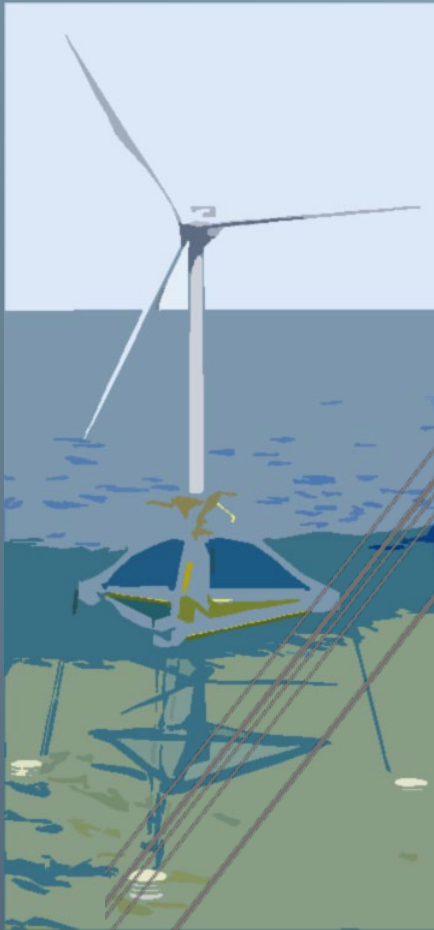




Ichnusa wind power srl

Progetto Definitivo

**PARCO EOLICO FLOTTANTE  
NEL MARE DI SARDEGNA  
SUD OCCIDENTALE**



# UR08

C0421UR08RELMET00a

**Ministero dell'Ambiente  
e della Sicurezza Energetica**

**Ministero della Cultura**

**Ministero delle Infrastrutture  
e dei Trasporti**

*Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale  
ex D.lgs. 152/2006*

*Domanda di Autorizzazione Unica  
ex D.lgs. 387/ 2003*

*Domanda di Concessione Demaniale Marittima  
ex R.D. 327/1942*

## RELAZIONE METEOMARINA

Progetto  
**Dott. Ing. Luigi Severini**  
Ord. Ing. Prov. TA n.776

Elaborazioni  
**iLStudio.**  
Engineering & Consulting **Studio**

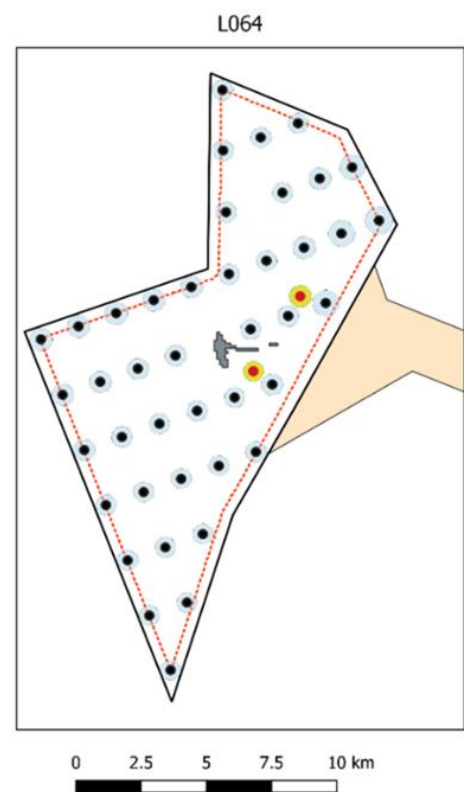
Consulenza





# Ichnusa Floating Offshore Wind Farm

Studio Meteomarino



Ichnusa Wind Power Srl

Rapporto Tecnico

Ottobre 2022

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001  
Management System Certification

BUREAU VERITAS  
Certification Denmark A/S

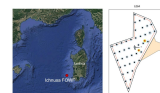




# Ichnusa Floating Offshore Wind Farm

Studio Meteomarino

Prepared for Ichnusa Wind Power Srl  
Represented by Mr. Fergal Darcy, Head of Project



Localizzazione e configurazione FOWF. Mappa ©GoogleEarth

Project manager	Andrea Pedroncini
Authors	Brunella Guida
Quality supervisor	Henrik Kofoed-Hansen
Approver	Andrea Crosta

Project number	22803514
Approval date	2022-10-17
Revision	Final 2.1
Classification	Confidential



# INDICE

<b>Nomenclatura .....</b>	<b>viii</b>
<b>Sintesi del lavoro.....</b>	<b>1</b>
<b>1        <b>Introduzione.....</b></b>	<b>4</b>
1.1       Scopi e obiettivi .....	4
1.2       Struttura del documento.....	4
<b>2        <b>Dati meteomarini di base .....</b></b>	<b>5</b>
2.1       Mediterranean Wind and Wave Database (MWM) .....	6
2.1.1     Validazione dei dati di vento .....	7
2.1.2     I dati di periodo medio del vento .....	9
2.1.3     Validazione dei dati di onda .....	9
2.1.4     Dati di periodo medio dell'onda.....	15
2.2       Dati del Copernicus Marine Environment Monitoring Service .....	16
2.3       Dati meteomarini forniti per FOWF .....	17
<b>3        <b>Climatologia generale .....</b></b>	<b>18</b>
3.1       Caratteristiche del vento su mesoscala .....	18
3.2       Circolazione generale .....	21
3.2.1     Circolazione oceanica superficiale.....	23
3.2.2     Circolazione intermedia .....	23
3.2.3     Circolazione profonda .....	24
3.2.4     Circolazione del Mar di Sardegna.....	25
3.3       Il clima ondoso del Mar Mediterraneo.....	26
<b>4        <b>Condizioni meteomarine tipiche .....</b></b>	<b>27</b>
4.1       Vento.....	27
4.1.1     Serie temporali e statistiche annuali .....	27
4.1.2     Rose dei venti e tabelle di frequenza della velocità e direzione del vento .....	29
4.2       Livelli del mare .....	31
4.2.1     Serie temporali e statistiche annuali .....	31
4.2.2     Livelli di marea .....	32
4.3       Correnti .....	32
4.3.1     Serie temporali e statistiche annuali .....	33
4.3.2     Rose di corrente e tabelle di frequenza intensità-direzione.....	35
4.3.3     Profilo verticale della velocità di corrente .....	38
4.4       Onde .....	41
4.4.1     Serie temporali e statistiche annuali .....	41
4.4.2     Rose delle onde .....	43
4.4.3 <i>Scatter plot</i> degli avvenimenti congiunti .....	43
<b>5        <b>Condizioni meteomarine estreme .....</b></b>	<b>49</b>
5.1       Velocità del vento.....	49
5.1.1     Conversione di scale temporali.....	57
5.2       Livello del mare .....	57
5.3       Correnti .....	61
5.4       Onde .....	65
5.4.1     Periodi d'onda associati .....	70
5.4.2     Altezze d'onda massima .....	75

5.4.3	Elevazione della cresta d'onda .....	80
<b>6</b>	<b>Temperatura e Salinità del mare.....</b>	<b>81</b>
6.1	Temperatura dell'acqua di mare .....	81
6.2	Salinità dell'acqua di mare .....	84
<b>7</b>	<b>Medicanes .....</b>	<b>88</b>
7.1	Introduzione generale ai medicanes.....	88
7.2	Frequenza .....	89
7.3	Medicanes nel clima futuro .....	91
7.4	Modellazione dei Medicanes .....	92
7.4.1	Metodologia .....	92
7.4.2	Ilona (19-22 Gennaio 2014).....	94
7.4.3	Rolf (4-9 Novembre 2011) .....	99
<b>8</b>	<b>Potenziale impatto ambientale delle infrastrutture FOWF .....</b>	<b>105</b>
8.1	Impronta del FOWF .....	105
8.2	Impatto sulle condizioni di vento .....	107
8.3	Impatto sulle condizioni d'onda.....	109
8.4	Impatto sulle condizioni idrodinamiche .....	111
<b>9</b>	<b>Conclusioni e suggerimenti.....</b>	<b>113</b>
9.1	Conclusioni .....	113
9.2	Suggerimenti.....	113
<b>10</b>	<b>Riferimenti.....</b>	<b>114</b>
<b>A</b>	<b>Model Quality Indices.....</b>	<b>1</b>

## FIGURE

Figura 0.1:	Rose annuali di velocità del vento a 10 m slm (in alto a sinistra) e a 80 m slm (in alto a destra), rosa delle altezze d'onda $H_{m0}$ (total sea, in basso a sinistra) e rosa delle correnti superficiali (in basso a destra) per un punto all'interno del FOWF .....	2
Figura 2.1:	Posizione del sito del progetto Ichnusa FOWF e del punto P1 .....	5
Figura 2.2:	MWM – Dominio del modello, batimetria e <i>mesh</i> di calcolo .....	6
Figura 2.3:	Copertura dei dati dell'altimetro utilizzati nel presente studio per la validazione dei dati di vento .....	7
Figura 2.4:	Validazione dei valori di velocità del vento (a 10 m) sui dati dell'altimetro per tutti i valori (a sinistra) e per $WS > 2.5$ m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità .....	7
Figura 2.5:	Validazione delle velocità del vento (10 m) con i dati altimetrici per settori direzionali e $WS > 2.5$ m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità .....	8
Figura 2.6:	Variabilità della velocità media del vento a 10 m slm nel punto P1 per il periodo 1979 – 2020. Le linee blu indicano la velocità del vento media annuale modellata, assieme alla media a lungo termine (10 anni) rappresentata da linee arancioni tratteggiate. La linea tratteggiata in viola mostra invece la media sul periodo complessivo di 42 anni. ....	9
Figura 2.7:	Validazione dell'altezza d'onda significativa rispetto ai dati altimetrici presso il sito Ichnusa. Si rimanda all'appendice A per la definizione degli indici di qualità.....	10
Figura 2.8:	Posizione della boa di Alghero (Rete Ondametrica Nazionale, RON) usata per la validazione dei dati di onda nel presente studio.....	10
Figura 2.9:	Validazione delle altezze d'onda significativa da MWM con i dati della boa di Alghero (RON): omnidirezionale (in alto a sinistra), e per i principali settori direzionali: O (in alto a destra), NO (in basso a sinistra) e OSO (in basso a destra). Si rimanda all'appendice A per la definizione degli indici di qualità .....	11

Figura 2.10: Risultati della correzione dei dati MWM presso il sito della boa (RON) di Alghero - Gli <i>Scatter plot</i> mostrano l'altezza d'onda significativa da MWM in confronto ai dati misurati, caso omnidirezionale e per i settori rilevanti, prima (a sinistra) e dopo (destra) la riscalatura.....	13
Figura 2.11: Risultati della correzione dei dati MWM nel punto P1 presso il sito Ichnusa. Gli <i>scatter plot</i> mostrano i parametri d'onda integrati dallo spettro riscalato in confronto agli stessi parametri a partire dallo spettro originale: $H_{m0}$ (in alto a sinistra), $T_{01}$ (in alto a destra), $T_{02}$ (in basso a sinistra), $T_p$ (in basso a destra).....	14
Figura 2.12: Risultati della correzione dei dati MWM nel punto P1 presso il sito Ichnusa. <i>Scatter plot</i> per MWD, mostra la direzione media dell'onda ottenuta da spettro riscalato confrontata con quella ottenuta da spettro originale. ....	14
Figura 2.13: Risultati della correzione dei dati MWM nel punto P1 presso il sito Ichnusa. La rosa mostra la direzione media dell'onda (MWD) ottenuta da spettro riscalato confrontata con quella ottenuta da spettro originale. ....	15
Figura 2.14: Spettri di potenza in frequenza di $H_{m0}$ modellata in MWM confrontati con quelli osservati dalla boa di Alghero .....	16
Figura 3.1: Mappa del Mar di Sardegna rispetto al Mar Mediterraneo .....	18
Figura 3.2: Campi annuali (2000-2004): probabilità di occorrenza di venti $U > 10$ m/s con le direzioni medie del vento sovrapposte (from [6]) .....	19
Figura 3.3: Campi annuali (2000-2004): stabilità del vento S (in basso) e variabilità relativa della velocità del vento G (in alto) (from [6]).....	20
Figura 3.4: Variabilità stagionale relativa della velocità del vento G (a sinistra) e stabilità S (a destra) (da [6]) .....	21
Figura 3.5: Principali elementi della circolazione del Mare di Sardegna (quadrato rosso) nell'ambito del bacino <i>Alghero-Provençal</i> (da [16]) .....	22
Figura 3.6: Circolazione dell'AW in superficie (da [11]) .....	23
Figura 3.7: Circolazione del LIW a 500 m di profondità (da [11]) .....	24
Figura 3.8: Circolazione profonda. AeDW, AdDW, TDW e WMDW indicano rispettivamente le Aegean, Adriatic, Tyrrhenian e Western Mediterranean Deep Waters (da [11]) .....	25
Figura 3.9: Altezze massime d'onda significative (in alto) e corrispondenti periodi medi dell'onda (in basso) nel Mar Mediterraneo. Da [20]. ....	26
Figura 4.1 Serie temporali e statistiche delle velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e $WS_{80,2hr}$ [m/s] nel Punto P1 .....	27
Figura 4.2 Statistiche mensili delle velocità del vento $WS_{10,2hr}$ (in alto) e $WS_{80,2hr}$ (in basso) nel Punto P1 .....	28
Figura 4.3 Rose dei venti annuali medi per le velocità del vento $WS_{10,2hr}$ nel Punto P1 .....	29
Figura 4.4 Rose dei venti annuali medi per le velocità del vento $WS_{80,2hr}$ nel Punto P1 .....	29
Figura 4.5 Serie temporali dei livelli (totale, mareale e residua) nel Punto P1 del sito del FOWF .....	31
Figura 4.6 Serie temporale e statistiche annuali delle correnti superficiali (totale, mareale e residua).....	33
Figura 4.7 Statistiche mensili delle velocità della corrente superficiale nel Point 1. Dall'alto verso il basso: correnti totali, mareali e residue Le correnti di marea del modello sono trascurabili ( $CS_{Tide} < 5 \cdot 10^{-3}$ m/s). Nella sezione successiva sarà analizzata solo la corrente totale.....	35
Figura 4.8 Rosa delle correnti superficiali (direzione: verso) nel Punto P1 .....	36
Figura 4.9 Confronto tra profili verticali di corrente da rianalisi CMEMS e 75° (a sinistra) 90° (centrale) e 99° (destra) percentile e profili teorici di legge di potenza 1/5 e 1/7 .....	40
Figura 4.10: Rose di corrente in superficie (in alto), a metà colonna (in basso a sinistra) e sul fondo (in basso a destra) nel punto P1, secondo i dati medi giornalieri da rianalisi CMEMS descritti nel Capitolo 2 .....	41
Figura 4.11 Serie temporale e statistiche annuali per $H_{m0}$ , $T_p$ , $T_{01}$ e $T_{02}$ .....	42
Figura 4.12 Rosa delle onde per il Punto P1 per il periodo 1979-2020 .....	43
Figura 4.13: Scatter plot omnidirezionale di $H_{m0}$ e $T_p$ nel Punto P1 .....	44
Figura 4.14: Diagramma <i>scatter</i> di $H_{m0}$ vs. $WS_{10,2hr}$ nel Punto P1 per lo stato totale del mare.....	47
Figura 5.1 Stime omnidirezionali della velocità del vento ( $WS_{10,2h}$ ) per un periodo di ritorno (TR) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stata valutata usando i metodi dei minimi quadrati (LS) o della massima verosimiglianza (ML) .....	50

Figura 5.2:	Distribuzione omnidirezionale estrema di $WS_{10,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata con l'annual maxima peaks (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con linee blu tratteggiate .....	50
Figura 5.3:	Distribuzione omnidirezionale estrema di $WS_{80,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai maddimi annuali (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con linee blu tratteggiate .....	51
Figura 5.4:	Distribuzioni direzionali marginali estreme di $WS_{10,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e con il metodo dei minimi quadrati .....	52
Figura 5.5:	Distribuzioni estreme annuali ottenute per i livelli d'acqua HWL totale e residuo (in alto a sinistra e in alto a destra, rispettivamente) e per quelli LWL totale e residuo (in basso a sinistra e in basso a destra, rispettivamente) .....	58
Figura 5.6	Stime omnidirezionali di $CS_{total}$ per un periodo di ritorno ( $T_R$ ) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è valutata usando un metodo dei minimi quadrati (LS) e un metodo di massima verosimiglianza (ML) .....	61
Figura 5.7	$CS_{total}$ omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Weibull 2-p adattata ai picchi medi annuali (AAP) e a un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea tratteggiata .....	62
Figura 5.8	$CS_{total}$ omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Weibull 2-p adattata ai picchi medi annuali (AAP) e a un metodo di adattamento ai minimi quadrati .....	63
Figura 5.9	Stime di $H_{m0,3h}$ omnidirezionale per un periodo di ritorno ( $T_R$ ) di 100 anni presso il sito del FOWF valutate utilizzando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stimata utilizzando il metodo dei minimi quadrati (LS) o il metodo della massima verosimiglianza (ML) .....	66
Figura 5.10	$H_{m0,3h}$ estrema omnidirezionale secondo una distribuzione Weibull troncata a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea blu tratteggiata .....	66
Figura 5.11	$H_{m0,3h}$ estrema omnidirezionale e direzionale marginale secondo una distribuzione di Weibull troncata a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annuali (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati. ....	67
Figura 5.12:	Valori <i>hindcast</i> dell'altezza d'onda significativa ( $H_{m0}$ ), direzione media dell'onda (MWD), velocità del vento ( $WS_{10}$ ) e direzione del vento ( $WD_{10}$ ) durante la tempesta dell'11 gennaio 1987 nel Punto P1. ....	69
Figura 5.13	Scatter plot di $H_{m0}$ vs. $T_p$ (sopra) e $H_{m0}$ vs. $T_{02}$ (sotto), e curve di correlazione utilizzate per condizioni omnidirezionali .....	74
Figura 5.14	$H_{max}$ estrema omnidirezionale secondo una distribuzione di Weibull troncata adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e del 97.5% sono mostrati con una linea tratteggiata .....	76
Figura 5.15	Distribuzioni estreme direzionali marginali di $H_{max}$ secondo una distribuzione di Weibull troncata adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento dei minimi quadrati. ....	77
Figura 5.16:	Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel Punto P1 .....	80
Figura 6.1	Statistiche annuali e mensili della temperatura giornaliera dell'acqua di mare (1987-2019) alla superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale (in basso). ....	82
Figura 6.2	Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da Gennaio a Giugno).....	83
Figura 6.3	Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati CMEMS 1987-2019, da Luglio a Dicembre). ....	83
Figura 6.4	Statistiche annuali e mensili della Salinità giornaliera (1987-2019) in superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale marino (in basso).....	85
Figura 6.5	Salinità media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da Gennaio a Giugno).....	86
Figura 6.6	Salinità media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da Luglio a Dicembre).....	86
Figura 6.7:	Diagramma T-S nel Punto P1 all'interno dell'area del Progetto del FOWF, per tutti i dati (in alto), per i dati medi mensili da Gennaio a Giugno (in basso a sinistra) e da Luglio a Dicembre (in basso a destra). Si noti che theta è la temperatura (°C); l'unità di misura della Salinità è per mille (PSU) o g/kg .....	87
Figura 7.1:	Densità di genesi (a sinistra) e densità di passaggio (a destra) da [41] .....	90

Figura 7.2: Numero di eventi al mese (a sinistra) e per stagione (a destra) da [41]) .....	90
Figura 7.3: (a) Variazioni nella frequenza media annuale dei medicanes (MED) e dei cicloni non-tropicali (EXT). La barra superiore e quella inferiore indicano rispettivamente il 75° e il 25° percentile. (b) Numero relativo (numero di <i>medicanes</i> con durate divise per il numero totale dei <i>medicanes</i> nel periodo) dei <i>medicanes</i> in base alla loro durata in ore. Viene inoltre raffigurata (linee orizzontali) la somma del numero di <i>medicanes</i> di durata maggiore di 24 ore. ....	92
Figura 7.4: Dominio del modello, griglia computazionale e batimetria utilizzata per la modellazione dei medicane. Marcato in nero il punto P1 .....	93
Figura 7.5: Medicane Ilona: MODIS Aqua Imagery del 19 Gennaio 2014 – UTC (da [46]) .....	94
Figura 7.6: Venti osservati da satellite Metop ASCAT il 19 Gennaio (da [46]) .....	95
Figura 7.7: Traiettoria del Medicane Ilona (da [46]) .....	96
Figura 7.8: Medicane Ilona: evoluzione temporale simulata del centro di pressione e la velocità del vento secondo [46] .....	96
Figura 7.9: Medicane Ilona: risultati della modellazione di onda. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo d'onda durante il picco della tempesta (b) e la serie temporale di altezza d'onda significative presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta in b)) .....	97
Figura 7.10: Medicane Ilona: risultati da modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo di corrente durante il picco della tempesta (b) e evoluzione temporale della corrente mediate sulla profondità presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta in b)) .....	98
Figura 7.11: Medicane Rolf: MODIS Aqua Imagery dell' 8 Novembre 2011 10:30UTC (da Tropical Storm Rolf - Wikipedia) .....	100
Figura 7.12: Traiettoria del Medicane Rolf (da [48]) adottata in questo studio .....	101
Figura 7.13: Medicane Rolf: serie temporale di pressione a livello del mare (SLP) al centro del ciclone: le barre grigie e le linee rosse denotano le variabili rispettivamente PRS e PGWs. Tutte le variabili rappresentano la media d'insieme. Ai fini di questo studio, è stata simulata la serie temporale PRS. Da [48]. ....	101
Figura 7.14: Medicane Rolf risultati della modellazione di onda. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo d'onda durante il picco della tempesta (b) e la serie temporale di altezza d'onda significative presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta in b)) .....	102
Figura 7.15: Medicane Rolf: risultati da modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo di corrente durante il picco di tempesta (b) e serie temporale della corrente mediata sulla profondità presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta b)) .....	103
Figura 7.16: Medicane Rolf: serie temporale di altezza d'onda significativa $H_{m0}$ e la direzione MWD, e a seguire intensità WS e direzione WD del vento durante il passaggio della tempesta; dati MWM estratti al punto P1 nel FOWF .....	104
Figura 8.1: Layout previsto del FOWF. Fonte: Ichnusa Wind Power .....	106
Figura 8.2: Galleggiante preso in considerazione per I WTG nel FOWF. Dimensioni in mm. Fonte: Ichnusa Wind Power .....	107
Figura 8.3: Principali schemi di fondazioni eoliche offshore galleggianti. Fonte: ICF (2020) white paper [46] .....	107
Figura 8.4: Tipologia e entità dei potenziali effetti ambientali degli impianti di energia eolica offshore galleggianti. Le variazioni attese valutati secondo le dinamiche atmosferiche e marine sono evidenziati dal riquadro in rosso. Fonte e illustrazione: Farr et al (2021 [53]) .....	108
Figura 8.5: Ubicazione degli OWF inizialmente progettati da 200 MW: Vesterhav North e Vesterhav South OWF. Fonte: Vedere link a piè di pagina .....	110
Figura 8.6: Elenco dei potenziali effetti delle piattaforme eoliche offshore sull'idrodinamica. Fonte: van Berkel et al. 2020, [58]) .....	112

## TABELLE

Tabella 0.1: Riepilogo dei valori estremi annuali e omnidirezionali presso il sito FOWF (analisi nel punto P1). Si noti che $T_{H_{max}}$ corrisponde al 50° percentile .....	3
Tabella 0.2: Riepilogo del potenziale impatto del FOWF sui parametri fisici ambientali .....	3



Tabella 2.1	Nome, posizione e profondità nel punto di estrazione dei dati per l'analisi del vento e delle onde .....	5
Tabella 2.2	Coefficienti utilizzati per la correzione dello spettro di densità di energia .....	11
Tabella 2.3	Riepilogo della configurazione principale del modello Mes Sea Reanalysis (CMEMS) .....	17
Tabella 2.4:	Elenco dei contenuti del pacchetto dei dati meteorologici di <i>hindcast</i> forniti per FOWF .....	17
Tabella 4.1	Statistiche annuali e mensili delle velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e $WS_{80,2hr}$ [m/s] nel Punto P1 .....	28
Tabella 4.2	Tabella di frequenza (%) per le velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e direzioni nel Punto P1 .....	30
Tabella 4.3	Tabella di frequenza (%) per le velocità del vento $WS_{80,2hr}$ e direzioni nel Punto P1 .....	30
Tabella 4.4	Statistiche annuali dei livelli d'acqua (totale, mareale e residua) nel Punto P1 .....	32
Tabella 4.5	Livelli di marea astronomica nel sito del FOWF (Point 1) basato sui dati modellati con il DTU10 nel periodo di tempo dal 01-01-1987 al 31-12-2019. I valori sono forniti in metri relativi al livello del mare (m slm) and alla marea astronomica più bassa in conformità con la differenza slm-LAT estratta dai dati .....	32
Tabella 4.6	Statistiche mensili delle correnti superficiali (totale, mareale, e residua) .....	34
Tabella 4.7	Tabella di frequenza della velocità e direzione della corrente superficiale .....	37
Tabella 4.8	Coefficienti per il calcolo della velocità della corrente ad una determinata profondità a partire dalla corrente di superficie nel sito del FOWF, ottenuti rispettivamente dai dati del CMEMS (90° percentile), e dal profilo teorico della legge di potenza. Si suggerisce di fare riferimento al profilo fittato sui dati CMEMS. ....	39
Tabella 4.9	Statistiche annuali e mensili di $H_{m0}$ , $T_p$ , $T_{01}$ e $T_{02}$ .....	42
Tabella 4.10	Tabella di frequenza [%] annuale di $H_{m0}$ rispetto alla direzione media dell'onda nel Punto P1 per il periodo 1979 - 2020 .....	45
Tabella 4.11:	Tabella di frequenza [%] annuale omnidirezionale di $H_{m0}$ rispetto alla periodo di picco dell'onda $T_p$ nel Punto P1 .....	46
Tabella 4.12:	Tabella di frequenza [%] annuale omnidirezionale di $H_{m0}$ rispetto alla velocità del vento $WS_{10,2hr}$ nel Punto P1 .....	48
Tabella 5.1:	Velocità del vento estrema $WS_{10}$ omnidirezionale e direzionale marginale nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora .....	53
Tabella 5.2:	Velocità del vento estrema $WS_{10}$ omnidirezionale e direzionale scalata nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].....	54
Tabella 5.3:	Velocità del vento estrema omnidirezionale e direzionale marginale $WS_{80}$ nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora .....	55
Tabella 5.4:	Velocità del vento estrema omnidirezionale e direzionale marginale $WS_{80}$ nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con Sezione 3.6.5.6 di [1] .....	56
Tabella 5.5	Livelli totali di acqua alta annuali e mensili estremi ( $H_{WLtotal}$ ).....	59
Tabella 5.6	Livelli residui di acqua alta annuali e mensili estremi ( $H_{WLresid}$ ) .....	59
Tabella 5.7	Livelli totali di acqua bassa annuali e mensili estremi ( $L_{WLtotal}$ ).....	60
Tabella 5.8	Livelli residui di acqua bassa annuali e mensili estremi ( $L_{WLresid}$ ) .....	60
Tabella 5.9:	Corrente totale ( $CS_{Total}$ ) estrema omnidirezionale e direzionale marginale alla superficie .....	64
Tabella 5.10:	Corrente totale ( $CS_{Total}$ ) estrema omnidirezionale e direzionale scalata alla superficie. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1] .....	64
Tabella 5.11	Altezze d'onda significative $H_{m0,3hr}$ estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali.....	68
Tabella 5.12	Altezze d'onda significative $H_{m0,3hr}$ estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali scalate, secondo quanto riportato nella Sezione 3.6.5.6 di [1].....	68
Tabella 5.13	Intervallo dei periodi di picco ( $T_p$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.11) .....	71
Tabella 5.14	Intervallo dei periodi di zero-crossing ( $T_{02}$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.11) .....	71
Tabella 5.15	Intervallo dei periodi di picco ( $T_p$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.12) .....	72
Tabella 5.16	Intervallo dei periodi di zero-crossing ( $T_{02}$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.12) .....	72



Tabella 5.17 Periodo d'onda ( $T_{Hmax}$ ) associato agli estremi annuali omnidirezionali di altezza d'onda massima ( $H_{max}$ da Tabella 5.18) confrontati con I limiti inferiori e superiori nel range suggerito da DNV [1].....	75
Tabella 5.18 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali ( $H_{max,3h}$ ) .....	78
Tabella 5.19 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate ( $H_{max,3h}$ ): l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato secondo la Sezione 3.6.5.6 di [1] .....	78
Tabella 5.20 Periodo d'onda ( $T_{Hmax}$ ) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali ( $H_{max}$ dalla Tabella 5.18) .....	79
Tabella 5.21 Periodo d'onda ( $T_{Hmax}$ ) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate ( $H_{max}$ dalla Tabella 5.19) .....	79
Tabella 5.22: Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel Punto P1 relative al SWL .....	80
Tabella 6.1 Statistiche annuali e mensili delle temperature dell'acqua marina giornaliera estratte in superficie, a metà colonna d'acqua e a livello del fondale marino nel periodi 1987-2019 nel Punto P1 di Ichnusa .....	81
Tabella 6.2 Statistiche annuali e mensili della Salinità giornaliera estratta in superficie, a metà colonna e sul fondo nel periodo 1987-2019 nel Punto P1 di Ichnusa .....	84
Tabella 7.1: Principali differenze tra medicane e tempeste tropicali (da [34] [38]).....	89
Tabella 8.1: Fenomeni più importanti per il cambiamento delle condizioni d'onda all'interno di un OWF .....	109

## ALLEGATI

### ALLEGATO A – Model Quality Indices

### ALLEGATO B – Extreme Value Analysis

## Nomenclatura

Abbreviazioni	
HAT	Highest Astronomical Tide
HSWL	Highest Still Water Level
ISO	International Organization for Standardisation
LAT	Lowest Astronomical Tide
LSWL	Lowest Still Water Level
MHWS	Mean High Water Spring
MHWN	Mean High Water Neap
MLWN	Mean Low Water Neap
MLWS	Mean Low Water Spring
MSL	Mean Sea Level
MWD	Mean Wave Direction
PWD	Peak Wave Direction
POT	Peak-Over-Threshold
Tr	Return Period
SWL	Still Water Level
mMSL	Meters above Mean Sea Level
PSU or PSS-78	Practical Salinity Unit
WTG	Wind Turbine Generator
RCP	Representative Concentration Pathway
ACC	Anthropogenic Climate Change
MSLP	Mean Sea Level Pressure

Subscripts	
Tide	Tide partition of the surface elevation
Residual	Surge partition of the surface elevation

Definizioni	
Time	Times are relative to UTC
Level	Levels are relative to local LAT (if not specified otherwise), however graphs are relative to MSL
Coordinate system	UTM-WGS84 Zone-32 North or Long/Lat (if not specified otherwise)
Direction	Directions are 30-degree bins relative to true North, i.e., 12 bins covering: 30 deg: 0° = -15° -15°, 30° = 15°- 45°, etc. Wind: °N coming from Current: °N going to Waves: °N coming from

Simboli	
Latin characters	
CD	Current direction
CS	Current speed
$C_{max}$	Maximum wave crest level
D	Water depth
$H_{m0}$ , $H_s$	Significant wave height (spectrum based)
$H_{max}$	Maximum wave height
N	Number (of discrete values, number of waves, etc.)
$T_{02}$ , $T_{m02}$	Zero-crossing wave period (spectral based)
$T_p$	Peak wave period
$T_z$	Zero-up crossing wave period (time domain based)
$U_c$	Current speed (m/s)
$U_{c, avg}$	Depth-integrated current speed (m/s)
WS	Wind speed
$Z_0$	Mean sea level
WD	Wind direction
$U_{10}$	Wind speed at 10 meters above MSL
$D_{10}$	Wind direction at 10 meters above MSL
Greek characters	
$\eta$	Surface elevation
$\Theta$	Direction ( $^{\circ}$ N)



## Sintesi del lavoro

Questo report presenta le condizioni meteomarine e i criteri di progettazione ambientale stimati per la piattaforma eolica offshore Ichnusa (Floating Offshore Wind Farm, FOWF) situata a 40-50 km al largo della parte sud-occidentale dell'isola Italiana Sardegna, in acque con profondità di circa 450 m.

Le condizioni meteomarine sono basate sul database del modello validato di *hindcast* di DHI, che comprende un periodo di 42 anni (1979-2020, inclusi) per vento e onde, e sul database idrodinamico di dominio pubblico distribuito tramite il servizio CMEMS. L'analisi delle condizioni meteomarine è stata eseguita in corrispondenza di un (1) punto all'interno dell'area di sviluppo FOWF ed include l'analisi di venti, correnti, onde e livelli marini.

### Condizioni ordinarie

La Figura 0.1 mostra le rose annuali dei venti alle quote di 10 ed 80 m slm, delle onde (total sea state) e delle correnti superficiali per la posizione all'interno del sito del progetto FOWF.

- La distribuzione dei venti mostra una predominanza dei venti provenienti da Nord-Ovest (settori direzionali centrati a 300°N e 330°N). I venti provenienti da questo quadrante pesano più del 50% sul totale. Anche i venti da Sud-Est (120°N-180°N) sono abbastanza frequenti, con un contributo di circa il 23%. I venti di maggiore intensità arrivano da Nord-Ovest (300°N).
- La distribuzione  $H_{m0}$ -MWD mostra che circa il 59% delle onde proviene da O-NO (270-330°N) e circa il 19% da SE (120-180°N). Gli eventi d'onda provenienti dal settore Nord-Est pesano per circa il 11% sul clima ondoso medio marino, di cui circa l'8% proviene da N (direzione centrata su 0°N). Le altezze d'onda sono minori di 3.0 m per circa il 90% del tempo. Per il 18% del tempo si ha  $H_{m0} < 0.5$ m.
- La corrente totale in superficie scorre prevalentemente verso i settori di Sud/Sud-Ovest per tutto l'anno, confermando che la dinamica al punto analizzato P1 è largamente determinata da fenomeni di mesoscala descritti alla Sezione 3.2, connessi al transito di vortici dall'Algeria nel mare di Sardegna. La velocità della corrente totale è minore di 0.40 m/s per il 90% del tempo, ma ha valori massimi fino a 1.6 m/s nel periodo analizzato, associati a correnti dirette verso SSO. L'analisi mostra che le correnti di marea sono del tutto trascurabili.

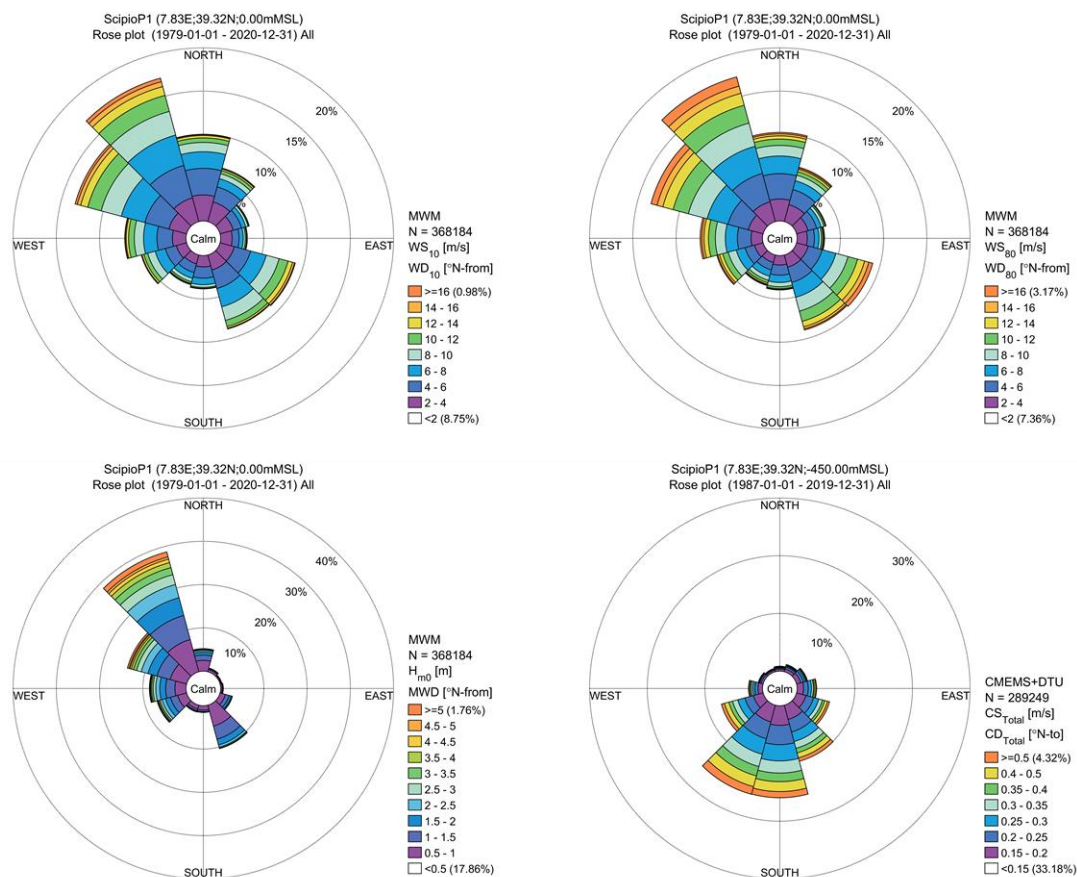


Figura 0.1: Rose annuali di velocità del vento a 10 m slm (in alto a sinistra) e a 80 m slm (in alto a destra), rosa delle altezze d'onda  $H_{m0}$  (total sea, in basso a sinistra) e rosa delle correnti superficiali (in basso a destra) per un punto all'interno del FOWF

### Condizioni estreme

Sono state stabilite condizioni estreme per i venti (a quota 10 m slm e 80 m slm), le onde (altezza d'onda significativa, altezza d'onda massima e altezza della cresta), le correnti ed i livelli del mare per periodi di ritorno fino a 500 anni, usando metodi statistici avanzati. Tabella 0.1 fornisce un riepilogo dei valori estremi omnidirezionali annuali per tutti i parametri analizzati.

Le onde estreme sono state stimate mediante il *best-fitting* di una popolazione di eventi di picco, che include una tempesta molto intensa avvenuta nel Gennaio del 1987.

L'influenza dei *Medicane* sull'analisi dei valori estremi d'onda è stata valutata come trascurabile, dato che nel clima attuale gli eventi di picco che influenzano le distribuzioni estreme nel punto di analisi non sono correlati al passaggio dei *Medicane*.

Tabella 0.1: Riepilogo dei valori estremi annuali e omnidirezionali presso il sito FOWF (analisi nel punto P1). Si noti che  $T_{Hmax}$  corrisponde al 50% percentile.

	TR [years]				
	1	10	50	100	500
$WS_{10,1hr}$ [m/s]	21.3	24.8	27.2	28.3	30.8
$WS_{80,1hr}$ [m/s]	25.4	29.9	33.0	34.3	37.4
$H_{m0,3h}$ [m]	7.9	9.5	10.4	10.7	11.3
$T_p$ [s]	11.9	12.8	13.2	13.3	13.6
$T_{02}$ [s]	8.7	9.4	9.7	9.9	10.1
$H_{max}$ [m]	14.4	17.7	19.6	20.3	22.0
$T_{Hmax}$ [s]	11.1	12.0	12.4	12.7	12.9
$HWL_{Total}$ [mMSL]	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6
$LWL_{Total}$ [mMSL]	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5
$CS_{Total}$ [m/s] - surface	1.0	1.3	1.5	1.6	1.9

### L'impatto ambientale del FOWF

Una valutazione qualitativa del potenziale impatto ambientale atteso del FOWF sui campi di vento, onda e corrente mostra che l'effetto complessivo è probabile che sia da lieve a moderato, come si può vedere in Tabella 0.2. La valutazione è stata basata sulla letteratura recente e sulle relazioni di Valutazione di Impatto Ambientale di vari progetti di parchi eolici *offshore*.

Tabella 0.2: Riepilogo del potenziale impatto del FOWF sui parametri fisici ambientali

Parametro fisico ambientale	Impatto	Commenti
Vento (Velocità del vento)	Minor to moderate	La velocità del vento potrebbe ridursi fino al 10% all'interno dell'area del parco eolico
Onda (Altezza d'onda)	Minor to moderate	L'altezza d'onda potrebbe ridursi fino al 5% nell'area di sottoflutto delle fondazioni. La variazione sarebbe di difficile misurazione in prossimità della costa.
Idrodinamica (Velocità di corrente)	Minor	La velocità di corrente potrebbe ridursi lievemente nell'area antistante la piattaforma galleggiante (<3%)

# 1 Introduzione

Questo report è stato realizzato per **Ichnusa Wind Power S.r.l. (Ichnusa Wind Power)** da DHI Srl a socio unico (DHI) e contiene **dati ed analisi meteomarine** destinati alla progettazione FEED dell' **Ichnusa Floating Offshore Wind Farm (FOWF)**, in Italia.

Questo documento include valutazioni sulle condizioni meteomarine tipiche ed estreme, nonché una valutazione qualitativa del potenziale impatto ambientale del FOWF. Lo studio adempie allo scopo del lavoro definito nella proposta di DHI del 22 Ottobre 2021, come concordato nel *Consultancy Contract* e nel *Data License Agreement* della stessa data.

Il FOWF si trova a circa 55 km dalla Sardegna, in Italia, nella parte più a Nord-Ovest del Mare di Sardegna (si veda illustrazione di copertina) in acque con profondità circa 450 m. La capacità prevista del FOWF è, secondo Ichonusa Wind Power, 504 MW forniti da 42 WTG. Ogni WTG ha una potenza nominale di circa 12 MW.

## 1.1 Scopi e obiettivi

Lo scopo di questo studio è definire le condizioni meteomarine in modo dettagliato ed accurato per il FOWF da utilizzare come input per la progettazione FEED delle turbine eoliche, le loro fondazioni ed i sistemi di ormeggio ed ancoraggio. Inoltre, lo studio è finalizzato a supportare il processo di autorizzazione di VIA (Valutazione di Impatto Ambientale).

Questo studio meteomarino si pone dunque l'obiettivo di descrivere la metodologia ed i principali risultati di un'analisi di condizioni meteomarine di normale esercizio ed estreme. Ciò include una descrizione delle condizioni di vento, livelli, correnti ed onde di superficie attraverso il sito del FOWF.

## 1.2 Struttura del documento

Il presente documento è organizzato come segue:

- Capitolo 2 presenta i dati modellistici utilizzati per l'analisi meteomarina, in condizioni tipiche ed estreme, compresa la descrizione e validazione del modello
- Capitolo 3 fornisce una descrizione della climatologia generale dell'area
- Capitolo 4 comprende le analisi delle condizioni tipiche di vento, onde, correnti e livelli
- Capitolo 5 comprende l'analisi delle condizioni meteomarine estreme ed una stima dei criteri ambientali di progetto
- Capitolo 6 mostra i principali dati statistici su temperatura e salinità dell'acqua del mare
- Capitolo 7 si occupa di condizioni meteomarine atipiche (*Medicane*) e fornisce una panoramica delle loro caratteristiche statistiche ed una valutazione quantitativa delle condizioni d'onda e di corrente associate
- Capitolo 8 tratta il potenziale impatto ambientale delle infrastrutture del FOWF
- Capitolo 9 presenta conclusioni e raccomandazioni
- Capitolo 10 elenca i riferimenti bibliografici utilizzati in questo rapporto tecnico.



## 2 Dati meteomarini di base

Lo studio si basa su due diversi set di dati: uno per i venti e le onde e uno per i dati idrodinamici.

I dati relativi al vento e alle onde sono stati estratti dal *Mediterranean Wind Wave Model* (MWM), sviluppato e mantenuto da DHI. MWM è un set di dati di modellazione validato e affidabile di 42 anni che copre l'intero Mar Mediterraneo per il periodo 1979-2020. Il database include dati orari di vento ed onde ad alta risoluzione spaziale di circa 10 km al largo con un incremento fino a 3 km vicino a costa, ed è riconosciuto come il migliore set di dati del Mar Mediterraneo.

I dati idrodinamici, che includono livello del mare, correnti, temperatura e salinità, sono stati estratti dal catalogo *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS).

Tabella 2.1 fornisce nome e posizione del punto selezionato illustrato in Figura 2.1, rispetto al punto centrale dell' Ichnusa FOWF, fornito da Ichnusa Wind Power. In accordo con Ichnusa Wind Power i dati di onda sono stati estratti nel punto griglia degli spettri d'onda più prossimo disponibile, ovvero nel punto griglia di coordinate (7.80°E, 39.30°N) posizionato a circa 4.4 km a sud-ovest del sito FOWF, mostrato anch'esso in Figura 2.1.

Nelle sezioni seguenti viene fornita una breve descrizione dell'origine dei dati e della loro validazione.

Tabella 2.1 Nome, posizione e profondità nel punto di estrazione dei dati per l'analisi del vento e delle onde

	Longitudine (°E)	Latitudine (°N)	Profondità (m)
<b>Punto P1</b>	7.83	39.32	450
<b>Punto griglia degli spettri d'onda</b>	7.80	39.30	450

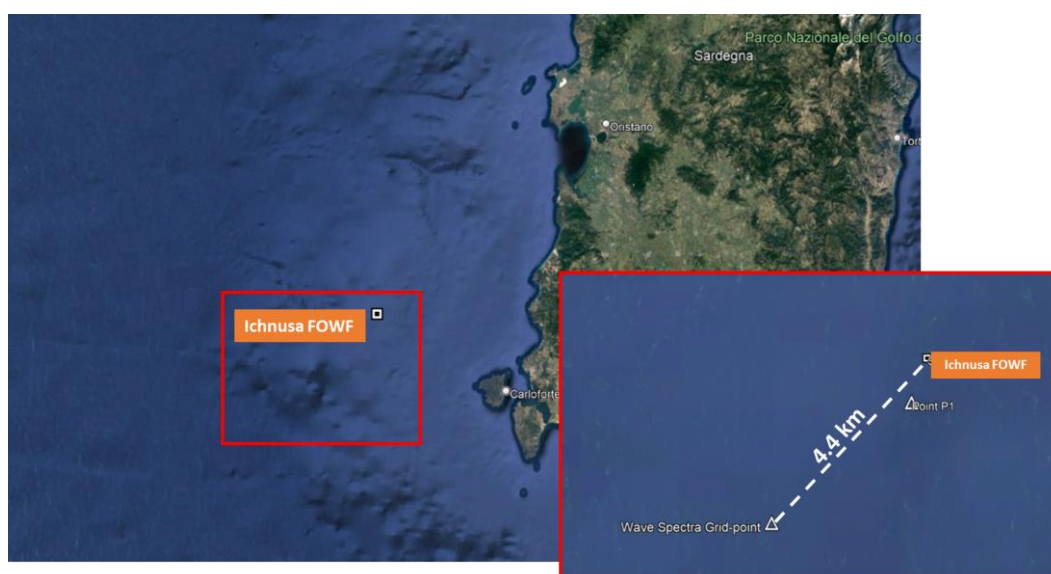


Figura 2.1: Posizione del sito del progetto Ichnusa FOWF e del punto P1

## 2.1 Mediterranean Wind and Wave Database (MWM)

DHI ha creato un set di dati di modellazione validato ed affidabile di 42 anni che copre l'intero Mar Mediterraneo per il periodo 1979-2020, il *Mediterranean Wind Wave Model* (MWM).

Il modello meteorologico utilizzato da MWM è il modello WRF-ARW, uno dei modelli meteorologici non-idrostatici più largamente riconosciuti e all'avanguardia. Il *dataset* globale GFS, prodotto e pubblicato da NCEP (*National Centers for Environmental Predictions*) fornisce le condizioni al contorno ed iniziali (dati orari con una risoluzione spaziale di 0.5°).

Il modello spettrale delle onde e del vento di terza generazione MIKE 21 SW<sup>1</sup> sviluppato, mantenuto e supportato da DHI viene utilizzato come modello di simulazione delle onde con una risoluzione che va da 0.1° a 0.03° su tutto il Mar Mediterraneo. Le prestazioni del modello atmosferico e di onda sono state validate sulla base di diversi dataset satellitari; Envisat, ERS-2, Geosat FO, Jason-1, Jason-2, Topex-Poseidon and CryoSat, mediante una procedura basata sulla tecnica della finestra mobile.

Sfruttando l'impostazione del modello realizzato per analisi di tipo *hindcast* e verificata attraverso dati misurati, è stato anche sviluppato un servizio di previsione (*forecast*) delle onde e del vento, operativo 24 ore su 24, 7 giorni su 7, ad oggi utilizzato da numerose aziende e organizzazioni nel Mar Mediterraneo. Il servizio di previsione utilizza il set di dati GFS per fornire le condizioni al contorno ed iniziali.

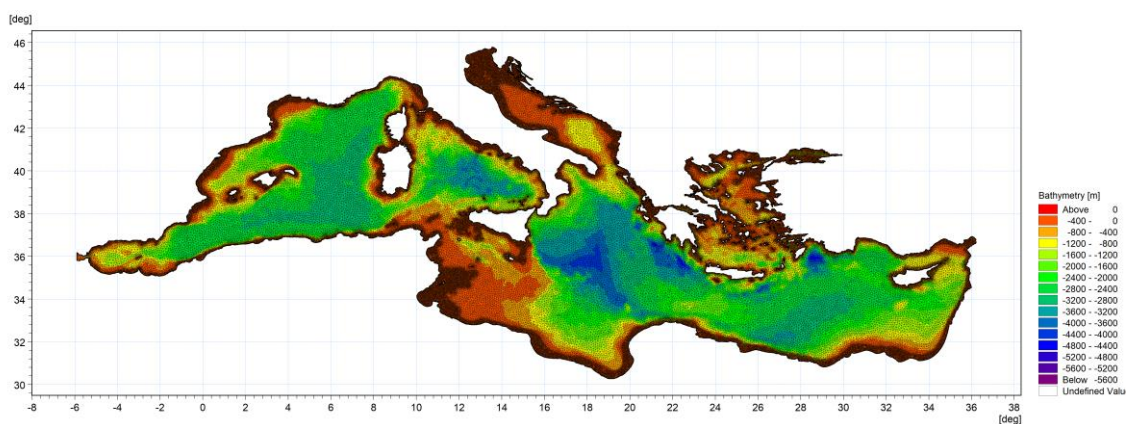


Figura 2.2: MWM – Dominio del modello, batimetria e *mesh* di calcolo

I risultati dei modelli di vento ed onda sono archiviati, ogni ora in tutto il dominio, in termini di parametri del vento e parametri dell'onda mediati sul periodo d'onda ("*phase averaged results*" o risultati parametrici). Inoltre, gli spettri 2D (in termini di energia d'onda associata a classi di frequenza e direzione) vengono salvati su una griglia regolare con una risoluzione spaziale costante di 0.1°.

I dati parametrici standard del vento MWM (orari) contengono:

- Velocità del vento a 10m slm – WS (m/s), altre quote disponibili come quella a 80 m richiesta in questo studio
- Direzione del vento – WD (°N).

I dati parametrici standard dell'onda MWM (orari, totali) contengono:

- Altezza d'onda significativa spettrale –  $H_{m0}$  (m)
- Periodo di picco dell'onda –  $T_p$  (s)

<sup>1</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves>

- Periodo medio dell'onda –  $T_{01}$  (s)
- Periodo di zero-crossing –  $T_{02}$  (s)
- Direzione media dell'onda – MWD (°N)
- Direzione di picco dell'onda – PWD (°N)
- Deviazione standard della direzione – DSD (gradi)

### 2.1.1 Validazione dei dati di vento

Il set di dati MWM è stato ampiamente validato ed utilizzato in molti studi scientifici ed applicazioni e progetti commerciali. Per il progetto FOWF i dati del vento sono stati validati attraverso dati altimetrici a 10 m sul livello del mare, estratti per l'area evidenziata in rosso in Figura 2.3.

Figura 2.4 mostra lo *scatter plot* delle velocità di vento modellate e misurate, per tutti i dati (a sinistra) e per le velocità del vento maggiori di 2.5 m/s (a destra), mentre la Figura 2.5 mostra lo stesso confronto per 8 settori direzionali. Il periodo di validazione copre gli anni dal 1992 al 2016 (inclusi).

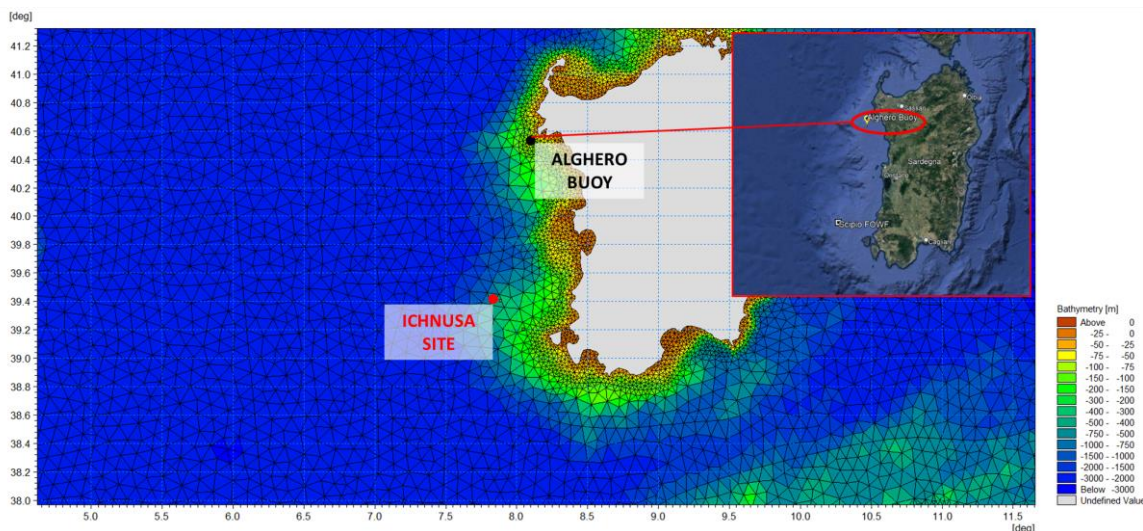


Figura 2.3: Copertura dei dati dell'altimetro utilizzati nel presente studio per la validazione dei dati di vento

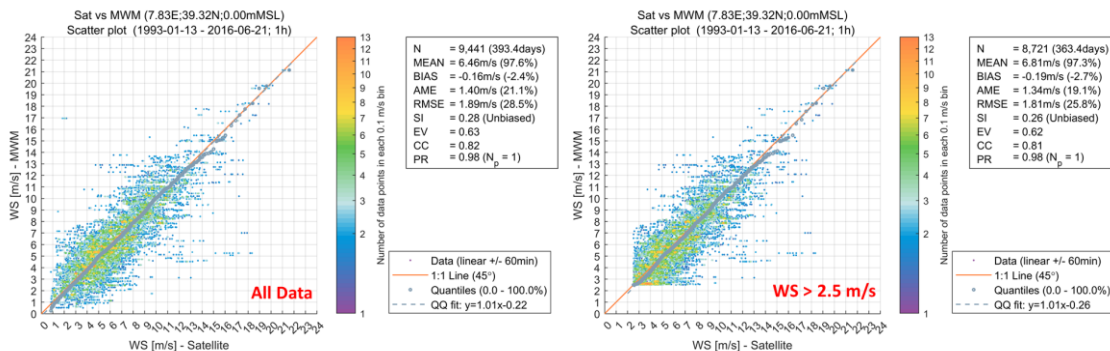


Figura 2.4: Validazione dei valori di velocità del vento (a 10 m) sui dati dell'altimetro per tutti i valori (a sinistra) e per  $WS > 2.5$  m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità



In generale, i dati WRF sono in buon accordo con i dati altimetrici nell'area FOWF. Tuttavia, si consiglia di effettuare un confronto tra i dati del modello di vento WRF e le future misurazioni (in situ) da strumentazione lidar galleggiante. Questo richiede di effettuare una nuova simulazione del modello WRF.

Figura 2.6 mostra la variabilità della media annuale della velocità del vento ( $WS_{10}$ ), insieme a varie medie su 10 anni (ad esempio 1981 - 1990, 1991 - 2000, 2001 - 2010 e 2011 - 2020). La variabilità è generalmente bassa, sebbene maggiore nella prima decade, probabilmente dovuta a variazioni nel dataset NCEP/GFS Global, forzante del modello WRF.

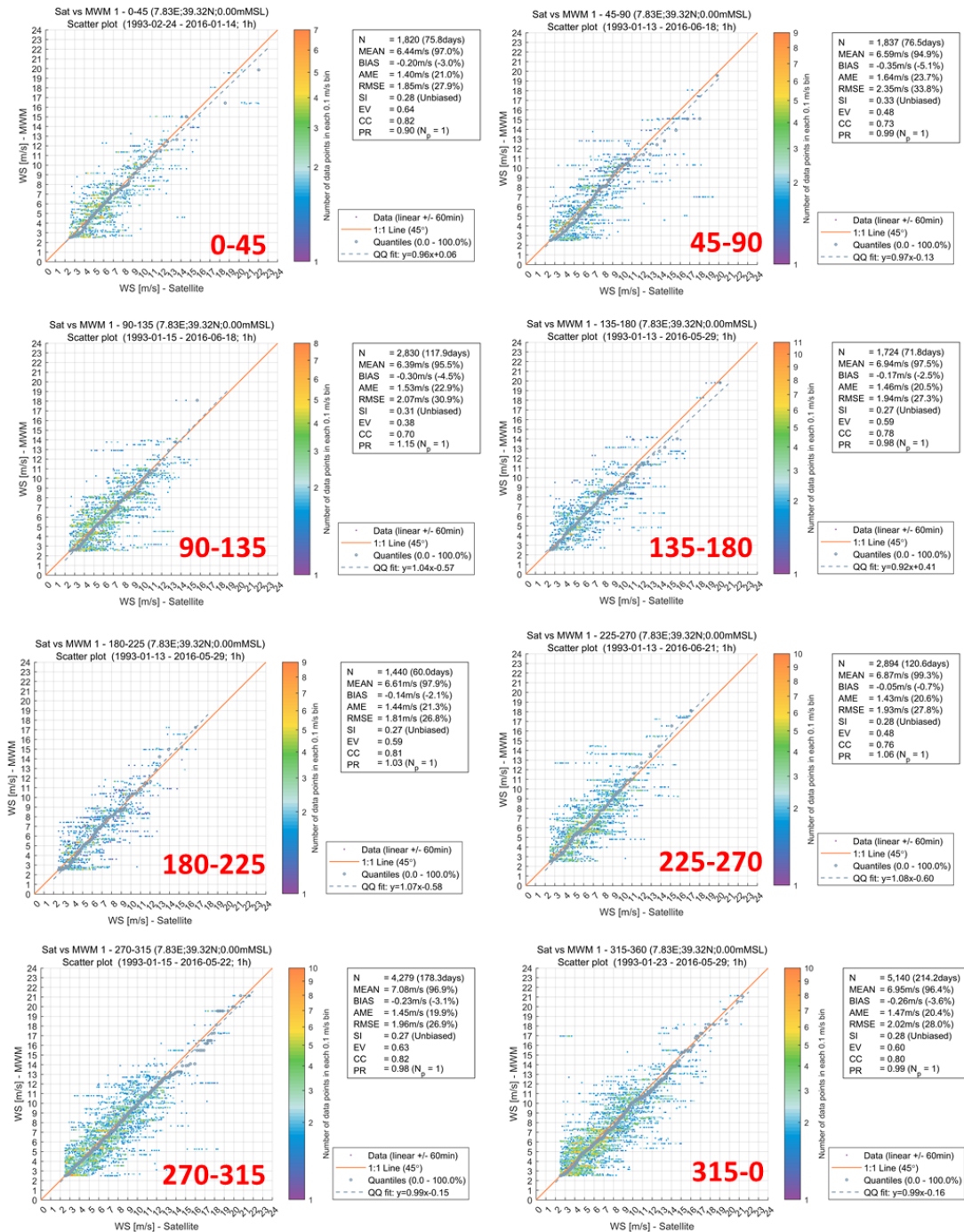


Figura 2.5: Validazione delle velocità del vento (10 m) con i dati altimetrici per settori direzionali e  $WS > 2.5$  m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità

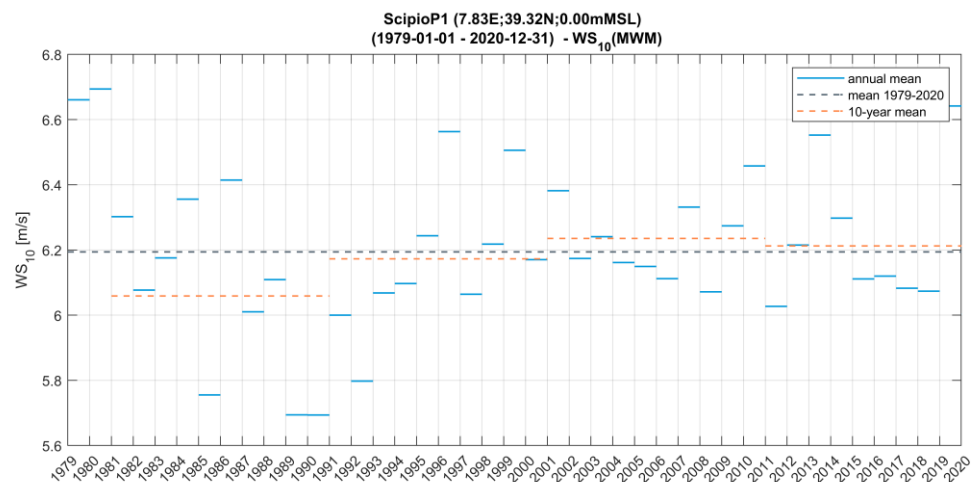


Figura 2.6: Variabilità della velocità media del vento a 10 m slm nel punto P1 per il periodo 1979 – 2020. Le linee blu indicano la velocità del vento media annuale modellata, assieme alla media a lungo termine (10 anni) rappresentata da linee arancioni tratteggiate. La linea tratteggiate in viola mostra invece la media sul periodo complessivo di 42 anni.

### 2.1.2 I dati di periodo medio del vento

Le osservazioni del vento medio rappresentano di solito medie su 10 minuti in un singolo punto, mentre i dati del vento da modello atmosferico sono rappresentativi di un'area e una durata determinate da una combinazione delle forzanti applicate alla griglia del modello. Pertanto, i dati del modello possono essere in qualche modo considerati “*smoothed*” (nello spazio e nel tempo) rispetto alle rilevazioni. L'effetto di “*smoothing*” è generalmente stimato valutando un periodo medio rappresentativo delle osservazioni per riflettere più accuratamente la minore variabilità del modello WRF. Il periodo medio è comunemente valutato comparando l'energia spettrale della serie modellata WS10 con le osservazioni locali.

Data la mancanza di dati sinottici misurati nell'area del FOWF, in questa fase non è possibile effettuare tale analisi. Sulla base di applicazioni simili nel Mar Mediterraneo, i dati di vento da MWM saranno assunti rappresentativi per un periodo medio di 2 ore. Un'adeguata verifica è rinviata a una fase successiva del progetto FOWF, quando saranno disponibili i dati di rilievo della strumentazione lidar galleggiante.

### 2.1.3 Validazione dei dati di onda

Data la mancanza di misurazioni delle onde nell'area del progetto FOWF, è stato eseguito un confronto con dati altimetrici da satellite (estratti per l'area rossa mostrata in Figura 2.3) come primo passo per la validazione dei dati MWM. Il confronto sull'altezza d'onda significativa è mostrato in Figura 2.7, nel cui *scatter plot* omnidirezionale viene confrontata, per tutti i dati, l'altezza d'onda modellata con quella da satellite. Il confronto mostra che le altezze d'onda sono generalmente sottostimate circa del 10% dal modello MWM.

Come secondo step di validazione, i dati d'onda MWM vicini alla costa ovest della Sardegna sono stati confrontati con i dati disponibili di più di 200 boe, tra cui la più vicina ad Alghero (facente parte della RON locale) posizionata ad una profondità di 100 m, a circa 130 km a nord-ovest del sito Ichnusa, come mostrato in Figura 2.8.

Figura 2.9 mostra lo *scatter plot* omnidirezionale di altezze d'onda significative da modello e misurate, per i principali settori direzionali di esposizione del sito di Alghero. Il periodo di validazione copre gli anni che vanno da Gennaio 2002 a Dicembre 2008. Similmente a quanto

osservato per i dati altimetrici, i risultati mostrano una sottostima da parte del modello specialmente per gli eventi provenienti dai settori direzionali di NO (300-345°N) e O (270-285°N).

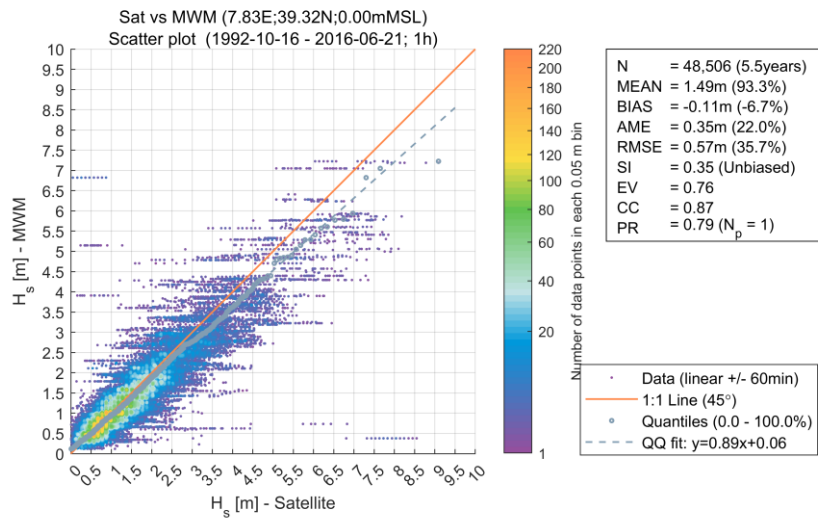


Figura 2.7: Validazione dell'altezza d'onda significativa rispetto ai dati altimetrici presso il sito Ichnusa. Si rimanda all'appendice A per la definizione degli indici di qualità

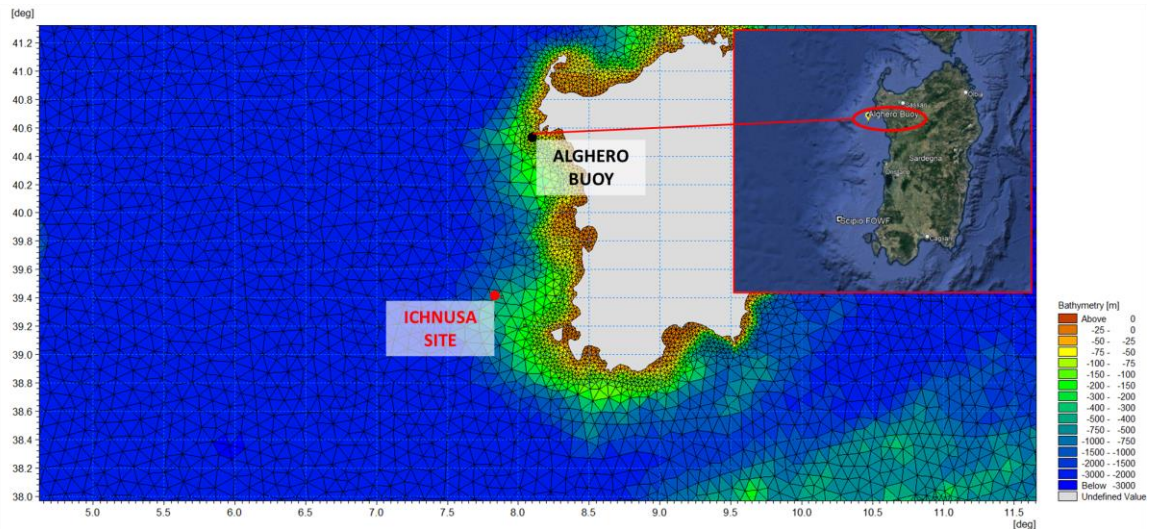


Figura 2.8: Posizione della boa di Alghero (Rete Ondametrica Nazionale, RON) usata per la validazione dei dati di onda nel presente studio

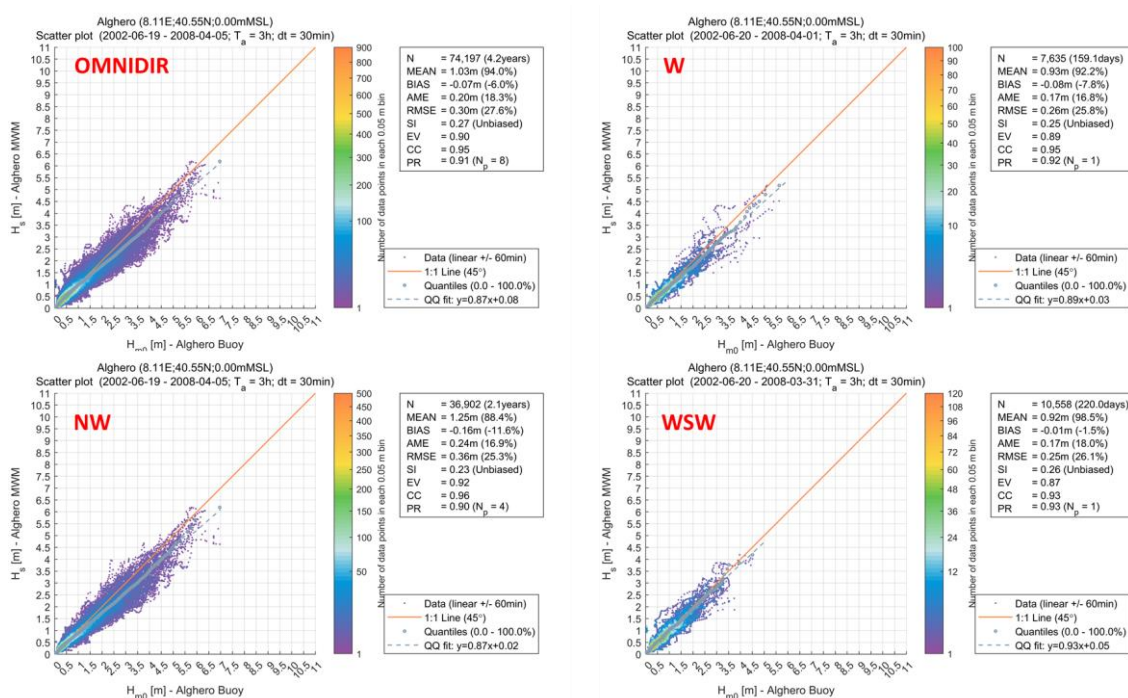


Figura 2.9: Validazione delle altezze d'onda significativa da MWM con i dati della boa di Alghero (RON): omnidirezionale (in alto a sinistra), e per i principali settori direzionali: O (in alto a destra), NO (in basso a sinistra) e OSO (in basso a destra). Si rimanda all'appendice A per la definizione degli indici di qualità

Vista l'assenza di altre misurazioni di onda conosciute prossime a FOWF, si è deciso di ottenere i fattori correttivi direzionali presso il sito della boa di Alghero a partire dagli *scatter plot* mostrati in Figura 2.9, utilizzandoli per scalare i dati MWM nel sito Ichnusa per i tre settori investigati. La correzione è stata applicata direttamente agli spettri d'onda simulati presso Ichnusa, riscaldando l'energia tra i settori corrispondenti ai settori direzionali considerati, come dettagliato di seguito:

- OSO: direzione compresa tra 210°N e 255°N
- O: direzione compresa tra 270°N e 285°N
- NO: direzione compresa tra 300°N e 345°N

I fattori di scala adottati per ogni settore sono derivati dagli *scatter plot* di Figura 2.9, e vengono quindi moltiplicati ad ogni spicchio dello spettro di densità di energia ricadente tra i limiti inferiore e superiore dei tre settori descritti sopra.

Tabella 2.2 Coefficienti utilizzati per la correzione dello spettro di densità di energia

Settore	Coefficiente
OSO	1.07
O	1.11
NO	1.15



Malgrado la grande distanza tra il sito di Progetto e la boa di riferimento, tale scelta è stata considerata appropriata. L'esposizione a eventi da O e NO è relativamente simile nei due siti, sebbene si presuppone che presso il sito Ichnusa si sviluppino eventi più energetici per le direzioni evidenziate. In aggiunta, presso Ichnusa si presentano fetch relativamente ampi (>250 km) per il settore OSO, seppur minori rispetto al sito della boa di Alghero (>450 km). Perciò, è ragionevole assumere che scalare l'energia dell'onda proveniente da OSO porterebbe ad effetti confrontabili tra Ichnusa ed il sito di Alghero, con una leggera sovrastima per Ichnusa.

Non è stato possibile applicare in Ichnusa la correzione per le onde da SE, in quanto la boa ad Alghero è quasi del tutto riparata dalla costa per il primo e secondo quadrante. MWM comunque riesce a performare molto meglio per questi settori, secondo quanto già sperimentato in altre applicazioni nel Mar Mediterraneo.

Gli *scatter plot* riportati in Figura 2.10 mostrano i risultati della correzione applicate ai dati della boa di Alghero, per il caso omnidirezionale e per i singoli settori d'interesse. A fini di verifica dell'impatto generale della correzione, i parametri d'onda per lo spettro riscaldato sono stati confrontati con gli stessi parametri per lo spettro originale. Figura 2.11 riporta gli *scatter plot* per i parametri rispettivamente  $H_{m0}$  (in alto a sinistra),  $T_{01}$  (in alto a destra),  $T_{02}$  (in basso a sinistra) e  $T_p$  (in basso a destra). Le immagini mostrano che il fattore di scala su  $H_{m0}$  è 1.12 e la riscaldatura condiziona leggermente i periodi d'onda. Un confronto simile con la direzione media di propagazione (MWD), attraverso *scatter plot* (Figura 2.12) e *rose plot* (Figura 2.13) mostra che si hanno leggere differenze soltanto per le direzioni scalate (come previsto), e tali differenze sono comunque trascurabili.



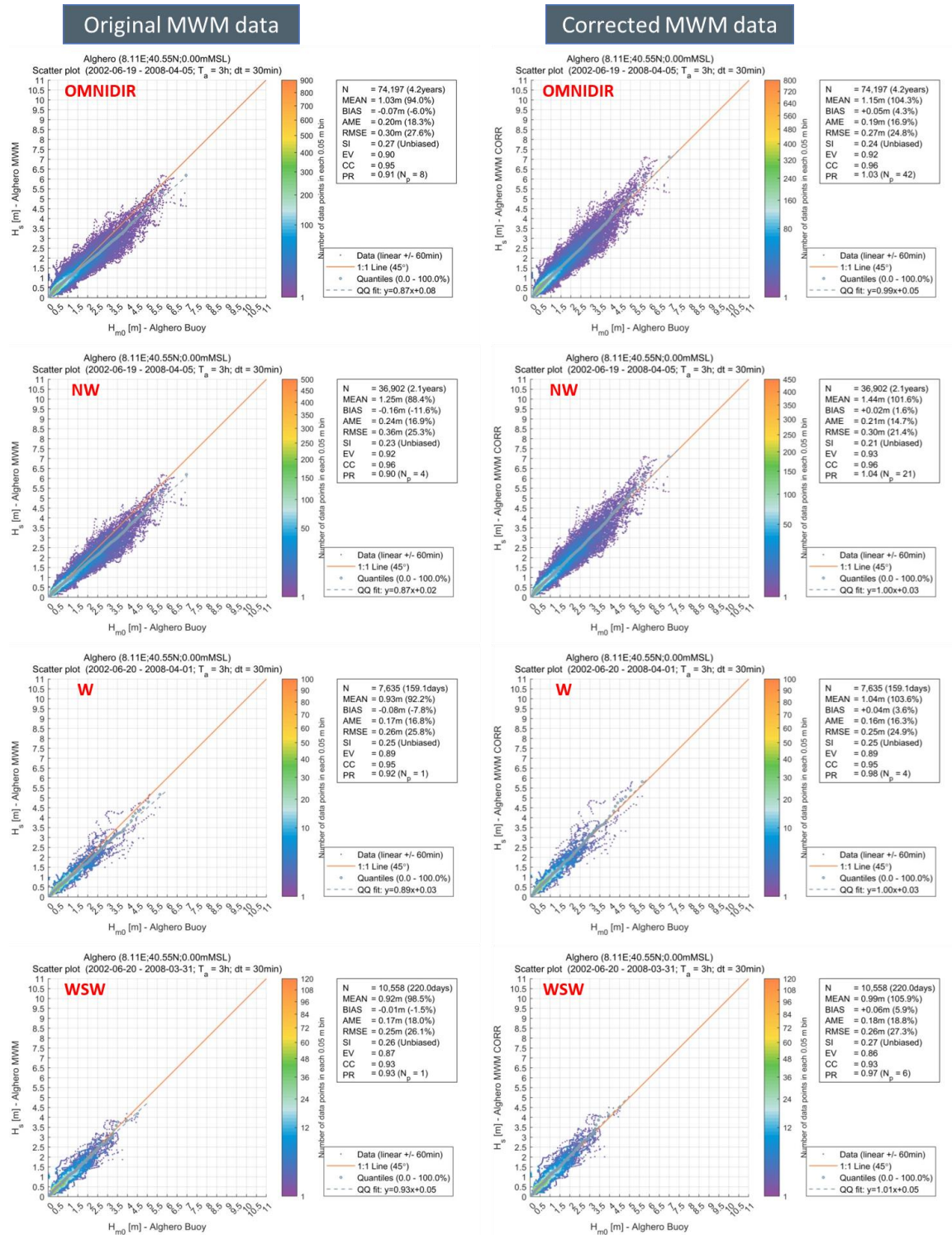


Figura 2.10: Risultati della correzione dei dati MWM presso il sito della boa (RON) di Alghero - Gli Scatter plot mostrano l'altezza d'onda significativa da MWM in confronto ai dati misurati, caso omnidirezionale e per i settori rilevanti, prima (a sinistra) e dopo (destra) la riscaleratura

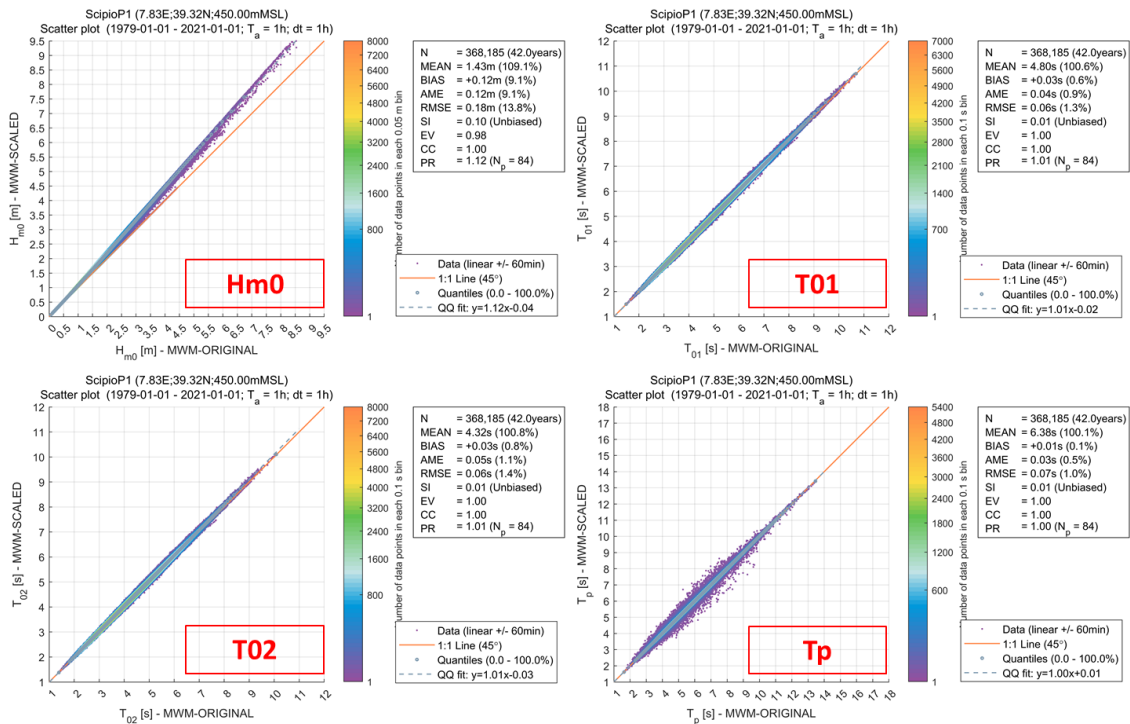


Figura 2.11: Risultati della correzione dei dati MWM nel punto P1 presso il sito Ichnusa. Gli *scatter plot* mostrano i parametri d'onda integrati dallo spettro riscaldato in confronto agli stessi parametri a partire dallo spettro originale:  $H_{m0}$  (in alto a sinistra),  $T_{01}$  (in alto a destra),  $T_{02}$  (in basso a sinistra),  $T_p$  (in basso a destra)

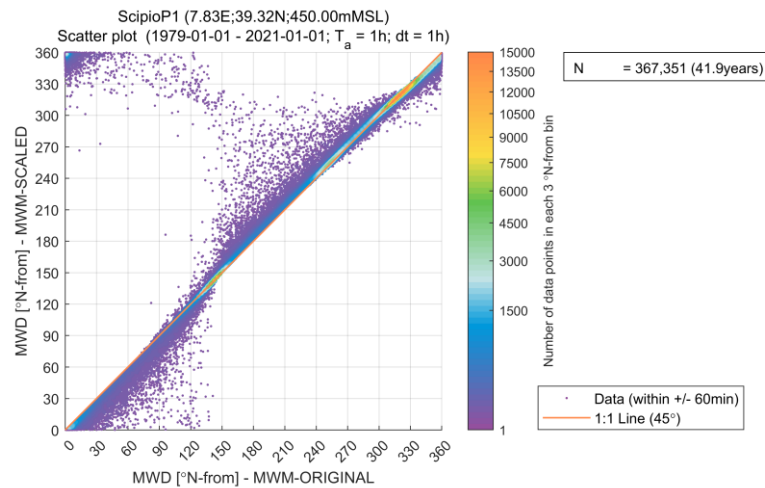


Figura 2.12: Risultati della correzione dei dati MWM nel punto P1 presso il sito Ichnusa. *Scatter plot* per MWD, mostra la direzione media dell'onda ottenuta da spettro riscaldato confrontata con quella ottenuta da spettro originale.

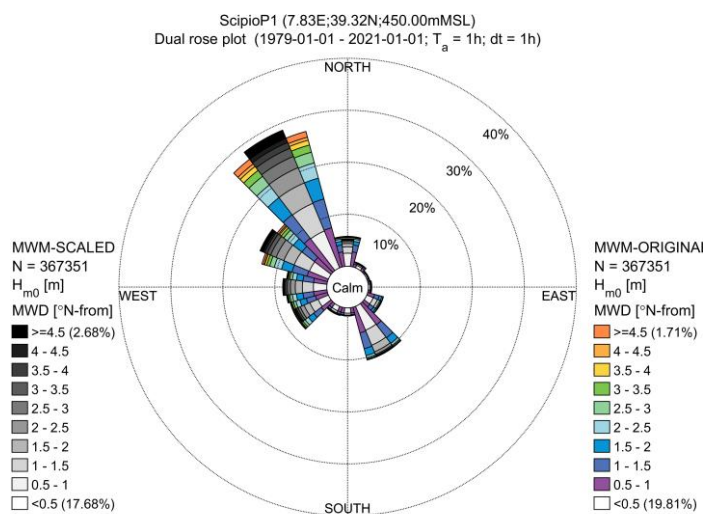


Figura 2.13: Risultati della correzione dei dati MWM nel punto P1 presso il sito Ichnusa. La rosa mostra la direzione media dell'onda (MWD) ottenuta da spettro riscaldato confrontata con quella ottenuta da spettro originale.

### 2.1.4 Dati di periodo medio dell'onda

I dati del modello d'onda rappresentano i valori istantanei di una cella di griglia e, considerando che la forzante vento ha intervalli di un'ora (con una cella più grande di quella del modello d'onda), si prevede che i risultati del modello d'onda non rappresentino le fluttuazioni ad alta frequenza comuni nelle osservazioni registrate. Pertanto, i dati del modello possono essere considerati come uno stato di mare "smoothed" (nello spazio e nel tempo). Questa scala temporale dovrebbe essere presa in considerazione quando si applicano i dati del modello per scopi come la progettazione strutturale.

Un approccio piuttosto semplice per valutare tale scala temporale (o *smoothing*) del modello consiste nel confrontare gli spettri di potenza dell'altezza d'onda significativa osservata e modellata e fare la media, su diverse finestre temporali, dei dati osservati. Figura 2.14 presenta un tale approccio presso il sito della boa di Alghero, dove si può vedere che una finestra temporale di media di 3 ore si adatta meglio alla parte alta della frequenza dello spettro. Questo significa che, per un giusto confronto, le misure devono essere mediate sulle 3 ore.

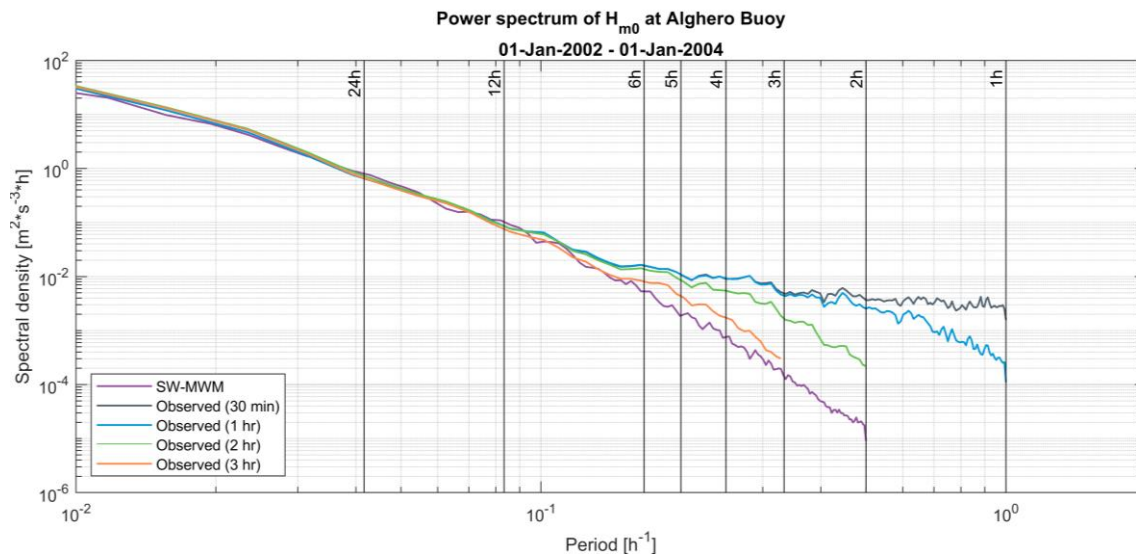


Figura 2.14: Spettri di potenza in frequenza di  $H_{m0}$  modellata in MWM confrontati con quelli osservati dalla boa di Alghero

## 2.2 Dati del Copernicus Marine Environment Monitoring Service

Il *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) fornisce regolari e sistematiche informazioni sullo stato fisico, la variabilità e la dinamica degli ecosistemi oceanici e marini a scala globale (oceanica) o regionale (mari europei).

Il prodotto di rianalisi fisica MED (d'ora in poi MEDREA24) è generato da un sistema numerico composto da un modello idrodinamico, fornito dal *Nucleos of European Modelling of the Ocean* (NEMO) e da uno schema di assimilazione dei dati variabili (OceanVAR) per i profili verticali di temperatura e salinità e da *Sea Level Anomaly* satellitari lungo le tracce dei dati. Il sistema di rianalisi è forzato dai campi atmosferici ERA5 dell'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e assimila le osservazioni rielaborate. La risoluzione della griglia orizzontale del modello è  $1/24^\circ$  (4-5 km) e i livelli verticali non uniformemente spazati sono 141. Il modello è disponibile con frequenza giornaliera attraverso le medie giornaliere dei campi di temperatura, salinità, altezza della superficie del mare e correnti. I dati orari sono disponibili solo per le correnti di superficie e i livelli d'acqua.

Tabella 2.3 mostra la configurazione del modello *Copernicus Med Sea* i cui dati sono stati utilizzati nel presente studio meteomarinario e consegnati a Ichnusa Wind. Visto che i dati del CMEMS non includono le forzanti mareali, esse sono state aggiunte sulla base delle costituenti delle maree del *Global Tide Model* di DHI (d'ora in poi chiamato DTU10 [3]).

Un'ampia validazione di MEDREA24 è fornita attraverso il CMEMS, valutato nel periodo 1987-2019, secondo i parametri di temperatura, salinità, altezza della superficie del mare, corrente, profondità degli strati misti ed energia cinetica turbolenta e comparandoli con le osservazioni satellitari quasi-indipendenti o in situ o con set di dati climatologici. Fare riferimento a [4] per ulteriori dettagli.

Tabella 2.3 Riepilogo della configurazione principale del modello Mes Sea Reanalysis (CMEMS)

<b>Main configuration of the nesting model (Med Sea Reanalyses)</b>	
<b>MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004</b>	
Numerical model	NEMO v3.6
Horizontal resolution	1/24° (approx. 4km)
Vertical resolution	141 unevenly spaced z levels
Temporal resolution	daily-mean, monthly-mean, hourly-mean
Availability	01.01.1987 - 31.12.2019
Tides	N/A
Atmospheric Forcing	1-h, 0.25° horizontal-resolution ERA5 reanalysis fields from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
Assimilation scheme	OceanVar (3DVAR)
Assimilated observations	In-situ vertical profiles of Temperature and Salinity from CTDs, XBTs, MBTs, bottles, ARGO floats; Sea Level Anomaly (SLA) from available satellites.  Objective Analyses-Sea Surface Temperature (SST) fields are used to correct surface heat fluxes
Initial conditions	Temperature and salinity monthly climatology (named SDN_V2aa) produced within the framework of SeaDataNet FP6 Project
Bathymetry	GEBCO 30sec interpolated on the model grid

## 2.3 Dati meteomarini forniti per FOWF

I dati meteomarini estratti dalle fonti di dati descritte nelle sezioni precedenti sono stati consegnati a Ichnusa Wind Power in quanto facenti parte dell'obiettivo di lavoro concordato nel *Consultancy Contract* e nel *License Agreement* del 22 Ottobre 2021. La posizione del punto di estrazione è raffigurata in Figura 2.1 and Tabella 2.1.

I dati di vento e onda sono stati forniti dal database meteomarino del Mediterraneo di DHI (MWM), che ricopre un periodo di 42 anni (1979-2020, compresi). I dati idrodinamici sono stati estratti dal *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) per la finestra di 34 anni (1987-2019, compresi). Visto che i dati CMEMS non includono le maree, questi sono stati incluse sulla base delle costituenti delle maree del DTU10, ovvero del *Global Tide Model* di DHI.

I dati d'onda includevano spettri d'onda 2D. I dati sono stati forniti in quattro file MATLAB, come descritto nella tabella seguente.

Tabella 2.4: Elenco dei contenuti del pacchetto dei dati meteomarini di *hindcast* forniti per FOWF

ID	Long. [E]	Lat. [N]	D (m)	Parameter	Time coverage	Model Database
Point P1	7.83	39.32	450	WIND	1979/01/01 - 2020/12/31	MWM (WRF)
	7.80	39.30	450	WAVE	1979/01/01 - 2020/12/31	MWM (MIKE 21 SW)
POINT 1	7.83	39.32	450	CURRENT	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS + DTU10
				WATER LEVEL	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS + DTU10
				TEMPERATURE	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS
				SALINITY	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS



### 3 Climatologia generale

Il Mare di Sardegna è la porzione del bacino Algero-Provenzale (Algero-Provençal-Basin, d'ora in poi APB) situato tra i 7°E a Ovest e la costa occidentale sarda ad Est, mentre i limiti Nord e Sud sono rispettivamente 42°N e 38°N (Bethoux, 1980 [5]).

Il clima della zona è il tipico clima mediterraneo, con inverni miti e abbastanza piovosi ed estate calde e soleggiate, mitigate dalle brezze marine. Al livello del mare la temperatura media giornaliera varia da circa 9.5°C di Gennaio e Febbraio a circa 25°C di Luglio e Agosto. La zona è generalmente ventosa, per il Maestrale di Nord-Ovest, che soffia dalla Francia e interessa in particolare il versante occidentale dell'isola, ma anche per il Ponente proveniente da Ovest.



Figura 3.1: Mappa del Mar di Sardegna rispetto al Mar Mediterraneo

#### 3.1 Caratteristiche del vento su mesoscala

Una panoramica dei principali sistemi eolici e della loro variabilità spaziale nel bacino del Mediterraneo è ben rappresentata da (Zecchetto et al., 2007 [6]), che offre un'analisi climatologica sul bacino per il periodo 2000-2004 grazie al satellite *Quick Scatterometer* (QuickSCAT), fornito dalla *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

Figura 3.2 riporta il campo di probabilità che la velocità del vento  $U > 10$  m/s, con le direzioni medie del vento sovrapposte, calcolate su una griglia regolare  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , ma tracciate su una griglia  $1^\circ \times 1^\circ$  per questioni di leggibilità. La figura mostra la scala sinottica del flusso del vento da Sud-Est nel Mediterraneo e la circolazione da Nord nel Mar Nero. Il Canale di Sicilia è principalmente interessato dai venti da Ponente e da Nord-Ovest: la struttura a scala regionale dei venti è comprovata dalla probabilità di velocità del vento, che raggiunge i suoi valori massimi (Prob > 0.3) nel Golfo del Leone e nel Canale di Sicilia (Maestrale), nel bacino levantino (Etesini), nel Mar Egeo settentrionale (vento simile alla Bora) e in poche piccole aree del Tirreno, Ionio e Adriatico.

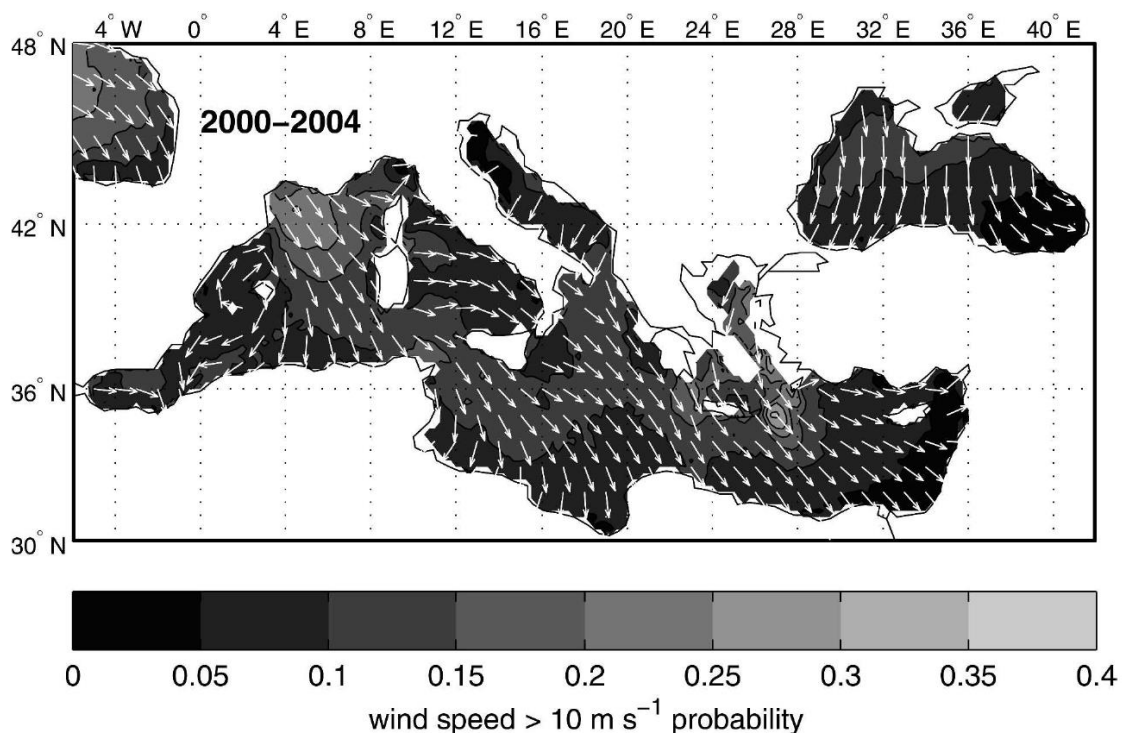


Figura 3.2: Campi annuali (2000-2004): probabilità di occorrenza di venti  $U > 10$  m/s con le direzioni medie del vento sovrapposte (from [6])

Figura 3.3 (parte alta) mostra la distribuzione spaziale della variabilità relativa annuale della velocità del vento  $G$ , definita come la raffica di vento dal rapporto tra deviazione standard della velocità del vento e la velocità media del vento. La figura indica che i valori più alti ( $G > 0.40$ ) si presentano in aree spazzate da venti provenienti da terra, a causa delle interazioni del vento con l'orografia. La parte bassa di Figura 3.3 illustra il campo di stabilità del vento  $S$ , dato da

$$S = 100 \left[ \left( \sum u \right)^2 + \left( \sum v \right)^2 \right]^{1/2} / U$$

dove  $u$  e  $v$  sono le componenti zonali e meridionali del vento, e le somme si estendono nel tempo.  $S$  varia da 0 a 100, aumentando con la costanza della direzione del vento. Il campo  $S$  in Figura 3.3 indica che le direzioni di vento più variabili ( $S < 40$ ) sono verso il mare di Alboran, il mare delle Baleari, l'Adriatico il Tirreno, il mar Nero ed il canale di Sicilia.

I campi di variabilità relativa della velocità dei venti stagionali, riportati sulla sinistra in Figura 3.4, mostrano che l'inverno e la primavera sono le stagioni più variabili. I campi di stabilità del vento sono riportati nei pannelli di destra in Figura 3.4. L'inverno è l'unica stagione di stabilità per lo più uniforme e bassa su tutto il bacino ( $30 < S < 50$ ), che deriva dal frequente passaggio dei fronti in questa stagione, mentre l'estate è la stagione con la più alta stabilità.

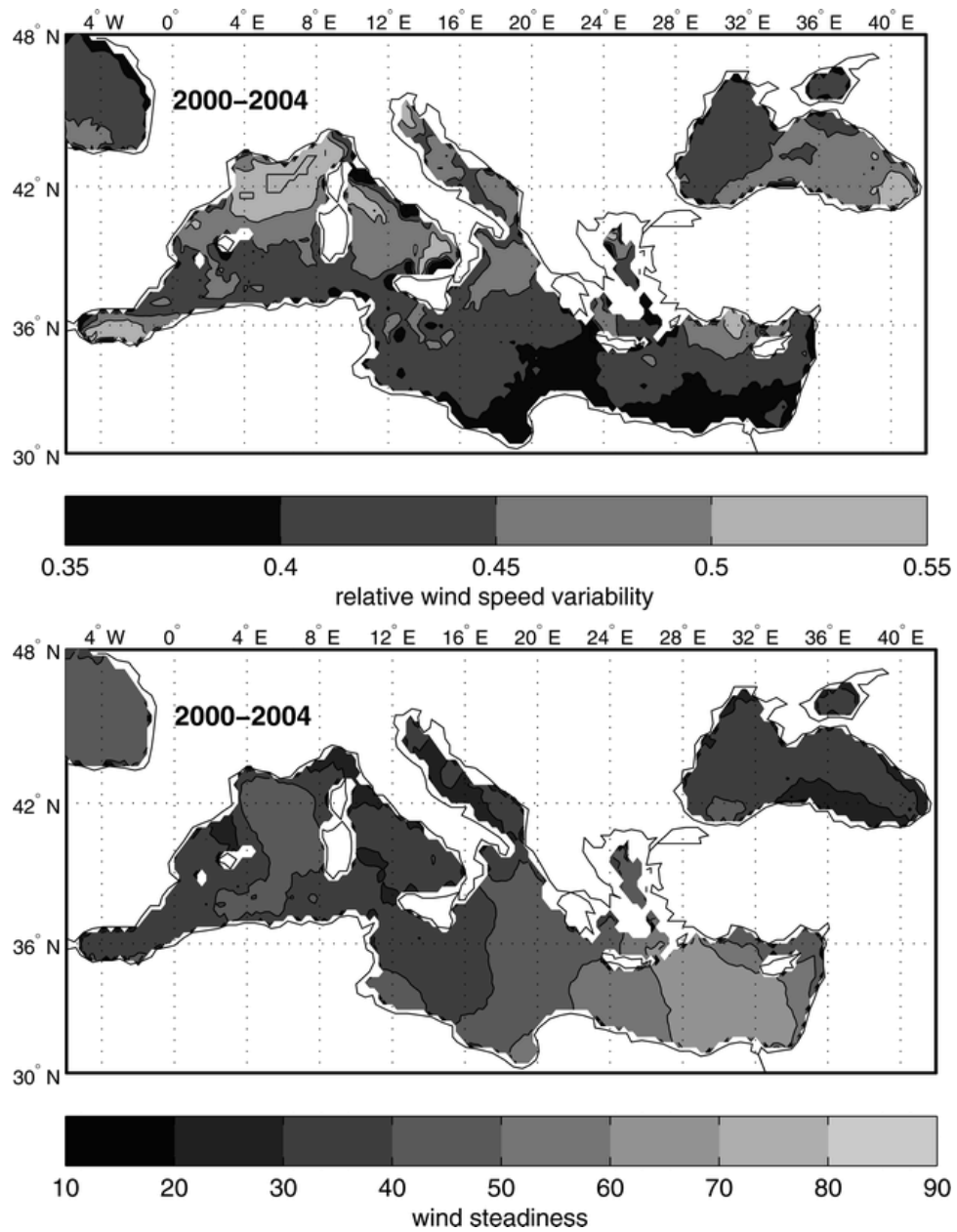


Figura 3.3: Campi annuali (2000–2004): stabilità del vento S (in basso) e variabilità relativa della velocità del vento G (in alto) (from [6])



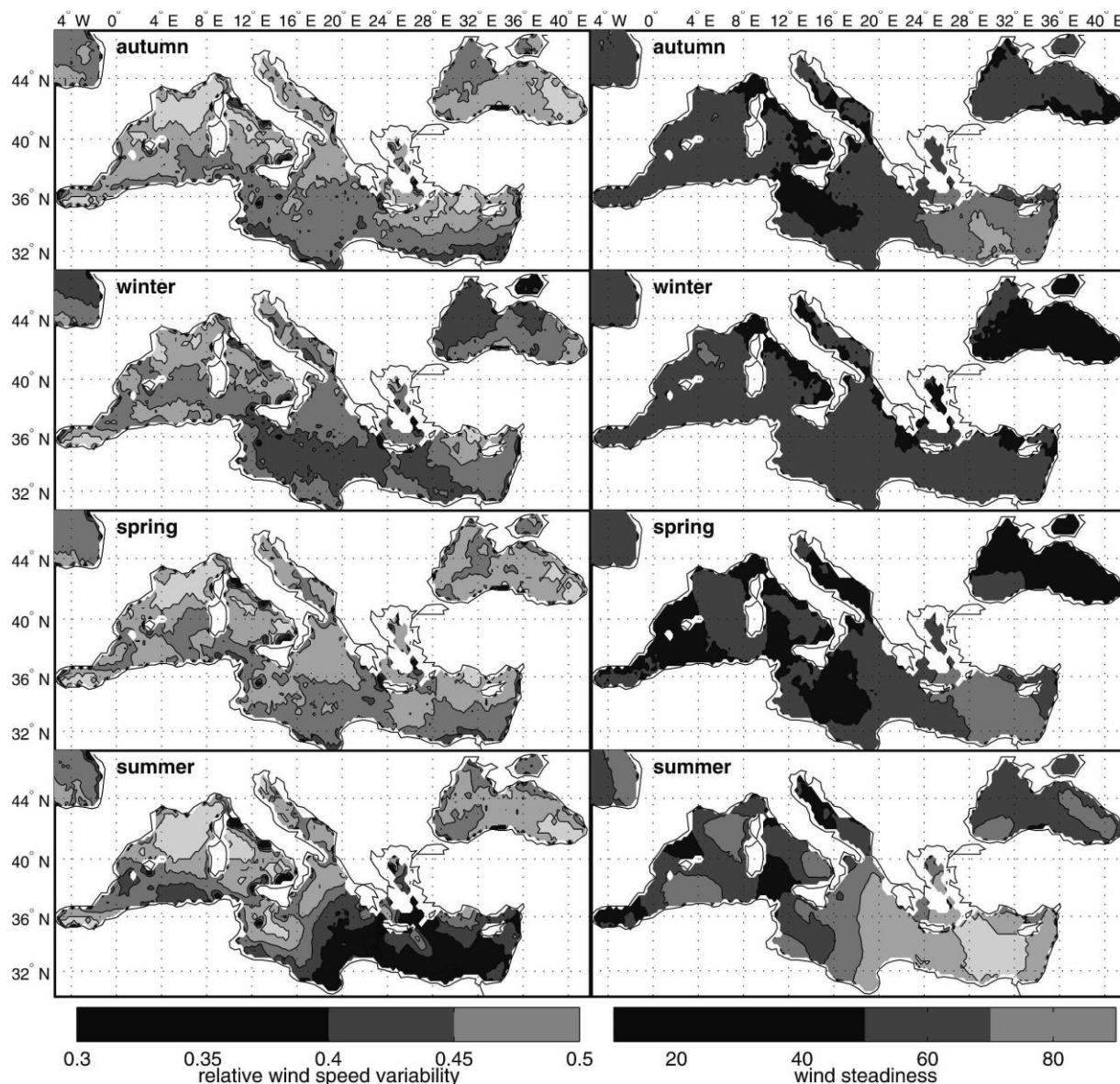


Figura 3.4: Variabilità stagionale relativa della velocità del vento  $G$  (a sinistra) e stabilità  $S$  (a destra) (da [6])

## 3.2 Circolazione generale

Il Mar Mediterraneo può essere considerato come un sistema oceanico su piccola scala in cui hanno luogo diversi processi spaziali e temporali, dominato da tre masse d'acqua: superficiale, intermedia e profonda. Queste masse d'acqua hanno un modello di circolazione indipendente, che sommati forniscono la circolazione generale del Mar Mediterraneo.

Il Mar Mediterraneo occidentale rappresenta una delle aree più dinamiche dell'intero bacino del Mediterraneo e per questo motivo la sua dinamica è stata ampiamente studiata in passato. E' comunemente considerato suddiviso in due parti, meridionale e settentrionale, dal cosiddetto *North Balearic Front*, formato dal gradiente di densità Nord-Sud tra le acque più salate e più fredde a Nord e le acque più fresche, modificate dall'Atlantico, a Sud (LaViolette et al. 1990; López García et al. 1994). La parte meridionale è caratterizzata in superficie dall'*Atlantic Water* (AW) che scorre nel Mar Mediterraneo attraverso lo Stretto di Gibilterra (Millot, 1999 [7]). Lungo la costa algerina l'AW è trasportato dalla *Algerian Current* (AC). L'instabilità dell'AC tende a generare gli

anticiclonici *Algerian Eddies* (AEs) che generalmente rimangono nel flusso principale dell'AC e collasano una volta raggiunto il Canale di Sardegna. Anche la parte settentrionale del bacino è una regione altamente dinamica, caratterizzata da processi di formazione di acque profonde seguite da una rapida re-stratificazione delle acque superficiali, che sono risultate responsabili dell'insorgere di un'intensa fioritura di alghe. Una rappresentazione di quanto detto è resa nella figura sottostante.

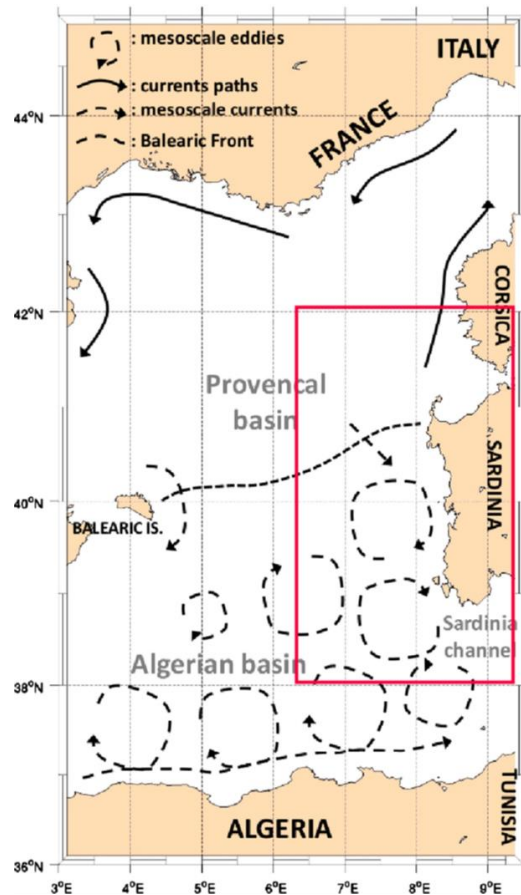


Figura 3.5: Principali elementi della circolazione del Mare di Sardegna (quadrato rosso) nell'ambito del bacino *Alghero-Provençal* (da [16])

La circolazione generale su larga scala del Mar Mediterraneo è in parte controllata dal gradiente di densità e dal dislivello tra l'Oceano Atlantico ed il Mar Mediterraneo e dalla trasformazione delle masse d'acqua che induce una componente termoalina attiva nella circolazione (Saliot, 2007 [8]). Il flusso generale delle masse d'acqua nel Mediterraneo è determinato principalmente dallo scambio di calore e dalla circolazione termoalina (Hopkins, 1978 [9]) e dall'effetto della rotazione terrestre (forza di Coriolis). Di conseguenza, la circolazione è diretta approssimativamente in senso antiorario lungo i versanti continentali, ma l'attività dinamica alla mesoscala si impone quasi ovunque nel Mediterraneo, modificando questo percorso medio. I fenomeni di mesoscala sono tipicamente di risalita, fronti, meandri e vortici. Localmente ed episodicamente (fino a diversi mesi) possono perturbare fortemente la circolazione generale (Millot and Taupier-Letage, 2005 [11]).

Le correnti di marea nel Mediterraneo sono generalmente deboli, come dimostrato sia da modelli che da osservazioni. Secondo Sparnocchia et al., 2004 [12], le correnti tidali più importanti si trovano nello Stretto di Gibilterra, forzate dalla marea atlantica, e sulle ampie piattaforme del Canale di Sicilia. Le maree dominanti sono quelle semidiurne M2 e S2, ma anche le componenti diurne K1 e O1 possono essere significative, anche se le loro ampiezze sono generalmente inferiori.

Viene fornita nelle sezioni seguenti una descrizione da letteratura più dettagliata dei *pattern* di circolazione generale nel Mar Mediterraneo delle acque superficiali, intermedie e profonde. Sezione 3.2.4 fornisce un'ulteriore descrizione della circolazione generale specifica per il Mar di Sardegna.

### 3.2.1 Circolazione superficiale

La circolazione superficiale è dovuta alla *Atlantic Water* (AW), che entra nel Mar Mediterraneo attraverso lo Stretto di Gibilterra e scorre in superficie verso Est; quest'acqua viene continuamente trasformata mescolandosi con quella presente nel Mediterraneo lungo tutto il suo percorso, diventando più calda e salata lungo la costa africana e costituendo l'origine della *Modified Atlantic Water* (MAW).

Scorre inizialmente attraverso il mare di Alboran, raggiungendo la costa algerina a 0°E circa. Forzato dalla forza di Coriolis, in corrispondenza del Canale di Sicilia, il flusso si dirama, con una parte che va a NE verso il Mar Tirreno e l'altra che scorre verso i bacini Ionio e Levantino attraverso il Canale di Sicilia. Il MAW scorre verso Est lungo i versanti algerino e tunisino, mantenendo la costa sulla sua destra ed entra nel Mediterraneo Orientale attraverso il Canale di Sicilia. Il MAW si trova anche in tutto il Mediterraneo Nord-Occidentale, formando la corrente permanente Nord-Mediterranea lungo le coste italiane, francesi e spagnole. Avvicinandosi al Canale di Sardegna, un ramo scorre verso Nord nel Mediterraneo Nord-Occidentale.

Nel canale di Sardegna il MAW è parzialmente deviato verso nord dal poco profondo Banco Skerki tunisino (Manzella, 1994 [15]) e poi si divide in tre rami principali per effetto della batimetria. Un ramo entra nel Mar Tirreno, scorrendo lungo la costa settentrionale siciliana; gli altri due flussi del MAW confluiscono nel bacino del Mediterraneo orientale attraversando il Canale di Sicilia (Astraldi et al., 1999 [14]).

Gli schemi di circolazione superficiale sono mostrati in Figura 3.6.

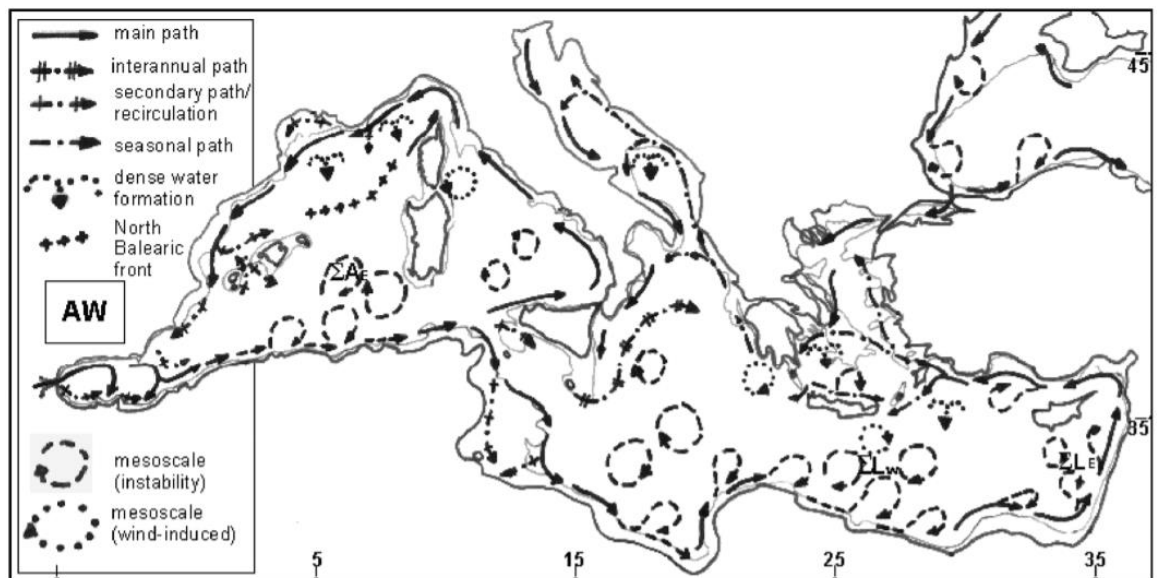


Figura 3.6: Circolazione dell'AW in superficie (da [11])

### 3.2.2 Circolazione intermedia

Il *Levantine Intermediate Water* (LIW) si forma principalmente nel bacino levantino Nord-Orientale durante l'inverno, a seguito di processi di raffreddamento ed evaporazione. Dopo la formazione, il LIW si dirige verso Ovest lungo le coste di Creta e Rodi – principalmente per la forza di Coriolis



– ad una profondità intermedia, penetrando la dorsale del Mediterraneo centrale ed entrando infine nel bacino Occidentale, dopo aver attraversato lo Stretto di Sicilia.

Nel Mar Tirreno, il LIW scorre lungo la costa italiana, in parte uscendo dal Canale di Corsica verso Nord, soprattutto durante l'inverno, ed in parte a Sud-Ovest lungo la costa orientale sarda ad una profondità compresa tra 700 m e 1000 m, sovrapponendosi poi alla WMDW (*Western Mediterranean Deep Water*) nel Canale di Sardegna (Hopkins, 1978 [9]).

Forti cambiamenti della vena del LIW si osservano passando vicino all'angolo Sud-Occidentale della Sardegna, dove diventa più ampia, più sottile e più fresca entro circa 100 km lungo il versante costiero. Le ragioni di questa modifica, che non si trova altrove lungo le coste italiane, sono ancora dibattute: un fenomeno potrebbe essere l'interazione tra le AEs che escono dal versante algerino e la vena LIW (Millot, 1999 [7]); un'altra spiegazione potrebbe essere legata all'instabilità della stessa vena LIW, generando vortici anticiclonici (Testor et al., 2005). Le possibili cause di tali instabilità sono ancora dibattute.

I *pattern* di circolazione del LIW sono mostrati in Figura 3.7.

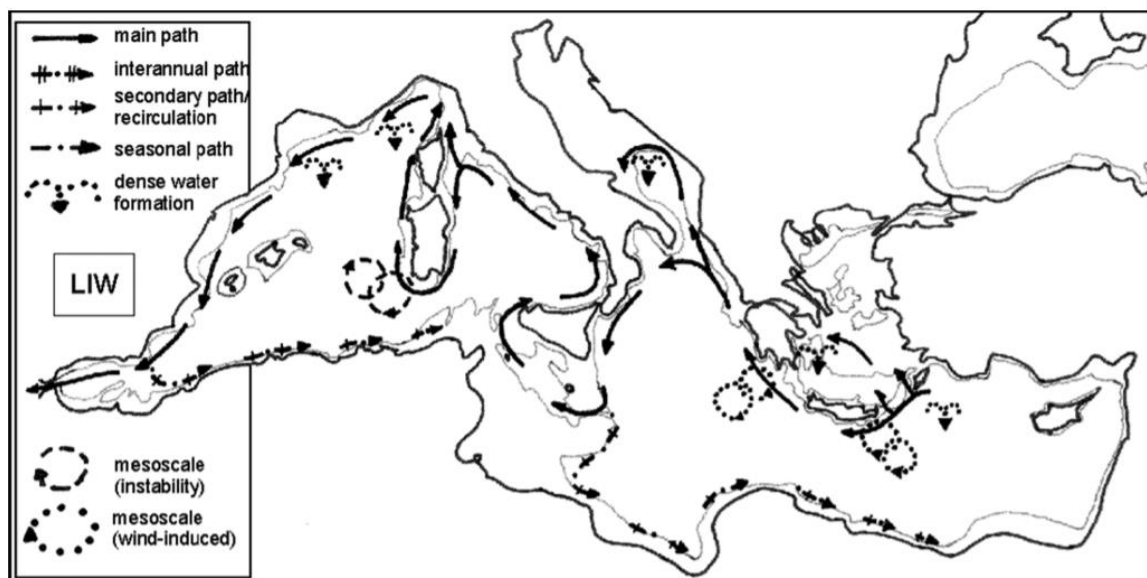


Figura 3.7: Circolazione del LIW a 500 m di profondità (da [11])

### 3.2.3 Circolazione profonda

Le acque profonde all'interno del bacino del Mediterraneo possono essere classificate come: acque profonde dell'Egeo e acque profonde dell'Adriatico, che formano le acque profonde del Mediterraneo Orientale (EMDW) e acque profonde del Tirreno e acque profonde del Golfo del Leone, che formano le acque profonde del Mediterraneo Occidentale (WMDW). Esperimenti sul campo condotti a partire dai primi anni '80 nell'ambito del programma di ricerca cooperativa internazionale POEM (*Physical Oceanography of the Eastern Mediterranean*) hanno dimostrato che un unico corpo idrico omogeneo riempie l'intero Mediterraneo Orientale al di sotto di una profondità di circa 1200 m. Hanno sostenuto che la colonna d'acqua negli strati profondi è caratterizzata da una temperatura potenziale e da una salinità che decrescono lentamente con la profondità, il che implica una stabilità statica molto bassa. Il periodo di ricambio delle acque profonde è stato stimato a circa 126 anni. Sotto l'influenza della forza di Coriolis, le acque profonde dell'Egeo e dell'Adriatico scorrono nel punto più profondo del Canale di Sicilia, principalmente nel lato tunisino, verso il bacino del Mediterraneo Occidentale. Queste acque sono più dense di quelle tirreniche profonde, quindi scorrono al di sotto e si mescolano con queste acque per formare l'acqua profonda tirrenica che si trova a 2000-3500 m.

I *pattern* di circolazione di tali acque profonde sono mostrati in Figura 3.8.

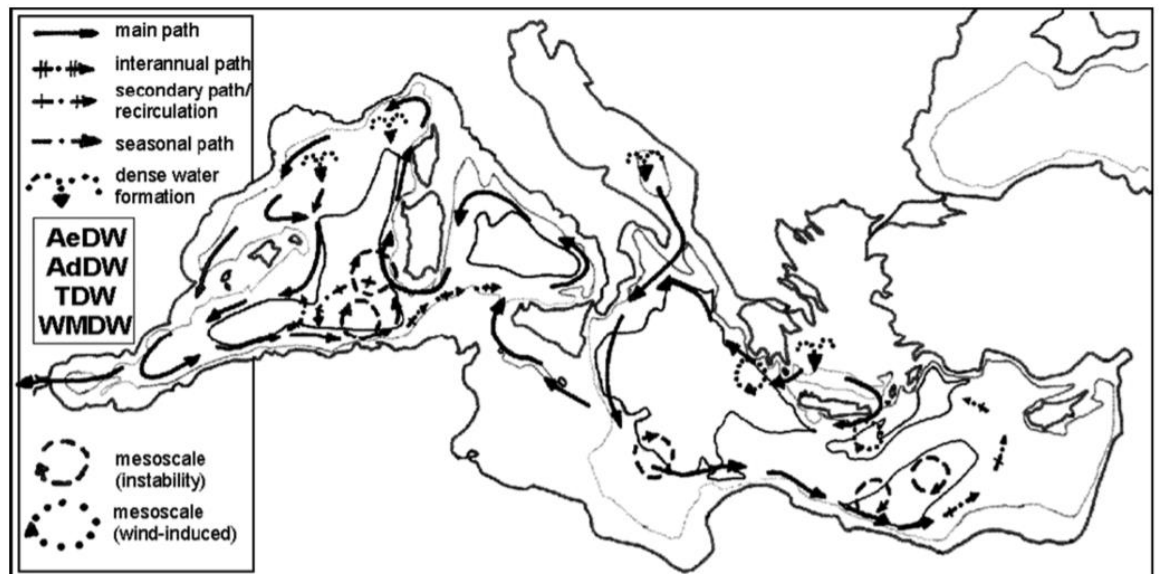


Figura 3.8: Circolazione profonda. AeDW, AdDW, TDW e WMDW indicano rispettivamente le Aegean, Adriatic, Tyrrhenian e Western Mediterranean Deep Waters (da [11])

### 3.2.4 Circolazione del Mar di Sardegna

Il Mare di Sardegna è la porzione del bacino Algero-Provenzale (APB) situata tra 7°E ad Ovest e la costa Occidentale della Sardegna ad Est, mentre i confini Settentrionale e Meridionale si trovano rispettivamente a 42°N e 38°N (Bethoux, 1980 [5]). Il Canale di Sardegna è il passaggio tra il bacino Algerino, sul versante Occidentale, e il bacino Tirrenico sul versante Orientale. È limitato dalla Sardegna e dalla costa Settentrionale Tunisina, e arriva fino a 2000 m di profondità verso 9°E. Il canale di Sardegna è una delle zone meno conosciute del Mar Mediterraneo occidentale. Ancora dibattuti sono i percorsi di *Levantine Intermediate Water* (LIW), *Tyrrhenian Dense Water* (TDW) e *Western Mediterranean Deep Water* (WMDW). In questa sezione si fornisce una breve descrizione delle principali caratteristiche di circolazione del Mar di Sardegna come indicato da letteratura e mostrato in Figura 3.5 (Olita et al., 2011 [16]).

L'esperimento chiamato PRIMO-1 ha raccolto serie temporali attuali in varie località e profondità nel canale di Sardegna, da Novembre 1993 a Ottobre 1994. Come descritto in Bouzinac et al. 1999 [17], l'analisi dei dati sul versante Sardo ha mostrato un flusso Nord-Ovest pressoché permanente negli strati intermedi e profondi, associato alla circolazione del LIW. Nella parte centro-Occidentale del canale, a 200 m di profondità, il flusso di corrente è stato rilevato verso Sud per l'influenza dei vortici anticiclonici (AEs), mentre il flusso di fondo è diretto verso Nord lungo le isobate. Il risultato più importante di tale esperimento è l'evidenza che l'attività di mesoscala ha un effetto significativo sulla circolazione media fino al fondo. I vortici anticiclonici, che raggiungono la parte occidentale del canale di Sardegna, sono in grado di rallentare, o addirittura invertire, la circolazione profonda lungo il pendio in senso antiorario.

Secondo il lavoro di Ribotti et al., 2004 [18], sulla base di un insieme di profili CTD raccolti durante diverse campagne oceanografiche, la circolazione superficiale del Mare di Sardegna è principalmente caratterizzata dal transito delle acque di immersione degli AEs di origine Atlantica, ma nei dati analizzati non è stata trovata alcuna evidenza di vortici generati localmente. Al contrario, Testor et al., 2005 [10] ha evidenziato la formazione dei cosiddetti vortici Sardi, cioè vortici anticiclonici formatisi a strati medio profondi (a circa 600 m di profondità) per separazione del flusso del LIW dal versante Sardo.

### 3.3 Il clima ondososo del Mar Mediterraneo

Il Mar Mediterraneo presenta una grande varietà di caratteristiche del clima ondososo e la sua variabilità è principalmente governata dalle caratteristiche meteorologiche attive altamente diversificate su scala sinottica e mesoscala (Sartini L. et al., 2017 [20]).

La distribuzione dei valori massimi assoluti di altezza d'onda significativa ricostruite da modello sull'intero bacino mostra che gli stati del mare di maggiore entità si verificano nell'intero bacino Occidentale e sono parzialmente associati a forti perturbazioni meteorologiche provenienti dall'Oceano Atlantico, come si può vedere in Figura 3.9.

Queste condizioni ondose molto intense sono particolarmente marcate vicino al Golfo del Leone e al Mare delle Baleari e vicino al bacino Algerino. Anche nel Tirreno Settentrionale si sviluppano questi stati di mare rilevanti, per la combinazione dei venti di Maestrale da Nord-Ovest e di Libeccio da Sud-Ovest: qui le onde lunghe (swell) sono frequenti. Gli eventi provenienti da Nord-Ovest, incanalati dalle Bocche di Bonifacio, sono responsabili anche della situazione nel clima ondososo del bacino Tirrenico Orientale. Anche nel bacino Ionico Meridionale e nell'area centrale del bacino levantino sono presenti elevate altezze d'onda significativa associate a sistemi ciclogenetici.

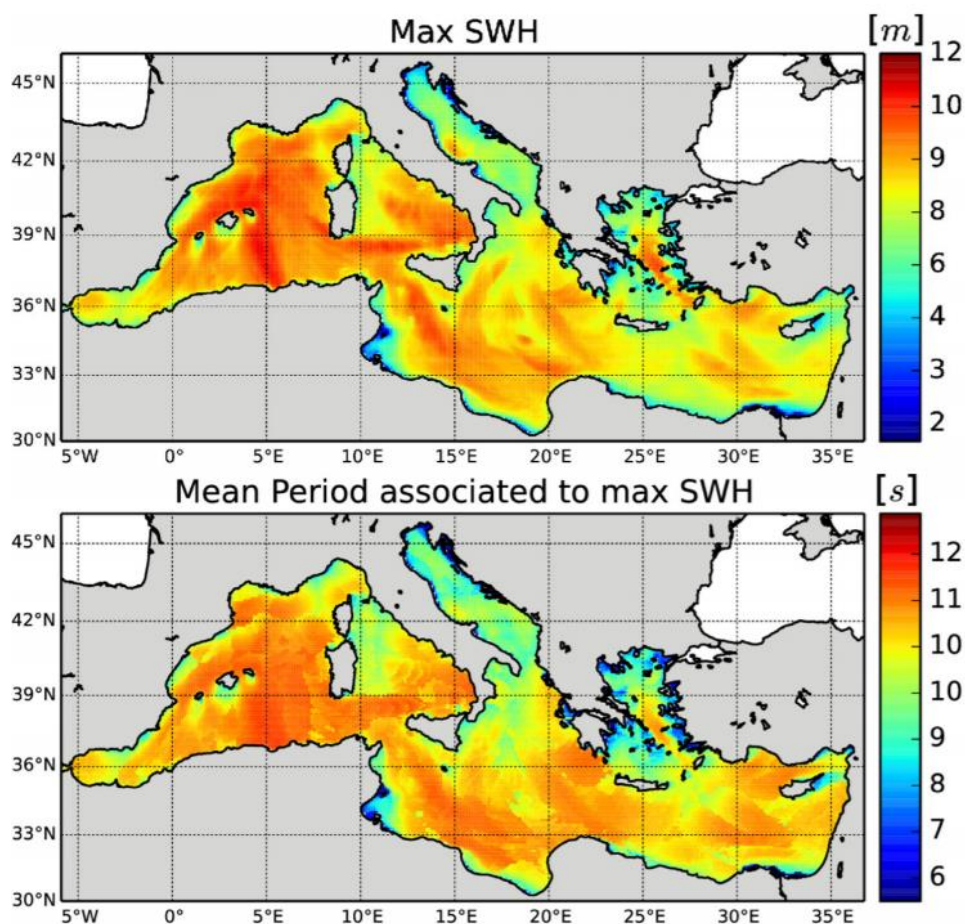


Figura 3.9: Altezze massime d'onda significative (in alto) e corrispondenti periodi medi dell'onda (in basso) nel Mar Mediterraneo. Da [20].

## 4 Condizioni meteomarine tipiche

Sono state condotte una serie di analisi meteomarine per descrivere le condizioni operative (normali) nel sito in progetto. Le analisi sono state condotte per un punto concordato ritenuto rappresentativo delle condizioni del sito del progetto (Tabella 2.4).

### 4.1 Vento

L'analisi delle condizioni del vento operative si è basata sui dati del modello atmosferico WRF descritti nel Capitolo 2. La risoluzione temporale dei dati del WRF è di 1 ora e la velocità e la direzione del vento modellate sono considerate rappresentative di una finestra media di 2 ore. L'analisi del vento è stata eseguita a quota 10 m slm e 80 m slm.

#### 4.1.1 Serie temporali e statistiche annuali

La serie temporale, lunga 42 anni, della velocità del vento nel punto P1 è riportata in Figura 4.1. Le statistiche annuali e quelle mensili, riportate in Tabella 4.1, mostrano che la velocità media mensile del vento è omogeneamente alta per la maggior parte dell'anno, con i valori massimi che si verificano tipicamente a Gennaio.

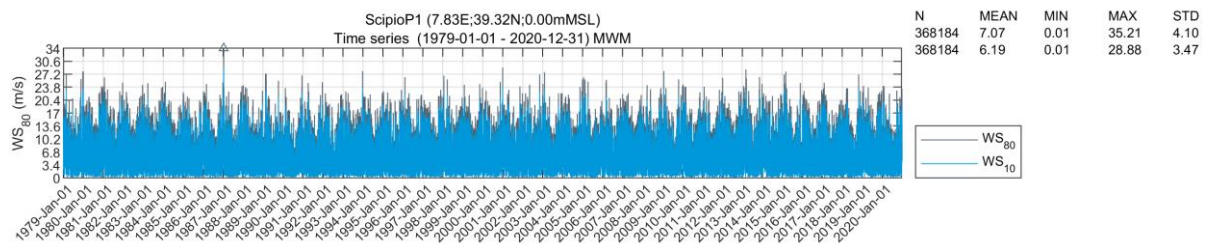


Figura 4.1 Serie temporali e statistiche delle velocità del vento WS<sub>10,2hr</sub> e WS<sub>80,2hr</sub> [m/s] nel Punto P1

Tabella 4.1 Statistiche annuali e mensili delle velocità del vento  $WS_{10,2hr}$  e  $WS_{80,2hr}$  [m/s] nel Punto P1

	$WS_{10,2hr}$ [m/s]				$WS_{80,2hr}$ [m/s]		
	MEAN	MAX	STD		MEAN	MAX	STD
All	6.2	28.9	3.5	All	7.1	35.2	4.1
Jan	7.4	28.9	3.8	Jan	8.4	35.2	4.6
Feb	7.3	23.0	3.7	Feb	8.2	27.7	4.4
Mar	6.9	23.3	3.7	Mar	7.9	28.5	4.4
Apr	6.6	21.3	3.5	Apr	7.6	25.2	4.2
May	5.4	19.5	3.1	May	6.4	24.4	3.8
Jun	4.8	17.7	2.7	Jun	5.6	20.9	3.2
Jul	4.9	17.3	2.6	Jul	5.7	21.5	3.1
Aug	4.8	17.0	2.5	Aug	5.4	20.2	3.0
Sep	5.4	19.5	2.8	Sep	6.0	22.9	3.3
Oct	6.2	22.9	3.3	Oct	7.0	27.1	3.9
Nov	7.2	22.6	3.7	Nov	8.1	27.1	4.4
Dec	7.5	24.1	3.8	Dec	8.6	28.9	4.6

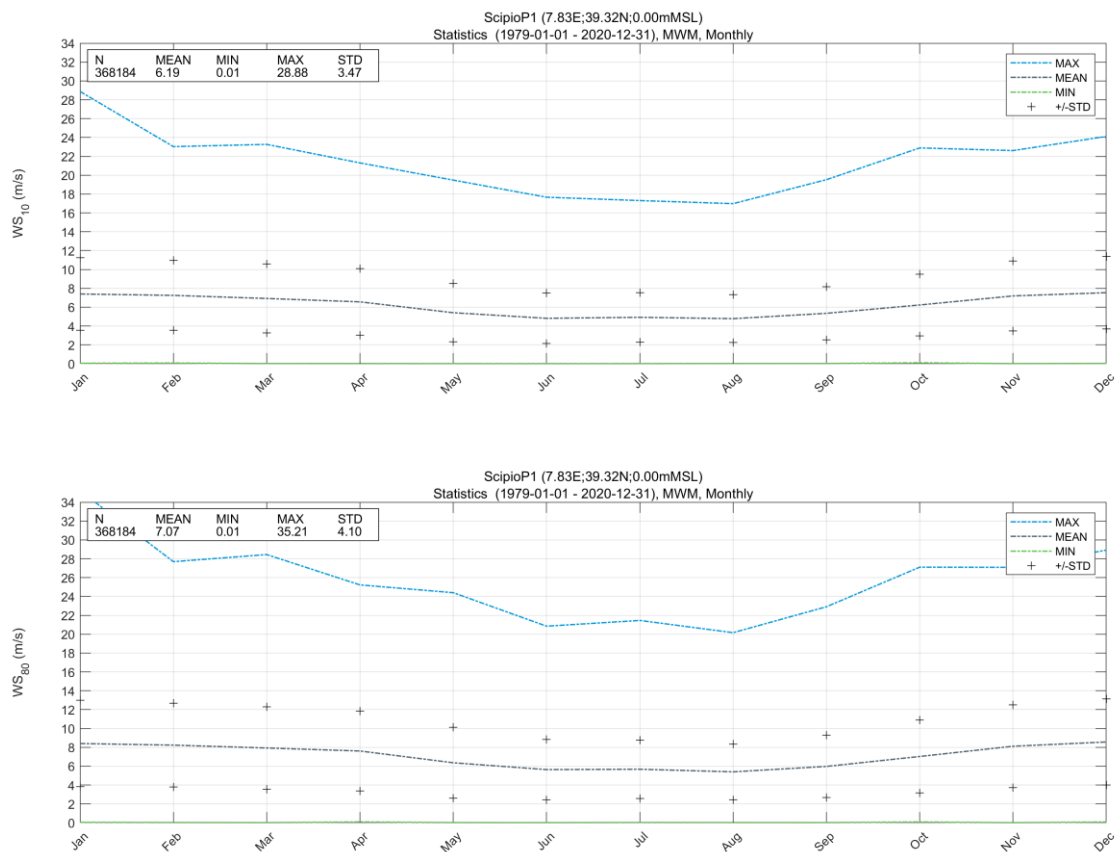


Figura 4.2 Statistiche mensili delle velocità del vento  $WS_{10,2hr}$  (in alto) e  $WS_{80,2hr}$  (in basso) nel Punto P1



### 4.1.2 Rose dei venti e tabelle di frequenza della velocità e direzione del vento

In Figura 4.3 e Figura 4.4, vengono riportate la rosa dei venti medi annuali nel punto P1, rispettivamente a 10 m e 80 m di altitudine. Le corrispondenti tabelle di frequenza di accadimento sono mostrate in Tabella 4.2 and Tabella 4.3.

La distribuzione dei venti mostra una dominanza dei venti Nord-Occidentali (settori direzionali centrati rispettivamente in 300°N and 330°N). Venti provenienti dal quarto quadrante rappresentano oltre il 50% del totale. Abbastanza frequenti sono anche i venti da Sud-Est (da 120°N a 180°N), che rappresentano circa il 23% delle direzioni del vento. I venti più intensi provengono da Nord-Ovest (300°N).

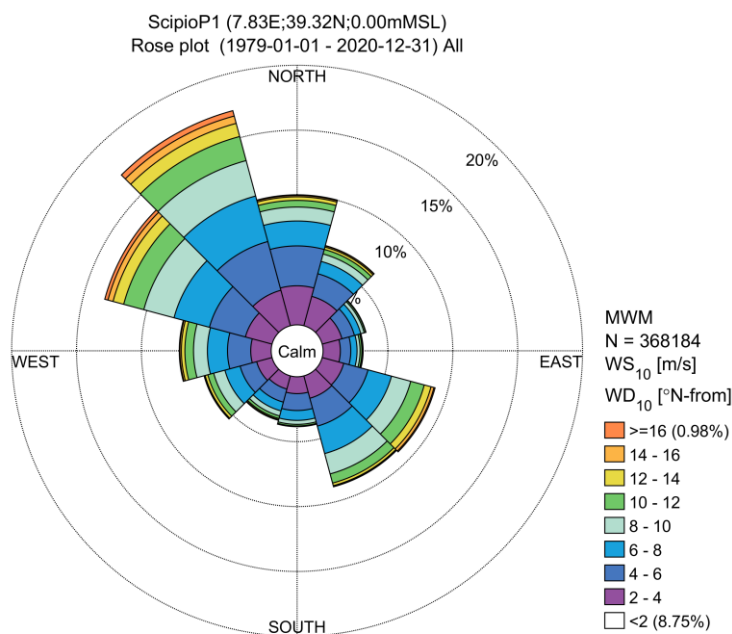


Figura 4.3 Rose dei venti annuali medi per le velocità del vento WS<sub>10,2hr</sub> nel Punto P1

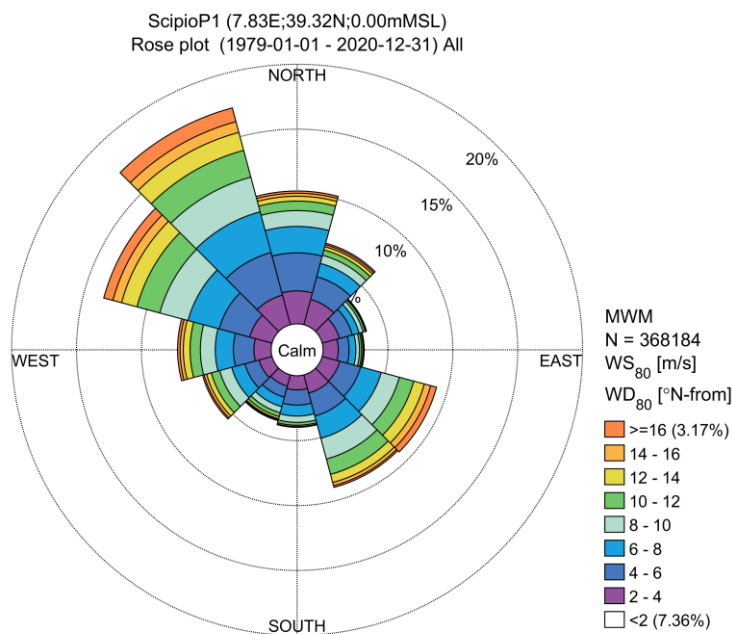


Figura 4.4 Rose dei venti annuali medi per le velocità del vento WS<sub>80,2hr</sub> nel Punto P1

Tabella 4.2 Tabella di frequenza (%) per le velocità del vento WS<sub>10,2hr</sub> e direzioni nel Punto P1

DIR [°N]	Wind Speed (m/s) WS <sub>10,2h</sub>																Tot.	
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32		32-34
0	0.920	3.009	3.073	1.920	1.073	0.513	0.277	0.103	0.035	0.012	0.004	-	-	-	-	-	-	10.94
30	0.835	2.343	1.805	0.984	0.591	0.363	0.190	0.095	0.022	0.003	0.001	0.001	-	-	-	-	-	7.23
60	0.794	1.577	0.997	0.507	0.270	0.106	0.031	0.006	0.000	0.001	-	-	-	-	-	-	-	4.29
90	0.765	1.333	0.804	0.482	0.231	0.144	0.066	0.022	0.004	0.002	-	-	-	-	-	-	-	3.85
120	0.741	1.719	1.940	1.874	1.534	1.080	0.540	0.234	0.076	0.011	-	0.000	-	-	-	-	-	9.75
150	0.700	1.782	2.223	2.192	1.621	0.733	0.207	0.062	0.021	0.005	0.000	-	-	-	-	-	-	9.55
180	0.615	1.299	1.299	0.763	0.304	0.123	0.042	0.011	0.004	0.001	-	-	-	-	-	-	-	4.46
210	0.569	1.048	1.045	0.699	0.401	0.206	0.090	0.034	0.017	0.003	0.000	-	-	-	-	-	-	4.11
240	0.578	1.226	1.321	1.213	0.897	0.467	0.215	0.059	0.022	0.003	0.001	-	-	-	-	-	-	6.00
270	0.631	1.574	1.791	1.548	1.071	0.664	0.270	0.112	0.037	0.009	0.003	0.001	-	-	-	-	-	7.71
300	0.736	2.125	2.871	2.826	2.412	1.606	0.848	0.407	0.169	0.066	0.015	0.003	0.000	0.000	0.000	-	-	14.08
330	0.865	2.829	3.889	3.632	2.824	1.920	1.047	0.586	0.296	0.099	0.026	0.005	0.000	-	-	-	-	18.02
Tot	8.75	21.86	23.06	18.64	13.23	7.93	3.82	1.73	0.70	0.22	0.05	0.01	0.00	-	-	-	-	100.00

Tabella 4.3 Tabella di frequenza (%) per le velocità del vento WS<sub>80,2hr</sub> e direzioni nel Punto P1

DIR [°N]	Wind Speed (m/s) WS <sub>80,2h</sub>																Tot.	
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32		32-34
0	0.769	2.538	2.930	2.040	1.219	0.730	0.375	0.233	0.103	0.038	0.018	0.010	0.002	-	-	-	-	11.01
30	0.687	2.014	1.812	1.067	0.648	0.425	0.262	0.148	0.085	0.032	0.007	0.002	0.000	0.001	-	-	-	7.19
60	0.667	1.375	1.033	0.540	0.317	0.169	0.070	0.024	0.006	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	4.20
90	0.631	1.175	0.830	0.526	0.279	0.165	0.105	0.057	0.023	0.006	0.003	0.002	-	-	-	-	-	3.80
120	0.615	1.403	1.663	1.645	1.445	1.150	0.841	0.508	0.274	0.133	0.049	0.011	0.001	-	0.000	-	-	9.74
150	0.590	1.448	1.830	1.779	1.652	1.222	0.655	0.255	0.079	0.038	0.012	0.005	0.000	0.000	-	-	-	9.57
180	0.528	1.087	1.168	0.848	0.489	0.219	0.100	0.040	0.013	0.003	0.003	0.001	-	-	-	-	-	4.50
210	0.474	0.887	0.894	0.758	0.476	0.308	0.172	0.086	0.040	0.017	0.008	0.002	-	-	-	-	-	4.12
240	0.504	1.030	1.131	1.055	0.958	0.670	0.372	0.205	0.081	0.023	0.012	0.002	0.001	0.000	-	-	-	6.04
270	0.532	1.328	1.582	1.398	1.148	0.792	0.521	0.250	0.112	0.053	0.018	0.006	0.002	0.003	-	-	-	7.75
300	0.632	1.780	2.433	2.491	2.247	1.826	1.231	0.692	0.390	0.181	0.100	0.040	0.011	0.004	0.000	0.001	-	14.06
330	0.728	2.363	3.396	3.252	2.762	2.134	1.437	0.852	0.535	0.311	0.171	0.055	0.022	0.007	0.001	-	-	18.03
Tot	7.36	18.43	20.70	17.40	13.64	9.81	6.14	3.35	1.74	0.84	0.40	0.14	0.04	-	-	-	-	100.00

## 4.2 Livelli del mare

Le normali condizioni del livello della superficie libera nel sito del progetto sono descritte nel seguito. Le analisi si basano sui dati *hindcast* di CMEMS per il periodo 1987-2019, come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 1 ora. Poiché i dati CMEMS non includono le maree, queste sono state aggiunte in base ai dati di marea del *Global Tide Model* di DHI.

I livelli d'acqua sono stati sottoposti ad analisi armonica per separare il segnale in componenti di marea e di non marea (residui). Questo *de-tiding* è stato condotto usando il metodo *U-tide* come descritto in [25], che si basa sul metodo di analisi delle maree *IOS U-tide* [26] definito dall'*Institute of Oceanographic Sciences* [27] ed integrando gli approcci di Foreman [28].

I valori assoluti sono riportati relativamente al livello medio del mare (slm). I livelli equivalenti relativi alla marea astronomica più bassa (LAT) possono essere ottenuti sommando la differenza slm-LAT estratta attraverso l'analisi armonica dei livelli d'acqua modellati, descritti nella Sezione 4.2.2.

I pedici "*tide*" e "*resid.*" rappresentano, rispettivamente, la componente di marea e residua del livello totale dell'acqua.

### 4.2.1 Serie temporali e statistiche annuali

Le serie temporali dei livelli d'acqua nel P1 sono mostrate in Figura 4.5. Le statistiche annuali e mensili dei livelli d'acqua sono presentate in Tabella 4.4. I valori mensili massimi totali e residui mostrano una variazione stagionale relativamente debole.

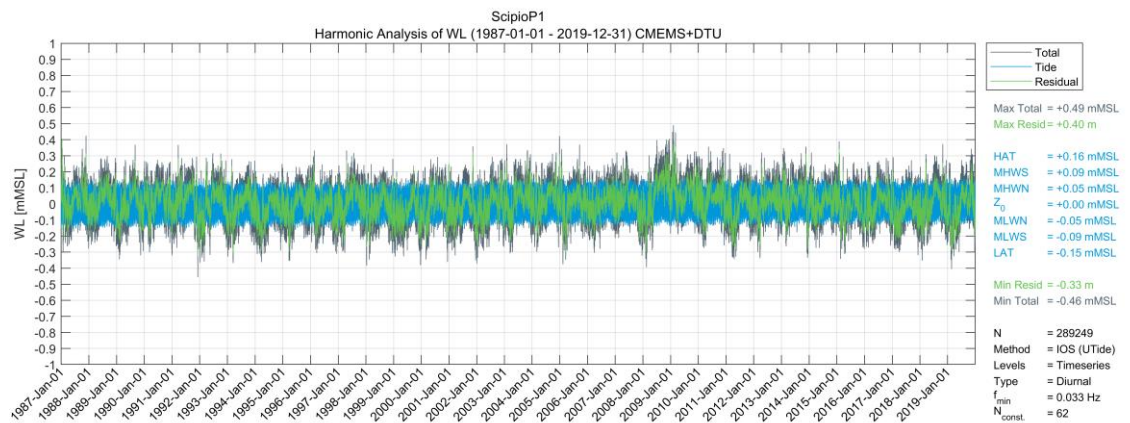


Figura 4.5 Serie temporali dei livelli (totale, mareale e residua) nel Punto P1 del sito del FOWF

Tabella 4.4 Statistiche annuali dei livelli d'acqua (totale, mareale e residua) nel Punto P1

Parameter	WL <sub>total</sub> [mMSL]			WL <sub>tide</sub> [m]			WL <sub>resid</sub> [m]		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
All	0.00	-0.46	0.49	0.00	-0.15	0.16	0.00	-0.33	0.40
Jan	-0.02	-0.38	0.45	0.00	-0.15	0.16	-0.02	-0.27	0.40
Feb	-0.04	-0.41	0.49	0.00	-0.15	0.16	-0.04	-0.30	0.37
Mar	-0.07	-0.37	0.45	0.00	-0.14	0.15	-0.07	-0.30	0.36
Apr	-0.04	-0.35	0.33	0.00	-0.14	0.14	-0.04	-0.26	0.27
May	-0.02	-0.33	0.36	0.00	-0.15	0.15	-0.02	-0.28	0.26
Jun	0.02	-0.30	0.33	0.00	-0.15	0.16	0.02	-0.20	0.24
Jul	0.04	-0.29	0.40	0.00	-0.15	0.16	0.04	-0.18	0.24
Aug	0.06	-0.18	0.33	0.00	-0.15	0.16	0.06	-0.07	0.20
Sep	0.05	-0.19	0.37	0.00	-0.14	0.15	0.05	-0.13	0.27
Oct	0.02	-0.26	0.37	0.00	-0.13	0.14	0.02	-0.18	0.29
Nov	0.02	-0.32	0.43	0.00	-0.14	0.15	0.02	-0.21	0.33
Dec	-0.04	-0.46	0.42	0.00	-0.15	0.16	-0.04	-0.33	0.31

## 4.2.2 Livelli di marea

I valori di marea astronomica del WL presentati in Tabella 4.5 sono stati ricavati dalle serie temporali, lunghe 34 anni, dei livelli d'acqua di marea modellate del DTU10 nel *Punto P1* come segue:

- HAT: WL massimo previsto
- MHWS: media dei due massimi consecutivi nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo massimo (*spring tide*)
- MHNW: media dei due massimi consecutivi nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo minimo (*neap tide*)
- MSL: WL medio previsto
- MLWN: media dei due minimi consecutivi nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo minimo (*neap tide*)
- MLWS: media dei due minimi consecutive nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo massimo (*spring tide*)
- LAT: WL minimo previsto

Tabella 4.5 Livelli di marea astronomica nel sito del FOWF (Point 1) basato sui dati modellati con il DTU10 nel periodo di tempo dal 01-01-1987 al 31-12-2019. I valori sono forniti in metri relativi al livello del mare (m slm) and alla marea astronomica più bassa in conformità con la differenza slm-LAT estratta dai dati

WL (m)	HAT	MHWS	MHNW	Z <sub>0</sub>	MLWN	MLWS	LAT
mMSL	0.16	0.09	0.05	0.00	-0.05	-0.09	-0.15
mLAT	0.31	0.24	0.20	0.15	0.10	0.06	0.00

## 4.3 Correnti

Le normali condizioni della corrente sono state stabilite sulla base dei dati *hindcast* CMEMS per il periodo 1987-2019 come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 1 ora. Poiché i dati CMEMS non includono le maree, le maree sono state aggiunte sulla base delle costituenti delle maree del *Global Tide Model* di DHI.

I dati sulla velocità della corrente sono stati analizzati per i componenti totali, di marea e residui. La separazione dei componenti mareali e residui è stata eseguita utilizzando il metodo descritto in [19]. I pedici “*tide*” e “*resid.*” rappresentano, rispettivamente, le componenti di marea e residue della velocità e della direzione della corrente. Le correnti modellate rappresentano i valori di superficie. L’analisi del profilo verticale della velocità della corrente è presentata nella Sezione 4.3.3. Da questa analisi sono state stabilite le relazioni tra la corrente superficiale e la velocità della corrente vicino al fondale.

### 4.3.1 Serie temporali e statistiche annuali

Le serie temporali di corrente (totale, mareale e residua) sono mostrati in Figura 4.6. le statistiche mensili per le velocità della corrente superficiale media e massima sono riassunte nella Tabella 4.6 e in Figura 4.7.

Come ci si aspettava per quest’area [21], le correnti di marea modellate sono praticamente trascurabili ( $CS_{Tide} < 5 \cdot 10^{-3}$  m/s), sicché il *de-tide* delle correnti è ridondante. Per tale motivo nelle sezioni seguenti viene analizzata solo la corrente totale.

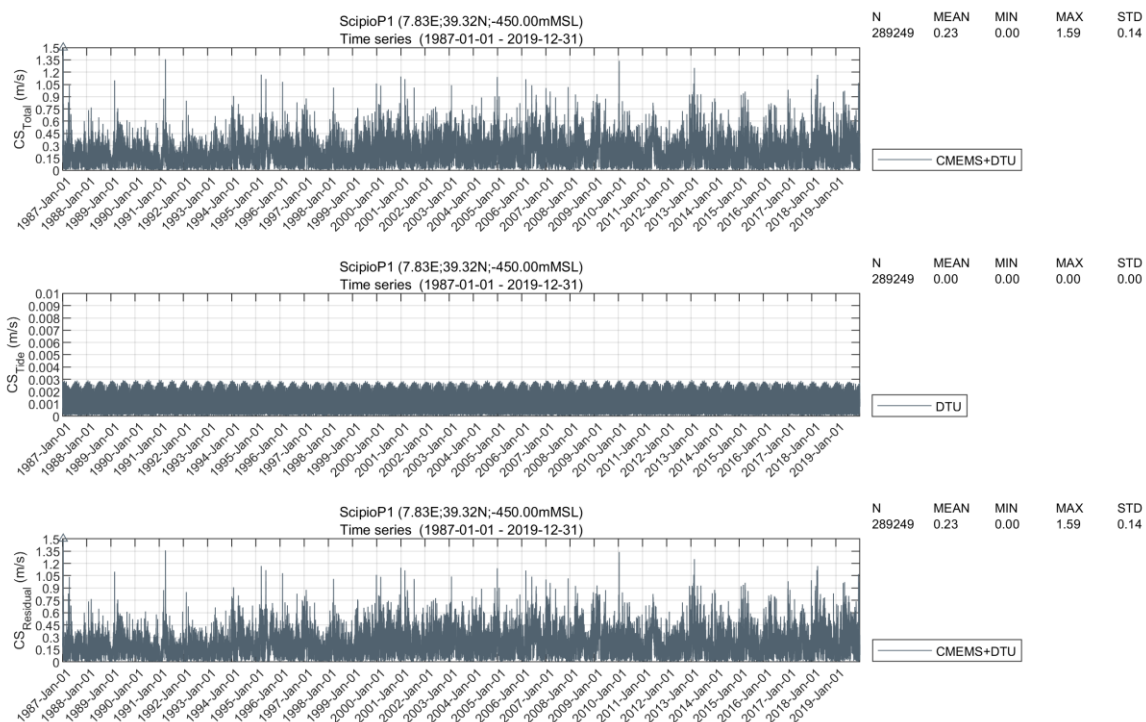


Figura 4.6 Serie temporale e statistiche annuali delle correnti superficiali (totale, mareale e residua)

Tabella 4.6 Statistiche mensili delle correnti superficiali (totale, mareale, e residua)

Parameter	CS <sub>total</sub> [m/s]		CS <sub>tide</sub> [m/s]		CS <sub>resid</sub> [m/s]	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
<b>All</b>	0.23	1.59	<0.01	<0.01	0.23	1.59
<b>Jan</b>	0.21	1.59	<0.01	<0.01	0.21	1.59
<b>Feb</b>	0.21	1.25	<0.01	<0.01	0.21	1.25
<b>Mar</b>	0.25	1.17	<0.01	<0.01	0.25	1.17
<b>Apr</b>	0.25	1.36	<0.01	<0.01	0.25	1.36
<b>May</b>	0.24	0.97	<0.01	<0.01	0.24	0.97
<b>Jun</b>	0.25	1.12	<0.01	<0.01	0.25	1.12
<b>Jul</b>	0.25	1.01	<0.01	<0.01	0.25	1.01
<b>Aug</b>	0.24	0.92	<0.01	<0.01	0.24	0.92
<b>Sep</b>	0.21	0.83	<0.01	<0.01	0.21	0.83
<b>Oct</b>	0.19	0.77	<0.01	<0.01	0.19	0.77
<b>Nov</b>	0.19	0.90	<0.01	<0.01	0.19	0.90
<b>Dec</b>	0.20	1.15	<0.01	<0.01	0.20	1.15

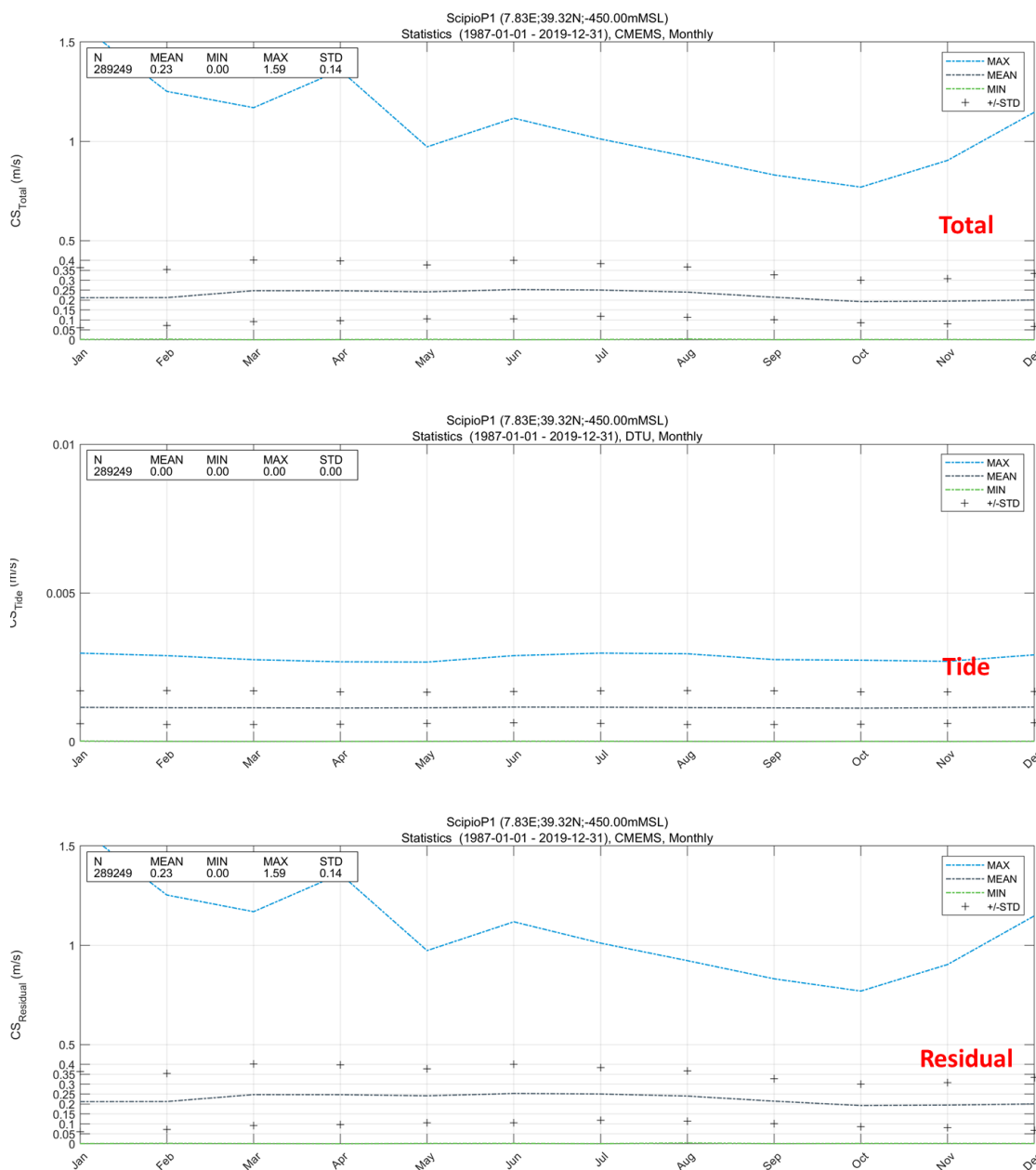


Figura 4.7 Statistiche mensili delle velocità della corrente superficiale nel Point 1. Dall'alto verso il basso: correnti totali, mareali e residue. Le correnti di marea del modello sono trascurabili ( $CS_{Tide} < 5 \cdot 10^{-3}$  m/s). Nella sezione successiva sarà analizzata solo la corrente totale.

### 4.3.2 Rose di corrente e tabelle di frequenza intensità-direzione

La rosa media annua della corrente superficiale (totale) è presentata in Figura 4.8, mentre le corrispondenti frequenze di occorrenza sono riportate in Tabella 4.7.

Le correnti superficiali totali fluiscono prevalentemente verso i settori Sud e Sud-Ovest durante tutto l'anno, a conferma che la dinamica al punto P1 analizzato è in gran parte determinata dai fenomeni di mesoscala descritti alla Sezione 3.2, legati al transito dei vortici algerini (AEs) nel Mar di Sardegna che dovrebbero influenzare la circolazione fino agli strati intermedi della colonna d'acqua. La velocità corrente totale è  $< 0,40$  m/s per circa il 90% del tempo, ma ha valori massimi fino a 1,6 m/s nel periodo analizzato, associati ai flussi verso SSO.

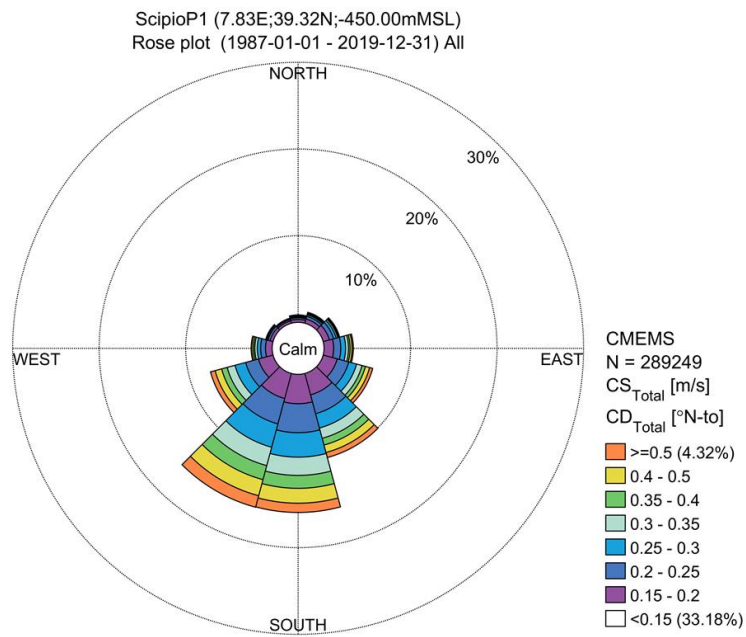


Figura 4.8 Rosa delle correnti superficiali (direzione: verso) nel Punto P1



Tabella 4.7 Tabella di frequenza della velocità e direzione della corrente superficiale

<b>CS<sub>Total</sub> [m/s]</b>		<b>0-0.05</b>	<b>0.05-0.1</b>	<b>0.1-0.15</b>	<b>0.15-0.2</b>	<b>0.2-0.25</b>	<b>0.25-0.30</b>	<b>0.3-0.35</b>	<b>0.35-0.4</b>	<b>0.4-0.45</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>Total</b>
<b>Direction from [°N]</b>	<b>0</b>	0.302	0.543	0.438	0.281	0.158	0.085	0.041	0.020	0.012	0.001	-	-	1.882
	<b>30</b>	0.352	0.615	0.548	0.358	0.242	0.138	0.078	0.041	0.022	0.002	-	-	2.397
	<b>60</b>	0.351	0.769	0.891	0.771	0.560	0.394	0.278	0.173	0.179	0.077	0.000	-	4.443
	<b>90</b>	0.410	1.113	1.603	1.741	1.541	1.273	0.934	0.665	0.777	0.553	0.004	-	10.613
	<b>120</b>	0.484	1.547	2.429	2.994	3.031	2.787	2.196	1.679	1.921	1.364	0.010	-	20.442
	<b>150</b>	0.510	1.662	2.783	3.389	3.346	2.822	2.103	1.492	1.716	1.059	0.010	0.001	20.894
	<b>180</b>	0.492	1.621	2.416	2.550	2.257	1.709	1.227	0.808	0.891	0.599	0.006	-	14.575
	<b>210</b>	0.460	1.324	1.747	1.681	1.380	0.933	0.655	0.409	0.500	0.366	0.006	-	9.460
	<b>240</b>	0.400	1.094	1.233	1.109	0.821	0.558	0.326	0.189	0.228	0.148	0.001	-	6.107
	<b>270</b>	0.375	0.809	0.908	0.740	0.498	0.314	0.179	0.102	0.106	0.035	-	-	4.066
	<b>300</b>	0.329	0.638	0.658	0.506	0.317	0.181	0.105	0.069	0.076	0.050	-	-	2.929
	<b>330</b>	0.309	0.551	0.470	0.330	0.185	0.121	0.069	0.067	0.061	0.028	-	-	2.192
	<b>TOT.</b>	4.77	12.29	16.12	16.45	14.34	11.32	8.19	5.71	6.49	4.28	0.04	0.00	100.00

### 4.3.3 Profilo verticale della velocità di corrente

Allo scopo di indicare una relazione adeguata a determinare le caratteristiche della corrente a diverse profondità (per esempio vicino alla superficie e vicino al fondo), è stato studiato il profilo verticale della velocità della corrente nel sito del progetto.

I profili caratteristici di velocità della corrente sono stati stabiliti sulla base dei dati CMEMS disponibili, descritti nel Capitolo 2. Più precisamente, è stato utilizzato il set di dati della media giornaliera ricavando valori su 41 livelli lungo la colonna d'acqua.

Inoltre, è stata investigata nel sito Ichnusa l'idoneità di un profilo di potenza teorico. A fini progettuali, un profilo di potenza generale può essere considerato adeguato alle acque costiere e ben rappresentativo delle condizioni più energetiche, compresi i valori estremi:

$$\frac{V_{z1}}{V_{z2}} = \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^{1/n} \quad \text{and} \quad V_{z1} = V_m \frac{n+1}{n} \left( \frac{z_1}{D} \right)^{1/n} \quad (4.1)$$

dove  $V_{z1}$  è la velocità della corrente al livello  $z_1$ ,  $V_{z2}$  è la velocità della corrente al livello  $z_2$ ,  $n$  è un coefficiente derivato dai dati sperimentali,  $V_m$  è la velocità mediate sulla profondità e  $D$  è la profondità. L'origine dell'asse  $z$  è posto sul fondale marino. Questo coefficiente, per acque basse o intermedie (cioè < 100-200 m) assume in generale valori compresi tra 4 e 7.

Una verifica dell'idoneità del profilo di potenza della corrente, basato sui dati CMEMS, è mostrata in Figura 4.9. Tutti i profili giornalieri ricostruiti da modello (linee grigie) sono mostrati insieme ai percentili di ordine 75, 90 e 99 (linea tratteggiata blu rispettivamente nei pannelli sinistro, centrale e destro), ovvero la velocità della corrente che supera i valori di soglia del 75%, 90% e 99%. Il profilo di potenza fornisce una scarsa descrizione, lungo tutta la colonna e per tutti i casi, del profilo di corrente osservato; sottostima le velocità di corrente nei primi strati dalla superficie fino a 100 m di profondità, e le sovrastima dai 100 m fino al fondo. I profili da modello generalmente mostrano correnti intense nei primi strati dalla superficie, che decrescono rapidamente fino ai 150 m; scendendo ulteriormente di quota, la corrente diventa quasi uniforme. E qui, a profondità intermedia fino agli strati più profondi, i profili dei tre percentili (Figura 4.9) sono molto simili. Tale comportamento è in linea con quanto riportato alla Sezione 3.2.4 sui *pattern* di circolazione osservati nel bacino.

Tabella 4.8 fornisce i parametri di adattamento per la valutazione della velocità della corrente a diverse profondità lungo tutta la colonna d'acqua, ottenuti dai dati giornalieri (prima colonna) e dai profili della legge di potenza teorica (seconda colonna). Si suggerisce di fare riferimento ai parametri di adattamento derivati dai profili medi giornalieri, data la bassa idoneità del profilo di potenza in loco come mostrato in Figura 4.9. Tuttavia, data l'attuale mancanza di misurazioni e il livello di incertezza legato all'utilizzo di dati medi giornalieri posteriori, è consigliabile che i progettisti adottino le ipotesi più adatte sui profili verticali in base a ciascuna specifica finalità progettuale.

Tabella 4.8 Coefficienti per il calcolo della velocità della corrente ad una determinata profondità a partire dalla corrente di superficie nel sito del FOWF, ottenuti rispettivamente dai dati del CMEMS (90° percentile), e dal profilo teorico della legge di potenza. Si suggerisce di fare riferimento al profilo fittato sui dati CMEMS.

Depth	Fit parameter at SFOWF point P1	
	CMEMS 90 <sup>th</sup> perc.	Power Law n=5
Surface	1.0	1.0
95%	0.8	0.9
90%	0.6	0.9
85%	0.5	0.8
80%	0.4	0.8
75%	0.3	0.8
70%	0.3	0.7
65%	0.2	0.7
60%	0.2	0.7
55%	0.2	0.7
50%	0.1	0.6
45%	0.1	0.6
40%	0.1	0.6
30%	0.1	0.5
20%	0.1	0.5
10%	0.1	0.4
5%	0.1	0.4
1m a.s.b.	0.1	0.3

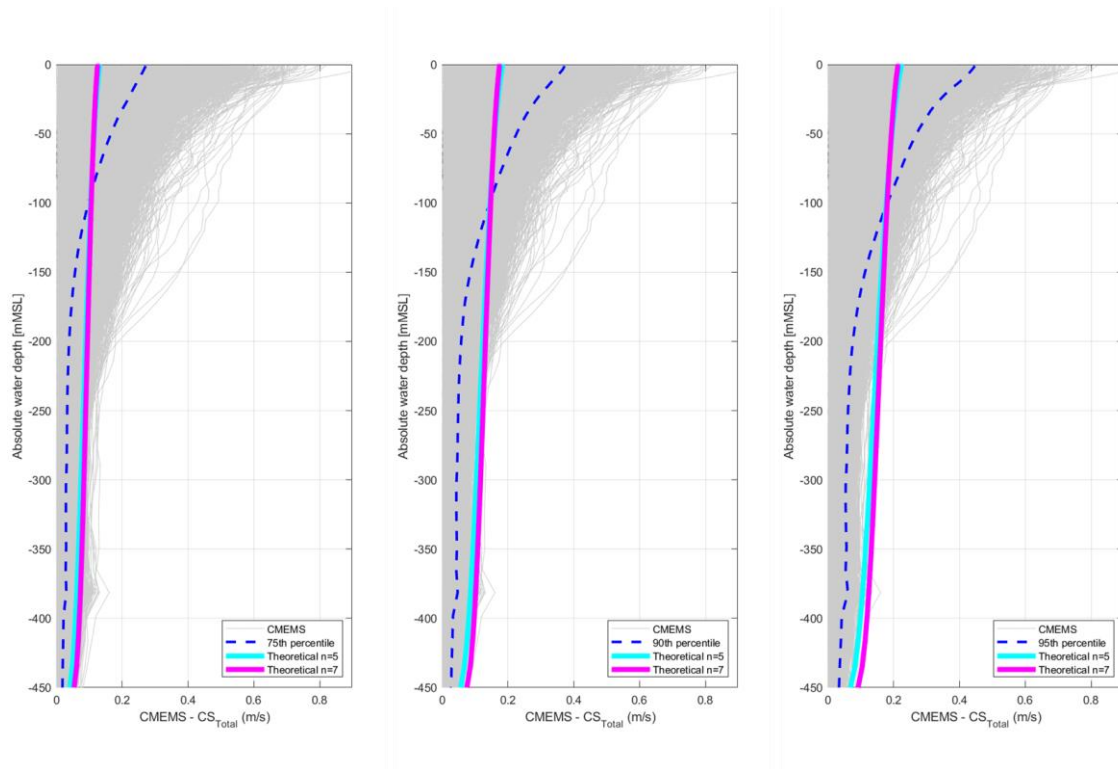


Figura 4.9 Confronto tra profili verticali di corrente da rianalisi CMEMS e 75° (a sinistra) 90° (centrale) e 99° (destra) percentile e profili teorici di legge di potenza 1/5 e 1/7

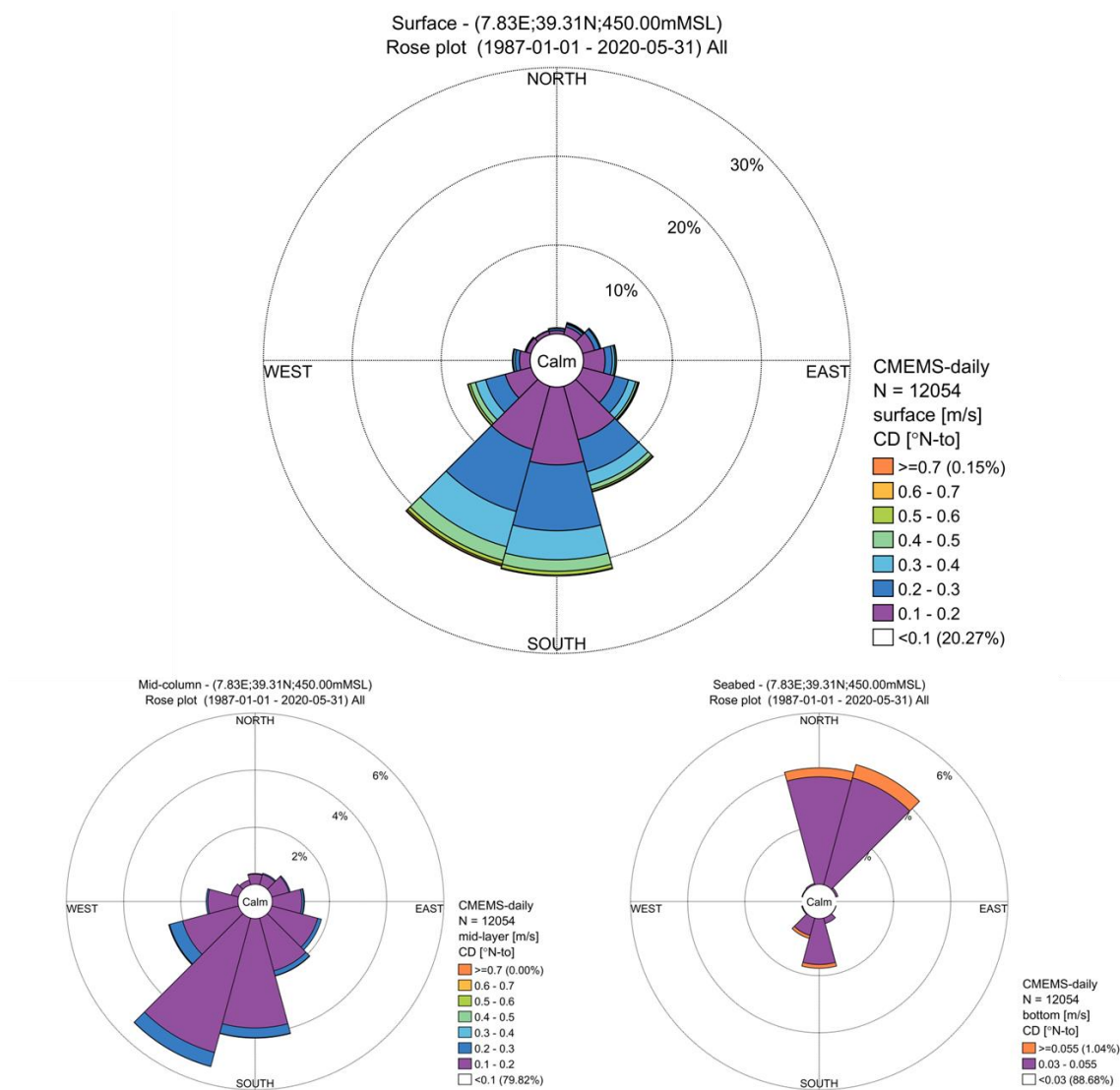


Figura 4.10: Rose di corrente in superficie (in alto), a metà colonna (in basso a sinistra) e sul fondo (in basso a destra) nel punto P1, secondo i dati medi giornalieri da rianalisi CMEMS descritti nel Capitolo 2

## 4.4 Onde

Le normali condizioni d'onda sono state fissate sulla base dei dati descritti nel Capitolo 2. La risoluzione temporale dei dati del MWM è di 1 ora e le altezze d'onda modellate sono considerate rappresentative di una finestra media di stati del mare di 3 ore (vedere Sezione 2.1.4).

### 4.4.1 Serie temporali e statistiche annuali

I grafici delle serie temporali di  $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{01}$  e  $T_{02}$  sono mostrate in Figura 4.11, mentre la Tabella 4.9 riassume le statistiche annuali per  $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{01}$  e  $T_{02}$ . Le statistiche mostrano che c'è una variabilità stagionale nelle statistiche d'onda, con le altezze d'onda significative più alte che si verificano nei mesi invernali (Dicembre-Febbraio).

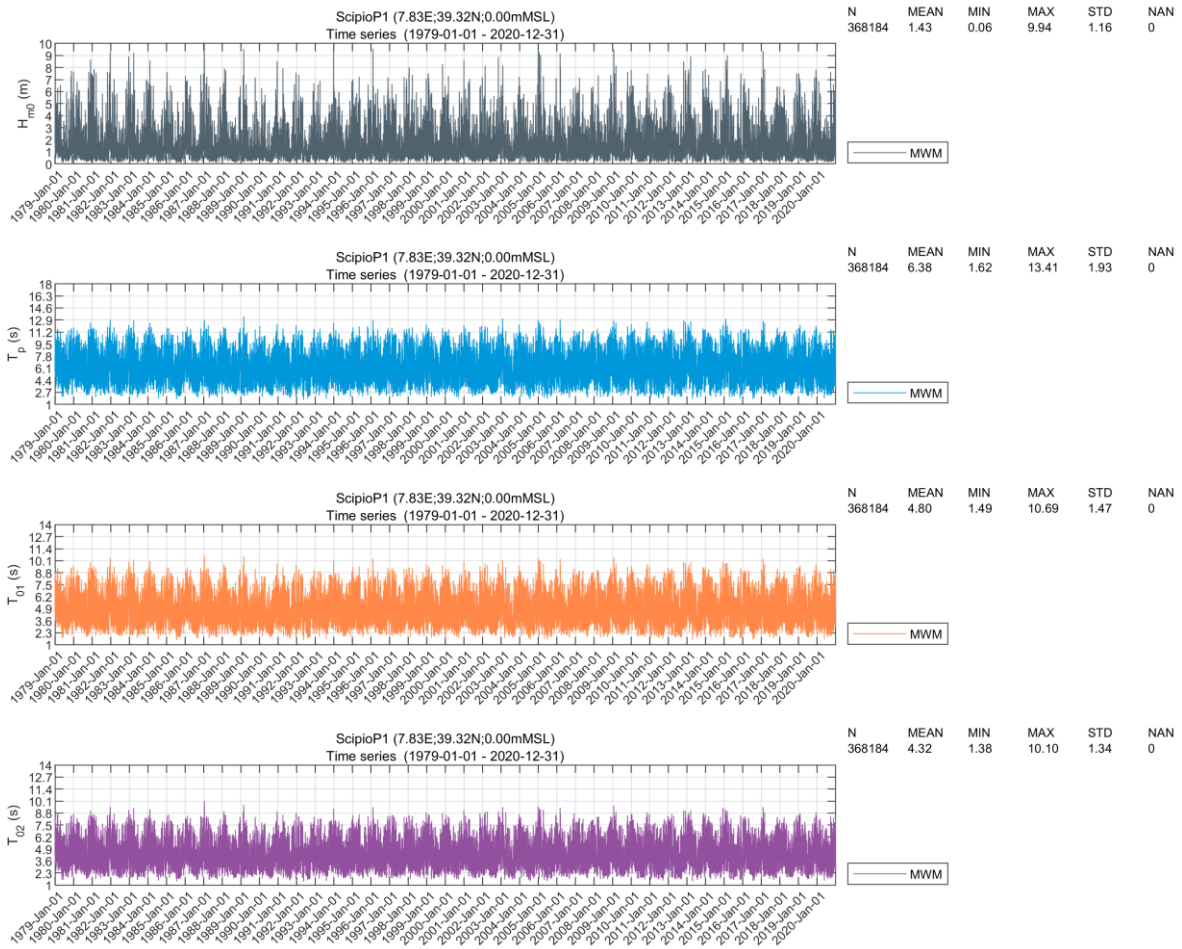


Figura 4.11 Serie temporale e statistiche annuali per  $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{01}$  e  $T_{02}$

Tabella 4.9 Statistiche annuali e mensili di  $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{01}$  e  $T_{02}$

Parameter	$H_{m0}$ [m]		$T_p$ [s]		$T_{01}$ [s]		$T_{02}$ [s]	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
All	1.4	9.9	6.4	13.4	4.8	10.7	4.3	10.1
Jan	1.9	9.9	7.1	13.1	5.4	10.7	4.9	10.1
Feb	1.9	9.6	7.0	13.4	5.3	10.6	4.8	9.7
Mar	1.7	9.2	6.9	13.0	5.2	10.3	4.7	9.4
Apr	1.5	7.9	6.7	11.9	5.0	9.8	4.5	9.2
May	1.2	7.2	6.1	12.0	4.6	9.5	4.1	8.6
Jun	1.0	5.9	5.7	10.9	4.3	8.6	3.8	7.8
Jul	1.0	5.8	5.6	10.9	4.2	8.5	3.7	7.7
Aug	0.9	6.0	5.5	10.9	4.1	8.5	3.7	7.7
Sep	1.1	7.6	5.8	11.5	4.4	9.2	3.9	8.4
Oct	1.4	8.5	6.3	12.8	4.7	10.0	4.2	9.1
Nov	1.8	8.9	6.9	12.6	5.3	9.9	4.8	9.1
Dec	2.0	9.5	7.2	13.0	5.4	10.4	4.9	9.5



#### 4.4.2 Rose delle onde

La rosa d'onda (la distribuzione dell'altezza d'onda significativa  $H_{m0}$  e la direzione media dell'onda MWD) è riportata in Figura 4.12 and in

Tabella 4.10 per lo stato totale del mare nel *Punto P1*.

La distribuzione  $H_{m0}$ -MWD mostra che circa il 59% delle onde provengono da O-NO (270-330°N) e circa il 19% da SE (120-180°N). Gli eventi d'onda provenienti dal settore nord-orientale rappresentano circa il 11% del clima ondoso medio annuo, di cui più dell'8% proviene da N (direzione centrata su 0°N). Le altezze d'onda sono inferiori a 3.0 m per circa il 90% del tempo e le condizioni di calma (qui rappresentate come  $H_{m0} < 0.5$  m) rappresentano il 18% del tempo. I valori massimi di  $H_{m0}$  sono associati ai settori ONO: l'altezza massima dell'onda nel periodo è 9.94 m da 290°N, relativa a una forte tempesta avvenuta nel Gennaio del 1987.

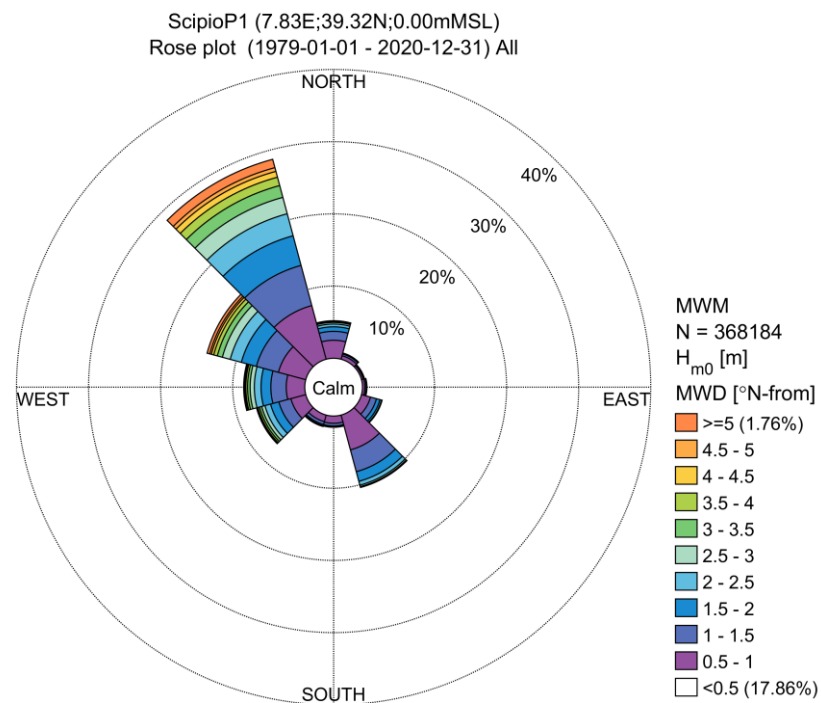


Figura 4.12 Rosa delle onde per il Punto P1 per il periodo 1979-2020

#### 4.4.3 Scatter plot degli avvenimenti congiunti

Sono stati prodotti *scatter plot* che descrivono la relazione tra i diversi parametri meteomarinari. Questi includono:

- Altezza d'onda significativa e periodo di picco dell'onda ( $H_{m0}$  vs.  $T_p$ );
- Altezza d'onda significativa e velocità del vento ( $H_{m0}$  vs. WS)

Gli *scatter plot* annuali omnidirezionali per lo stato totale del mare sono riassunti nel seguito.

#### 4.4.3.1 $H_{m0}$ e $T_p$

Lo scatter plot omnidirezionale  $H_{m0}$  -  $T_p$  è mostrato in Figura 4.13. Le tabelle che danno la frequenza di occorrenza [%] delle combinazioni di  $H_{m0}$ ,  $T_p$ , e MWD sono riportate in un file digitale (Microsoft Excel, formato .xlsx) insieme a questo report, per i seguenti intervalli:

- Intervalli  $H_{m0}$  di 0.5 m (per esempio,  $0 \text{ m} \leq H_{m0} < 0.5 \text{ m}$ )
- Intervalli  $T_p$  di 1 secondo (per esempio,  $0 \text{ s} \leq T_p < 1.0 \text{ s}$ )
- Per onde omnidirezionali, e per onde condizionate sulla direzione media dell'onda, MWD (settori direzionali  $12 \times 30^\circ$ , centrati su  $0^\circ\text{N}$ ,  $30^\circ\text{N}$ ,  $60^\circ\text{N}$ , etc.).

Le tabelle omnidirezionali di  $H_{m0}$  vs.  $T_p$  sono riportate nella Tabella 4.11.

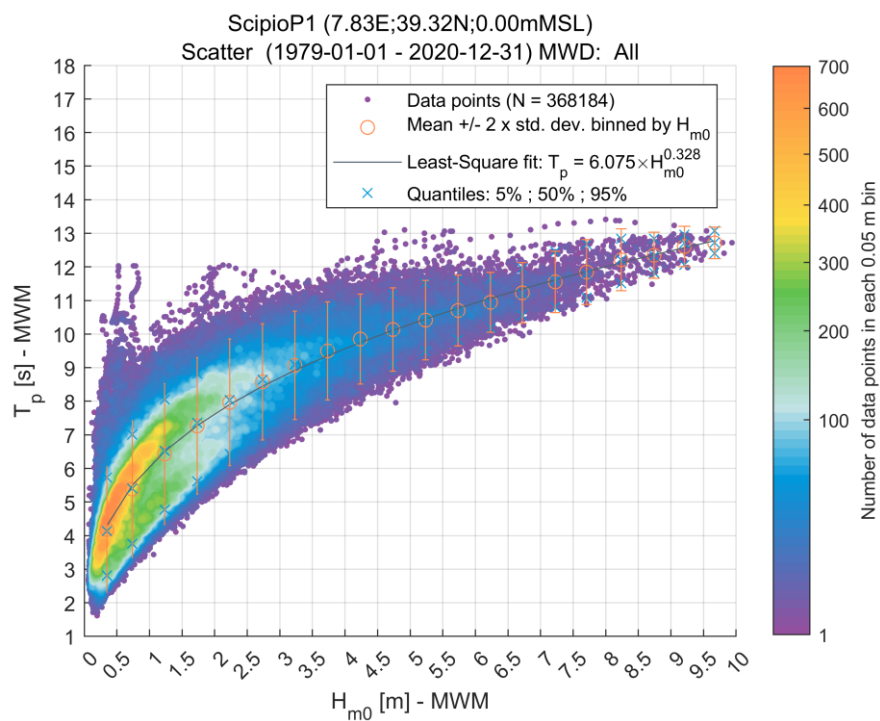


Figura 4.13: Scatter plot omnidirezionale di  $H_{m0}$  e  $T_p$  nel Punto P1

Tabella 4.10 Tabella di frequenza [%] annuale di Hm0 rispetto alla direzione media dell'onda nel Punto P1 per il periodo 1979 - 2020

H <sub>m0</sub> [m]	<0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5	5.5 - 6.0	6.0 - 6.5	6.5 - 7.0	7.0 - 7.5	7.5 - 8.0	8.0 - 8.5	8.5 - 9.0	9.0 - 9.5	9.5-10.0	Total
0	2.953	2.498	1.230	0.631	0.373	0.228	0.107	0.073	0.039	0.013	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	-	-	-	-	-	8.15
30	0.601	0.504	0.248	0.120	0.025	0.002	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.50
60	0.337	0.242	0.113	0.066	0.015	0.003	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.78
90	0.357	0.327	0.188	0.074	0.026	0.008	0.001	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.98
120	0.903	1.296	0.855	0.501	0.217	0.071	0.018	0.007	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.87
150	2.667	4.995	3.128	1.384	0.545	0.211	0.092	0.023	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.06
180	0.843	1.001	0.371	0.123	0.056	0.007	0.001	0.000	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.40
210	0.633	0.936	0.419	0.170	0.070	0.026	0.010	0.004	0.003	0.001	0.002	0.001	0.001	-	-	-	-	-	-	-	2.28
240	0.763	2.142	1.726	1.194	0.803	0.468	0.320	0.221	0.097	0.056	0.027	0.017	0.008	0.001	0.000	0.000	-	-	-	-	7.84
270	0.989	2.580	2.132	1.362	0.926	0.585	0.354	0.239	0.120	0.072	0.048	0.036	0.009	0.005	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	9.47
300	2.120	3.933	3.162	2.161	1.601	1.126	0.727	0.522	0.331	0.231	0.148	0.088	0.053	0.035	0.028	0.011	0.010	0.008	0.005	0.001	16.30
330	4.696	7.698	5.759	4.254	3.157	2.346	1.693	1.197	0.835	0.540	0.421	0.297	0.205	0.130	0.076	0.033	0.015	0.010	0.007	0.001	33.37
TOT.	17.86	28.15	19.33	12.04	7.81	5.08	3.33	2.29	1.44	0.91	0.65	0.44	0.28	0.17	0.11	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	100

Tabella 4.11: Tabella di frequenza [%] annuale omnidirezionale di Hm0 rispetto alla periodo di picco dell'onda Tp nel Punto P1

Tp [s]	Hmo [m]																			Total	
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	7-7.5	7.5-8	8-8.5	8.5-9	9-9.5		9.5-10
17-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	-	0.001	-	-	0.001	0.001	0.001	-	-	-	0.01
12-13	-	0.001	-	-	0.001	-	-	0.001	0.003	0.003	0.005	0.006	0.004	0.008	0.013	0.015	0.018	0.016	0.013	0.002	0.11
11-12	-	0.005	-	0.007	0.004	0.008	0.021	0.044	0.051	0.067	0.086	0.102	0.111	0.105	0.083	0.03	0.008	0.004	-	-	0.74
10-11	0.007	0.01	0.006	0.029	0.073	0.215	0.39	0.49	0.522	0.458	0.401	0.295	0.157	0.059	0.014	0.002	-	-	-	-	3.13
9-10	0.016	0.037	0.142	0.357	0.954	1.426	1.395	1.174	0.705	0.352	0.154	0.038	0.005	-	-	-	-	-	-	-	6.76
8-9	0.049	0.207	0.938	2.666	2.973	2.05	1.179	0.533	0.153	0.033	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.78
7-8	0.118	1.186	5.269	4.242	2.348	1.221	0.334	0.044	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.76
6-7	0.426	6.34	5.943	3.14	1.402	0.161	0.007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.42
5-6	2.344	10.139	5.163	1.576	0.061	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.28
4-5	6.957	7.66	1.858	0.023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.50
3-4	6.342	2.535	0.012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.89
2-3	1.594	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.62
1-2	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
Total	17.86	28.15	19.33	12.04	7.82	5.08	3.33	2.29	1.44	0.91	0.65	0.44	0.28	0.17	0.11	0.05	0.03	0.02	0.01	-	100

#### 4.4.3.2 $H_{m0}$ e $WS$

Lo *scatter plot* e la tabella di frequenza di occorrenza (%) di  $H_{m0}$  vs.  $WS$  nel *Punto P1* del FOWF per le condizioni dello stato totale del mare sono mostrate in Figura 4.14 and Tabella 4.12, rispettivamente.

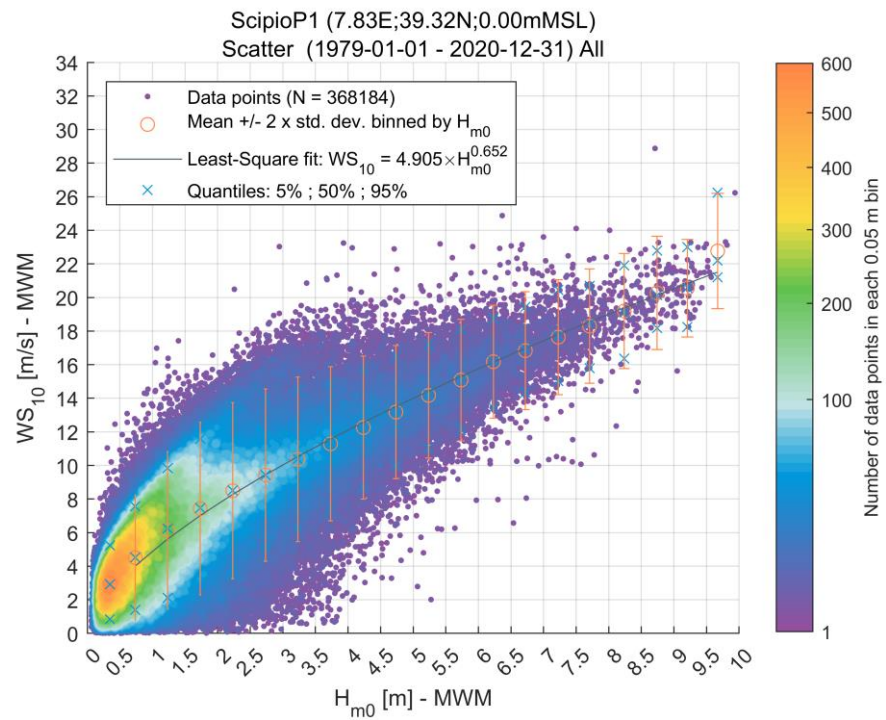


Figura 4.14: Diagramma *scatter* di  $H_{m0}$  vs.  $WS_{10,2hr}$  nel Punto P1 per lo stato totale del mare

Tabella 4.12: Tabella di frequenza [%] annuale omnidirezionale di H<sub>m0</sub> rispetto alla velocità del vento WS<sub>10,2hr</sub> nel Punto P1

WS <sub>10</sub> [m/s]	H <sub>m0</sub> [m]																				
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	7-7.5	7.5-8	8-8.5	8.5-9	9-9.5	9.5-10	Total
32-34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30-32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24-26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22-24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.01
20-22	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.007	0.005	0.006	0.009	0.007	0.001	0.05
18-20	-	-	-	-	-	0.002	0.007	0.008	0.011	0.008	0.012	0.02	0.031	0.03	0.035	0.023	0.015	0.008	0.004	-	0.21
16-18	-	-	0.001	-	0.005	0.039	0.058	0.043	0.042	0.057	0.076	0.103	0.118	0.089	0.053	0.016	0.003	0.001	-	-	0.70
14-16	-	0.001	0.005	0.02	0.134	0.198	0.152	0.17	0.199	0.216	0.269	0.207	0.102	0.042	0.012	-	-	-	-	-	1.73
12-14	-	0.004	0.041	0.355	0.599	0.448	0.486	0.598	0.549	0.408	0.223	0.089	0.019	-	-	-	-	-	-	-	3.82
10-12	0.001	0.038	0.743	1.658	1.309	1.292	1.234	0.93	0.465	0.177	0.054	0.019	0.003	0.001	-	0.001	-	-	-	-	7.93
8-10	0.009	0.73	3.664	2.976	2.571	1.81	0.921	0.377	0.123	0.037	0.01	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	-	13.23
6-8	0.234	5.559	5.901	3.612	1.983	0.867	0.328	0.109	0.038	0.007	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	18.64
4-6	3.824	10.543	5.216	2.246	0.798	0.292	0.1	0.032	0.006	0.002	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.06
2-4	9.158	8.411	2.904	0.921	0.327	0.098	0.03	0.014	0.002	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.87
0-2	4.636	2.865	0.855	0.252	0.09	0.033	0.012	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.75
<b>Total</b>	17.86	28.15	19.33	12.04	7.82	5.08	3.33	2.29	1.44	0.91	0.65	0.44	0.28	0.17	0.11	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	100
<b>Accum</b>	19.636	51.642	72.091	84.213	91.105	94.997	97.253	98.515	99.199	99.581	99.789	99.91	99.962	99.985	99.997	99.998	99.999	99.999	100	-	-



## 5 Condizioni meteomarine estreme

Sono state condotte una serie di analisi per valutare le condizioni meteomarine estreme nel *Punto P1* all'interno del sito del progetto FOWF. Le condizioni estreme sono state basate sui dati presentati nel Capitolo 2 e sono eseguite solamente per lo stato totale del mare.

Tutti i valori estremi sono forniti per i periodi di ritorno ( $T_R$ ) di 1, 10, 50, 100 e 500 anni. Gli estremi dei sottoinsiemi direzionali si basano su settori direzionali  $12 \times 30^\circ$  (centrati in  $0^\circ N$ ,  $30^\circ N$ ,  $60^\circ N$ , etc.). Gli estremi dei sottoinsiemi direzionali sono presentati, in questo documento, in due modi differenti (come concordato con il Cliente):

1. **Come valori estremi direzionali marginali:** individuando le distribuzioni teoriche che meglio si adattano ai campioni di dati che soddisfano il requisito specifico (cioè, per ogni intervallo direzionale di  $30^\circ$ ). Vengono estratti gli eventi estremi per ciascuna direzione, e si individua la distribuzione che meglio si adatta al campione di eventi estratti separatamente per ciascuna direzione. Infine, i valori estremi vengono derivati dalle distribuzioni per ciascun periodo di ritorno selezionato.
2. **Come valori direzionali scalati:** per i requisiti di progettazione, è stato determinato un insieme caratteristico di valori direzionali con probabilità annua di superamento  $p_0$ , secondo le raccomandazioni presenti nella Sezione 3.6.5.6 di DNV [1]. Questo comporta il calcolo del valore del periodo di ritorno per ciascun sottoinsieme direzionale corrispondente a una probabilità di superamento di  $p_0/(0.5N_{DS})$ , dove  $N_{DS}$  è il numero dei settori direzionali.

Ad esempio, con 12 settori direzionali e una probabilità annua di superamento di  $10^{-2}$  (ovvero  $T_R = 100$  anni), i valori estremi per ciascun settore direzionale corrispondono a un periodo di ritorno di 600 anni. Allo stesso modo, i valori estremi, per ogni settore, di 1, 10, 50 e 500 anni corrispondono a valori del periodo di ritorno, rispettivamente, di 6, 60, 300 e 3000 anni. Infine, il valore del periodo di ritorno caratteristico per ciascuna direzione viene selezionato come il valore minimo tra l'estremo direzionale così calcolato e il valore omnidirezionale corrispondente.

### 5.1 Velocità del vento

Le velocità del vento estreme nel sito del progetto sono state stabilite sulla base dei dati del modello WRF a 10 m slm e 80 m slm descritti nel Capitolo 2. Si è ipotizzato che la risoluzione temporale del vento modellato rappresenti il vento medio su una durata di 2 ore.

La distribuzione applicata per stimare le velocità del vento estreme è stata scelta sulla base di un'analisi di sensibilità che confronta le stime omnidirezionali estreme, associate a un periodo di ritorno di 100 anni, della velocità del vento a 10 m slm ( $WS_{10}$ ). Ciò ha comportato il confronto tra i valori stimati e il corrispondente adattamento ai dati ottenuti per varie distribuzioni, numero di eventi e metodi di adattamento. I risultati di questo test di sensibilità sono presentati in termini di valori associati a un periodo di ritorno di 100 anni in Figura 5.1.

Questa figura mostra che la distribuzione di Gumbel con adattamento ai minimi quadrati (LS alla velocità del vento al quadrato) fornisce una stima centrale delle velocità del vento estreme, per un periodo di ritorno di 100 anni, nel *Punto P1*, rispetto ad altre distribuzioni e metodi di adattamento. Figura 5.1 mostra che la distribuzione estrema nel *Punto P1*, basata su Gumbel, valori di picco annuali *LS fit and squared*, fornisce un buon adattamento ai dati; quindi, si consiglia di applicare questo metodo per derivare le velocità del vento estreme (a tutte le altezze) nel sito del progetto FOWF. Figura 5.2 e Figura 5.3 mostrano le distribuzioni omnidirezionali ottenute rispettivamente per le velocità del vento a 10 m slm e 80 m slm.

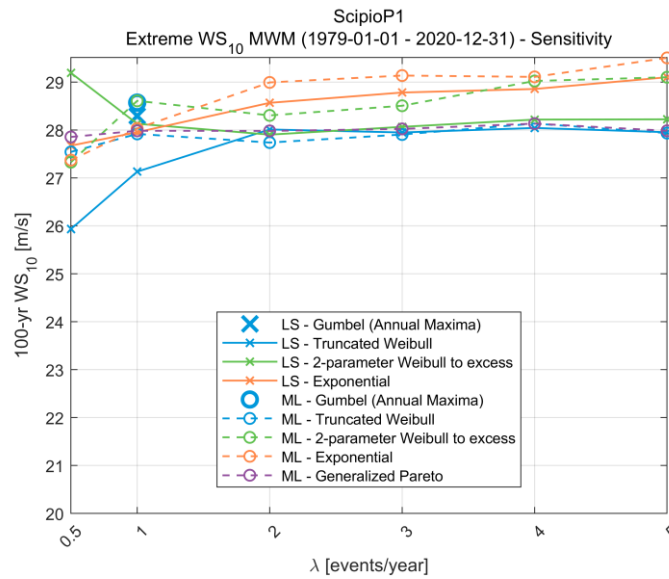


Figura 5.1 Stime omnidirezionali della velocità del vento ( $WS_{10,2h}$ ) per un periodo di ritorno (TR) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stata valutata usando i metodi dei minimi quadrati (LS) o della massima verosimiglianza (ML)

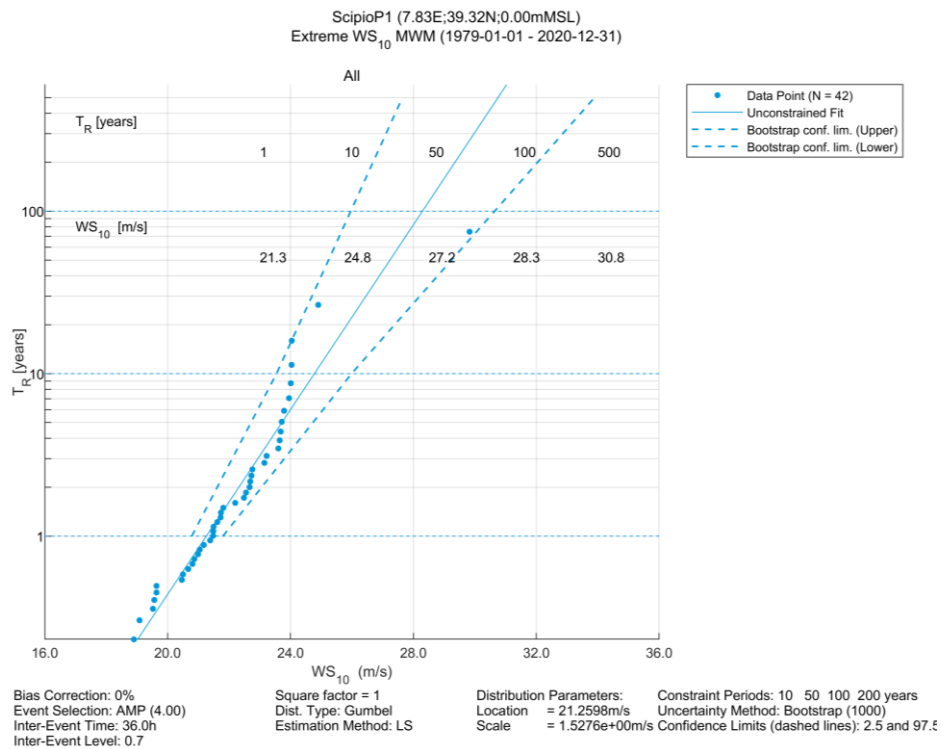


Figura 5.2: Distribuzione omnidirezionale estrema di  $WS_{10,2hr}$  secondo una distribuzione di Gumbel adattata con l'annual maxima peaks (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con linee blu tratteggiate

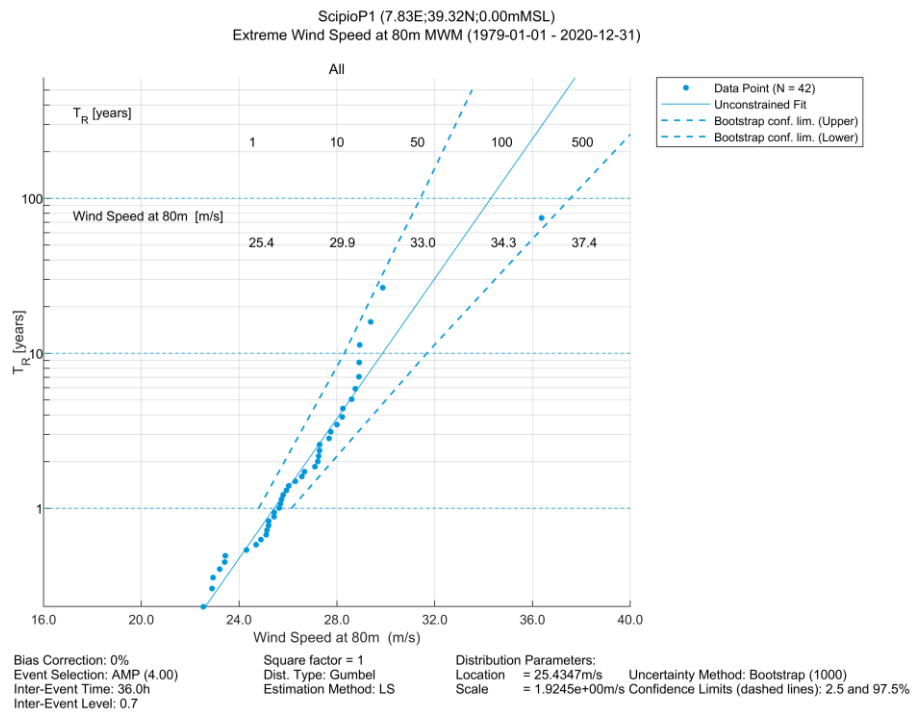


Figura 5.3: Distribuzione omnidirezionale estrema di  $WS_{80,2hr}$  secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai maddimi annuali (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con linee blu tratteggiate

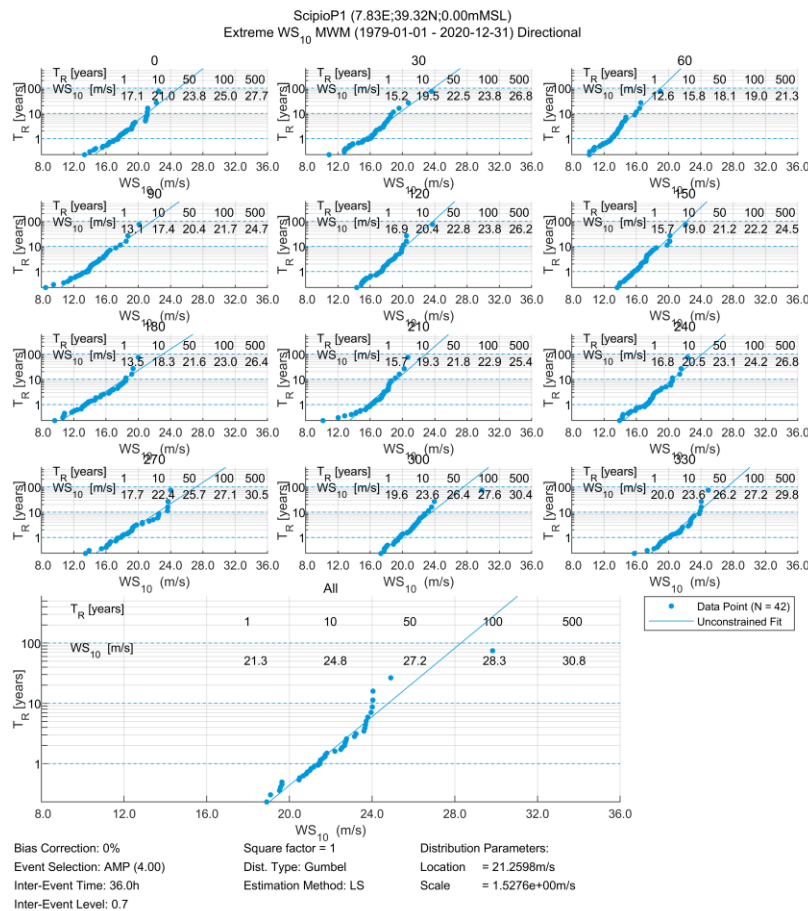


Figura 5.4: Distribuzioni direzionali marginali estreme di WS<sub>10,2hr</sub> secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e con il metodo dei minimi quadrati

Come menzionato nella Sezione 3.3, le velocità del vento a 10 m di altitudine modellate sono considerate rappresentative di una finestra media di 2 ore. Le velocità del vento estreme risultanti nel *Punto P1* sono riportate nella seguente serie di tabelle:

- Tabella 5.1 riassume le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali per WS<sub>10</sub> e per la durata di 1 ora;
- Tabella 5.2 sono riassunte le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate per WS<sub>10</sub>. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1];
- Tabella 5.3 riassume le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali per WS<sub>80</sub> e per la durata di 1 ora;
- Tabella 5.4 riassume le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate per WS<sub>80</sub>. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].

Tabella 5.1: Velocità del vento estrema WS10 omnidirezionale e direzionale marginale nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora

		<b>WS<sub>10,1hr</sub> [m/s]</b>				
<b>T<sub>R</sub> [years]</b>		<b>1</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>500</b>
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>21.3</b>	<b>24.8</b>	<b>27.2</b>	<b>28.3</b>	<b>30.8</b>
<b>Wind Incoming Direction [°N coming from]</b>	<b>0</b>	17.1	21.0	23.8	25.0	27.7
	<b>30</b>	15.2	19.5	22.5	23.8	26.8
	<b>60</b>	12.6	15.8	18.1	19.0	21.3
	<b>90</b>	13.1	17.4	20.4	21.7	24.7
	<b>120</b>	16.9	20.4	22.8	23.8	26.2
	<b>150</b>	15.7	19.0	21.2	22.2	24.5
	<b>180</b>	13.5	18.3	21.6	23.0	26.4
	<b>210</b>	15.7	19.3	21.8	22.9	25.4
	<b>240</b>	16.8	20.5	23.1	24.2	26.8
	<b>270</b>	17.7	22.4	25.7	27.1	30.5
	<b>300</b>	19.6	23.6	26.4	27.6	30.4
	<b>330</b>	20.0	23.6	26.2	27.2	29.8

Tabella 5.2: Velocità del vento estrema  $WS_{10}$  omnidirezionale e direzionale scalata nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes				
		$WS_{10,1hr}$ [m/s]				
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
$T_{R\_DNV}$ [years]		6	60	300	600	3000
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>21.3</b>	<b>24.8</b>	<b>27.2</b>	<b>28.3</b>	<b>30.8</b>
Wind Incoming Direction [°N coming from]	<b>0</b>	20.2	24.1	26.9	28.0	30.8
	<b>30</b>	18.6	22.9	25.9	27.1	30.1
	<b>60</b>	15.1	18.3	20.6	21.5	23.8
	<b>90</b>	16.5	20.8	23.8	25.1	28.1
	<b>120</b>	19.6	23.0	25.4	26.5	28.9
	<b>150</b>	18.2	21.5	23.8	24.8	27.0
	<b>180</b>	17.2	22.0	25.3	26.8	30.1
	<b>210</b>	18.5	22.1	24.6	25.7	28.2
	<b>240</b>	19.7	23.4	25.9	27.1	29.6
	<b>270</b>	21.3	24.8	27.2	28.3	30.8
	<b>300</b>	21.3	24.8	27.2	28.3	30.8
<b>330</b>	21.3	24.8	27.2	28.3	30.8	



Tabella 5.3: Velocità del vento estrema omnidirezionale e direzionale marginale  $WS_{80}$  nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora

		$WS_{80,1hr}$ [m/s]				
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>25.4</b>	<b>29.9</b>	<b>33.0</b>	<b>34.3</b>	<b>37.4</b>
<b>Wind Incoming Direction [°N coming from]</b>	<b>0</b>	20.0	25.0	28.5	30.0	33.5
	<b>30</b>	17.7	23.0	26.7	28.3	32.1
	<b>60</b>	14.4	18.1	20.8	21.9	24.6
	<b>90</b>	15.4	20.9	24.7	26.4	30.2
	<b>120</b>	20.7	25.2	28.4	29.8	32.9
	<b>150</b>	19.1	23.1	25.9	27.2	30.0
	<b>180</b>	15.9	21.6	25.7	27.4	31.5
	<b>210</b>	18.6	23.0	26.1	27.4	30.4
	<b>240</b>	20.1	24.6	27.8	29.2	32.4
	<b>270</b>	21.1	26.9	31.0	32.8	36.9
	<b>300</b>	23.3	28.3	31.8	33.4	36.9
	<b>330</b>	23.9	28.4	31.5	32.9	36.0

Tabella 5.4: Velocità del vento estrema omnidirezionale e direzionale marginale WS80 nel Punto P1 per la finestra media di 1 ora: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes				
		WS <sub>80,1hr</sub> [m/s]				
T <sub>R</sub> [years]		1	10	50	100	500
T <sub>R,DNV</sub> [years]		6	60	300	600	3000
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>25.4</b>	<b>29.9</b>	<b>33.0</b>	<b>34.3</b>	<b>37.4</b>
Wind Incoming Direction [°N coming from]	<b>0</b>	23.9	28.9	32.4	33.9	37.4
	<b>30</b>	21.8	27.2	30.9	32.5	36.2
	<b>60</b>	17.3	21.1	23.7	24.9	27.5
	<b>90</b>	19.7	25.2	29.0	30.7	34.5
	<b>120</b>	24.2	28.7	31.9	33.3	36.5
	<b>150</b>	22.2	26.3	29.1	30.3	33.1
	<b>180</b>	20.4	26.1	30.2	31.9	36.0
	<b>210</b>	22.0	26.4	29.5	30.8	33.8
	<b>240</b>	23.6	28.2	31.4	32.7	35.9
	<b>270</b>	25.4	29.9	33.0	34.3	37.4
	<b>300</b>	25.4	29.9	33.0	34.3	37.4
<b>330</b>	25.4	29.9	33.0	34.3	37.4	

### 5.1.1 Conversione di scale temporali

Le informazioni fornite in questa sezione descrivono in dettaglio i fattori di correzione della velocità del vento di tempesta che possono essere applicati alle velocità del vento modellate per rappresentare i vari intervalli di tempo. Queste correzioni sono state determinate seguendo la Sezione 2.3.2.11 di [1] e la Sezione A.7.3 di [29].

Per finestre di media temporale minori di 1 ora, la velocità media del vento in condizioni di tempesta può essere espressa come:

$$U_{w,T}(z) = U_{w,1h}(z) \cdot \left[ 1 - 0.41 \cdot I_u \cdot \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (5.1)$$

with:

$U_{w,T}(z)$  è la velocità del vento sostenuta (m/s) a un'altitudine di  $z$  metri slm, mediate su un intervallo di tempo  $T$

$U_{w,1h}(z)$  è la velocità del vento sostenuta in 1 ora a un'altitudine di  $z$  metri slm

$T_0$  è l'intervallo di riferimento di media temporale di 3600 s

$I_u$  è un valore dimensionalmente dipendente per l'intensità turbolenta della velocità del vento, dato da:  $I_u = 0.06 \cdot (1 + 0.043 \cdot U_{w0}) \cdot (z/z_r)^{-0.22}$

Poiché le velocità del vento modellate rappresentano una velocità del vento sostenuta di 2 ore, un modo per determinare la velocità del vento sostenuta di 1 ora ( $U_{w0}$ ) è un step necessario per implementare le correzioni di cui sopra. I valori di  $U_{w0}$  sono stati approssimati tramite una soluzione iterativa delle equazioni di media temporale descritte sopra, impostando  $T$  a 7200 m e l'elevazione  $z$  a 10 m, che ha portato a definire un fattore di correzione del 3.3% da 2 h a 1 h.

## 5.2 Livello del mare

Il modello statistico EVA di DHI (vedi Appendice B) è stato impostato per i livelli d'acqua. I livelli estremi di acqua alta e bassa sono stimati indipendentemente per il livello totale dell'acqua (di marea e residuo) e solo residuo. Le altezze della superficie libera mostrano variazioni stagionali e la stagione viene quindi utilizzata come co-variabile.

Le distribuzioni estreme sono mostrate in Figura 5.5. Tabella 5.5 e Tabella 5.6 mostrano, rispettivamente, i livelli mensili estremi totali e residui dell'acqua alta. I valori estremi mensili dell'acqua bassa sono riportati nella Tabella 5.7 e Tabella 5.8 Tabella 5.8 per i livelli totale e residuo, rispettivamente. I livelli dell'acqua sono riportati rispetto al livello medio del mare (m slm).

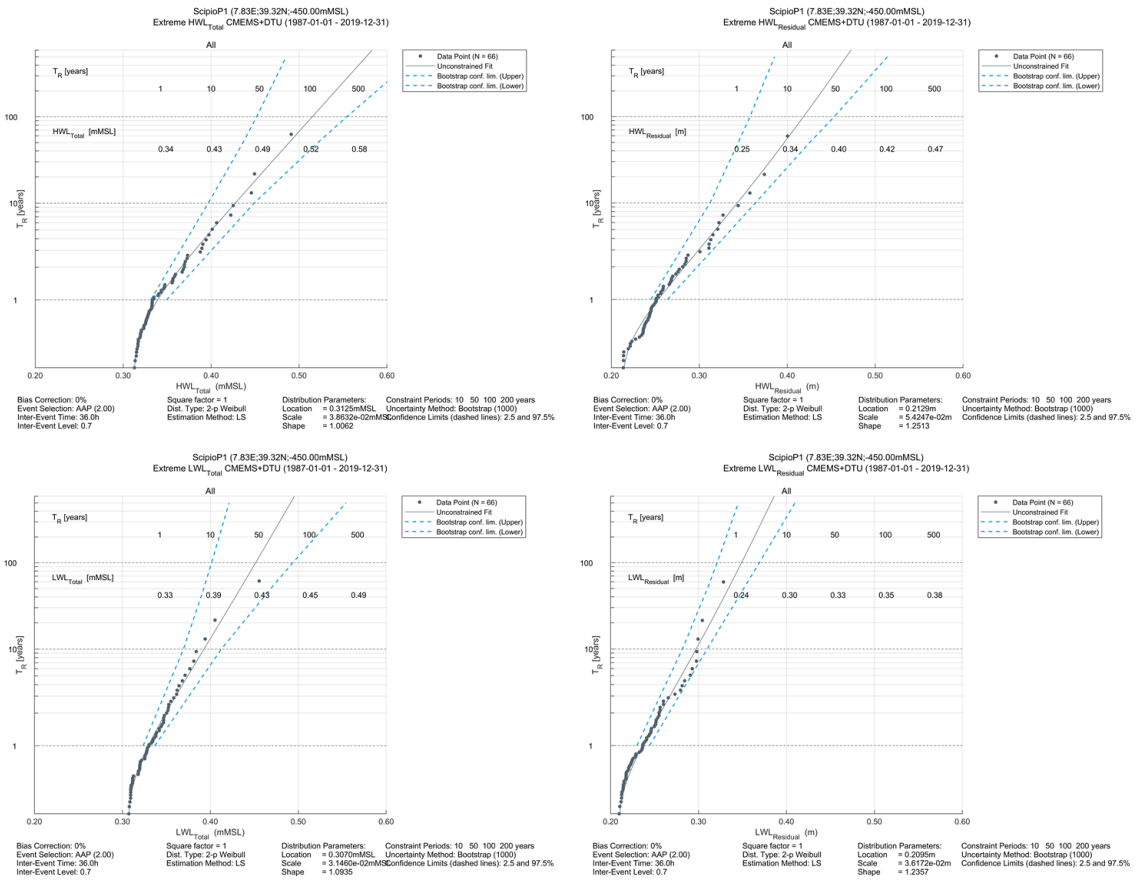


Figura 5.5: Distribuzioni estreme annuali ottenute per i livelli d'acqua HWL totale e residuo (in alto a sinistra e in alto a destra, rispettivamente) e per quelli LWL totale e residuo (in basso a sinistra e in basso a destra, rispettivamente)

Tabella 5.5 Livelli totali di acqua alta annuali e mensili estremi (HWL<sub>total</sub>)

Annual and Monthly Extreme Total High Water Level [mMSL]						
Months		T <sub>R</sub> [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6
	Jan	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
	Feb	0.2	0.4	0.4	0.5	0.5
	Mar	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Apr	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
	May	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
	Jun	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
	Jul	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Aug	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
	Sep	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
	Oct	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Nov	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
	Dec	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5

Tabella 5.6 Livelli residui di acqua alta annuali e mensili estremi (HWL<sub>resid</sub>)

Annual and Monthly Extreme Residual High Water Level [m]						
Months		T <sub>R</sub> [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5
	Jan	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Feb	0.1	0.3	0.3	0.4	0.4
	Mar	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	Apr	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4
	May	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3
	Jun	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3
	Jul	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3
	Aug	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
	Sep	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
	Oct	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
	Nov	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
	Dec	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4

Tabella 5.7 Livelli totali di acqua bassa annuali e mensili estremi (LWL<sub>total</sub>)

Annual and Monthly Extreme Total Low Water Level [mMSL]						
Months		T <sub>R</sub> [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5
	Jan	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
	Feb	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
	Mar	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
	Apr	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4
	May	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
	Jun	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
	Jul	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	Aug	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	Sep	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	Oct	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	Nov	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
Dec	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	

Tabella 5.8 Livelli residui di acqua bassa annuali e mensili estremi (LWL<sub>resid</sub>)

Annual and Monthly Extreme Residual Low Water Level [m]						
Months		T <sub>R</sub> [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
	Jan	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
	Feb	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
	Mar	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
	Apr	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	May	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	Jun	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
	Jul	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
	Aug	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	Sep	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
	Oct	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
	Nov	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
Dec	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	



### 5.3 Correnti

In questa sezione sono presentate le condizioni di corrente superficiale estreme stimate. L'analisi ai valori estremi è stata eseguita per le velocità di corrente superficiale totale ( $CS_{Total}$ ) e residua ( $CS_{Resid}$ ). Il *de-tiding* è stato condotto utilizzando il metodo *U-tide* come descritto in [18]. I pedici "tide" e "resid." rappresentano, rispettivamente, la componente di marea e residua della velocità della corrente e della sua direzione.

La distribuzione applicata per stimare le velocità della corrente estrema è stata scelta sulla base di un'analisi di sensibilità che confronta le stime estreme omnidirezionali estreme, associate a un periodo di ritorno di 100 anni, di  $CS_{Total}$  e  $CS_{Resid}$  (e il corrispondente adattamento dei dati) ottenute da varie distribuzioni, numero di eventi e metodi di adattamento. I risultati di questo test di sensibilità sono presentati in termini di valori associati a un periodo di ritorno di 100 anni in Figura 5.15.

I risultati mostrano che le stime della corrente estrema delle diverse distribuzioni rimangono pressoché stabili aumentando i criteri di soglia (numero di eventi per anno) e il tipo di distribuzione. Quasi tutte le distribuzioni hanno provveduto a fornire una stima robusta, con i valori più alti per la Gumbel. È stata selezionata la Weibull a due parametri con metodo dei minimi quadrati (Least Squared, LS), usando una soglia di 2 picchi l'anno ( $\lambda = 2$ ).

Le distribuzioni dei valori estremi per le condizioni di corrente superficiale omnidirezionale sono mostrate nella Figura 5.7, per la corrente totale.

I valori estremi omnidirezionali e direzionali marginali della velocità della corrente superficiale  $CS_{Total}$  sono riassunti nella Tabella 5.9, mentre Tabella 5.10 mostra l'insieme dei valori direzionali scalati (scalati secondo la Sezione 3.6.5.6 di [1]).

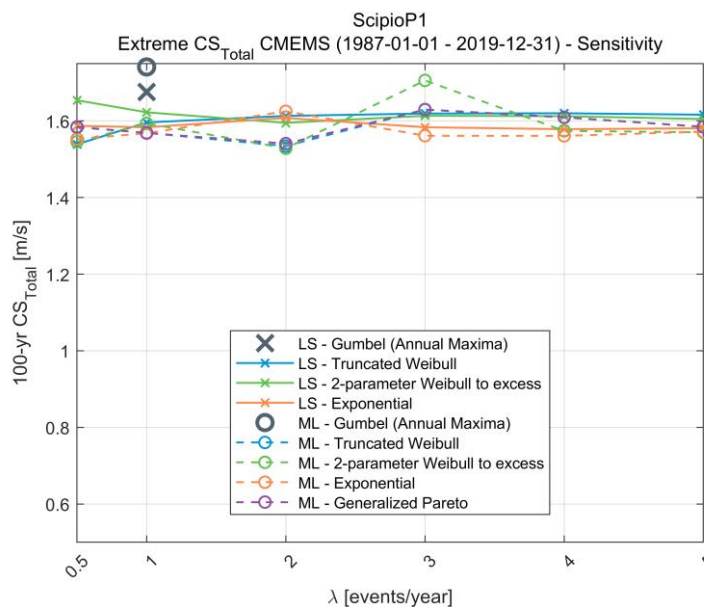


Figura 5.6 Stime omnidirezionali di  $CS_{total}$  per un periodo di ritorno ( $T_R$ ) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è valutata usando un metodo dei minimi quadrati (LS) e un metodo di massima verosimiglianza (ML)

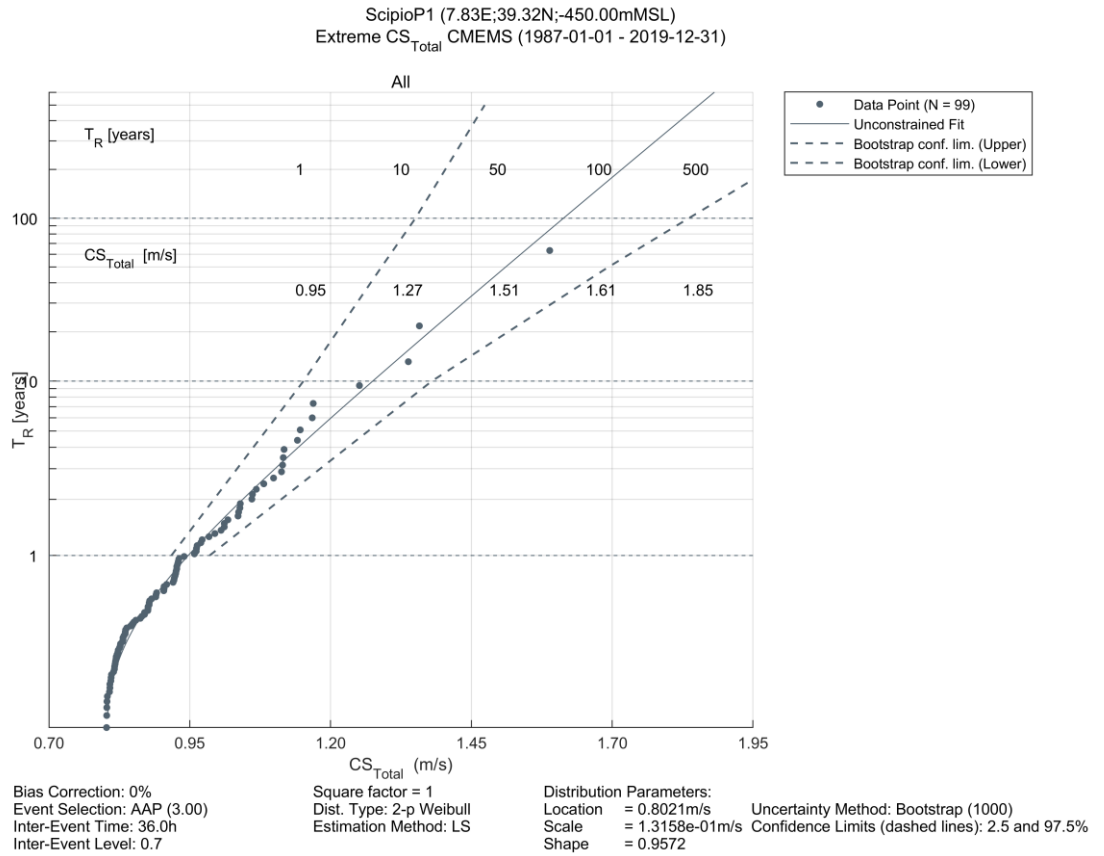


Figura 5.7  $CS_{total}$  omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Weibull 2-p adattata ai picchi medi annuali (AAP) e a un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea tratteggiata

ScipioP1 (7.83E;39.32N;-450.00mMSL)  
 Extreme  $CS_{Total}$  CMEMS (1987-01-01 - 2019-12-31) Directional

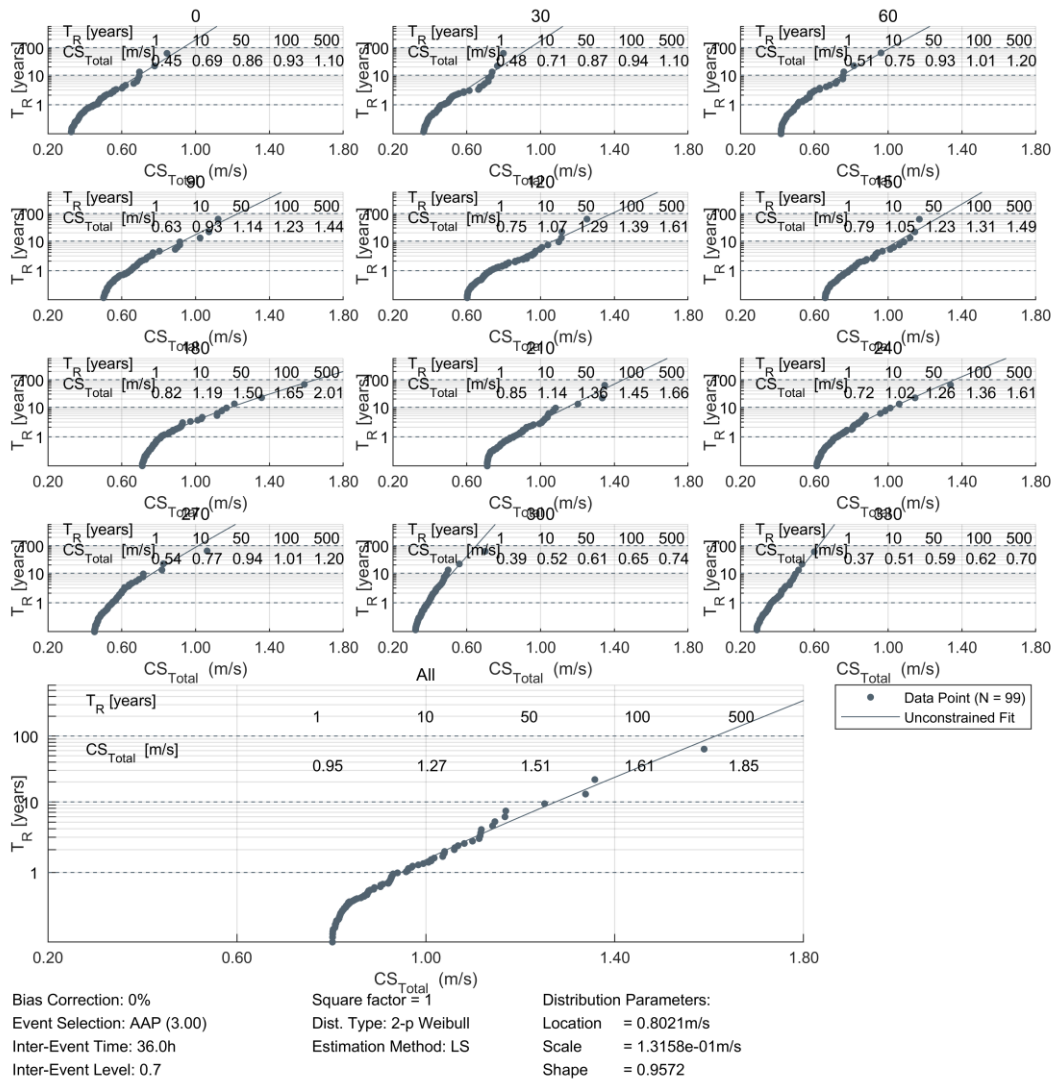


Figura 5.8  $CS_{Total}$  omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Weibull 2-p adattata ai picchi medi annuali (AAP) e a un metodo di adattamento ai minimi quadrati

Tabella 5.9: Corrente totale ( $CS_{Total}$ ) estrema omnidirezionale e direzionale marginale alla superficie

		$CS_{Total}$ [m/s]				
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>1.0</b>	<b>1.3</b>	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>	<b>1.9</b>
Surface current Direction [°N going towards]	0	0.5	0.7	0.9	0.9	1.1
	30	0.5	0.7	0.9	0.9	1.1
	60	0.5	0.8	0.9	1.0	1.2
	90	0.6	0.9	1.1	1.2	1.4
	120	0.8	1.1	1.3	1.4	1.6
	150	0.8	1.1	1.2	1.3	1.5
	180	0.8	1.2	1.5	1.7	2.0
	210	0.9	1.1	1.4	1.5	1.7
	240	0.7	1.0	1.3	1.4	1.6
	270	0.5	0.8	0.9	1.0	1.2
	300	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7
	330	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7

Tabella 5.10: Corrente totale ( $CS_{Total}$ ) estrema omnidirezionale e direzionale scalata alla superficie. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes				
		$CS_{Total}$ [m/s]				
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>1.0</b>	<b>1.3</b>	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>	<b>1.9</b>
Surface current Direction [°N going towards]	0	0.6	0.9	1.0	1.1	1.3
	30	0.7	0.9	1.1	1.1	1.3
	60	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4
	90	0.9	1.2	1.4	1.5	1.7
	120	1.0	1.3	1.5	1.6	1.9
	150	1.0	1.3	1.4	1.5	1.7
	180	1.0	1.3	1.5	1.6	1.9
	210	1.0	1.3	1.5	1.6	1.9
	240	1.0	1.3	1.5	1.6	1.9
	270	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4
	300	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	330	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8

## 5.4 Onde

Le altezze d'onda significative estreme stimate sono state definite sulla base dei dati estratti dal database *hindcast* del MWM descritto nel Capitolo 2. Il calcolo delle onde estreme è stato basato sullo stato totale del mare (condizioni combinate di *swell* e *wind sea*) per un periodo di 42 anni (1979-2020, compresi).

La risoluzione temporale dei parametri dell'onda modellata è 1 ora e gli eventi del periodo di ritorno sono considerati rappresentativi di uno stato di mare di 3 ore ( $H_{m0,3h}$ ). Le condizioni d'onda estreme sono state determinate per periodi di ritorno di 1, 10, 50, 100 e 500 anni.

La distribuzione applicata per stimare l' $H_{m0,3h}$  estrema è stata scelta sulla base di un test di sensibilità che confronta la stima omnidirezionale estrema, associata a un periodo di ritorno di 100 anni, e il corrispondente adattamento ai dati, ottenuti da varie distribuzioni PDF, numero di eventi e metodi di adattamento. I risultati di questo test di sensibilità sono presentati in Figura 5.9. Alcuni metodi hanno fornito adattamenti più instabili ed erano più sensibili alla soglia fissata ( $\lambda$  eventi all'anno), ma generalmente tutti hanno mostrato una crescita progressiva delle stime di valori estremi con l'aumentare del numero di eventi annui presi. Basandoci sulla nostra esperienza nell'area e riferendoci alle onde estreme registrate dalla boa di Alghero [30], è stata selezionata la distribuzione Weibull troncata con associato metodo di stima dei minimi quadrati. Tale distribuzione è risultata infatti più robusta rispetto alle altre, e complessivamente si adatta meglio ai dati misurati, compresi i picchi più intensi.

Si raccomanda quindi di derivare le stime delle onde estreme nel sito del FOWF utilizzando una distribuzione di Weibull troncata con il metodo dei minimi quadrati (LS) utilizzando un *threshold* corrispondente a due picchi annuali in media ( $\lambda = 2$ ). Tale distribuzione è stata utilizzata per valutare i valori estremi di altezze d'onda massime ( $H_{max}$ ).

La distribuzione risultante per le altezze d'onda significativa totali omnidirezionali è mostrata in Figura 5.10 e riassume l'altezza d'onda significativa estrema omnidirezionale. Figura 5.11 mostra le distribuzioni estreme direzionali marginali adattate agli eventi di picco per ciascun settore direzionale, e i valori estremi risultanti sono riassunti nella Tabella 5.11. L'insieme dei valori direzionali scalati (scalati secondo la Sezione 3.6.5.6 di [1]) è riportato alla Tabella 5.12.

Si prega di notare che l'altezza d'onda più alta del campione di dati su cui è stata utilizzata la distribuzione di Weibull è di 9.94 m e corrisponde a una tempesta molto forte avvenuta l'11 gennaio 1987, a causa di un sistema di pressione molto bassa. Figura 5.12 mostra i valori *hindcast* di altezza d'onda significativa ( $H_{m0}$ ), direzione media dell'onda (MWD), velocità del vento ( $WS_{10}$ ) e direzione del vento ( $WS_{10}$ ) durante l'evento estremo nel *Punto P1*. Tempeste con  $H_{m0}$  oltre i 9.5 m si sono verificate anche nel 1989, 1993 e 1996, in Inverno.

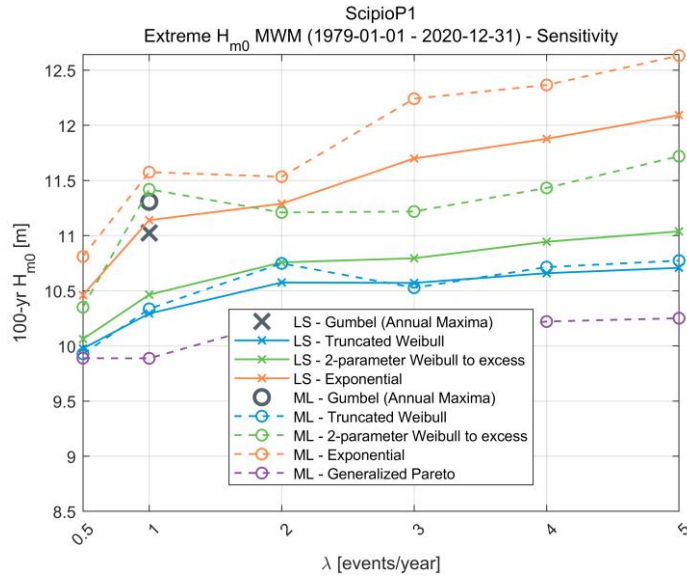


Figura 5.9 Stime di  $H_{m0,3h}$  omnidirezionale per un periodo di ritorno ( $T_R$ ) di 100 anni presso il sito del FOWF valutate utilizzando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stimata utilizzando il metodo dei minimi quadrati (LS) o il metodo della massima verosimiglianza (ML)

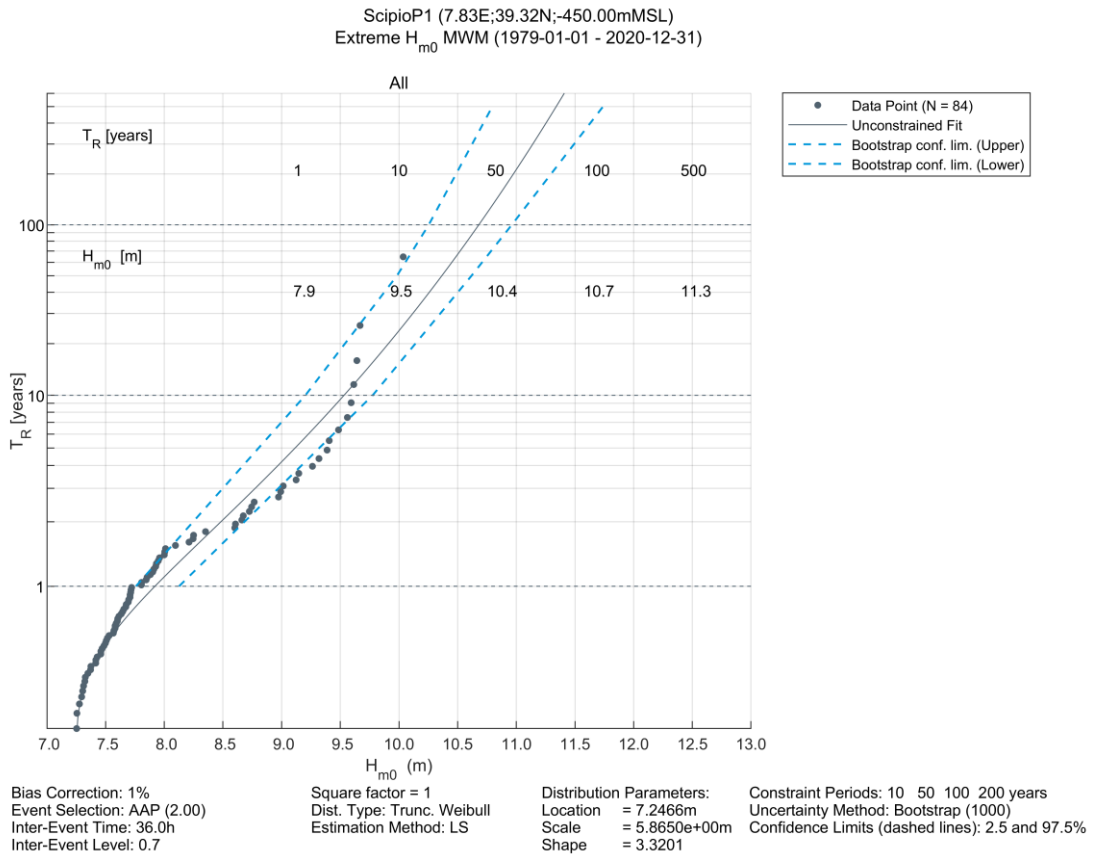


Figura 5.10  $H_{m0,3h}$  estrema omnidirezionale secondo una distribuzione Weibull troncata a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea blu tratteggiata



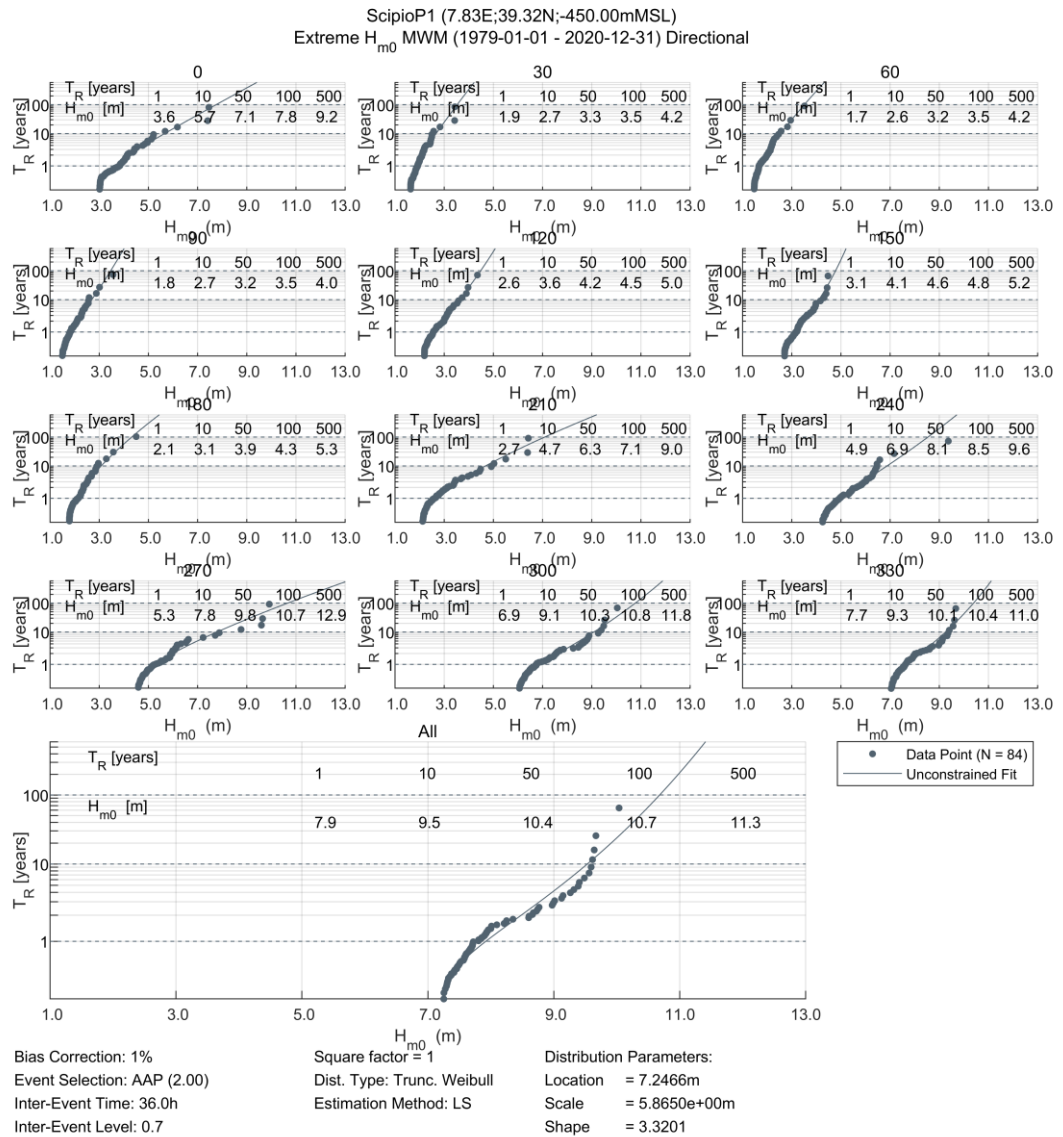


Figura 5.11  $H_{m0,3h}$  estrema omnidirezionale e direzionale marginale secondo una distribuzione di Weibull troncata a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annuali (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati.

Tabella 5.11 Altezze d'onda significative  $H_{m0,3hr}$  estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali

		$H_{m0,3h}$ [m]				
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>7.9</b>	<b>9.5</b>	<b>10.4</b>	<b>10.7</b>	<b>11.3</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	3.6	5.7	7.1	7.8	9.2
	30	1.9	2.7	3.3	3.5	4.2
	60	1.7	2.6	3.2	3.5	4.2
	90	1.8	2.7	3.2	3.5	4.0
	120	2.6	3.6	4.2	4.5	5.0
	150	3.1	4.1	4.6	4.8	5.2
	180	2.1	3.1	3.9	4.3	5.3
	210	2.7	4.7	6.3	7.1	9.0
	240	4.9	6.9	8.1	8.5	9.6
	270	5.3	7.8	9.8	10.7	12.9
	300	6.9	9.1	10.3	10.8	11.8
	330	7.7	9.3	10.1	10.4	11.0

Tabella 5.12 Altezze d'onda significative  $H_{m0,3hr}$  estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali scalate, secondo quanto riportato nella Sezione 3.6.5.6 di [1])

		Scaled directional extremes				
		$H_{m0,3h}$ [m]				
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>7.9</b>	<b>9.5</b>	<b>10.4</b>	<b>10.7</b>	<b>11.3</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	5.2	7.3	8.8	9.4	10.9
	30	2.5	3.3	4.0	4.2	4.9
	60	2.4	3.3	4.0	4.3	5.1
	90	2.5	3.3	3.8	4.0	4.5
	120	3.4	4.3	4.9	5.1	5.6
	150	3.9	4.6	5.1	5.2	5.5
	180	2.8	4.0	5.0	5.4	6.6
	210	4.2	6.5	8.4	9.2	11.3
	240	6.5	8.2	9.3	9.7	10.7
	270	7.2	9.5	10.4	10.7	11.3
	300	7.9	9.5	10.4	10.7	11.3
	330	7.9	9.5	10.4	10.7	11.3

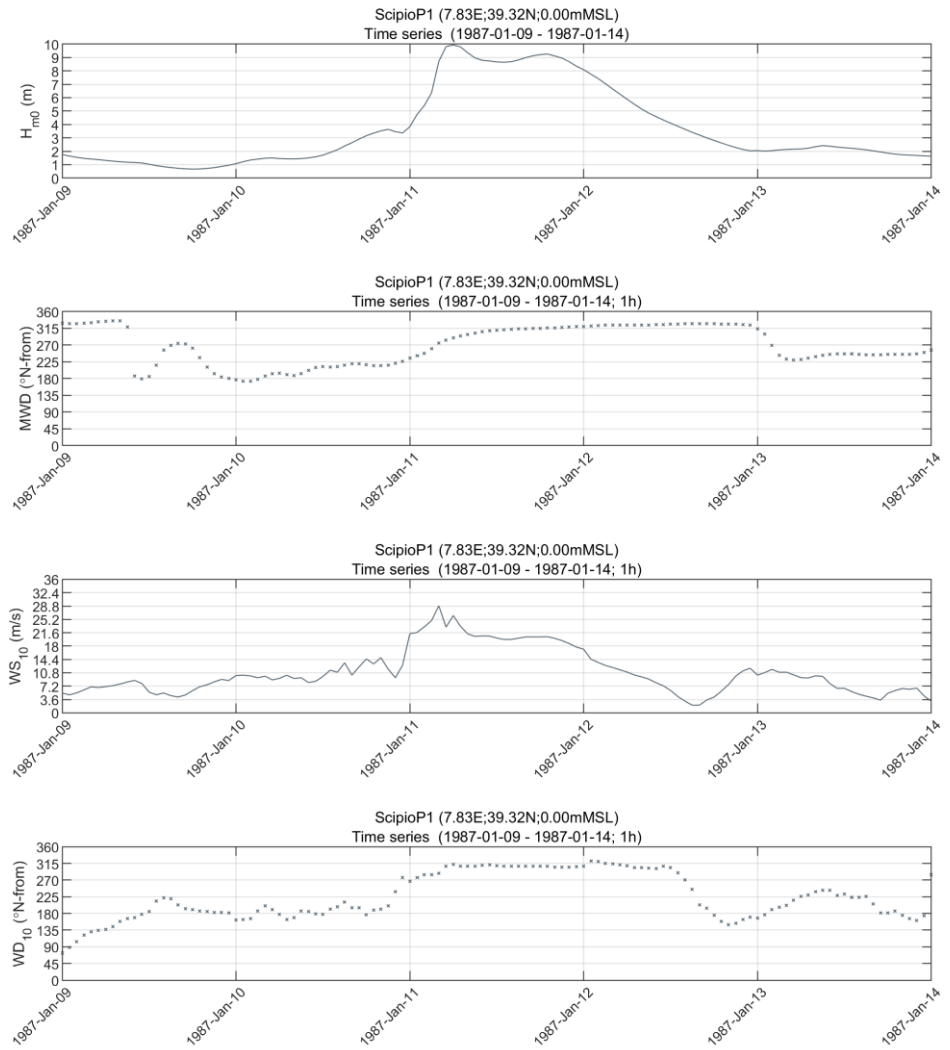


Figura 5.12: Valori *hindcast* dell'altezza d'onda significativa ( $H_{m0}$ ), direzione media dell'onda (MWD), velocità del vento ( $WS_{10}$ ) e direzione del vento ( $WD_{10}$ ) durante la tempesta dell'11 gennaio 1987 nel Punto P1.

### 5.4.1 Periodi d'onda associati

Gli intervalli del periodo d'onda associati all'altezza d'onda significativa estrema sono stati determinati per il periodo di picco dell'onda ( $T_p$ ), periodo d'onda di zero-crossing ( $T_{02}$ ) e sono riportate nella Tabella 5.13.

Figura 5.13 mostra lo *scatter plot* di  $H_{m0}$  vs.  $T_p$  e  $H_{m0}$  vs.  $T_{02}$  per le condizioni dello stato del mare omnidirezionali totali nel punto della griglia del modello analizzato. Esiste una relazione molto chiara tra l'altezza d'onda significative e il periodo d'onda, che suggerisce una dominanza delle onde generate dal vento per le condizioni estreme. Una funzione di potenza ai minimi quadrati è stata adattata ai quantili del 5, 50 e 95% per le onde più grandi. Gli adattamenti risultanti sono stati utilizzati per stimare l'intervallo di valori di  $T_p$  e  $T_{02}$  associati alle altezze d'onda significativa estreme omnidirezionali.

Lo stesso approccio è stato adottato per determinare i periodi d'onda associati alle altezze d'onda significativa estreme direzionali. L'analisi di regressione si è basata su quattro set direzionali (basati sulla MWD):

- Sector 1: settori direzionali da 30°N a 120°N
- Sector 2: settori direzionali da 150°N a 180°N
- Sector 3: settori direzionali da 210°N a 270°N
- Sector 4: settori direzionali da 300°N a 0°N

Tabella 5.13 e Tabella 5.14 riassumono l'intervallo del periodo d'onda ( $T_p$  e  $T_{02}$ ) associato alle altezze d'onda significativa estreme omnidirezionali e direzionali marginali (cioè le altezze d'onda dalla Tabella 5.11).

Tabella 5.15 e Tabella 5.16 riassumono l'intervallo del periodo d'onda ( $T_p$  e  $T_{02}$ ) associato alle altezze d'onda significativa estreme omnidirezionali e i valori direzionali caratteristici (cioè le altezze d'onda scalate secondo la Sezione 3.6.5.6 di [1] da Tabella 5.12).

Tabella 5.13 Intervallo dei periodi di picco ( $T_p$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.11)

$T_p$ [s]		$T_R$ [years]														
$T_R$ [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>11.3</b>	<b>11.9</b>	<b>12.6</b>	<b>12.2</b>	<b>12.8</b>	<b>13.3</b>	<b>12.7</b>	<b>13.2</b>	<b>13.6</b>	<b>12.9</b>	<b>13.3</b>	<b>13.8</b>	<b>13.2</b>	<b>13.6</b>	<b>14.0</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	8.0	8.8	10.2	9.7	10.5	11.5	10.8	11.5	12.2	11.2	11.8	12.5	12.1	12.7	13.1
	30	5.8	6.8	9.0	6.9	7.7	9.5	7.6	8.3	9.7	7.9	8.5	9.8	8.6	9.0	10.1
	60	5.5	6.6	8.9	6.7	7.6	9.4	7.5	8.2	9.7	7.9	8.5	9.8	8.7	9.1	10.1
	90	5.7	6.8	9.0	6.9	7.8	9.5	7.6	8.3	9.7	7.8	8.5	9.8	8.4	8.9	10.0
	120	6.8	7.6	9.4	8.0	8.6	9.9	8.7	9.1	10.1	8.9	9.3	10.2	9.4	9.6	10.3
	150	7.5	8.0	8.7	8.5	8.8	9.3	9.0	9.2	9.6	9.2	9.3	9.7	9.5	9.6	9.9
	180	6.1	6.8	7.9	7.4	7.9	8.7	8.3	8.7	9.2	8.7	9.0	9.5	9.7	9.7	10.0
	210	7.2	8.2	10.1	9.2	10.1	11.5	10.4	11.2	12.4	11.0	11.7	12.7	12.1	12.7	13.4
	240	9.4	10.3	11.7	10.8	11.6	12.6	11.6	12.3	13.1	11.9	12.5	13.3	12.5	13.1	13.6
	270	9.7	10.5	11.9	11.4	12.1	13.0	12.6	13.1	13.7	13.0	13.6	14.0	14.1	14.5	14.6
300	10.6	11.3	12.1	12.0	12.6	13.0	12.7	13.2	13.5	12.9	13.4	13.6	13.4	13.9	14.0	
330	11.1	11.8	12.5	12.1	12.7	13.1	12.5	13.1	13.4	12.7	13.3	13.5	13.1	13.6	13.7	

Tabella 5.14 Intervallo dei periodi di zero-crossing ( $T_{02}$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.11)

$T_{02}$ [s]		$T_R$ [years]														
$T_R$ [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>8.5</b>	<b>8.7</b>	<b>9.1</b>	<b>9.2</b>	<b>9.4</b>	<b>9.7</b>	<b>9.6</b>	<b>9.7</b>	<b>9.9</b>	<b>9.7</b>	<b>9.9</b>	<b>10.0</b>	<b>10.0</b>	<b>10.1</b>	<b>10.3</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	5.8	6.3	7.0	7.2	7.6	8.1	8.0	8.3	8.7	8.4	8.6	9.0	9.1	9.3	9.5
	30	4.2	4.6	5.2	5.0	5.3	5.7	5.4	5.7	5.9	5.6	5.8	6.0	6.1	6.2	6.3
	60	4.0	4.5	5.1	4.9	5.2	5.6	5.4	5.6	5.9	5.6	5.8	6.0	6.1	6.2	6.3
	90	4.2	4.6	5.2	5.0	5.3	5.7	5.4	5.7	5.9	5.6	5.8	6.0	5.9	6.1	6.2
	120	4.9	5.2	5.6	5.7	5.9	6.1	6.1	6.2	6.3	6.3	6.3	6.4	6.6	6.6	6.6
	150	5.3	5.6	6.0	6.0	6.2	6.4	6.4	6.5	6.6	6.5	6.5	6.7	6.7	6.7	6.9
	180	4.4	4.8	5.3	5.3	5.6	5.9	5.9	6.1	6.4	6.2	6.3	6.5	6.8	6.8	6.9
	210	5.2	5.6	6.3	6.7	7.1	7.7	7.6	8.0	8.6	8.0	8.4	9.0	8.9	9.3	9.8
	240	6.8	7.2	7.9	7.9	8.3	8.9	8.5	8.9	9.4	8.7	9.1	9.6	9.1	9.5	10.1
	270	7.0	7.4	8.1	8.3	8.7	9.3	9.2	9.6	10.1	9.6	10.0	10.5	10.4	10.8	11.2
300	7.9	8.2	8.6	9.0	9.2	9.5	9.6	9.7	9.9	9.8	9.9	10.0	10.2	10.3	10.3	
330	8.3	8.6	8.9	9.1	9.3	9.5	9.5	9.6	9.8	9.6	9.8	9.9	9.9	10.0	10.1	

Tabella 5.15 Intervallo dei periodi di picco ( $T_p$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.12)

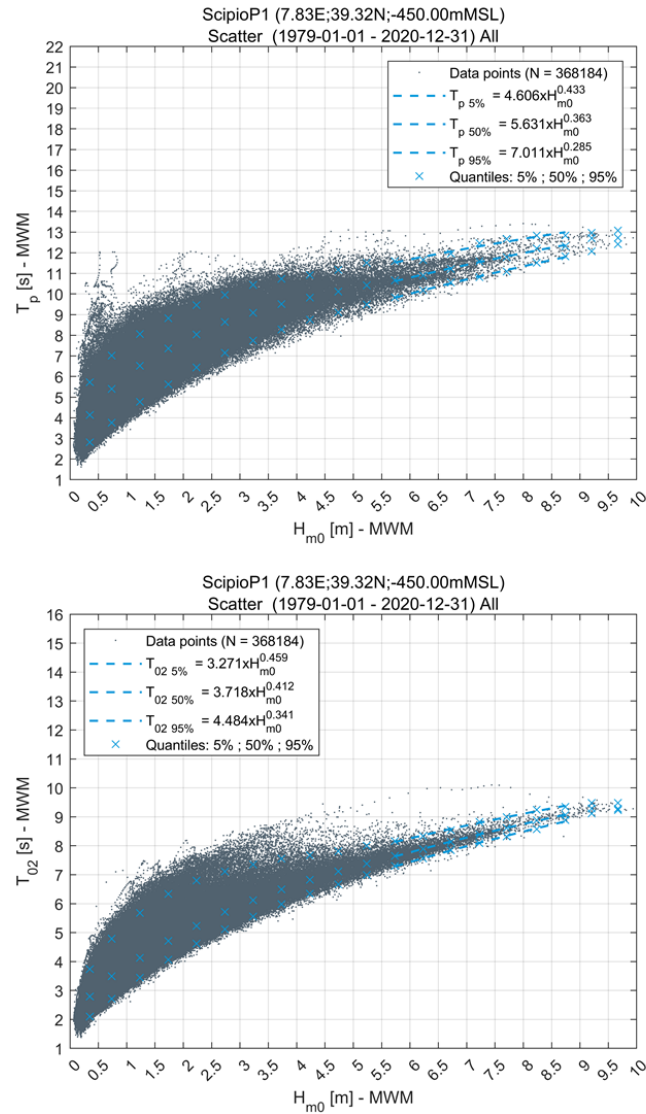
$T_P$ [s]		$T_R$ [years]														
$T_R$ [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>11.3</b>	<b>11.9</b>	<b>12.6</b>	<b>12.2</b>	<b>12.8</b>	<b>13.3</b>	<b>12.7</b>	<b>13.2</b>	<b>13.6</b>	<b>12.9</b>	<b>13.3</b>	<b>13.8</b>	<b>13.2</b>	<b>13.6</b>	<b>14.0</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	9.4	10.2	11.2	10.9	11.6	12.3	11.8	12.4	12.9	12.2	12.8	13.1	13.0	13.5	13.7
	30	6.6	7.5	9.4	7.7	8.4	9.8	8.4	8.9	10.0	8.6	9.1	10.1	9.3	9.5	10.3
	60	6.5	7.4	9.3	7.6	8.3	9.7	8.4	8.9	10.0	8.7	9.1	10.1	9.5	9.7	10.3
	90	6.7	7.6	9.4	7.6	8.3	9.7	8.2	8.7	9.9	8.4	8.9	10.0	8.9	9.3	10.2
	120	7.8	8.4	9.8	8.7	9.1	10.1	9.3	9.5	10.3	9.5	9.7	10.3	9.9	10.0	10.5
	150	8.3	8.7	9.2	9.0	9.2	9.6	9.4	9.5	9.8	9.6	9.6	9.9	9.9	9.8	10.1
	180	7.1	7.7	8.5	8.4	8.7	9.3	9.4	9.5	9.8	9.8	9.8	10.0	10.7	10.4	10.5
	210	8.8	9.7	11.2	10.6	11.4	12.5	11.8	12.4	13.2	12.2	12.9	13.5	13.3	13.8	14.2
	240	10.6	11.3	12.4	11.7	12.3	13.1	12.3	12.9	13.5	12.5	13.1	13.7	13.1	13.6	14.0
	270	11.0	11.8	12.8	12.4	13.0	13.6	12.9	13.4	13.9	13.0	13.6	14.0	13.4	13.9	14.2
300	11.3	11.9	12.6	12.2	12.8	13.2	12.7	13.3	13.5	12.9	13.4	13.6	13.2	13.7	13.8	
330	11.3	11.9	12.6	12.2	12.8	13.2	12.7	13.3	13.5	12.9	13.4	13.6	13.2	13.7	13.8	

Tabella 5.16 Intervallo dei periodi di zero-crossing ( $T_{02}$ ) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.12)



T <sub>02</sub> [s]		T <sub>R</sub> [years]														
T <sub>R</sub> [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>8.5</b>	<b>8.7</b>	<b>9.1</b>	<b>9.2</b>	<b>9.4</b>	<b>9.7</b>	<b>9.6</b>	<b>9.7</b>	<b>9.9</b>	<b>9.7</b>	<b>9.9</b>	<b>10.0</b>	<b>10.0</b>	<b>10.1</b>	<b>10.3</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	6.9	7.3	7.9	8.1	8.4	8.8	8.9	9.1	9.3	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.0
	30	4.8	5.1	5.6	5.5	5.7	6.0	5.9	6.1	6.2	6.1	6.2	6.3	6.5	6.5	6.5
	60	4.7	5.0	5.5	5.5	5.7	6.0	6.0	6.1	6.2	6.2	6.3	6.3	6.7	6.7	6.6
	90	4.8	5.2	5.6	5.5	5.7	6.0	5.8	6.0	6.2	6.0	6.1	6.2	6.3	6.3	6.4
	120	5.6	5.8	6.0	6.2	6.3	6.3	6.5	6.5	6.5	6.7	6.6	6.6	6.9	6.9	6.7
	150	5.9	6.1	6.4	6.4	6.5	6.7	6.6	6.7	6.8	6.7	6.8	6.9	6.9	6.9	7.0
	180	5.1	5.4	5.8	6.0	6.1	6.4	6.6	6.7	6.8	6.9	6.9	7.0	7.5	7.4	7.3
	210	6.4	6.7	7.4	7.7	8.1	8.7	8.6	9.0	9.6	9.0	9.4	9.9	9.8	10.2	10.7
	240	7.7	8.1	8.7	8.5	8.9	9.5	9.0	9.4	9.9	9.2	9.6	10.1	9.6	10.0	10.5
	270	8.1	8.4	9.1	9.1	9.5	10.0	9.5	9.8	10.3	9.6	10.0	10.5	9.8	10.2	10.7
	300	8.5	8.7	9.0	9.2	9.4	9.6	9.6	9.8	9.9	9.7	9.9	10.0	10.0	10.1	10.2
330	8.5	8.7	9.0	9.2	9.4	9.6	9.6	9.8	9.9	9.7	9.9	10.0	10.0	10.1	10.2	

Figura 5.13 Scatter plot di  $H_{m0}$  vs.  $T_p$  (sopra) e  $H_{m0}$  vs.  $T_{02}$  (sotto), e curve di correlazione utilizzate per condizioni omnidirezionali



## 5.4.2 Altezze d'onda massima

L'altezza massima dell'onda  $H_{max,3h}$  è stata stimata utilizzando il metodo della convoluzione di Tromans and Vanderschuren [22] e basato sulla distribuzione dell'altezza delle onde a breve termine di Forristall [23]. Maggiori dettagli sulla metodologia sono riportati nell'Appendice B.

I valori estremi sono stati stimati utilizzando lo stesso metodo applicato per derivare i valori estremi di  $H_{m0,3h}$  (distribuzione di Weibull troncata adattata a due eventi annuali e con best-fitting ai minimi quadrati) anche applicato per la stima delle altezze d'onda. La Figura 5.14 mostra la distribuzione omnidirezionale, mentre le distribuzioni direzionali marginali sono riportate in Figura 5.15. Tabella 5.18 riassume l'altezza d'onda annuale/omnidirezionale e direzionale marginale ottenuta e rappresentativa per il sito del FOWF. Il set di valori direzionali scalati (secondo la Sezione 3.6.5.6 di [1]) è fornito alla Tabella 5.19.

Confrontando i risultati di altezza d'onda significativa stimata, il rapporto  $H_{max}/H_{m0}$  è compreso tra 1.5 e 2.0, con una media di ~1.7 a prescindere dai tempi di ritorno. I valori più bassi di tale rapporto si trovano nei settori direzionali meno energetici, caratterizzati da un *fetch* corto, ovvero i settori 30-60°N e 180-210°N, con il rapporto a 1.5. Comunque, sono considerati coerenti con il fattore di correlazione medio tra  $H_{max}$  e  $H_{m0}$  trovato con l'analisi statistica di onde registrate presso la boa di Alghero [30].

Periodi d'onda associati alle altezze massime d'onda sono derivati applicando la seguente relazione ottenuta in occasione di progetti passati e solitamente adottata in altre aree del Mediterraneo (ad esempio nel Canale di Sicilia):

$$T_{Hmax} = 1.28 * T_{m02}$$

I valori ottenuti sono riportati, per gli estremi marginali e quelli scalati rispettivamente, in Tabella 5.20 e Tabella 5.21.

Solo per il caso omnidirezionale, la Tabella 5.17 fornisce le stime superiori e inferiori come raccomandato da DNV (vedere Sezione 3.7.4 di [1]), che afferma che il periodo d'onda  $T_{Hmax}$  da utilizzare in combinazione con l'altezza d'onda estrema a lungo termine  $H_{max}$  per un tempo di ritorno di 100 anni dovrebbe essere compreso tra:

$$2.55\sqrt{H_{max,100}} < T_{Hmax,100} < 3.32\sqrt{H_{max,100}}$$

I valori di stima centrale previsti per  $T_{Hmax}$  risultano essere all'interno del range raccomandato da DNV, è questo è verificato per ciascuno dei 12 settori direzionali considerati.

Tabella 5.17 Periodo d'onda ( $T_{Hmax}$ ) associato agli estremi annuali omnidirezionali di altezza d'onda massima ( $H_{max}$  da Tabella 5.18) confrontati con i limiti inferiori e superiori nel range suggerito da DNV [1]

$T_{Hmax}$ [s]	$T_R$ [years]				
	1	10	50	100	500
Lower DNV	9.7	10.7	11.3	11.5	12.0
Lower (5%)	10.9	11.8	12.3	12.4	12.8
Central (50%)	<b>11.1</b>	<b>12.0</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>12.9</b>
Upper (95%)	11.6	12.4	12.7	12.8	13.2
Upper DNV	12.6	14.0	14.7	15.0	15.6

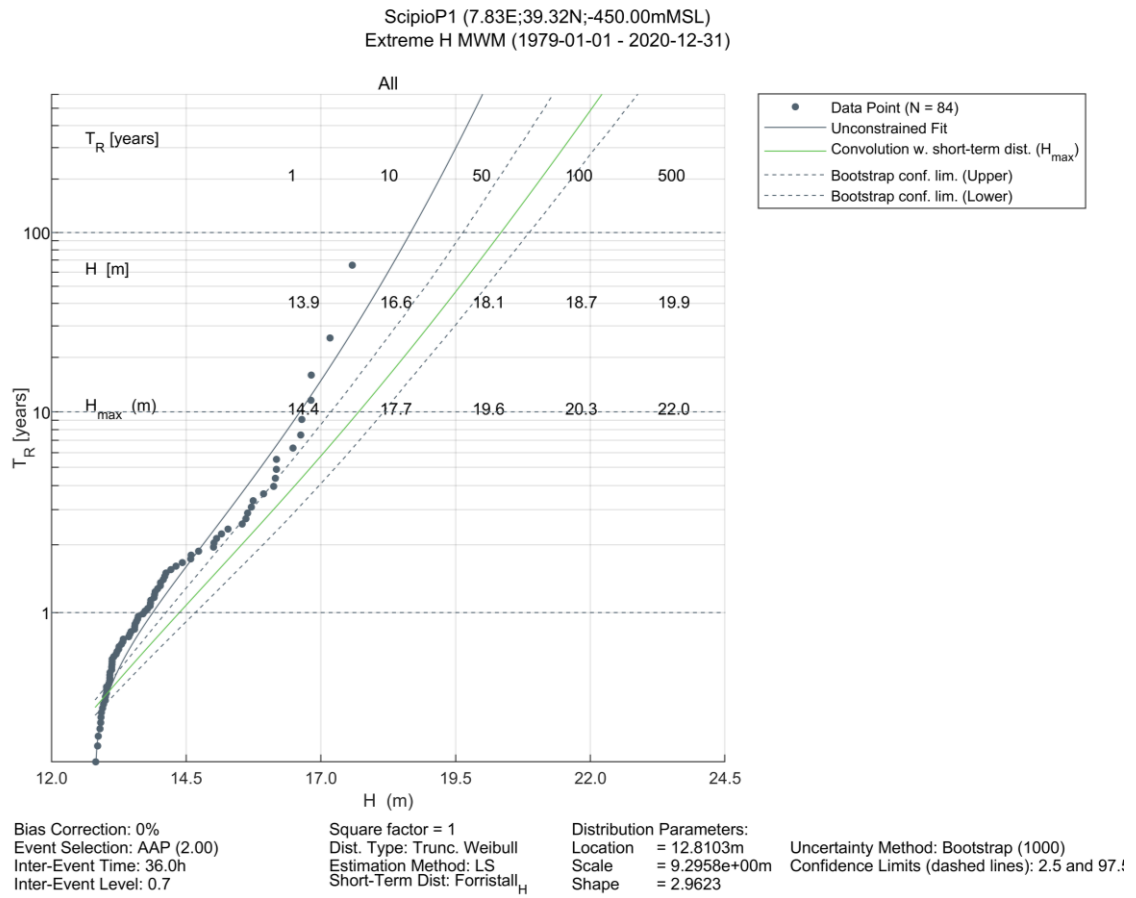


Figura 5.14  $H_{max}$  estrema omnidirezionale secondo una distribuzione di Weibull troncata adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e del 97.5% sono mostrati con una linea tratteggiata

ScipioP1 (7.83E;39.32N;-450.00mMSL)  
 Extreme H MWM (1979-01-01 - 2020-12-31) Directional

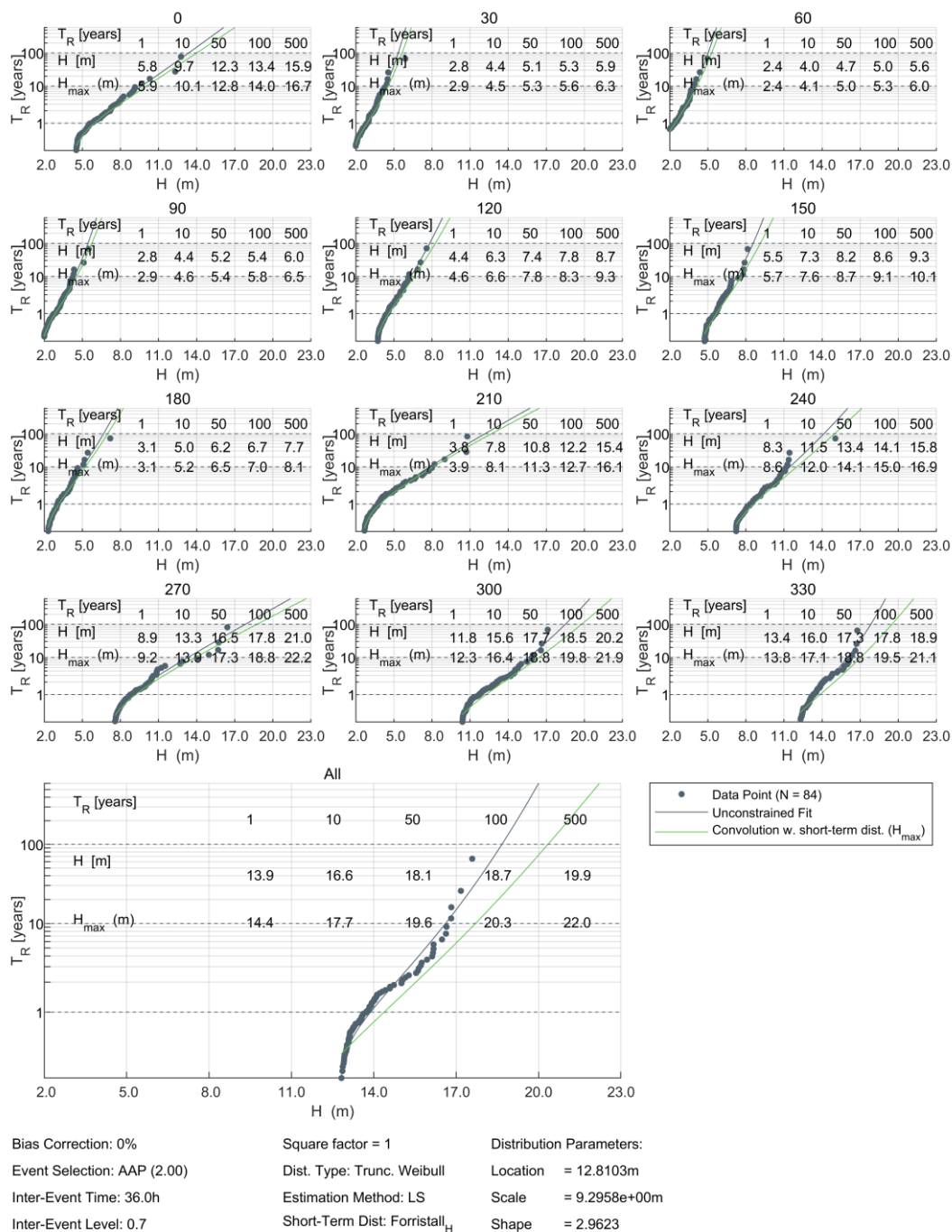


Figura 5.15 Distribuzioni estreme direzionali marginali di  $H_{max}$  secondo una distribuzione di Weibull troncata adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento dei minimi quadrati.

Tabella 5.18 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali ( $H_{max,3h}$ )

		$H_{max}$ [m]				
		1	10	50	100	500
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>14.4</b>	<b>17.7</b>	<b>19.6</b>	<b>20.3</b>	<b>22.0</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	5.9	10.1	12.8	14.0	16.7
	30	2.9	4.5	5.3	5.6	6.3
	60	2.4	4.1	5.0	5.3	6.0
	90	2.9	4.6	5.4	5.8	6.5
	120	4.6	6.6	7.8	8.3	9.3
	150	5.7	7.6	8.7	9.1	10.1
	180	3.1	5.2	6.5	7.0	8.1
	210	3.9	8.1	11.3	12.7	16.1
	240	8.6	12.0	14.1	15.0	16.9
	270	9.2	13.9	17.3	18.8	22.2
	300	12.3	16.4	18.8	19.8	21.9
330	13.8	17.1	18.8	19.5	21.1	

Tabella 5.19 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate ( $H_{max,3h}$ ): l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato secondo la Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes				
		$H_{max}$ [m]				
$T_R$ [years]		1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>14.4</b>	<b>17.7</b>	<b>19.6</b>	<b>20.3</b>	<b>22.0</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	9.2	13.1	15.9	17.0	19.7
	30	4.3	5.4	6.1	6.4	7.0
	60	3.8	5.1	5.8	6.1	6.7
	90	4.3	5.5	6.2	6.5	7.2
	120	6.2	7.9	9.0	9.4	10.4
	150	7.3	8.8	9.8	10.2	11.0
	180	4.8	6.6	7.8	8.2	9.3
	210	7.1	11.6	15.0	16.5	20.0
	240	11.3	14.3	16.3	17.1	19.0
	270	12.8	17.7	19.6	20.3	22.0
	300	14.4	17.7	19.6	20.3	22.0
330	14.4	17.7	19.6	20.3	22.0	

Tabella 5.20 Periodo d'onda ( $T_{Hmax}$ ) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali ( $H_{max}$  dalla Tabella 5.18)

$T_{Hmax}$ [s]		$T_R$ [years]														
$T_R$ [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>10.9</b>	<b>11.1</b>	<b>11.6</b>	<b>11.8</b>	<b>12.0</b>	<b>12.4</b>	<b>12.3</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>12.8</b>	<b>12.8</b>	<b>12.9</b>	<b>13.2</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	7.4	8.1	9.0	9.2	9.7	10.4	10.2	10.6	11.1	10.8	11.0	11.5	11.6	11.9	12.2
	30	5.4	5.9	6.7	6.4	6.8	7.3	6.9	7.3	7.6	7.2	7.4	7.7	7.8	7.9	8.1
	60	5.1	5.8	6.5	6.3	6.7	7.2	6.9	7.2	7.6	7.2	7.4	7.7	7.8	7.9	8.1
	90	5.4	5.9	6.7	6.4	6.8	7.3	6.9	7.3	7.6	7.2	7.4	7.7	7.6	7.8	7.9
	120	6.3	6.7	7.2	7.3	7.6	7.8	7.8	7.9	8.1	8.1	8.1	8.2	8.4	8.4	8.4
	150	6.8	7.2	7.7	7.7	7.9	8.2	8.2	8.3	8.4	8.3	8.3	8.6	8.6	8.6	8.8
	180	5.6	6.1	6.8	6.8	7.2	7.6	7.6	7.8	8.2	7.9	8.1	8.3	8.7	8.7	8.8
	210	6.7	7.2	8.1	8.6	9.1	9.9	9.7	10.2	11.0	10.2	10.8	11.5	11.4	11.9	12.5
	240	8.7	9.2	10.1	10.1	10.6	11.4	10.9	11.4	12.0	11.1	11.6	12.3	11.6	12.2	12.9
	270	9.0	9.5	10.4	10.6	11.1	11.9	11.8	12.3	12.9	12.3	12.8	13.4	13.3	13.8	14.3
300	10.1	10.5	11.0	11.5	11.8	12.2	12.3	12.4	12.7	12.5	12.7	12.8	13.1	13.2	13.2	
330	10.6	11.0	11.4	11.6	11.9	12.2	12.2	12.3	12.5	12.3	12.5	12.7	12.7	12.8	12.9	

Tabella 5.21 Periodo d'onda ( $T_{Hmax}$ ) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate ( $H_{max}$  dalla Tabella 5.19)

$T_{Hmax}$ [s]		$T_R$ [years]														
$T_R$ [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>		<b>10.9</b>	<b>11.1</b>	<b>11.6</b>	<b>11.8</b>	<b>12.0</b>	<b>12.4</b>	<b>12.3</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>12.8</b>	<b>12.8</b>	<b>12.9</b>	<b>13.2</b>
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	8.8	9.3	10.1	10.4	10.8	11.3	11.4	11.6	11.9	11.8	12.0	12.3	12.5	12.8	12.8
	30	6.1	6.5	7.2	7.0	7.3	7.7	7.6	7.8	7.9	7.8	7.9	8.1	8.3	8.3	8.3
	60	6.0	6.4	7.0	7.0	7.3	7.7	7.7	7.8	7.9	7.9	8.1	8.1	8.6	8.6	8.4
	90	6.1	6.7	7.2	7.0	7.3	7.7	7.4	7.7	7.9	7.7	7.8	7.9	8.1	8.1	8.2
	120	7.2	7.4	7.7	7.9	8.1	8.1	8.3	8.3	8.3	8.6	8.4	8.4	8.8	8.8	8.6
	150	7.6	7.8	8.2	8.2	8.3	8.6	8.4	8.6	8.7	8.6	8.7	8.8	8.8	8.8	9.0
	180	6.5	6.9	7.4	7.7	7.8	8.2	8.4	8.6	8.7	8.8	8.8	9.0	9.6	9.5	9.3
	210	8.2	8.6	9.5	9.9	10.4	11.1	11.0	11.5	12.3	11.5	12.0	12.7	12.5	13.1	13.7
	240	9.9	10.4	11.1	10.9	11.4	12.2	11.5	12.0	12.7	11.8	12.3	12.9	12.3	12.8	13.4
	270	10.4	10.8	11.6	11.6	12.2	12.8	12.2	12.5	13.2	12.3	12.8	13.4	12.5	13.1	13.7
300	10.9	11.1	11.5	11.8	12.0	12.3	12.3	12.5	12.7	12.4	12.7	12.8	12.8	12.9	13.1	
330	10.9	11.1	11.5	11.8	12.0	12.3	12.3	12.5	12.7	12.4	12.7	12.8	12.8	12.9	13.1	



### 5.4.3 Elevazione della cresta d'onda

Per ogni stato del mare, l'elevazione massima della cresta dell'onda,  $C_{max}$ , è stata stimata usando il metodo di convoluzione di Tromans e Vanderschuren [22]. Si è ipotizzato che le elevazioni delle singole creste d'onda seguissero la distribuzione proposta da Forristall [24]. Ulteriori informazioni tecniche sono contenute nell'Appendice B. Le elevazioni massime della cresta dell'onda sono state calcolate relative al livello del mare calmo,  $C_{max,SWL}$ .

La stessa distribuzione a lungo termine usata per valutare l'altezza d'onda massima estrema è stata applicata per stimare le altezze d'onda massime estreme omnidirezionali e direzionali, ovvero con una distribuzione di Weibull troncata adattata a una media di 2 picchi all'anno ( $\lambda = 2$ ), con il metodo di adattamento ai minimi quadrati.

Le distribuzioni risultanti per  $C_{max,SWL}$  sono mostrate in Figura 5.16, e i valori estremi stimati per i periodi di ritorno richiesti sono riassunti in Tabella 5.22.

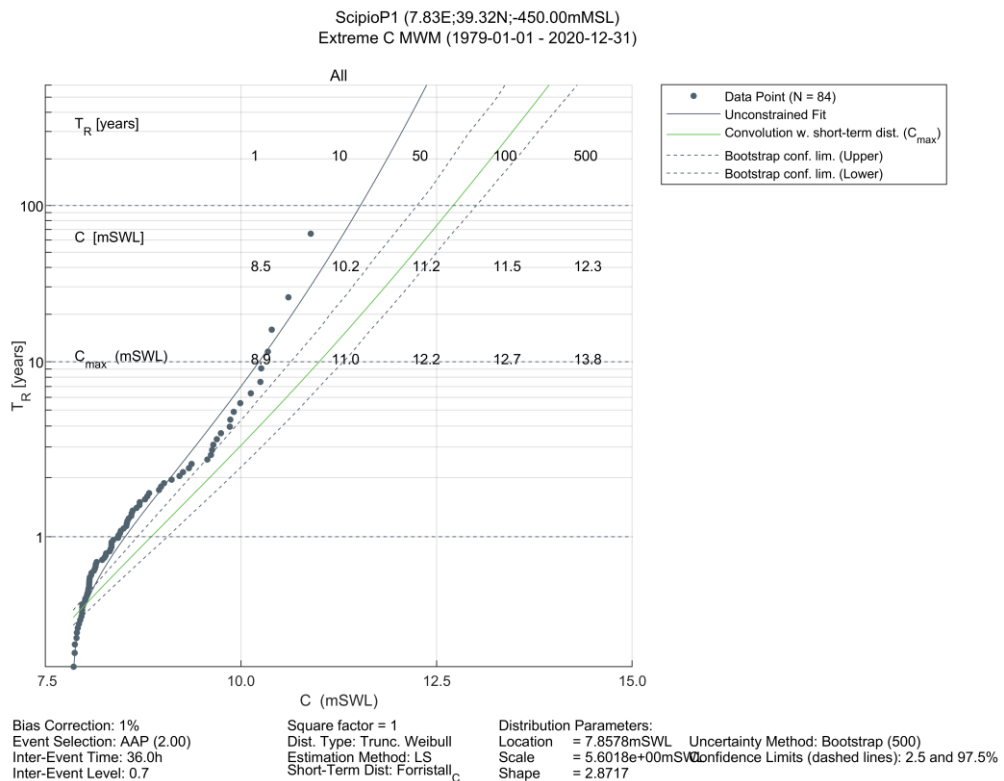


Figura 5.16: Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel Punto P1

Tabella 5.22: Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel Punto P1 relative al SWL

	$C_{max}$ [m]				
$T_R$ [years]	1	10	50	100	500
<b>OMNIDIRECTIONAL</b>	8.9	11.0	12.2	12.7	13.8

## 6 Temperatura e Salinità del mare

### 6.1 Temperatura dell'acqua di mare

I profili mensili della temperatura lungo la colonna d'acqua sono stati stimati dai dati *hindcast* del CMEMS per il periodo 1987-2019, come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 24 ore. I profili medi giornalieri della temperatura e della salinità sono stati estratti, relativi al *Punto P1*.

Le statistiche annuali e mensili delle temperature giornaliere sono fornite in Tabella 6.1 e in Figura 6.1 per tre livelli della colonna d'acqua: in superficie, a metà colonna e sul fondo del mare. I dati mostrano che la colonna d'acqua è ben miscelata durante i mesi invernali, mentre, da Maggio a Novembre, si sviluppa una chiara stratificazione. Le temperature più elevate dell'acqua in superficie si registrano nel periodo Luglio-Agosto, mentre i valori da metà colonna al fondale marino rimangono pressoché stabili durante tutto l'anno.

Le suddette variazioni mensili sono chiaramente visibili nei profili medi mensili mostrati in Figura 6.2 e Figura 6.3. Da maggio a novembre la colonna d'acqua è caratterizzata da una stratificazione piuttosto forte, confermando la presenza dell'*Atlantic Water (AW)* e della *Levantine Intermediate Water (LIW)* come generalmente si ritrova per profondità maggiori di ~200 m, caratterizzata da valori diversi e piuttosto stabili di temperatura e salinità.

Tabella 6.1 Statistiche annuali e mensili delle temperature dell'acqua marina giornaliere estratte in superficie, a metà colonna d'acqua e a livello del fondale marino nei periodi 1987-2019 nel Punto P1 di Ichnusa

Parameter	Surface			Mid-column			Seabed		
	Mean T [°C]	Min T [°C]	Max T [°C]	Mean T [°C]	Min T [°C]	Max T [°C]	Mean T [°C]	Min T [°C]	Max T [°C]
All	19.0	12.8	28.5	14.1	12.8	15.6	13.8	13.2	14.6
Jan	14.8	13.2	17.1	14.2	13.3	15.6	13.8	13.5	14.4
Feb	14.1	12.9	15.6	14.1	13.1	15.0	13.9	13.5	14.5
Mar	14.2	12.8	16.2	13.9	12.8	14.9	13.9	13.6	14.3
Apr	15.2	12.9	18.4	13.9	12.9	15.0	13.9	13.6	14.3
May	17.7	14.5	22.2	14.0	13.2	15.1	13.8	13.5	14.4
Jun	21.3	16.8	26.2	14.0	13.3	15.1	13.8	13.5	14.4
Jul	24.2	20.7	28.3	14.1	13.4	15.1	13.8	13.4	14.2
Aug	25.5	22.5	28.5	14.1	13.4	15.0	13.8	13.3	14.1
Sep	24.3	20.7	27.5	14.1	13.5	15.0	13.8	13.2	14.1
Oct	22.0	18.4	24.9	14.1	13.6	14.9	13.8	13.4	14.2
Nov	19.1	15.7	22.8	14.1	13.4	14.7	13.8	13.3	14.6
Dec	16.2	13.8	19.1	14.1	13.3	15.4	13.8	13.4	14.6

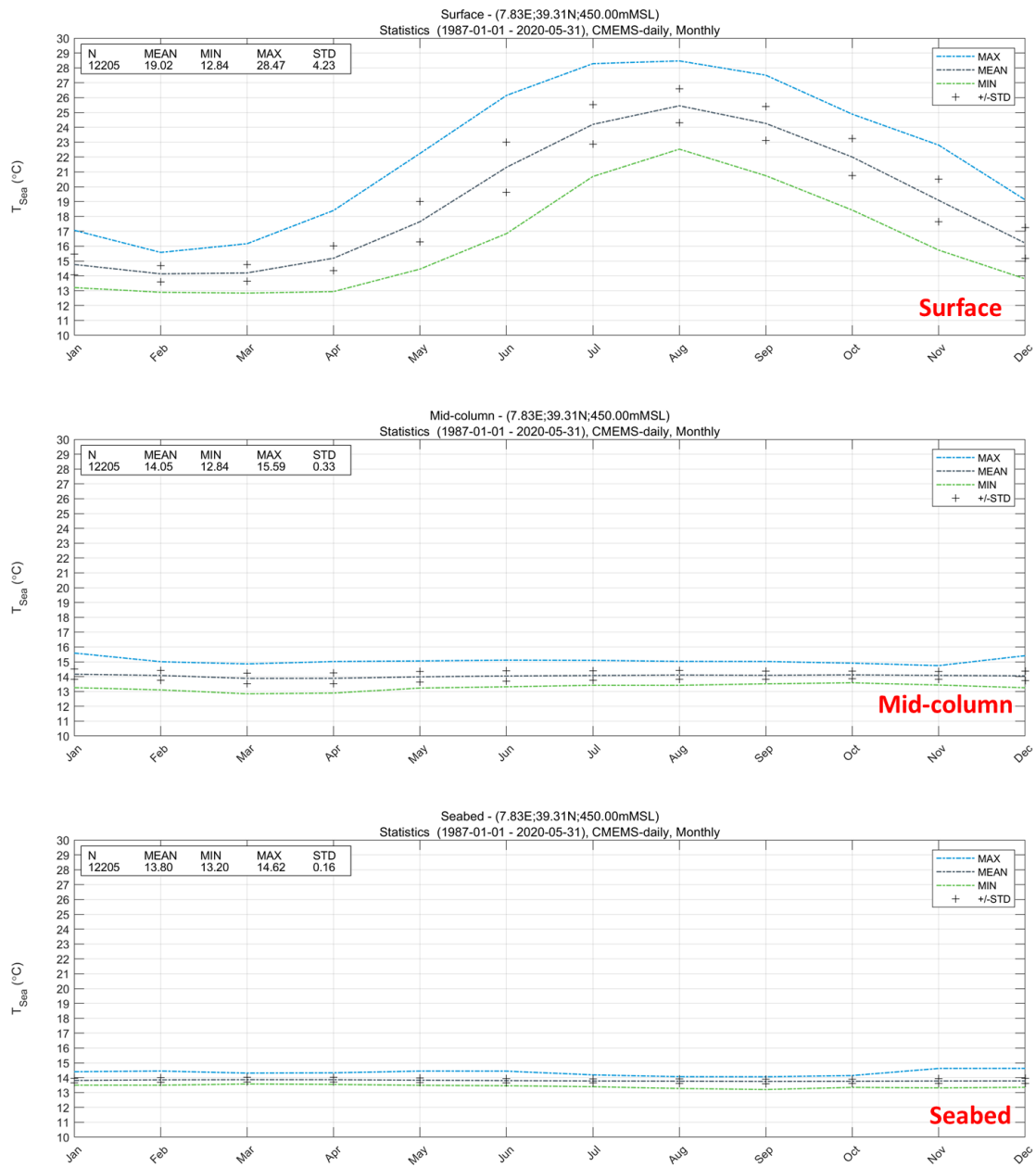


Figura 6.1 Statistiche annuali e mensili della temperatura giornaliera dell'acqua di mare (1987-2019) alla superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale (in basso).

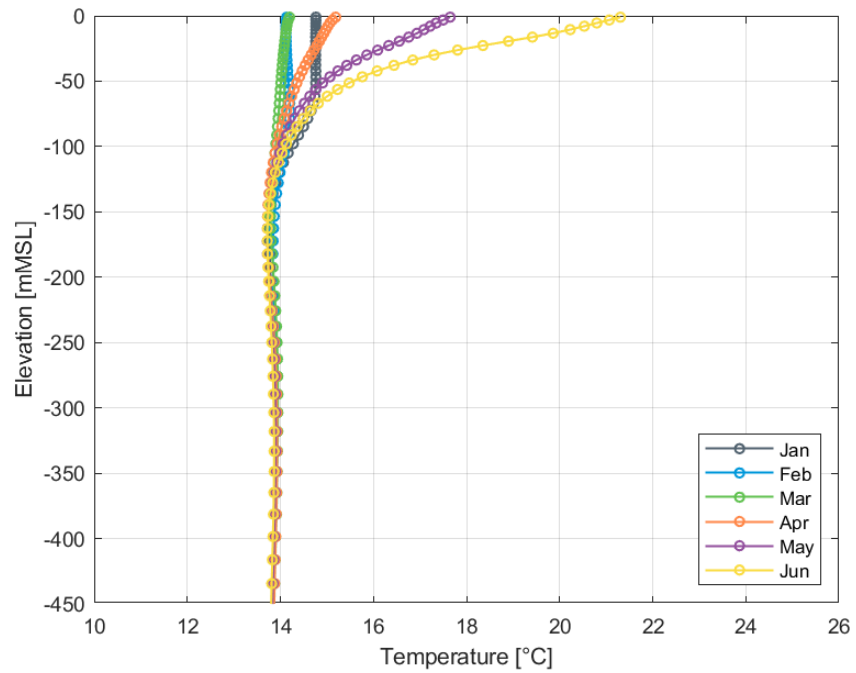


Figura 6.2 Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da Gennaio a Giugno)

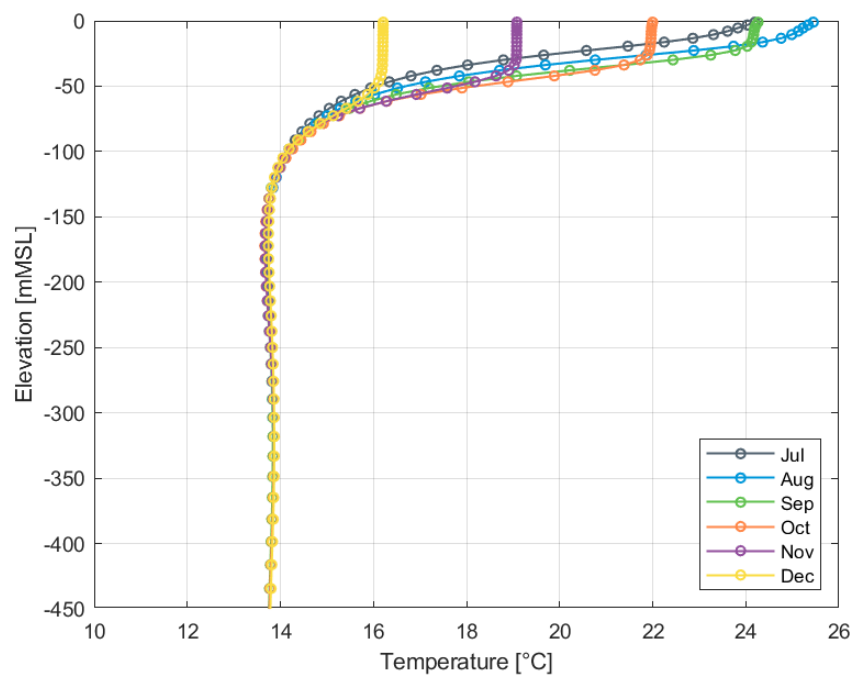


Figura 6.3 Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati CMEMS 1987-2019, da Luglio a Dicembre).

## 6.2 Salinit  dell'acqua di mare

I profili di Salinit  mensili lungo la colonna d'acqua sono stati valutati dai dati *hindcast* CMEMS per il periodo 1987-2019, come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 24 ore. I profili di Salinit  giornalieri sono stati estratti per il *Punto P1*.

Le statistiche annuali e mensili della Salinit  giornaliera sono fornite nella Tabella 6.2 e in Figura 6.4 a tre livelli della colonna d'acqua: in superficie, a met  colonna e al livello del fondale marino. I dati mostrano valori pi  alti e stabili negli strati pi  profondi, dovuti alla presenza della *Levantine Intermediate Water* (LIW). I profili medi mensili sono mostrati in Figura 6.5 e in Figura 6.6. i valori minimi di Salinit  si verificano da Maggio a Settembre nell'intervallo 30-50 m sotto la superficie, mostrando una stratificazione piuttosto forte.

La presenza di determinate masse d'acqua sar  discussa in questo paragrafo analizzando i diagrammi T-S ottenuti dai profili CMEMS estratti nel *Punto P1*. La Figura 6.7 mostra, nella parte in alto, il diagramma T-S per tutti i dati, mentre la media mensile   riportata da Gennaio a Giugno (nella parte in basso a sinistra) e da Luglio a Dicembre (nella parte in basso a destra). Come previsto, i diagrammi evidenziano la presenza della massa d'acqua superficiale di origine atlantica (MAW) identificabile da Salinit  minima e a un livello intermedio di origine levantina (LIW) evidenziata da un livello di Salinit  massima assoluto.

Tabella 6.2 Statistiche annuali e mensili della Salinit  giornaliera estratta in superficie, a met  colonna e sul fondo nel periodo 1987-2019 nel Punto P1 di Ichnusa

Parameter	Surface			Mid-column			Seabed		
	Mean Salinity [-]	Min Salinity [-]	Max Salinity [-]	Mean Salinity [-]	Min Salinity [-]	Max Salinity [-]	Mean Salinity [-]	Min Salinity [-]	Max Salinity [-]
All	38.7	38.5	38.9	38.0	37.0	38.4	38.7	38.5	38.9
Jan	38.7	38.6	38.8	38.1	37.4	38.4	38.7	38.6	38.8
Feb	38.7	38.6	38.9	38.0	37.0	38.3	38.7	38.6	38.9
Mar	38.7	38.6	38.8	38.0	37.0	38.4	38.7	38.6	38.8
Apr	38.7	38.6	38.8	37.9	37.3	38.3	38.7	38.6	38.8
May	38.7	38.6	38.9	37.9	37.2	38.3	38.7	38.6	38.9
Jun	38.7	38.6	38.9	37.9	37.2	38.3	38.7	38.6	38.9
Jul	38.7	38.6	38.8	37.9	37.4	38.2	38.7	38.6	38.8
Aug	38.7	38.5	38.7	37.9	37.5	38.2	38.7	38.5	38.7
Sep	38.7	38.5	38.7	38.0	37.5	38.3	38.7	38.5	38.7
Oct	38.7	38.6	38.8	38.0	37.6	38.3	38.7	38.6	38.8
Nov	38.7	38.5	38.9	38.0	37.6	38.3	38.7	38.5	38.9
Dec	38.7	38.6	38.9	38.1	37.7	38.4	38.7	38.6	38.9

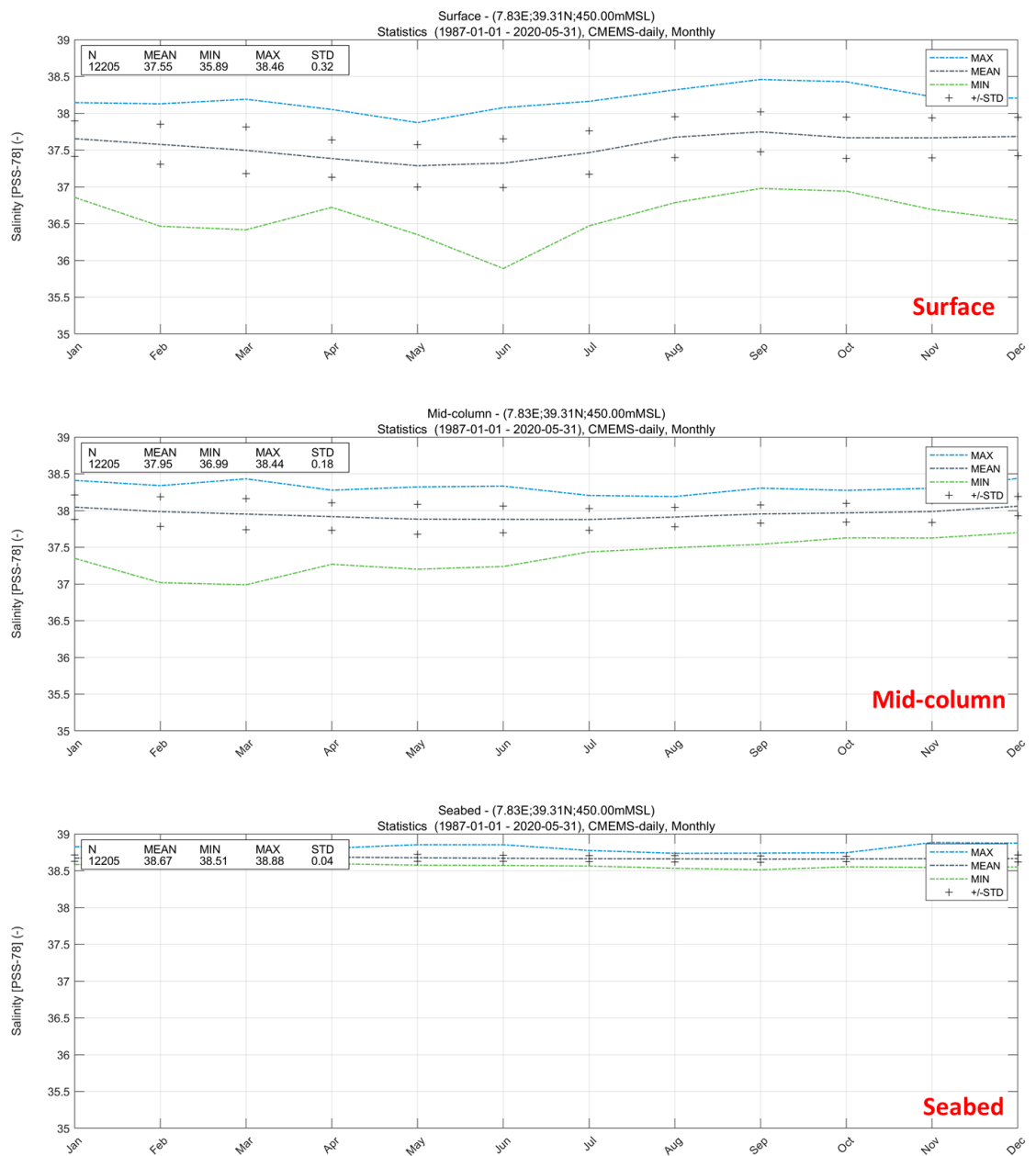


Figura 6.4 Statistiche annuali e mensili della Salinità giornaliera (1987-2019) in superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale marino (in basso).

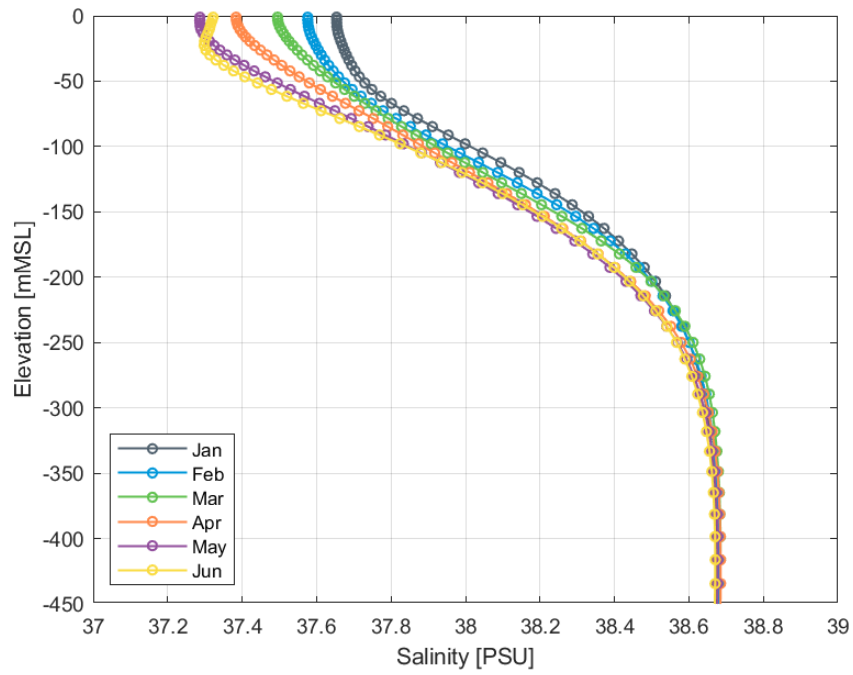


Figura 6.5 Salinit  media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da Gennaio a Giugno)

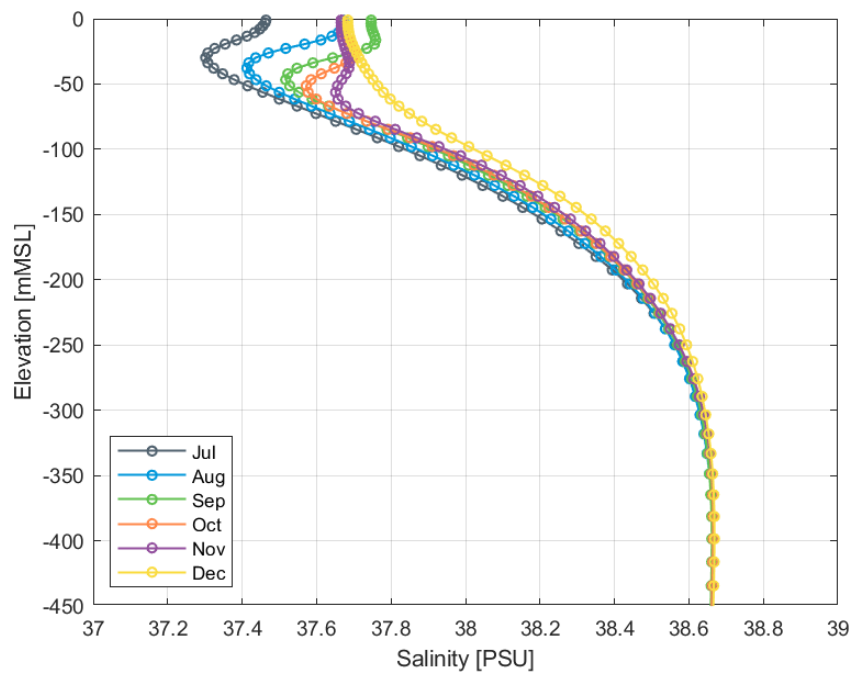


Figura 6.6 Salinit  media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da Luglio a Dicembre).



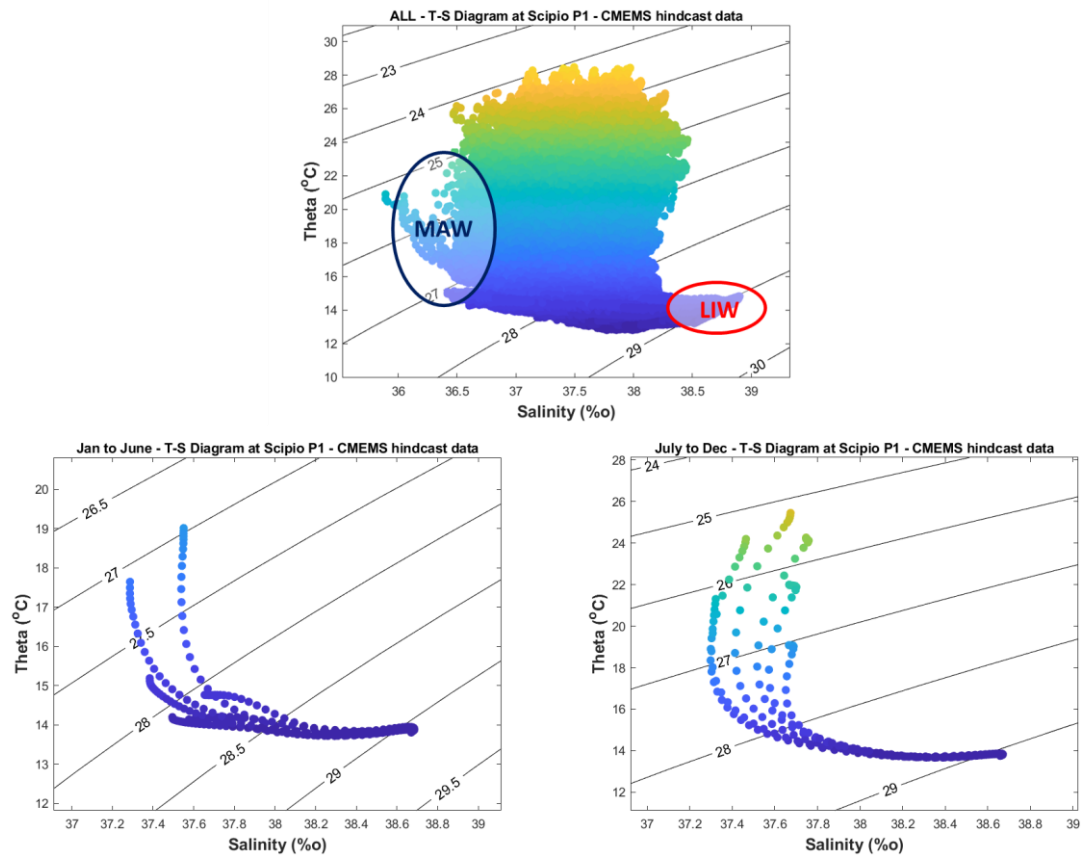


Figura 6.7: Diagramma T-S nel Punto P1 all'interno dell'area del Progetto del FOWF, per tutti i dati (in alto), per i dati medi mensili da Gennaio a Giugno (in basso a sinistra) e da Luglio a Dicembre (in basso a destra). Si noti che theta è la temperatura (°C); l'unità di misura della Salinità è per mille (PSU) o g/kg

## 7 Medicanes

La regione mediterranea è una delle più attive regioni ciclogenetiche del mondo, con una media climatologica di qualche migliaio di cicloni all'anno. Tra la grande quantità di cicloni sviluppatasi nel bacino, si possono trovare nella storia antica una serie di tempeste di breve durata ma eccezionalmente violente. Solo negli ultimi secoli questi rari eventi sono stati paragonati agli uragani, a causa dei forti venti associati.

### 7.1 Introduzione generale ai medicanes

I *Medicanes* (*MEDiterranean hurriCANES*) sono sistemi meteorologici su mesoscala che si formano nel bacino del Mediterraneo, dove le condizioni barocline forniscono l'instabilità atmosferica necessaria per la formazione di cicloni. Con il progresso delle immagini satellitari, la particolarità di queste tempeste è stata messa in evidenza e, per l'effettiva somiglianza con gli uragani, le tempeste degli ultimi anni sono state chiamate *Medicanes*. Queste tempeste rappresentano un rischio significativo per le aree marine *offshore* e costiere poiché provocano ingenti danni dovuti a eventi estremi di venti, precipitazioni e inondazioni associati alle tempeste.

Dagli anni 80' a oggi sono stati studiate alcune di queste tempeste e le principali caratteristiche meteorologiche possono essere catalogate come un sistema a bassa pressione che, anche se spesso di natura baroclina, può entrare in una nuova fase di sviluppo, spinto dalla convezione e dall'interazione aria-mare piuttosto che dall'instabilità baroclina, assumendo caratteristiche simili a quelle dei vortici tropicali:

- una simmetria verticale quasi perfetta,
- una copertura nuvolosa a forma di spirale con un occhio nel mezzo, corrispondente a una colonna d'aria senza vento sopra il centro della tempesta,
- un nucleo caldo visibile nelle anomalie positive del campo di temperatura.

Il termine "simil-tropicale" è stato introdotto per il fatto che, sebbene condividano caratteristiche simili a quelle dei cicloni tropicali, si sviluppano oltre i tropici (Homar et al., 2003 [31]; Gaertner et al., 2018 [32]). I cicloni simil-tropicali di media latitudine e gli attuali cicloni tropicali mostrano caratteristiche simili ma leggermente differenti. Le maggiori differenze tra i *medicanes* e le tempeste tropicali riguardano l'intensità e la durata (vedere Tabella 7.1):

- La durata dei *medicanes* è ridotta a qualche giorno a causa dell'estensione limitata del Mar Mediterraneo, e raggiungono la loro forma "tropicale" solo per un breve periodo, mentre conservano le caratteristiche non-tropicali per il resto del tempo;
- L'estensione orizzontale è generalmente limitata a qualche centinaio di chilometri;
- L'intensità raramente supera la Categoria 1 della scala Saffir-Simpson (Miglietta et al., 2011[33]; Miglietta and Rotunno, 2019 [34]).

Le loro principali somiglianze sono il loro aspetto nelle immagini satellitari e le loro caratteristiche dinamiche e termodinamiche: un nucleo caldo la cui anomalia decresce con l'altitudine, una debole variabilità verticale del vento, una forte rotazione intorno al punto minimo di pressione (alta vorticità di basso livello) e celle convettive organizzate in bande di pioggia che si estendono dal fronte dell'occhio (Pravia-Sarabia et al., 2020 [35]).

Tabella 7.1: Principali differenze tra medicane e tempeste tropicali (da [34] [38])

	Tropical Cyclone	Medicane
Radius [km]	fino a 1000	Fino a 150
Min SLP [hPa]	910	980
Vmax [km/h]	295	180

Le caratteristiche principali dei *medicane* e i valori tipici dei loro parametri, derivati dai pochi eventi osservati, possono essere riassunti come segue:

- Un raggio compreso tra 70 e 200 km
- Una durata compresa tra 12 h e 5 giorni
- Una distanza percorsa compresa tra 700 and 3000 km
- Nella maggior parte dei casi si sviluppa un occhio chiaramente definito e visibile fino a 3 giorni. In alcuni casi, l'occhio non compare, mentre in altri si sviluppa due volte (scomparendo quando la tempesta attraversa zone di terra)
- Velocità del vento fino a circa 40 m/s
- Le regioni di genesi più frequenti sono le isole Baleari e il Mar Ionio
- La maggior parte dei *medicane* si verifica in autunno, ma alcuni sono stati rilevati anche in inverno e in primavera.

La velocità del vento sopra descritta è considerata superficiale, ovvero ad una altezza standard di 10 m sopra il terreno.

## 7.2 Frequenza

I *medicane* sono considerati fenomeni rari a causa del piccolo numero di osservazioni. Un elenco aggiornato di possibili *medicane* rilevati dalle immagini satellitari conta poche decine di eventi in un periodo di 25 anni (1982-2007). Con una frequenza media di uno o due eventi all'anno e data la mancanza di database sistematici e pluridecennali, una valutazione oggettiva dei rischi a lungo termine dei venti indotti dai *medicane* è impossibile con i metodi standard.

Una valutazione sistematica della frequenza e delle proprietà statistiche dei *medicane* è resa ancora più ardua dal fatto che non è semplice tracciare una linea netta di demarcazione tra i *medicane* e i cicloni mediterranei "ordinari". Infatti, i *medicane* sono spesso disturbi baroclini nelle prime fasi della loro vita, che subiscono una transizione verso dinamiche di tipo tropicale ogni volta che si presentano diversi fattori ambientali favorevoli.

I metodi di rilevamento e tracciamento utilizzano in genere algoritmi applicati ai dati globali di rianalisi ricostruiti con modelli meteorologici a risoluzione spaziale crescente (*downscaling*). La prima sfida, anche per i più moderni prodotti di rianalisi, è che la risoluzione di *downscaling* deve essere abbastanza alta da comprendere la scala spaziale dei *medicane*, che può essere anche inferiore a cento chilometri (Cavicchia and von Storch, 2012 [40]). Inoltre, i principali algoritmi di rilevamento sono stati ideati per i cicloni tropicali e devono quindi essere adattati al caso dei *medicane*. La letteratura su questo argomento specifico è ampia e quale sia il metodo migliore da essere utilizzato per i *medicane* è ancora una questione aperta. Un metodo di tracciamento indipendente dal tempo sembra essere necessario per rilevare i *medicane* nella realtà e tale approccio consente anche di rilevare tempeste simultanee. Infatti, potrebbe verificarsi la reale coesistenza (nel tempo) di due *medicane* all'interno di un dominio, e la capacità di rilevarne più di uno alla volta potrebbe essere della massima importanza.

Una statistica sperimentale pluridecennale viene realizzata in (Cavicchia et al., 2014 [41]) applicando un algoritmo di rilevamento dei campi atmosferici ridotti ottenuti dalle rianalisi

NCEP/NCAR per il periodo 1948-2011 che ha portato all'identificazione di 99 *medicanes*. I *pattern* geografici delle genesi e delle traiettorie dei *medicanes* rilevati sono mostrati in Figura 7.1. La maggior parte dei *medicanes* identificati si forma in due aree specifiche del Mediterraneo:

- **Mediterraneo Occidentale**, delimitato approssimativamente dalle Isole Baleari e dalla costa spagnola a Ovest, dalla Francia meridionale a Nord e dalle coste Occidentali della Corsica e della Sardegna ad Est,
- **Mar Ionio**, tra Sicilia e Grecia, che si estende a Sud fino alla costa della Libia.

Altre due aree di formazione, caratterizzate da un minor numero di eventi, sono il Mar Egeo e il Mar Adriatico. Si rileva un'attività molto bassa nel bacino levantino nel Mediterraneo orientale.

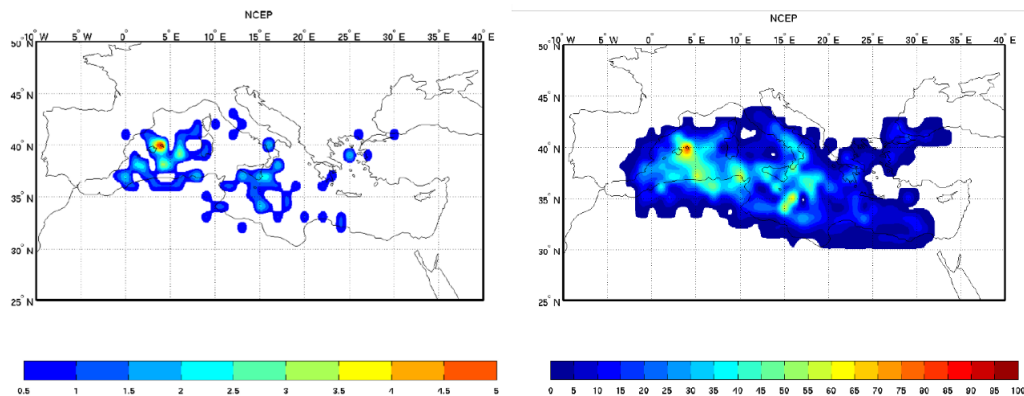


Figura 7.1: Densità di genesi (a sinistra) e densità di passaggio (a destra) da [41]

Il numero di *medicanes* al mese (a sinistra) e per stagione (a destra) è riportato in Figura 7.2. La variabilità da un anno all'altro è forte. Il trend complessivo è trascurabile (+0.015 eventi/anno). La distribuzione stagionale dei *medicanes* rilevati è caratterizzata da nessun evento in estate, un'elevata attività durante l'intero autunno, un picco a gennaio e una coda che si estende da Febbraio fino a Maggio. La frequenza di questi fenomeni è quindi estremamente bassa, 1.57 +/- 1.3 eventi a stagione (da Agosto fino a Luglio dell'anno successivo), coerentemente con l'assunzione empirica dei *medicanes* come eventi rari.

C'è una marcata differenza tra le proprietà statistiche de *medicanes* nelle due aree dove se ne forma il maggior numero: la frequenza di formazione dei *medicanes* nel Mediterraneo occidentale aumenta costantemente durante l'autunno e inizia a decrescere a Gennaio, con una lunga coda che si estende durante la primavera. Nell'altro caso, gli eventi nel Mar Ionio mostrano un netto picco a Gennaio, con un'attività molto più bassa durante l'autunno e la primavera.

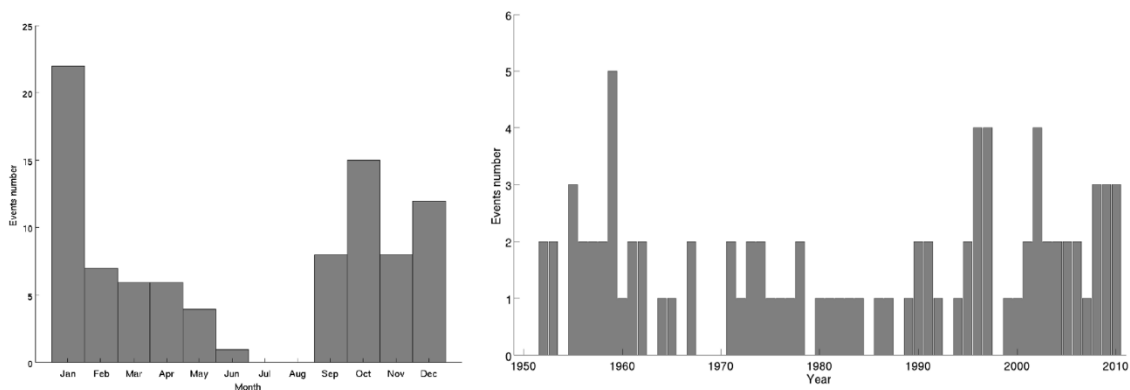


Figura 7.2: Numero di eventi al mese (a sinistra) e per stagione (a destra) da [41]

### 7.3 Medicanes nel clima futuro

L'impatto del cambiamento climatico antropogenico (ACC) sui *medicanes* è comunemente investigato attraverso i modelli climatici regionali e le proiezioni risultanti mostrano una diminuzione del numero di *medicanes* nel 21° secolo, accompagnata da un aumento dell'intensità massima del vento (Cavicchia et al., 2014b [42]). Tuttavia, i risultati basati sui modelli climatici regionali sono affetti da importanti limitazioni che potrebbero portare a una rappresentazione non corretta delle caratteristiche dei *medicanes* e a sovrastimare la loro intensità. Queste limitazioni sono legate alla mancanza di algoritmi di accoppiamento atmosfera-oceano e alla mancanza di un legame interattivo a scale incrociate con quella dei modelli climatici globali.

Il recente lavoro di González-Alemán et al., 2019 [43] è il primo studio in cui un modello globale accoppiato a un'alta risoluzione atmosferica orizzontale viene usato per studiare gli effetti dell'ACC su molteplici caratteristiche dei *medicanes*. Il modello adottato HiFLOR (*High – Resolution Forecast – Oriented Low Ocean Resolution*) si è dimostrato uno strumento utile nello studio della risposta dei cicloni tropicali all'ACC, in quanto ha una risoluzione orizzontale della griglia (~25 km) che permette di studiare la struttura dei *medicanes*, tiene esplicitamente conto delle dinamiche non lineari associate ai sistemi non-tropicali (per esempio leggi di cutoff e rottura d'onda) ed è uno dei pochi modelli climatici globali in grado di catturare TC di categoria 4 e 5. Inoltre, essendo un modello accoppiato, include la miscelazione oceanica indotta dal vento e la rappresentazione dello strato misto oceanico.

I ricercatori studiano i rischi collegati ai *medicanes* attraverso le seguenti tre simulazioni HiFLOR di 50 anni:

- una climatologica (**CLIM**), rappresentativa dello stato climatico medio durante gli anni 1986-2005;
- il futuro prossimo (**EARLY**) con il *Representative Concentration Pathway* (RCP4.5);
- il futuro lontano (**LATE**) con l'RCP4.5.

È stata trovata una serie di cambiamenti rilevanti nei rischi legati ai *medicanes* entro la fine del 21° secolo. Sebbene in numero inferiore, è probabile che i *medicanes* diventino più intensi in autunno rispetto alla primavera e all'inverno e che sviluppino nuclei caldi più profondi di maggiore durata, il che significa una struttura tropicale più robusta e, di conseguenza, l'aumento della probabilità di raggiungere l'intensità degli uragani. Le simulazioni prevedono precipitazioni più intense, che sono anche motivo di preoccupazione dati i rischi di alluvione legati a queste tempeste. Inoltre, i *medicanes* tendono a cambiare i loro punti preferiti di genesi e passaggio, diventando più comuni nel Mar Ionio e meno comuni nel Mar Mediterraneo Occidentale.

Si trovano cambiamenti significative solo nel futuro lontano rispetto al futuro vicino, ciò significa che i *medicanes* probabilmente non cambieranno sostanzialmente nei prossimi decenni ma risentiranno significativamente dell'ACC entro la fine del 21° secolo. L'assunzione presente più forte è nello scenario RCP4.5 adottato, che tiene conto degli sforzi considerevoli che dovrebbero essere messi in atto per ridurre le emissioni cumulative di gas serra.

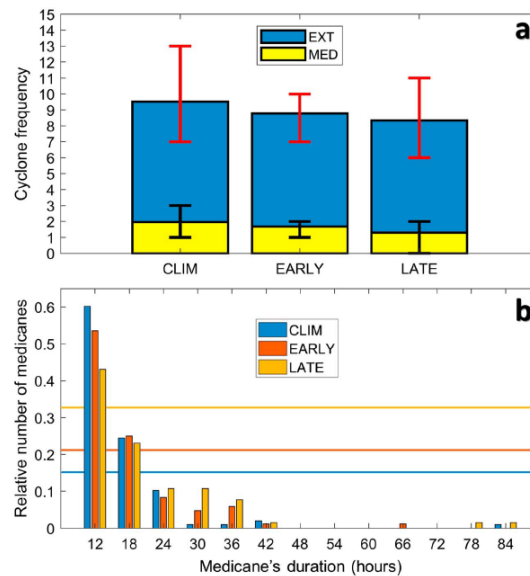


Figura 7.3: (a) Variazioni nella frequenza media annuale dei medicanes (MED) e dei cicloni non-tropicali (EXT). La barra superiore e quella inferiore indicano rispettivamente il 75° e il 25° percentile. (b) Numero relativo (numero di *medicane* con durate divise per il numero totale dei *medicane* nel periodo) dei *medicane* in base alla loro durata in ore. Viene inoltre raffigurata (linee orizzontali) la somma del numero di *medicane* di durata maggiore di 24 ore.

## 7.4 Modellazione dei Medicanes

In questa sezione si descrive la modellazione numerica eseguita per valutare i parametri meteomarini indotti dal passaggio di un possibile *medicane* nel sito del FOWF. Come discusso nelle sezioni precedenti, l'algoritmo per il rilevamento e il tracciamento dei *medicane* è ancora una questione aperta, quindi manca un elenco ben definito di *medicane* storici, così come un database delle traiettorie stimate (cosiddette "best-tracks"). Sulla base della lista delle migliori tracce disponibili, si è scelto di concentrare la modellazione ai seguenti due casi:

- *Ilona* (19-22 Gennaio 2014), scelto perché uno dei più vicini al sito
- *Rolf* (6-9 Novembre 2011), scelto perché uno dei più lunghi e intensi degli ultimi anni.

### 7.4.1 Metodologia

Un *hindcasting* affidabile delle condizioni meteomarine indotte da una tempesta tropicale richiede la messa a punto di una catena di modelli numerici accoppiati (meteorologico, di moto ondoso e idrodinamico) che richiederebbero inutilmente tempo e costi per gli obiettivi di questo studio, dato che lo Stretto di Sardegna non è un'area soggetta a cicloni tropicali. Tuttavia, è stata adottata una metodologia semplificata con l'obiettivo di stimare l'energia potenziale dell'onda indotta nel sito del progetto del FOWF dal passaggio dei *medicane* del passato. La metodologia è costituita dall'applicazione dei seguenti modelli numerici:

- MIKE 21 *Cyclone Wind Generation*
- MIKE 21 *Spectral Waves FM (SW)*
- MIKE 21 *Hydrodynamic FM (HD)*

Il campo del vento è stato definito applicando il modello parametrico di Holland (i.e., Holland, 1980 [50]) attraverso il modulo *Cyclone Wind Generation* di MIKE 21. Il vento e la pressione generate dal ciclone sono quindi descritti da un semplice modello parametrico basato su parametri come la posizione dell'occhio del ciclone, il raggio della velocità del vento massima, etc. La maggior parte di questi parametri è generalmente disponibile da pubblicazioni



meteorologiche o da banche dati. Bisogna evidenziare che la metodologia qui presentata non tiene in conto le condizioni meteomarine trovate dal *medicane* al momento del suo sviluppo, pertanto le onde e le correnti *hindcast* devono essere interpretate come potenziali contributi alle condizioni locali dovute al passaggio delle tempeste simulate.

Le simulazioni d'onda e di corrente sono state eseguite con i modelli applicati in modalità non-stazionaria a forzati dai campi di venti ricostruiti, ottenuti per ogni percorso ciclonico. I modelli sono stati applicati su un'ampia area (vedere Figura 7.4), per evitare effetti di confine nel sito *target* e per riprodurre il campo d'onda dalla fase iniziale della tempesta, che tipicamente si generano nella zona delle Baleari, lungo la costa Spagnola o nel Canale di Sicilia. Per ogni percorso ciclonico sono stati registrati il campo d'onda indotto sull'intero dominio e le serie temporali d'onda nei punti di interesse.

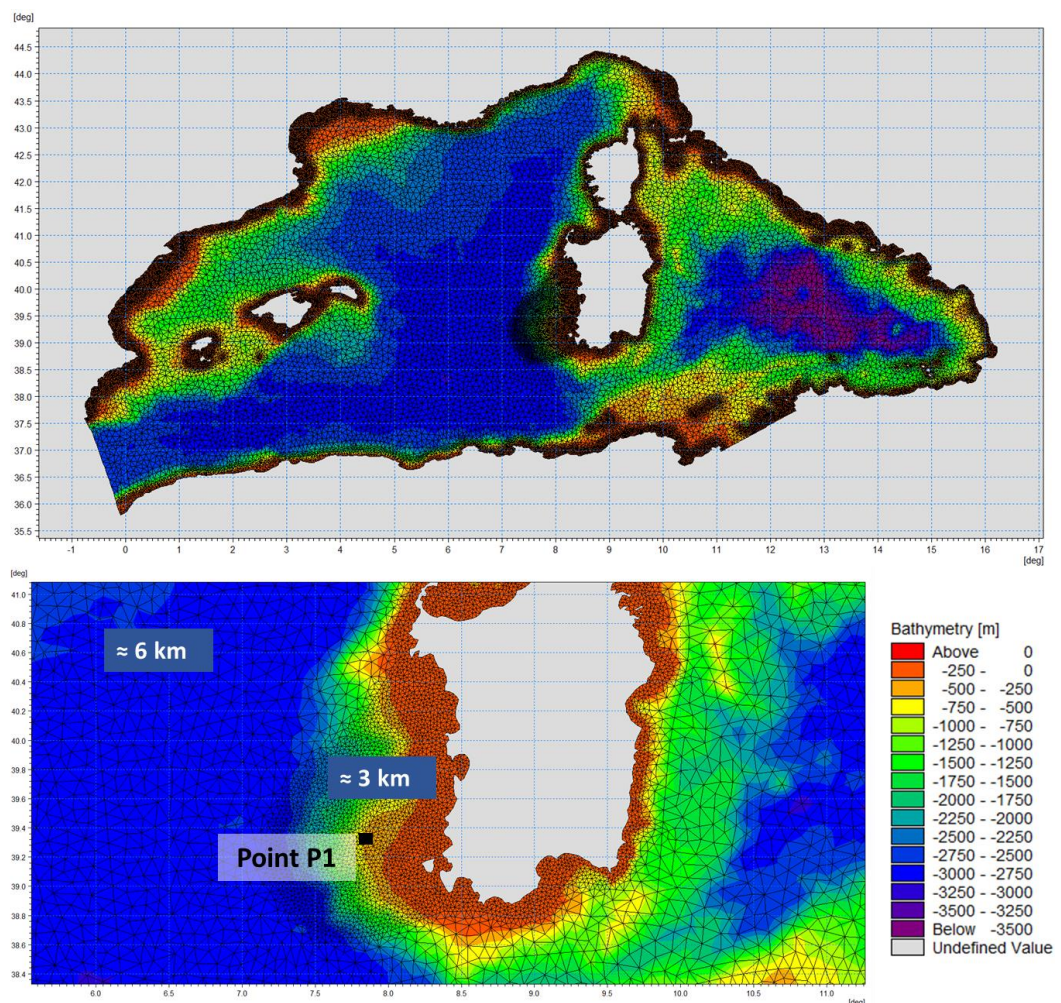


Figura 7.4: Dominio del modello, griglia computazionale e batimetria utilizzata per la modellazione dei *medicane*. Marcato in nero il punto P1

Sono stati modellati i due *medicane* selezionati tra la documentazione storica e sono state stimate le condizioni d'onda e delle correnti nella zona del FOWF. I risultati sono riassunti nelle sezioni seguenti, dopo una breve descrizione di ciascuna tempesta.



#### 7.4.2 Ilona (19-22 Gennaio 2014)

La tempesta si è formata la mattina del 19 Gennaio 2014 sulla costa orientale spagnola, tra Malaga e Gibilterra. I forti venti sono stati associati ad un'aria alta di bassa pressione precedente alla formazione del ciclone mediterraneo. La stazione meteorologica ufficiale dell'aeroporto di Gibilterra ha riportato valori sostenuti con un massimo di 103.7 km/h alle 6.50 UTC.

Il sistema inizialmente si formò come un ciclone extratropicale e si trasformò rapidamente in una tempesta subtropicale nelle ore successive. I dati di tre stazioni costiere spagnole (Alhaurin, Estepona ed El Palo) hanno mostrato che la pressione minima raggiunta è stata di circa 989 hPa nelle prime ore del 19 Gennaio. Verso le 12 UTC, la direzione del vento recuperate dai dati satellitari Advanced Scatterometer (ASCAT) ha mostrato un vortice definite con la velocità massima di circa 50 nodi.

Dopo la formazione il ciclone si è spostato a Est, seguendo la costa del Nord Africa. Piogge intense e raffiche di vento fino a 80 km/h hanno colpito l'Algeria durante la notte. Durante questo periodo la pressione nell'occhio del ciclone salì ad un valore stabile di 997 hPa.

Durante la notte del 19 Gennaio e la prima mattina del 20 Gennaio, quando il ciclone stava interagendo con l'orografia dell'Isola di Sardegna, la visione del vortice sparì dalla conformazione delle nubi e tornò evidente nella tarda mattina del 20 Gennaio 2014.

Tra le 12 UTC e le 16 UTC il ciclone si sposta nel Tirreno approdando sulla costa campana, tra Napoli e Salerno. Il minimo di bassa pressione si ottiene alle 15 UTC vicino Napoli, le misurazioni di pressione sull'isola di Procida riportano un valore di raffica di vento massima di 98 km/h e una pressione minima di 998 hPa alle 15:45 UTC. Successivamente, l'interazione tra il ciclone e l'orografia divenne significativa e il vortice scomparire fino alla notte del 20 Gennaio, quando il sistema di bassa pressione entra in contatto con il Mar Adriatico.

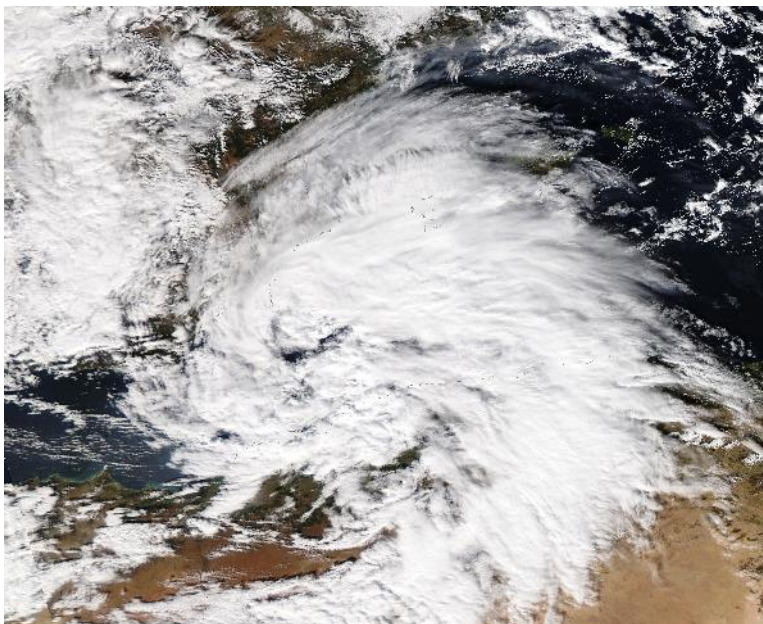


Figura 7.5: Medicane Ilona: MODIS Aqua Imagery del 19 Gennaio 2014 – UTC (da [46])

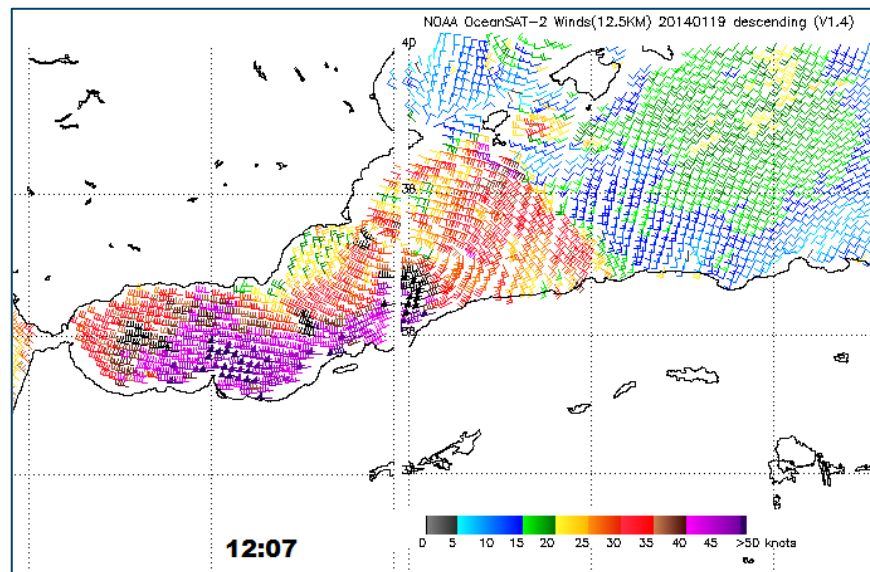


Figura 7.6: Venti osservati da satellite Metop ASCAT il 19 Gennaio (da [46])

La Figura 7.7 mostra la traiettoria di Ilona utilizzata in questo studio, presa da [46], e la corrispondente evoluzione della pressione minima nel tempo. Ai fini di questo studio, la modellazione è stata limitata al periodo compreso tra il 19 Gennaio h09:00 UTC quando le tempeste hanno iniziato a generarsi, fino al 20 Gennaio h16:00 UTC quando atterra sulla costa Campana nell'Italia Meridionale.

L'onda modellata e i campi idrodinamici sono brevemente descritti in Figura 7.9 e Figura 7.10, che mostrano la posizione dell'occhio del medicane (a), il campo d'onda al picco della tempesta (b) e le serie temporali dell'altezza dell'onda significativa e della velocità della corrente mediate sulla profondità in un punto P1 del FOWF (marcatore magenta in (b)), rispettivamente. Il valore massimo di  $H_{m0}$  è di circa 3,6 m, e si verifica il 20 gennaio intorno alle 10 UTC quando la tempesta si dirige verso est passando sopra il canale di Sardegna. Le correnti indotte (mediate sulla profondità) sembrano essere trascurabili.

Secondo i risultati sopra descritti, i valori massimi di  $H_{m0}$  indotti dallo sviluppo di Ilona sul Mare di Sardegna sono di circa 8-9 m e si verificano nel canale di Sardegna.

L'energia delle onde generata nel sito FOWF dal passaggio di Ilona è inferiore a quella delle tempeste più violente verificatesi nell'area FOWF entro il periodo di retromarcia di 42 anni analizzato nel presente rapporto, confermando che il passaggio di questa tempesta di tipo tropicale - sebbene intenso, non è determinante per l'intensità dell'energia ondosa più alta nell'area FOWF con il clima attuale.

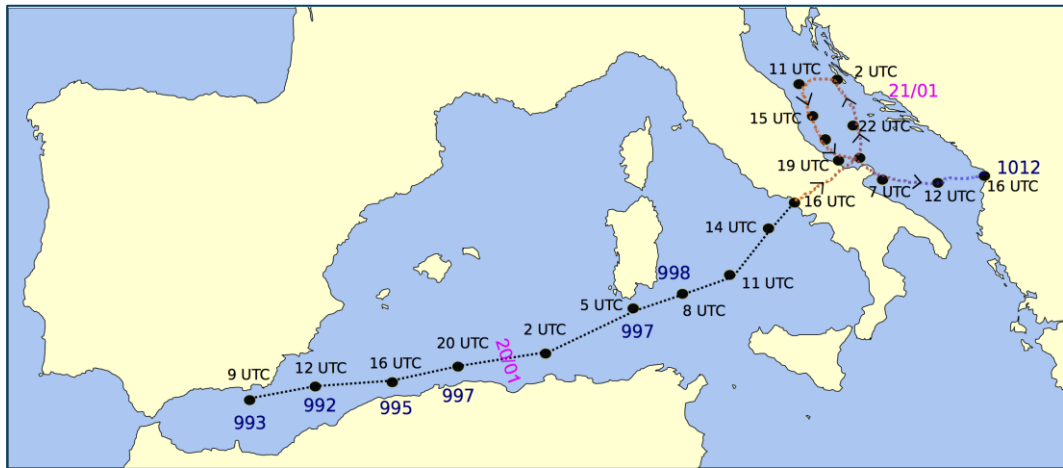


Figura 7.7: Traiettoria del Medicanne Ilona (da [46])

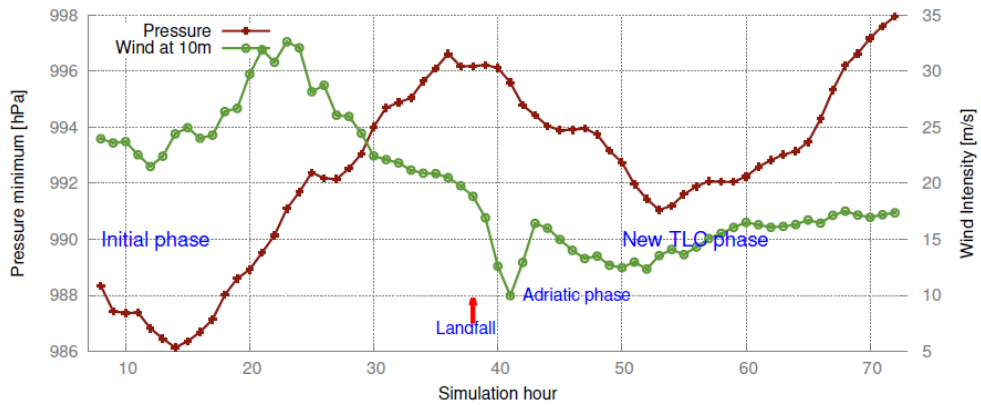


Figura 7.8: Medicanne Ilona: evoluzione temporale simulata del centro di pressione e la velocità del vento secondo [46]

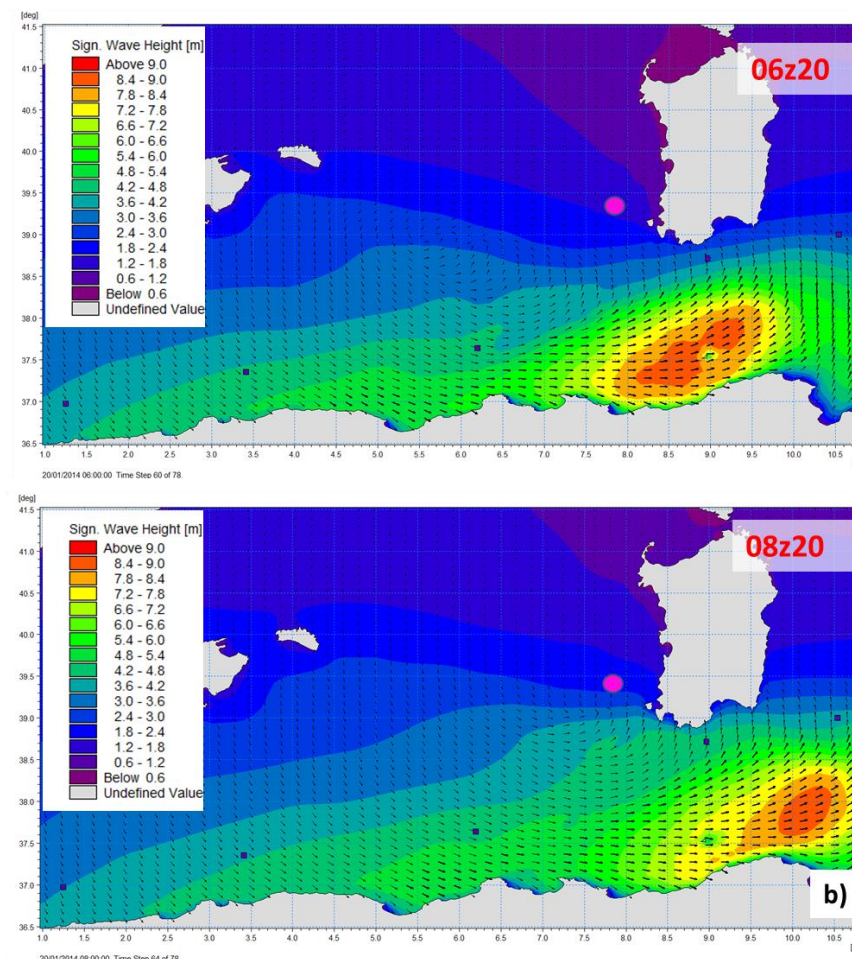
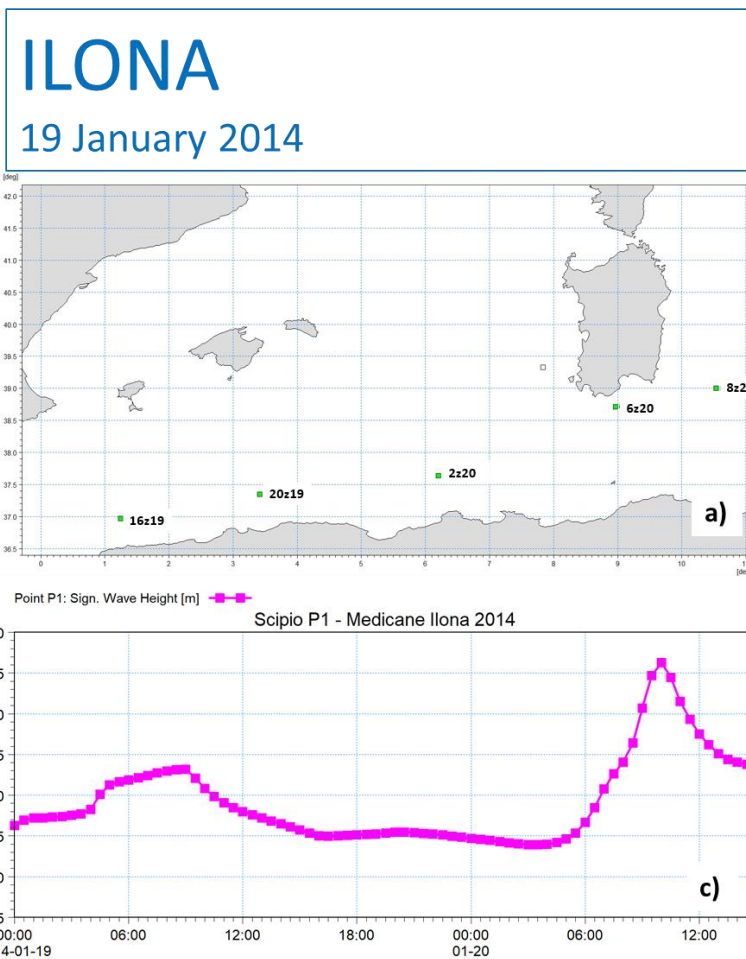


Figura 7.9: Medicane Ilona: risultati della modellazione di onda. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo d'onda durante il picco della tempesta (b) e la serie temporale di altezza d'onda significative presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta in b))



# ILONA

## 19 January 2014

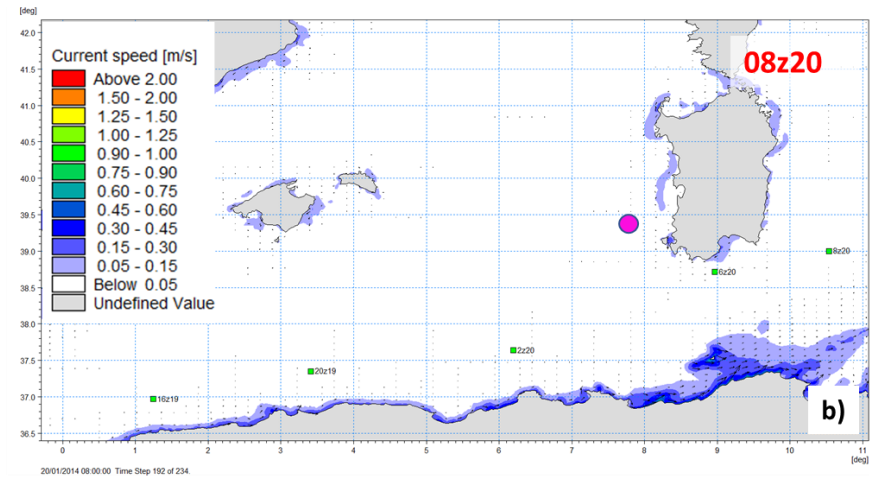
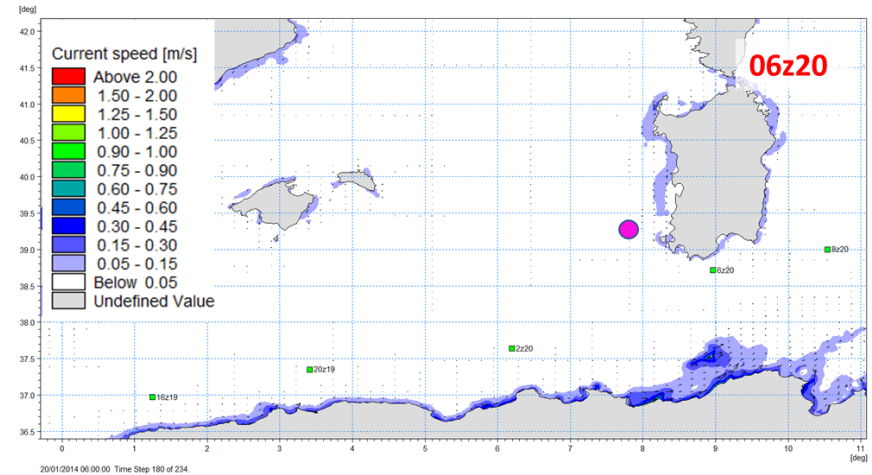
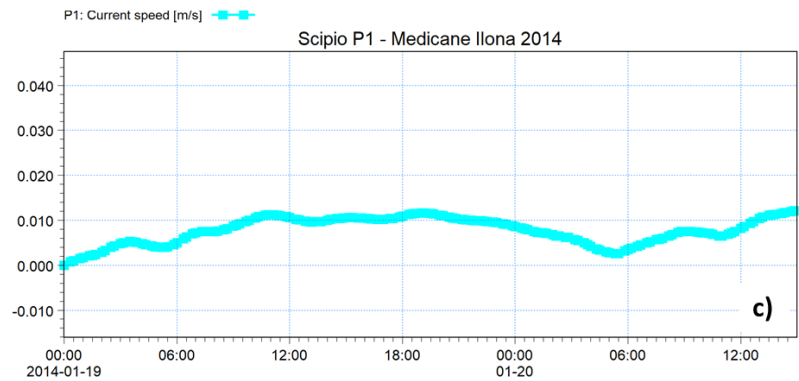
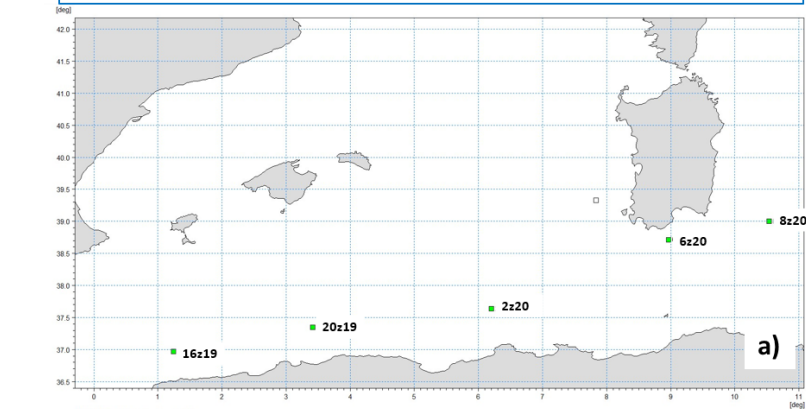


Figura 7.10: Mediane Ilona: risultati da modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo di corrente durante il picco della tempesta (b) e evoluzione temporale della corrente mediate sulla profondità presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta in b))

### 7.4.3 Rolf (4-9 Novembre 2011)

La tempesta denominata Rolf è probabilmente la più intensa, la più ampia e la più duratura *medicane* mai registrata in termini di velocità del vento (Dafis et al., 2018 [47]).

La tempesta tropicale di novembre 2011 è iniziata nel periodo dal 4 al 6 novembre 2011, quando un sistema extratropicale si è lentamente trasformato in una bassa subtropicale sulle calde acque del Mar Mediterraneo. Man mano che la tempesta si spostava lentamente verso ovest, e mentre continuava il suo movimento verso ovest, si è lentamente organizzata e il 7 novembre 2011 si è trasformata in una perturbazione subtropicale. Più tardi quel giorno, la perturbazione subtropicale si trasformò e si rafforzò in una depressione tropicale al largo delle coste della Francia. Verso la fine del 7 novembre, la tempesta è stata aggiornata allo stato di tempesta tropicale poiché si è rafforzata in modo significativo. L'8 novembre 2011, la tempesta ha continuato a rafforzarsi man mano che si avvicinava alla Francia. Alla massima intensità, la tempesta ha avuto una bassa pressione minima di 991 hPa. Si stima che la velocità del vento abbia raggiunto i 45 nodi secondo varie tecniche di analisi satellitare. Il 9 novembre, tuttavia, la tempesta è atterrata nel sud-est della Francia, vicino a Hyères, dove si è dissipata completamente poco dopo.

Nel complesso, la tempesta tropicale ha causato gravi inondazioni in alcune parti della Spagna, dell'Italia e della Francia. Dal 6 all'8 novembre 2011, la tempesta ha prodotto un totale di 600 mm di pioggia in circa 72 ore sull'Europa sudoccidentale. Sia in Francia che in Italia, le forti piogge della tempesta hanno causato lo straripamento di molti fiumi dalle loro sponde, provocando l'allagamento di più città. Un totale di 12 persone sono morte a causa della tempesta.

Nel lavoro di Koseki et al., 2021 [48] gli autori si sono concentrati su questa tempesta per studiare la risposta di un *medicane* al futuro cambiamento climatico. Implementando un ridimensionamento del modello WRF fino a una risoluzione spaziale di 5 km, gli autori hanno riprodotto lo stesso ciclone (cioè Rolf) nelle condizioni climatiche attuali (PRS) e in diverse condizioni di pseudo riscaldamento globale (denominate PGW). Le simulazioni dell'insieme hanno rivelato che il riscaldamento globale sembra indurre un cambiamento nella traiettoria del ciclone, probabilmente a causa dei cambiamenti nell'intensità della tempesta stessa.

Figura 7.12 mostra la traiettoria di Rolf come descritta da [48], dove la linea nera è da osservazioni di ERA5 e quella grigia da NOAA. Figura 7.13 mostra la corrispondente evoluzione della pressione minima nel tempo secondo le simulazioni condotte dagli autori nella situazione climatica attuale (PRS) e in condizioni di pseudo riscaldamento globale (PGW). Ai fini del presente studio, abbiamo fatto riferimento alla traiettoria della linea nera di Figura 7.12 e alla serie temporale PRS della pressione sul livello del mare al centro del ciclone in Figura 7.13.

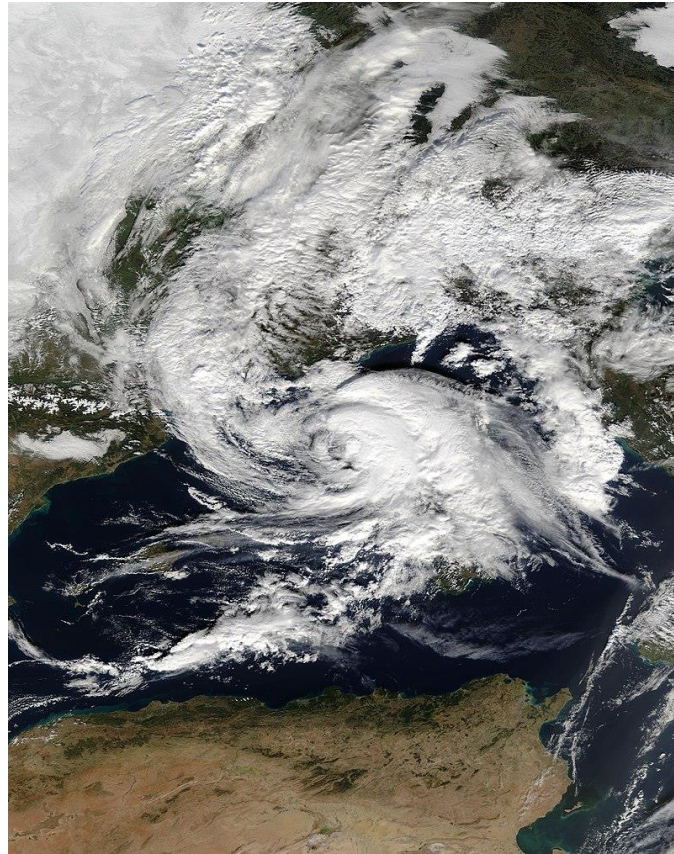


Figura 7.11: Medicane Rolf: MODIS Aqua Imagery dell' 8 Novembre 2011 10:30UTC (da Tropical Storm Rolf - Wikipedia)

L'onda modellata e i campi idrodinamici sono brevemente descritti in Figura 7.14 e Figura 7.15, mostrano la posizione dell'occhio del medicane (a), il campo d'onda al picco della tempesta (b) e le serie temporali dell'altezza dell'onda significativa e della velocità della corrente media di profondità in un punto P1 di FOWF (marcatore magenta in b)), rispettivamente. Il valore massimo di  $H_{m0}$  è di circa 7,0 m, e si verifica il 7 novembre alle 12 UTC quando l'occhio della tempesta si stava spostando verso est verso il Mar di Sardegna. Le correnti indotte (media di profondità) sembrano essere praticamente trascurabili.

Secondo i risultati sopra descritti, la tempesta Rolf ha determinato la generazione di una notevole energia ondosa nel Mar di Sardegna durante il suo passaggio. Ciò è confermato anche dai dati MWM, come mostrato in Figura 7.16 che riporta le serie temporali del vento e delle onde al punto P1. Tuttavia, i valori massimi stimati di  $H_{m0}$  indotti al FOWF sono ancora inferiori alle tempeste più violente che si sono verificate nell'area del FOWF entro il periodo di retromarcia di 42 anni analizzato nel presente rapporto, a conferma dell'importanza del passaggio di tempeste di tipo tropicale, ma non è probabile che sia determinante per l'intensità della più alta energia delle onde nell'area FOWF.



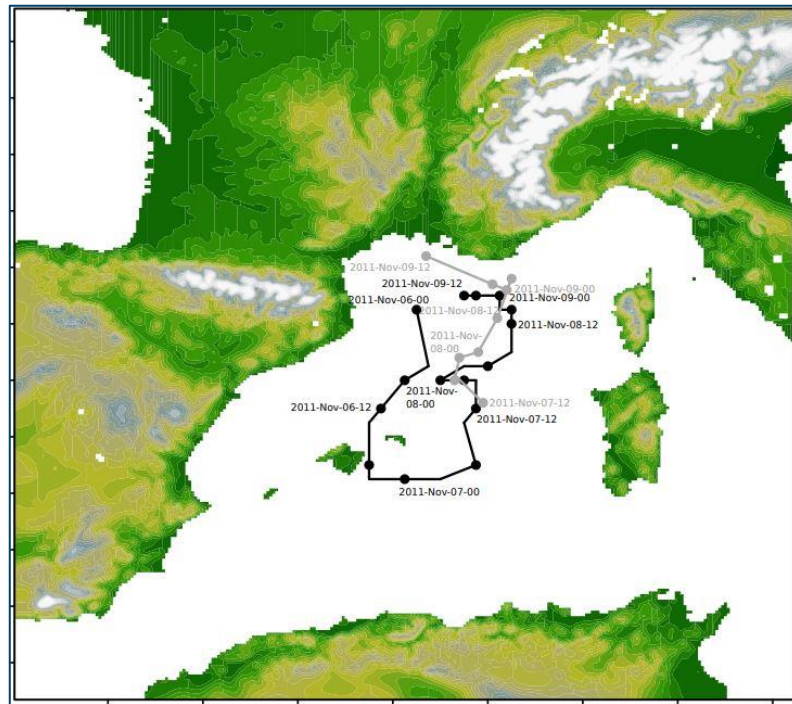


Figura 7.12: Traiettoria del Medcane Rolf (da [48]) adottata in questo studio

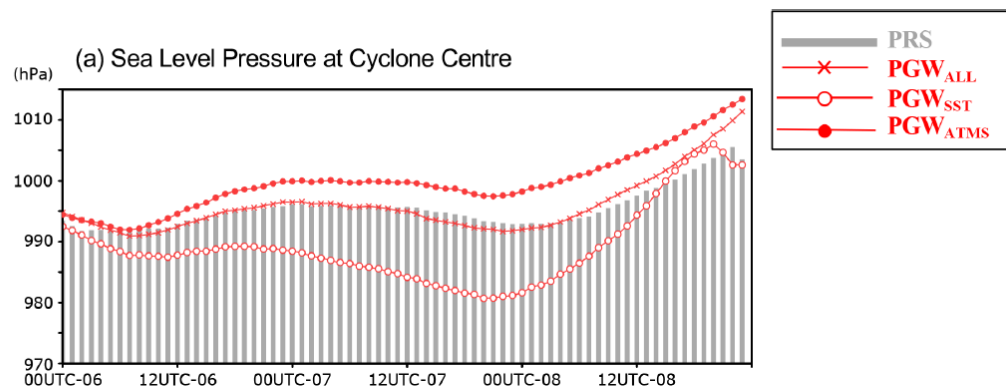


Figura 7.13: Medcane Rolf: serie temporale di pressione a livello del mare (SLP) al centro del ciclone: le barre grigie e le linee rosse denotano le variabili rispettivamente PRS e PGWs. Tutte le variabili rappresentano la media d'insieme. Ai fini di questo studio, è stata simulata la serie temporale PRS. Da [48].

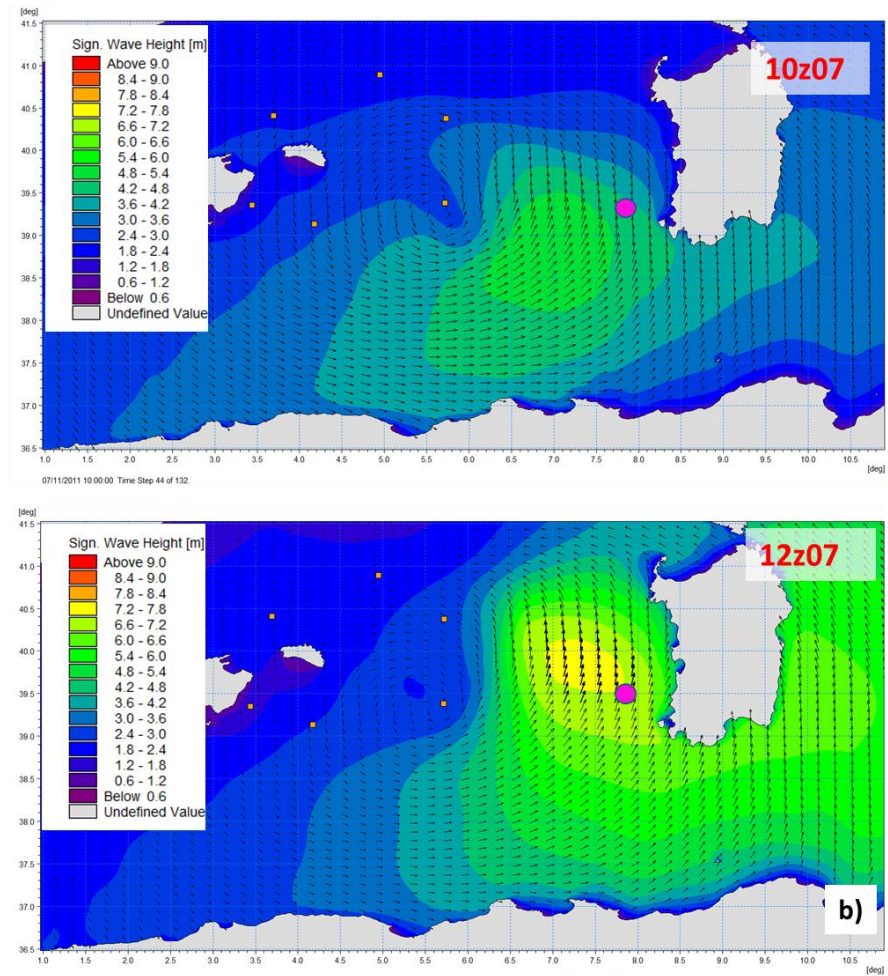
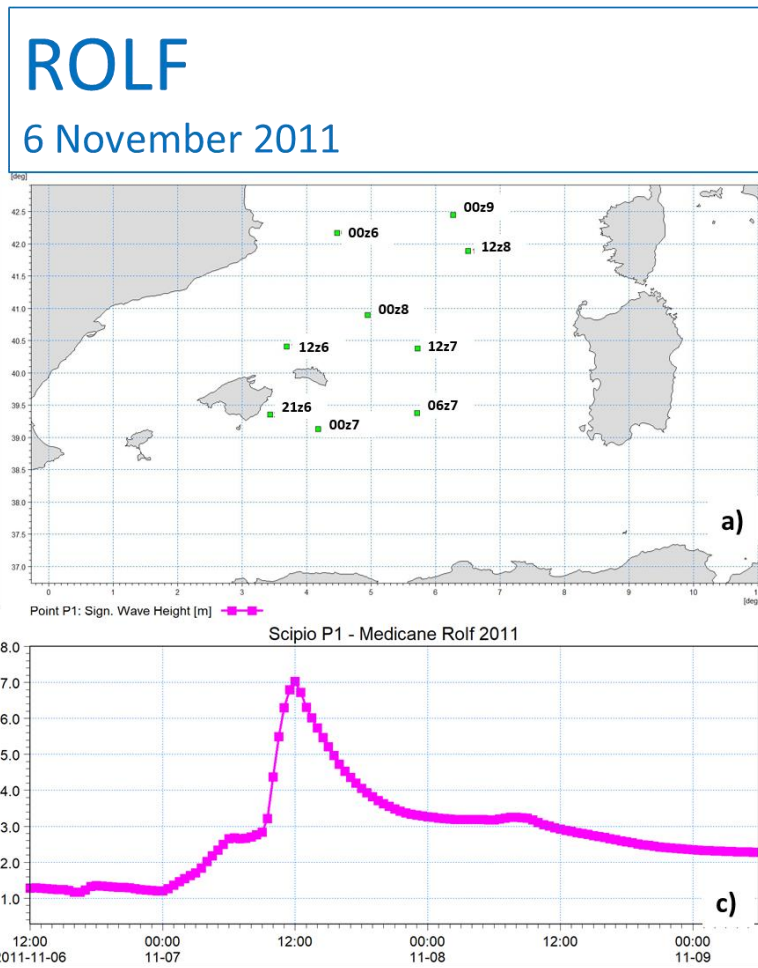


Figura 7.14: Mediane Rolf risultati della modellazione di onda. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo d'onda durante il picco della tempesta (b) e la serie temporale di altezza d'onda significative presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta in b))

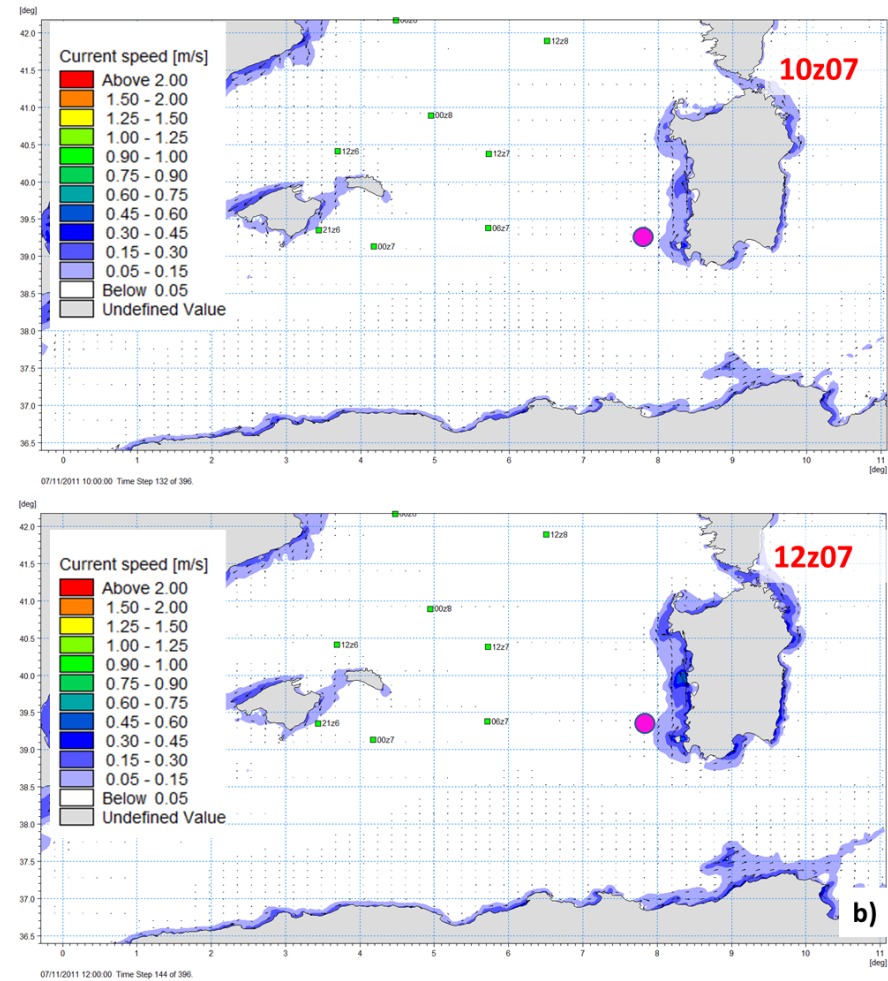
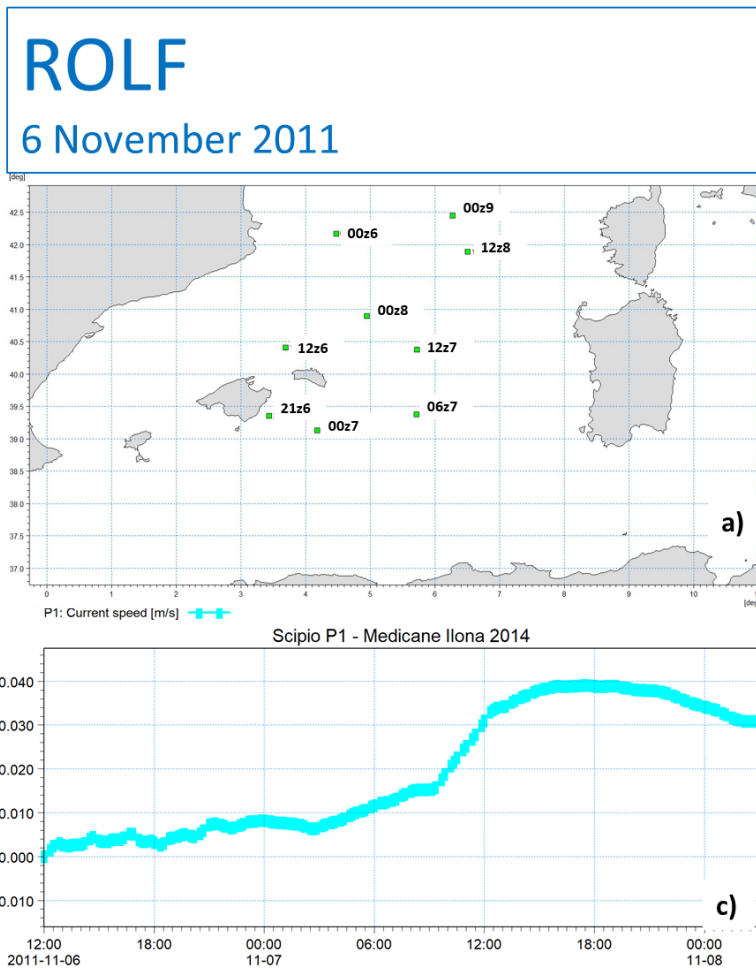


Figura 7.15: Mediane Rolf: risultati da modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del ciclone (a), campo di corrente durante il picco di tempesta (b) e serie temporale della corrente mediata sulla profondità presso il punto P1 del FOWF (marcatore magenta b))

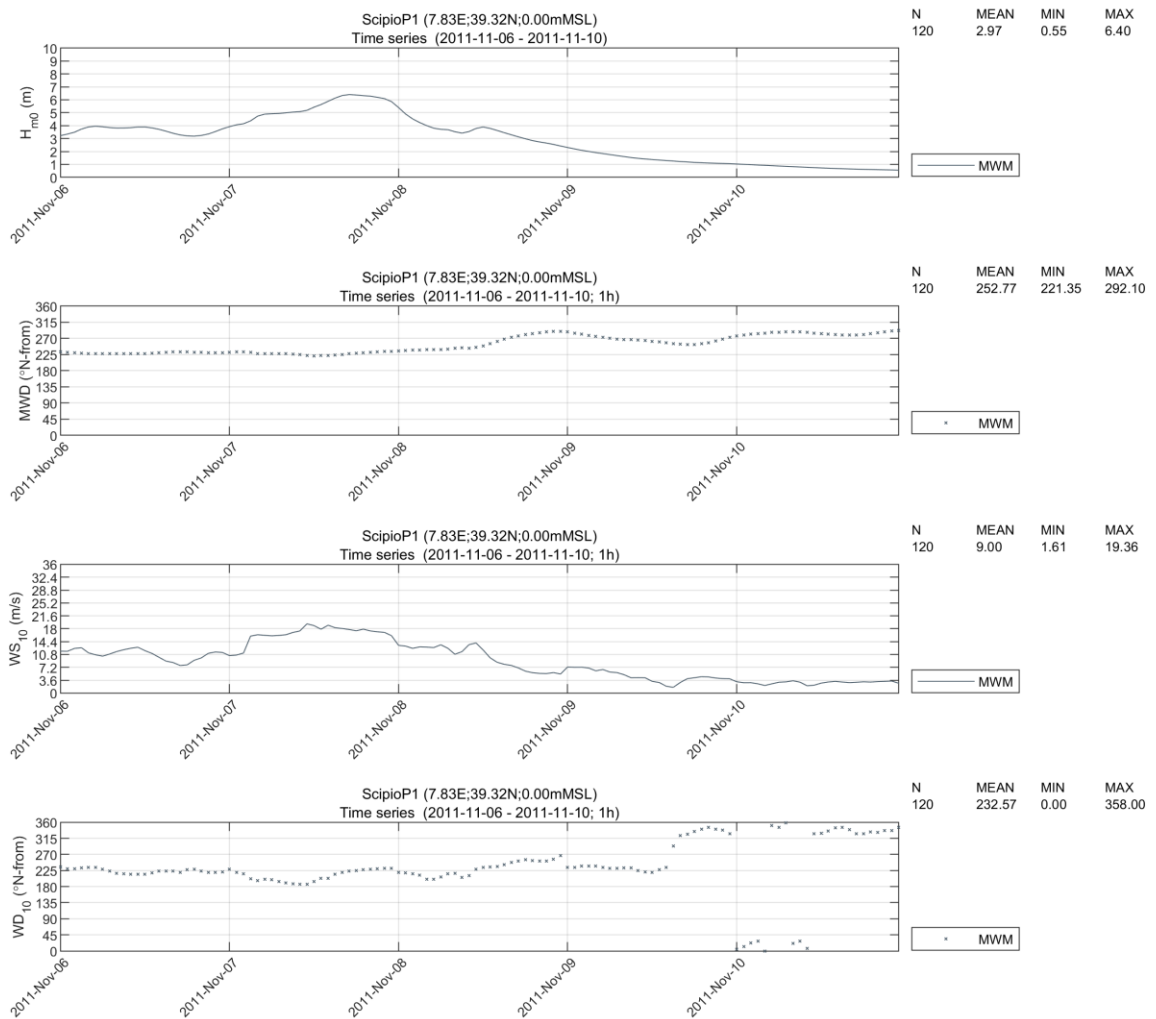


Figura 7.16: Mediane Rolf: serie temporale di altezza d'onda significativa  $H_{m0}$  e la direzione MWD, e a seguire intensità WS e direzione WD del vento durante il passaggio della tempesta; dati MWM estratti al punto P1 nel FOWF

## 8 Potenziale impatto ambientale delle infrastrutture FOWF

Questo capitolo presenta una valutazione qualitativa degli effetti del FOWF in progetto sull'ambiente fisico, cioè i campi di vento, onda e corrente.

### 8.1 Impronta del FOWF

La capacità pianificata del FOWF è, secondo Ichnusa Wind Power, di 504 MW, forniti da 42 WTG disposte come illustrato in Figura 8.1 a una profondità di 400-450 m (D) e due (2) sottostazioni. Ogni WTG Ha una Potenza nominale di circa 12 MW. La distanza tra le WTG sarà di 2 km e il parco coprirà un'area di circa 110-120km<sup>2</sup>.

In questa fase del progetto sono ancora in sviluppo il tipo di galleggiante e i sistemi di ormeggio e ancoraggio. Secondo Ichnusa Wind Power è probabile che il galleggiante sarà di tipo semi-sommersibile come presentato in Figura 8.2 <sup>2</sup>. Esempi di fondazioni per il *floating offshore wind* sono illustrati in Figura 8.3.

---

<sup>2</sup> Visualizzazione al sito <https://www.stiesdal.com/offshore-technologies/tetra-offshore-foundations-for-any-water-depth/>



ID	WGS84 UTM Z32N		Bathymetry [mLAT]
	E [m]	N [m]	
WTG_01	398152	4342533	-450
WTG_02	400137	4365178	-524
WTG_03	393181	4355443	-676
WTG_04	394013	4353278	-621
WTG_05	394844	4351124	-567
WTG_06	395674	4348973	-521
WTG_07	396505	4346815	-490
WTG_08	397334	4344660	-469
WTG_09	394623	4355950	-653
WTG_10	395455	4353784	-584
WTG_11	396287	4351630	-525
WTG_12	397117	4349480	-487
WTG_13	397949	4347322	-457
WTG_14	398778	4345167	-437
WTG_15	396063	4356466	-671
WTG_16	396895	4354301	-564
WTG_17	397726	4352147	-500
WTG_18	398557	4349997	-459
WTG_19	399389	4347839	-431
WTG_20	397504	4356973	-656
WTG_21	398337	4354808	-546
WTG_22	399169	4352654	-476
WTG_23	400000	4350504	-429
WTG_24	401424	4351049	-397
WTG_25	398946	4357488	-602
WTG_26	400606	4353175	-441
WTG_27	400387	4357995	-495
WTG_28	401219	4355838	-441
WTG_29	402048	4353683	-389
WTG_30	400164	4362816	-506
WTG_31	400275	4360409	-510
WTG_32	401825	4358513	-451
WTG_33	402658	4356356	-392
WTG_34	401604	4363324	-460
WTG_35	402436	4361171	-430
WTG_36	403266	4359021	-380
WTG_37	404099	4356864	-352
WTG_38	403036	4363878	-419
WTG_39	403868	4361725	-385
WTG_40	404699	4359575	-352
WTG_41	405113	4362160	-359
WTG_42	406140	4360083	-343
OSS_01	403123	4357127	-384
OSS_02	401325	4354199	-408

Coordinates and water depths for layouts L064 and L062.

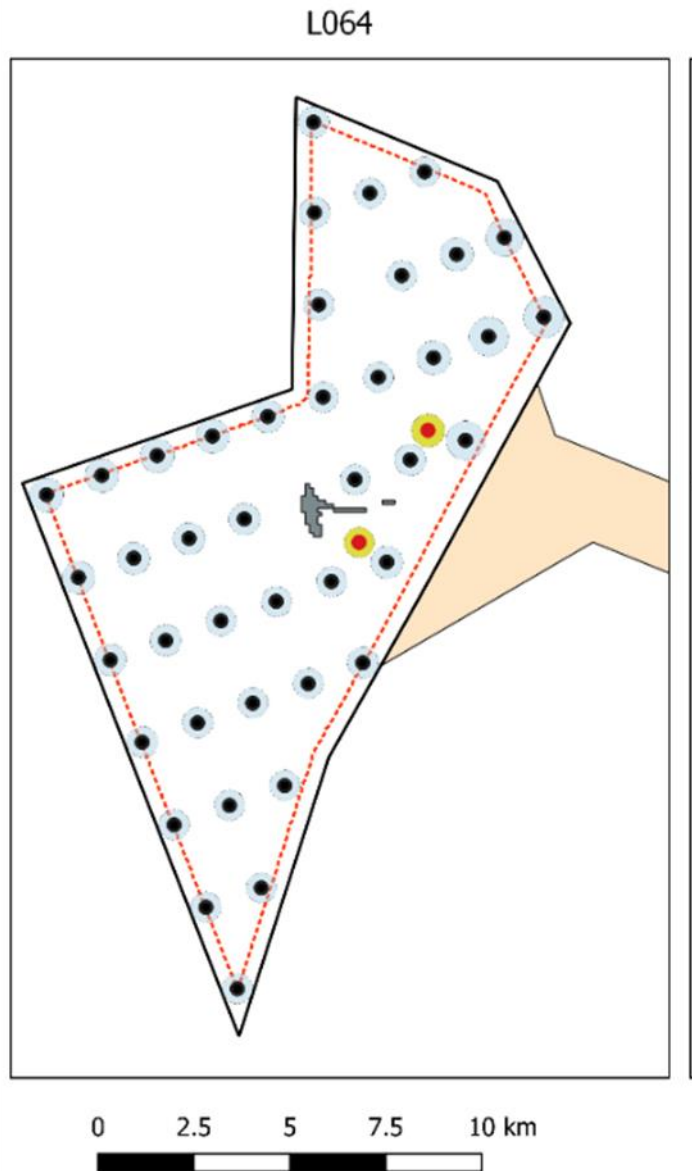


Figura 8.1: Layout previsto del FOWF. Fonte: Ichnusa Wind Power

### TetraSub – Dimensions



© Stiesdal Offshore Technologies A/S 2021. All Rights Reserved

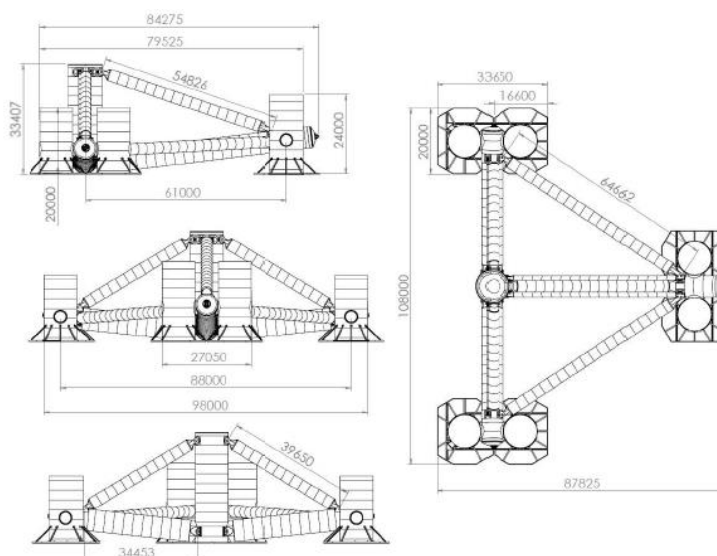


Figura 8.2: Galleggiante preso in considerazione per I WTG nel FOWF. Dimensioni in mm. Fonte: Ichnusa Wind Power

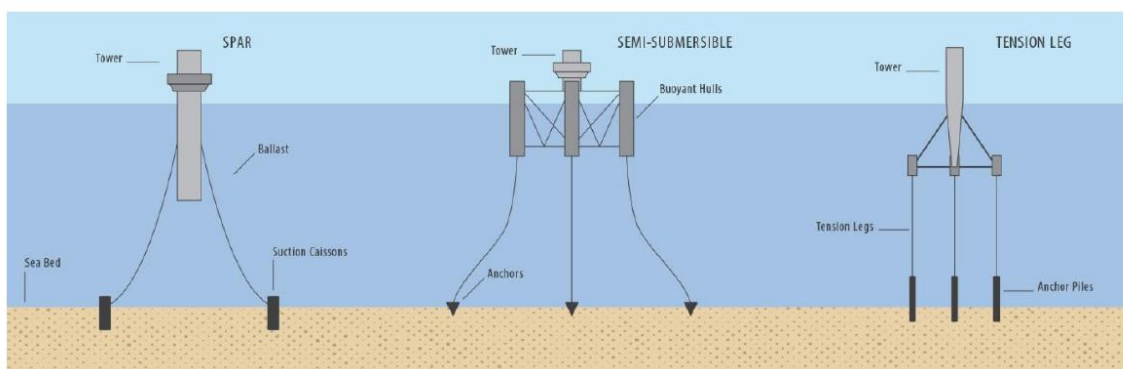


Figura 8.3: Principali schemi di fondazioni eoliche offshore galleggianti. Fonte: ICF (2020) white paper [46]

## 8.2 Impatto sulle condizioni di vento

La conseguenza probabilmente più ampiamente documentata sulle condizioni atmosferiche locali e regionali della raccolta dell'energia eolica è l'effetto scia. Le turbine eoliche estraggono energia cinetica dall'atmosfera e convertono parte di essa in energia elettrica. La restante parte dell'energia viene convertita in energia cinetica turbolenta che genera scie e deficit della velocità del vento di sottovento.

Per valutare l'impatto degli Horns Rev 1 OWF da 158 MW (WTG da 80x2 MW all'interno di una spaziatura 7D (diametro del rotore  $D = 80$  m) che copre un'area di 20 km<sup>2</sup> in acque con profondità 6-14 m) sul clima ambientale del vento, Christiansen e Hasager (2005, [56]) hanno utilizzato immagini satellitari da radar ad apertura sintetica (SAR) per stimare il deficit di velocità del vento di sottovento.

Per l'intervallo di velocità del vento 8-9 m/s la velocità del vento alla quota media dell'altezza dell'hub si riduce mediamente dell'8-9% nell'area di sottovento del WTG rispetto al punto di



riferimento sopravvento, vedere anche Christensen et al (2013, [54]). La velocità del vento recupera entro il 2% rispetto alla velocità del flusso libero su una distanza di 5-20 km a seconda della velocità del vento ambientale, alla stabilità atmosferica e al numero di turbine in funzione. L'effetto scia a Horns Rev 1 OWF è ben visualizzato dalle famose fotografie aeree scattate il 12 febbraio 2008, si veda Hasager et al (2013, [57]).

Anche Akhtar et al (2021,[55]) hanno recentemente esaminato gli impatti dei parchi eolici sulle dinamiche atmosferiche locali e sui deficit spaziali-temporali dei pattern della velocità del vento per lo scenario del parco eolico prossimo futuro nel Mare del Nord usando un modello climatico ad alta risoluzione con la parametrizzazione delle turbine eoliche. I loro risultati mostrano che gruppi di grandi parchi eolici (> 500 MW) possono potenzialmente portare a riduzioni della velocità media del vento locale di 2-2.5 m/s (cioè del 20-25% ipotizzando una velocità media del vento di 10 m/s) e con un recupero della velocità sottovento a 40 km dal parco eolico.

Sebbene i risultati di cui sopra si riferiscano a parchi eolici con fondazioni a fondo fisso, è ragionevole supporre che gli effetti siano simili per quelli galleggianti. Quindi è probabile che la velocità media del vento verrà ridotta, all'interno del FOWF da 504 MW, fino al 10% con distanze di recupero della velocità sottovento di 20-30 km.

Come affermato nella recente e completa revisione dei potenziali effetti ambientali degli impianti di energia eolica offshore galleggianti in acque profonde di Farr et al (2021, [53]), l'effetto complessivo dei FOWF sul clima regionale è probabilmente da lieve a moderato, come anche illustrato in Figura 8.4.

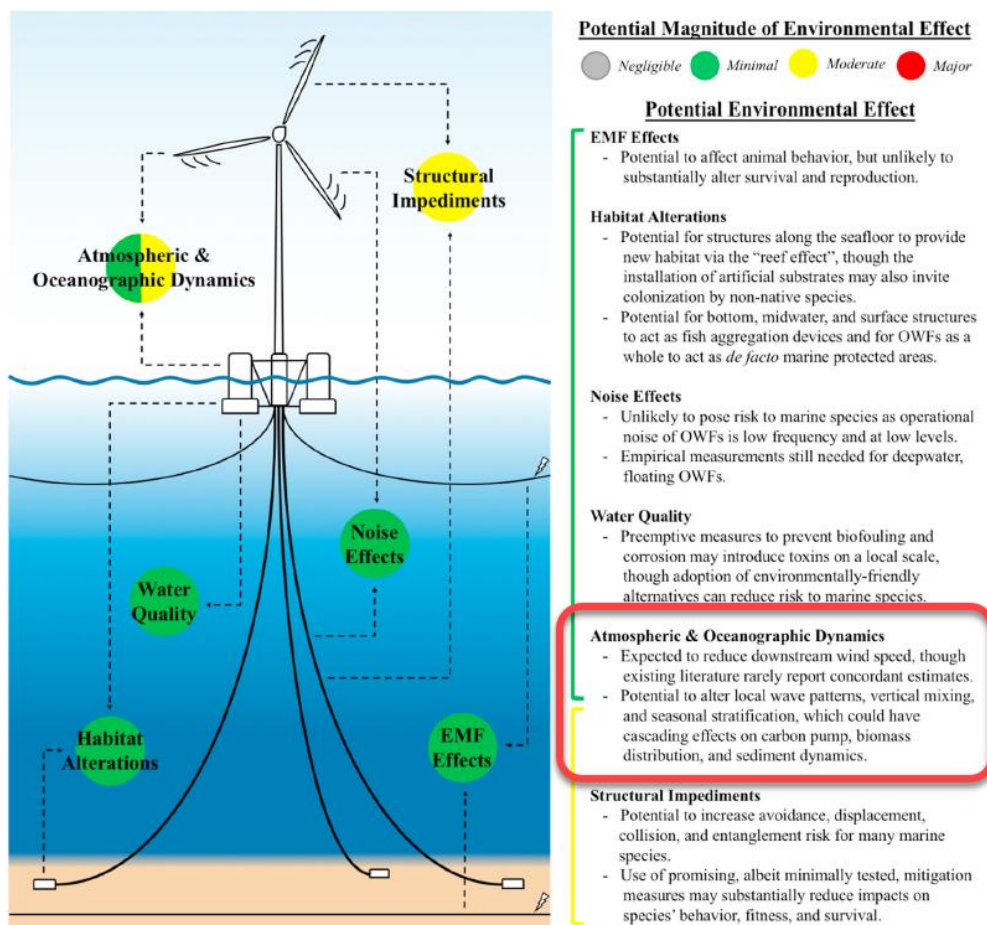


Figura 8.4: Tipologia e entità dei potenziali effetti ambientali degli impianti di energia eolica offshore galleggianti. Le variazioni attese valutati secondo le dinamiche atmosferiche e marine sono evidenziati dal riquadro in rosso. Fonte e illustrazione: Farr et al (2021 [53])

### 8.3 Impatto sulle condizioni d’onda

Il più grande impatto visivo di una turbina eolica galleggiante sulle onde di gravità superficiali è l’interazione tra le onde e il galleggiante, che si traduce in una variazione locale delle altezze d’onda.

Come affermato in Christensen et al (2013, [54]) ci sono fondamentalmente tre diversi processi responsabili delle modifiche ai campi d’onda che si propagano attraverso un parco eolico, come elencato nella Tabella 8.1. L’effetto risultante di tutti e tre i processi sarà maggiore per le onde con periodo breve (lunghezza d’onda simile alla grandezza caratteristica del galleggiante) e minore per le onde con periodo lungo (*swell*). L’effetto della dissipazione dell’energia d’onda dovuto all’attrito e alla separazione dei vortici attorno a una fondazione è ridotto rispetto agli altri due fenomeni.

Tabella 8.1: Fenomeni più importanti per il cambiamento delle condizioni d’onda all’interno di un OWF

Wave Changing Processes			
	Dissipation of wave energy due to drag resistance	Reflection/diffraction of waves around the foundation structure	Effect of changed wind field inside and on lee site of the wind farm
<b>Consequence</b>	Due to the local interaction between the waves and foundation structure a part of the wave energy will be transformed into turbulent kinetic energy because of surface friction on the structure and flow separation on the lee site of the structure	A part of the wave energy will be reflected/diffracted around the foundation structure.  This will change the wave conditions significantly, but only locally.	As the generation of wind waves is governed by the surface shear stress on the water surface due to wind, fetch, depth and wind duration, changed wind field means changed wave field.  A reduced wind speed results in a reduced wave height (period).

In DHI Christensen et al (2013, [54]) hanno sviluppato un metodo ingegneristico per la valutazione delle variazioni delle condizioni d’onda utilizzando i modelli numerici allo stato dell’arte MIKE 21 SW<sup>3</sup> e WAMIT<sup>TM</sup> (simile a quello utilizzato oggi in MIKE 21 MA<sup>4</sup>). Questa metodologia generale è stata utilizzata nell’ Horns Rev 1 OWF sopra menzionato. Si è riscontrato che la riduzione massime dell’altezza d’onda significativa sottovento rispetto all’OWF era dell’ordine del 5%, e a 20 km di distanza la riduzione era di circa l’1%. Il periodo dell’onda è rimasto pressoché invariato. Si prega di notare che l’analisi è stata effettuata per stati di mare stazionari, che è un’approssimazione, probabilmente conservativa, per la valutazione dei cambiamenti climatici d’onda dovuti agli effetti dell’OWF.

I parchi eolici offshore Vesterhav Sud e Vesterhav Nord, leggermente più grandi, inizialmente progettati da 200 MW ciascuno, sono situati a nord di Horns Rev 1 lungo la costa ovest dello Jutland, si veda Figura 8.5. I parchi eolici si trovano in acque profonde 15-30 m, a circa 4 km dalla costa e coprono entrambi un’area di circa 44 km<sup>2</sup>. Ciascun parco eolico è composto da 20-21 WTG da 8.4 MW.

<sup>3</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves>

<sup>4</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-mooring-analysis>



Figura 8.5: Ubicazione degli OWF inizialmente progettati da 200 MW: Vesterhav North e Vesterhav South OWF. Fonte: Vedere link a piè di pagina

Dopo un'attenta valutazione lo Studio di Impatto Ambientale per ciascuno dei due siti ha concluso che l'impatto complessivo sulle condizioni d'onda è minore (riduzione dell'altezza d'onda media dell'1-3.5% e confinato nell'area del parco eolico)<sup>5,6</sup>. La metodologia utilizzata è stata basata su Christensen et al (2013, [54]).

Più tardi nel processo di sviluppo, lo schema della farm è stato modificato, le turbine sono state spostate più offshore, e la capacità totale è stata leggermente ridotta. Il Progetto è stato approvato a Dicembre 2020<sup>7,8</sup> dalla Danish Energy Agency.

Per il progetto Hornsea Three, circa 10 volte più grande (2400 MW, 231 WTG), nel Regno Unito situato a più di 120 km dalla costa e che ricopre un'area di quasi 700 km<sup>2</sup>, lo Studio di Impatto Ambientale ha concluso che la riduzione massima dell'altezza d'onda era del 15% e meno del 2.5% a circa 50 km sottovento rispetto all'OWF<sup>9</sup>. Questa valutazione si basava su analisi numeriche dettagliate. Il progetto è stato approvato nel Dicembre del 2020.

Per il FOWF operative Hywind Scotland da 30 MW (5x6 MW WTG, 95-120 m di profondità d'acqua e 7 km<sup>2</sup> di estensione) l'impatto in termini di variazioni indotte sulle condizioni d'onda, di corrente, dei sedimenti e della morfologia è stato analizzato durante la fase esplorativa<sup>10</sup>. Questo sembra anche essere il caso dell'Hywind Tampen (Norway) FOWF in progetto da 88 MW (11x8 MW WTG a 260-300 m di profondità, estensione sul fondale marino di 22.5 km<sup>2</sup> e a 140 km dalla costa)<sup>11</sup>.

<sup>5</sup> [https://www2.mst.dk/Udgiv/web/ATR%2005\\_06\\_Vesterhav%20Syd\\_Sediment%20and%20Hydrographic%20R4.pdf](https://www2.mst.dk/Udgiv/web/ATR%2005_06_Vesterhav%20Syd_Sediment%20and%20Hydrographic%20R4.pdf)

<sup>6</sup> [https://www2.mst.dk/Udgiv/web/ATR%2005\\_06\\_Vesterhav%20Nord\\_Sediment%20and%20Hydrographic%20R4.pdf](https://www2.mst.dk/Udgiv/web/ATR%2005_06_Vesterhav%20Nord_Sediment%20and%20Hydrographic%20R4.pdf)

<sup>7</sup> [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/vesterhav\\_syd\\_miljoekonsekvensrapport.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/vesterhav_syd_miljoekonsekvensrapport.pdf)

<sup>8</sup> [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/vesterhav\\_nord\\_miljoekonsekvensrapport.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindenergi/vesterhav_nord_miljoekonsekvensrapport.pdf)

<sup>9</sup> <https://hornseaproject3.co.uk/> Environmental Statement: Volume 5, Annex 1.1 – Marine Processes Technical Report, May 2018

<sup>10</sup> <https://www.equinor.com/en/how-and-why/impact-assessments.html> - Hywind Scotland, Environmental Statement, April 2015, see chapter 8.

<sup>11</sup> <https://www.equinor.com/en/how-and-why/impact-assessments/hywind-tampen.html>

Sebbene i risultati di cui sopra si riferiscano a una gamma di parchi eolici con fondazioni fisse sul fondo, è ragionevole prevedere che l'effetto di blocco sulle condizioni d'onda sottovento non sarà significativamente diverso per un parco eolico galleggiante. Quindi è probabile che l'altezza d'onda sarà ridotta meno del 5% sottovento rispetto al FOWF e il cambiamento sarà difficilmente misurabile nelle vicine zone costiere a 30-40 km dal parco eolico.

L'effetto dei cavi di ormeggio sulle onde sarà trascurabile per la loro dimensione rispetto alla lunghezza d'onda. Solo localmente la piattaforma galleggiante (ad esempio semi-sommersa) darà maggiori effetti di protezione rispetto alle fondazioni monopalo o al jacket.

Pertanto, è probabile che l'effetto complessivo del FOWF sulle condizioni d'onda sia da lieve a moderato.

## 8.4 Impatto sulle condizioni idrodinamiche

I due principali impatti derivano da 1) la modifica del campo del vento dovuta all'effetto diretto dell'estrazione della potenza dal vento e 2) dagli effetti di blocco della fondazione WTG sulle correnti marine e conseguentemente sulla turbolenza, sulla miscelazione e sulla stratificazione della colonna d'acqua; vedere ad esempio queste recente analisi completa fatta da van Berkel et al (2020 [58]) di DHI e la Figura 8.6. Come affermato sia in Farr et al (2021 [53]) sia in van Berkel et al (2020, [58]), l'attuale comprensione degli effetti dei FOWF sulle dinamiche marine è limitata e incerta.

La maggior parte degli studi di impatto ambientale per i progetti eolici offshore è basata su modellazioni del flusso idrodinamico per scenari di riferimento e di sviluppo progettuale al fine di quantificare il probabile impatto, dove la velocità è ridotta all'intero del parco eolico e il blocco del flusso dovuto alla fondazione è tenuto in conto da un processo di modellazione su sotto-griglie. Quest'ultimo mostra che l'effetto di blocco sul flusso è maggiore nelle immediate vicinanze della piattaforma di fondazione, ma si riduce rapidamente di entità a valle della struttura. In prossimità delle singole fondazioni, si ha spesso una piccola amplificazione locale della velocità della corrente (come avviene anche per onde di gravità superficiali).

Questo approccio è stato applicato anche per l'OWF Vesterhav Sud e l'OWF Vesterhav Nord inizialmente progettati da 200 MW e discussi sopra, dove è stato utilizzato il modello MIKE 21/3<sup>12</sup>. I risultati mostrano che i cambiamenti delle correnti (e dei livelli d'acqua) previsti sono relativamente piccoli (velocità della corrente ridotta meno del 2%), e lo Studio di Impatto Ambientale conclude che l'impatto è trascurabile.

Per il 10 volte più grande OWF Hornsea Three (si veda sopra), i cambiamenti previsti nelle velocità della corrente di picco variano da +0.04 m/s a -0.1 m/s in prossimità dell'area dell'OWF. Questo cambiamento dovrebbe essere confrontato con le velocità della corrente generate dalle maree di 0.6 m/s (acqua alta) e di 1.0 m/s (acqua bassa) per le maree primaverili medie.

Si è inoltre concluso che, nonostante l'OWF Hornsea Three causi qualche redistribuzione della velocità della corrente, la variazione netta complessiva della portata a cui l'acqua passa attraverso l'OWF è minima e quindi i livelli del mare locali e regionali (di marea e non) non avrebbero dovuto essere interessati dall'OWF.

---

<sup>12</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>

### SUMMARY OF LOCAL AND REGIONAL HYDRODYNAMIC IMPACTS

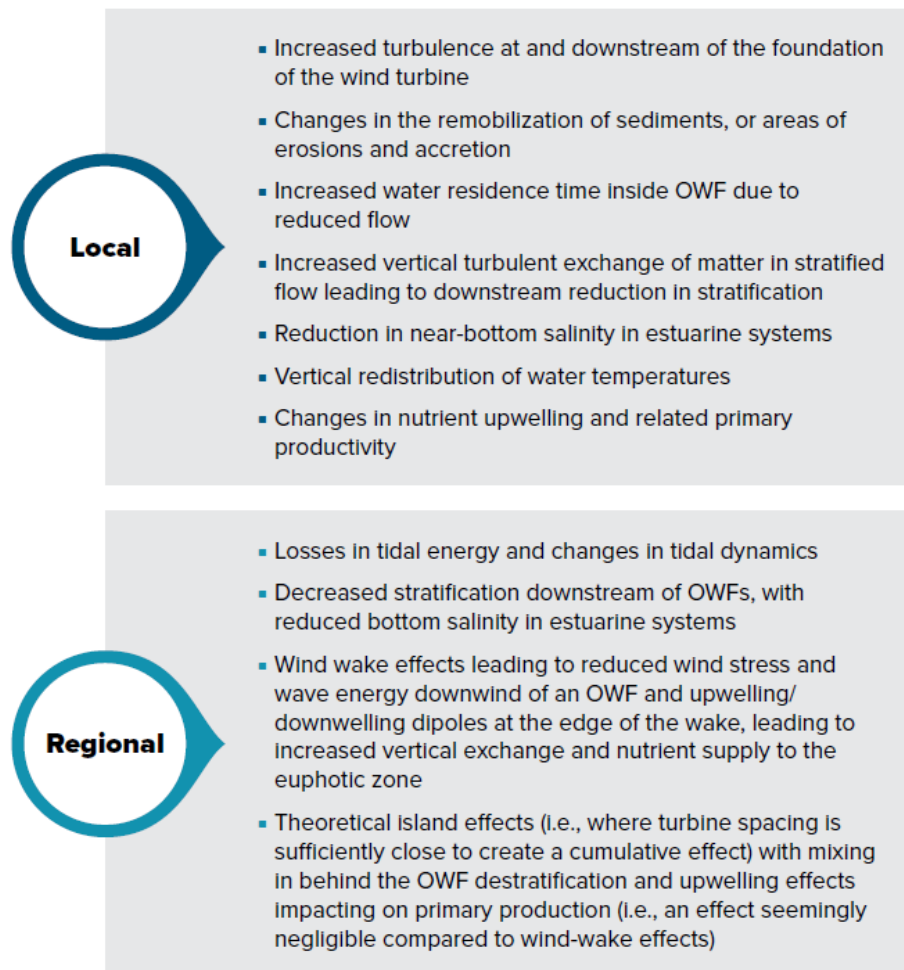


Figura 8.6: Elenco dei potenziali effetti delle piattaforme eoliche offshore sull'idrodinamica. Fonte: van Berkel et al. 2020, [58])

Per il FOWF in particolare, le correnti di superficie e della porzione superiore della colonna d'acqua (10-20 m) cambieranno nelle immediate vicinanze del galleggiante, ma dovrebbero rimanere confinate nell'ordine di centinaia di metri dalla piattaforma di fondazione. È probabile che il cambiamento di flusso, principalmente non mareale, ambientale e delle velocità relativamente meno intense della corrente (corrente superficiale < 0.4 m/s nel 90% del tempo) sia minimo (< 2-3%). Dato che i galleggianti occupano il 5-10% della colonna d'acqua superiore e che la dimensione dei cavi di ormeggio e dei sistemi di ancoraggio al fondo marino è ridotta, l'impatto previsto sulle correnti vicino al fondale dovrebbe essere minore, anche considerando l'entità delle velocità della corrente sul fondale descritta nella Sezione 4.3.3 (presso il sito la velocità della corrente vicino al fondale marino è < 0.1 m/s).

Allo stesso modo, l'impatto sulle condizioni del livello del mare dovrebbe essere minimo



## 9 Conclusioni e suggerimenti

### 9.1 Conclusioni

Questo lavoro definisce le condizioni meteomarine e i parametri meteomarini di progetto valutati per l'*Ichnusa Floating Offshore Wind Farm (FOWF)*, situato al largo della Sardegna, a circa 40-50 km a Ovest dalla costa Sud-Occidentale.

La base di dati per lo studio si è fondata sui dati meteomarini disponibili di 42 anni (1979-2020) per i venti e le onde, estratte dal database MWM di DHI. I dati *hindcast* idrodinamici per corrente 3D, livello del mare e temperatura/salinità sono estratti dai database CMEMS. Il confronto con i dati satellitari e le misurazioni disponibili hanno mostrato che tutti i modelli funzionano adeguatamente.

I dati di vento e onda sono stati analizzati in un punto (P1) situato a circa quattro (4) km a ovest rispetto al sito del progetto, considerato rappresentativo delle condizioni del sito. Per quanto riguarda corrente e livello del mare, DHI ha combinato i dati CMEMS con quelli del modello *Global Tide* di DHI per tenere conto dell'influenza delle maree. I risultati delle analisi dei valori normali ed estremi sono considerati rappresentativi delle condizioni meteomarine del sito del progetto e applicabili per il FEED.

La regione del Mediterraneo è una delle regionali ciclogenetiche più attive del mondo. Questo studio fornisce una panoramica generale sui *medicanes*, comprese le loro caratteristiche statistiche, sulla base della letteratura disponibile, e fornisce anche una valutazione quantitativa delle potenziali altezze d'onda indotte nei pressi del FOWF da due medicane storiche di cui sono disponibili dei tentativi di "best-track". Si conclude che è improbabile che il passaggio di tempeste simil-tropicali sia determinante ai fini della stima delle onde estreme nell'area del FOWF.

Questo report include anche una valutazione qualitativa del potenziale impatto previsto del FOWF sull'ambiente fisico, ivi incluso il campo del vento, il moto ondoso e le correnti, mostrando che l'effetto complessivo è probabilmente da lieve a moderato. La valutazione si è basata sulla letteratura recente e sui report degli Studi di Impatto Ambientale di vari progetti di parchi eolici offshore.

### 9.2 Suggerimenti

#### Validazione aggiuntiva e aggiornamento del report

È fortemente consigliato effettuare un confronto tra i dati del modello *hindcast* utilizzati in questo studio e di una campagna lidar (che comprendono venti, onde e idrodinamica) per qualificare o aggiornare ulteriormente i parametri meteomarini qui stimati di progettazione. Questo richiederebbe (idealmente) di effettuare simulazioni aggiuntive con i modelli descritti, in modo da estendere i database sul periodo della campagna di misure.

#### Modellazione di downscaling

In questo studio meteomarino sono stati utilizzati i migliori dati meteomarini disponibili a lungo termine provenienti da vari modelli regionali. Per migliorare ulteriormente la qualità dei dati e ridurre le incertezze ad essi associate, in particolare sui dati d'onda e di corrente nel sito di progetto del FOWF, si suggerisce di implementare il *down-scaling* locale ad alta risoluzione delle condizioni al largo, da effettuarsi a seguito di un doveroso confronto tra i dati dei modelli regionali e quelli provenienti dalle misure lidar attualmente in corso.

## 10 Riferimenti

- [1] DNV, “DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, Edition September 2019, Amended September 2021. DNV (2021-09).
- [2] S. Saha, S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y. Hou, H. Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M. Peña Mendez, H. van den Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen and E. Becker, “The NCEP Climate Forecast System Version 2,” *Journal of Climate*, vol. 27, pp. 2185-2208, 2014.
- [3] Ole Baltazar Andersen, (2010). Improvement in global ocean tide model in shallow water regions. Poster, SV.1-68 45, OSTST, Lisbon, Oct.18-22.
- [4] <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-004.pdf>
- [5] Bethoux, J., 1980. Meanwater fluxes across sections in the Mediterranean Sea, evaluated on the basis of water and salt budgets and of observed salinities. *Oceanolog. Acta* 3, 79–88.
- [6] Zecchetto, S., & De Biasio, F. (2007). Sea Surface Winds over the Mediterranean Basin from Satellite Data (2000–04): Meso- and Local-Scale Features on Annual and Seasonal Time Scales, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(6), 814-827.
- [7] Millot, C., Gacic, M., Astraldi, M., LaViolette, P.E., 1999. Circulation in the Western Mediterranean Sea. *J. Mar. Syst.* 20(1–4), 423–442.
- [8] Alain Saliot Editor, 2007, “The Mediterranean Sea”, Springer
- [9] Hopkins, T. S.: Physical processes in the Mediterranean basins, University of South Carolina Press., 269–310, 1978
- [10] Testor, P., Béranger, K., Mortier, L., 2005. Modeling the deep eddy field in the southwestern Mediterranean: the life cycle of Sardinian eddies. *Geophys. Res. Lett.* 32(July), 13602 Sparnocchia, S.;
- [11] Millot, C. and Taupier-Letage, I., 2005, “Circulation in the Mediterranean Sea”, *The Mediterranean Sea in Handbook of Environmental Chemistry*, Springer Berlin, ISBN: 978-3-540-25018-0, Vol. 5k: 29–66
- [12] Sparnocchia, S.; Vetrano, A.; Mazzola, S.. 2004 Tidal and subtidal currents in the Strait of Sicily. *Journal of Geophysical Research*, 109 (C2). C02011. <https://doi.org/10.1029/2003JC002011>
- [13] Manzella, G. M. R., Hopkins, T. S., Minnett, P. J., and Nacini, E. (1990), Atlantic water in the strait of Sicily, *J. Geophys. Res.*, 95( C2), 1569– 1575, doi:10.1029/JC095iC02p01569.
- [14] Astraldi, M., Balopoulos, S., Candela, J., Font, J., Gacic, M., Gasparini, G. P., Manca, B., and Theocharis, A.: The role of straits and channels in understanding the characteristics of Mediterranean circulation, *Progress in Oceanography*, 44, 65–108, 1999.
- [15] Manzella, G. M. R.: The seasonal variability of the water masses and transport through the Strait of Sicily, *Coastal and Estuarine Studies*, 46, 33–450, 1994
- [16] Olita, A., Ribotti, A., Sorgente, R., Fazioli, L., Perilli, A., 2011a. SLA—chlorophyll-a variability and covariability in the Algero–Provençal-Basin (1997–2007) through combined use of EOF and wavelet analysis of satellite data. *Ocean Dyn.* 61(January), 89–102
- [17] Catherine Bouzinac, Jordi Font, Claude Millot, Hydrology and currents observed in the channel of Sardinia during the PRIMO-1 experiment from November 1993 to October 1994, *Journal of Marine Systems*, Volume 20, Issues 1–4, 1999, Pages 333-355
- [18] Ribotti, A., Puillat, I., Sorgente, R., Natale, S., 2004. Mesoscale circulation in the surface layer off the southern and western Sardinia island in 2000–2002. *Chem. Ecol.* 20(5), 345–363.



- [19] Mosetti, F. (1987), Distribuzione delle maree nei mari italiani, *Boll. Oceanol. Teor. Appl.*, 5, 65 – 71
- [20] L. Sartini, G. Besio, F. Cassola, Spatio-temporal modelling of extreme wave heights in the Mediterranean Sea, *Ocean Modelling*, Volume 117, 2017, Pages 52-69, ISSN 1463-5003, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.07.001>.
- [21] Alberola C, Rousseau S, Millot Claude, Astraldi M, Font J, Garcialafuente J, Gasparini Gp, Send U, Vangriesheim Annick (1995). Tidal currents in the western mediterranean-sea. *Oceanologica Acta*, 18(2), 273-284. Open Access version: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00097/20777/>
- [22] P. Tromans and V. L., "Response Based Design Conditions in the North Sea: Application of a New Method," in *Offshore Technology Conference Texas, USA May 1995, Texas, 1995*.
- [23] G. Z. Forristall, "On the Statistical Distribution of Wave Heights in a Storm," *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, no. C5, pp. 2353-2358, 1978.
- [24] G. Z. Forristall, "Wave Crest Distributions: Observations and Second-Order Theory," *Journal of Geophysical Research*, vol. 30, no. 8, pp. 1931-1943, 2000.
- [25] D. L. Codiga, »Unified Tidal Analysis and Prediction Using the U-Tide Matlab Functions. Technical Report 2011-01, « Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp, 2011.
- [26] R. Pawlowicz, B. Beardsley og S. Lentz, »Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE, « *Computers & Geosciences* 28, pp. 929-937, 2002
- [27] K. E. Leffler og D. A. Jay, »Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L-1/L-2) solutions, « *Cont. Shelf Res.* 29, pp. 78-88. DOI: 10.1016/j.csr.2008.1004.1011, 2009
- [28] M. G. G. Foreman, J. Y. Cherniawsky og V. A. Ballantyne, »Versatile Harmonic Tidal Analysis: Improvements and Applications., « *J. Atmos. Oceanic Tech.* 26, pp. 806-817. DOI: 10.1175/2008JTECHO1615.1171, 2009
- [29] ISO 19901-1 Petroleum and Natural Gas Industries - Specific requirements for offshore structures - Part 1: Metocean design and operating considerations, 2015.
- [30] Piscopia, Rodolfo & franco, leopoldo & Corsini, Stefano & Inghilesi, R.. (2004). *Italian Wave Atlas*.
- [31] Homar, V., Romero, R., Stensrud, D. J., Ramis, C., and Alonso, S.: Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean: Dynamical vs. boundary factors, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 1469–1490, 2003
- [32] Gaertner, M. Á., González-Alemán, J. J., Romera, R., Domínguez, M., Gil, V., Sánchez, E., Gallardo, C., Miglietta, M. M., Walsh, K. J., Sein, D. V., Somot, S., Dell'Aquila, A., Teichmann, C., Ahrens, B., Buonomo, E., Colette, A., Bastin, S., van Meijgaard, E., and Nikulin, G.: Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean–atmosphere coupling and increased resolution, *Clim. Dynam.*, 51, 1041–1057, 2018
- [33] Miglietta, M. M., Moscatello, A., Conte, D., Mannarini, G., Lacorata, G., and Rotunno, R.: Numerical analysis of a Mediterranean "hurricane" over south-eastern Italy: Sensitivity experiments to sea surface temperature, *Atmos. Res.*, 101, 412–426, 2011.
- [34] Miglietta, M. M. and Rotunno, R.: Development mechanisms for Mediterranean tropical-like cyclones (medicanes), *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 145, 1444–1460, 2019
- [35] Pravia-Sarabia, E., Gómez-Navarro, J. J., Jiménez-Guerrero, P., and Montávez, J. P.: TITAM (v1.0): The Time-Independent Tracking Algorithm for Medicanes, *Geosci. Model Dev.*, 13, 6051–6075, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-6051-2020>, 2020.

- [36] Anthes, R. A., Corell, R. W., Holland, G., Hurrell, J. W., Mac-Cracken, M. C., and Trenberth, K. E.: Hurricanes and Global Warming—Potential Linkages and Consequences, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 87, 623–628, 2006.
- [37] Shen, B.-W., Atlas, R., Reale, O., Lin, S.-J., Chern, J.-D., Chang, J., Henze, C., and Li, J.-L.: Hurricane forecasts with a global mesoscale-resolving model: Preliminary results with Hurricane Katrina (2005), *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13813, <https://doi.org/10.1029/2006GL026143>, 2006.
- [38] Tous, M. and Romero, R.: Meteorological environments associated with medicane development, *Int. J. Climatol.*, 33, 1–14, <https://doi.org/10.1002/joc.3428>, 2013.
- [39] Nastos, P., Karavana-Papadimou, K., and Matzangouras, I.: Tropical-like cyclones in the Mediterranean: Impacts and composite daily means and anomalies of synoptic conditions, in: *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology*, 3–5, 2015.
- [40] Cavicchia, L. and von Storch, H.: The simulation of medicanes in a high-resolution regional climate model, *Clim. Dynam.*, 39, 2273–2290, 2012.
- [41] Cavicchia, L., von Storch, H. & Gualdi, S. A long-term climatology of medicanes. *Clim Dyn* 43, 1183–1195 (2014).
- [42] Cavicchia, L., von Storch, H., & Gualdi, S. (2014). Mediterranean Tropical-Like Cyclones in Present and Future Climate, *Journal of Climate*, 27(19), 7493-7501.
- [43] González-Alemán, J. J., Pascale, S., Gutierrez-Fernandez, J., Murakami, H., Gaertner, M. A., & Vecchi, G. A. (2019). Potential increase in hazard from Mediterranean hurricane activity with global warming. *Geophysical Research Letters*, 46, 1754-1764.
- [44] Romero, R., and K. Emanuel (2013), Medicane risk in a changing climate, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 5992–6001, doi:10.1002/jgrd.50475.
- [45] Picornell, M. A., Campins, J., and Jansà, A.: Detection and thermal description of medicanes from numerical simulation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1059–1070, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1059-2014>, 2014.
- [46] Cioni, G., Thermal structure and dynamical modelling of a Mediterranean Tropical-like Cyclone, December 2014, DOI: 10.13140/RG.2.1.2000.4722
- [47] Dafis S., Rysman J.F., Claud C., Flaounas E., Remote sensing of deep convection within a tropical-like cyclone over the Mediterranean Sea *Atmos Sci Lett.* 2018;19: e823. <https://doi.org/10.1002/asl.823>
- [48] Koseki, S., Mooney, P. A., Cabos, W., Gaertner, M. Á., de la Vara, A., and González-Alemán, J. J.: Modelling a tropical-like cyclone in the Mediterranean Sea under present and warmer climate, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 53–71, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-53-2021>, 2021.
- [49] Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J. et al. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 109, 77 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- [50] Holland, G. J., 1980. An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, Vol.108
- [51] I. Pytharoulis, Analysis of a Mediterranean tropical-like cyclone and its sensitivity to the sea surface Temperatures, *Atmospheric Research*, Volume 208, 2018, Pages 167-179, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.009>.
- [52] Main Page, [https://medicanecentre.org/wiki/index.php?title=Main\\_Page&oldid=2011](https://medicanecentre.org/wiki/index.php?title=Main_Page&oldid=2011) (last visited August 27, 2021).

- [53] Farr, H., Ruttenberg, B., Walter R.K., Wang, Y-H., White, C., 2021 Potential environmental effects of deepwater floating offshore wind energy facilities, *Ocean & Coastal Management*, 207, 16pp, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105611>
- [54] Christensen, E.D., Johnson, M., Sørensen, O.R., Hasager, C.B., Badger, M., Larsen, S.E., 2013. Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm. *Coast Eng.* 82, 25–46. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.004>
- [55] Akhtar, N., Geyer, B., Rockel, B. et al., 2021. Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials. *Sci Rep* 11, 11826. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91283-3>
- [56] Christiansen, M.B., Hasager, C.B., 2005. Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. *Rem. Sens. Environ.* 98, 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.009>
- [57] Hasager, C. B., Rasmussen, L., Peña, A., Jensen, L. E., & Réthoré, P-E., 2013. Wind Farm Wake: The Horns Rev Photo Case. *Energies*, 6, 696-716. <https://doi.org/10.3390/en6020696>
- [58] van Berkel, J., Burchard, H., Christensen, A., Mortensen, L.O., Petersen, O.S., and Thomsen, F., 2020 The effects of offshore wind farms on hydrodynamics and implications for fishes. *Oceanography* 33(4):108–117, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.410>
- [59] ICF. 2020. Comparison of Environmental Effects from Different Offshore Wind Turbine Foundations. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Headquarters, Sterling, VA. OCS Study BOEM 2020-041. 42 pp. <https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/environment/Wind-Turbine-Foundations-White%20Paper-Final-White-Paper.pdf>



ALLEGATI



## ALLEGATO A – Model Quality Indices





## A Model Quality Indices

To obtain an objective and quantitative measure of how well the model data compared to the observed data, a number of statistical parameters so-called quality indices (QI's) are calculated.

Prior to the comparisons, the model data are synchronised to the time stamps of the observations so that both time series had equal length and overlapping time stamps. For each valid observation, measured at time  $t$ , the corresponding model value is found using linear interpolation between the model time steps before and after  $t$ . Only observed values that had model values within  $\pm$  the representative sampling or averaging period of the observations are included (e.g., for 10-min observed wind speeds measured every 10 min compared to modelled values every hour, only the observed value every hour is included in the comparison).

The comparisons of the synchronised observed and modelled data are illustrated in (some of) the following figures:

- Time series plot including general statistics
- Scatter plot including quantiles, QQ-fit and QI's (dots coloured according to the density)
- Histogram of occurrence vs. magnitude or direction
- Histogram of bias vs. magnitude
- Histogram of bias vs. direction
- Dual rose plot (overlapping roses)
- Peak event plot including joint (coinciding) individual peaks

The quality indices are described below, and their definitions are listed in Tabella A1. Most of the quality indices are based on the entire data set, and hence the quality indices should be considered averaged measures and may not be representative of the accuracy during rare conditions.

The MEAN represents the mean of modelled data, while the bias is the mean difference between the modelled and observed data. AME is the mean of the absolute difference, and RMSE is the root mean square of the difference. The MEAN, BIAS, AME and RMSE are given as absolute values and relative to the average of the observed data in percent in the scatter plot.

The scatter index (SI) is a non-dimensional measure of the difference calculated as the unbiased root-mean-square difference relative to the mean absolute value of the observations. In open water, an SI below 0.2 is usually considered a small difference (excellent agreement) for significant wave heights. In confined areas or during calm conditions, where mean significant wave heights are generally lower, a slightly higher SI may be acceptable (the definition of SI implies that it is negatively biased (lower) for time series with high mean values compared to time series with lower mean values (and same scatter/spreading), although it is normalised).

EV is the explained variation and measures the proportion  $[0 - 1]$  to which the model accounts for the variation (dispersion) of the observations.

The correlation coefficient (CC) is a non-dimensional measure reflecting the degree to which the variation of the first variable is reflected linearly in the variation of the second variable. A value close to 0 indicates very limited or no (linear) correlation between the two data sets, while a value close to 1 indicates a very high or perfect correlation. Typically, a CC above 0.9 is considered a high correlation (good agreement) for wave heights. It is noted that CC is 1 (or -1) for any two fully linearly correlated variables, even if they are not 1:1. However, the slope and intercept of the linear relation may be different from 1 and 0, respectively, despite CC of 1 (or -1).

The Q-Q line slope and intercept are found from a linear fit to the data quantiles in a least-square sense. The lower and uppermost quantiles are not included on the fit. A regression line slope different from 1 may indicate a trend in the difference.

The peak ratio (PR) is the average of the  $N_{\text{peak}}$  highest model values divided by the average of the  $N_{\text{peak}}$  highest observations. The peaks are found individually for each data set through the Peak-Over-Threshold (POT) method applying an average annual number of exceedances of 4 and an inter-event time of 36 hours. A general underestimation of the modelled peak events results in PR below 1, while an overestimation results in a PR above 1.

An example of a peak plot is shown in Figure A1. 'X' represents the observed peaks (x-axis), while 'Y' represents the modelled peaks (y-axis), both represented by circles ('o') in the plot. The joint (coinciding) peaks, defined as any X and Y peaks within  $\pm 36$  hours<sup>13</sup> of each other (i.e., less than or equal to the number of individual peaks), are represented by crosses ('x'). Hence, the joint peaks ('x') overlap with the individual peaks ('o') only if they occur at the same time exactly. Otherwise, the joint peaks ('x') represent an additional point in the plot, which may be associated with the observed and modelled individual peaks ('o') by searching in the respective X and Y-axis directions, see example with red lines in Figure A1. It is seen that the 'X' peaks are often underneath the 1:1 line, while the 'Y' peaks are often above the 1:1 line.

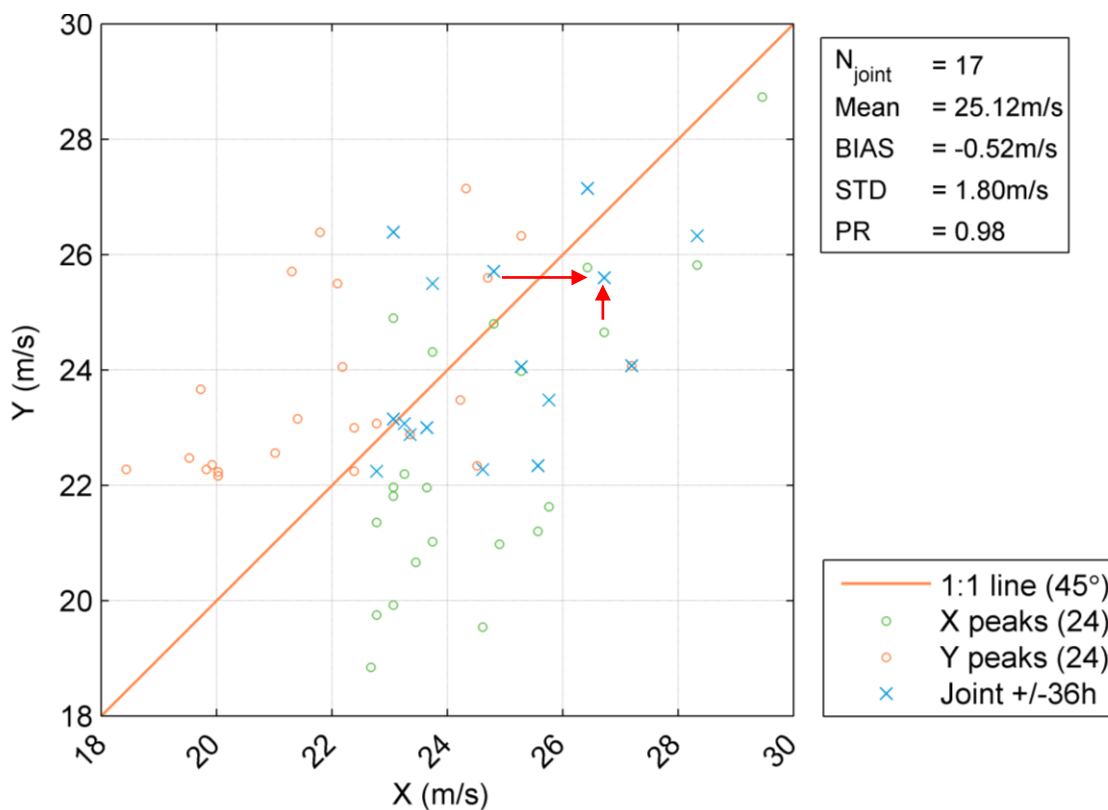


Figure A1 Example of peak event plot (wind speed)

<sup>13</sup> 36 hours is chosen arbitrarily as representative of an average storm duration. Often the observed and modelled storm peaks are within 1-2 hours of each other.

Tabella A1 Definition of model quality indices (X = Observation, Y = Model)

Abbreviation	Description	Definition
N	Number of data (synchronised)	–
MEAN	Mean of Y data, Mean of X data	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \equiv \bar{Y}$ , $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \equiv \bar{X}$
STD	Standard deviation of Y data Standard deviation of X data	$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y - \bar{Y})^2}$ , $\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X - \bar{X})^2}$
BIAS	Mean difference	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - X)_i = \bar{Y} - \bar{X}$
AME	Absolute mean difference	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ( Y - X )_i$
RMSE	Root mean square difference	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - X)_i^2}$
SI	Scatter index (unbiased)	$\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - X - \text{BIAS})_i^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  X_i }$
EV	Explained variance	$\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 - \sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X}) - (Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$
CC	Correlation coefficient	$\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$
QQ	Quantile-Quantile (line slope and intercept)	Linear least square fit to quantiles
PR	Peak ratio (of $N_{\text{peak}}$ highest events)	$\text{PR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{peak}}} Y_i}{\sum_{i=1}^{N_{\text{peak}}} X_i}$



## ALLEGATO B – Extreme Value Analysis





# DHI Extreme Value Analysis (EVA)

## Contents

<b>1</b>	<b>DHI Extreme Value Analysis (EVA).....</b>	<b>2</b>
1.1	Summary of approach .....	2
1.2	Long-term distributions .....	3
1.3	Individual wave and crest height .....	3
1.4	Subset extremes.....	5
1.5	Uncertainty assessment .....	7
1.6	Confidence limits .....	7
1.7	Joint probability analyses (JPA) .....	8
1.8	References .....	10

## Revisions

Date	Description	Initials
2021-08-13	Version 1.0.	PDG

## Nomenclature

Abbreviation	Explanation
$C$	Individual crest level [m]
$C_{max}$	Maximum (highest) individual crest level [m]
$C_{mp}$	Most probable maximum individual crest level in a storm event [m]
$H_{m0}$	Zerth moment significant wave height [m]
$H$	Individual (trough-crest) wave height [m]
$H_{max}$	Maximum (highest) individual (trough-crest) wave height [m]
$H_{mp}$	Most probable maximum individual wave height in a storm event [m]
$T_R$	Return period [years]

# 1 DHI Extreme Value Analysis (EVA)

This document describes the DHI extreme value analysis (EVA).

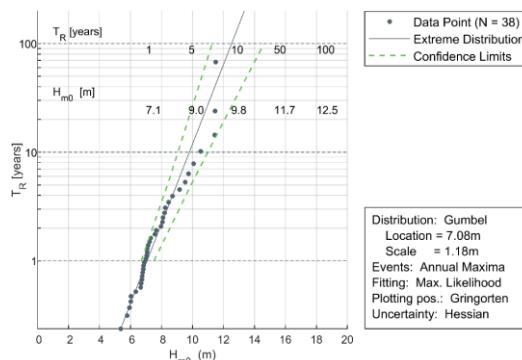
## 1.1 Summary of approach

Extreme values with conditioned long return periods are estimated by fitting a probability distribution to historical data. Several distributions, data selection and fitting techniques are available for estimation of extremes, and the estimated extremes are often rather sensitive to the choice of method. However, it is not possible to choose a preferred method only on its superior theoretical support or widespread acceptance within the industry. Hence, it is common practice to test several approaches and make the final decision based on goodness of fit.

The typical extreme value analyses involved the following steps:

1. Extraction of independent identically-distributed events by requiring that events are separated by at least 36 hours (or similar), and that the value between events had dropped to below 70% (or similar) of the minor of two consecutive events. The extraction is conducted individually for omni and directional/seasonal subsets respectively.
2. Fitting of extreme value distribution to the extracted events, individually for omni and directional/seasonal subsets. Distribution parameters are estimated either by maximum likelihood or least-square methods. The following analysis approaches are used (see Section 1.2 for details):
  - Fitting the Gumbel distribution to annual maxima.
  - Fitting a distribution to all events above a certain threshold (the Peak-Over-Threshold method). The distribution type can be exponential, truncated Weibull or 2-parameter Weibull to excess.
3. Constraining of subseries to ensure consistency with the omni/all-year distribution; see Section 1.4 for details.
4. Bootstrapping to estimate the uncertainty due to sampling error; see Section 1.6 for details.
5. Values of other parameters conditioned on extremes of one variable are estimated using the methodology proposed in [1] (Heffernan & Tawn).

Figure 1.1 shows an example of EVA based on 38 years of hindcast data and a Gumbel distribution fitted to the annual maxima using max. likelihood.



**Figure 1.1 Example of traditional extreme value analysis of  $H_{m0}$ .**

A Gumbel distribution fitted to the annual maxima using maximum likelihood.

## 1.2 Long-term distributions

The following probability distributions are often used in connection with extreme value estimation:

- 2-parameter Weibull distribution
- Truncated Weibull distribution
- Exponential distribution
- Gumbel distribution

The 2-parameter Weibull distribution is given by:

$$P(X < x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1.1)$$

with distribution parameters  $\alpha$  (shape) and  $\beta$  (scale). The 2-parameter Weibull distribution used in connection with Peak-Over-Threshold (POT) analysis is fitted to the excess of data above the threshold, i.e., the threshold value is subtracted from data prior to fitting.

The 2-parameter *truncated* Weibull distribution is given by:

$$P(X < x) = 1 - \frac{1}{P_0} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1.2)$$

with distribution parameters  $\alpha$  (shape) and  $\beta$  (scale) and the exceedance probability,  $P_0$ , at the threshold level,  $\gamma$ , given by:

$$P_0 = \exp\left(-\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1.3)$$

The 2-parameter truncated Weibull distribution is used in connection with Peak-Over-Threshold analysis, and as opposed to the non-truncated 2-p Weibull, it is fitted directly to data, i.e., the threshold value is **not** subtracted from data prior to fitting.

The exponential distribution is given by:

$$P(X < x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - \mu}{\beta}\right)\right), \quad x \geq \mu \quad (1.4)$$

with distribution parameters  $\beta$  (scale) and  $\mu$  (location). Finally, the Gumbel distribution is given by:

$$P(X < x) = \exp\left(-\exp\left(\frac{\mu - x}{\beta}\right)\right) \quad (1.5)$$

with distribution parameters  $\beta$  (scale) and  $\mu$  (location).

## 1.3 Individual wave and crest height

### Short-term distributions

The short-term distributions of individual wave heights and crests conditional on  $H_{m0}$  are assumed to follow the distributions proposed by Forristall, (Forristall G. Z., 1978) and (Forristall G. Z., 2000). The Forristall wave height distribution is based on Gulf of Mexico measurements, but experience from the North Sea has shown that these distributions may have a more general applicability. The Forristall wave and crest height distributions are given by:

$$P(X > x | H_{m0}) = \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha H_{m0}}\right)^\beta\right) \quad (1.6)$$

where the distribution parameters,  $\alpha$  and  $\beta$ , are as follows:

Forristall wave height:  $\alpha = 0.681$   $\beta = 2.126$

Forristall crest height (3D):  $\alpha = 0.3536 + 0.2568 \cdot S_1 + 0.0800 \cdot U_r$

$\beta = 2 - 1.7912 \cdot S_1 - 0.5302 \cdot U_r + 0.284 \cdot U_r^2$

$$S_1 = \frac{2\pi}{g} \frac{H_{m0}}{T_{01}^2} \quad \text{and} \quad U_r = \frac{H \cdot L^2}{d^3}$$

For this type of distribution, the distribution of the extremes of a given number of events,  $N$ , (waves or crests) converges towards the Gumbel distribution conditional on the most probable value of the extreme event,  $H_{mp}$  (or  $C_{mp}$  for crests):

$$P(h_{\max} | H_{mp}) = \exp \left( - \exp \left( - \ln N \left( \left( \frac{h_{\max}}{H_{mp}} \right)^\beta - 1 \right) \right) \right) \quad (1.7)$$

### 1.3.1 Individual waves (modes)

The extreme individual wave and crest heights are derived using the storm mode approach, (Tromans, P.S. and Vanderschuren, L., 1995). The storm modes, or most probable values of the maximum wave or crest in the storm ( $H_{mp}$  or  $C_{mp}$ ), are obtained by integrating the short-term distribution of wave heights conditional on  $H_{m0}$  over the entire number of sea states making up the storm. In practice, this is done by following these steps:

1. Storms are identified by peak extraction from the time series of significant wave height. Individual storms are taken as portions of the time series with  $H_{m0}$  above 0.7 times the storm peak,  $H_{m0}$ .
2. The wave (or crest) height distribution is calculated for each sea state above the threshold in each individual storm. The short-term distribution of  $H$  (or  $C$ ) conditional on  $H_{m0}$ ,  $P(h|H_{m0})$ , is assumed to follow the empirical distributions by Forristall (see Section 1.3). The wave height probability distribution is then given by the following product over the  $n$  sea states making up the storm:

$$P(H_{\max} < h) = \prod_{j=1}^{n_{\text{seastates}}} P(h | H_{m0,j})^{N_{\text{waves},j}} \quad (1.8)$$

with the number of waves in each sea state,  $N_{\text{waves}}$ , being estimated by deriving the mean zero-crossing period of the sea state. The most probable maximum wave height (or mode),  $H_{mp}$ , of the storm is given by:

$$P(H_{\max} < h) = \frac{1}{e} \quad (1.9)$$

This produces a database of historical storms each characterised by its most probable maximum individual wave height which is used for further extreme value analysis.

### 1.3.2 Convolution of short-term variability with long-term storm density

The long-term distribution of individual waves and crests is found by convolution of the long-term distribution of the modes (subscript  $_{mp}$  for most probable value) with the distribution of the maximum conditional on the mode given by:

$$\begin{aligned}
 P(H_{\max}) &= \int_0^{\infty} P(h_{\max} | H_{mp}) \cdot p(H_{mp}) dH_{mp} \\
 &= \int_0^{\infty} \exp \left( - \exp \left( - \ln N \left( \left( \frac{h}{H_{mp}} \right)^{\beta} - 1 \right) \right) \right) \cdot p(H_{mp}) dH_{mp}
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

The value of  $N$ , which goes into this equation, is determined by defining equivalent storm properties for each individual storm. The equivalent storms have constant  $H_{m0}$  and a duration such that their probability density function of  $H_{\max}$  or  $C_{\max}$  matches that of the actual storm. The density functions of the maximum wave in the equivalent storms are given by:

$$p(H_{\max} | H_{m0,eq}, N_{eq}) = \frac{d}{dH} \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{H_{\max}}{\alpha \cdot H_{m0,eq}} \right)^{\beta} \right) \right]^{N_{eq}} \tag{1.11}$$

The  $\beta$  parameter in eq. (1.10) comes from the short-term distribution of individual crests, eq. (1.6), and is a function of wave height and wave period. Based on previous studies, it has been assessed that the maximum crest heights are not sensitive to  $\beta_c$  for a constant value of 1.88 and hence, it is decided to apply  $\beta_c = 1.88$ . The number of waves in a storm,  $N$ , was conservatively calculated from a linear fit to the modes minus one standard deviation.

### 1.4 Subset extremes

Estimates of subset (e.g., directional, and monthly) extremes are required for several parameters. To establish these extremes, it is common practice to fit extreme value distributions to data sampled from the population (i.e., the model database) that fulfils the specific requirement e.g., to direction, i.e., the extremes from each direction are extracted and distributions fitted to each set of directional data in turn. By sampling an often relatively small number of values from the data set, each of these directional distributions is subject to uncertainty due to sampling error. This will often lead to the directional distributions being inconsistent with the omnidirectional distribution fitted to the maxima of the entire (omnidirectional) data set. Consistency between directional and omnidirectional distributions is ensured by requiring that the product of the  $n$  directional annual non-exceedance probabilities equals the omnidirectional, i.e.:

$$\prod_{i=1}^n F_i(x, \hat{\theta}_i)^{N_i} = F_{omni}(x, \hat{\theta}_{omni})^{N_{omni}} \tag{1.12}$$

where  $N_i$  is the number of sea states or events for the  $i$ 'th direction and  $\hat{\theta}_i$ , the estimated distribution parameter. This is ensured by estimating the distribution parameters for the individual distributions and then minimizing the deviation:

$$\delta = \sum_{x_j} \left[ -\ln \left( -N_{omni} \ln F_{omni}(x, \hat{\theta}_{omni}) \right) + \ln \left( -\sum_{i=1}^n N_i \ln F_i(x_j, \hat{\theta}_i) \right) \right]^2 \quad (1.13)$$

Here  $x_j$  are extreme values of the parameter for which the optimization is carried out, i.e., the product of the directional non-exceedance probabilities is forced to match the omnidirectional for these values of the parameter in question.

The directional extremes presented in this report are given without scaling, that is, a  $T_{yr}$  event from direction  $i$  will be exceeded once every  $T$  years on the average. The same applies for monthly extremes. A  $T_{yr}$  monthly event corresponds to the event that is exceeded once (in that month) every  $T$  years, which is the same as saying that it is exceeded once every  $T/12$  years (on average) of the climate for that month.

### 1.4.1 Optimized directional extremes

The directional extremes are derived from fits to each subseries data set meaning that a  $T_R$  year event from each direction will be exceeded once every  $T_R$  years on average. Having e.g., 12 directions, this means that **one** of the directions will be exceeded once every  $T_R/12$  years on average. A 100-year event would thus be exceeded once every  $100/12 = 8\frac{1}{3}$  years (on average) from **one** of the directions.

For design application, it is often required that the summed (overall) return period (probability) is  $T_R$  years. A simple way of fulfilling this would be to take the return value corresponding to the return period  $T_R$  times the number of directions, i.e., in this case the  $12 \times 100 = 1200$ -year event for each direction. However, this is often not optimal since it may lead to very high estimates for the strong sectors, while the weak sectors may still be insignificant.

Alternatively, an optimized set of directional extreme values may be produced for design purpose in addition to the individual values of directional extremes described above. The optimized values are derived by increasing (scaling) the individual  $T_R$  values of the directions to obtain a summed (overall) probability of  $T_R$  years while ensuring that the extreme values of the strong sector(s) become as close to the overall extreme value as possible. In practice, this is done by increasing the  $T_R$  of the weak directions more than that of the strong sectors but ensuring that the sum of the inverse directional  $T_R$ 's equals the inverse of the targeted return period, i.e.:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{R,i}} = \frac{1}{T_{R,omni}} \quad (1.14)$$

where  $n$  is the number of directional sectors and  $T_{R,omni}$  is the targeted overall return period.

## 1.5 Uncertainty assessment

The extreme values are estimated quantities and therefore all associated with uncertainty. The uncertainty arises from several sources:

### Measurement/model uncertainty

The contents of the database for the extreme value analysis are associated with uncertainty. This type of uncertainty is preferably mitigated at the source – e.g., by correction of biased model data and removal of obvious outliers in data series. The model uncertainty can be quantified if simultaneous good quality measurements are available for a reasonably long overlapping period.

### True extreme value distribution is unknown

The distribution of extremes is theoretically unknown for levels above the levels contained in the extreme value database. There is no justification for the assumption that a parametric extreme value distribution fitted to observed/modelled data can be extrapolated beyond the observed levels. However, it is common practice to do so, and this obviously is a source of uncertainty in the derived extreme value estimates. This uncertainty, increasing with decreasing occurrence probability of the event in question, is not quantifiable but the metocean expert may minimize it by using experience and knowledge when deciding on an appropriate extreme value analysis approach. Proper inclusion of other information than direct measurements and model results may also help to minimize this type of uncertainty.

### Uncertainty due to sampling error

The number of observed/modelled extreme events is limited. This gives rise to sampling error which can be quantified by statistical methods such as Monte Carlo simulations or bootstrap resampling. The results of such an analysis are termed the confidence limits. The confidence limits (see Section 1.6) should **not** be mistaken for the total uncertainty in the extreme value estimate.

### Settings of the analysis (judgement)

Any EVA involves the need to define the various settings of the analysis (threshold, distribution, and fitting method), which introduces subjectivity to the analysis. The sensitivity of these settings can be assessed by comparing the resulting extreme values, and the goodness of fit can, to some extent, be objectively assessed by statistical measures. However, standard practice typically includes manual inspection of the fitted distributions. Hence, the final settings, and thus results, relies on the experience and preference of the metocean expert conducting the analysis ('engineering judgement'). The tail of the distributions (the values of long the return periods) can be particularly sensitive to the settings of the analysis.

## 1.6 Confidence limits

The confidence limits of extreme estimates are established from a bootstrap analysis or a Monte Carlo simulation.

The bootstrap analysis estimates the uncertainty due to sampling error. The bootstrap consists of the following steps:

1. Construct a new set of extreme events by sampling randomly with replacement from the original data set of extremes
2. Carry out an extreme value analysis on the new set to estimate T-year events



An empirical distribution of the T-year event is obtained by looping steps 1 and 2 many times. The percentiles are read from the resulting distribution.

In the Monte Carlo simulation, the uncertainty is estimated by randomly generating many samples that have the same statistical distribution as the observed sample.

The Monte Carlo simulation can be summarised in the following steps:

1. Randomly generating a sample consisting of N data points, using the estimated parameters of the original distribution. If the event selection is based on a fixed number of events, N is set equal to the size of original data set of extremes. If the event selection is based on a fixed threshold, the sample size N is assumed to be Poisson-distributed.
2. From the generated sample, the parameters of the distribution are estimated, and the T-year return estimates are established.

Steps 1 and 2 are looped numerous times, whereby an empirical distribution of the T-year event is obtained. The quartiles are read from the resulting distribution.

### 1.7 Joint probability analyses (JPA)

Values of other parameters conditioned on extremes of one variable are estimated using the methodology proposed in [1] (Heffernan & Tawn). This method consists in modelling the marginal distribution of each variable separately. The variables are transformed from physical space, X, to standard Gumbel space by the relationship:

$$Y = \text{LN} \left( -\text{LN} \left( F(X, \hat{\theta}) \right) \right) \quad (1.15)$$

where  $F(X, \hat{\theta})$  denotes the distribution function of the variable, X, with estimated parameters,  $\hat{\theta}$ . No restriction is given on the marginal model of the variables. A combination of the empirical distribution for the bulk of events and a parametric extreme value distribution function fitted to the extreme tail of data was adopted here. For parameters which may have both a positive and a negative extreme such as the water level conditioned on wave height, both the positive and the negative extreme tail are modelled parametrically.

The dependence structure of the two variables is modelled in standard Gumbel distribution space, conditioning one variable by the other. The model takes the form:

$$(Y_2 | Y_1 = y_1) = ay_1 + y_1^b Z \quad (1.16)$$

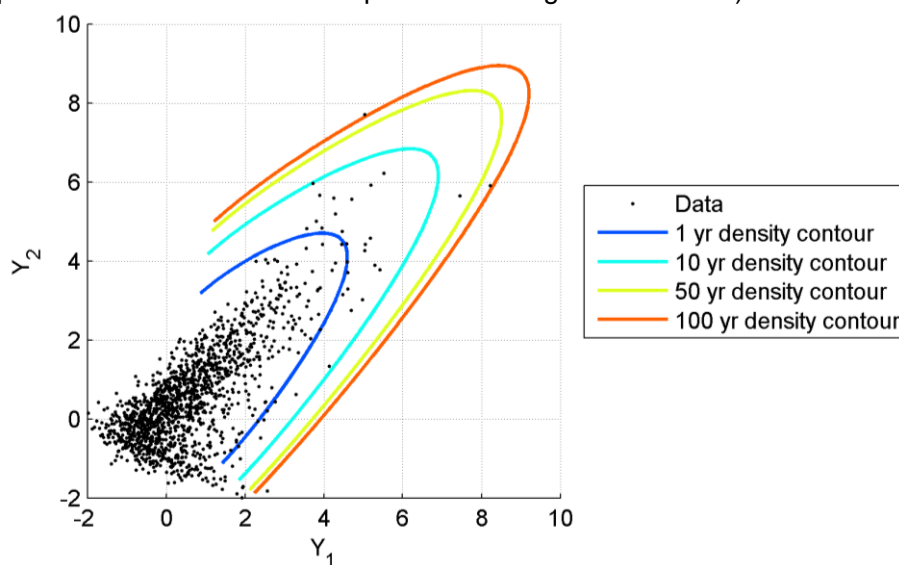
with  $Y_1$  being the conditioning variable and  $Y_2$  the conditioned. The residual, Z, is assumed to converge to a normal distribution, G, with increasing  $y_1$ . The parameters,  $\hat{a}$  and  $\hat{b}$ , are found from regression and the parameters,  $\hat{\mu}$  and  $\hat{\sigma}$ , of the normal distribution, G, estimated from the residuals, Z:

$$Z = \frac{y_2 - a \cdot y_1}{y_1^b} \quad (1.17)$$

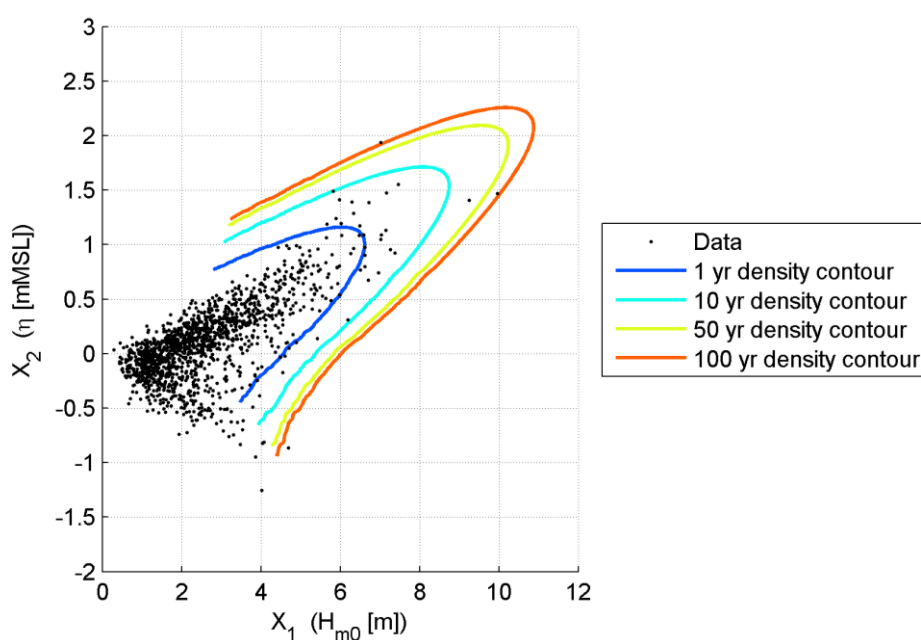
Figure 1.2 shows an example of the modelled dependence structure for  $H_{m0}$  and water level in standard Gumbel space. Figure 1.3 shows the same in physical space. The model is clearly capable of describing the positive

association between wave heights and water level for this condition and appears also to capture the relatively large spreading.

The applied joint probability model is event-based. This means that independent events of the conditioning parameter are extracted from the model data. The combined inter-event time and inter-event level criterion described in Section 1.1 is applied to isolate independent events of the conditioning parameter. The conditioned parameter is extracted from the model time series at the point in time of the peak of the conditioning parameter. Time averaging of the conditioned parameter is often carried out prior to data extraction to reduce the influence of phases in the analysis (the fact that the water level may not peak at the same time as the peak wave height for instance).



**Figure 1.2** Dependence structure of  $H_{m0}$  and water level transformed into standard Gumbel space.



**Figure 1.3** Dependence structure of  $H_{m0}$  and water in physical space

## 1.8 References

- [1] J. E. Heffernan and J. A. Tawn, "A conditional approach for multivariate extreme values," *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, vol. 66, no. 3, pp. 497-546, 2004.



Ichnusa wind power srl

**iLStudio.**  
Engineering & Consulting Studio

<b>PARCO EOLICO FLOTTANTE NEL MARE DI SARDEGNA SUD OCCIDENTALE</b> PROGETTO DEFINITIVO		
<b>Relazione meteomarina</b>		
Codice documento: <b>C0421UR08RELMET00a</b>	Data emissione: <b>Marzo 2023</b>	Pagina <b>153 di 153</b>

*Il presente documento, composto da n. 155 fogli è protetto dalle leggi nazionali e comunitarie in tema di proprietà intellettuali delle opere professionali e non può essere riprodotto o copiato senza specifica autorizzazione del Progettista.*

Taranto, Marzo 2023

Dott. Ing. Luigi Severini