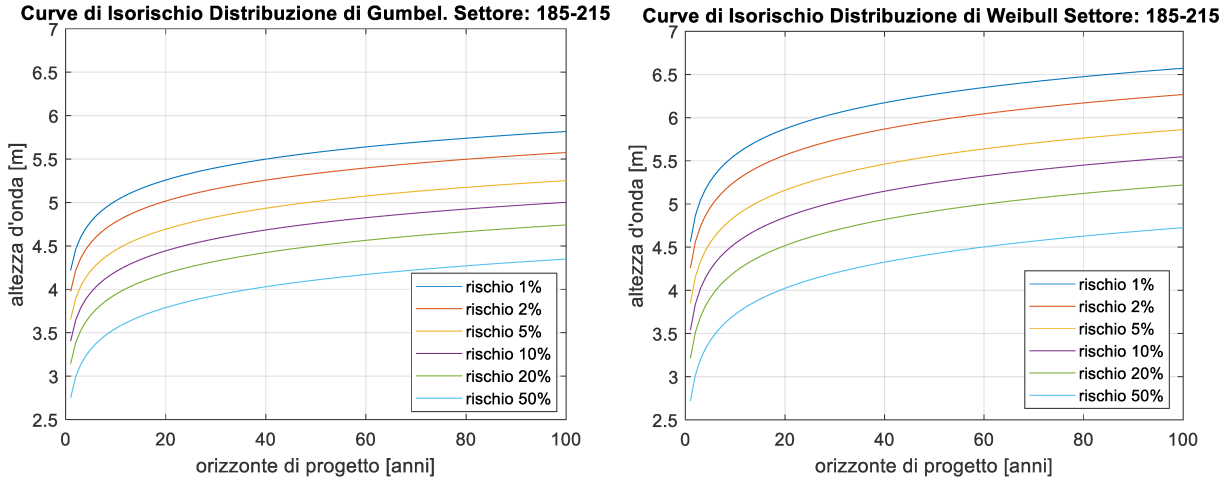


Figura 28: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 185-215°N.

Tabella 27: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 185-215°N N ottenuta con la distribuzione di Gumbel.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.6	2.8	3.3	3.2	3.4	4.0	4.2

Tabella 28: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 185-215°N ottenuta con la distribuzione di Weibull.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.6	2.9	3.3	3.6	3.9	4.3	4.6

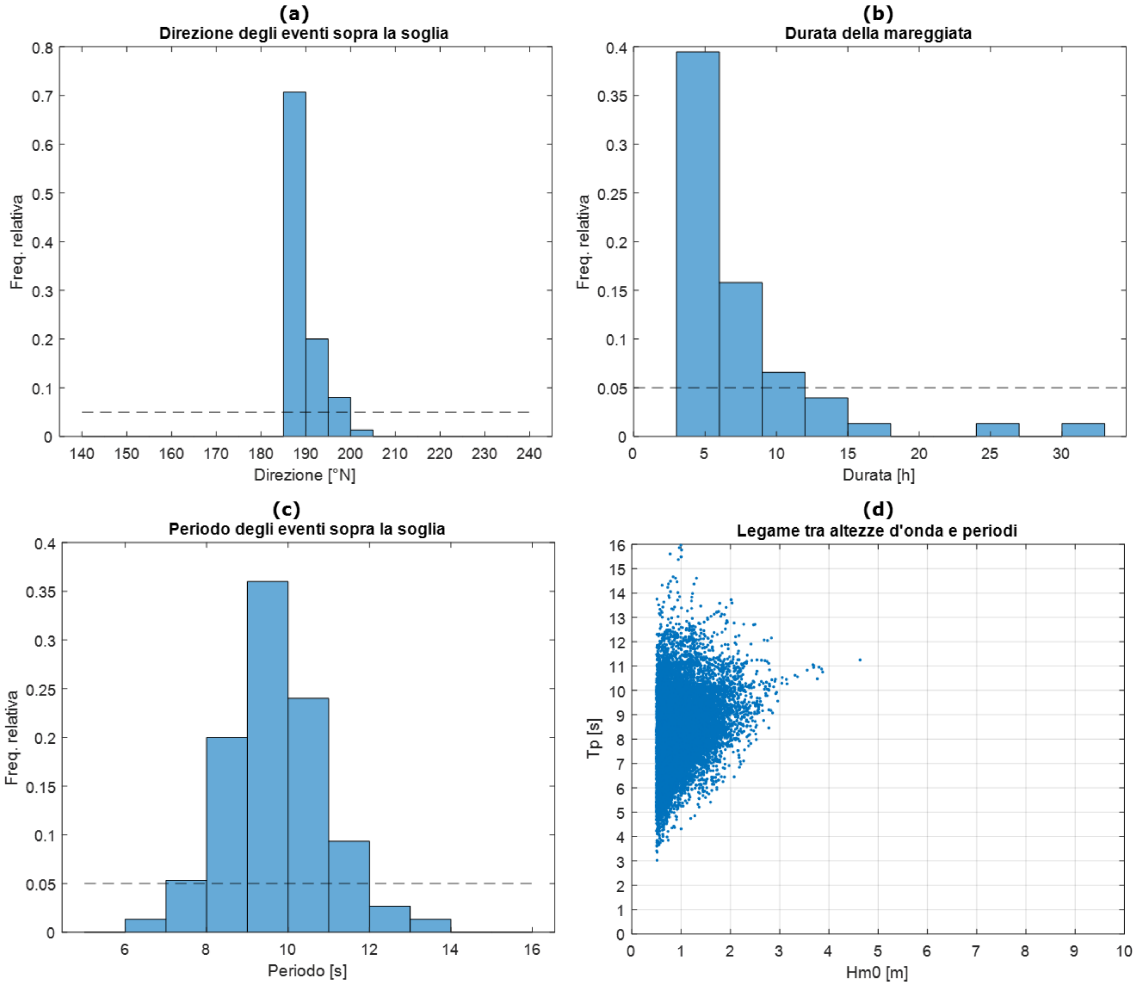


Figura 29: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 185-215°N (d). Risultati al largo.

5.2.4 Eventi estremi al largo per il settore di traversia secondario 135-150°N

Limitando l'analisi al settore di traversia secondario 135-150°N, ed adottando un valore della soglia $H_{threshold}$ pari a 1.5 m (Tabella 29), il valore di altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni risulta pari a Hs=3.4 m con la distribuzione di Gumbel, Hs=3.6 m con quella di Weibull. L'onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha altezza significativa Hs=3.6 m (Gumbel) e Hs=3.9 m (Weibull) (Tabella 27 e Tabella 21). I livelli di rischio in funzione di altezze significative e orizzonte di progetto sono riportati in Figura 24. Con riferimento al periodo 2000-2018 non si sono verificate, dal settore di traversia secondario, altezze d'onda significative maggiori di 4 m.

Onde con altezza significativa maggiore di 3 m si sono presentate con periodi di picco T_p di circa 9 s (Figura 32,c d). Le onde con altezza superiore alla soglia fissata hanno, più frequentemente, periodo di picco compreso fra 7-8 s (con una frequenza di accadimento del 50% circa, Figura 32,c). La durata media della mareggiata, definita come persistenza nel tempo di altezze significative superiori alla soglia di 1.5 m, è per questo settore di traversia limitata a circa 5.2 ore (Figura 32,b). Complessivamente, dal settore 135-150°N, la frequenza relativa di mareggiate con durata superiore alle 15 ore è inferiore al 3% (Figura 32,b).

Tabella 29: Parametri di analisi statistica al largo per il settore 135-150°N per le distribuzioni di Gumbel e Weibull.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.5	0.34	0.44	1.65	1.42	2.7

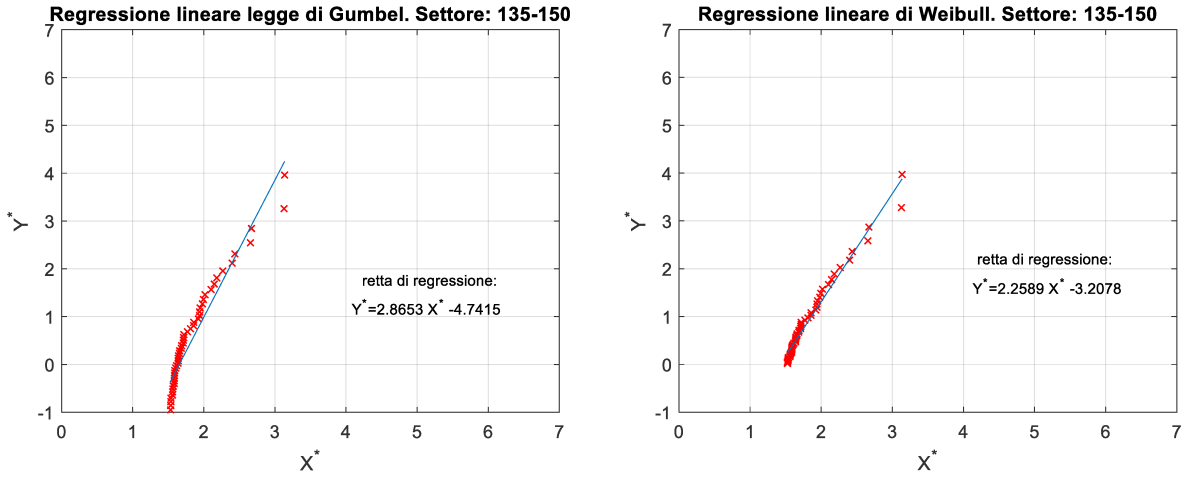


Figura 30: Regressione lineare per la stima dei parametri distribuzioni di Gumbel e Weibull al largo, settore 135-150°N.

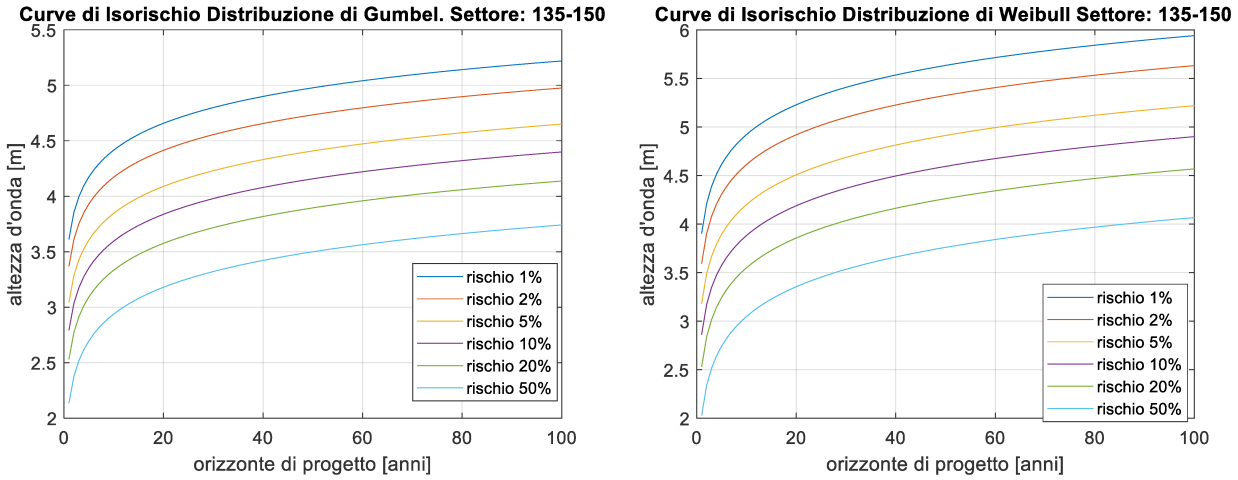


Figura 31: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull. Settore 135-150°N.

Tabella 30: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-150°N ottenuta con la distribuzione di Gumbel.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	1.9	2.2	2.6	2.8	3.0	3.4	3.6

Tabella 31: Altezza d'onda significativa al largo associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) per il settore 135-150°N ottenuta con la distribuzione di Weibull.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.6	3.9

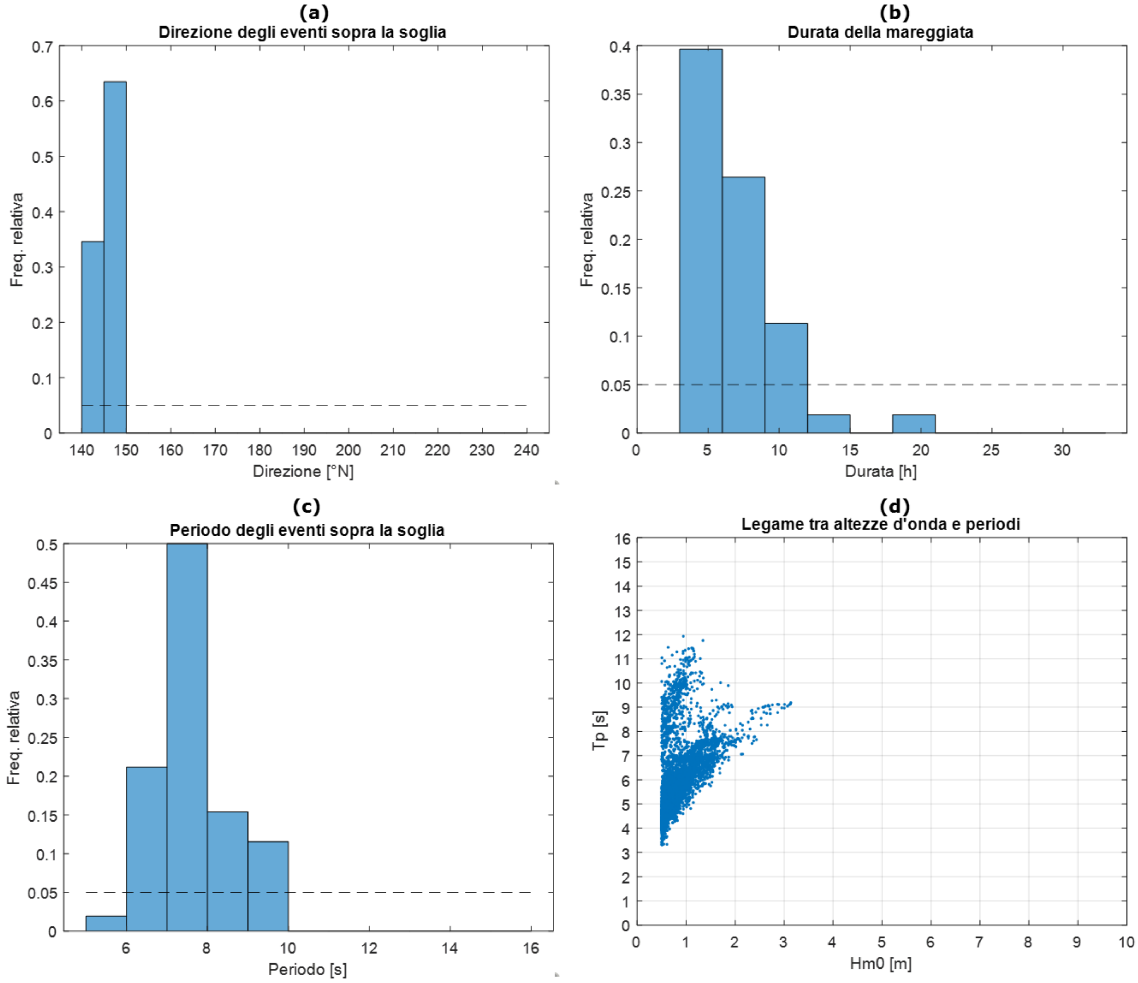


Figura 32: Frequenza relativa della direzione (a), della durata (b) e del periodo di picco T_p (c) degli eventi con altezza significativa superiore alla soglia e legame fra altezze e periodi per il settore 135-150°N (d). Risultati al largo di Cala Cravieu.

5.3 ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI A COSTA

La serie temporale dei dati al largo relativa al periodo 2000-2018, propagata a costa tramite il modello MIKE21-SW (descritto in *Sezione 2.2*) è stata analizzata con il metodo statistico POT (precedentemente descritto in *Sezione 5.1*). Nella propagazione a costa è stato, cautelativamente, considerato un sopralzo pari a 0.7 m, come richiesto dal Committente.

I risultati riportati in questa sezione si riferiscono ad estrazioni condotte nei punti seguenti (Figura 10):

(i) Punto con latitudine 44°20’13’’N, longitudine 8°32’45’’E, su un fondale di 10 m;

(ii) Punto con latitudine 44°20’13’’N, longitudine 8°32’37’’E, su un fondale di circa 6 m;

Per tali punti, si riportano i risultati relativi alla statistica a costa dei moti ondosi provenienti, al largo, da tutto il settore di traversia. Come discusso nella sezione 4.4, si ritiene opportuno rimarcare che tali moti ondosi, una volta propagati a costa, hanno direzione compresa fra 130-160°N per il 90% del tempo circa, risultando in tale circostanza inclinati rispetto alla diga di Cala Cravieu di 30-60°.

5.3.1 Eventi estremi sui fondali a profondità 10 m

Relativamente agli eventi con direzione di provenienza, al largo, dall’intero settore di traversia, l’analisi statistica a costa è stata condotta individuando, quali estremi, i picchi di altezza d’onda significativa superiori alla soglia $H_{threshold}$ assunta pari a 1.5 m (Tabella 32). Il moto ondoso presenta, sui fondali profondi 10 m antistanti la diga, un valore di altezza d’onda significativa con tempo di ritorno 50 anni pari a Hs=3.4 m (Gumbel) o Hs=3.6 m (Weibull), mentre l’onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha altezza significativa Hs=3.6 m (Gumbel) o Hs=3.9 m (Weibull) (Tabella 33 e Tabella 34).

Tabella 32: Parametri di analisi statistica su fondale di 10 m per le onde provenienti, al largo, dall’intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.5	0.31	0.39	1.65	1.44	4.9

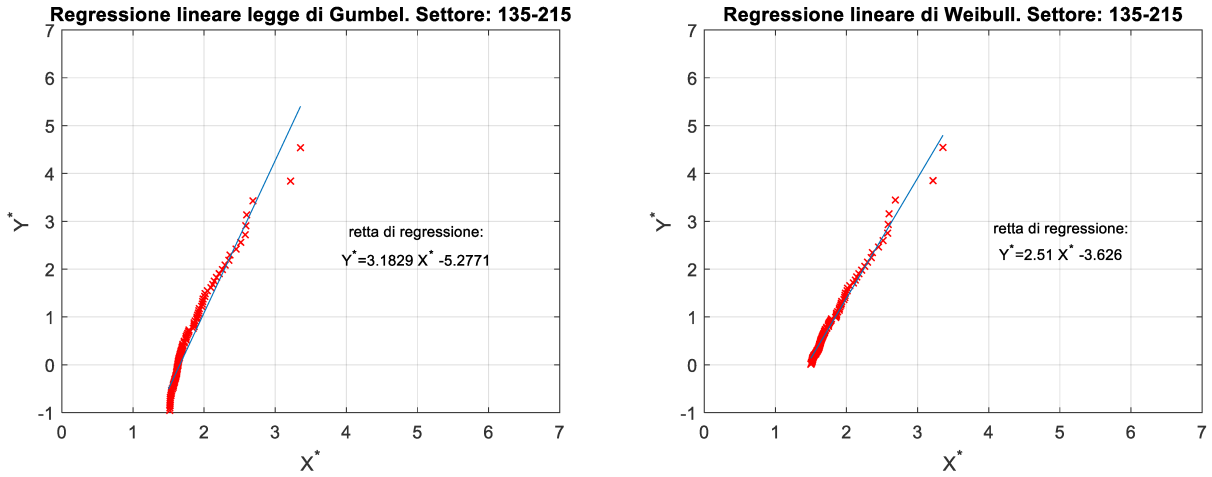


Figura 33: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel su fondale di 10 m per onde provenienti al largo dall’intero settore di traversia (135-215°N).

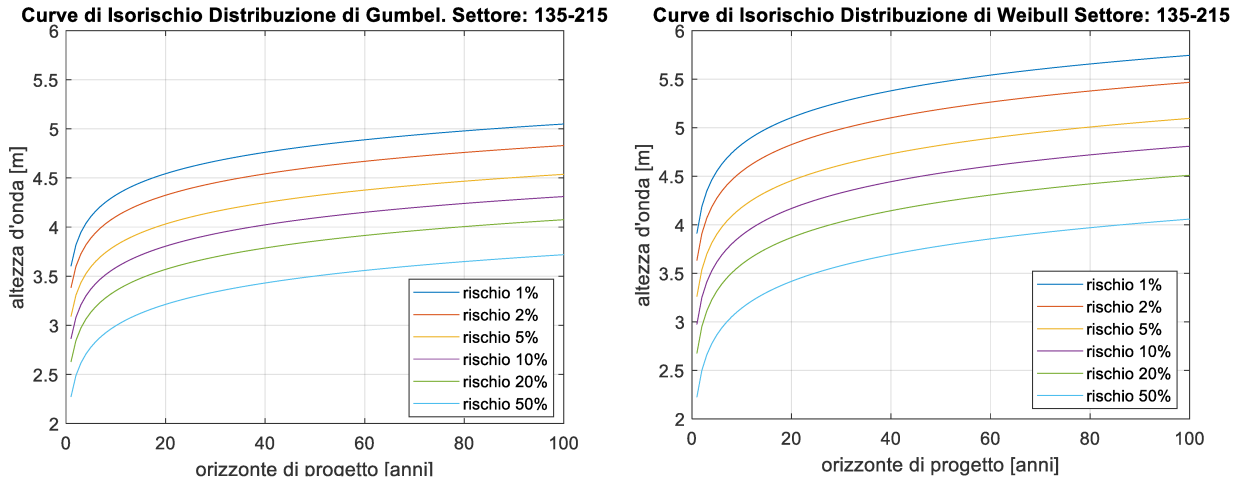


Figura 34: Altezze d'onda significative su fondale di 10 m in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N).

Tabella 33: Altezza d'onda significativa su fondale di 10 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.1	2.4	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6

Tabella 34: Altezza d'onda significativa su fondale di 10 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9

5.3.2 **Eventi estremi sui fondali a profondità 6 m**

Assumendo un valore della soglia $H_{threshold}$ pari a 1.5 m (Tabella 35), sui fondali profondi 6 m l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni pari a Hs=3.4 m (Gumbel) o Hs=3.6 m (Weibull), mentre l'onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha altezza significativa Hs=3.6 m (Gumbel) o Hs=3.9 m (Weibull) (Tabella 40 e Tabella 41).

Tabella 35: Parametri di analisi statistica su fondale di 6 m per le onde provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.5	0.31	0.38	1.65	1.44	5.6

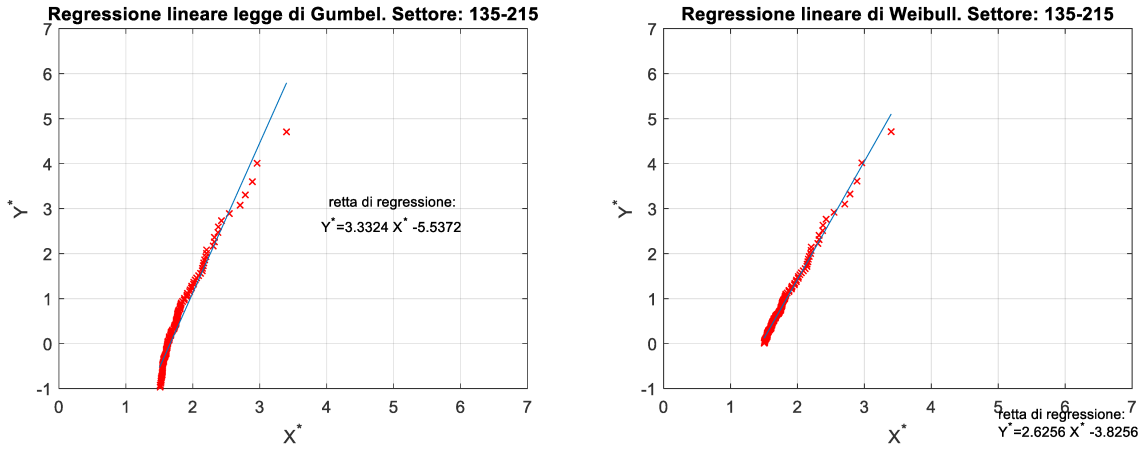


Figura 35: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel su fondale di 6 m per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N).

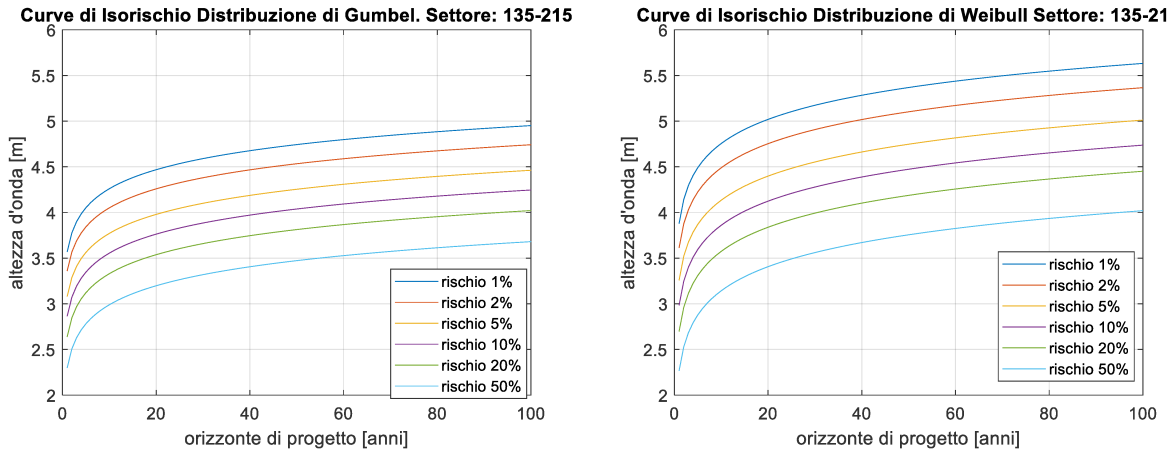


Figura 36: Altezze d'onda significative su fondale di 6 m in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N).

Tabella 36: Altezza d'onda significativa su fondale di 6 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.1	2.4	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6

Tabella 37: Altezza d'onda significativa su fondale di 6 m associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9

6 ANALISI DELLA MAREGGIATA DEL 29 OTTOBRE 2018

Nella presente sezione si fornisce una descrizione analitica dell'evento del 29 ottobre 2018, inquadrato in un primo tempo in un contesto più generale, sia dal punto di vista della relazione con le registrazioni storiche di diversi ondametri nell'Alto Mediterraneo (*Sezione 6.1.1*) sia relativamente l'evoluzione di livelli e pressioni per come registrati di mareografi (*Sezione 6.1.2*). L'approccio adottato consente di documentare lo sviluppo e le caratteristiche dinamiche dell'evento, nonché dei fenomeni meteomarini ad esso associati.

È successivamente presentata la ricostruzione della mareggiata per mezzo di modellistica numerica (*Sezione 6.2, Sezione 6.3*), mirata a sopperire alla mancanza di misurazioni dirette nella specifica area di interesse.

6.1 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'EVENTO

6.1.1 Registrazione della mareggiata da ondametri nel mediterraneo e discussione dell'eccezionalità sulle relative serie storiche

La mareggiata che si è abbattuta sul litorale ligure il 20 ottobre 2018, recando danni ingenti ad opere ed infrastrutture in particolare nella fascia costiera occidentale del golfo del Tigullio, ha avuto genesi nell'ambito di un ampio e complesso fenomeno meteorologico descritto in un precedente rapporto tecnico UNIFI-DICEA-LaMMA [7].

In questa sezione si analizzano, nello specifico, le caratteristiche del risultante moto ondoso, per come registrato dalle stazioni ondametriche localizzate nell'Alto Mediterraneo e operative durante la mareggiata in esame (Tabella 1, Tabella 2 e Figura 1)[4]. Per ciascuna stazione è stato determinato il tempo di ritorno associato alla massima altezza significativa registrata durante la mareggiata, in relazione all'analisi statistica condotta sulla serie storica registrata della stessa stazione (Tabella 38). L'analisi statistica è stata effettuata secondo le modalità descritte in *Sezione 5.1.*

Si rimanda all'*ALLEGATO I* per informazioni di dettaglio circa i risultati dell'analisi degli eventi estremi condotta per ciascuno degli ondametri analizzati.

[4] I dati della stazione ondametrica di Monaco non sono stati inseriti nella presente analisi poiché, nonostante la stazione abbia registrato la mareggiata, la serie storica di dati disponibili per questo ondametro è troppo limitata (2014-2018) per poter eseguire una statistica degli eventi estremi in grado di fornire informazioni significative.

Tabella 38: Tempo di ritorno della mareggiata del 29 ottobre 2018 per ondametri situati nell'area dell'Alto Mediterraneo.

Ondametro	Massima altezza significativa [m]	Tempo di ritorno dell'evento	Osservazioni
Capo Mele	6.5	50-100 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 22.30 circa del 29/10/2018
Giannutri	6.6	~ 100 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 20 circa del 29/10/2018
Gorgona	5.3	< 50 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 20 circa del 29/10/2018
Alistro	4.9	< 50 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 17 circa del 29/10/2018
La Ravellata	5.5	< 50 anni	Valore massimo raggiunto alle ore 23.30 circa del 29/10/2018

Si osserva come la mareggiata sia stata caratterizzata da un valore massimo dell'altezza significativa associabile ad un tempo di ritorno superiore ai 50 anni per le stazioni di Capo Mele (situata sulla costa meridionale francese, Figura 1) e di Giannutri (situata a sud dell'arcipelago toscano). Per le altre stazioni (Gorgona, Alistro e la Ravellata) i tempi di ritorno associabili all'evento sono stati, invece, inferiori ai 50 anni.

L'entità del fenomeno, ed in particolare la sua eventuale connotazione di eccezionalità, appare fortemente sito specifica, legata in modo determinate alla conformazione locale del paraggio e alla sua esposizione a venti ed onde. Si denota quindi come essenziale valutare le caratteristiche locali del moto ondoso durante la mareggiata nell'area in prossimità di Cala Cravieu.

6.1.2 **Pressione e livelli nella zona: registrazioni disponibili**

Ulteriori indicazioni circa la manifestazione dell'evento del 29/10 a livello dell'intero Alto Mediterraneo, e del suo sviluppo dinamico, pervengono dalle registrazioni di pressione atmosferica dei mareografi disponibili (Tabella 3).

Le registrazioni della Rete Mareografica Nazionale mostrano una vasta depressione con entità variabile fra i 987 hPa raggiunti a Porto Torres intorno alle 13 del 29/10, e i 977 hPa (registrati dal mareografo di Imperia, intorno alle 19.30 dello stesso girono), come riportato in Figura 37.

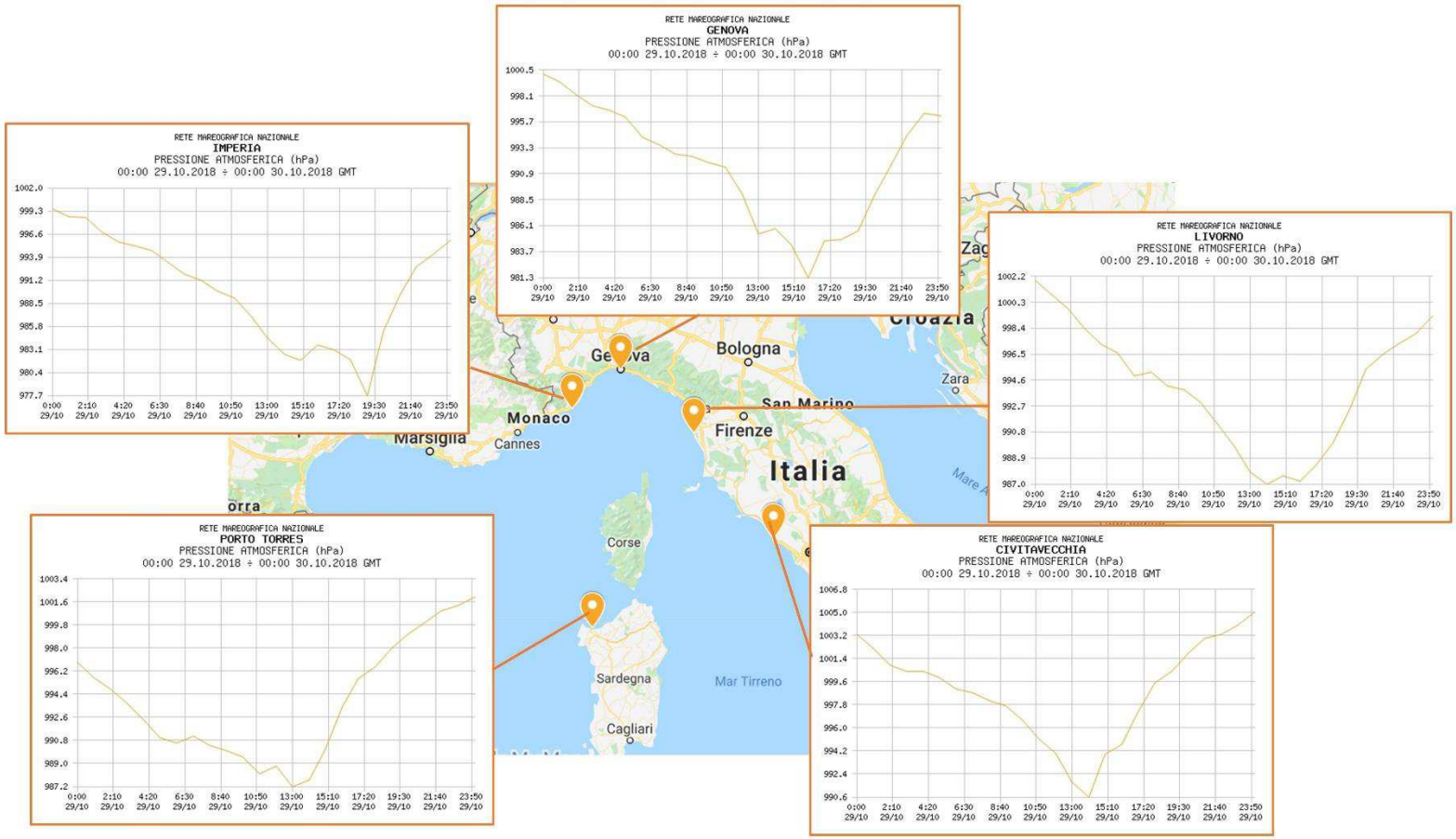


Figura 37: Pressione atmosferica registrata da mareografi dell'Alto Mediterraneo nella giornata del 29/10/2018.

Si riportano di seguito i livelli del mare e le pressioni atmosferiche registrate dal mareografo di Genova, ritenuto in prima approssimazione rappresentativo della zona di Cala Cravieu in virtù della moderata distanza da questa, come osservato nella *Sezione 4.5*.



Figura 38: Livello idrometrico registrato dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018.

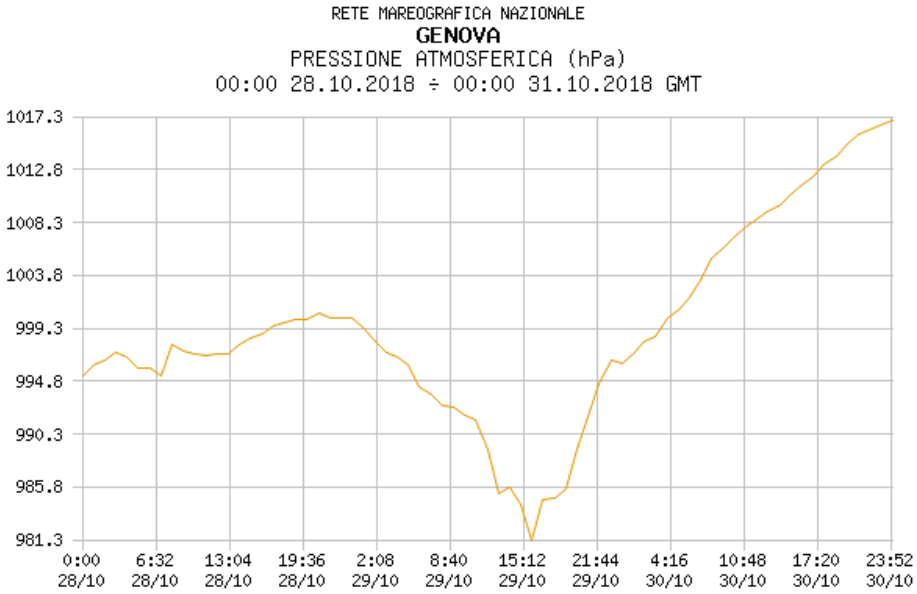


Figura 39: Pressione atmosferica registrata dal mareografo di Genova nel periodo 28/10-30/10 2018.

Il livello idrometrico misurato presso il mareografo di Genova (Figura 38) mostra un valore massimo di 0.79 m (corrispondente ad una variazione di 0.68 m rispetto al livello medio del mare per la stessa stazione). Il livello massimo è stato raggiunto poco dopo le ore 15.00 (GMT), corrispondenti alle 16.00 locali circa, del 29/10/2018. Tale valore corrisponde al massimo registrato dal 2010 ad oggi.

Il minimo barico registrato dal mareografo è stato di 981.3 mBar circa (Figura 38), con picco poco dopo le 15.00 (GMT) del 29/10/2018. Tale valore risulta inferiore di 32.7 mbar rispetto al valore medio per la stessa stazione. Tale minimo barico, in prima approssimazione, potrebbe aver comportato un sopralzo di 33 cm circa.

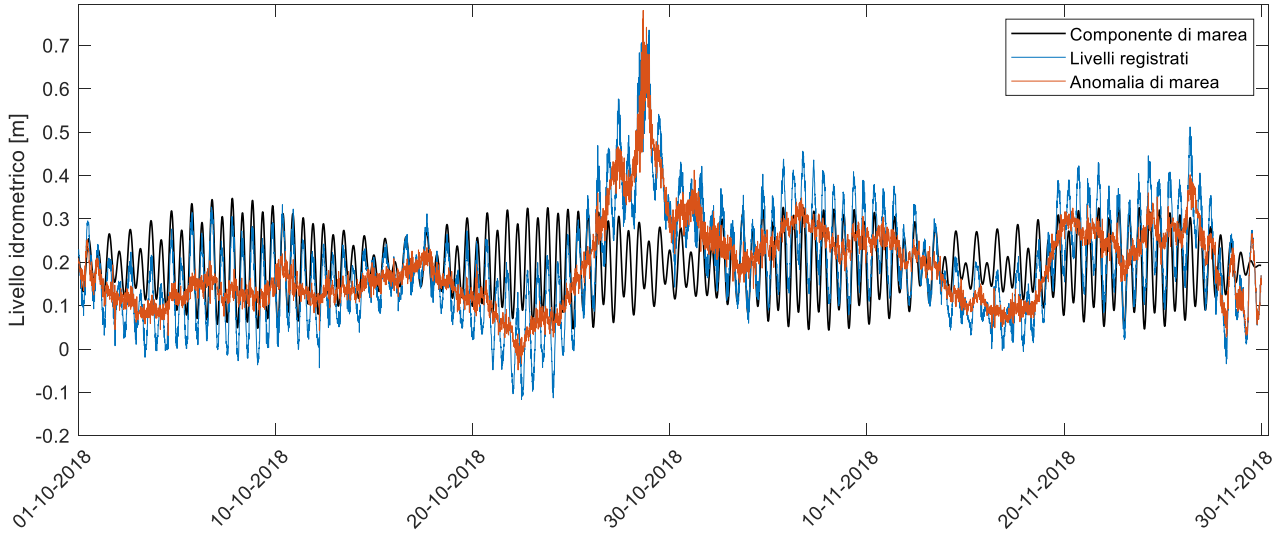


Figura 40: Componenti di marea, livelli registrati presso il mareografo di Genova e anomalia di marea.

Il valore del livello del mare osservato presso il mareografo di Genova, epurato dal livello di marea atteso[5] (la cosiddetta "anomalia di marea", Figura 40), ha raggiunto un massimo di circa 0.78 m (equivalenti ad una variazione di livello di +0.67 m circa rispetto al medio mare per la località in esame). Confrontando tale valore con il sopralzo

[5] La variazione di livello idrometrico imputabile ad effetti di marea è stata separata dal segnale registrato dal mareografo di Genova applicando un filtro passa banda per isolare le sole componenti con periodo di 12 ore (frequenza compresa fra $2.1 \cdot 10^{-5}$ e $2.4 \cdot 10^{-5}$ Hz) e 24 ore (fra $1.07 \cdot 10^{-5}$ e $1.18 \cdot 10^{-5}$ Hz). L'anomalia di marea è individuata come differenza fra il segnale di livello registrato (filtrato dal rumore con un filtro passa-basso) e la componente di oscillazione imputabile agli effetti di marea.

imputabile alla sola componente barica (i.e. 33 cm circa), è evidente come alti fattori (e.g. l'intensità del vento) debbano aver avuto un ruolo fondamentale nella formazione del sopralzo totale durante la mareggiata.

Si nota come la massima anomalia di marea abbia avuto luogo in coincidenza con una fase di bassa marea astronomica, avvenuta poco prima delle 17 del 29/10/2018 (Figura 40). L'alta marea astronomica successiva, verificatasi intorno alle 23.30 del 29/10/2018, ha contribuito a mantenere il livello marino ad una quota elevata anche dopo il passaggio del nucleo di bassa pressione.

6.1.3 **Sintesi degli aspetti rilevanti**

L'inquadramento generale dell'evento del 29 ottobre 2018 ha messo in evidenza gli aspetti fondamentali di seguito riassunti:

- L'evento meteorologico nel suo complesso ha manifestato connotati di eccezionalità relativamente alla presenza di un blocco anticiclonico sull'Europa Orientale che ha impedito l'evoluzione della depressione presente sul Mediterraneo Occidentale, con conseguente approfondimento del minimo depressionario. Una descrizione di dettaglio dell'evento meteorologico è stata fornita in un precedente studio realizzato da DICEA e LaMMA [7].
- Con riferimento al solo parametro sintetico costituito dall'altezza d'onda significativa, l'evento ha mostrato caratteri di eccezionalità (tempo di ritorno prossimo ai 100 anni) per gli ondametri di Capo Mele e di Giannutri.
- Le registrazioni di livelli e pressioni disponibili in località relativamente prossime a quella in esame mostrano un massimo livello idrometrico e un minimo barico di +0.68 m e 981-983 mbar rispettivamente (raggiunti il 29/10, fra le 15 e le 17 locali).
- Il massimo livello idrometrico presso Genova (+0.68 m rispetto al livello medio mare) non è stato precedentemente eguagliato nel periodo 2010-2018.
- La massima anomalia di marea ricostruita, pari a circa +0.67 m, ha avuto luogo in corrispondenza di un minimo di marea astronomica. L'alta marea astronomica successiva, verificatasi intorno alle 23.30 del 29/10, ha contribuito a mantenere elevato il sopralzo anche dopo il passaggio del nucleo di bassa pressione.
- La mancanza di dati ondametrici rilevati in prossimità della zona interessata, ha reso indispensabile adottare tecniche di modellazione numerica per ricostruire localmente la mareggiata (come documentato in *Sezione 5.2, Sezione 5.3,*).

6.2 RICOSTRUZIONE NUMERICA DELLA MAREGGIATA AL LARGO

Il modello WW3-DICEA (introdotto nella *Sezione 2.1*) è stato utilizzato per ricostruire numericamente la mareggiata al largo di Cala Cravieu (Figura 41, Figura 42).

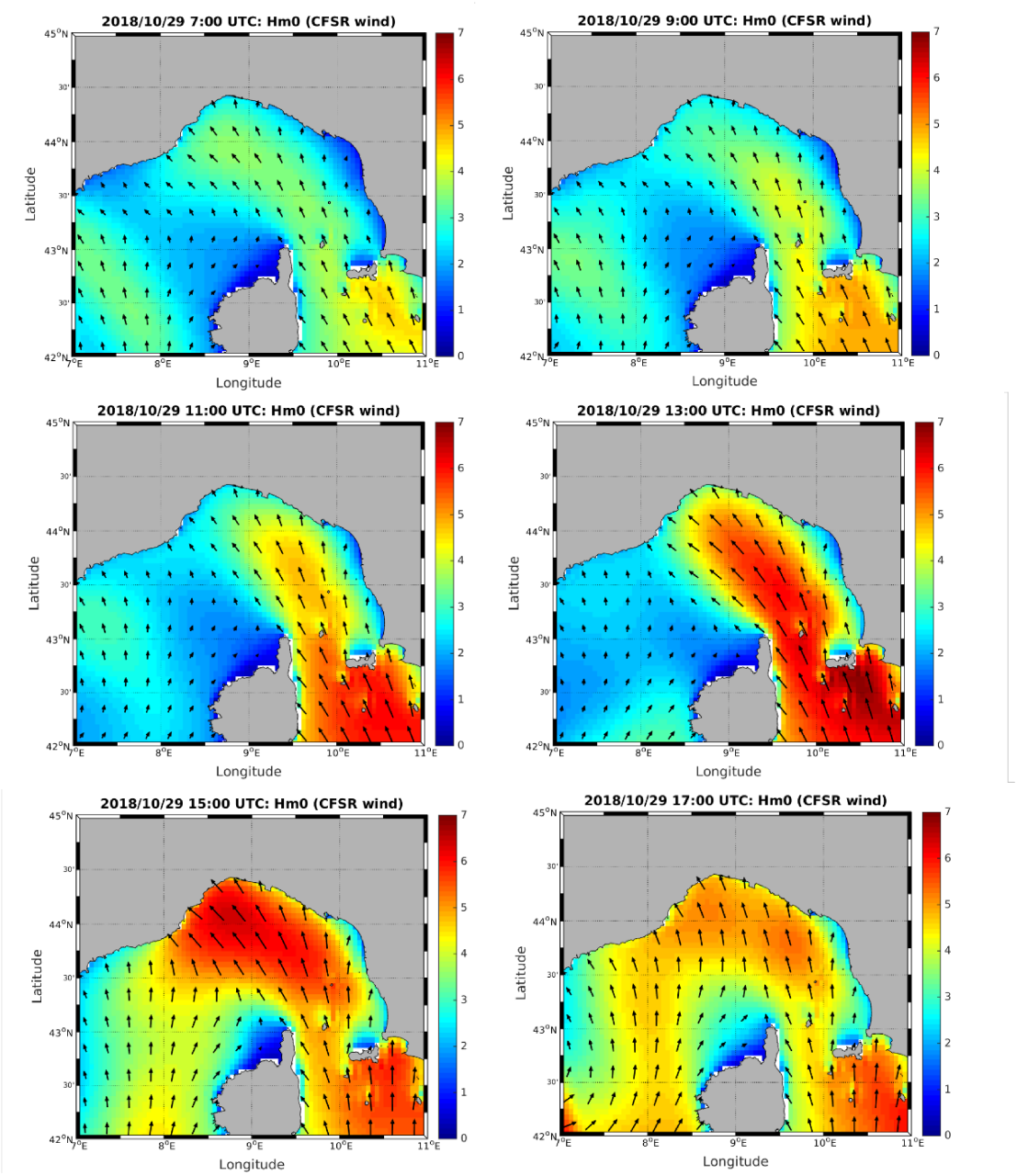


Figura 41: Evoluzione temporale dell'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza del moto ondoso fra le ore 07 UTC del 29/10/2018 e le 17 UTC del 29/10/2018.

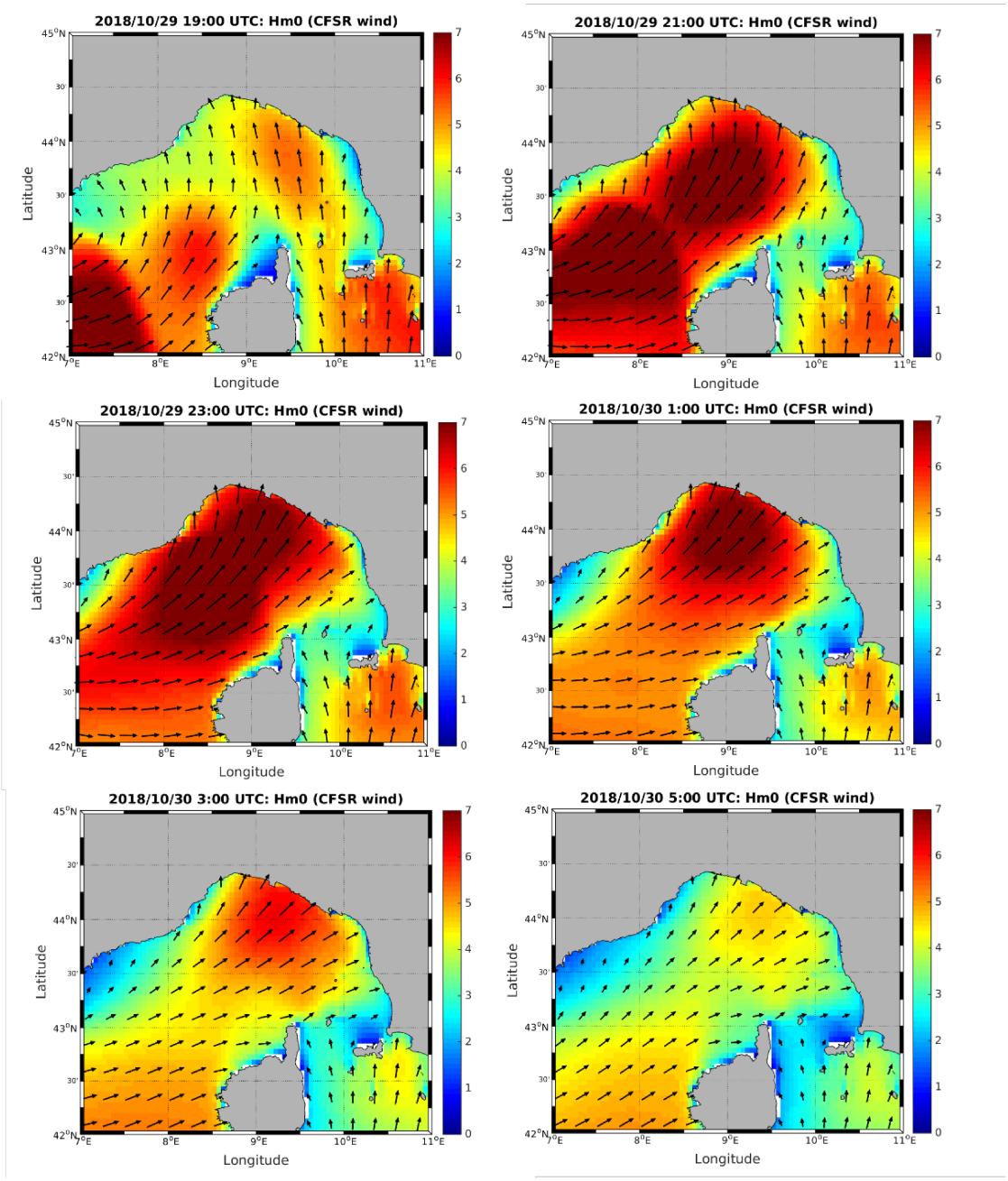


Figura 42: Evoluzione temporale dell'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza del moto ondoso fra le ore 19 UTC del 29/10/2018 e le 05 UTC del 30/10/2018.

L'attendibilità dei risultati è stata verificata tramite confronto dell'output del modello con le misurazioni di alcuni degli ondametri che hanno registrato la mareggiata (Figure II.1-II.5 in *ALLEGATO II*). Il modello mostra una capacità soddisfacente di riprodurre i

dati misurati dagli ondametri, in particolare per quanto riguarda i valori di picco di altezza significativa raggiunti durante la mareggiata.

In Figura 41 e Figura 42 è riportata l'evoluzione temporale del campo di altezza d'onda e la direzione di provenienza del moto ondoso fra le ore 07 del 29/10/2018 e le 05 del 30/10/2018, relativamente all'intera area dell'Alto Mediterraneo. È possibile osservare l'iniziale direzione di provenienza del moto ondoso da Scirocco, seguita da una seconda fase in cui l'agitazione ondosa nell'Alto Mediterraneo ha provenienza prevalente da Libeccio.

La Figura 43 mostra l'andamento di altezza significativa, direzione, periodo di picco T_p e periodo medio $T_{m-1,0}$ nel punto al largo di Cala Cravieu.

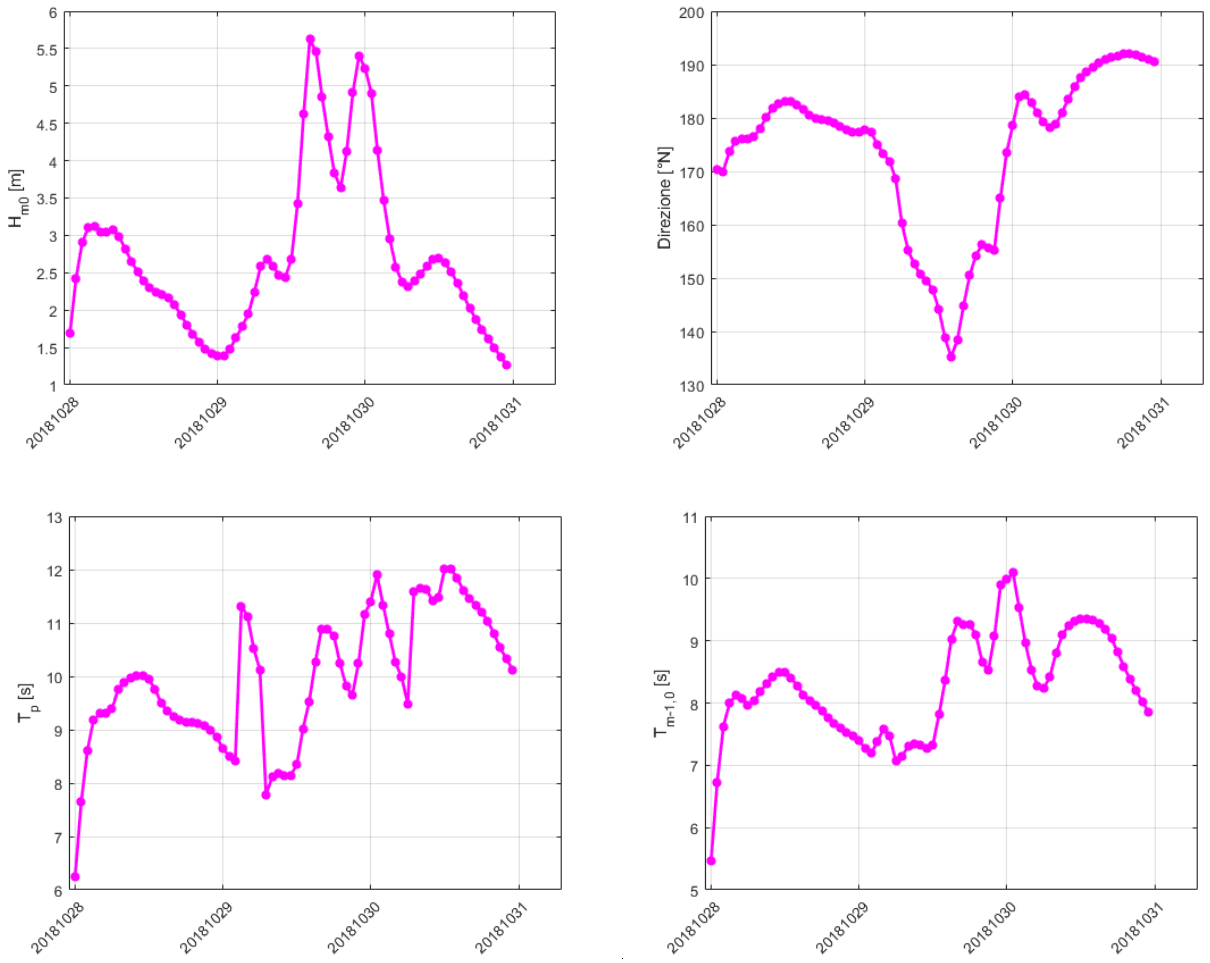


Figura 43: Ricostruzione della mareggiata del 29 ottobre 2018 con il modello WW3-DICEA nel punto al largo di Cala Cravieu: altezza significativa (H_{m0}), direzione (Dir), periodo di picco (T_p) e periodo medio ($T_{m-1,0}$).

La mareggiata, al largo, vede una direzione di proveninza variabile fra 135°N e 190°N. È possibile individuare un primo picco di altezza significativa, con valore Hs=5.6 m circa, corrispondente ad onde provenienti dalla direzione 135-140°N, verificatosi alle ore 15 circa del 29 ottobre 2018. Un secondo picco, verificatosi alle ore 23 circa del giorno 29 ottobre 2018, ha altezza significativa Hs=5.4 m e corrisponde ad onde provenienti dalla direzione 180°N circa.

Il primo picco è associato ad onde con un periodo $T_{m-1,0}$ di circa 9 s (con periodo di picco T_p pari a circa 10-11 s). Il secondo picco è associato ad onde con un periodo medio $T_{m-1,0}$ di circa 10 s, con un periodo di picco T_p di circa 11.2 s.

La mareggiata è stata caratterizzata, complessivamente, da valori di altezza d'onda significativa superiori a 3 m per una durata consecutiva di circa 16 ore (dalle ore 12 circa del giorno 29 ottobre, fino alle ore 04 circa del giorno 30 ottobre 2018). Valori di altezza d'onda significativa superiori alla soglia dei 2 m si sono osservati per 37 ore consecutive circa.

Confrontando i risultati ottenuti dalla ricostruzione della mareggiata al largo con i risultati dell'analisi statistica degli eventi estremi documentata in *Sezione 5.2*, è possibile osservare quanto segue:

- La massima altezza d'onda significativa raggiunta durante la mareggiata (Hs=5.6 m), è associata ad un tempo di ritorno superiore ai 100 anni (Tabella 21, Tabella 22, Tabella 24, Tabella 25), a prescindere dalla direzione di provenienza del moto ondoso. Si noti che, escludendo la mareggiata, non si sono registrate altezze d'onda significative superiori ai 5 m nel punto offshore di Cala Cravieu.
- Il primo picco di altezza significativa (Hs=5.6 m) corrisponde ad onde provenienti dalla direzione 135-140°N. La probabilità che gli eventi sopra soglia a largo provengano dal settore secondario (135-150°N) è inferiore al 7% (Figura 23,a). Inoltre, è da evidenziare come, escludendo la mareggiata in esame, le massime altezze significative dal settore secondario nel periodo 2000-2018 siano state di circa 3.6 m.
- La durata complessiva della mareggiata, con valori sopra la soglia dei 2 m per oltre 30 ore consecutive, costituisce un ulteriore tratto di eccezionalità: l'analisi degli eventi passati ha infatti rivelato come, nel periodo 2000-2018, mareggiate con durata di 30 ore si siano presentate con una frequenza relativa del 3% circa (Figura 23,b).

Deve essere sottolineato come la durata della mareggiata sia un parametro di primaria importanza nella determinazione dell'effetto sollecitante della stessa su una struttura marittima: a parità di altezza significativa, una mareggiata con durata superiore si traduce in una probabilità maggiore che si siano presentate singole onde con altezza massima fino al doppio della significativa.

6.3 PROPAGAZIONE DELLA MAREGGIATA A COSTA

Si riportano in questa sezione i risultati ottenuti propagando a costa la mareggiata del 29/10 con il modello spettale MIKE21-SW.

I punti considerati per l'estrazione delle caratteristiche del moto ondoso a costa sono gli stessi introdotti in Sezione 4.4 e Figura 10.

La mareggiata, al largo, vede una direzione di provenienza del moto ondoso compresa fra i 135 e i 190°N circa. Nella propagazione a costa, l'azione di marcati fenomeni di rifrazione che avvengono prima che le onde raggiungano il Cala Cravieu, porta i fronti d'onda a subire una progressiva rotazione, assumendo direzione circa parallela a quella della diga. Durante la mareggiata, il moto ondoso a costa ha avuto direzioni comprese fra circa 130 e 150°N (Figura 45).

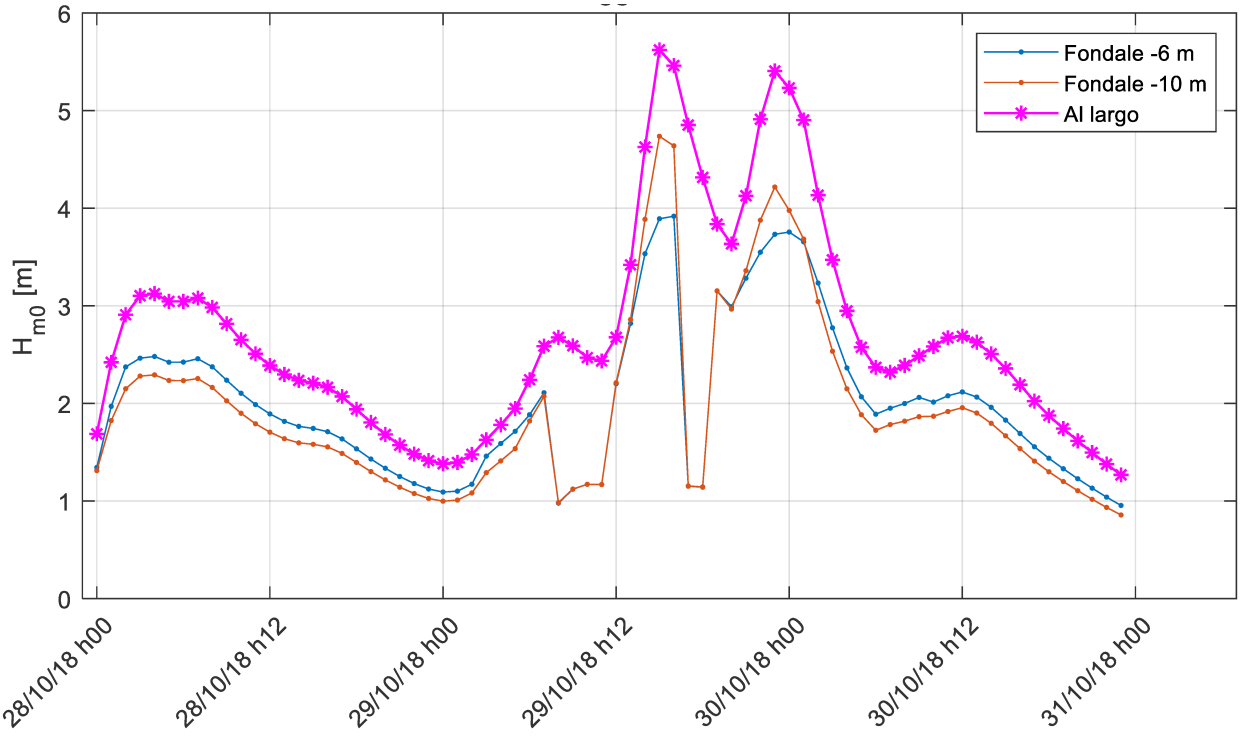


Figura 44: Altezza d'onda significativa per la mareggiata del 29 ottobre 2018 al largo di Cala Cravieu e sui fondali con profondità 6 m e 10 m antistanti la diga.

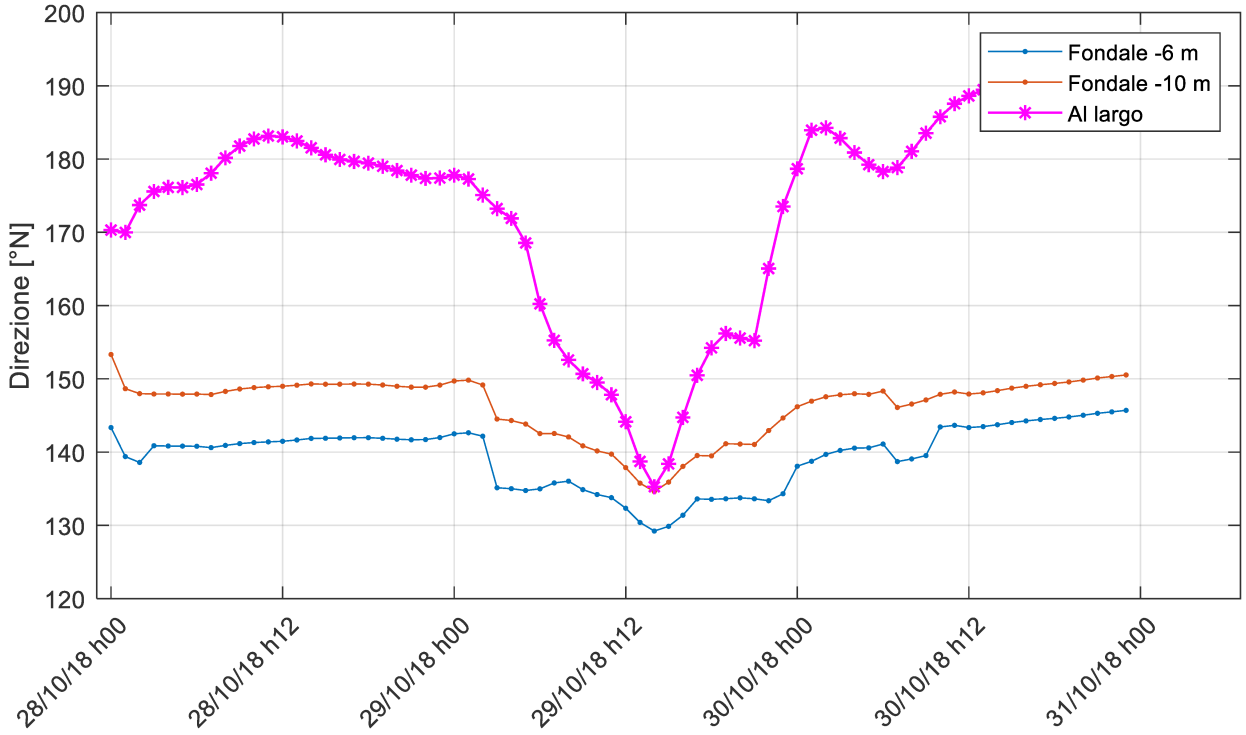


Figura 45: Direzione di provenienza del moto ondoso per la mareggiata del 29 ottobre 2018 al largo di Cala Cravieu e sui fondali con profondità 10 m.

I fenomeni di rifrazione e di frangimento che si verificano nella propagazione a costa hanno determinato una riduzione della massima altezza d'onda significativa rispetto ai valori al largo, in particolare:

- Il primo picco di altezza significativa al largo (Hs=5.6 m circa, con onde provenienti da 135-140°N), verificatosi intorno alle 15 del 29 ottobre 2018, giunge sui fondali a profondità 10 m con un valore di Hs di circa 4.7 m, subendo quindi una considerevole riduzione in altezza per fenomeni di interazione con il fondale (Figura 44).
- Il secondo picco di altezza significativa al largo (Hs=5.4 m, con provenienza da 180°N circa), verificatosi alle 23 del 29 ottobre, giunge sui fondali a profondità 10 m antistanti la diga con Hs=4.2 m circa e direzione di provenienza 145°N (Figura 44).
- La mareggiata, sui fondali di 10 m, ha presentato altezza significativa superiore ai 3 m per circa 10 ore, non continuative (Figura 44).

- Sui fondali a profondità di circa 6 m quali, in prima approssimazione, quelli al piede della diga di Cala Cravieu[6], intervengono marcati fenomeni di frangimento che portano le massime altezze d'onda significative ad essere di poco inferiori ai 4 m durante la mareggiata (Figura 44).

In relazione all'analisi degli eventi estremi condotta per il moto ondoso propagato a costa sui fondali antistanti la diga di Cala Cravieu (*Sezione 5.3*), la massima altezza significativa raggiunta durante la mareggiata sui fondali di 10 m (Hs=4.7 m) ha un tempo di ritorno superiore ai 100 anni su quegli stessi fondali (la statistica a costa per le onde provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia risulta in un'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno centennale pari a Hs=3.9 m, *Sezione 5.3.1*, Tabella 34).

6.4 SET-UP SUI FONDALI ANTISTANTI LA DIGA

La mareggiata del 29 ottobre 2018 è stata caratterizzata da una notevole sopraelevazione del livello marino nell'alto tirreno, composto in parte da sopralzo barico (quantificabile in almeno 35 cm, coerentemente con le registrazioni di dati barometrici, *Sezione 6.1.2*), sopralzo indotto da vento, set-up d'onda, effetti di marea astronomica.

Sulle coste esposte all'azione del moto ondoso è infine necessario calcolare l'azione del set-up d'onda, ovvero quella indotta dalle onde nella zona dei frangenti, per la quale è necessario adottare modelli costieri a più alta risoluzione. Si deve tener conto che, in un evento così importante (con onde di altezza significativa, al largo, fino a 5-6 m), la fascia dei frangenti è molto ampia ed è lecito attendersi un effetto legato all'innalzamento del livello prodotto direttamente dall'azione del moto ondoso anche in zone protette dall'azione diretta delle onde.

Il valore del set-up d'onda potrebbe essere propriamente quantificato mediante specifica modellistica sperimentale su modello in scala di laboratorio da condursi in un canale marittimo per onde e correnti.

[6] Sulla base del rilievo fornito dal committente, il piede della diga di Cala Cravieu ha, lato mare, una quota variabile fra i 4 e i 6 m.

7 AGGIORNAMENTO DELLA STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI CON LA MAREGGIATA DI OTTOBRE 2018

La statistica degli eventi estremi è stata aggiornata per includere l'evento del 29 ottobre 2018. L'analisi è stata condotta sulla serie temporale dei dati relativi all'intero periodo gennaio 2000/dicembre 2018, così come simulati dal modello WW3-DICEA e propagati a costa tramite il modello MIKE21-SW.

Nella propagazione a costa è stato considerato un sopralzo pari a 0.7 m (richiesto dal Committente e comparabile al livello registrato dal mareografo di Genova durante la mareggiata di ottobre 2018).

È riportata, di seguito, la statistica degli eventi estremi per le seguenti casistiche:

(i) Aggiornamento della statistica al largo di Cala Cravieu, per eventi provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N);
(ii) Aggiornamento della statistica su fondale di 10 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N);
(iii) Aggiornamento della statistica a costa, su fondale di 6 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N);
(iv) Statistica stagionale a costa, su fondale di 6 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N).

I punti considerati per l'estrazione delle caratteristiche del moto ondoso a costa sono gli stessi introdotti in Sezione 4.4 e Figura 10.

7.1.1 Statistica annuale al largo di Cala Cravieu, per eventi provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N)

Includendo la mareggiata del 29/10/2018 negli eventi analizzati nel punto al largo di Cala Cravieu, e considerando eventi provenienti dall'intero settore 135-215°N, l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 100 anni aumenta a Hs=5.2 m (Gumbel) o Hs=5.7 m (Weibull) (Tabella 40, Tabella 41).

Si osserva che la mareggiata del 29 ottobre 2019, significativamente più intensa di tutti gli eventi registrati in precedenza, contribuisce in modo rilevante all'aumento dell'altezza d'onda con tempo di ritorno centennale.

Tabella 39: Parametri di analisi statistica al largo di Cala Cravieu per onde provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
2.00	0.47	0.58	2.17	1.86	6.6

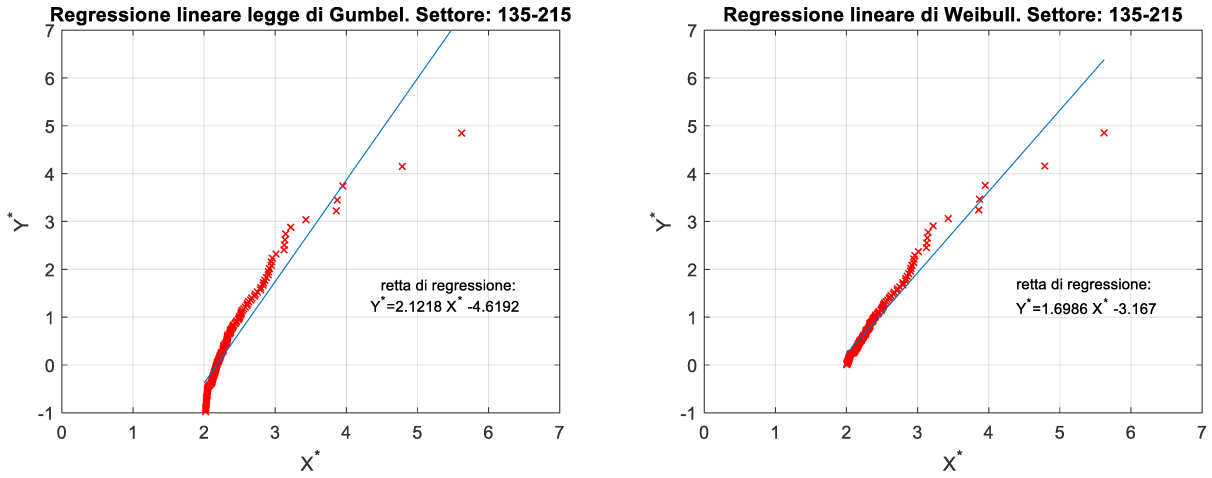


Figura 46: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull al largo di Cala Cravieu per onde provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

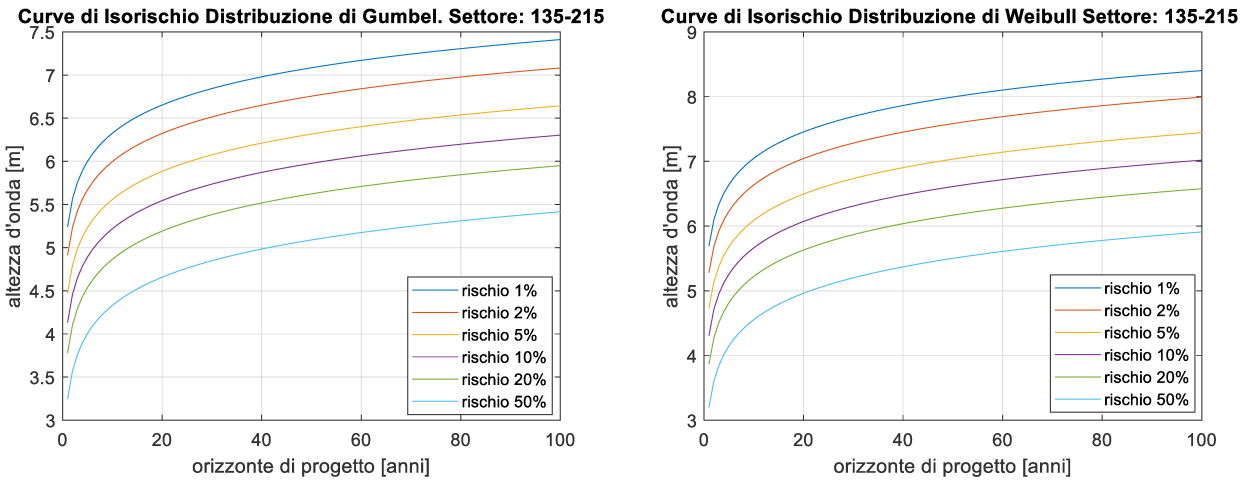


Figura 47: Altezze d'onda significative al largo di Cala Cravieu funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

Tabella 40: Altezza d'onda significativa al largo di Cala Cravieu per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	3.0	3.4	3.8	4.2	4.5	4.9	5.2

Tabella 41: Altezza d'onda significativa al largo di Cala Cravieu per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	3.0	3.4	3.9	4.3	4.7	5.3	5.7

7.1.2 Statistica annuale a costa, su fondale di 10 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N)

Includendo la mareggiata del 29/10/2018 (così come propagata sui fondali antistanti la diga di Cala Cravieu a profondità 10 m, con un set-up di 0.7 m) tra gli eventi analizzati nella statistica degli estremi e considerando moti ondosi provenienti, al largo, dall'intero settore 135-215°N, l'altezza d'onda significativa a costa con tempo di ritorno 100 anni assume un valore Hs=4.2 m (Gumbel) o Hs=4.6 m (Weibull) (Tabella 43, Tabella 44).

Tabella 42: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

$H_{threshold}$ **[m]**	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.5	0.41	0.52	1.62	1.35	4.9

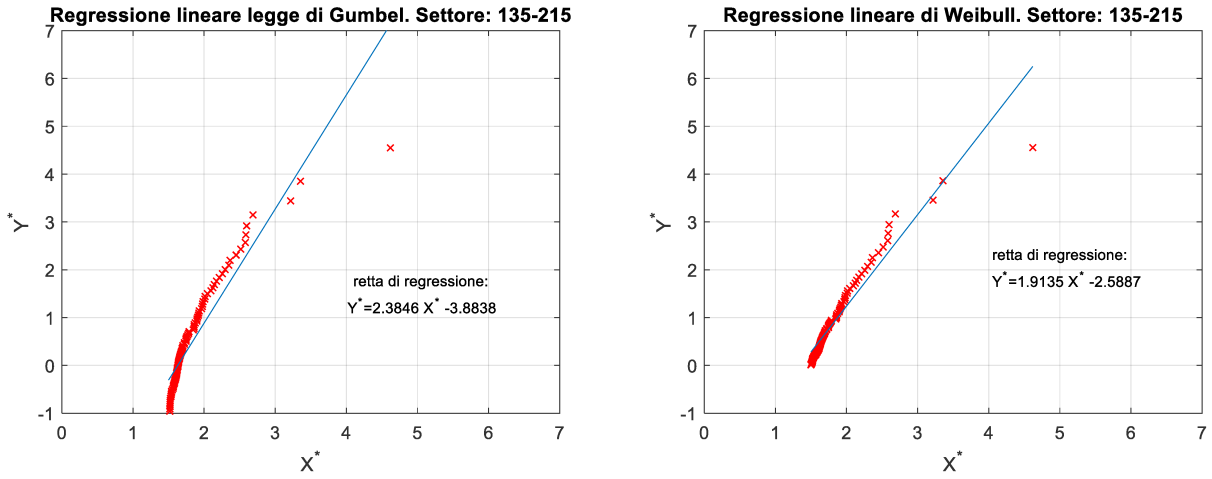


Figura 48: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale d 10 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

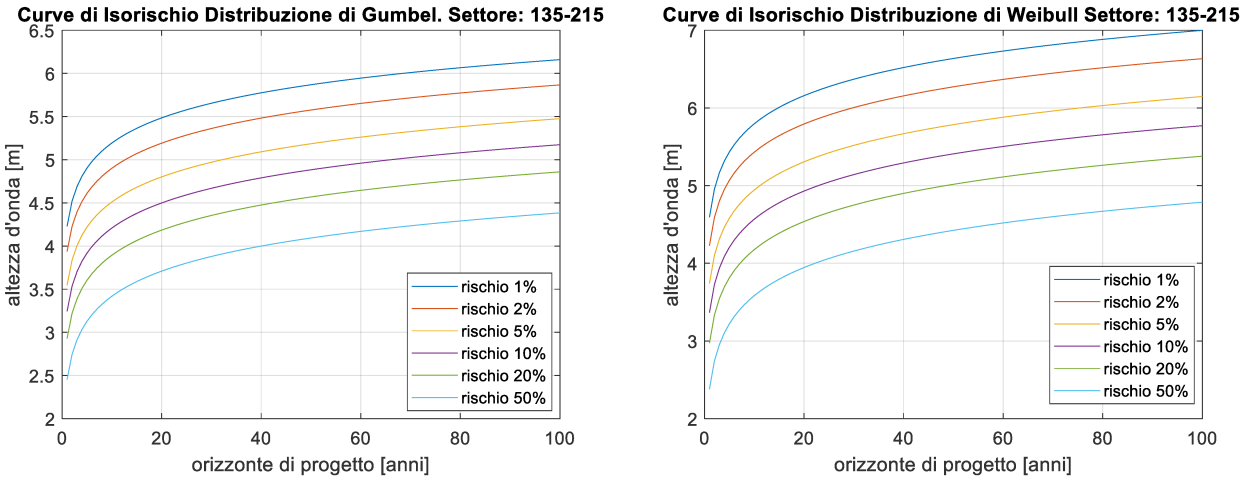


Figura 49: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

Tabella 43: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.3	2.6	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2

Tabella 44: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 10 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.6

7.1.3 Statistica annuale a costa, su fondale di 6 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N)

Includendo la mareggiata del 29/10/2018 (propagata sui fondali antistanti la diga a profondità 6 m, con un set-up di 0.7 m) tra gli eventi analizzati, l'altezza d'onda significativa a costa con tempo di ritorno 100 anni assume un valore Hs=3.8 m (Gumbel) o Hs=4.1 m (Weibull) (Tabella 46, Tabella 47).

Tabella 45: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.5	0.34	0.43	1.65	1.43	5.8

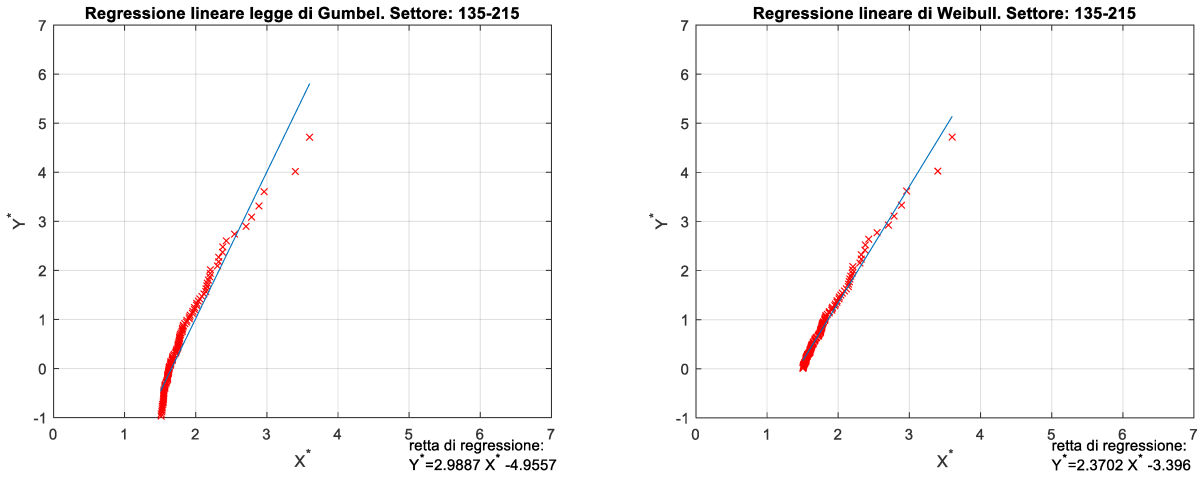


Figura 50: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale d 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

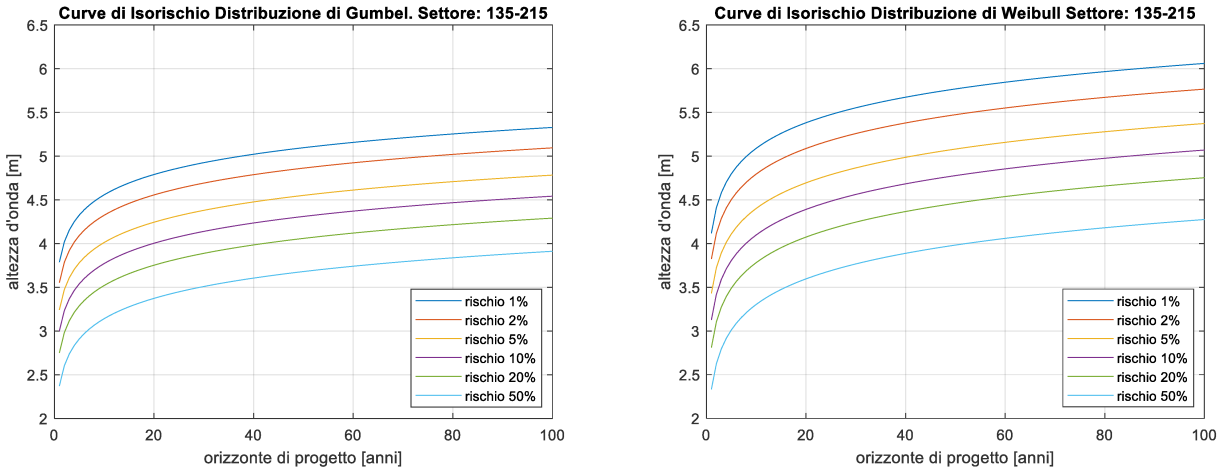


Figura 51: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m , in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

Tabella 46: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8

Tabella 47: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m , per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.2	2.5	2.9	3.2	3.5	3.9	4.1

7.1.4 Statistica stagionale a costa, su fondale di 6 m, per gli eventi provenienti, al largo, dall'intero settore di traversia (135-215°N)

Conducendo l'analisi statistica sulle singole stagioni[7], sui fondali di 6 m con 0.7 m di set-up, l'altezza d'onda significativa a costa con tempo di ritorno 100 anni assume un valore di:

- Hs=4.1 m (Weibull) in autunno (Tabella 50);
- Hs=4.0 m (Weibull) in inverno (Tabella 53);
- Hs=2.8 m (Weibull) in primavera (Tabella 56);
- Hs=2.6 m (Weibull) in estate (Tabella 59).

Autunno

Tabella 48: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.4	0.41	0.53	1.56	1.29	2.5

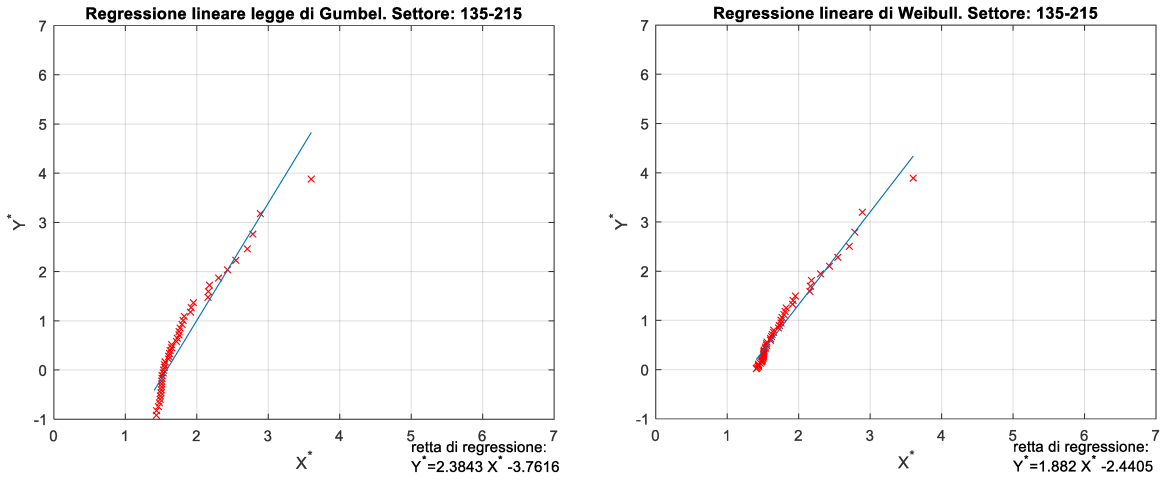


Figura 52: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale.

[7] Come precedentemente introdotto in Sezione 4.4.2, le stagioni dell'anno si intendono così suddivise: inverno: dicembre-gennaio-febbraio; primavera: marzo-aprile-maggio; estate: giugno-luglio-agosto; autunno: settembre-ottobre-novembre.

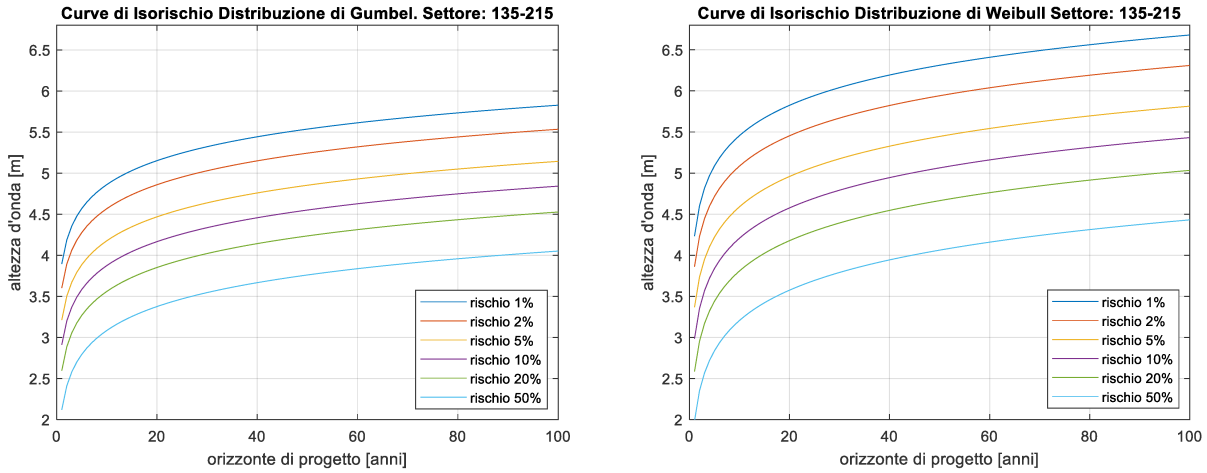


Figura 53: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale.

Tabella 49: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.0	2.3	2.7	2.9	3.2	3.6	3.9

Tabella 50: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo autunnale.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.0	2.3	2.7	3.0	3.4	3.9	4.1

Inverno

Tabella 51: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.4	0.37	0.47	1.59	1.34	2.4

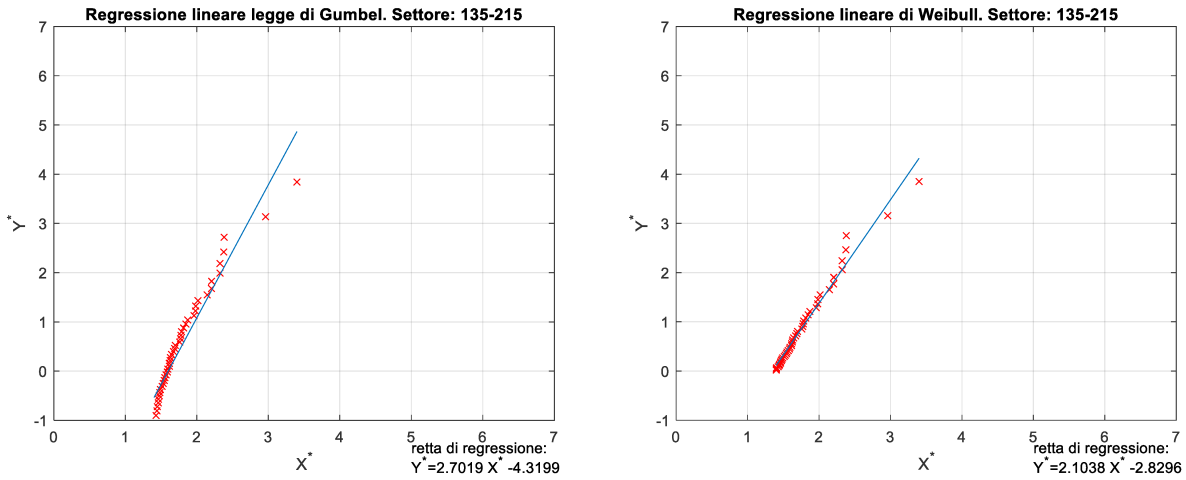


Figura 54: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale.

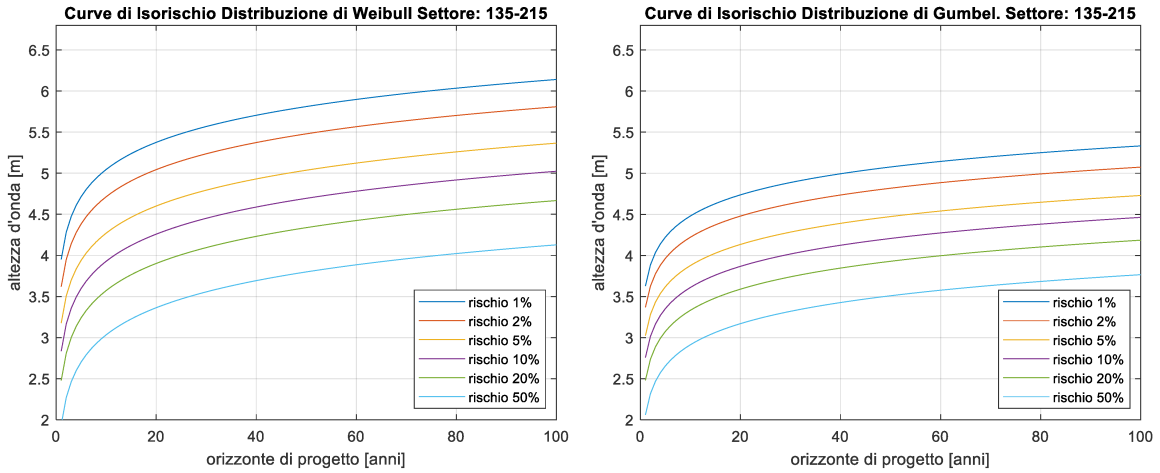


Figura 55: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale.

Tabella 52: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	1.9	2.1	2.5	2.8	3.0	3.4	3.7

Tabella 53: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo invernale.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.0	2.2	2.6	2.9	3.2	3.6	4.0

Primavera

Tabella 54: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.4	0.20	0.26	1.53	1.39	1.84

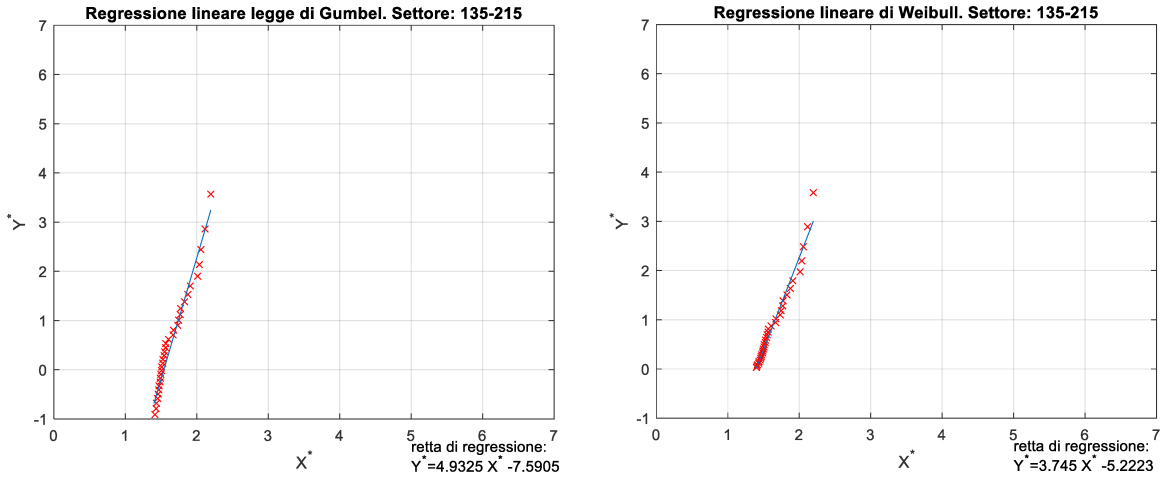


Figura 56: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile.

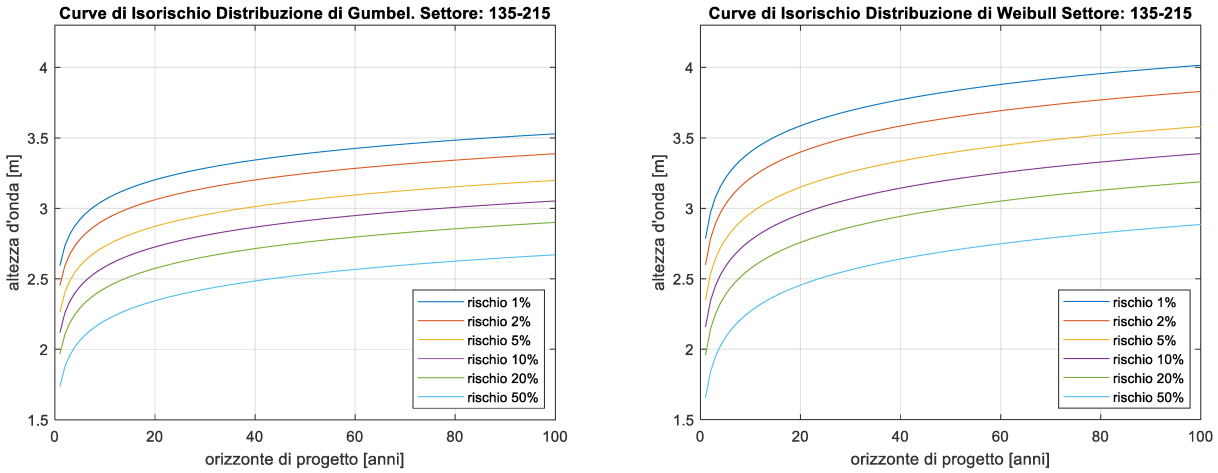


Figura 57: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile.

Tabella 55: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	1.6	1.8	2.0	2.1	2.3	2.5	2.6

Tabella 56: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo primaverile.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	1.6	1.7	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8

Estate

Tabella 57: Parametri di analisi statistica a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N) per le distribuzioni di Gumbel e Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo.

$H_{threshold}$ [m]	β_{Gumbel}	$B_{Weibull}$	γ_{Gumbel}	$\gamma_{Weibull}$	λ
1.2	0.21	0.27	1.32	1.18	1.84

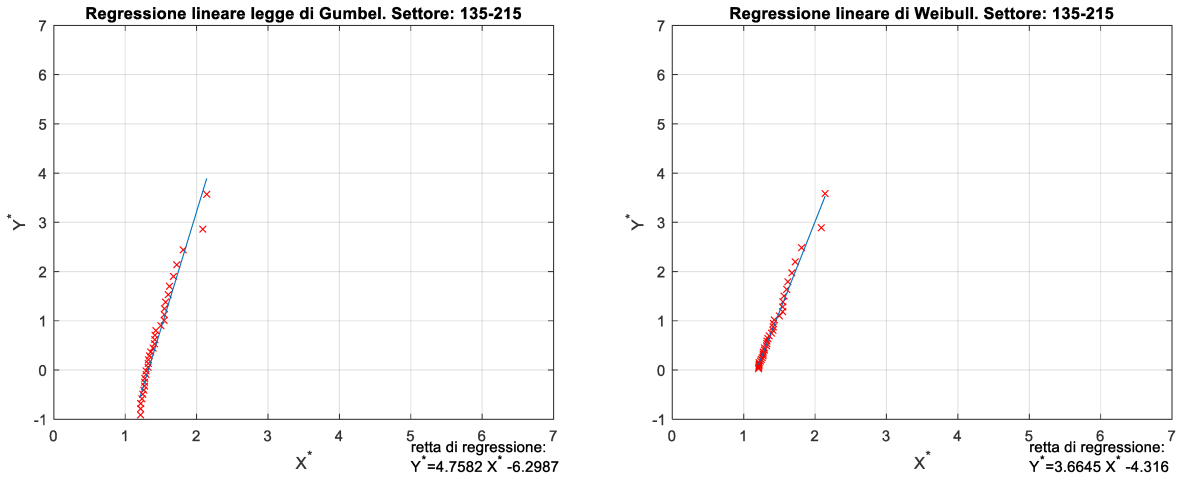


Figura 58: Regressione lineare per la stima dei parametri delle leggi di Gumbel e Weibull a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo.

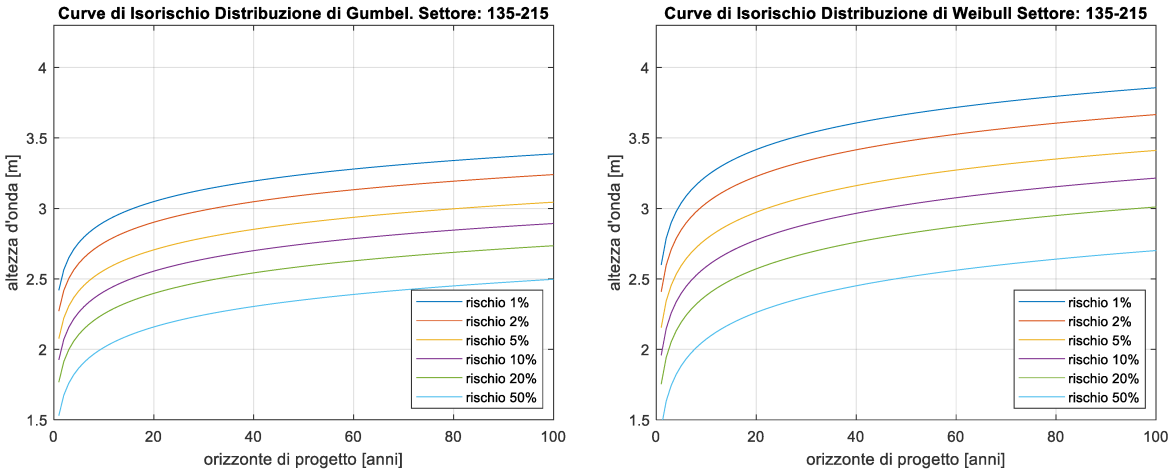


Figura 59: Altezze d'onda significative a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel e di Weibull, per onde provenienti al largo dall'intero settore di traversia (135-215°N). Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo.

Tabella 58: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Gumbel. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	1.4	1.6	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4

Tabella 59: Altezza d'onda significativa a costa di Cala Cravieu, su fondale di 6 m, per diversi tempi di ritorno (1-100 anni), per onde dall'intero settore di traversia (135-215°N) – Distribuzione di Weibull. Aggiornamento della statistica con l'evento del 2018. Periodo estivo.

	tempo di ritorno [anni]						
	1	**3**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6

8 CONCLUSIONI

L'evento che ha colpito con particolare violenza la costa ligure in data 29/10/2018 è stato ricostruito e caratterizzato in relazione al contesto storico di eventi estremi per la zona in esame.

La ricostruzione della mareggiata, effettuata tramite modellistica numerica, ha mostrato, al largo di Cala Cravieu, una massima altezza d'onda significativa associabile ad un tempo di ritorno di oltre 100 anni.

Anche sui fondali a profondità 6 m antistanti la diga di Cala Cravieu la massima altezza significativa raggiunta durante la mareggiata (Hs pari a circa 4 m) ha un tempo di ritorno di circa 100 anni (rapportata alla statistica a costa condotta per onde provenienti dall'intero settore di traversia, su quegli stessi fondali).

La sola considerazione del parametro altezza significativa consentirebbe, dunque, di denotare l'evento in esame quale eccezionale.

L'evento del 29 ottobre 2018, mai eguagliato nella zona in termini di altezza significativa, ha provocato una variazione rilevante nella statistica degli eventi estremi volta a definire le azioni di progetto da considerarsi per la ricostruzione della diga.

In particolare, sui fondali a profondità 6 m antistanti la diga, considerando un set-up di 0.7 m e con la funzione estremale di Weibull, l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 100 anni aumenta ad Hs=4.1 m, con periodo T_p=11.7 s. Considerando il solo periodo estivo, l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 100 anni ha valore ad Hs=2.6 m con periodo T_p=11 s.

Si ritiene opportuno rimarcare che tali moti ondosi, una volta propagati a costa, hanno direzione compresa fra 130-160°N per il 90% del tempo circa, risultando in tale circostanza inclinati rispetto alla diga di Cala Cravieu di 30-60°.

BIBLIOGRAFIA

[1] The WAVEWATCH III® Development Group (WW3DG), 2016: *User manual and system documentation of WAVEWATCH III*, R version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. Available at

http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf (accessed 23/01/2019).

[2] Pelli, D., 2018, *Nested Modelling of wave processes from deep to shallow water: Building of an operational wave model system*. PhD Thesis. University of Florence and University of Braunschweig.

[3] NOAA - https://governmentshutdown.noaa.gov/

[4] MIKE21, Spectral Wave Module, Scientific Documentation,

http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf

[5] https://geoportal.regione.liguria.it/

[6] Shore protection manual: Volume I and II, 1984, Hydraulic Engineering Reports, Coastal Engineering Research Center, Mississipi.

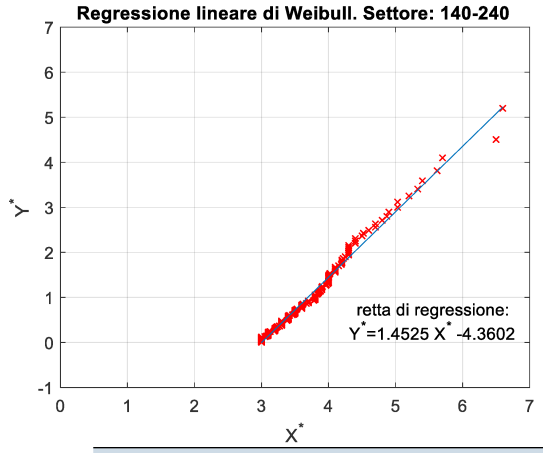
[7] UNIFI-DICEA-LaMMA, Carattrizzazione del Clima Meteomarino e Ricostruzione della mareggiata del 29 ottobre 2018 presso il Porto Carlo Riva (Rapallo). Relazione Tecnica.

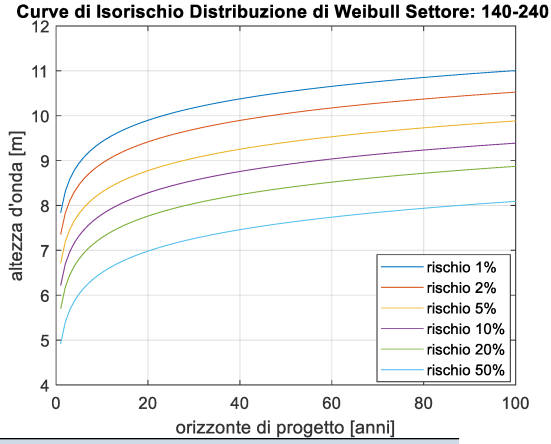
ALLEGATO I - Eventi estremi per altri ondametri nell'alto mediterraneo

I.1 - Analisi degli eventi estremi per l'ondametro di LA SPEZIA

Settore: 140-240°N - Periodo: 1989 – 2005, dati tri-orari

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=3.0m F. estremante: Weibull, parametro α =1

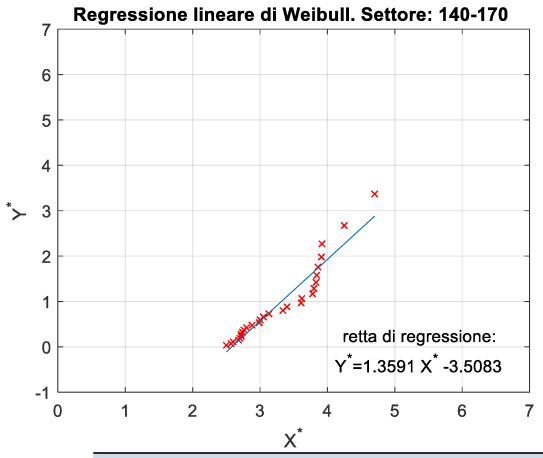


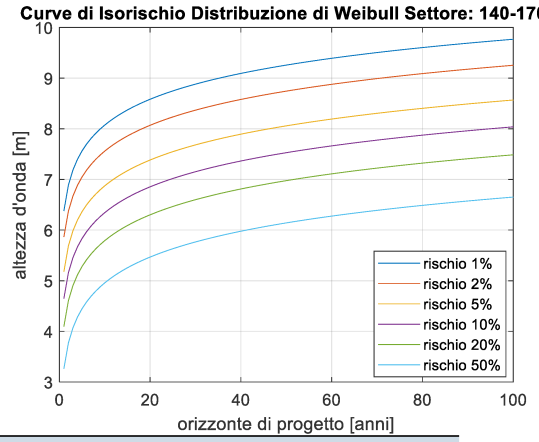


	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	4.7	5.1	5.8	6.3	6.7	7.4	7.8

Settore: 140-170°N - Periodo: 1989 – 2005, dati tri-orari

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=2.5m F. estremante: Weibull, parametro α =1



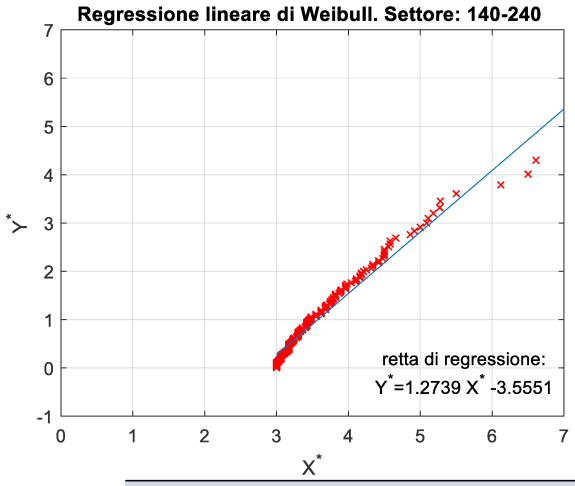


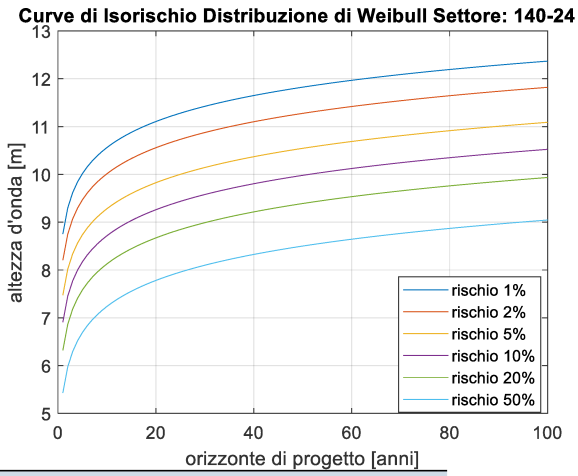
	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	3.0	3.5	4.2	4.7	5.2	5.8	6.3

I.2 - Analisi degli eventi estremi per l'ondametro di GORGONA

Settore: 140-240°N - Periodo: 2008-2018, dati ogni 30 minuti

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=3.0m F. estremante: Weibull, parametro α =1

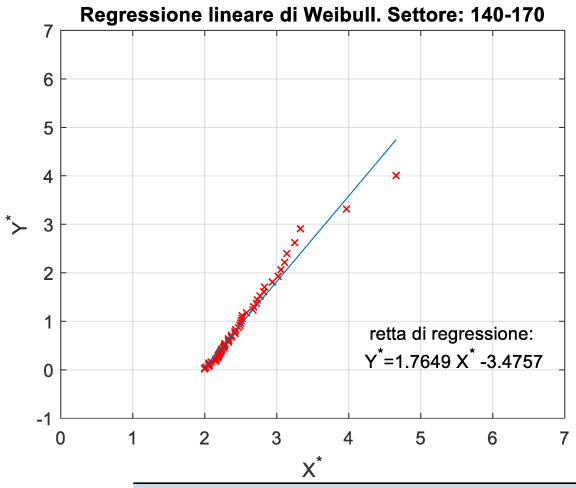


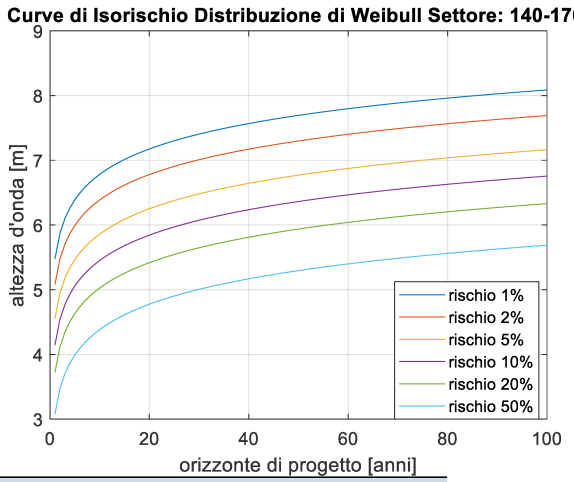


	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	5.1	5.7	6.4	6.9	7.5	8.2	8.8

Settore: 140-170°N - Periodo: 2008-2018, dati ogni 30 minuti

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=2.0m F. estremante: Weibull, parametro α =1



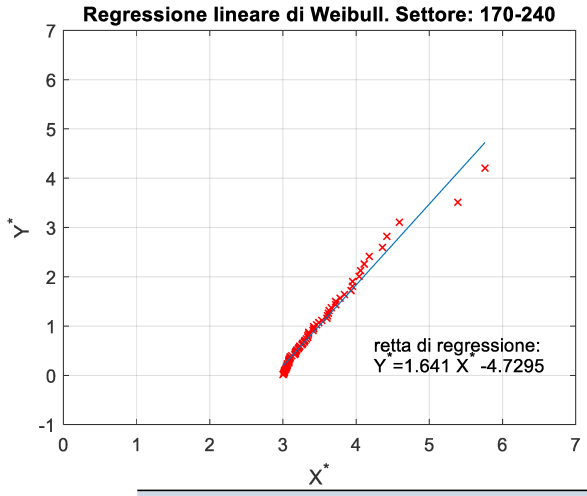


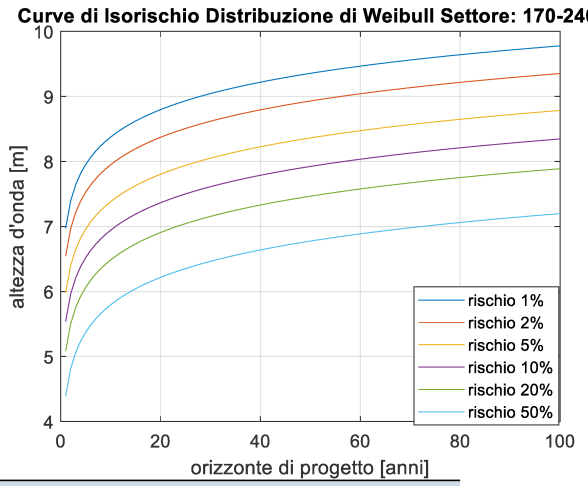
	tempo di ritorno [anni]						
	1	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	5.1	5.5

I.3 - Analisi degli eventi estremi per l'ondametro di GOMBO

Settore: 170-240°N** - Periodo: 2011-2018, dati ogni 30 minuti

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=3.0m F. estremante: Weibull, parametro α =1





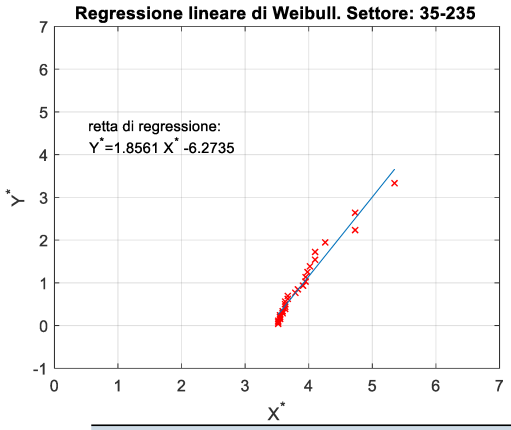
	tempo di ritorno [anni]						
	1	2	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	4.2	4.6	5.1	5.6	6.0	6.6	7.0

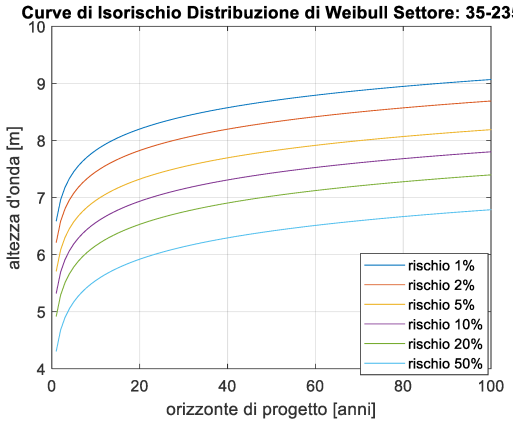
** l'analisi è stata effettuata soltanto sul settore 170-240°N in quanto l'ondametro ondametrica di Gombo ha come proprio settore di apertura 170-310°N.

I.4 - Analisi degli eventi estremi per l'ondametro di CAPO MELE

Settore: 35-235°N** - Periodo: 2012-2018, dati ogni 30 minuti

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=3.5m F. estremante: Weibull, parametro α =1





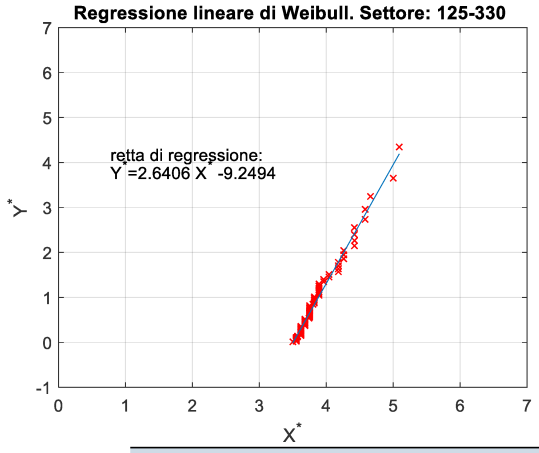
	tempo di ritorno [anni]						
	1	2	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	4.1	4.5	5.0	5.4	5.7	6.2	6.6

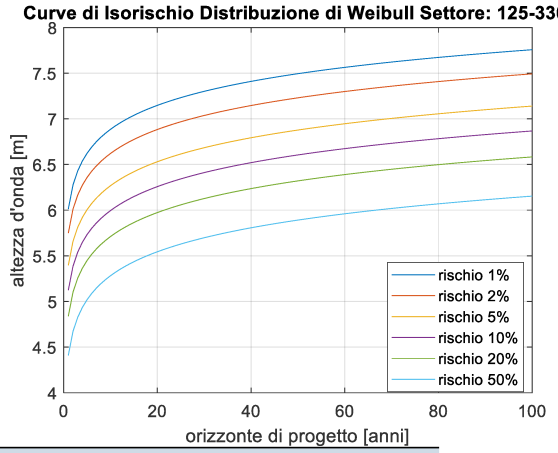
** l'analisi è stata effettuata sull'intero settore di traversia cui risulta esposto l'ondametro.

I.5 - Analisi degli eventi estremi per l'ondametro di GIANNUTRI

Settore: 125-330°N** - Periodo: 2009-2018, dati ogni 30 minuti

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=3.5m F. estremante: Weibull, parametro α =1





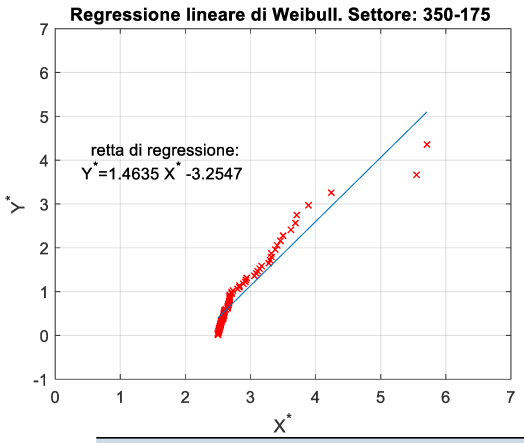
	tempo di ritorno [anni]						
	1	2	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	5.8	6.0

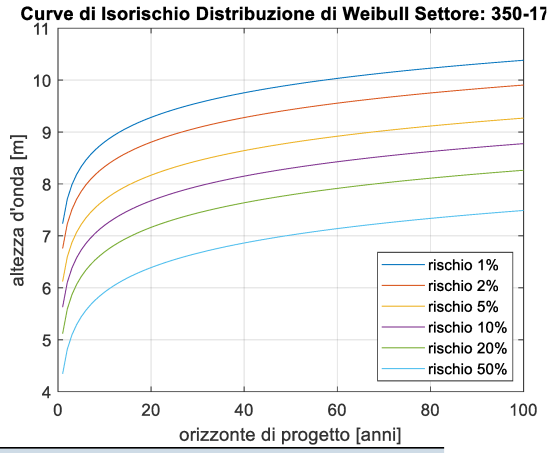
** l'analisi è stata effettuata sull'intero settore di traversia cui risulta esposto l'ondametro.

I.6 - Analisi degli eventi estremi per l'ondametro di ALISTRO

Settore: 350-175°N** - Periodo: 2013-2018, dati ogni 30 minuti

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=2.5m F. estremante: Weibull, parametro α =1





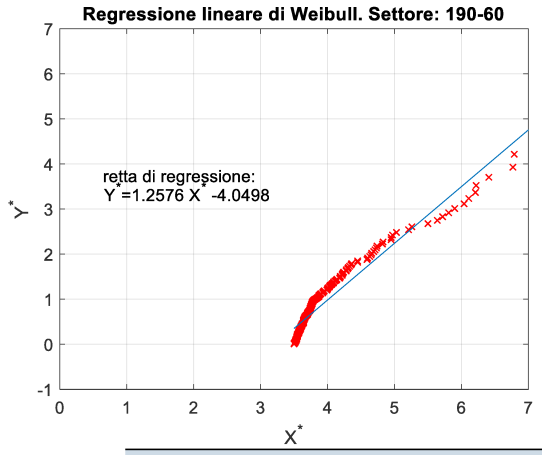
	tempo di ritorno [anni]						
	1	2	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	4.1	4.6	5.2	5.7	6.1	6.8	7.2

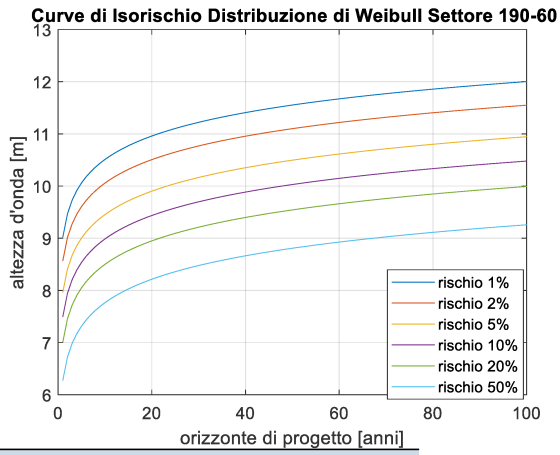
** l'analisi è stata effettuata sull'intero settore di traversia cui risulta esposto l'ondametro.

I.7 - Analisi degli eventi estremi per l'ondametro di LA RAVELLATA

Settore: 190-60°N** - Periodo: 2013-2018, dati ogni 30 minuti

Metodo: POT (*Sezione 5.1*) $H_{threshold}$=3.5m F. estremante: Weibull, parametro α =1





	tempo di ritorno [anni]						
	1	2	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Hs [m]	6.0	6.5	7.1	7.5	8.0	8.6	9.0

** l'analisi è stata effettuata sull'intero settore di traversia cui risulta esposto l'ondametro.

ALLEGATO II – Confronto fra previsioni dei modelli e registrazioni delle boe ondametriche

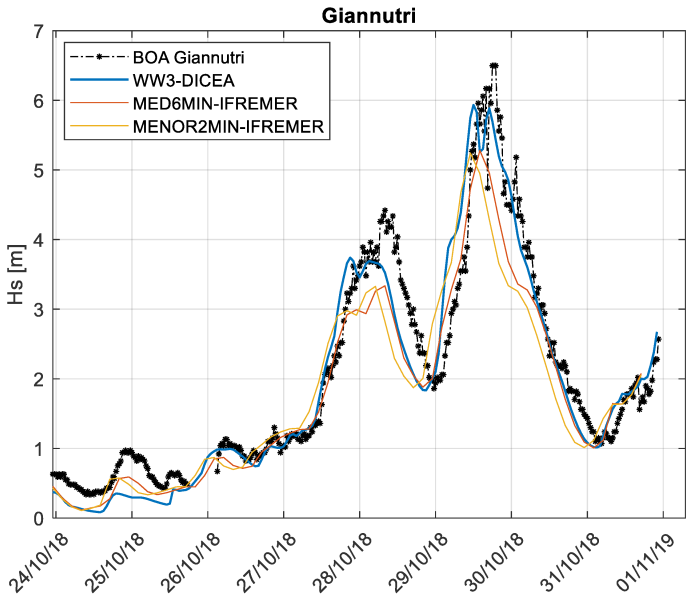


Figura II.1: Registrazione della mareggiata presso l'ondametro di Giannutri e le previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 mIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN.

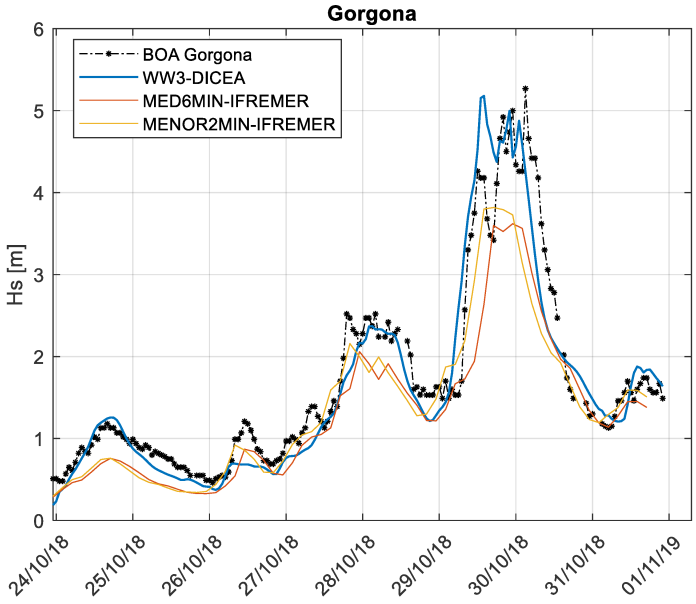


Figura II.2: Registrazione della mareggiata presso l'ondametro di Gorgona previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 mIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN.

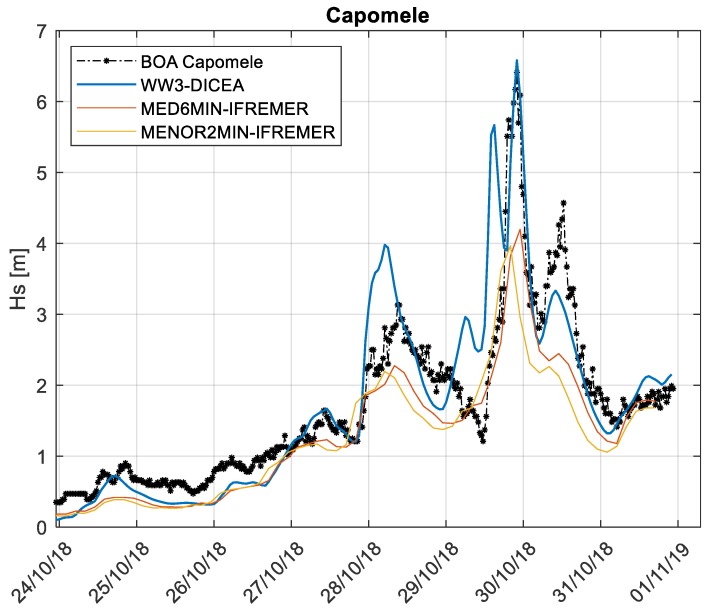


Figura II.3: Registrazione della mareggiata presso l'ondametro di Capo mele previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 mIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN.

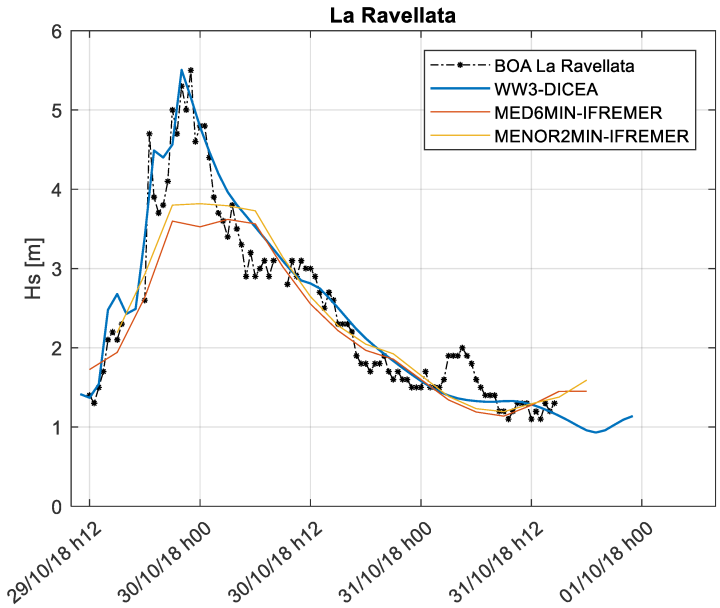


Figura II.4: Confronto fra le registrazioni della mareggiata presso l'ondametro di La Ravellata previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 mIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN.

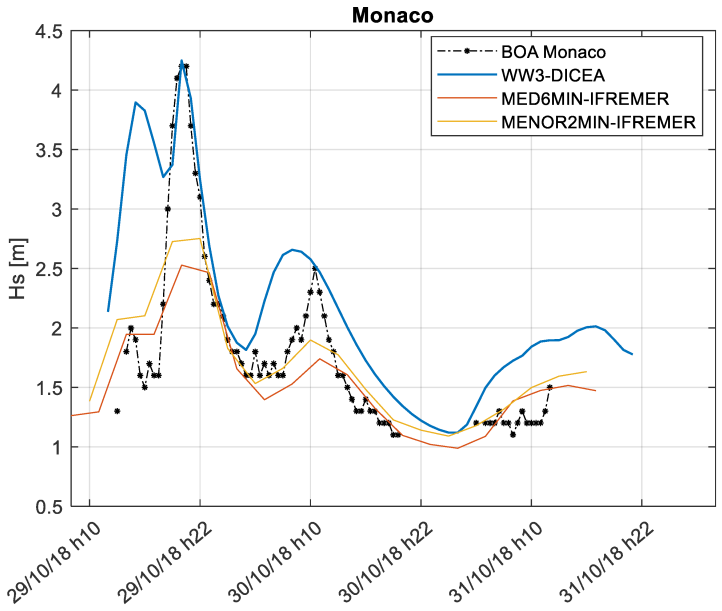


Figura II.5: Registrazione della mareggiata presso la boa di Monaco previsioni dei modelli numerici WW3-DICEA, MARC-IFREMER MED 6 MIN e MARC-IFREMER MENOR 2MIN.