

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA
PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO
NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE - BARIUM BAY
74 WTG – 1.110 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

Progettazione e SIA



Indagini ambientali e studi specialistici



Studio misure di mitigazione e compensazione



supervisione scientifica



SIA.ES.7 CLIMA METEOMARINO

ES.7.1 Meteorologia

REV.	DATA	DESCRIZIONE



INDICE

INDICE	2
ABBREVIAZIONI	4
FIGURE	5
TABELLE	9
1 INTRODUZIONE	11
1.1 Obiettivo	11
1.2 Organizzazione	11
2 CLIMATOLOGIA GENERALE	12
2.1 Topografia	12
2.2 Meteorologia	13
2.3 Vento e onde	13
2.4 Correnti	14
2.5 Temperatura e salinità	15
3 DATABASE METEOMARINI	16
3.1 Locazione geografica	16
3.2 ERAS	18
3.2.1 Calibrazione dei dati onda	19
3.2.2 Calibrazione dei dati vento	20
3.3 MEDSEA	21
3.4 TPXO	22
4 CONDIZIONI METEOMARINE TIPICHE	23
4.1 Vento	23
4.1.1 Statistiche mensili e annuali	23
4.1.2 Rose dei venti e tabelle di frequenza	25
4.2 Onde	27
4.2.1 Statistiche mensili e annuali	27
4.2.2 Rosa d'onda e tabelle di frequenza H_s -direzione e H_s-T_p , con scatter plot	29
4.2.3 Distribuzione congiunta H_s-T_p	31
4.2.4 Distribuzione congiunta H_s-T_z	32
4.3 Vento e onde	33
4.3.1 Distribuzione congiunta $V_{10m,1h}-H_s$	33
4.4 Correnti	35
4.4.1 Statistiche mensili e annuali	35
4.4.2 Rosa delle correnti e tabelle di frequenza	37
4.5 Livello del mare	41

4.5.1	Statistiche mensili e annuali _____	41
4.5.2	Termini non armonici _____	43
4.6	Temperatura e salinità dell'acqua di mare _____	44
4.6.1	Temperatura _____	44
4.6.2	Salinità _____	47
4.6.3	Diagramma Temperatura-Salinità _____	51
5	CONDIZIONI METEOMARINE ESTREME _____	52
5.1	Vento _____	52
5.1.1	Studio di sensibilità _____	52
5.1.2	Valori estremi omnidirezionali e direzionali, per i vari periodi di ritorno _____	56
5.2	Onde _____	57
5.2.1	Studio di sensibilità _____	58
5.2.2	Valori estremi omnidirezionali e direzionali $H_{S,TR}$, per i vari periodi di ritorno _____	61
5.2.3	Valori estremi omnidirezionali e direzionali T_p associati a $H_{S,TR}$, per i vari periodi di ritorno _____	62
5.2.4	Onda massima: altezza e periodo _____	62
5.3	Correnti _____	64
5.3.1	Studio di sensibilità _____	64
5.3.2	Valori estremi omnidirezionali e direzionali, per i vari periodi di ritorno _____	67
5.4	Livello del mare _____	68
5.4.1	Studio di sensibilità _____	68
5.4.2	Valori estremi per i vari periodi di ritorno _____	71
6	CONCLUSIONI _____	72
6.1	Suggerimenti per future attività _____	72
BIBLIOGRAFIA _____		73

ABBREVIAZIONI

GEV	Generalized Extreme Value (distribution)
H	Individual wave height
$H_{\max,TR}$	Individual wave height, max height associated with the return period T_R
H_{TR}	Individual wave height for the return period
H_S	Significant wave height (spectral)
$H_{S,TR}$	Significant wave height (spectral) for the return period
HAT	Highest Astronomical Tide
LAT	Lowest Astronomical Tide
MHWS	Mean High Water Spring
MHWN	Mean High Water Neap
MLWN	Mean Low Water Neap
MLWS	Mean Low Water Spring
$T_{H_{\max,TR}}$	(Individual) wave period for the max wave height associated with the return period T_R
T_P	Peak period (spectral)
T_Z	Mean zero crossing period (spectral)
$U_{xx,xx,tide}$	(Marine) current speed, tidal
$U_{xx,xx,residual}$	(Marine) current speed, residual
$U_{xx,xx,tot}$	(Marine) current speed, total
$U_{am,bh,tide/resid/tot}$	Current speed, at depth a (in m), discretized in time with step b (in hours)
$U_{am,TR,tide/resid/tot}$	(Expected) return period current speed, at depth a (in m)
V	Wind speed
$V_{am,bh}$	Wind speed, at height a (in m), discretized in time with step b (in hours)
$V_{am,TR}$	(Expected) return period wind speed, at height a (in m)
η (eta)	Seawater vertical distance above mean still water level
$\eta_{bh,tide}$	Seawater vertical distance above mean still water level, stochastic
$\eta_{bh,resid}$	Seawater vertical distance above mean still water level, residual
$\eta_{bh,tot}$	Seawater vertical distance above mean still water level, total
$\eta_{bh,tide/resid/tot}$	Seawater vertical distance above mean still water level, discretized in time with step b (in hours)
$\eta_{TR,tide/resid/tot}$	(Expected) return period seawater vertical distance above mean still water level

FIGURE

Figura 1 Batimetria del mare Adriatico, da (Artegiani et al., 1997). Le linee “a” e “b” demarcano la divisione tra bacino Adriatico del nord, centrale, e del sud	12
Figura 2 Circolazione generale dell'Adriatico, da (Mosetti, 1984).....	14
Figura 3 Profili stagionali di temperatura e salinità nell'Adriatico del sud, da (Artegiani et al., 1997). Simboli: □ per l'inverno, ○ per la primavera, ◇ per l'estate e Δ per l'autunno.	15
Figura 4 Mappa della regione di interesse, con layout del parco eolico offshore proposto. Punti rossi: aerogeneratore, linee arancioni: cavi elettrici inter-array, linea verde: cavo elettrico collegamento a terra	16
Figura 5 Posizione dei punti dai quali si sono estratte le variabili meteomarine, per ogni database utilizzato, relative alla posizione delle turbine eoliche. Figura generata con Google Earth.....	17
Figura 6 Posizione dei punti dai quali si sono estratte le variabili meteomarine. Ingrandimento su parco eolico: ogni cerchio corrisponde a una turbina eolica. Figura generata con Google Earth.....	18
Figura 7 Scatter diagram H_s modello VS H_s satellite: sx non calibrato, dx dopo calibrazione	20
Figura 8 Scatter diagram $V_{10m,1h}$ modello VS $V_{10m,1h}$ satellite: sx non calibrato, dx dopo calibrazione .21	21
Figura 9 Statistiche mensili della velocità del vento, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m. (STD = deviazione standard).....	24
Figura 10 Rosa dei venti, considerando le velocità del vento con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m. Direzione: N(0°) indica vento DA nord	25
Figura 11 Statistiche mensili di H_s , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021 (STD = deviazione standard)	28
Figura 12 Statistiche mensili di T_p , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021 (STD = deviazione standard)	28
Figura 13 Statistiche mensili di T_z , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021 (STD = deviazione standard)	28
Figura 14 Rosa d'onda, basata su dati H_s e direzione media d'onda (MWD), con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Direzione: N(0°) indica vento DA nord.....	29
Figura 15 Scatter plot omnidirezionale H_s - T_p . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Vedi sezione 4.2.3 per equazione e coefficienti della linea di correlazione	31
Figura 16 Scatter plot omnidirezionale H_s - T_z . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Vedi sezione 4.2.4 per equazione e coefficienti della linea rossa	32
Figura 17 Scatter plot omnidirezionale $V_{10m,1h}$ - H_s . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Vedi sezione 4.3.1 per equazione e coefficienti della linea di correlazione	33
Figura 18 Statistiche mensili della velocità della corrente, componente mareale , basata sulle costituenti delle maree considerate in TPXO9.2 (STD = deviazione standard)	36
Figura 19 Statistiche mensili della velocità della corrente, componente residua , basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019 (STD = deviazione standard)	36
Figura 20 Statistiche mensili della velocità della corrente, componente totale , somma delle componenti mareale e residua (STD = deviazione standard)	37

Figura 21 Rosa delle correnti, componente mareale , basata sulle costituenti delle maree considerate in TPX09.2. Direzione: N(0°) indica corrente DA nord	38
Figura 22 Rosa delle correnti, componente residua , basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019. Direzione: N(0°) indica corrente DA nord.....	38
Figura 23 Rosa delle correnti, componente totale , somma delle componenti mareale e residua. Direzione: N(0°) indica corrente DA nord.....	39
Figura 24 Statistiche mensili del livello del mare, componente mareale , basata sulle costituenti delle maree considerate in TPX09.2 (STD = deviazione standard)	42
Figura 25 Statistiche mensili del livello del mare, componente residua , basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019 (STD = deviazione standard)	42
Figura 26 Statistiche mensili del livello del mare, componente totale , somma delle componenti mareale e residua (STD = deviazione standard)	43
Figura 27 Statistiche mensili della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, fondale marino (STD = deviazione standard)	45
Figura 28 Statistiche mensili della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, metà colonna (STD = deviazione standard)	45
Figura 29 Statistiche mensili della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, superficie (STD = deviazione standard)	46
Figura 30 Statistiche mensili della temperatura media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da gennaio a giugno	46
Figura 31 Statistiche mensili della temperatura media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da luglio a dicembre.....	47
Figura 32 Statistiche mensili della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, fondale marino (STD = deviazione standard).....	48
Figura 33 Statistiche mensili della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, metà colonna (STD = deviazione standard)	49
Figura 34 Statistiche mensili della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, superficie (STD = deviazione standard).....	49
Figura 35 Statistiche mensili della salinità media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da gennaio a giugno	50
Figura 36 Statistiche mensili della salinità media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da luglio a dicembre.....	50
Figura 37 Diagramma T-S, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, di temperatura e salinità. Il colore si riferisce alla profondità, con scala a destra (da 0 m s.l.m. a circa -145 m s.l.m., corrispondente al fondo). L'ellisse rosso rappresenta la MLIW.....	51
Figura 38 Velocità del vento (omnidirezionali) a 10m s.l.m., periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora.....	53

Figura 39 Velocità del vento (omnidirezionali) a 100m s.l.m., periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora.....	53
Figura 40 Probabilità V_{100m} estreme, funzione teorica GEV (linea tratteggiata) VS valori estratti da serie temporale (croci), da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora.....	54
Figura 41 Probabilità V_{100m} estreme, funzione teorica Extreme Value (Gumbel) (linea tratteggiata) VS valori estratti da serie temporale (croci), da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora	54
Figura 42 Probabilità V_{100m} estreme, funzione teorica Weibull (linea tratteggiata) VS valori estratti da serie temporale (croci), da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora.....	55
Figura 43 Probabilità V_{100m} estreme, distribuzione omnidirezionale teorica GEV, 5 eventi/anno (linea tratteggiata) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)	55
Figura 44 Probabilità V_{100m} estreme, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 5 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 0° a 150°	56
Figura 45 Probabilità V_{100m} estreme, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 5 eventi/anno (linea tratteggiata) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 180° a 330°	56
Figura 46 Altezza significativa d'onda estrema, periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora	58
Figura 47 Probabilità H_s estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica GEV , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora	59
Figura 48 Probabilità H_s estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica Extreme Value (Gumbel) , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora.....	59
Figura 49 Probabilità H_s estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica Weibull , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora	60
Figura 50 H_s estreme, distribuzione omnidirezionale teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)	60
Figura 51 H_s estreme, distribuzione teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre), da 0° a 150°	61
Figura 52 H_s estreme, distribuzione teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre), da 180° a 330°	61
Figura 53 Velocità della corrente totale (omnidirezionale), periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora.....	64

Figura 54 Probabilità U_{0m} estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica GEV , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora	65
Figura 55 Probabilità U_{0m} estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica Extreme value (Gumbel) , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora.....	65
Figura 56 Probabilità U_{0m} estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica Weibull , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora	66
Figura 57 Velocità della corrente totale estrema, distribuzione omnidirezionale teorica GEV, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)	66
Figura 58 Velocità della corrente totale estrema, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 0° a 150°	67
Figura 59 Velocità della corrente totale estrema, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 180° a 330°	67
Figura 60 Livello del mare totale, periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora.....	69
Figura 61 Probabilità η estremo (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica GEV , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora.....	69
Figura 62 Probabilità η estremo (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica Extreme Value (Gumbel) , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora.....	70
Figura 63 Probabilità η estremo (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica Weibull , da 1 a 5 eventi/anno (λ). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora	70
Figura 64 Livello del mare totale estremo, distribuzione teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)	71

TABELLE

Tabella 1: caratteristiche principali dei dati meteomarini di base utilizzati	16
Tabella 2 Caratteristiche principali di MEDSEA. Estratta e adattata da (Drudi, Grandi and Clementi, 2019)	22
Tabella 3 Statistiche mensili e annuali della velocità del vento, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m.. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti)	23
Tabella 4 Tabelle di frequenza, in percentuale (%), delle velocità del vento, divisa per intervalli (bin) di vento e per direzione. Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)	26
Tabella 5 Statistiche mensili e annuali di H_s , T_p e T_z , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti).....	27
Tabella 6 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni H_s -direzione. Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)	30
Tabella 7 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni omnidirezionali H_s - T_p . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)	31
Tabella 8 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni omnidirezionali H_s - T_z . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)	32
Tabella 9 Tabelle di frequenza, in percentuale (sopra) e in numero di occorrenze (sotto), delle combinazioni omnidirezionali $V_{10m,1h}$ - H_s . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta).....	34
Tabella 10 Statistiche mensili e annuali della velocità della corrente (omnidirezionale), componenti mareale (in alto), residua (al centro) e totale (in basso). Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti).....	35
Tabella 11 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni $U_{0m,1h,tidal}$ -direzione (componente mareale) , basata sulle costituenti delle maree considerate in TPXO9.2. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta).....	39
Tabella 12 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni $U_{0m,1h,resid}$ -direzione (componente residua). Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta).....	40
Tabella 13 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni $U_{0m,1h,tot}$ -direzione (componente totale) , somma delle componenti mareale e residua. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)	40
Tabella 14 Statistiche mensili e annuali del livello del mare, componenti mareale (in alto), residua (al centro) e totale (in basso). Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti)	41
Tabella 15 Termini non armonici delle maree	43

Tabella 16 Statistiche mensili e annuali della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in superficie, a metà colonna, e sul fondo. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da blu (valori bassi), al bianco (valori intermedi), al rosso (valori più alti).....	44
Tabella 17 Statistiche mensili e annuali della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in superficie, a metà colonna, e sul fondo. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti).....	48
Tabella 18 Velocità del vento estrema a 10m s.l.m. , omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme GEV, considerando 5 eventi all'anno.....	57
Tabella 19 Velocità del vento estrema a 100m s.l.m. , omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme GEV, considerando 5 eventi all'anno.....	57
Tabella 20 Altezze significative estreme, omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme Weibull, considerando 2 eventi all'anno	62
Tabella 21 Intervalli del periodo di picco T_P associato alle altezze d'onda significative estreme, omnidirezionali e direzionali marginali, presentate in Tabella 20.....	62
Tabella 22 Altezze d'onda massime estreme (periodo di ritorno T_R), omnidirezionali e direzionali marginali ($H_{max,TR}$).....	63
Tabella 23 Periodi d'onda associati a $H_{max,TR}$ ($T_{Hmax,TR}$): limite inferiore e superiore secondo (DNVGL, 2017)	63
Tabella 24 Velocità della corrente (totale) estrema, omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme GEV, considerando 2 eventi all'anno.....	68
Tabella 25 Livelli del mare (totale) estremi, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo la distribuzione Weibull, considerando 2 eventi all'anno	71

1 INTRODUZIONE

Il presente elaborato tecnico è stato realizzato per **Barium Bay s.r.l.** da Scientific Engineering Ltd, nell'ambito del progetto **Parco eolico offshore nel mare Adriatico meridionale (Bari)**.

Esso include, in breve:

- una descrizione dei database utilizzati per ottenere i dati meteomarini di input delle presenti analisi,
- le descrizioni delle metodologie utilizzate per l'elaborazione dei dati meteomarini, al fine di valutare le condizioni meteomarine tipiche ed estreme,
- la presentazione e discussione delle condizioni meteomarine tipiche ed estreme.

Il parco eolico oggetto di analisi si trova nel sud-est dell'Italia, nelle acque della regione Puglia, a est di Brindisi, e comprende 74 turbine eoliche galleggianti da 15 MW, per un totale di 1110 MW.

1.1 Obiettivo

Il presente elaborato tecnico ha come obiettivo quello di definire le condizioni meteomarine, sia tipiche che estreme, per l'area di interesse. Queste informazioni sono elaborate e presentate in modo da poter supportare la progettazione FEED delle turbine eoliche.

1.2 Organizzazione

L'elaborato tecnico è stato impostato come segue:

- Capitolo 1, INTRODUZIONE: il presente capitolo,
- Capitolo 2, CLIMATOLOGIA GENERALE: fornisce una descrizione della climatologia generale dell'Adriatico,
- Capitolo 3, DATABASE METEOMARINI: vengono descritti nel dettaglio le basi di dati che si sono utilizzate per condurre le analisi presentate,
- Capitolo 4, CONDIZIONI METEOMARINE TIPICHE: vengono presentate e analizzate le condizioni meteomarine tipiche presenti nel sito,
- Capitolo 5, CONDIZIONI METEOMARINE ESTREME: vengono derivate le condizioni meteomarine estreme adattando delle distribuzioni teoriche di valori estremi ai valori estremi delle serie temporali considerate nel capitolo 4,
- Capitolo 6, CONCLUSIONI: vengono presentate le principali considerazioni finali e dei suggerimenti per le prossime fasi.

2 CLIMATOLOGIA GENERALE

2.1 Topografia

Il mare Adriatico è lungo circa 750 km e largo 200 km, con una sola, limitata apertura alla sua estremità meridionale (Bertotti and Cavaleri, 2009). Come descritto da (Orlic, Gacic and La Violette, 1992), e rappresentato in Figura 1, la sua forma allungata e il fatto che è un mare quasi chiuso determina la specifica la dinamica delle sue acque. L'Adriatico può essere considerato composto da tre parti, di profondità crescente procedendo da nord a Sud, dove finisce presso lo Stretto d'Otranto. La prima parte, che include il Golfo di Venezia, è relativamente poco profonda, con una pendenza abbastanza uniforme fino a 100 m che poi aumenta rapidamente fino a 200 m all'inizio della seconda parte, appena a sud di Ancona. Questa seconda parte ha una importante caratteristica: una zona di profondità più elevata nella sua parte settentrionale (*Mid Adriatic Pit*, anche chiamati *Pomo depressions*, circa 280 m di profondità) e nella sua zona meridionale, il *Palagruza* (o *Pelagosa*) *Sill*. La terza parte, separata dalla seconda da una linea immaginaria che va dalla penisola del Gargano alla costa croata, presenta una zona molto estesa e profonda, il *South Adriatic Pit* (1200 m circa), per poi risalire verso lo Stretto d'Otranto, dove l'Adriatico è collegato al Mediterraneo. Lo stretto d'Otranto ha una profondità media di 325m, e una larghezza di circa 75 km. La costa occidentale dell'Adriatico presenta un andamento più regolare, con isobate generalmente parallele alla costa e con una profondità che aumenta in modo uniforme verso il mare. La costa orientale, al contrario, è più frastagliata e presenta molte isole e promontori che impongono una diminuzione piuttosto repentina della profondità, portando anche a isobate dall'andamento più complesso.

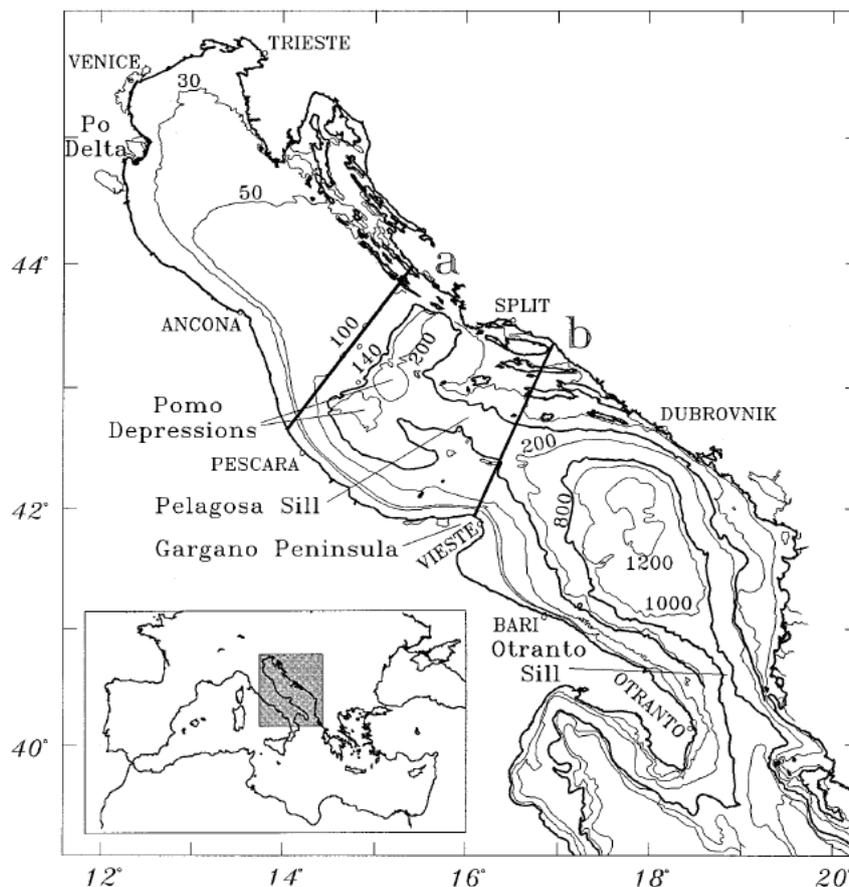


Figura 1 Batimetria del mare Adriatico, da (Artegiani et al., 1997). Le linee "a" e "b" demarcano la divisione tra bacino Adriatico del nord, centrale, e del sud

2.2 Meteorologia

Come riportato da (Orlic, Gacic and La Violette, 1992), il mare Adriatico è situato tra la zona subtropicale ad alta pressione e la *westerlies belt*, in cui le perturbazioni atmosferiche si spostano generalmente da ovest a est. Queste zone si spostano durante tutto l'anno, provocando forti differenze stagionali. Per la maggior parte dell'anno, gli effetti della *westerlies belt* dominano la regione, con frequenti cicloni e anticicloni che compaiono nella parte inferiore della troposfera. In estate, la zona subtropicale di alta pressione domina e le perturbazioni cicloniche e anticicloniche, limitando molto l'influenza della *westerlies belt*. Le condizioni meteorologiche sono influenzate anche dalle aree di bassa/alta pressione semi-permanenti: la depressione d'Islanda e l'alta pressione Eurasiatica d'inverno, l'alta pressione delle Azzorre e la depressione di Karachi d'estate. Oltre a questi fenomeni a scala sinottica, onde planetarie (onde di Rossby) si verificano anche sull'area adriatica, mentre a livello di mesoscala fenomeni atmosferici (brezze marine e terrestri, onde gravitazionali ecc.) possono modificare le condizioni locali.

Le temperature dell'aria raggiungono i massimi a luglio, e i minimi verso gennaio. D'estate le temperature su tutto l'Adriatico sono piuttosto uniformi, da 22 a 26°C. Le temperature invernali, invece, variano da circa 10°C nel sud a circa 2°C a nord, con la costa orientale tendenzialmente più calda (di circa 2°C) rispetto alla costa occidentale. L'umidità relativa è al minimo in estate e al massimo in autunno. Tuttavia, i fenomeni a scala sinottica possono cambiare in modo sostanziale queste caratteristiche: la Bora (vedi sezione 2.3) può abbassare l'umidità del 60-70% in un periodo di tempo molto breve. La quantità di nuvole dipende soprattutto dai fenomeni atmosferici a scala sinottica, essendo massima nel tardo autunno (ca. 6/10) e minima in estate (1/10-4/10). Di conseguenza, il massimo delle precipitazioni si verifica nel tardo autunno, mentre il minimo d'estate, con quantità che variano da circa 1000mm/anno nell'entroterra ai circa 400mm/anno registrati dalle stazioni meteorologiche costiere.

2.3 Vento e onde

La Bora, da N-NE a E-NE, un vento freddo e caratterizzato da forti raffiche, e lo Scirocco, che soffia da Sud-Est a nord-Ovest lungo l'asse del bacino, sono i venti dominanti in inverno, e responsabile delle mareggiate nella parte settentrionale del bacino (Bertotti and Cavaleri, 2009), mentre d'estate il Maestrale spira da O-NW a NW (Katalinić, Ćorak and Parunov, 2014). La Bora e lo Scirocco possono raggiungere condizioni di tempesta e causare onde estreme, mentre il Maestrale non raggiunge queste condizioni. L'onda massima registrata nell'Adriatico è stata durante un evento di Scirocco, con un'altezza d'onda di 10,8 metri.

Come riportato da (Katalinić, Ćorak and Parunov, 2014) la Bora è il vento di più forte intensità. Soffia sui Monti Dinarici, che ne modellano i punti in cui tende a concentrarsi, con tipiche raffiche di vento di livello burrasca (72 km/h) di velocità, ma che può anche superare i 180 km/h. Tuttavia, la direzione di questo vento da N-NE a E-NE fa sì che la lunghezza di *fetch* sia relativamente corta, impedendo la generazione di onde di vento sostanziali. Lo Scirocco soffia lungo l'Adriatico (da E-SE a SS-E), sviluppandosi solitamente per due o tre giorni, fino a raggiungere la sua velocità massima. Le relative onde di vento entrano attraverso lo stretto d'Otranto in uno stato già maturo, e continuano a svilupparsi lungo l'Adriatico portando a stati di mare con onde più lunghe (sia in lunghezza d'onda che in periodo) rispetto a quelle generate dalla Bora, quest'ultime più corte e con un rapporto altezza/lunghezza d'onda più elevato. In condizioni di tempesta, lo Scirocco può raggiungere una velocità fino a oltre i 100 km/h. In generale, oltre alle tempeste dovute ai venti sopra citati ci possono

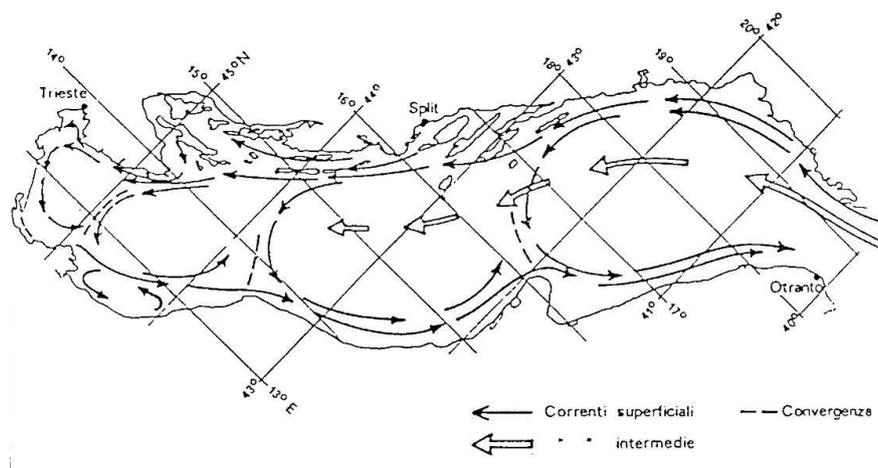
essere altri episodi di forte vento, ma la loro durata relativamente limitata e le tipiche lunghezze di *fetch* portano allo sviluppo di stati di mare con onde non ancora pienamente sviluppate.

2.4 Correnti

Come riportato da (Orlic, Gacic and La Violette, 1992), la circolazione superficiale generale del mare Adriatico consiste in un flusso verso nord lungo la costa orientale e un flusso in direzione opposta, verso sud, che scorre lungo la costa occidentale, come anche riportato in precedenza da (Mosetti, 1984) (Figura 2). In inverno, la corrente sulla costa orientale è di maggiore intensità, mentre nella stagione estiva predomina la corrente verso sud della costa occidentale. Le velocità tipiche sono inferiori a 10 cm/s, ma localmente possono raggiungere valori più elevati, in particolare in prossimità della costa ovest, in inverno.

(Orlic, Gacic and La Violette, 1992) citano la spiegazione fornita da (Zore, 1956) in termini di gradienti di densità per giustificare queste due correnti superficiali principali. Durante l'inverno, le acque dell'Adriatico del sud sono più calde e salate delle acque dell'Adriatico medio e settentrionale, con un effetto sul livello del mare dovuto alla differenza di temperatura (*thermosteric height*) più importante dell'effetto dovuto alla differenza di salinità (*halosteric height*), che genera il flusso verso nord lungo l'Adriatico orientale. Durante l'estate, invece, le acque del nord Adriatico sono più calde e meno saline delle acque del medio Adriatico, generando delle correnti più pronunciate, verso sud, lungo la parte occidentale dell'Adriatico. (Zore-Armanda, 1969) propone anche il vento di Scirocco come un fattore di rafforzamento del flusso invernale verso nord, lungo la parte orientale dell'Adriatico. Come si osserva in Figura 2, l'Adriatico meridionale presenta un vortice separato, ben documentato da rilevamenti idrografici biologici come presentato in (Faganeli *et al.*, 1989).

Per quanto riguarda le correnti causate dalle maree, nell'Adriatico in generale questo tipo di correnti non sono molto pronunciate. Esse possono essere definite di tipo misto, che può essere descritto in modo sufficientemente accurato da sette componenti armoniche. Le ampiezze di marea diurne aumentano da sud-est a nord-ovest, raggiungendo i 18 cm per la componente diurna principale (K1) nell'estremità settentrionale del bacino. La costituente semidiurna della marea ha un punto anfidromico alla latitudine di Ancona, con una ampiezza massima della costituente M2 che equivale a 26 cm.



2.5 Temperatura e salinità

Come riportato da (Artegiani *et al.*, 1997), nell'Adriatico meridionale il termocline stagionale si estende fino a circa 75 m di profondità. Il ciclo stagionale delle acque superficiali è causato soprattutto dalle acque dolci lungo la costa, che portano a una diminuzione della salinità in tutte le stagioni e in maniera più accentuata durante la primavera e l'estate. Oltre i 150 m di profondità, le condizioni sono molto più omogenee e simili alle condizioni di mare che si trovano al largo nel Mediterraneo, con una variazione stagionale relativamente debole fino a 300 m, mediata dalle correnti per avvezione e il miscelamento della massa d'acqua *MLIW* (*modified Levantine Intermediate Waters*). In questa regione il *MLIW* è definito da una salinità maggiore di 38,6 psu e una temperatura maggiore di 13,5°C, compreso tra i 150m e 400 m di profondità. La massa d'acqua profonda del sud Adriatico (*SAdDW*, *South Adriatic Deep Water*) presenta delle caratteristiche medie differenti da quelle delle corrispondenti masse d'acqua profonda del nord e Adriatico centrale (*NAdDW* e *MAdDW*, *North Adriatic* e *Middle Adriatic Deep Water*), e presenta le seguenti caratteristiche: una temperatura di $13,16 \pm 0,30^\circ\text{C}$, una salinità uguale a $38,61 \pm 0,09$ psu. Le *SAdDW* presentano una temperatura e salinità più alta rispetto alle *NAdDW* e *MAdDW*, probabilmente a causa del miscelamento con la *MLIW* e con acque superficiali locali (Ovchinnikov *et al.*, 1985; Roether and Schlitzer, 1991).

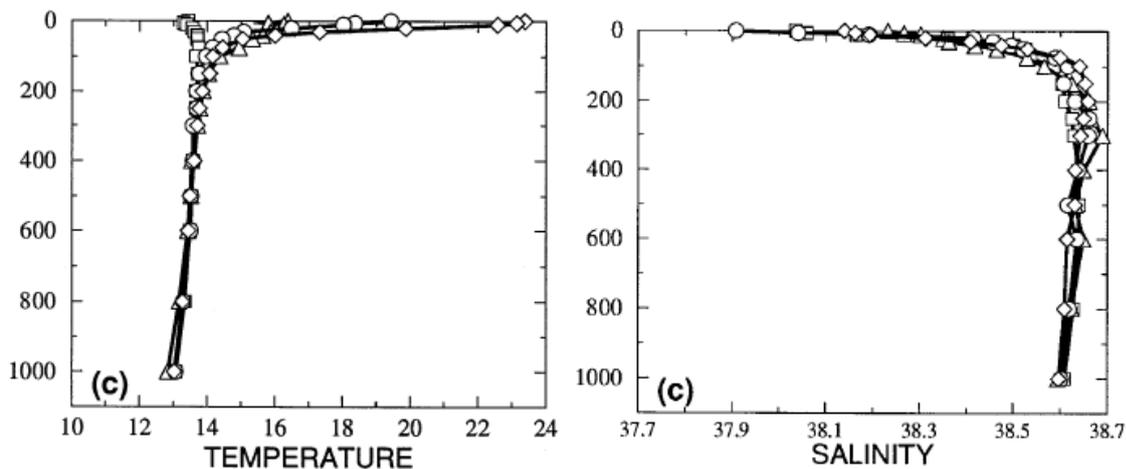


Figura 3 Profili stagionali di temperatura e salinità nell'Adriatico del sud, da (Artegiani *et al.*, 1997). Simboli: □ per l'inverno, ○ per la primavera, ◇ per l'estate e Δ per l'autunno.

3 DATABASE METEOMARINI

3.1 Locazione geografica

Il parco eolico considerato è situato al largo di Bari (Figura 4), e consiste in 80 turbine di 14MW ciascuna, per un totale di 1120MW. Le coordinate medie delle turbine eoliche sono, in gradi decimali:

- Latitudine: 41.58 °N
- Longitudine: 16.92 °E

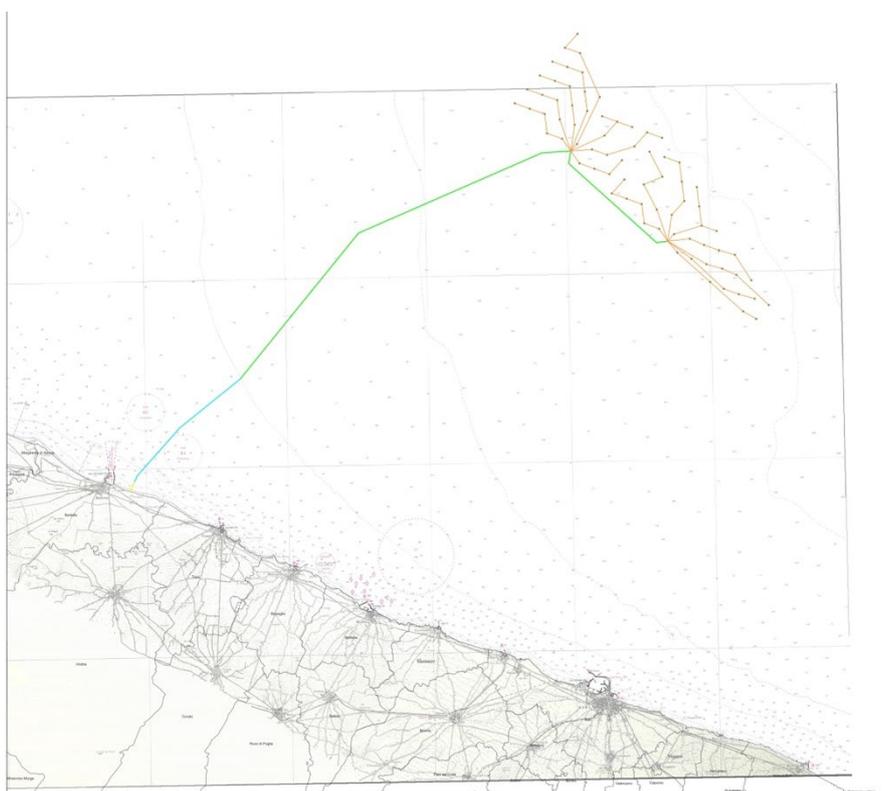


Figura 4 Mappa della regione di interesse, con layout del parco eolico offshore proposto. Punti grigi: aerogeneratori, linee arancioni: cavi elettrici inter-array, linea verde: cavo elettrico collegamento a terra

Utilizzando queste coordinate come “obiettivo”, si sono cercate le coordinate più vicine a queste per ogni database utilizzato, e le coordinate considerate per ogni database (e variabile meteomarina) utilizzato sono riportate nella Tabella 1.

Nella Figura 5 sono visualizzate le coordinate di questa tabella rispetto al parco eolico e alla costa, e nella Figura 6 si fornisce un ingrandimento della zona del parco eolico, per meglio visualizzare le coordinate esatte da dove si sono estratti i dati *hindcast* utilizzati nel presente report. Come si può osservare, per tutti i database utilizzati si è riuscito ad estrarre i dati per delle coordinate molto vicine alle coordinate centrali del parco eolico (i/e coordinate “medie” del parco eolico).

Tabella 1: caratteristiche principali dei dati meteomarini di base utilizzati

Dato	Lat.	Long.	Quota/e	Periodo temporale	Discretiz. temporale	Database
	[gradi N]	[gradi E]	[m] s.l.m.	[dd/mm/yyyy]		

Vento	41.5 N	17.0 E	10, 100	01/01/1980-31/12/2021	1 ora	ERA5
Onde	41.5 N	17.0 E	/	01/01/1980-31/12/2021	1 ora	ERA5
Correnti (residual)	41.5625 N	16.9167 E	0	01/01/1990-31/12/2019	1 ora	MEDSEA
Correnti (tidal)	41.5625 N	16.9167 E	0	01/01/1990-31/12/2019	1 ora	TPX09.2
Livello del mare (residual)	41.5625 N	16.9167 E	/	01/01/1990-31/12/2019	1 ora	MEDSEA
Livello del mare (tidal)	41.5625 N	16.9167 E	/	01/01/1990-31/12/2019	30 min	TPX092
Temperatura	41.5625 N	16.9167 E	Da 0 al fondo	01/01/1990-31/12/2019	1 giorno	MEDSEA
Salinità	41.5625 N	16.9167 E	Da 0 al fondo	01/01/1990-31/12/2019	1 giorno	MEDSEA

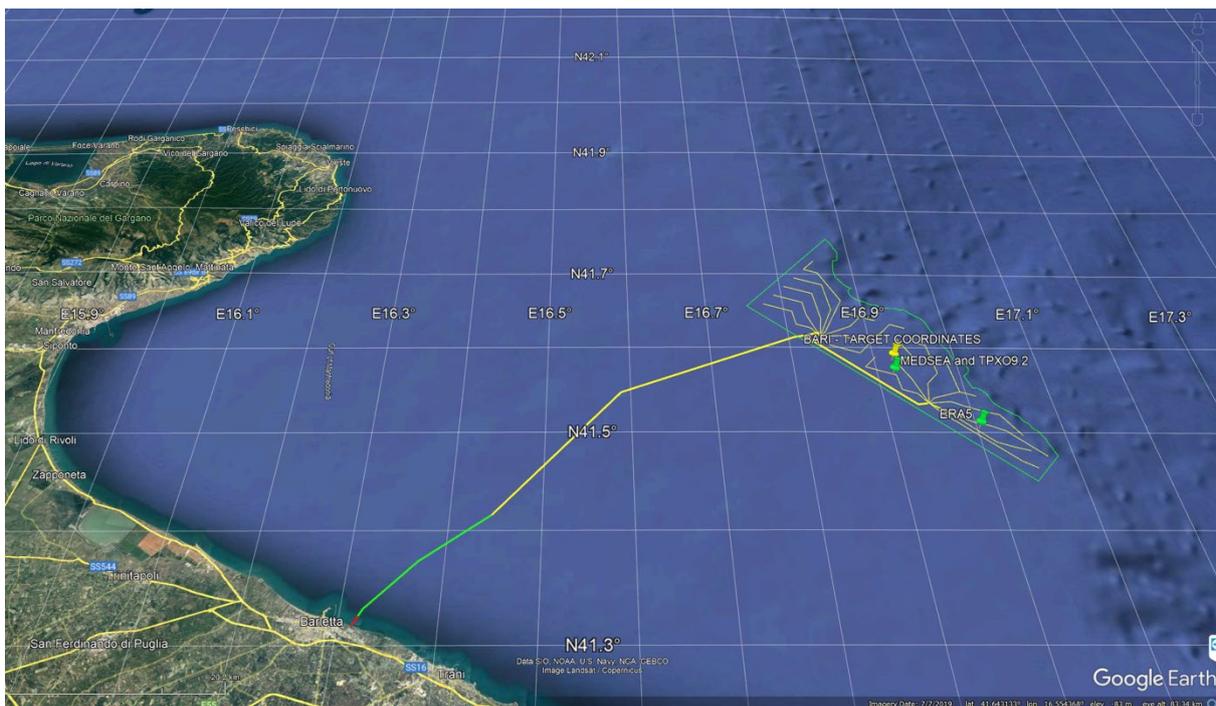


Figura 5 Posizione dei punti dai quali si sono estratte le variabili meteomarine, per ogni database utilizzato, relative alla posizione delle turbine eoliche. Figura generata con Google Earth

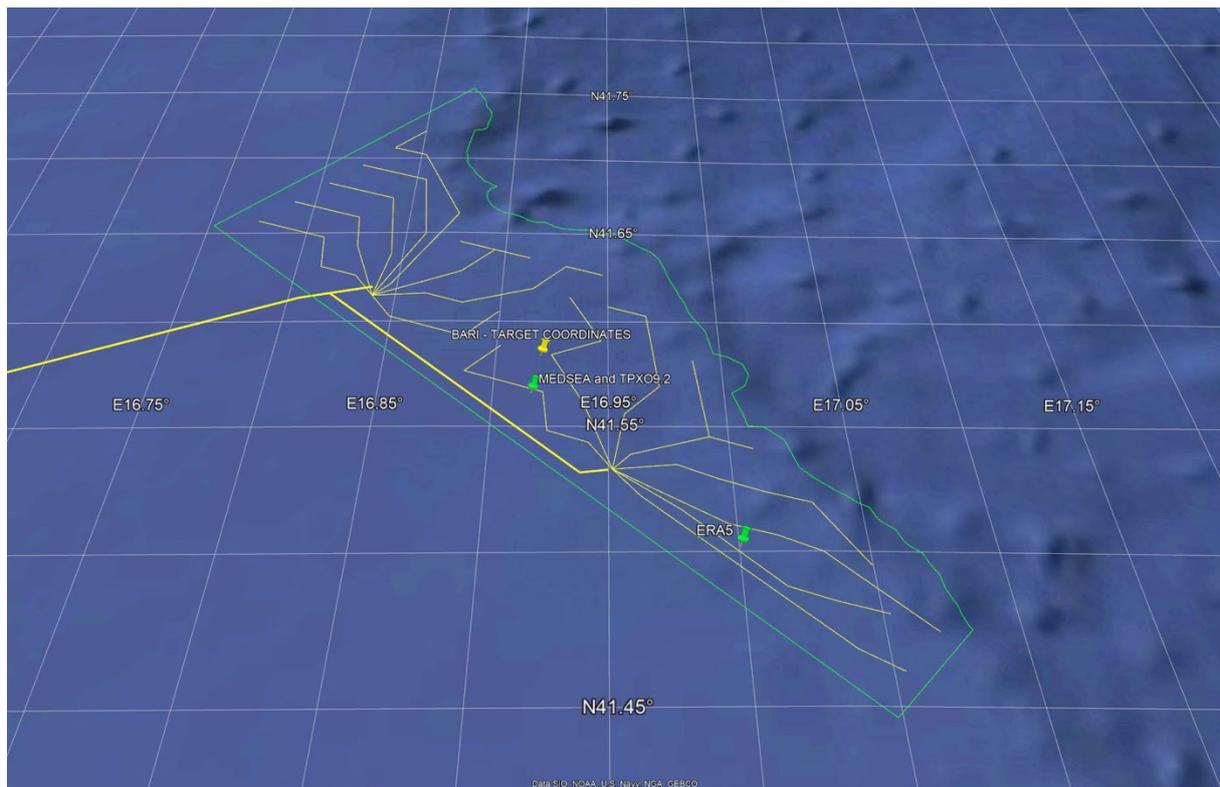


Figura 6 Posizione dei punti dai quali si sono estratte le variabili meteomarine. Ingrandimento su parco eolico: ogni cerchio corrisponde a una turbina eolica. Figura generata con Google Earth.

3.2 ERA5

ERA5 rappresenta la quinta generazione di modelli atmosferici di rianalisi del clima a livello globale, sviluppata e mantenuta dal *Copernicus Climate Change Service (C3S)* dell'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, che copre il periodo dal gennaio 1950 fino ai giorni nostri.

Il database ERA5 è in grado di provvedere, con una risoluzione temporale oraria, un vasto numero di parametri meteomarini relativi all'atmosfera (a diverse quote), alla superficie terrestre e alla superficie di mari/oceani. I dati sono forniti su una griglia con risoluzione spaziale pari a 30 km, adottando un modello dell'atmosfera che discretizza su 137 livelli un dominio spaziale che si estende fino a 80 km di altezza. Per le superfici terrestri e marine, invece, i parametri forniti sono relativi solo ad una quota, quella del livello del terreno o della superficie del mare/oceano.

ERA5 è in realtà un insieme di modelli. Un modello di assimilazione dei dati misurati 4D-Var (<https://www.ecmwf.int/node/16666>) provvede gli input del modello di previsione atmosferica dell'*Integrated Forecast System (IFS)* dell'ECMWF (versione CY41R2). Questo modello è a sua volta accoppiato con il modello della superficie terrestre HTESSEL, in grado di prevedere l'evoluzione della natura del suolo, della vegetazione e della neve sui continenti terrestri: per esempio, con questo modello si è in grado di calcolare qual è la temperatura del suolo. Per quanto riguarda i parametri relativi ai mari e oceani, a livello di superficie, il modello di previsione atmosferica è accoppiato al modello di onde WAM.

Il modello di rianalisi ERA5 fornisce quindi dei parametri meteomarini su un dominio di altezza che va dalla superficie terrestre/dal livello del mare fino a 80 km di altezza. Invece, per i parametri relativi

alla colonna d'acqua (i.e. sotto la superficie del mare/ocean) si utilizzano altri modelli di rianalisi, come per esempio quello utilizzato per il database MEDSEA (sezione 3.3).

3.2.1 Calibrazione dei dati onda

Per le analisi condotte sono necessarie delle serie temporali che coprano un periodo sufficientemente lungo e con una discretizzazione temporale e spaziale abbastanza fine. I dati misurati disponibili (boa ondometrica, satelliti, ...) generalmente non soddisfano questi requisiti, per cui si fa riferimento a dati generati da modelli numerici, in particolare ai dati di rianalisi. Tuttavia, in (Bertotti and Cavaleri, 2009) è evidenziato come il modello di rianalisi ERA5 tenda a sottostimare l'altezza significativa d'onda. Questo effetto è dovuto al fatto che il Mediterraneo, e in particolare l'Adriatico, sono bacini relativamente piccoli. La soluzione proposta da (Cavaleri and Sclavo, 2006) qui adottata è quella di calibrare i dati di rianalisi con i dati misurati disponibili, derivando dei fattori di calibrazione per l'altezza significativa d'onda H_s , e i periodi T_p e T_z .

In particolare, si sono utilizzati i dati misurati del database (CMEMS, 2022b), basato sull'elaborazione dati dell'altimetro multi-missione WAVE-TAC, a sua volta basato su set di dati di altezza significativa d'onda pluriennali di livello 3 CMEM. In questo database si sono usati i dati di H_s rilevati dagli altimetri delle missioni satellitari Jason-1, Jason-2, Envisat, Cryosat-2, SARAL/AltiKa, Jason-3 e CFOSAT. In (CMEMS, 2022b), le coordinate più prossime al punto di interesse per cui si possono estrarre sia i dati misurati dai satelliti che i dati da ERA5 sono le seguenti: Latitudine: 41°N, Longitudine: 19°E¹.

Per queste coordinate, e per gli stessi istanti di tempo, si è ottenuta una sequenza temporale di coppie di dati, i.e. l' H_s modellato da ERA5 e l' H_s rilevato dai satelliti, rappresentati in uno *scatter diagram* H_s -modello (y) VS H_s -satellite (x), da cui si è poi derivata l'equazione della linea di correlazione che meglio si adatta (con tecnica ai minimi quadrati), passante per l'origine, i.e. $y = a \cdot x$. L'inverso del coefficiente a rappresenta il fattore di calibrazione di H_s . Per i periodi T_p e T_z , come indicato in (Cavaleri and Sclavo, 2006), il fattore di calibrazione è uguale alla radice quadrata del fattore di calibrazione per H_s . I fattori di calibrazione utilizzati sono i seguenti:

- Fattore di calibrazione per H_s (1/a): 1.39671
- Fattore di calibrazione per T_p e T_z : 1.1818

¹ Le più vicine, in realtà, sarebbero 41°N, 17°E, ma queste corrispondono ad un punto sulla terraferma

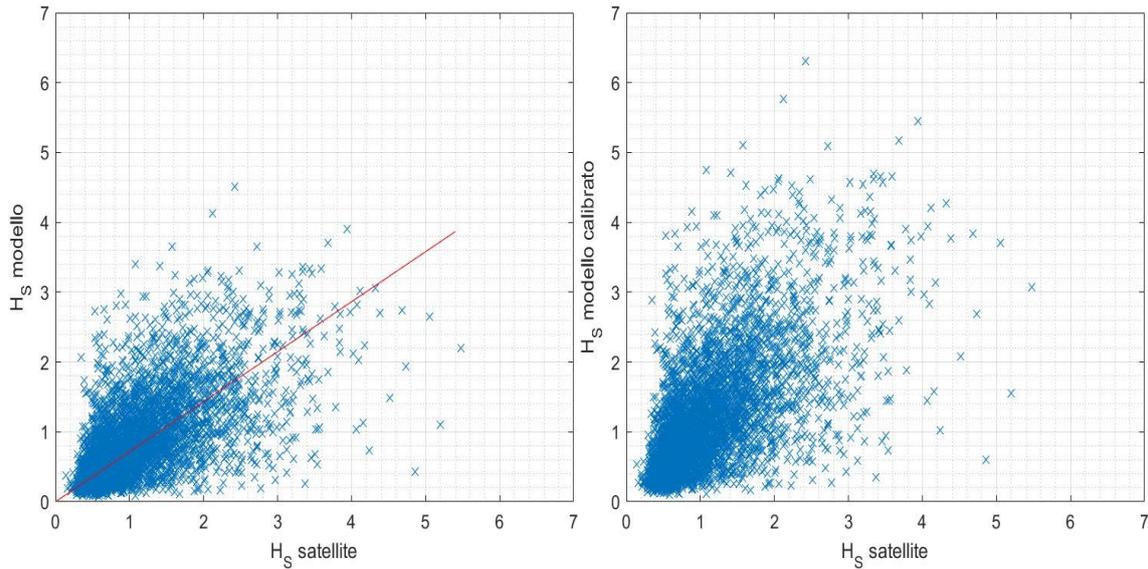


Figura 7 Scatter diagram H_s modello VS H_s satellite: sx non calibrato, dx dopo calibrazione

3.2.2 Calibrazione dei dati vento

Similmente a quanto considerato per le onde, anche per il vento le analisi condotte richiedono delle serie temporali che coprano un periodo sufficientemente lungo, con discretizzazione temporale e spaziale abbastanza fine. Anche qui i dati misurati disponibili non hanno questi requisiti, per cui si fa riferimento ai dati di rianalisi ottenuti con dei modelli matematici.

Tuttavia, in (Bertotti and Cavaleri, 2009) si è evidenziato che anche le velocità del vento a livello di superficie del mare sono sottostimate, per via degli stessi effetti considerati per le onde. Come fatto per H_s , T_p e T_z , i dati di rianalisi sono stati calibrati con i dati misurati disponibili, adottando ancora una volta il metodo presentato in (Cavaleri and Sclavo, 2006), derivando il fattore di calibrazione per la velocità del vento a 10 m s.l.m, $V_{10m,1h}$. I dati misurati utilizzati sono del database (CMEMS, 2022a), che fornisce le velocità del vento basate sulle osservazioni degli scatterometri ASCAT sui satelliti Metop-B e Metop-C. Ulteriori informazioni sono fornite in (Giesen, Stoffelen and Verhoef, 2022). Le coordinate più prossime al punto di interesse sono le seguenti:

- Latitudine: 41.5625°N
- Longitudine: 17.0625°E

Per queste coordinate, e per gli stessi istanti di tempo, si è ottenuta una sequenza temporale di coppie di dati, i.e. il $V_{10m,1h}$ modellato da ERA5 e il $V_{10m,1h}$ rilevato dai satelliti, rappresentati in uno *scatter diagram* il $V_{10m,1h}$ -modello (y) VS il $V_{10m,1h}$ -satellite (x), da cui si è poi derivata l'equazione della linea di correlazione che meglio si adatta (con tecnica ai minimi quadrati), passante per l'origine, i.e. $y = a*x$. L'inverso del coefficiente a rappresenta il fattore di calibrazione di il $V_{10m,1h}$. I risultati sono presentati in Figura 7. Per $V_{100m,1h}$ si è applicato lo stesso coefficiente di calibrazione, pari a:

- Fattore di calibrazione per V_{10m} (e V_{100m}): 1.052

dato che la velocità del vento con la quota può essere modellata con una legge a potenza (i.e. *power law*), come indicato in (DNVGL, 2017), per la quale:

$$V_{100m,1h} = V_{10m,1h} * \left(\frac{100m}{10m}\right)^\alpha$$

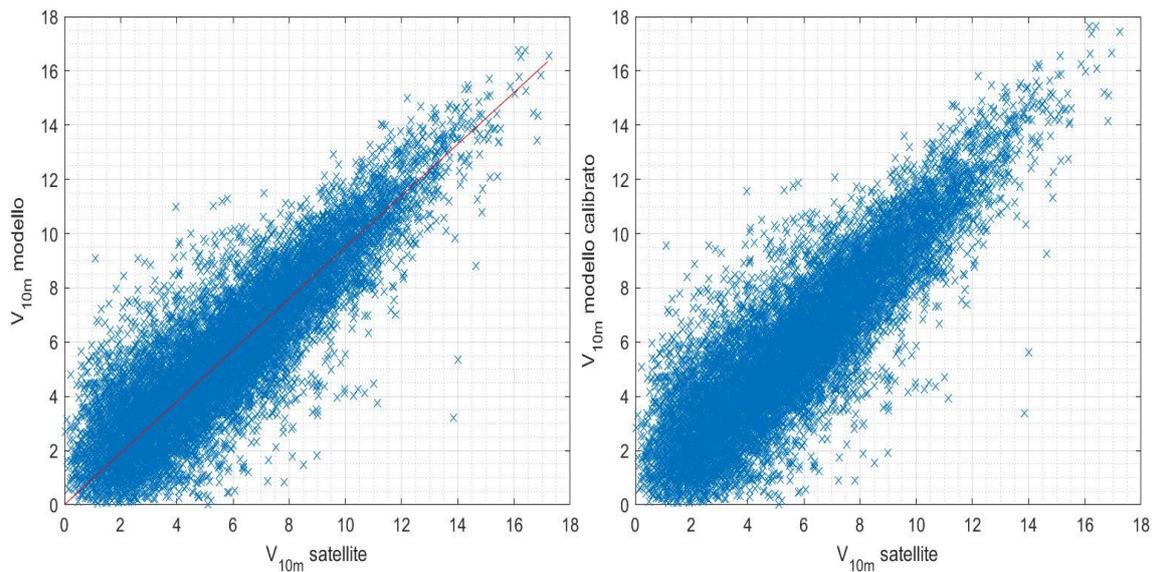


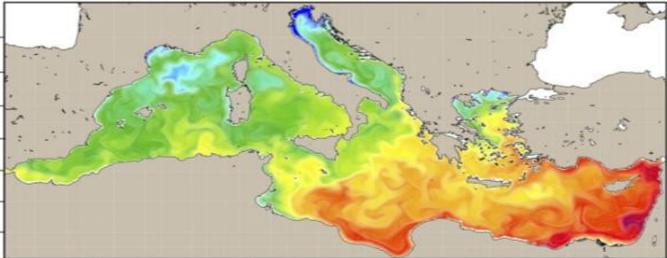
Figura 8 Scatter diagram $V_{10m,1h}$ modello VS $V_{10m,1h}$ satellite: sx non calibrato, dx dopo calibrazione

3.3 MEDSEA

Con MEDSEA si indica il database di dati di rianalisi *MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004*, detto anche *Med Sea Reanalysis model*, fornito dal *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), descritto in dettaglio in (Drudi, Grandi and Clementi, 2019), di cui si fornisce una sintesi nel seguito.

MEDSEA è basato su un modello idrodinamico, basato sul *Nucleous for European Modeling of the Ocean (NEMO v3.6)*, con uno schema di assimilazione dei dati variazionali (*OceanVAR*) per i profili verticali di temperatura e salinità e per i dati satellitari *Sea Level Anomaly*, lungo il loro tracciato. Il sistema di rianalisi è forzato dai campi atmosferici ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5 (guarda sezione 3.2), assimilando le osservazioni rianalizzate. La risoluzione della griglia orizzontale del modello è $1/24^\circ$ (circa 4 km) e ha 141 livelli verticali distanziati in modo non uniforme.

Questo modello è stato ampiamente validato con un confronto tra i dati modellati e i dati sperimentali rilevati da satelliti, da sensori in sito, e da altri set di dati climatologici, per il periodo 1987-2019, per le variabili temperatura, salinità, altezza della superficie del mare, corrente ed altri. Maggiori dettagli sulla validazione sono forniti in (Escudier *et al.*, 2021). In Tabella 2 sono illustrate le caratteristiche principali di MEDSEA.

Domain	MEDSEA (6°W-36.29167°E; 30.1875°S – 45.97917°N)
Resolution and grid	1/24°; regular grid; 1016 x 380 x 141 It is defined on a regular grid at 1/24 degree (approx. 4km) and 141 vertical levels.
Geographic coverage	

Model version	NEMO v3.6
Tides	N/A
Atmospheric forcing	Reanalysis: 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	Insitu 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	Reanalysis: Temperature and salinity monthly climatology (named SDN_V2aa) produced within the framework of SeaDataNet FP6 Project at 01/01/1985.
Bathymetry	GEBCO 30sec interpolated on the model grid

Tabella 2 Caratteristiche principali di MEDSEA. Estratta e adattata da (Drudi, Grandi and Clementi, 2019)

3.4 TPXO

Come descritto più in dettaglio in <https://www.tpxo.net/global>, TPXO è una serie di modelli, con copertura globale, delle maree, che si adatta meglio, nel senso dei minimi quadrati, alle equazioni di marea di Laplace e ai dati di altimetria misurati. Ogni modello successivo della serie TPXO si basa su una batimetria aggiornata e assimila più dati rispetto alle versioni precedenti. Tutti i modelli TPXO sono stati ottenuti con OTIS, il software dove si sono implementati i metodi descritti in dettaglio in (Egbert, Bennett and Foreman, 1994; Egbert and Erofeeva, 2002).

I modelli TPXO provvedono ampiezze e fasi dell'elevazione della superficie del mare e le correnti considerando otto armoniche primarie (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), due armoniche di lungo periodo (Mf, Mm) e tre armoniche non lineari (M4, MS4, MN4).

4 CONDIZIONI METEOMARINE TIPICHE

4.1 Vento

Le analisi delle variabili di vento presentate in questa sezione sono basate sui dati di rianalisi *hindcast* del database ERA5, per le coordinate 41.5 N 17.0 E, per il periodo che va dal 01/01/1980 al 31/12/2021, con discretizzazione temporale pari a 1 ora (Tabella 1, a pag. 16). I dati e le analisi riportate sono relativi a due quote sopra il livello del mare: 10 m s.l.m. e 100m s.l.m..

4.1.1 Statistiche mensili e annuali

I valori di minima, massima, media, e deviazione standard della velocità del vento, valutati su base mensile e annuale, sono presentati in Tabella 3 e graficamente nella Figura 9, per le altitudini di 10 m e 100 m s.l.m.

Per entrambe le altitudini, le velocità medie del vento tendono a raggiungere i loro valori più alti nei mesi invernali (picco in dicembre) e i più bassi nei mesi estivi (minimo in giugno-agosto per V_{10m} e agosto-settembre per V_{100m}) e questo, in generale, si riscontra anche nelle velocità massime e la deviazione standard, anche se non esattamente negli stessi mesi: per esempio, il V_{10m} massimo si riscontra in gennaio, mentre il V_{10m} medio massimo si ha in dicembre, così come il V_{100m} massimo si è registrato in Novembre, mentre il V_{100m} medio massimo si ha in dicembre. I valori di minimo, invece, sono vicini allo zero, indicando che si sono dei periodi senza vento (o vento molto basso) per tutti i mesi.

Si osserva inoltre anche l'effetto dello *wind shear*, i.e. la velocità che aumenta proporzionalmente alla quota, con una velocità media del vento a 100 m s.l.m. circa il 15% più alta di quella a 10 m s.l.m.

		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic
$V_{10m,1h}$ [m/s]	Min	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Media	5.8	6.7	6.7	6.4	5.8	5.2	4.9	5.1	4.9	5.1	5.5	6.4	6.9
	Max	22.6	22.6	19.9	21.4	17.9	19.9	18.7	14.8	15.3	17.7	18.9	21.5	19.6
	Std	3.1	3.3	3.3	3.3	2.9	2.7	2.6	2.7	2.6	2.6	3.0	3.3	3.4
$V_{100m,1h}$ [m/s]	Min	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Media	6.7	7.5	7.6	7.4	7.0	6.4	6.0	6.1	5.7	5.7	6.2	7.3	7.7
	Max	27.8	27.7	26.0	27.1	24.0	27.3	22.9	18.5	18.3	21.3	24.2	27.8	24.3
	Std	3.7	4.0	4.0	4.0	3.6	3.5	3.2	3.2	3.1	3.1	3.6	4.0	4.1

Tabella 3 Statistiche mensili e annuali della velocità del vento, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m.. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti)

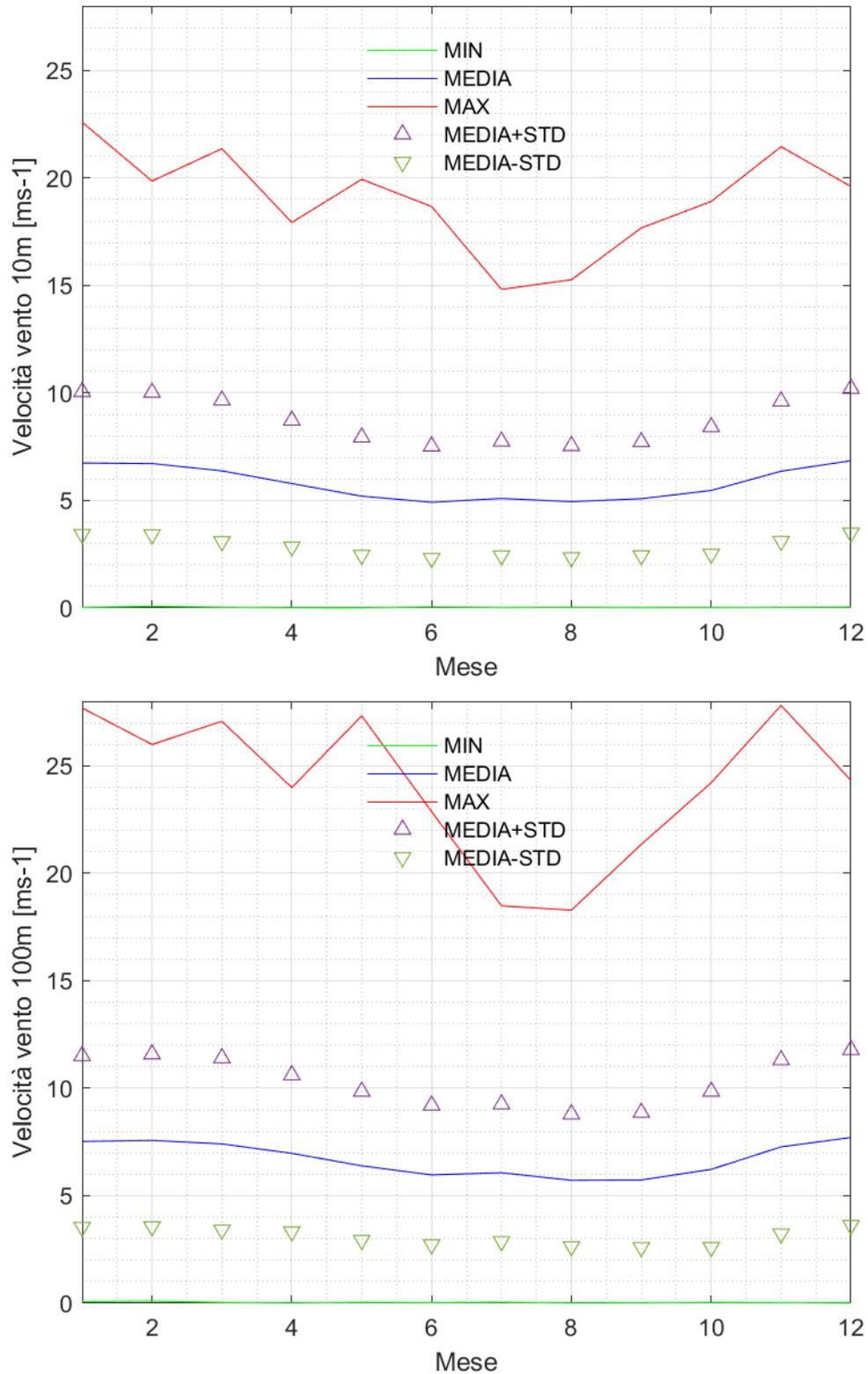


Figura 9 Statistiche mensili della velocità del vento, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m. (STD = deviazione standard)

4.1.2 Rose dei venti e tabelle di frequenza

I grafici delle rose dei venti, a 10m e 100m s.l.m., sono presentati in Figura 10, mentre le tabelle di frequenza, in percentuale (%), delle velocità del vento, divisa per intervalli (bin) di vento e per direzione di provenienza del vento, sono presentate in Tabella 4.

La distribuzione quasi bipolare delle velocità rispetto alla direzione è quasi identica alle due quote, con una forte dominanza dei venti provenienti da NNW e WNW (tra i 300° e 330° provengono circa il 37% dei venti, ad entrambe le quote) seguita dai venti provenienti da S e SSE (tra i 120° e 180°, provengono circa il 28% dei venti, ad entrambe le quote). I venti più intensi tendono a provenire da N e NNW (330°-0°) e da SSE (150°) per entrambe le altezze.

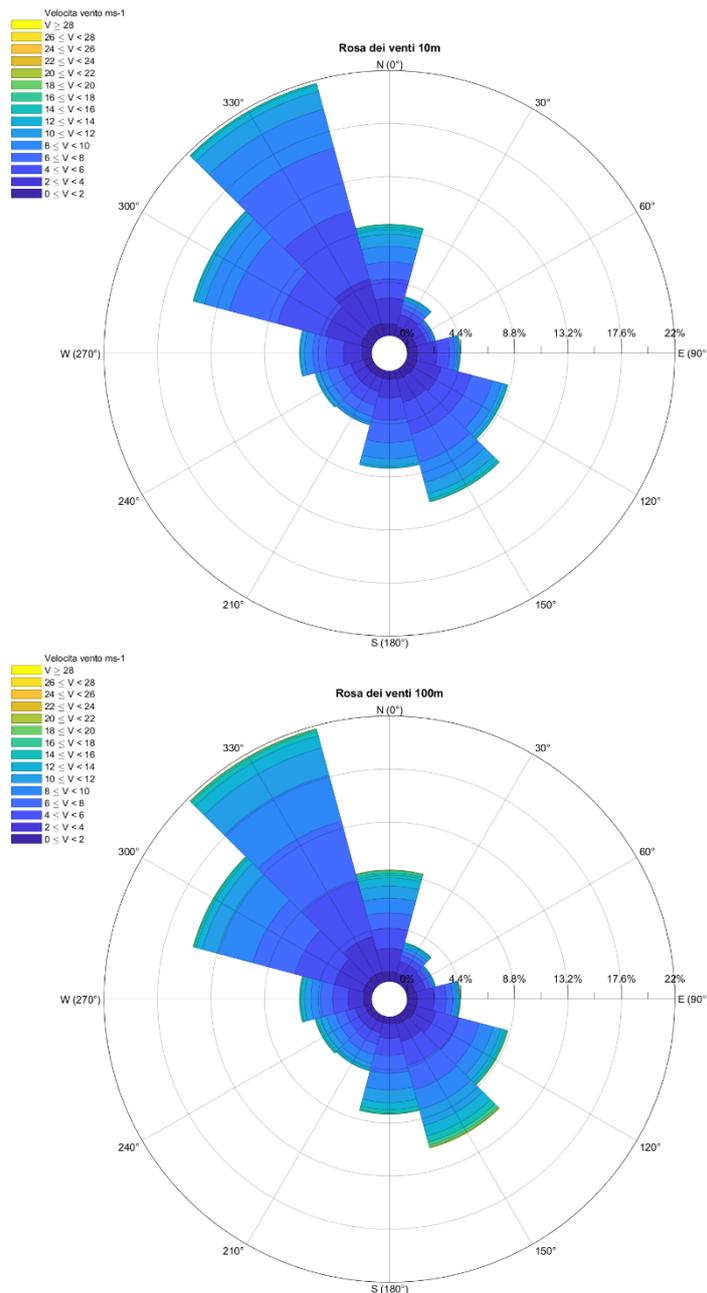


Figura 10 Rosa dei venti, considerando le velocità del vento con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m. Direzione: N(0°) indica vento DA nord

V_{10m,1h}		Velocità vento [m/s] 10m s.l.m.													
		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
Direzione [°N]	TOT	9.962%	21.883%	24.286%	20.953%	13.144%	6.263%	2.500%	0.790%	0.187%	0.031%	0.00%	0.000%		
	0	9.252%	0.989%	2.125%	1.601%	1.403%	1.299%	0.994%	0.567%	0.208%	0.056%	0.008%	0.00%	0.00%	
	30	3.400%	0.834%	1.033%	0.488%	0.382%	0.321%	0.204%	0.104%	0.029%	0.004%	0.000%			
	60	2.475%	0.793%	0.906%	0.353%	0.185%	0.127%	0.076%	0.026%	0.007%	0.002%				
	90	4.353%	0.829%	1.606%	1.034%	0.445%	0.193%	0.121%	0.087%	0.033%	0.004%	0.000%			
	120	8.611%	0.859%	2.083%	2.544%	1.810%	0.776%	0.297%	0.166%	0.062%	0.011%	0.002%			
	150	11.316%	0.787%	1.954%	2.738%	2.416%	1.736%	0.972%	0.467%	0.184%	0.050%	0.012%	0.00%		
	180	8.083%	0.671%	1.557%	1.857%	1.859%	1.339%	0.619%	0.147%	0.033%	0.001%	0.000%			
	210	4.706%	0.650%	1.171%	1.193%	0.953%	0.575%	0.152%	0.011%	0.001%					
	240	4.875%	0.686%	1.112%	1.081%	0.941%	0.637%	0.303%	0.092%	0.021%	0.003%				
	270	5.941%	0.791%	1.540%	1.404%	1.093%	0.696%	0.314%	0.087%	0.014%	0.002%	0.001%			
300	15.252%	0.982%	3.006%	4.090%	4.072%	2.120%	0.677%	0.224%	0.064%	0.015%	0.003%				
330	21.739%	1.091%	3.791%	5.902%	5.394%	3.326%	1.535%	0.523%	0.133%	0.038%	0.005%	0.00%			

V_{100m,1h}		Velocità vento [m/s] 100m s.l.m.													
		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
Direzione [°N]	TOT	8.610%	18.093%	20.165%	19.177%	15.347%	9.687%	5.035%	2.345%	0.985%	0.372%	0.132%	0.040%	0.010%	0.003%
	0	9.480%	0.856%	1.959%	1.716%	1.345%	1.240%	1.001%	0.690%	0.403%	0.183%	0.059%	0.021%	0.005%	0.001%
	30	3.447%	0.711%	1.026%	0.519%	0.382%	0.316%	0.235%	0.154%	0.069%	0.026%	0.005%	0.002%	0.000%	
	60	2.375%	0.670%	0.851%	0.380%	0.191%	0.122%	0.088%	0.045%	0.017%	0.007%	0.003%			
	90	3.771%	0.726%	1.249%	0.835%	0.419%	0.207%	0.128%	0.086%	0.065%	0.040%	0.013%	0.002%	0.001%	
	120	7.592%	0.729%	1.544%	1.807%	1.489%	0.982%	0.516%	0.254%	0.143%	0.083%	0.032%	0.010%	0.002%	0.000%
	150	11.232%	0.703%	1.533%	2.055%	2.058%	1.702%	1.338%	0.853%	0.478%	0.271%	0.149%	0.059%	0.024%	0.006%
	180	8.698%	0.611%	1.209%	1.504%	1.629%	1.475%	1.148%	0.668%	0.319%	0.098%	0.028%	0.007%	0.001%	0.000%
	210	4.955%	0.581%	0.924%	1.001%	0.972%	0.817%	0.460%	0.162%	0.034%	0.004%	0.000%			
	240	5.260%	0.595%	0.937%	0.971%	0.956%	0.826%	0.519%	0.284%	0.117%	0.040%	0.011%	0.004%	0.000%	
	270	5.995%	0.689%	1.279%	1.230%	1.023%	0.796%	0.537%	0.281%	0.117%	0.034%	0.007%	0.001%	0.001%	
300	14.574%	0.820%	2.397%	3.234%	3.352%	2.718%	1.287%	0.492%	0.172%	0.069%	0.024%	0.007%	0.002%	0.001%	
330	22.621%	0.920%	3.184%	4.913%	5.358%	4.145%	2.431%	1.066%	0.410%	0.128%	0.040%	0.020%	0.004%	0.001%	

Tabella 4 Tabelle di frequenza, in percentuale (%), delle velocità del vento, divisa per intervalli (bin) di vento e per direzione. Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021, a 10m e 100 m s.l.m. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

4.2 Onde

Le analisi delle variabili relative alle onde presentate in questa sezione sono basate sui dati di rianalisi *hindcast* del database ERA5, per le coordinate 41.5 N 17.0 E, per il periodo che va dal 01/01/1980 al 31/12/2021, con discretizzazione temporale pari a 1 ora (Tabella 1, a pag. 16). In particolare, sono state analizzate le serie temporali dei seguenti parametri:

- H_s [m], il *significant wave height* (altezza significativa dell'onda) degli stati di mare, valutato secondo metodo spettrale, i.e. quattro volte la radice quadrata dell'integrale su tutte le direzioni e tutte le frequenze dello spettro d'onda bidimensionale.
- T_p [s], il *peak period* (periodo di picco) dello spettro dello stato di mare, calcolato come il reciproco della frequenza corrispondente al valore più grande (picco) dello spettro dell'onda di frequenza. Lo spettro delle onde di frequenza si ottiene integrando lo spettro delle onde bidimensionali in tutte le direzioni.
- T_z [s], il *mean zero-crossing wave period*, valutato secondo metodo spettrale, i.e. due volte pigreco per la radice quadrata del rapporto tra l'integrale dello spettro d'onda bidimensionale e il secondo momento dello stesso. Fornisce una indicazione del periodo medio delle onde che occorrono nello specifico stato di mare.
- MWD [°N], la *mean wave direction* (direzione media di propagazione dell'onda) è una media su tutte le frequenze e direzioni dello spettro d'onda bidimensionale, relativa alla posizione geografica del polo nord. Zero significa 'proveniente da nord' e 90 'proveniente da est'.

4.2.1 Statistiche mensili e annuali

I valori di minima, massima, media e deviazione standard di H_s , T_p e T_z , valutati su base mensile e annuale, sono presentati in Tabella 5 e graficamente Figura 11, Figura 12 e Figura 13. L' H_s medio presenta valori più alti nei mesi invernali e più bassi nei mesi estivi, con un rapporto di circa 2:1 (i.e. ~ 1.28 m in dicembre, contro ~ 0.66 m in giugno). La deviazione standard dell' H_s presenta un andamento stagionale simile all' H_s medio, mentre l' H_s massimo presenta un andamento meno regolare, anche se in generale tende a essere più basso nei mesi estivi e più alto in quelli invernali. Sia il T_p che il T_z hanno un andamento stagionale simile, e vicino all'andamento stagionale dell' H_s medio, con l'energia dello spettro che si concentra in periodi più alti nei mesi invernali e più bassi nei mesi estivi, e con onde di periodo medio (T_z) più lungo nei mesi invernali e più corto nei mesi estivi.

		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic
H_s [m]	Min	0.05	0.06	0.09	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07
	Media	0.94	1.24	1.25	1.13	0.91	0.73	0.66	0.69	0.66	0.73	0.88	1.12	1.28
	Max	6.90	6.43	6.32	6.90	4.78	5.29	6.23	3.89	3.85	5.34	5.96	5.82	6.00
	Std	0.72	0.88	0.85	0.82	0.64	0.55	0.48	0.49	0.48	0.51	0.65	0.79	0.87
		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic
T_p [s]	Min	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16
	Media	4.85	5.41	5.50	5.26	4.89	4.46	4.23	4.26	4.19	4.42	4.83	5.28	5.52
	Max	11.83	11.83	11.47	11.17	10.81	10.09	10.32	9.13	8.85	9.69	10.25	11.71	11.44
	Std	1.51	1.60	1.58	1.61	1.47	1.36	1.15	1.11	1.10	1.22	1.47	1.62	1.62
		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic
T_z [s]	Min	1.67	1.69	1.96	1.67	1.71	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.75	1.72	1.71
	Media	3.51	3.87	3.90	3.75	3.52	3.25	3.13	3.14	3.10	3.25	3.48	3.76	3.93
	Max	7.67	7.44	7.67	7.39	6.46	6.76	7.22	6.04	6.03	6.58	7.49	7.11	7.61
	Std	0.86	0.91	0.90	0.91	0.79	0.73	0.65	0.65	0.64	0.69	0.83	0.89	0.93

Tabella 5 Statistiche mensili e annuali di H_s , T_p e T_z , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti)

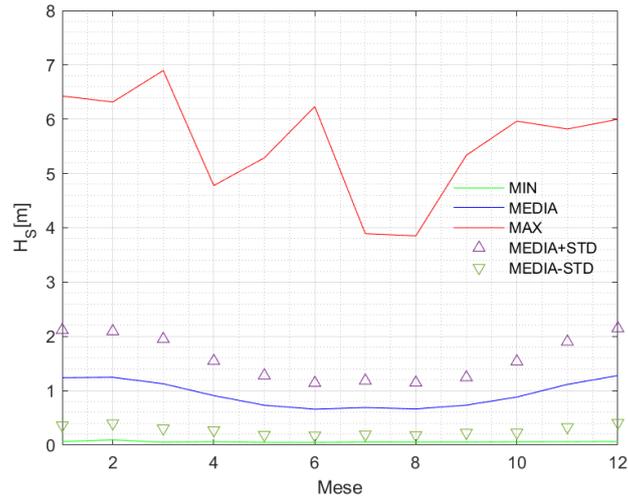


Figura 11 Statistiche mensili di H_s , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021 (STD = deviazione standard)

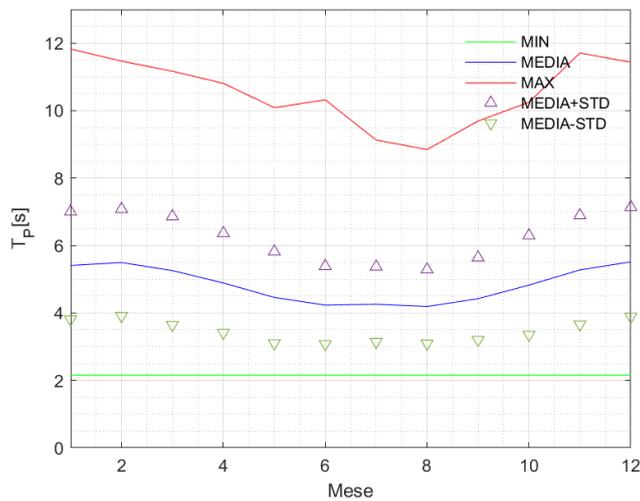


Figura 12 Statistiche mensili di T_p , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021 (STD = deviazione standard)

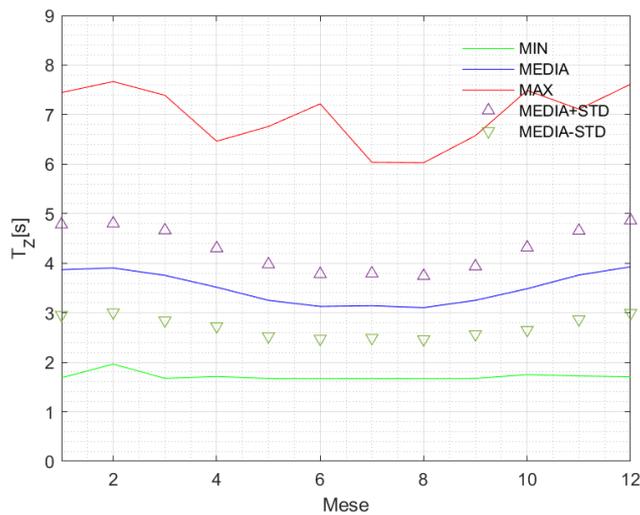


Figura 13 Statistiche mensili di T_z , basate su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021 (STD = deviazione standard)

4.2.2 Rosa d'onda e tabelle di frequenza H_s -direzione e H_s-T_p , con scatter plot

Il grafico della rosa d'onda è presentato in Figura 14, mentre la tabella di frequenza, in percentuale, delle combinazioni H_s -direzione di propagazione è presentata in Tabella 6, con H_s diviso per intervalli di 0.5m, mentre la direzione è divisa per intervalli di 30° .

La distribuzione delle direzioni nella rosa d'onda è fortemente dominata dalla direzione NNW (330°), da cui provengono circa il 31% della totalità delle onde, seguita da un 14% di onde provenienti da 120° (~15%) e 150° (~12%). Seppur non identica, questa distribuzione è simile a quella della rosa dei venti (Figura 10), il che significa che le onde nel luogo d'interesse sono in larga parte dovute a venti locali (*sea waves*) e in minor misura dovute a onde generate da venti non locali e propagatesi fino al luogo di interesse (*swell waves*).

In termini di direzionalità delle altezze significative più alte, riferendosi alla Tabella 6, si può vedere che se si considerano **solo** gli H_s più alti di 2.5m (circa il 4.3% di tutti i valori di H_s), il 26% e il 23% di questo provengono, rispettivamente, da N (0°) e da NNW (330°) seguiti dalle direzioni 150° (~15%) e 120° (~11%).

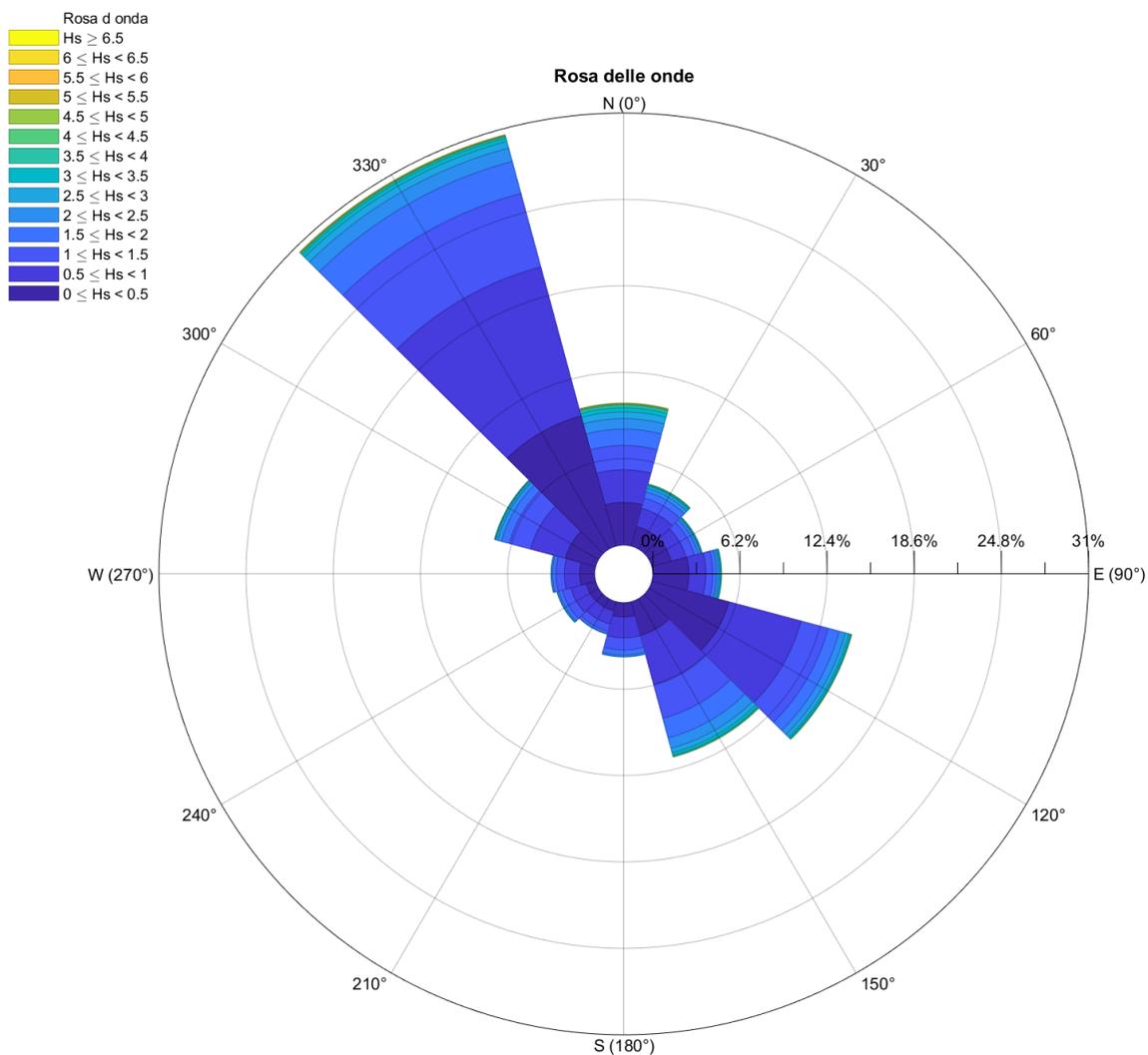


Figura 14 Rosa d'onda, basata su dati H_s e direzione media d'onda (MWD), con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Direzione: N(0°) indica vento DA nord

H_s-dir.		Altezza significativa H_s [m]														
			0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
Direzione [deg N]	TOT	10.188%	32.029%	33.284%	17.766%	8.480%	4.132%	2.111%	1.147%	0.561%	0.240%	0.141%	0.067%	0.029%	0.011%	0.001%
	0	10.188%	3.056%	2.348%	1.738%	1.174%	0.755%	0.488%	0.290%	0.180%	0.075%	0.053%	0.024%	0.007%	0.001%	
	30	4.624%	1.450%	1.356%	0.758%	0.464%	0.256%	0.158%	0.090%	0.051%	0.027%	0.014%	0.001%			
	60	3.717%	1.434%	1.083%	0.609%	0.283%	0.150%	0.075%	0.042%	0.021%	0.011%	0.003%	0.002%	0.003%		
	90	4.895%	2.563%	1.210%	0.490%	0.259%	0.159%	0.099%	0.068%	0.031%	0.010%	0.004%	0.001%			
	120	14.732%	5.684%	5.310%	1.991%	0.826%	0.442%	0.249%	0.131%	0.054%	0.026%	0.012%	0.007%	0.000%		
	150	11.537%	2.494%	3.639%	2.521%	1.462%	0.767%	0.339%	0.190%	0.073%	0.028%	0.016%	0.005%	0.002%	0.002%	
	180	3.890%	1.020%	1.494%	0.867%	0.378%	0.100%	0.023%	0.006%	0.001%						
	210	2.418%	0.682%	0.980%	0.536%	0.169%	0.043%	0.004%	0.002%	0.000%						
	240	2.858%	0.696%	1.132%	0.639%	0.255%	0.092%	0.030%	0.009%	0.002%	0.001%					
	270	3.118%	1.064%	1.088%	0.597%	0.249%	0.087%	0.026%	0.006%	0.001%	0.000%					
	300	7.464%	2.229%	2.569%	1.561%	0.580%	0.286%	0.127%	0.063%	0.029%	0.011%	0.008%	0.002%	0.001%	0.000%	
330	30.561%	9.657%	11.074%	5.459%	2.381%	0.995%	0.492%	0.251%	0.118%	0.051%	0.031%	0.026%	0.015%	0.009%	0.001%	

Tabella 6 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni H_s-direzione. Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

4.2.3 Distribuzione congiunta H_S-T_P

In Tabella 7 è riportata la tabella di frequenze, in percentuale, delle combinazioni H_S-T_P , considerando tutte le direzioni. H_S è diviso per intervalli di 0.5m, mentre T_P è diviso per intervalli di 1s. Le stesse informazioni sono riportate nello *scatter plot* in Figura 15. Nella figura è visibile la curva di correlazione, ottenuta adattando una funzione di potenza con metodo ai minimi quadrati. L'equazione della curva di correlazione, con i relativi valori dei coefficienti corrispondenti ai quantili 5, 50, e 95%, è la seguente:

- Equazione: $T_P = a \cdot H_S^b$
- Coefficiente a : 5.2609 (5), 5.2637 (50), 5.2665 (95)
- Coefficiente b : 0.3513 (5), 0.3520 (50), 0.3528 (95)

H_S-T_P		Altezza significativa H_S [m]														
		TOT	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
Periodo di picco T_P [s]	0.50	0.000%														
	1.50	0.000%														
	2.50	9.812%	9.804%	0.009%												
	3.50	23.229%	14.517%	8.377%	0.334%	0.001%										
	4.50	24.877%	6.373%	13.865%	4.280%	0.348%	0.011%									
	5.50	20.184%	1.045%	8.056%	7.966%	2.751%	0.345%	0.019%	0.002%							
	6.50	12.282%	0.118%	2.370%	3.631%	3.690%	1.952%	0.465%	0.052%	0.004%						
	7.50	6.191%	0.080%	0.550%	1.255%	1.184%	1.346%	1.181%	0.511%	0.074%	0.010%	0.001%				
	8.50	2.502%	0.011%	0.025%	0.249%	0.379%	0.358%	0.370%	0.514%	0.416%	0.135%	0.038%	0.000%			
	9.50	0.802%	0.072%	0.015%	0.048%	0.118%	0.105%	0.064%	0.059%	0.061%	0.090%	0.096%	0.000%	0.000%	0.000%	
	10.50	0.112%	0.008%	0.013%	0.002%	0.007%	0.015%	0.012%	0.008%	0.007%	0.004%	0.005%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
11.50	0.009%	0.001%	0.004%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	

Tabella 7 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni omnidirezionali H_S-T_P . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

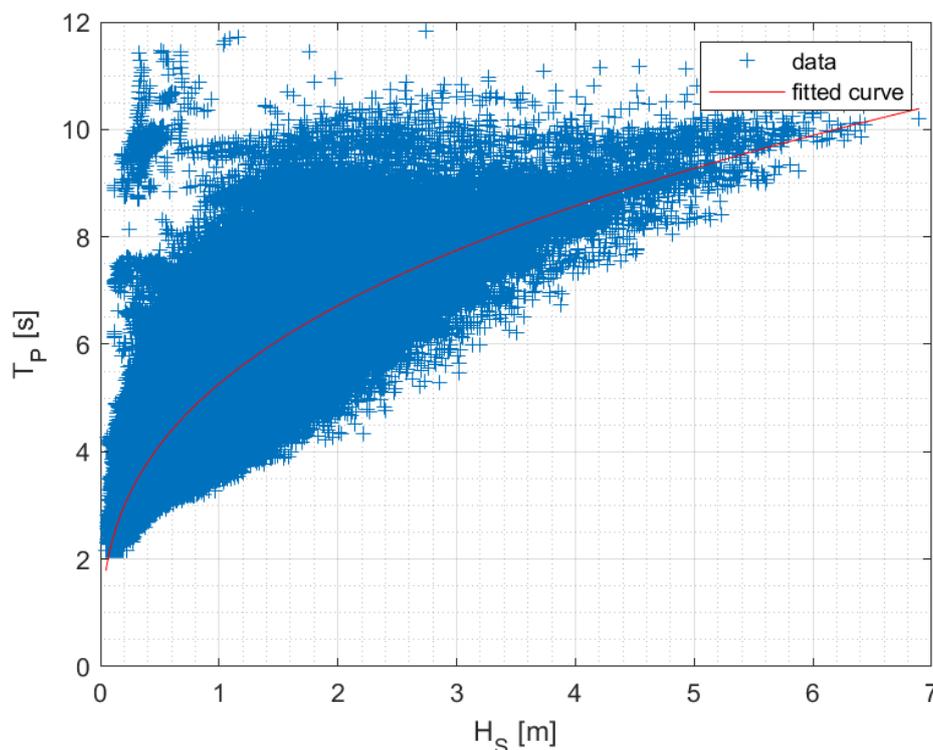


Figura 15 Scatter plot omnidirezionale H_S-T_P . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Vedi sezione 4.2.3 per equazione e coefficienti della linea di correlazione

4.2.4 Distribuzione congiunta H_S-T_Z

In Tabella 8 è riportata la tabella di frequenze, in percentuale, delle combinazioni H_S-T_Z , considerando tutte le direzioni. H_S è diviso per intervalli di 0.5m, mentre T_P è diviso per intervalli di 1s. Le stesse informazioni sono riportate nello *scatter plot* in Figura 16. La curva di correlazione è ottenuta adattando una funzione di potenza con metodo ai minimi quadrati. L'equazione della curva di correlazione, con i relativi valori dei coefficienti corrispondenti ai quantili 5, 50, e 95%, è la seguente:

- Equazione: $T_Z = a \cdot H_S^b$
- Coefficiente a : 3.7786 (5), 3.7796 (50), 3.7807 (95)
- Coefficiente b : 0.3095 (5), 0.3099 (50), 0.3103 (95)

H_S-T_Z		Altezza significativa H_S [m]														
		TOT	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
Per. zero-crossing T_Z [s]	0.50	0.000%														
	1.50	0.783%	0.783%													
	2.50	30.933%	25.651%	5.282%												
	3.50	42.954%	5.573%	25.538%	11.273%	0.568%	0.002%									
	4.50	19.080%	0.022%	2.443%	6.069%	7.182%	2.918%	0.431%	0.014%	0.000%						
	5.50	5.328%		0.021%	0.422%	0.683%	1.138%	1.595%	1.022%	0.382%	0.06%	0.01%	0.000%			
	6.50	0.870%			0.003%	0.046%	0.069%	0.082%	0.109%	0.176%	0.18%	0.13%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%
	7.50	0.05%					0.006%	0.003%	0.002%	0.003%	0.00%	0.01%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Tabella 8 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni omnidirezionali H_S-T_Z . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

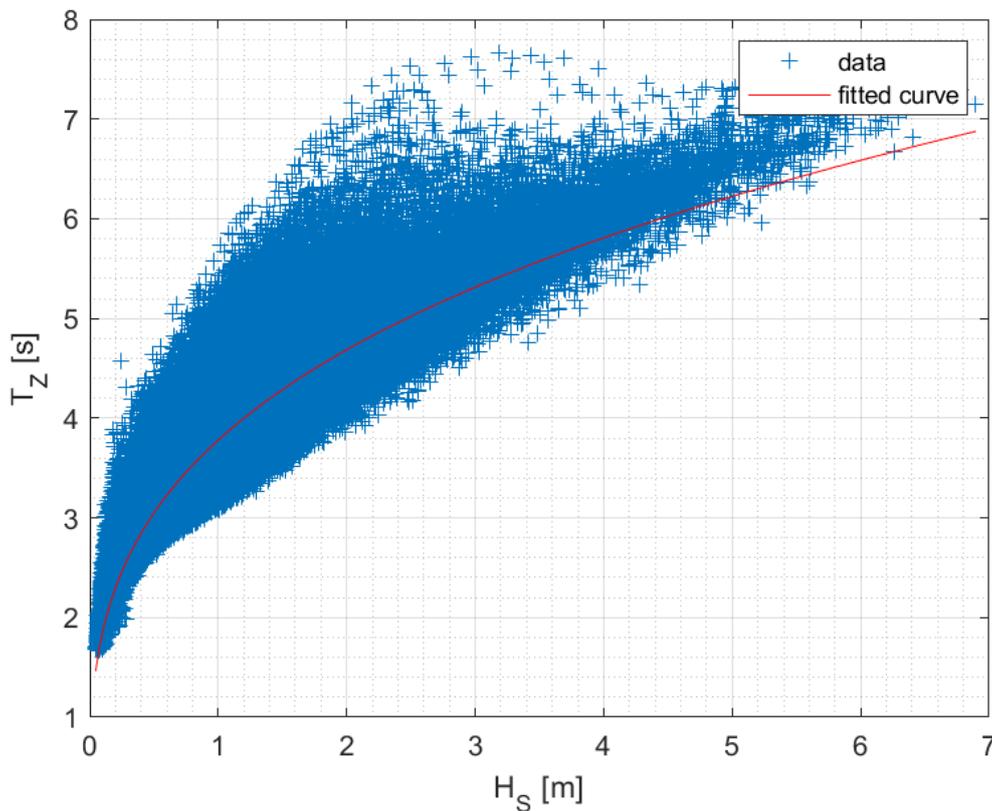


Figura 16 Scatter plot omnidirezionale H_S-T_Z . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Vedi sezione 4.2.4 per equazione e coefficienti della linea rossa

4.3 Vento e onde

4.3.1 Distribuzione congiunta $V_{10m,1h}$ - H_s

In Tabella 9 è riportata la tabella di frequenze, in percentuale (%) e in numero di occorrenze, delle combinazioni $V_{10m,1h}$ - H_s (i.e. velocità vento a 10m s.l.m. e altezza significativa d'onda), considerando tutte le direzioni. La $V_{10m,1h}$ è divisa per intervalli di 2m, mentre la H_s è diviso per intervalli di 0.5m. Le stesse informazioni sono riportate nello *scatter plot* in Figura 17, la cui curva di correlazione, ottenuta adattando una funzione di potenza con metodo ai minimi quadrati, con i relativi valori dei coefficienti corrispondenti ai quantili 5, 50, e 95%, è la seguente:

- Equazione: $V_{10m,1h} = a \cdot H_s^b$
- Coefficiente a : 6.4134 (5), 6.4188 (50), 6.4242 (95)
- Coefficiente b : 0.6048 (5), 0.6059 (50), 0.6071 (95)

Nelle tabelle e nella figura è possibile vedere come ci sia una relazione stretta tra la velocità dei venti locali e l'altezza significativa d'onda degli stati di mare locale, il che rafforza la conclusione che una buona parte degli stati di mare in questa area sia determinato dalle condizioni meteorologiche locali (*seas*, mare) e non dalle condizioni meteorologiche remote (che danno luoghi a onde non generate localmente che si propagano verso il sito di interesse, i.e. *swells*, mareggiate).

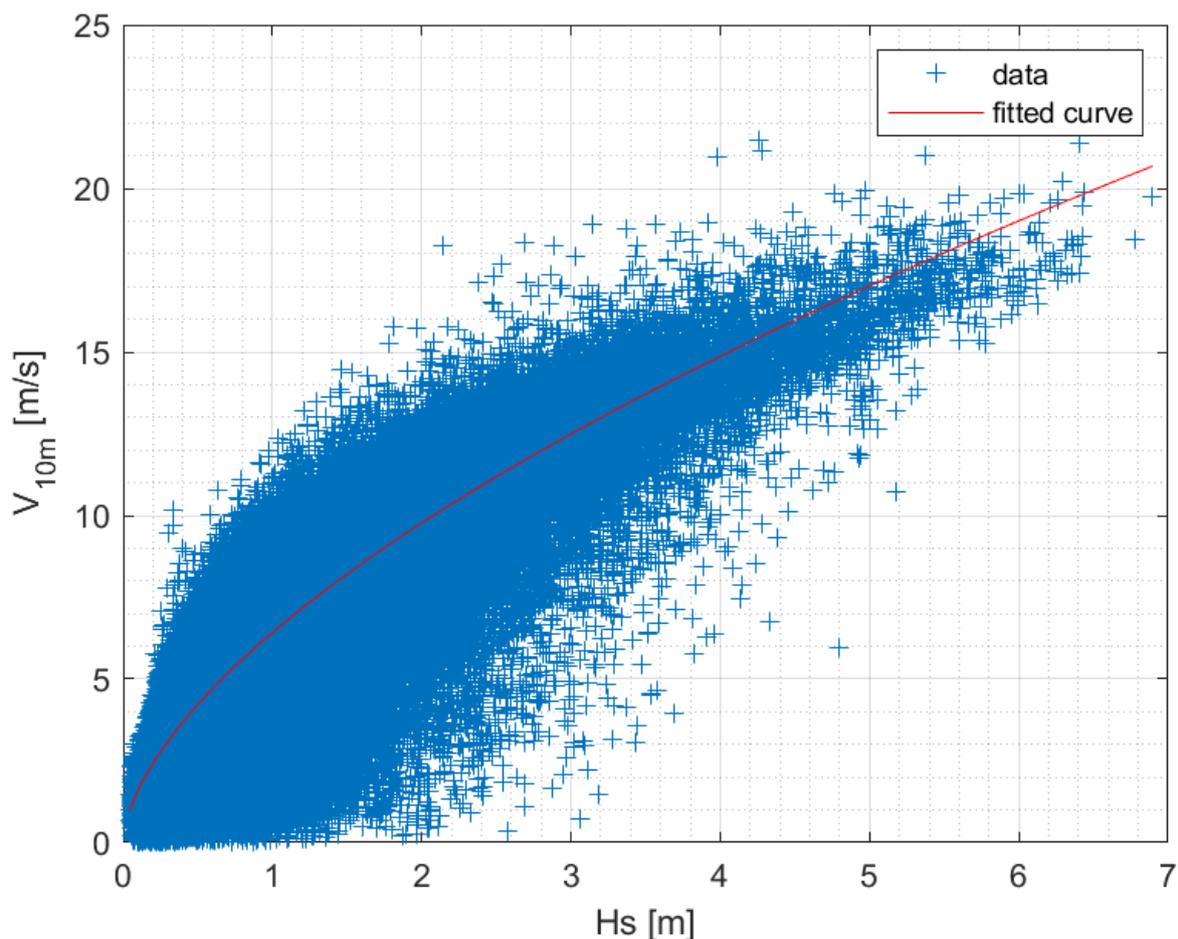


Figura 17 Scatter plot omnidirezionale $V_{10m,1h}$ - H_s . Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Vedi sezione 4.3.1 per equazione e coefficienti della linea di correlazione

$V_{10m,1h}-H_s$		Altezza significativa H_s [m]														
		TOT	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
Vel. vento $V_{10m,1h}$ [m/s]	1	9.962%	8.127%	1.586%	0.205%	0.034%	0.008%	0.001%	0.001%							
	3	21.883%	15.218%	5.684%	0.798%	0.139%	0.034%	0.008%	0.002%	0.000%						
	5	24.286%	8.134%	13.392%	2.244%	0.399%	0.091%	0.020%	0.005%	0.001%	0.000%					
	7	20.953%	0.547%	11.481%	7.363%	1.242%	0.247%	0.058%	0.012%	0.003%	0.001%					
	9	13.144%	0.004%	1.125%	6.651%	4.162%	0.948%	0.192%	0.049%	0.012%	0.002%					
	11	6.263%	0.000%	0.016%	0.494%	2.397%	2.269%	0.850%	0.193%	0.035%	0.007%	0.002%	0.000%			
	13	2.500%			0.012%	0.105%	0.517%	0.901%	0.661%	0.244%	0.050%	0.008%	0.002%			
	15	0.790%			0.000%	0.002%	0.017%	0.079%	0.213%	0.240%	0.142%	0.083%	0.012%	0.002%		
	17	0.187%						0.001%	0.003%	0.010%	0.024%	0.036%	0.043%	0.044%	0.020%	0.006%
	19	0.031%						0.000%	0.001%	0.001%	0.002%	0.002%	0.005%	0.008%	0.007%	0.005%
21	0.002%									0.000%	0.001%	0.000%			0.001%	
23	0.000%												0.000%			

$V_{10m,1h}-H_s$		Altezza significativa H_s [m]														
		TOT	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
Vel. vento $V_{10m,1h}$ [m/s]	1	36677	29922	5840	753	124	31	5	2							
	3	80569	56029	20928	2938	510	126	28	9	1						
	5	89416	29947	49308	8261	1470	335	72	18	4		1				
	7	77145	2014	42272	27110	4572	909	212	43	10	3					
	9	48394	13	4141	24487	15325	3490	706	181	44	7					
	11	23059	1	58	1817	8826	8354	3129	711	129	25	8	1			
	13	9206			46	387	1902	3316	2435	897	184	31	8			
	15	2910			1	8	62	291	786	884	521	304	45	8		
	17	688						4	12	36	90	131	158	162	73	22
	19	113						1	2	3	6	9	17	31	24	18
21	6									1	2		1		2	
23	1													1		

Tabella 9 Tabelle di frequenza, in percentuale (sopra) e in numero di occorrenze (sotto), delle combinazioni omnidirezionali $V_{10m,1h}-H_s$. Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1980 al 31/12/2021. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

4.4 Correnti

Le analisi della velocità della corrente marina presentate in questa sezione sono basate sui dati di rianalisi del database MEDSEA, per le coordinate 41.5625 N 16.9167 E, per il periodo che va dal 01/01/1990 al 31/12/2019, con discretizzazione temporale pari a 1 ora. I dati MEDSEA non includono le correnti marine indotte dalle maree, che sono state aggiunte sulla base dei dati del database TPXO9.2, considerando le stesse coordinate e gli stessi istanti di tempo per calcolare la velocità totale della corrente. Quindi, nel seguito, le analisi della velocità della corrente marina vengono presentate distinguendo le seguenti tre componenti:

- componente deterministica, mareale (*tidal*),
- componente non deterministica, residua (*resid*),
- componente totale (*tot*).

4.4.1 Statistiche mensili e annuali

I valori di minima, massima, media e deviazione standard della velocità della corrente, valutati su base mensile e annuale, sono presentati in Tabella 10 e graficamente in Figura 18 (componente mareale), Figura 19 (componente residua) e Figura 20 (componente totale).

La componente mareale (*tide*) delle velocità di corrente media mensile è abbastanza limitata se confrontata con la componente residua (*resid*), con un andamento generalmente costante nel corso di tutto l'anno e velocità marginalmente più elevata in giugno e dicembre. La velocità media della componente residua, invece, tende a raggiungere i valori più alti nei mesi di agosto e dicembre, e i più bassi nei mesi di fine inverno (febbraio, marzo), con un andamento simile anche per la deviazione standard.

La velocità di corrente totale è largamente dominata dalla componente stocastica (*resid*), da cui prende gli andamenti nel corso dell'anno.

		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic
U_{0m,1h,tide} [m/s]	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Media	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
	Max	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	Std	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
U_{0m,1h,resid} [m/s]	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Media	0.18	0.15	0.12	0.14	0.15	0.17	0.18	0.22	0.25	0.21	0.17	0.20	0.23
	Max	1.06	0.74	0.80	0.97	0.73	0.85	1.01	0.88	0.81	0.84	1.06	0.84	0.75
	Std	0.11	0.08	0.07	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.12	0.10	0.11	0.10
U_{0m,1h,tot} [m/s]	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Media	0.18	0.15	0.12	0.14	0.15	0.17	0.18	0.22	0.25	0.21	0.17	0.20	0.23
	Max	1.06	0.75	0.80	0.96	0.72	0.84	1.01	0.89	0.82	0.83	1.06	0.85	0.76
	Std	0.11	0.08	0.07	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.12	0.10	0.11	0.10

Tabella 10 Statistiche mensili e annuali della velocità della corrente (omnidirezionale), componenti mareale (in alto), residua (al centro) e totale (in basso). Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti)

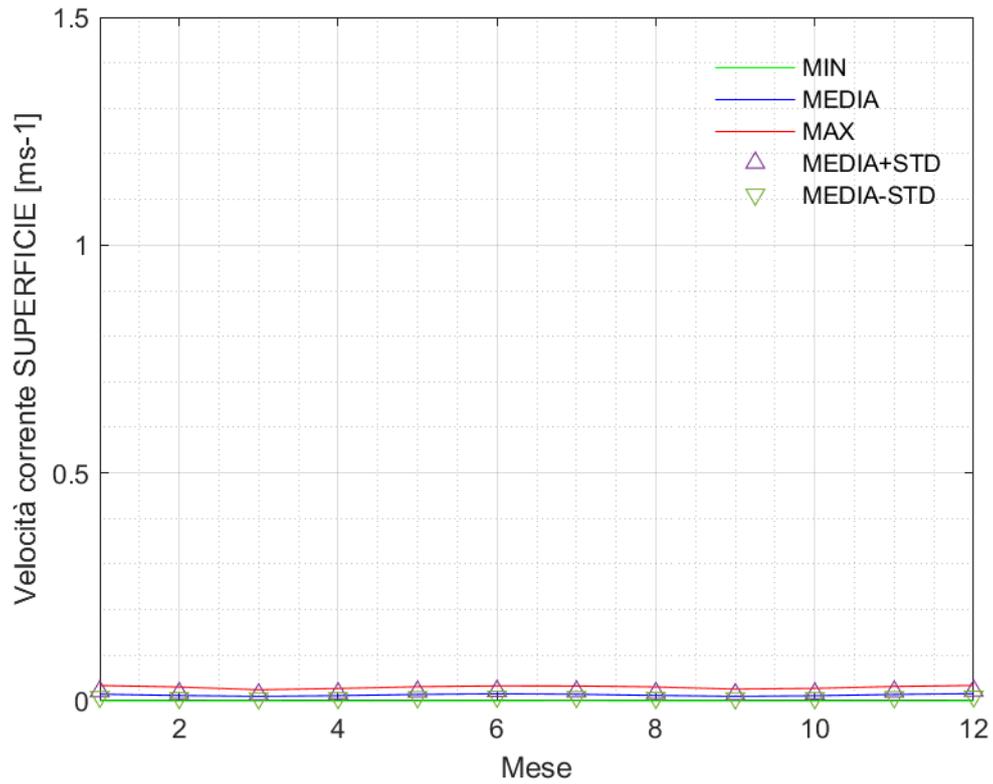


Figura 18 Statistiche mensili della velocità della corrente, componente **mareale**, basata sulle costituenti delle maree considerate in TPX09.2 (STD = deviazione standard)

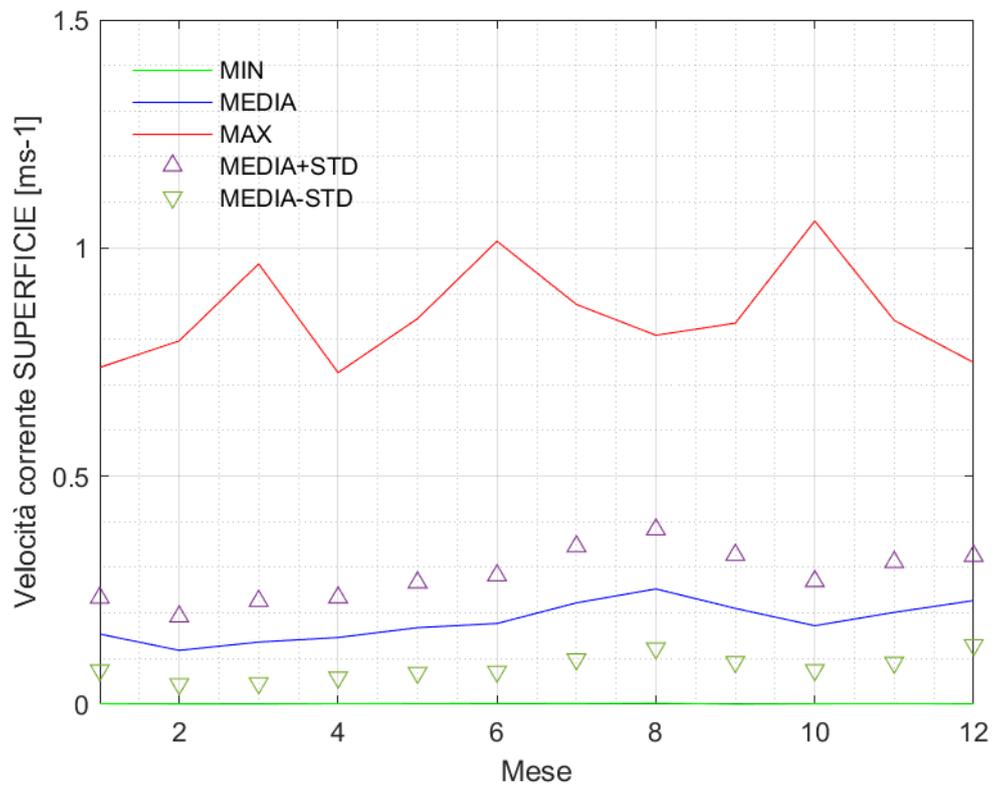


Figura 19 Statistiche mensili della velocità della corrente, componente **residua**, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019 (STD = deviazione standard)

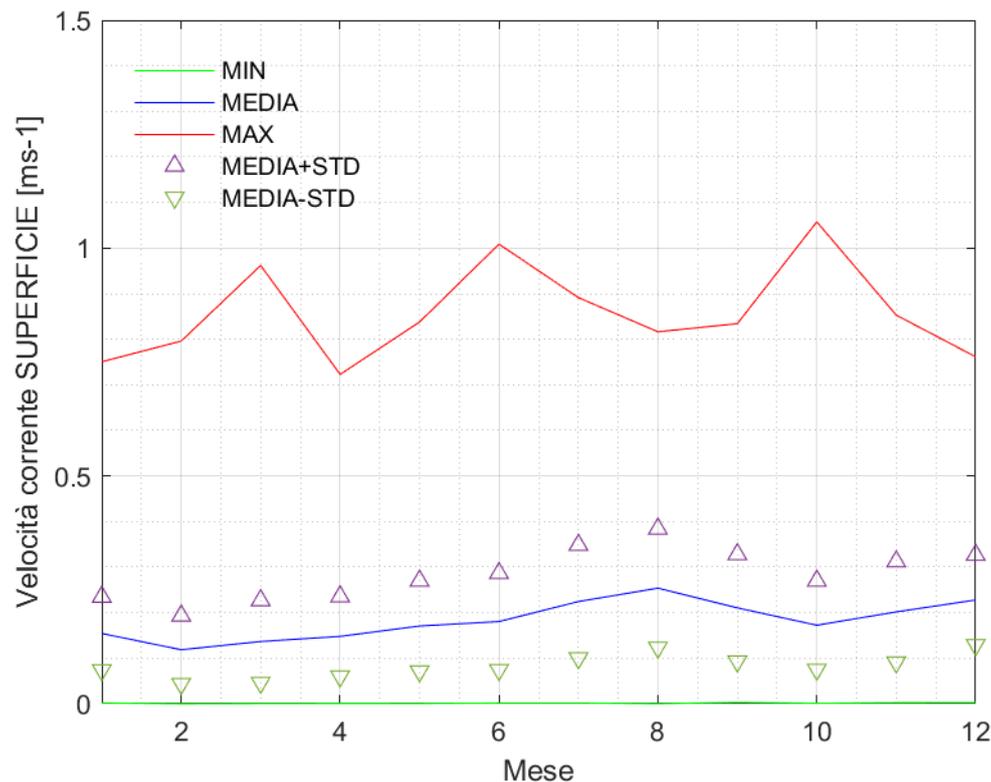


Figura 20 Statistiche mensili della velocità della corrente, componente **totale**, somma delle componenti mareale e residua (STD = deviazione standard)

4.4.2 Rosa delle correnti e tabelle di frequenza

Le rose delle correnti sono presentate in Figura 21 (componente mareale), Figura 22 (componente residua) e Figura 23 (componente totale), mentre le tabelle di frequenza, in percentuale, delle combinazioni velocità della corrente-direzione sono presentate in Tabella 11 (componente mareale), Tabella 12 (componente residua) e Tabella 13 (componente totale), con la velocità di corrente $U_{0m,1h}$ divisa per intervalli di 0.1 m/s, mentre la direzione è divisa per intervalli di 30° .

In termini di direzionalità, la componente deterministica (i.e. mareale) presenta una forte direzionalità WNW e ESE, con $\sim 26\%$ delle correnti provenienti da 300°N e $\sim 16\%$ da 120°N . Se poi si considerano gli intervalli da 270°N a 330°N e da 90°N a 150°N questi valori salgono, rispettivamente, a 41% e 38% , mentre nelle altre direzioni vengono registrate il 5% (o meno) delle velocità. Per quanto riguarda la componente residua (stocastica), il $\sim 34\%$ delle correnti provengono dai 330°N (i.e. NNW), percentuale che sale al $\sim 56\%$ se si considerano le direzioni da 330°N a 0°N . Dato che le velocità di corrente residua sono quasi un ordine di grandezza più alte di quelle mareali, la direzionalità della velocità di corrente totale è dominata dalla componente residua. Infatti, si può osservare un simile andamento in Figura 22 e Figura 23.

In termini di modulo della velocità, il 100% delle correnti mareali ha una velocità inferiore a 0.1m/s, mentre per le correnti residue si ha il $\sim 24\%$ delle velocità sotto 0.1m/s, $\sim 63\%$ sotto 0.2m/s, $\sim 86\%$ sotto 0.3m/s, e 96% sotto i 0.4m/s. Le velocità di corrente marina (totale) più alte, comprese tra 0.9 e 1.1m/s, tendono a provenire da N, con direzioni comprese tra 330°N e 30°N e da S (180°N - 210°N).

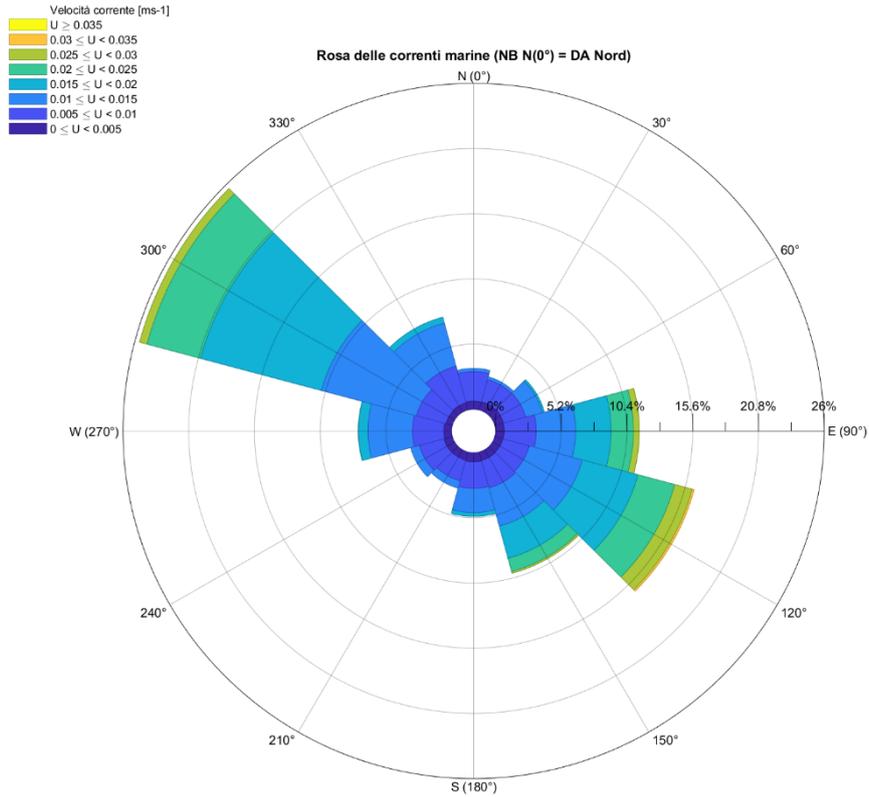


Figura 21 Rosa delle correnti, componente **mareale**, basata sulle costituenti delle maree considerate in TPX09.2. Direzione: N(0°) indica corrente DA nord

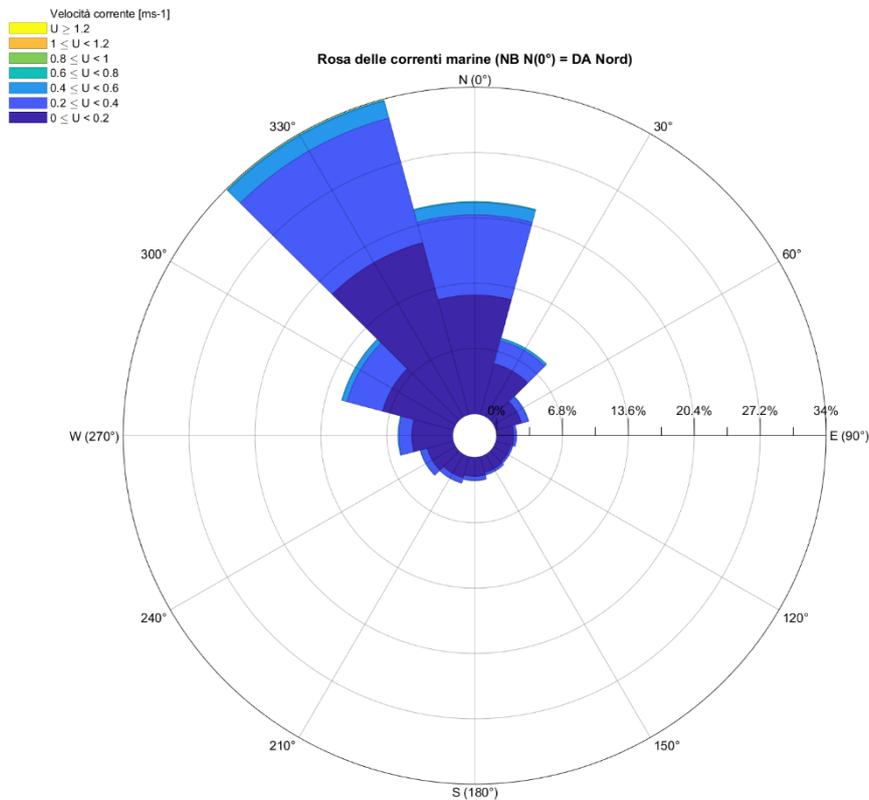


Figura 22 Rosa delle correnti, componente **residua**, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019. Direzione: N(0°) indica corrente DA nord

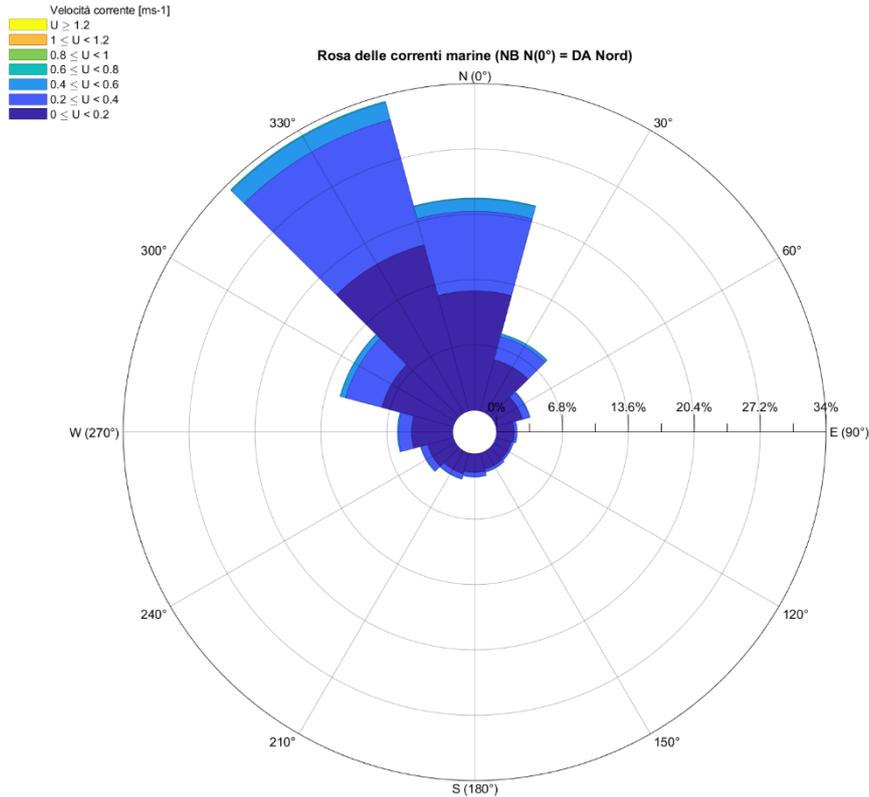


Figura 23 Rosa delle correnti, componente **totale**, somma delle componenti mareale e residua. Direzione: N(0°) indica corrente DA nord

U_{0m,1h,tide}		Velocità corrente [m/s]										
		0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	1.0-1.1
Direzione [deg N]	TOT	100.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
	0	3.268%	3.268%									
	30	2.742%	2.742%									
	60	4.069%	4.069%									
	90	11.384%	11.384%									
	120	16.337%	16.337%									
	150	10.020%	10.020%									
	180	5.081%	5.081%									
	210	2.986%	2.986%									
	240	3.420%	3.420%									
	270	7.394%	7.394%									
	300	25.628%	25.628%									
330	7.671%	7.671%										

Tabella 11 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni U_{0m,1h,tidal}-direzione (componente mareale), basata sulle costituenti delle maree considerate in TPX09.2. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

$U_{0m,1h,resid}$		Velocità corrente [m/s]											
		0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	1.0-1.1	
Direzione [deg N]	TOT	24.204%	38.795%	22.899%	9.584%	3.310%	0.943%	0.196%	0.050%	0.013%	0.003%	0.002%	
	0	22.094%	3.916%	8.450%	5.828%	2.518%	0.978%	0.312%	0.072%	0.014%	0.004%	0.001%	0.002%
	30	8.236%	2.180%	3.310%	1.795%	0.665%	0.203%	0.068%	0.010%	0.003%	0.001%	0.001%	0.000%
	60	3.508%	1.329%	1.405%	0.571%	0.148%	0.042%	0.009%	0.002%	0.001%	0.000%		
	90	2.060%	1.033%	0.738%	0.216%	0.059%	0.012%	0.002%	0.000%				
	120	1.817%	0.977%	0.621%	0.172%	0.037%	0.010%	0.000%					
	150	1.979%	1.023%	0.682%	0.202%	0.053%	0.014%	0.003%	0.002%	0.000%			
	180	2.424%	1.090%	0.876%	0.314%	0.103%	0.029%	0.007%	0.003%	0.002%	0.000%	0.000%	
	210	2.852%	1.196%	1.068%	0.412%	0.135%	0.030%	0.006%	0.003%	0.001%	0.000%	0.001%	
	240	3.565%	1.405%	1.389%	0.574%	0.152%	0.029%	0.013%	0.002%				
	270	5.646%	1.950%	2.269%	0.987%	0.328%	0.089%	0.019%	0.004%	0.001%	0.000%		
	300	11.935%	2.915%	4.653%	2.655%	1.138%	0.420%	0.124%	0.022%	0.007%	0.001%		
330	33.885%	5.189%	13.335%	9.173%	4.248%	1.455%	0.381%	0.075%	0.023%	0.005%	0.000%	0.000%	

Tabella 12 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni $U_{0m,1h,resid}$ -direzione (componente residua). Discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

$U_{0m,1h,tot}$		Velocità corrente [m/s]											
		0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	1.0-1.1	
Direzione [deg N]	TOT	23.898%	38.714%	23.079%	9.692%	3.379%	0.965%	0.201%	0.051%	0.014%	0.004%	0.002%	
	0	22.086%	3.916%	8.503%	5.768%	2.516%	0.987%	0.308%	0.068%	0.014%	0.003%	0.002%	0.002%
	30	8.316%	2.184%	3.333%	1.830%	0.677%	0.208%	0.068%	0.009%	0.003%	0.001%	0.001%	0.000%
	60	3.655%	1.404%	1.432%	0.605%	0.154%	0.045%	0.010%	0.002%	0.001%	0.000%		
	90	2.110%	1.030%	0.779%	0.225%	0.061%	0.012%	0.002%	0.000%				
	120	1.882%	0.969%	0.670%	0.192%	0.038%	0.012%	0.001%					
	150	2.042%	1.009%	0.719%	0.239%	0.053%	0.018%	0.003%	0.002%	0.000%			
	180	2.412%	1.060%	0.879%	0.321%	0.111%	0.031%	0.006%	0.003%	0.002%	0.000%	0.000%	
	210	2.801%	1.158%	1.048%	0.420%	0.132%	0.031%	0.006%	0.003%	0.001%	0.000%	0.001%	
	240	3.518%	1.394%	1.357%	0.572%	0.148%	0.033%	0.013%	0.001%				
	270	5.702%	1.937%	2.293%	1.011%	0.347%	0.086%	0.024%	0.003%	0.001%	0.000%		
	300	12.109%	2.942%	4.698%	2.695%	1.175%	0.427%	0.137%	0.026%	0.008%	0.002%		
330	33.366%	4.895%	13.004%	9.202%	4.278%	1.489%	0.387%	0.084%	0.021%	0.006%	0.000%	0.000%	

Tabella 13 Tabella di frequenza, in percentuale (%), delle combinazioni $U_{0m,1h,tot}$ -direzione (componente totale), somma delle componenti mareale e residua. Le celle sono ombreggiate da bianco (frequenza bassa) al rosso (frequenza alta)

4.5 Livello del mare

Le analisi del livello del mare sono basate sui dati di rianalisi *hindcast* del database MEDSEA, per le coordinate 41.5625 N 16.9167 E, per il periodo che va dal 01/01/1990 al 31/12/2019, con discretizzazione temporale pari a 1 ora.

Come per le correnti, i dati MEDSEA non includono i cambiamenti del livello del mare derivanti dalle maree, che sono quindi stati aggiunti considerando i dati TPXO92, per le stesse coordinate e gli stessi istanti di tempo utilizzati per il database MEDSEA.

Quindi, nel seguito, le analisi del livello del mare vengono presentate distinguendo le tre componenti come segue:

- componente deterministica, mareale (*tidal*),
- componente non deterministica, residua (*resid*),
- componente totale (*tot*).

Vengono inoltre derivati, utilizzando le componenti armoniche delle maree, i termini “non-armonici”, e cioè i parametri che vengono tipicamente utilizzati per caratterizzare le caratteristiche delle maree, come per esempio in (DNVGL, 2017).

4.5.1 Statistiche mensili e annuali

I valori di minima, massima, media, e deviazione standard del livello del mare, valutati su base mensile e annuale, sono presentati in Tabella 14 e graficamente in Figura 24 (componente mareale), Figura 25 (componente residua) e Figura 26 (componente totale).

		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic	
$\eta_{1h,tide}$ [m]	Min	-0.21	-0.18	-0.20	-0.21	-0.21	-0.20	-0.18	-0.18	-0.20	-0.21	-0.21	-0.21	-0.19	
	Media	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Max	0.24	0.24	0.23	0.21	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.23	0.24
	Std	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09
		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic	
$\eta_{1h,resid}$ [m]	Min	-0.39	-0.27	-0.39	-0.37	-0.27	-0.26	-0.18	-0.18	-0.12	-0.18	-0.30	-0.29	-0.32	
	Media	0.00	0.04	0.01	-0.05	-0.04	-0.03	-0.01	0.02	0.04	0.01	-0.03	0.01	0.02	
	Max	0.59	0.52	0.54	0.38	0.32	0.33	0.28	0.24	0.21	0.30	0.29	0.42	0.59	
	Std	0.58	0.61	0.61	0.60	0.57	0.56	0.55	0.54	0.54	0.55	0.57	0.59	0.61	
		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic	
$\eta_{1h,tot}$ [m]	Min	-0.50	-0.40	-0.45	-0.50	-0.43	-0.38	-0.32	-0.30	-0.28	-0.33	-0.42	-0.38	-0.41	
	Media	0.00	0.04	0.01	-0.05	-0.04	-0.03	-0.01	0.02	0.04	0.01	-0.03	0.01	0.02	
	Max	0.62	0.57	0.61	0.49	0.37	0.47	0.43	0.37	0.36	0.41	0.39	0.62	0.57	
	Std	0.13	0.15	0.15	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	

Tabella 14 Statistiche mensili e annuali del livello del mare, componenti mareale (in alto), residua (al centro) e totale (in basso). Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti)

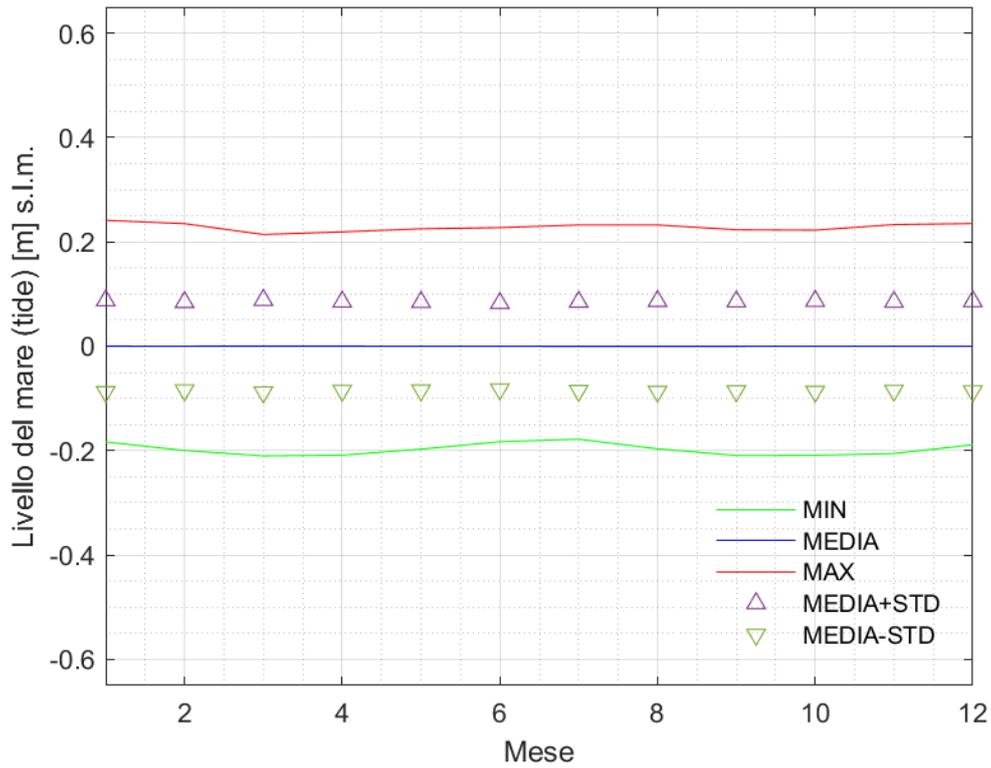


Figura 24 Statistiche mensili del livello del mare, componente **mareale**, basata sulle costituenti delle maree considerate in TPX09.2 (STD = deviazione standard)

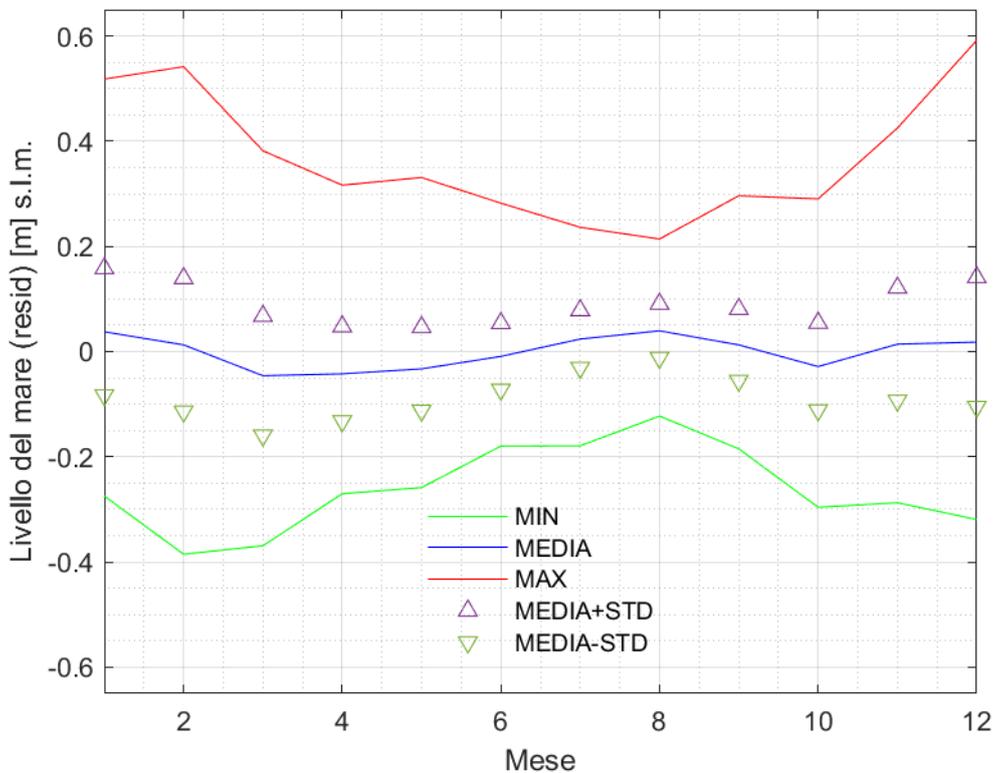


Figura 25 Statistiche mensili del livello del mare, componente **residua**, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 ora, dal 01/01/1990 al 31/12/2019 (STD = deviazione standard)

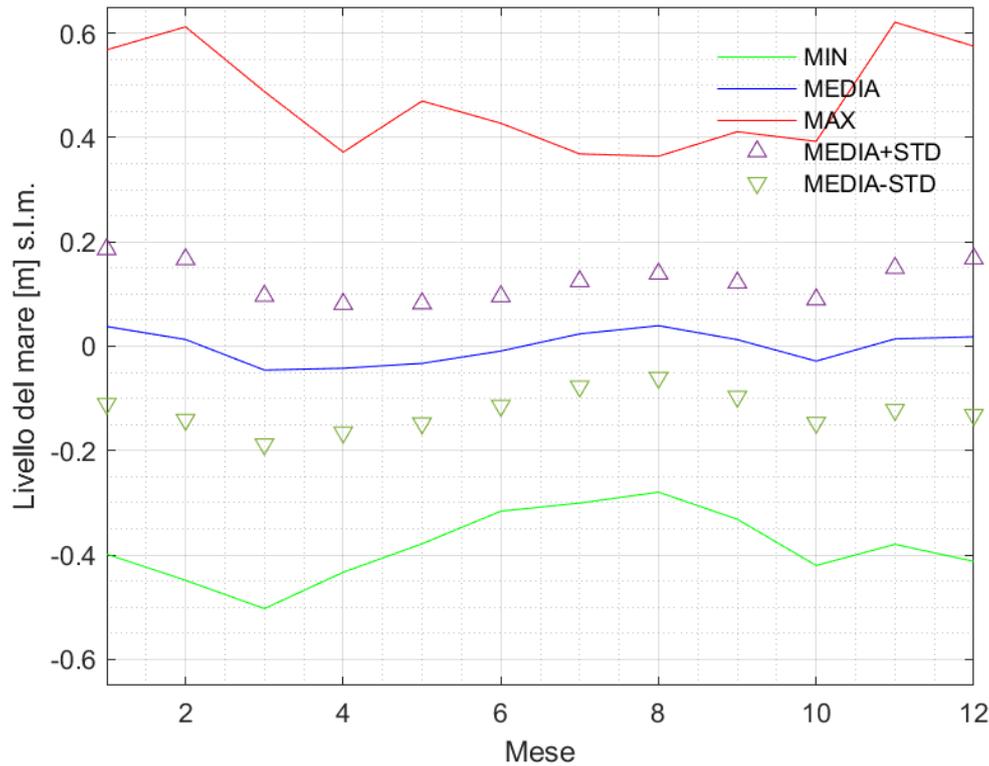


Figura 26 Statistiche mensili del livello del mare, componente **totale**, somma delle componenti mareale e residua (STD = deviazione standard)

4.5.2 Termini non armonici

I termini non armonici sono derivati dalle costituenti mareali estratte dal database TPX092. LAT e HAT sono derivati estraendo, rispettivamente, il valore più basso e più alto del livello del mare (componente mareale), considerando una serie temporale più lunga di 18.6 anni. Il sito di Bari è caratterizzato da un regime **semidiurno**, in base ad un *form factor* (Simon, 2013; Stephenson, 2016) uguale a **0.450**. I termini non armonici sono presentati in Tabella 15:

- *HAT: Highest Astronomical Tide*
- *MHWS: Mean High Water Spring*
- *MHWN: Mean High Water Neaps*
- *Z_0: mean still water level*
- *MLWN: Mean Low water Neaps*
- *MLWS: Mean Low Water Spring*
- *LAT: Lowest Astronomical Tide*

Tabella 15 Termini non armonici delle maree

WL [m]	LAT	MLWS	MLWN	Z_0	MHWN	MHWS	HAT
mMSL	-0.212	-0.147	-0.030	0	0.030	0.147	0.241

4.6 Temperatura e salinità dell'acqua di mare

Le analisi di temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua sono basate sui dati MEDSEA, per le coordinate 41.5625 N 16.9167 E, per il periodo che va dal 01/01/1990 al 31/12/2019, con discretizzazione temporale pari a 1 giorno.

In particolare, sono stati utilizzati i seguenti dati:

- med-cmcc-tem-rean-d: temperatura potenziale, in °C, lungo la colonna d'acqua (*thetao*) e sul fondo marino (*bottomT*),
- med-cmcc-sal-rean-d: salinità dell'acqua, in psu, lungo la colonna d'acqua (*so*).

4.6.1 Temperatura

I dati *hindcast* della temperatura sono stati analizzati in maniera analoga a quelli relativi alle temperature, i.e. derivando i principali valori statistici (minimo, massimo, media, deviazione standard) su base mensile e annuale, e a tre livelli di profondità: in superficie, a metà colonna, e sul fondo marino. I risultati sono presentati in Tabella 17. In Figura 27, Figura 28 e Figura 29 sono rappresentate le statistiche mensili della temperatura rispettivamente per il fondale marino, a metà colonna, e in superficie. Similmente, in Figura 30 e Figura 31 sono inoltre rappresentati i livelli di temperatura media mensile in funzione di tutti i livelli di profondità disponibili nel database *hindcast*.

In superficie, le temperature più alte si registrano nel periodo tra luglio e settembre, mentre quelle più basse tra gennaio e marzo, con una differenza massima di temperatura media di circa 12 °C. A metà fondale può essere osservato un andamento simile a quello sul fondo, con un andamento stagionale simile a quello in superficie ma in ritardo di 2-4 mesi e molto più smorzato (differenza massima di temperatura media di circa 1.4 °C a metà e di 1°C sul fondo).

I grafici mostrano come la colonna d'acqua sia ben miscelata nei mesi invernali e agli inizi della primavera (da dicembre ad aprile), con variazioni di circa 1 °C o meno lungo tutta la colonna, mentre una chiara stratificazione si sviluppa nei mesi estivi e autunnali, dove la differenza di temperatura media mensile, tra superficie e fondale marino, può raggiungere gli 11-12 °C (vedi luglio e agosto).

		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic
Superficie	Min	12.22	12.66	12.33	12.22	12.47	14.03	16.88	20.44	22.27	19.05	17.04	14.15	12.44
	Media	18.56	14.28	13.80	13.79	14.68	17.74	22.00	24.81	25.81	23.29	20.07	17.16	15.36
	Max	29.02	16.27	14.91	15.30	19.27	24.29	27.65	28.81	29.02	27.64	23.97	20.72	18.14
Meta'	Min	12.01	12.80	12.70	12.01	12.57	12.50	12.87	12.61	12.69	12.74	12.61	12.27	12.79
	Media	14.31	14.32	13.84	13.72	13.87	14.02	14.14	14.28	14.52	14.60	14.56	14.76	15.13
	Max	18.11	16.24	15.34	14.94	15.11	15.67	15.74	15.80	15.83	15.86	15.87	16.64	18.11
Fondo	Min	11.87	12.37	12.53	11.87	12.06	11.87	11.90	12.23	12.74	12.38	12.52	11.97	12.61
	Media	13.89	14.24	13.79	13.56	13.51	13.54	13.61	13.76	13.91	13.98	14.05	14.29	14.49
	Max	16.14	15.99	15.10	14.83	14.73	14.70	14.71	15.52	15.32	15.08	15.30	15.98	16.14

Tabella 16 Statistiche mensili e annuali della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in superficie, a metà colonna, e sul fondo. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da blu (valori bassi), al bianco (valori intermedi), al rosso (valori più alti)

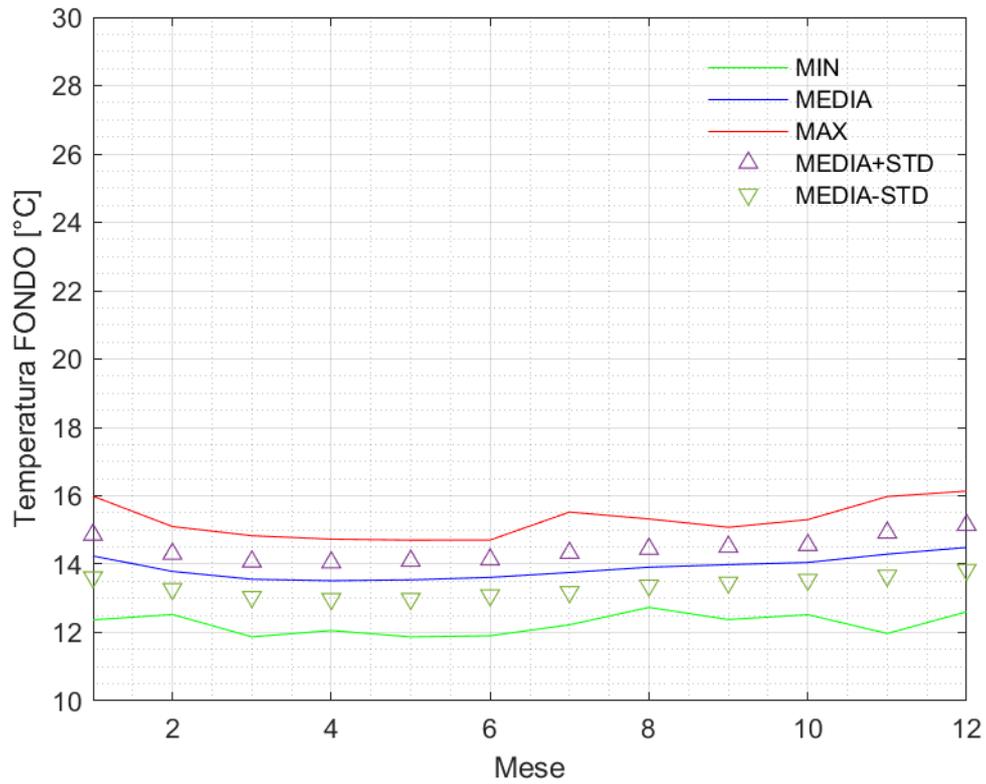


Figura 27 Statistiche mensili della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, fondale marino (STD = deviazione standard)

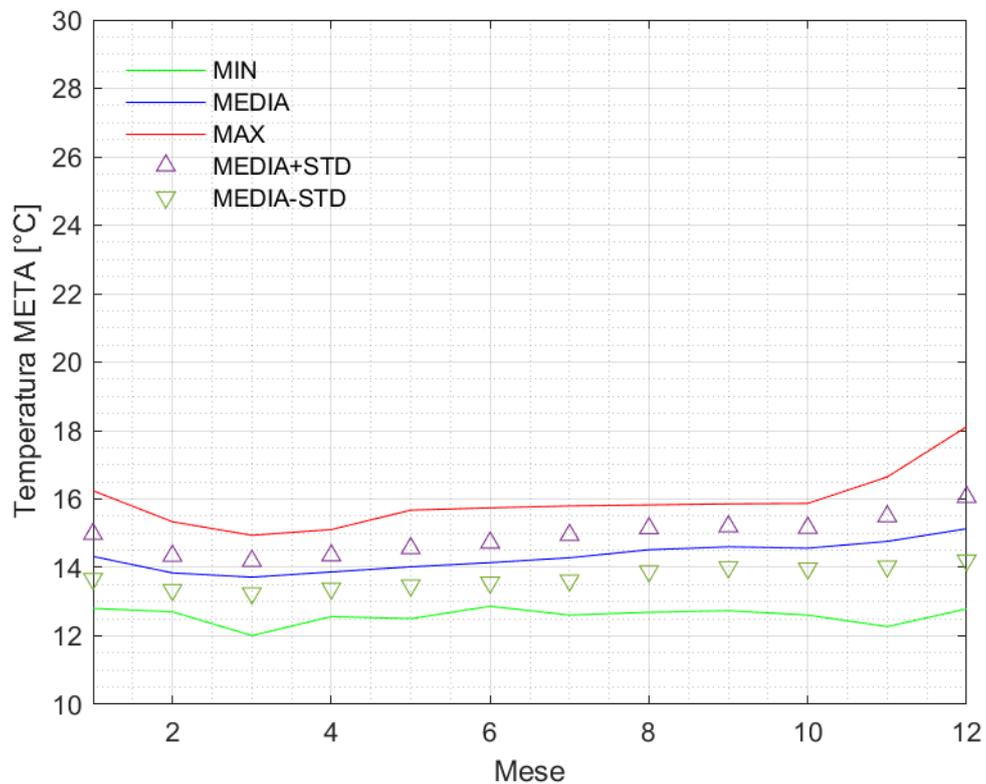


Figura 28 Statistiche mensili della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, metà colonna (STD = deviazione standard)

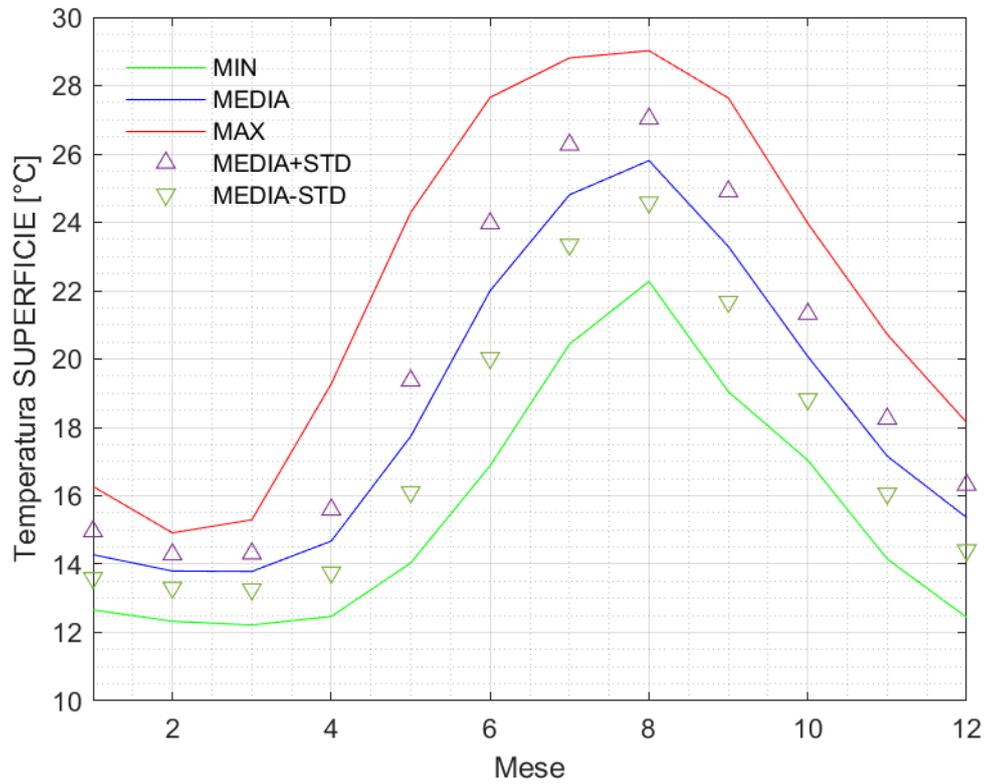


Figura 29 Statistiche mensili della temperatura, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, superficie (STD = deviazione standard)

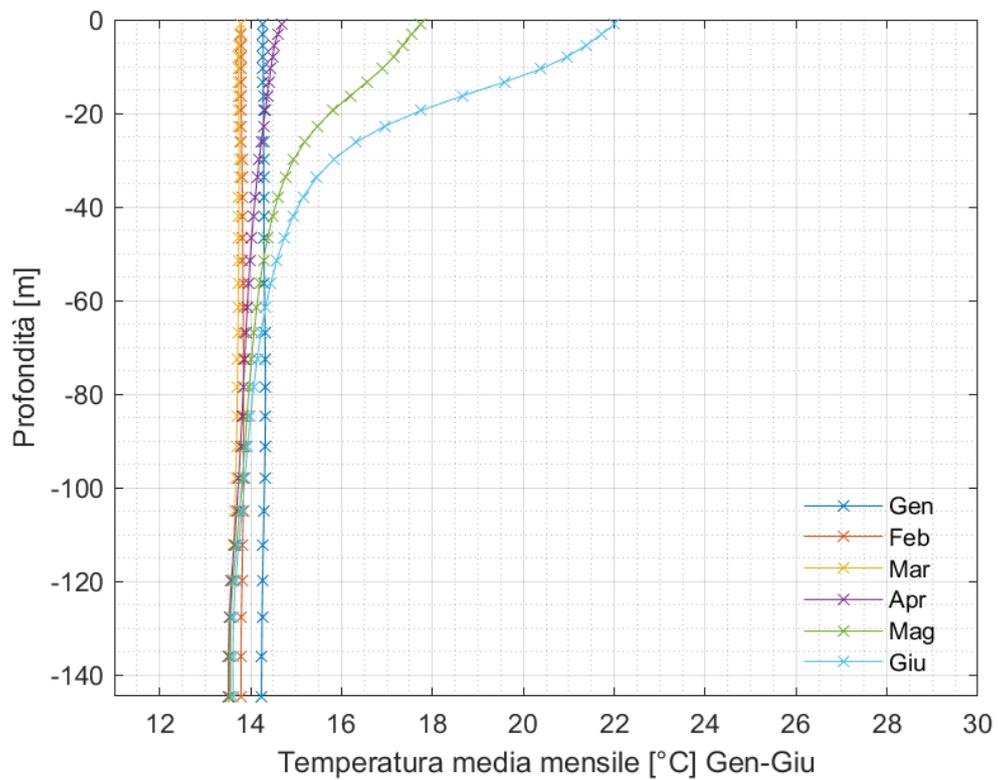


Figura 30 Statistiche mensili della temperatura media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da gennaio a giugno

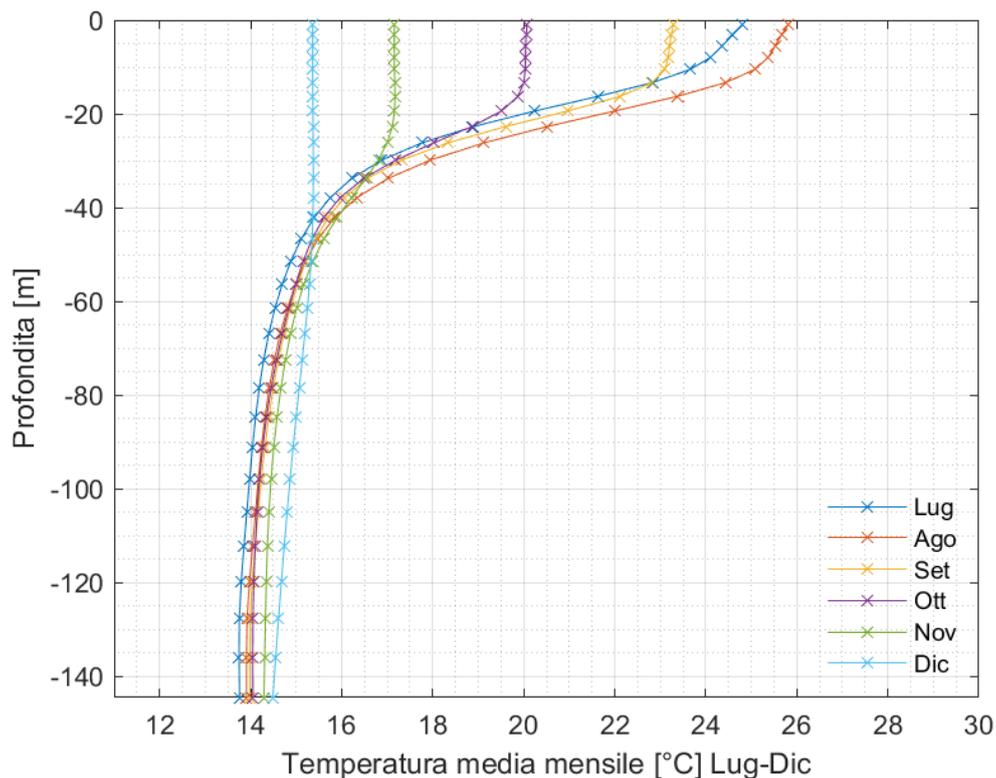


Figura 31 Statistiche mensili della temperatura media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da luglio a dicembre

4.6.2 Salinità

I dati *hindcast* della salinità sono stati analizzati in maniera analoga a quelli relativi alle temperature, i.e. derivando i principali valori statistici (minimo, massimo, media, deviazione standard) su base mensile e annuale, e a tre livelli di profondità: in superficie, a metà colonna, e sul fondo marino. I risultati sono presentati in Tabella 17. In Figura 32, Figura 33 e Figura 34 sono rappresentate le statistiche mensili della salinità rispettivamente per il fondale marino, a metà colonna, e in superficie. In Figura 35 e Figura 36 sono inoltre rappresentati i livelli di salinità media mensile in funzione di tutti i livelli di profondità disponibili nel database *hindcast*.

In superficie si osservano i range di salinità più pronunciati, anche se comunque moderati in termini di valo medio, con minime nei mesi estivi (giugno-agosto) e massime in inverno e inizio primavera (gennaio-aprile), con una differenza massima di circa 0.21 psu. Sempre in superficie, la differenza tra i massimi mensili è di circa 0.6 psu, mentre per i minimi questa differenza crece a 1.74 psu. A metà colonna e sul fondo, invece, i valori più alti sono osservati a fine estate/inizio autunno (Settembre-Nov), e quelli più bassi in quelli invernali tra Gen e Mar, anche se le oscillazioni del valore medio mensile sono, in generale, molto limitate (differenza massima di circa 0.09 psu a metà colonna e di 0.06 sul fondo).

Le differenze più pronunciate tra lo strato superficiale e gli strati più profondi si osservano da aprile a novembre: come osservato in (Artegiani *et al.*, 1997), le variazioni più pronunciate nello strato superficiale sono dovute alle acque dolci dei fiumi che si incontra in tutto l'Adriatico meridionale. In generale, tuttavia, si può osservare come le differenze di salinità (medie mensili) tra superficie fondo, con salinità del fondo sempre più alta, siano abbastanza ridotte, da 0.29 psu di differenza in luglio a 0.04 psu di diffeenza in febbraio.

		All	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Sep	Ott	Nov	Dic
Superficie	Min	36.28	38.02	37.93	37.79	37.55	37.34	37.38	37.27	36.70	36.28	37.14	37.32	37.80
	Media	38.47	38.55	38.57	38.55	38.53	38.42	38.39	38.36	38.39	38.46	38.41	38.42	38.53
	Max	39.50	38.93	38.91	38.96	39.05	39.03	39.12	39.24	39.50	39.39	39.40	39.12	38.95
Meta'	Min	38.09	38.17	38.18	38.18	38.27	38.09	38.14	38.15	38.14	38.35	38.18	38.31	38.20
	Media	38.63	38.59	38.59	38.61	38.64	38.64	38.62	38.61	38.63	38.68	38.67	38.66	38.62
	Max	39.14	38.95	38.91	38.95	39.00	39.06	39.04	39.03	39.02	39.11	39.14	39.14	38.97
Fondo	Min	38.27	38.32	38.27	38.32	38.40	38.34	38.40	38.34	38.39	38.35	38.37	38.38	38.35
	Media	38.64	38.63	38.61	38.61	38.62	38.62	38.62	38.65	38.67	38.66	38.64	38.65	38.66
	Max	39.07	38.93	38.89	38.88	38.89	38.91	38.89	39.07	39.00	38.96	38.94	38.98	38.94

Tabella 17 Statistiche mensili e annuali della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in superficie, a metà colonna, e sul fondo. Le celle dei valori di media sono ombreggiate da bianco (valori bassi) al rosso (valori più alti)

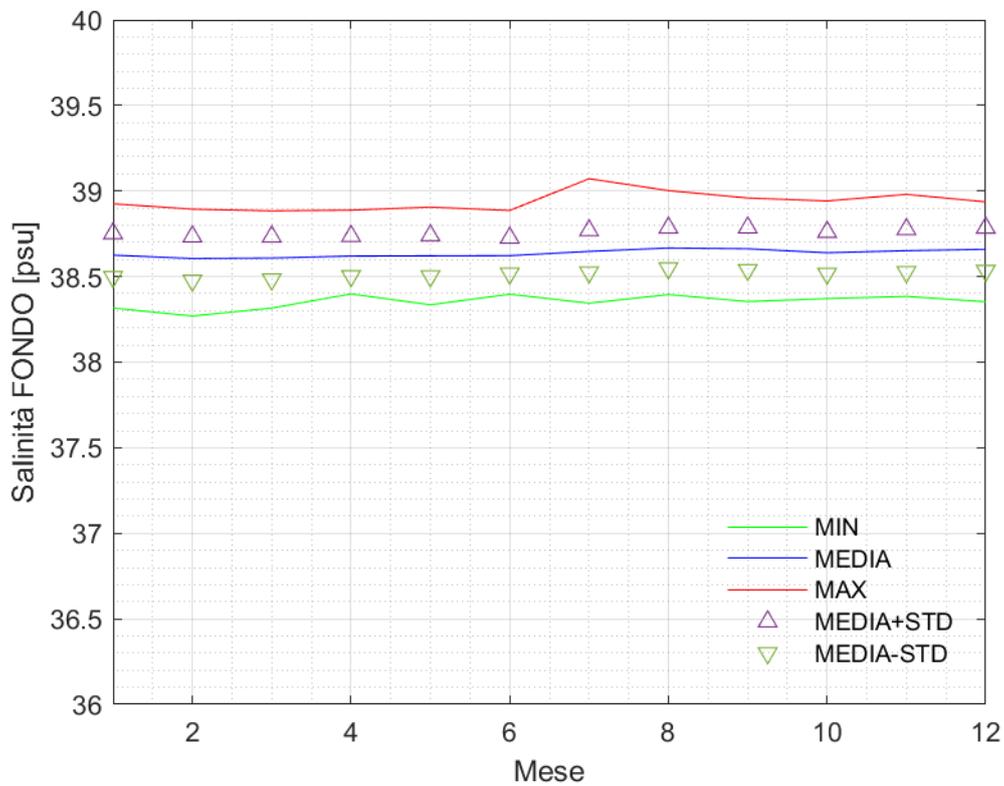


Figura 32 Statistiche mensili della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, fondale marino (STD = deviazione standard)

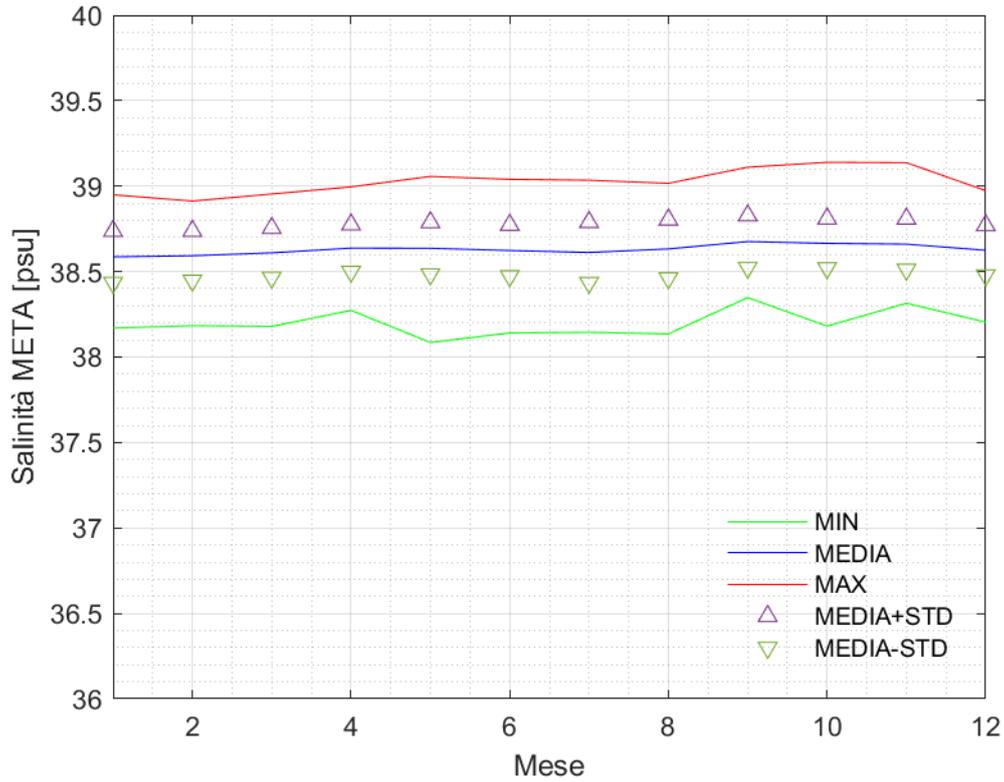


Figura 33 Statistiche mensili della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, metà colonna (STD = deviazione standard)

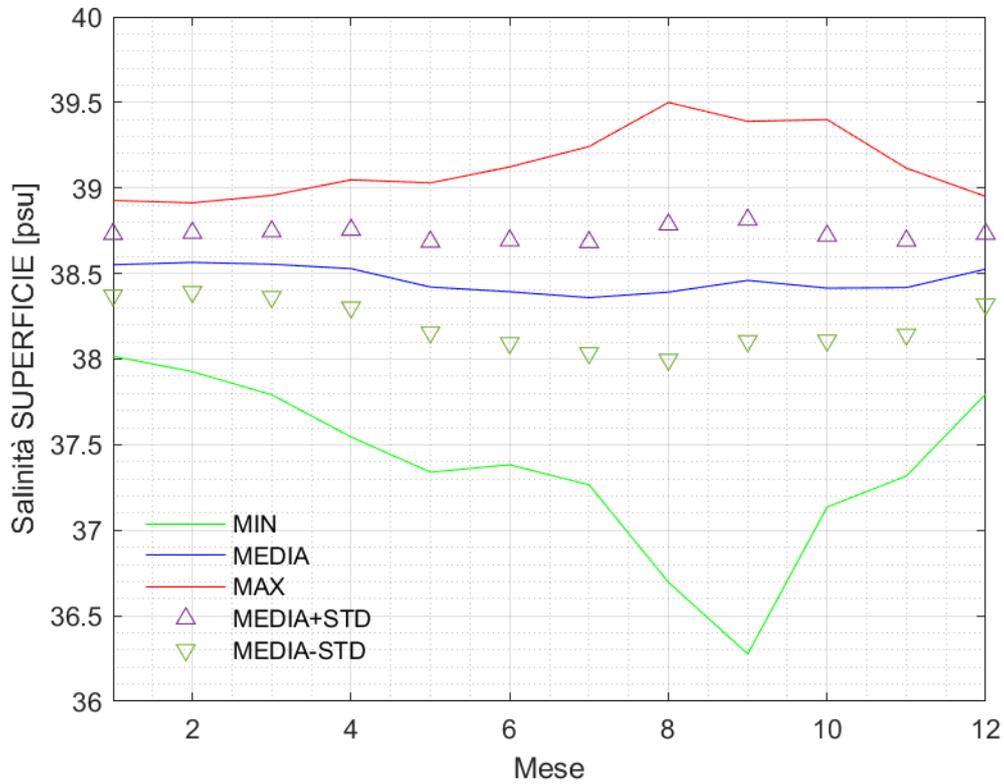


Figura 34 Statistiche mensili della salinità, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, superficie (STD = deviazione standard)

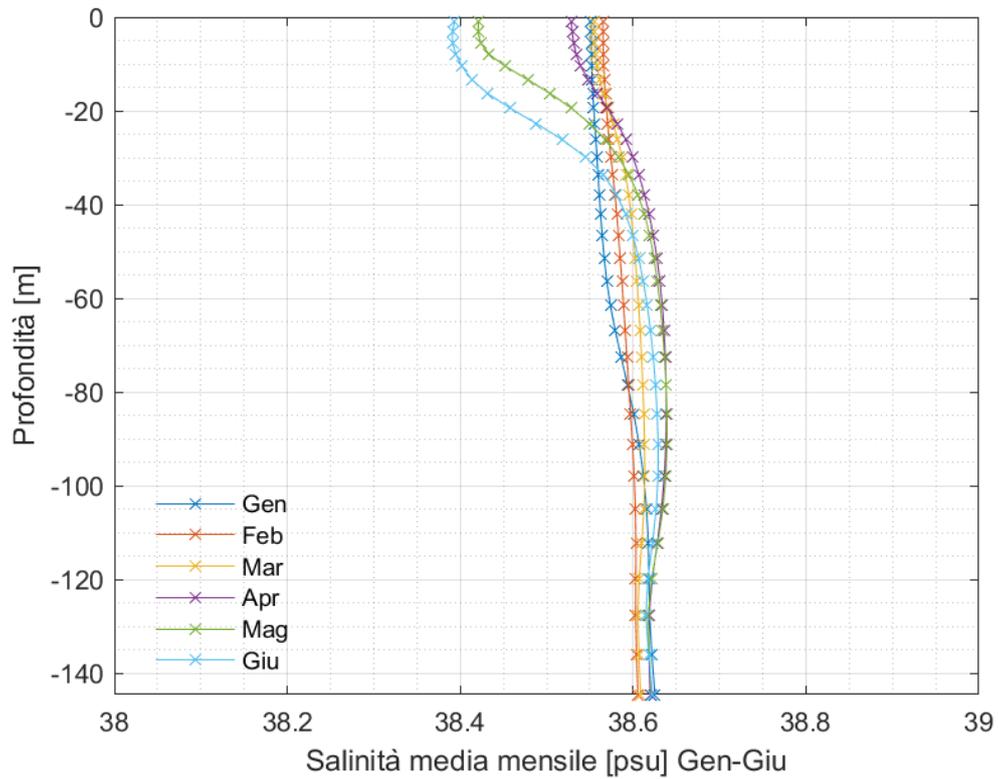


Figura 35 Statistiche mensili della salinità media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da gennaio a giugno

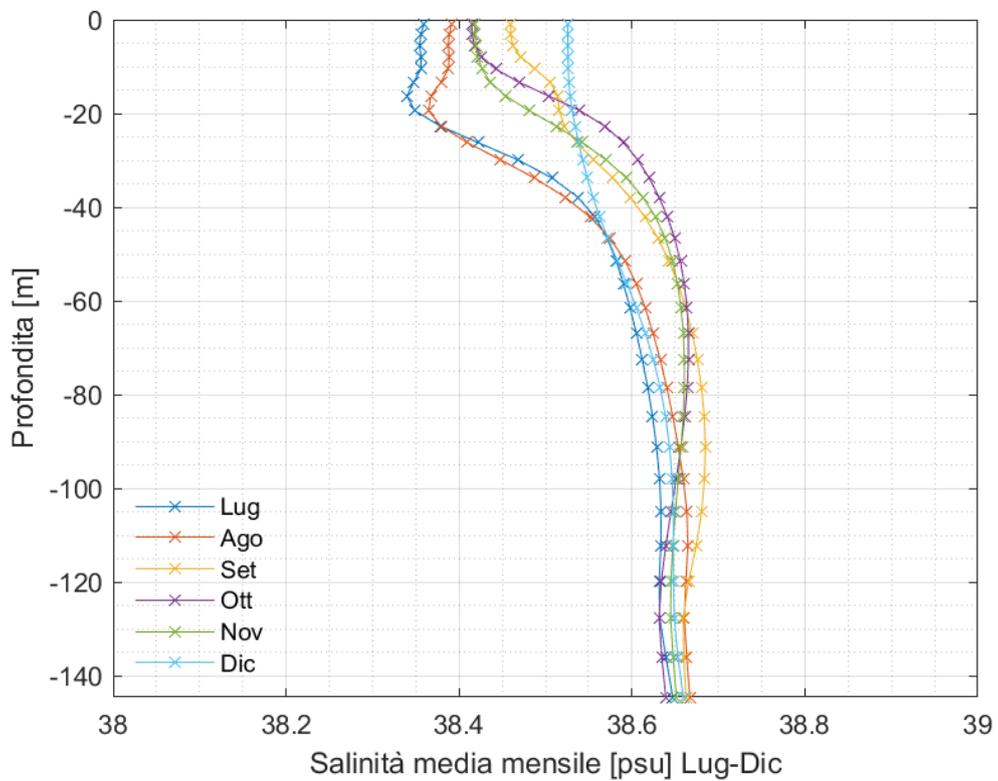


Figura 36 Statistiche mensili della salinità media, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, in funzione della profondità, da luglio a dicembre

4.6.3 Diagramma Temperatura-Salinità

Il diagramma T-S permette di identificare la presenza di determinate masse d'acqua, caratterizzate da specifiche combinazioni di queste due variabili, ed è rappresentato in Figura 37. Per facilitare ancor di più l'identificazione delle masse d'acqua, il colore di ogni punto è determinato in base alla profondità, nella colonna d'acqua, a cui quello specifico valore T-S si riferisce: dal blu che indica il fondale (i.e. -145 m s.l.m. circa) al giallo della superficie.

Come già osservato in precedenza, le differenze stagionali di salinità e temperatura si osservano soprattutto fino ad una profondità di circa -50 m s.l.m., mentre si riducono molto oltre questa profondità. Secondo (Artegiani *et al.*, 1997), come già menzionato, nell'Adriatico del sud l'afflusso di acque dolci dei fiumi abbassa la salinità al livello di superficie, mentre sul fondo questo andamento è molto più debole, modulato dalla massa d'acqua MLIW (*modified Levantine Intermediate Water*), che può essere definita da valori di salinità >38.6 psu e temperatura $>13.5^{\circ}\text{C}$, rappresentato da ellisse rosso in figura. Comunque, l'interazione con questa massa d'acqua è limitata, a causa della profondità relativamente bassa del sito considerato.

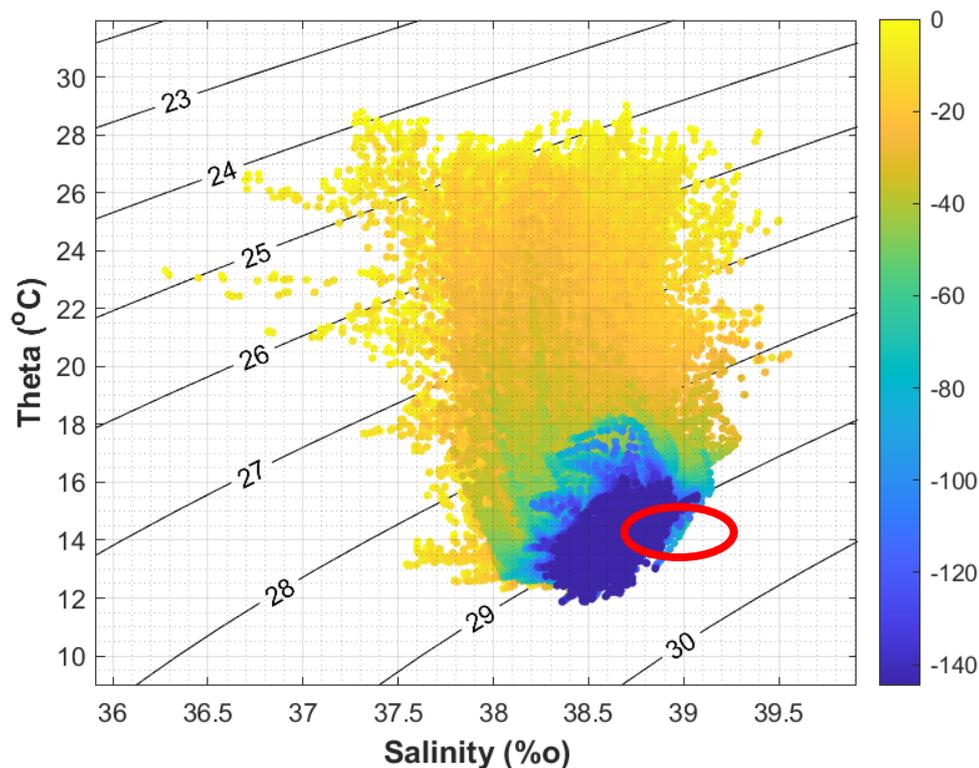


Figura 37 Diagramma T-S, basata su dati con discretizzazione temporale di 1 giorno, dal 01/01/1990 al 31/12/2019, di temperatura e salinità. Il colore si riferisce alla profondità, con scala a destra (da 0 m s.l.m. a circa -145 m s.l.m., corrispondente al fondo). L'ellisse rosso rappresenta la MLIW

5 CONDIZIONI METEOMARINE ESTREME

Si presentano in questo capitolo una serie di analisi volte a quantificare le condizioni meteomarine estreme, basate sulle serie temporali dei database *hindcast* presentate nel capitolo 2. I valori estremi calcolati sono per i periodi di ritorno (T_R) di 1, 10, 50 e 100 anni, e per sottoinsiemi direzionali (in aggiunta ai valori omnidirezionali), basati sugli stessi settori direzionali usati nei precedenti capitoli (intervalli di 30° , centrati in 0° , 30° , 60° , ..., 330°).

In termini di metodologia, si è proceduto come segue. Partendo dalle serie temporali della variabile meteomarina analizzata (omnidirezionale), si sono estratti gli n eventi estremi per anno (con n che varia da 1, i.e. 1 evento per anno, a 5) e si è individuata, tramite una analisi di sensibilità sui valori omnidirezionali e per un periodo di ritorno di 100 anni, la distribuzione di frequenza teorica e il numero di eventi all'anno che più si adattano al campione di n eventi estremi. Fatta questa scelta, si è poi applicata questa specifica distribuzione sui sottoinsiemi direzionali di eventi estremi, derivando i valori corrispondenti ad ogni periodo di ritorno T_R scelto, per ogni direzione.

La GEV (*Generalized Extreme Value distribution*) rappresenta, tramite un'unica distribuzione, i tre tipi di distribuzione (Fischer-Tippet, anche nota come Gumbel (*shape parameter* $k = 0$), Frechet ($k > 0$), e Weibull ($k < 0$)) usate per la derivazione dei valori estremi. Nonostante ciò, nelle analisi di sensibilità presentate sotto si è comunque fatto il confronto tra la GEV e la GEV forzata con $k=0$ (i.e. Gumbel, detta anche *Extreme Value*) e $k < 0$ (Weibull). Per la scelta degli eventi estremi si è adottata la tecnica di *block maxima*. Le distribuzioni sono state adattate ai dati disponibili con il metodo della massima verosimiglianza (*Maximum Likelihood Estimation, MLE*).

Tutti i valori estremi sono considerati per finestre temporali medie pari a 1 ora. Per la conversione in altre scale temporali, si applichi il metodo suggerito nello standard (IEC, 2019), sezione 6.4.3.1.

5.1 Vento

Le serie temporali considerate per l'estrazione degli eventi estremi sono le stesse considerate per le analisi delle condizioni meteomarine tipiche:

- Variabili: velocità del vento a 10m e 100m s.l.m., con relative direzioni
- Database: ERA5
- Coordinate di riferimento: 41.5 N, 17.0 E
- Periodo temporale coperto / discretizzazione: dal 01/01/1980 al 31/12/2021 / 1 ora

5.1.1 Studio di sensibilità

I risultati dello studio di sensibilità condotto sui valori estremi delle velocità del vento (omnidirezionali) a 10m e 100m s.l.m., per un periodo di ritorno T_R di 100 anni, sono presentati in Figura 38 e Figura 39, confrontando le probabilità dei valori estremi estratti dalla serie temporale considerata con le probabilità ottenute con le distribuzioni teoriche considerate, illustrati in Figura 40 (GEV), Figura 41 (Weibull) e Figura 42 (Gumbel). In base a questi risultati la distribuzione scelta è la seguente:

- Tipo di distribuzione: GEV
- Numero di eventi all'anno: 5

La bontà della corrispondenza tra la distribuzione scelta e i massimi estratti dalle serie temporali per le distribuzioni marginali, omnidirezionale e direzionali, è rappresentata in Figura 43, Figura 44, e Figura 45.

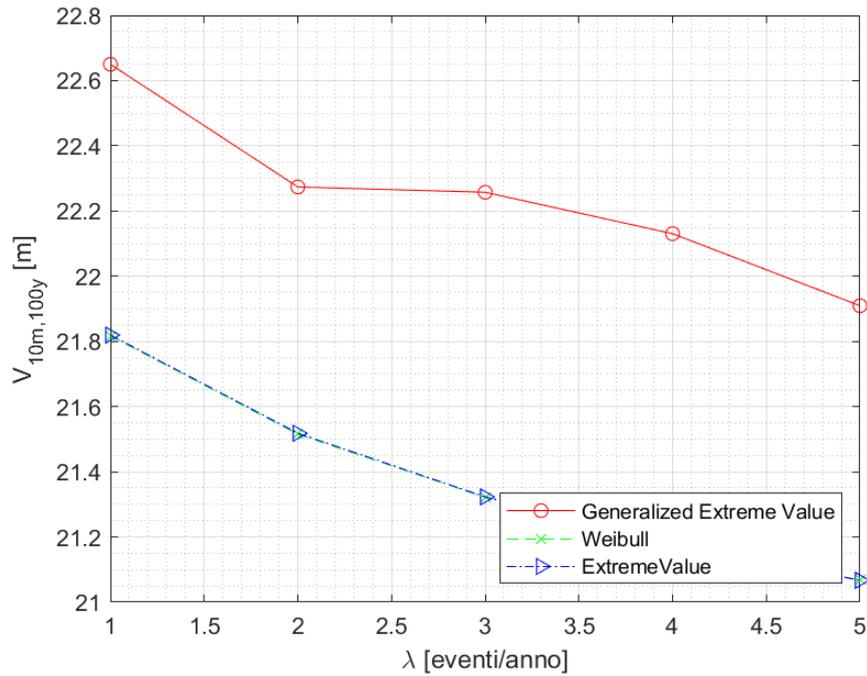


Figura 38 Velocità del vento (omnidirezionali) a 10m s.l.m., periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

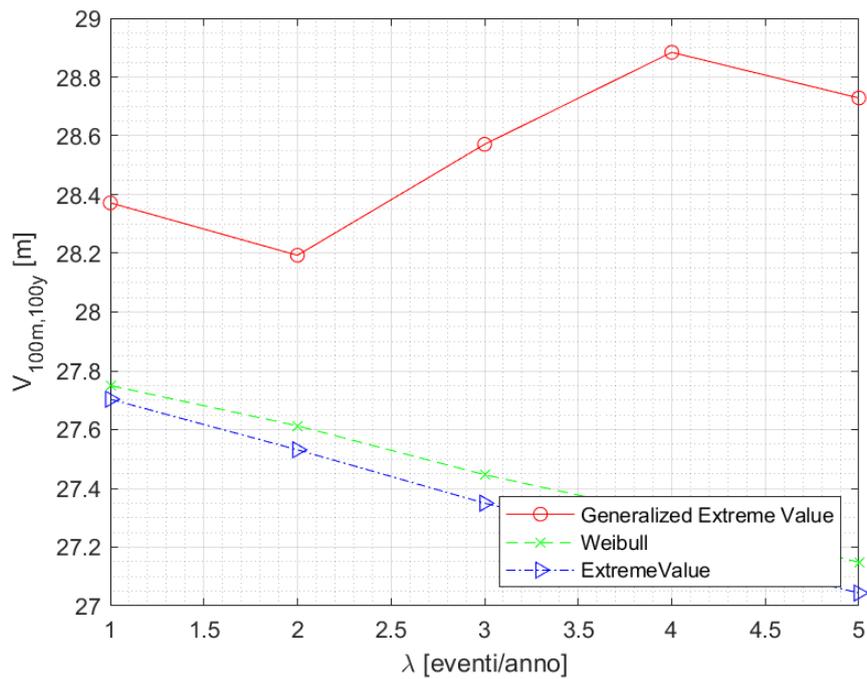


Figura 39 Velocità del vento (omnidirezionali) a 100m s.l.m., periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

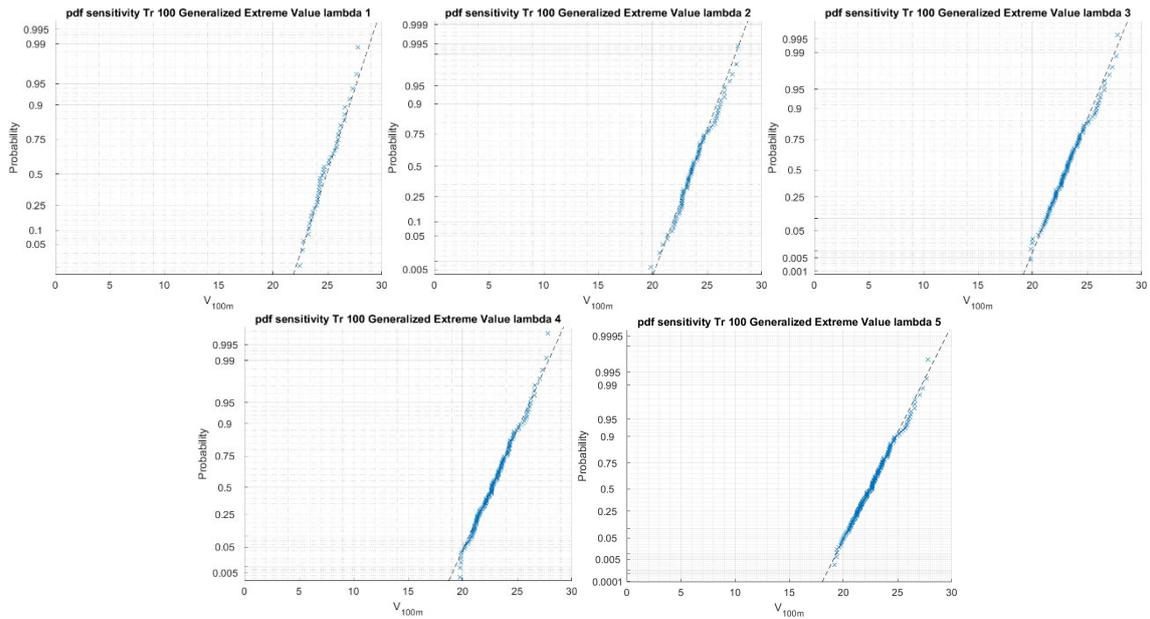


Figura 40 Probabilità V_{100m} estreme, funzione teorica **GEV** (linea tratteggiata) VS valori estratti da serie temporale (croci), da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

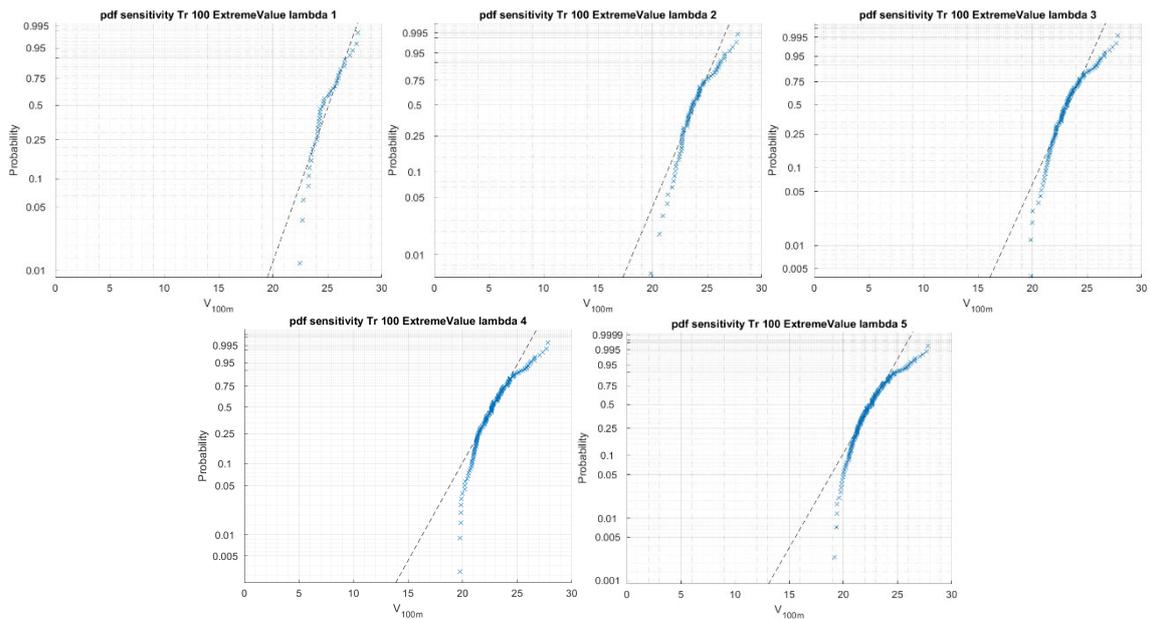


Figura 41 Probabilità V_{100m} estreme, funzione teorica **Extreme Value (Gumbel)** (linea tratteggiata) VS valori estratti da serie temporale (croci), da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

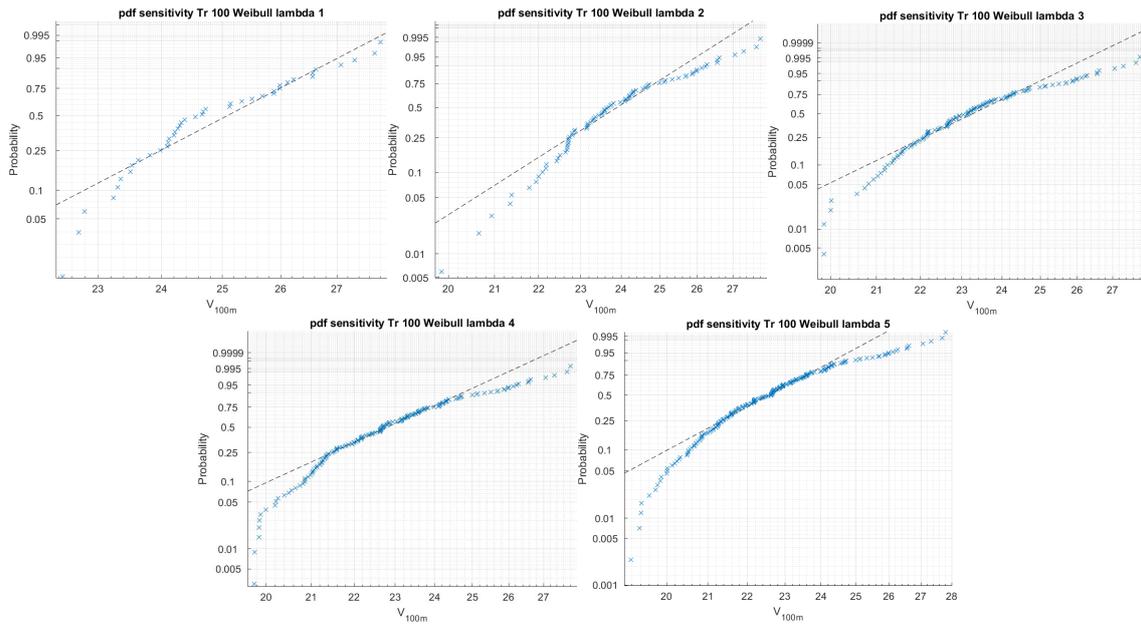


Figura 42 Probabilità V_{100m} estreme, funzione teorica **Weibull** (linea tratteggiata) VS valori estratti da serie temporale (croci), da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

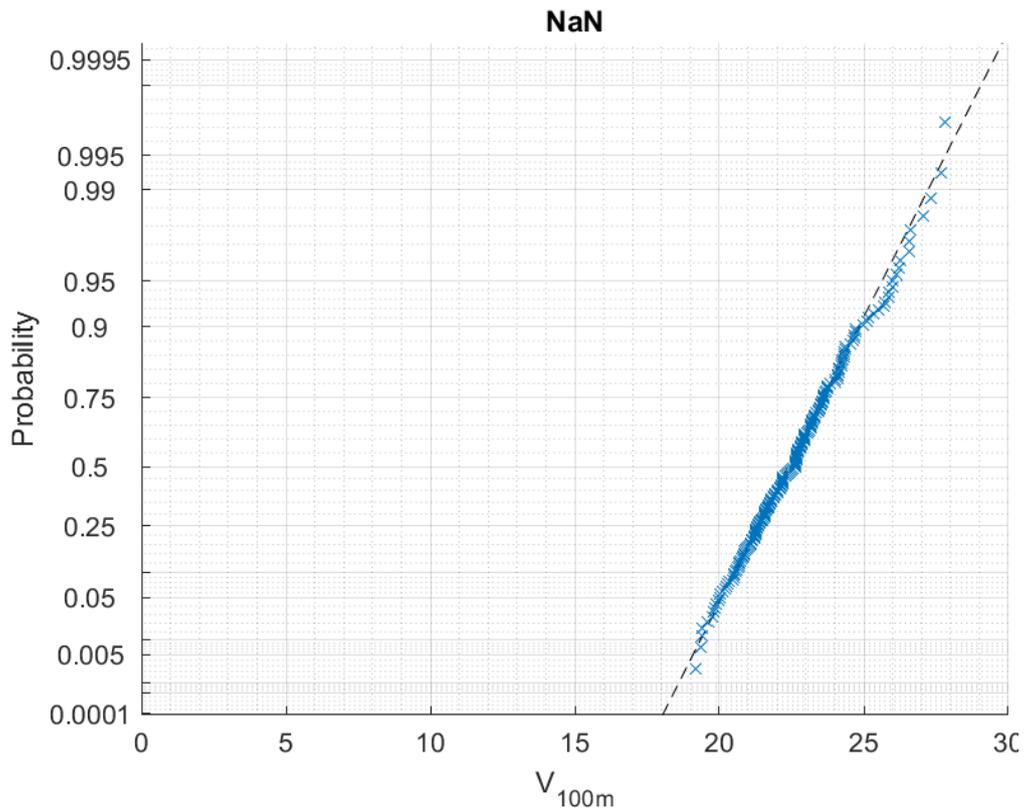


Figura 43 Probabilità V_{100m} estreme, distribuzione **omnidirezionale** teorica GEV, 5 eventi/anno (linea tratteggiata) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)

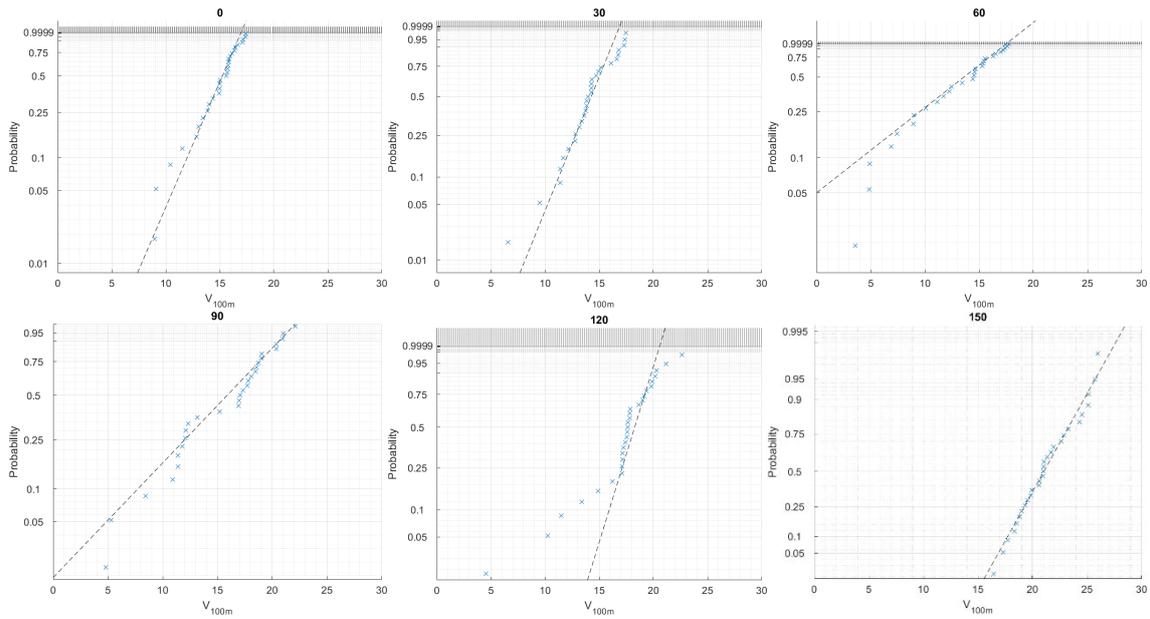


Figura 44 Probabilità V_{100m} estreme, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 5 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 0° a 150°

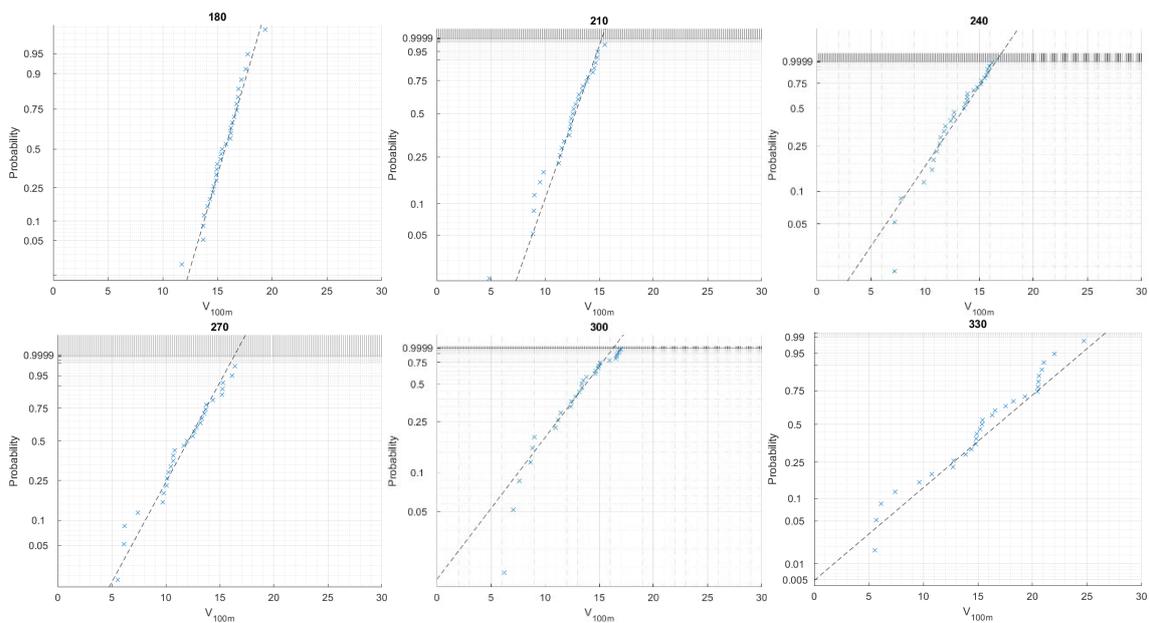


Figura 45 Probabilità V_{100m} estreme, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 5 eventi/anno (linea tratteggiata) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 180° a 330°

5.1.2 Valori estremi omnidirezionali e direzionali, per i vari periodi di ritorno

Le velocità estreme del vento derivate con il tipo di distribuzione scelta, i.e. GEV considerando 5 eventi/anno, omnidirezionale e direzionali marginali, sono riportate in Tabella 18 per $V_{10m,TR}$ e in Tabella 19 per $V_{100m,TR}$.

$V_{10m,TR}$		Periodo di ritorno T_R [y]			
		1	10	50	100
Direzione [°N]	OMNI	18.93	20.65	21.57	21.91
	0	14.72	15.20	15.24	15.25
	30	13.89	14.93	15.12	15.15
	60	14.13	14.86	14.91	14.91
	90	15.60	17.22	17.50	17.55
	120	16.15	17.57	17.85	17.91
	150	18.25	20.02	20.57	20.72
	180	13.17	14.39	14.78	14.88
	210	10.71	11.42	11.53	11.55
	240	12.40	13.00	13.06	13.07
	270	11.43	12.26	12.37	12.39
	300	13.83	14.43	14.47	14.48
	330	17.07	20.32	21.14	21.33

Tabella 18 Velocità del vento estrema a 10m s.l.m., omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme GEV, considerando 5 eventi all'anno

$V_{100m,TR}$		Periodo di ritorno T_R [y]			
		1	10	50	100
Direzione [°N]	OMNI	24.00	26.72	28.18	28.73
	0	16.69	17.36	17.43	17.44
	30	16.11	17.40	17.63	17.68
	60	16.69	17.65	17.72	17.73
	90	19.58	21.78	22.14	22.21
	120	20.21	22.24	22.65	22.73
	150	23.31	26.50	27.86	28.30
	180	16.97	18.79	19.50	19.72
	210	14.21	15.35	15.54	15.58
	240	15.22	16.09	16.18	16.20
	270	14.32	16.22	16.64	16.73
	300	16.09	16.89	16.95	16.96
	330	19.97	23.97	25.03	25.29

Tabella 19 Velocità del vento estrema a 100m s.l.m., omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme GEV, considerando 5 eventi all'anno

5.2 Onde

Le serie temporali considerate per l'estrazione degli eventi estremi sono le stesse considerate per le analisi delle condizioni meteomarine tipiche:

- Variabili: altezza significativa d'onda (H_s), periodi di picco dello spettro (T_p), periodi di zero-crossing (T_z)
- Database: ERA5
- Coordinate di riferimento: 41.5 N, 17.0 E

Scientific Engineering ltd • e-mail: info@scientific-engineering.co.uk

- Periodo temporale coperto / discretizzazione: dal 01/01/1980 al 31/12/2021 / 1 ora

5.2.1 Studio di sensibilità

I risultati dello studio di sensibilità condotto sui valori estremi dell'altezza d'onda significativa (omnidirezionali), per un periodo di ritorno T_R di 100 anni, sono presentati in Figura 46, confrontando le probabilità dei valori estremi estratti dalla serie temporale considerata con le probabilità ottenute con le distribuzioni teoriche considerate, illustrati in Figura 47 (GEV), Figura 48 (Weibull) e Figura 49 (Gumbel). In base a questi risultati la distribuzione scelta è la seguente:

- Tipo di distribuzione: Weibull
- Numero di eventi all'anno: 2

La bontà della corrispondenza tra la distribuzione scelta e i massimi estratti dalle serie temporali per le distribuzioni marginali, omnidirezionale e direzionali, è rappresentata in Figura 50, Figura 51 e Figura 52.

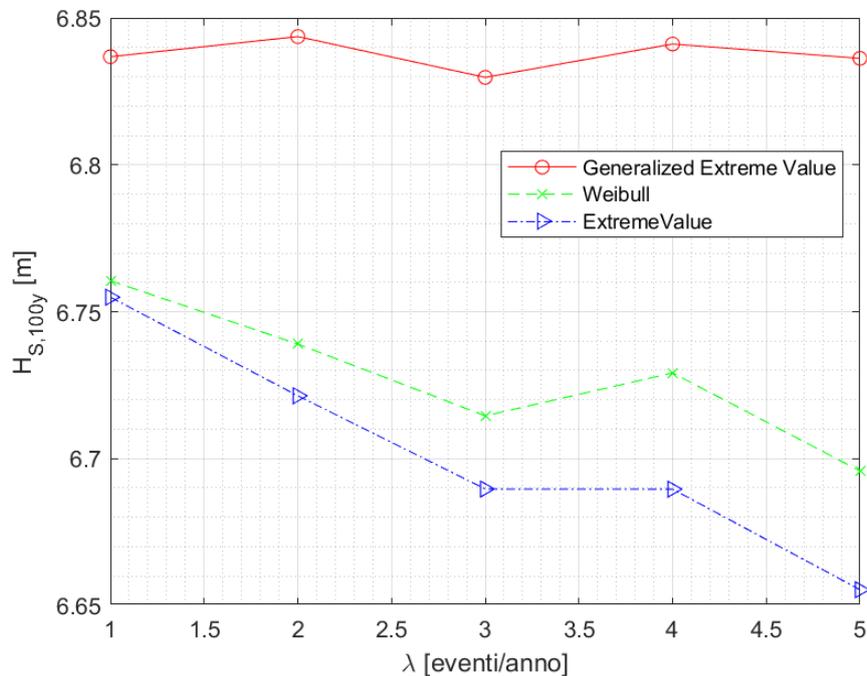


Figura 46 Altezza significativa d'onda estrema, periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

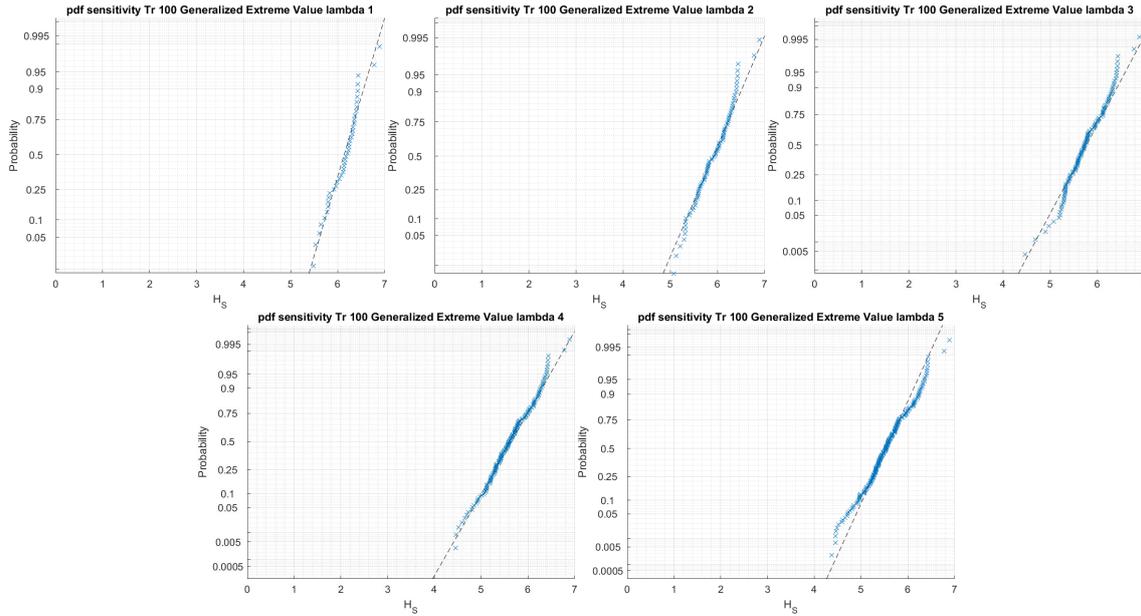


Figura 47 Probabilità H_s estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **GEV**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

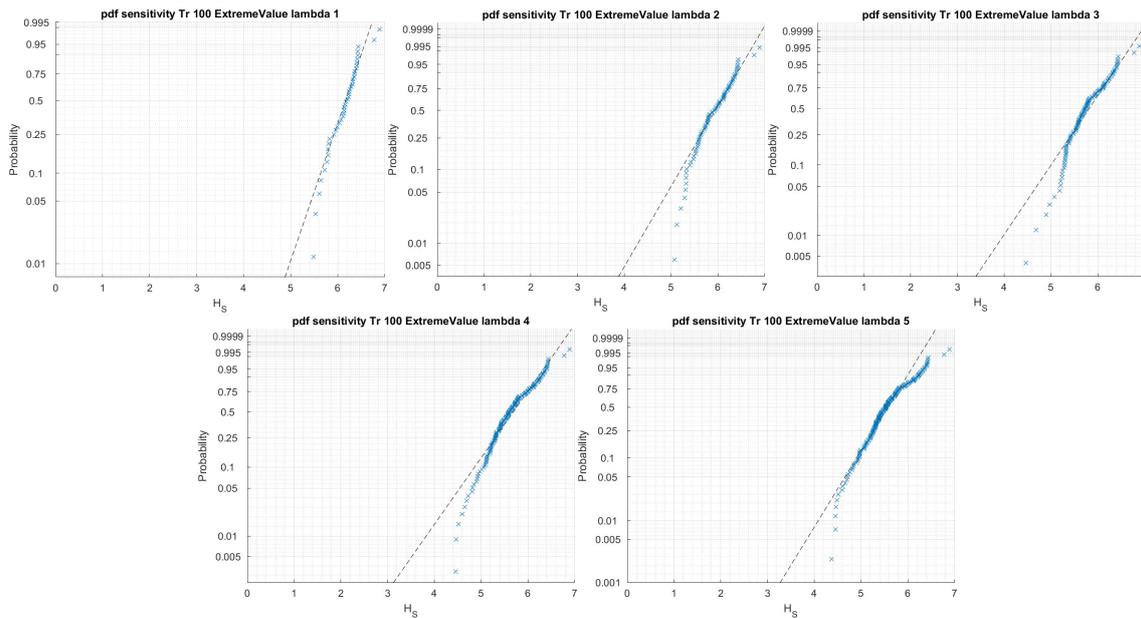


Figura 48 Probabilità H_s estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **Extreme Value (Gumbel)**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

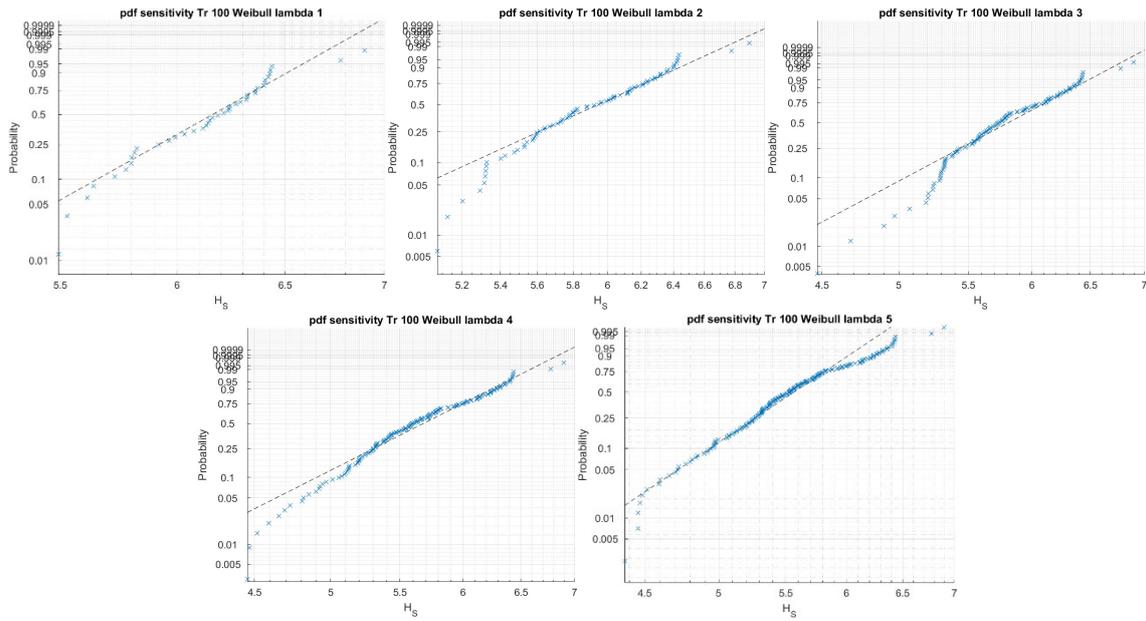


Figura 49 Probabilità H_s estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **Weibull**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1980 al 31/12/2021, discretizzazione 1 ora

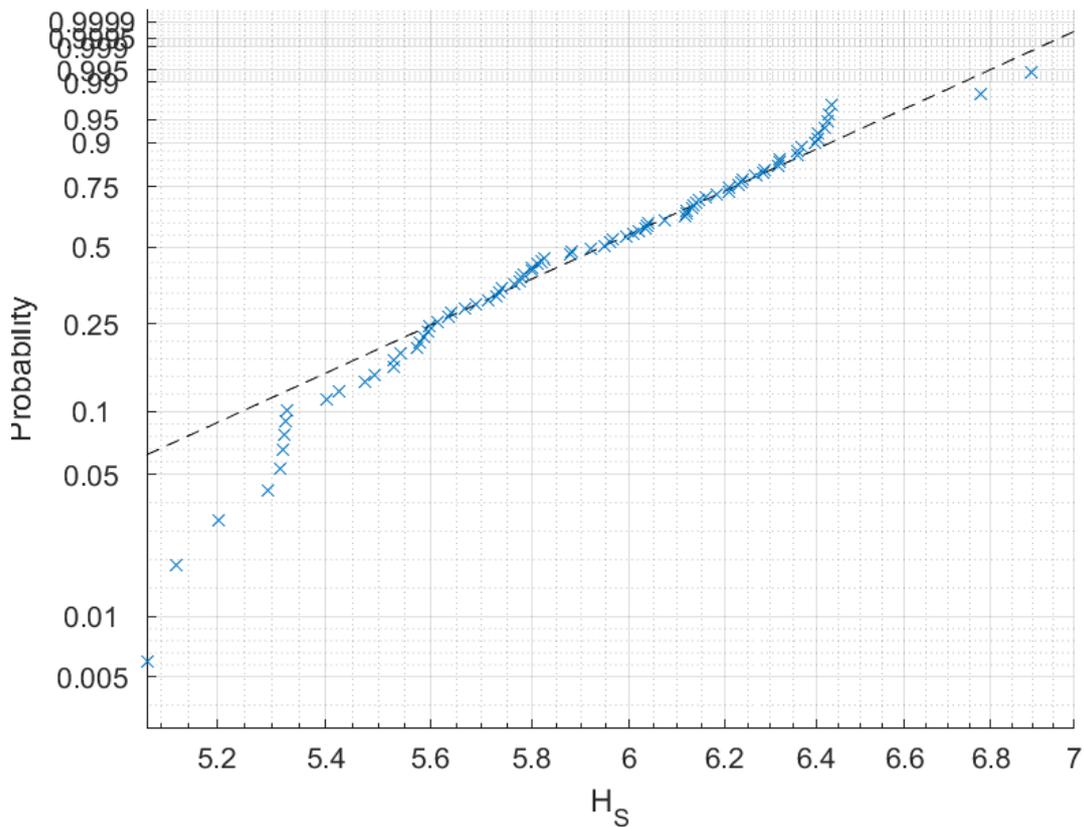


Figura 50 H_s estreme, distribuzione **omnidirezionale** teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)

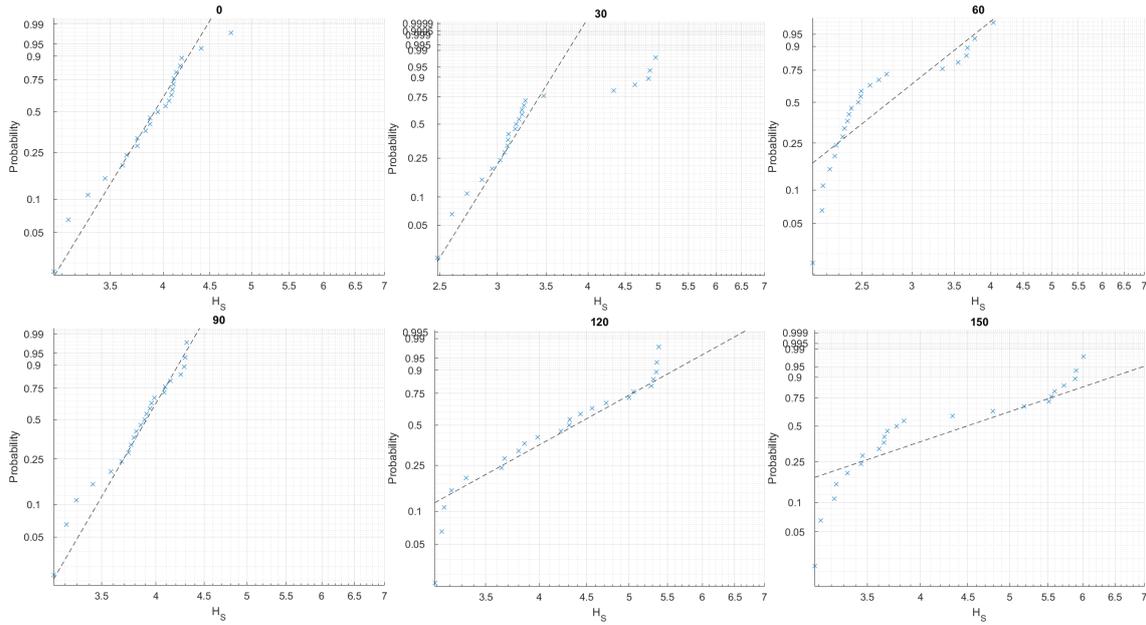


Figura 51 H_s estreme, distribuzione teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre), da 0° a 150°

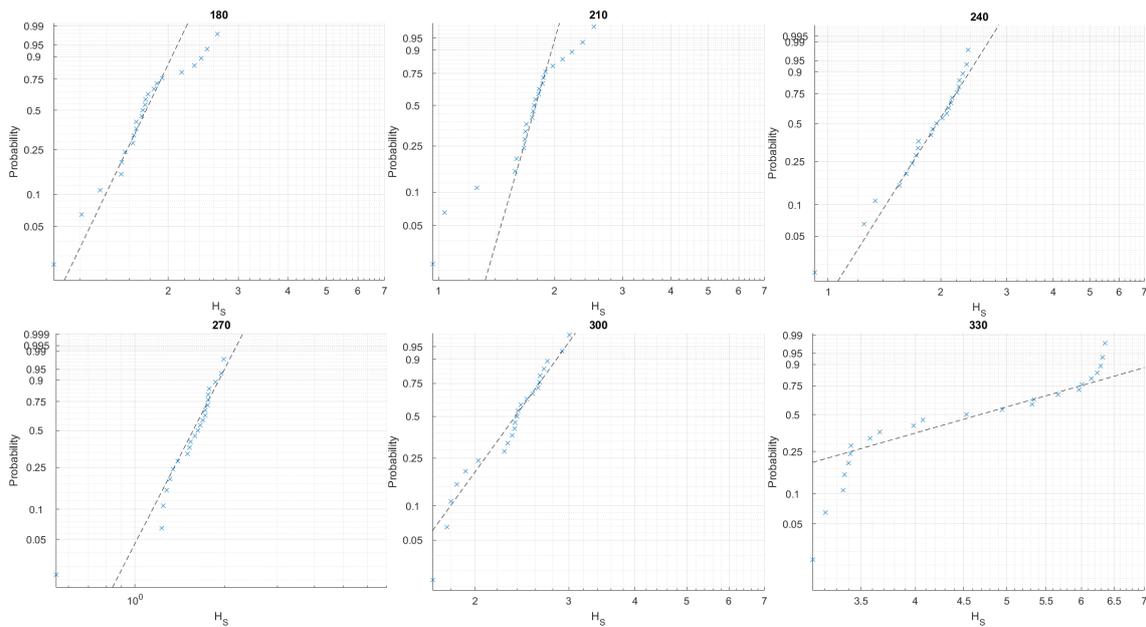


Figura 52 H_s estreme, distribuzione teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre), da 180° a 330°

5.2.2 Valori estremi omnidirezionali e direzionali $H_{s,TR}$, per i vari periodi di ritorno

Le altezze significative estreme ($H_{s,TR}$) derivate con distribuzione Weibull, considerando 2 eventi/anno, omnidirezionale e direzionali marginali, sono riportate in Tabella 20.

$H_{S,TR}$		Periodo di ritorno T_R [y]			
		1	10	50	100
Direzione [°N]	OMNI	5.96	6.51	6.68	6.74
	0	3.93	4.48	4.66	4.71
	30	3.45	4.72	5.17	5.33
	60	2.74	3.76	4.13	4.26
	90	3.89	4.31	4.44	4.49
	120	4.34	5.48	5.88	6.01
	150	4.38	6.06	6.66	6.87
	180	1.81	2.45	2.68	2.76
	210	1.79	2.32	2.51	2.57
	240	1.92	2.40	2.56	2.62
	270	1.58	1.96	2.09	2.13
	300	2.40	2.90	3.06	3.12
	330	4.74	6.62	7.31	7.54

Tabella 20 Altezze significative estreme, omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme Weibull, considerando 2 eventi all'anno

5.2.3 Valori estremi omnidirezionali e direzionali T_P associati a $H_{S,TR}$, per i vari periodi di ritorno

Nella sezione 4.2.2 si è ricavata una funzione che, data l'altezza significativa H_s , fornisce picco T_P , adattando una funzione di potenza con metodo ai minimi quadrati, con valori dei coefficienti corrispondenti ai quantili 5, 50, e 95%.

$T_{P,TR}$		Periodo di ritorno T_R [y]											
		1			10			50			100		
		5%	50%	95%	5%	50%	95%	5%	50%	95%	5%	50%	95%
Direzione [°N]	INI	9.85	9.87	9.88	10.16	10.18	10.20	10.25	10.27	10.29	10.28	10.30	10.32
	0	8.50	8.52	8.53	8.91	8.92	8.94	9.03	9.05	9.06	9.07	9.09	9.10
	30	8.12	8.14	8.15	9.07	9.09	9.10	9.37	9.39	9.40	9.47	9.49	9.50
	60	7.49	7.50	7.51	8.38	8.39	8.40	8.66	8.67	8.69	8.75	8.76	8.78
	90	8.48	8.49	8.50	8.79	8.80	8.82	8.88	8.90	8.91	8.91	8.93	8.94
	120	8.81	8.82	8.84	9.57	9.58	9.60	9.80	9.82	9.84	9.88	9.90	9.92
	150	8.84	8.85	8.87	9.91	9.92	9.94	10.24	10.26	10.28	10.36	10.38	10.40
	180	6.48	6.49	6.49	7.21	7.22	7.23	7.44	7.45	7.46	7.52	7.53	7.54
	210	6.45	6.46	6.46	7.07	7.08	7.09	7.26	7.27	7.28	7.33	7.34	7.35
	240	6.62	6.63	6.63	7.15	7.16	7.17	7.32	7.33	7.34	7.37	7.38	7.39
	270	6.17	6.18	6.19	6.66	6.67	6.68	6.81	6.82	6.83	6.86	6.87	6.88
	300	7.15	7.16	7.17	7.64	7.65	7.66	7.79	7.80	7.82	7.84	7.85	7.87
	330	9.09	9.10	9.12	10.22	10.24	10.26	10.58	10.60	10.62	10.70	10.72	10.74

Tabella 21 Intervalli del periodo di picco T_P associato alle altezze d'onda significative estreme, omnidirezionali e direzionali marginali, presentate in Tabella 20

5.2.4 Onda massima: altezza e periodo

Nel seguito sono presentate l'altezza e il periodo dell'onda massima associate agli stati di mare estremi presentati nelle sezioni precedenti. In particolare, per stimare l'altezza dell'onda massima si è fatto riferimento alla *recommended practice* di DNV (DNVGL, 2017), usando l'equazione:

$$H_{\max,TR} = 1.9 * H_{S,TR}$$

dove gli H_S sono gli $H_{S,TR}$ relativi agli eventi estremi presentati in Tabella 20. Le altezze d'onda massima derivate con questo approccio sono presentate in Tabella 22.

Per stimare il periodo d'onda associato all'onda massima, indicato con $T_{Hmax,TR}$, si è fatto riferimento alla stessa *recommended practices* di DNV (DNVGL, 2017) per stimare i limiti inferiori e superiori di $T_{Hmax,TR}$:

$$T_{Hmax,TR-lower} = 2.55\sqrt{H_{max,TR}}$$

$$T_{Hmax,TR-upper} = 3.32\sqrt{H_{max,TR}}$$

I risultati sono presentati in Tabella 23.

$H_{max,TR}$		Periodo di ritorno T_R [y]			
		1	10	50	100
Direzione [°N]	OMNI	11.32	12.37	12.70	12.80
	0	7.46	8.51	8.84	8.96
	30	6.55	8.96	9.82	10.12
	60	5.20	7.15	7.85	8.09
	90	7.39	8.19	8.44	8.52
	120	8.24	10.42	11.17	11.42
	150	8.32	11.51	12.66	13.06
	180	3.44	4.66	5.10	5.25
	210	3.39	4.41	4.76	4.88
	240	3.65	4.56	4.87	4.97
	270	3.00	3.72	3.97	4.05
	300	4.55	5.50	5.82	5.92
330	9.01	12.58	13.88	14.33	

Tabella 22 Altezze d'onda massime estreme (periodo di ritorno T_R), omnidirezionali e direzionali marginali ($H_{max,TR}$)

$T_{Hmax,TR}$		Periodo di ritorno T_R [y]							
		1		10		50		100	
		$T_{Hmax,TR}$ lower	$T_{Hmax,TR}$ upper	$T_{Hmax,TR}$ lower	$T_{Hmax,TR}$ upper	$T_{Hmax,TR}$ lower	$T_{Hmax,TR}$ upper	$T_{Hmax,TR}$ lower	$T_{Hmax,TR}$ upper
Direzione [°N]	OMNI	8.58	11.17	8.97	11.68	9.09	11.83	9.12	11.88
	0	6.96	9.07	7.44	9.68	7.58	9.87	7.63	9.94
	30	6.53	8.50	7.63	9.94	7.99	10.41	8.11	10.56
	60	5.82	7.57	6.82	8.88	7.14	9.30	7.25	9.44
	90	6.93	9.02	7.30	9.50	7.41	9.64	7.44	9.69
	120	7.32	9.53	8.23	10.72	8.52	11.09	8.62	11.22
	150	7.35	9.58	8.65	11.26	9.07	11.81	9.22	12.00
	180	4.73	6.16	5.51	7.17	5.76	7.50	5.84	7.61
	210	4.70	6.12	5.35	6.97	5.56	7.24	5.63	7.34
	240	4.87	6.35	5.44	7.09	5.63	7.32	5.69	7.40
	270	4.41	5.75	4.92	6.41	5.08	6.61	5.13	6.68
	300	5.44	7.08	5.98	7.79	6.15	8.01	6.21	8.08
330	7.65	9.97	9.05	11.78	9.50	12.37	9.65	12.57	

Tabella 23 Periodi d'onda associati a $H_{max,TR}$ ($T_{Hmax,TR}$): limite inferiore e superiore secondo (DNVGL, 2017)

5.3 Correnti

Le serie temporali considerate per l'estrazione degli eventi estremi sono le stesse considerate per le analisi delle condizioni meteomarine tipiche:

- Variabili: velocità della corrente (totale) in superficie, con relative direzioni
- Database: TPXO9.2 (componente mareale), ERA5 (componente stocastica)
- Coordinate di riferimento: 41.5625 N, 16.9167 E
- Periodo temporale coperto / discretizzazione: dal 01/01/1990 al 31/12/2019 / 1 ora

Si noti che queste analisi sono fatte solo per la componente totale della corrente.

5.3.1 Studio di sensibilità

I risultati dello studio di sensibilità condotto sui valori estremi delle velocità della corrente totale (omnidirezionali), per un periodo di ritorno T_R di 100 anni, sono presentati in Figura 53, confrontando le probabilità dei valori estremi estratti dalla serie temporale considerata con le probabilità ottenute con le distribuzioni teoriche considerate, illustrati in Figura 54 (GEV), Figura 55 (Weibull) e Figura 56 (Gumbel). In base a questi risultati la distribuzione scelta è la seguente:

- Tipo di distribuzione: GEV
- Numero di eventi all'anno: 2

La bontà della corrispondenza tra la distribuzione scelta e i massimi estratti dalle serie temporali per le distribuzioni marginali, omnidirezionale e direzionali, è rappresentata in Figura 43, Figura 44, e Figura 45).

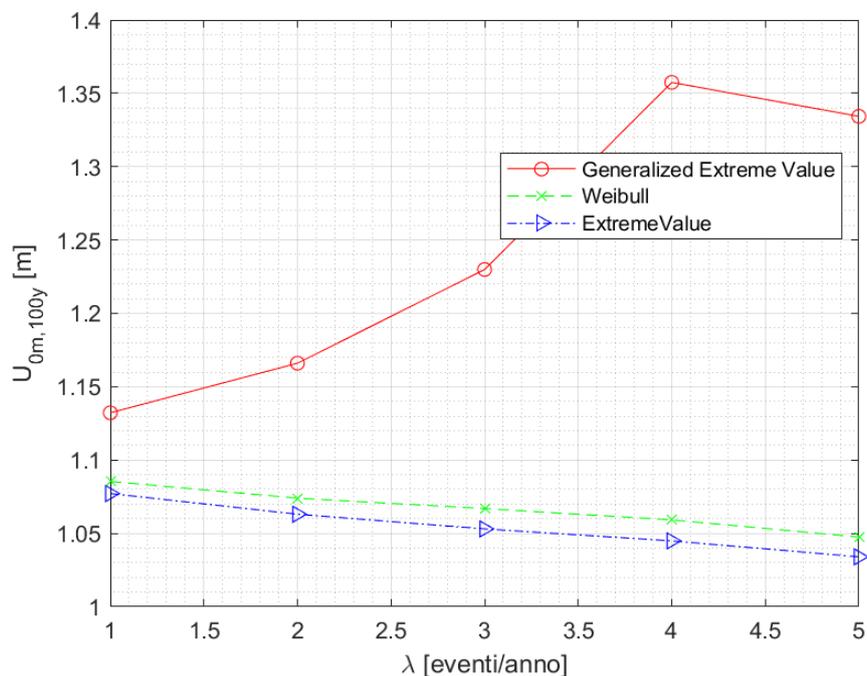


Figura 53 Velocità della corrente totale (omnidirezionale), periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

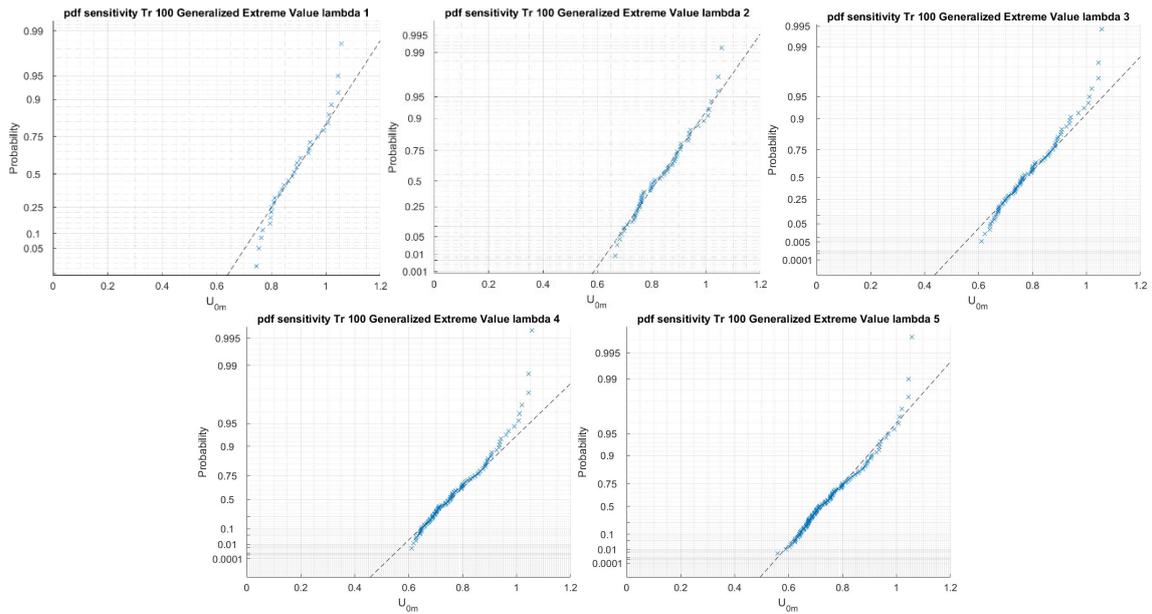


Figura 54 Probabilità U_{om} estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **GEV**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

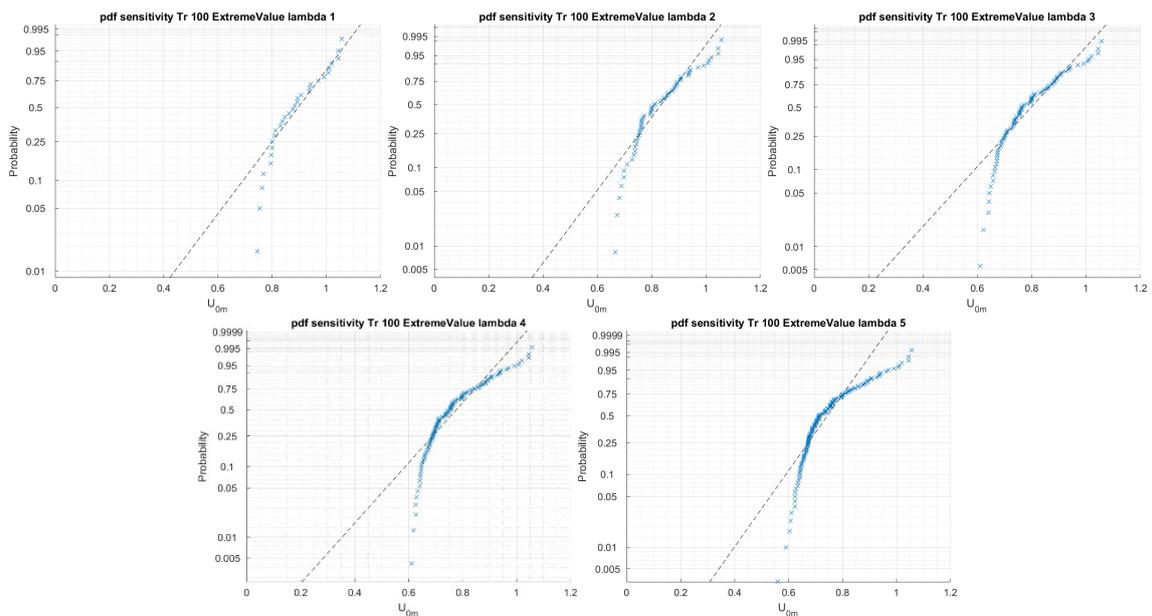


Figura 55 Probabilità U_{om} estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **Extreme value (Gumbel)**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

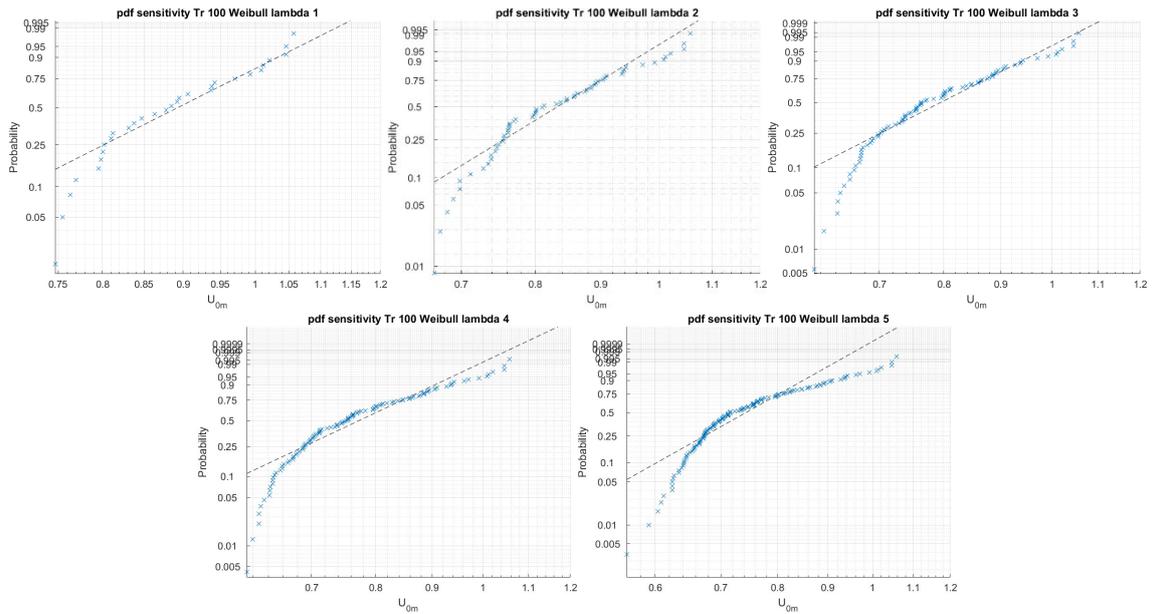


Figura 56 Probabilità U_{0m} estreme (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **Weibull**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

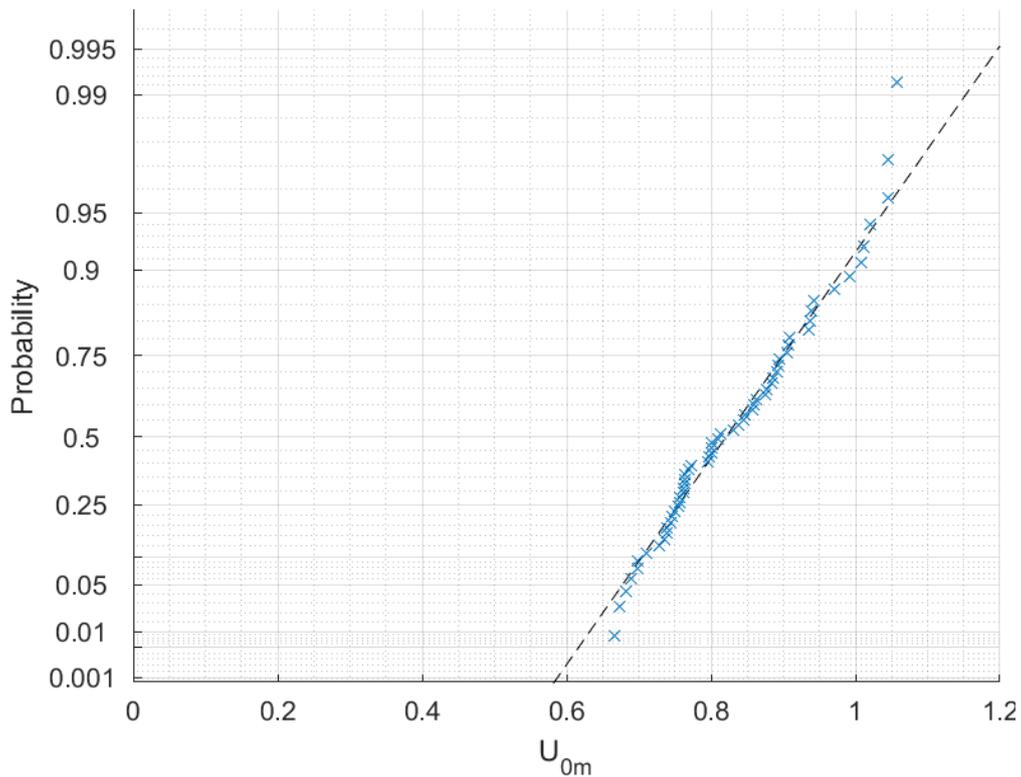


Figura 57 Velocità della corrente totale estrema, distribuzione **omnidirezionale** teorica GEV, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)

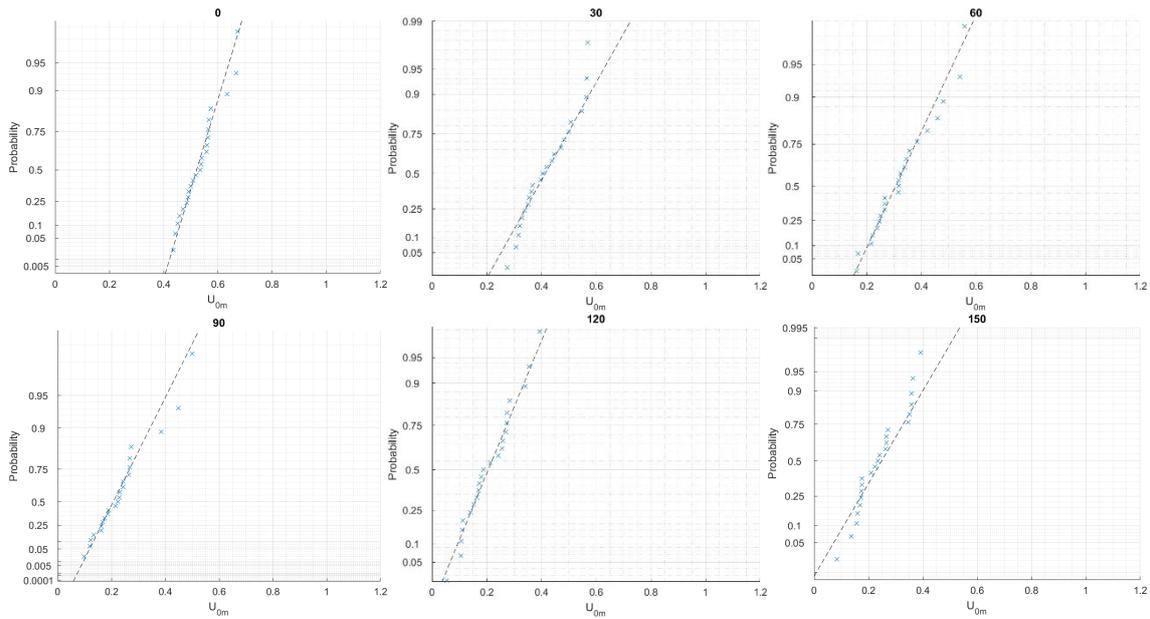


Figura 58 Velocità della corrente totale estrema, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 0° a 150°

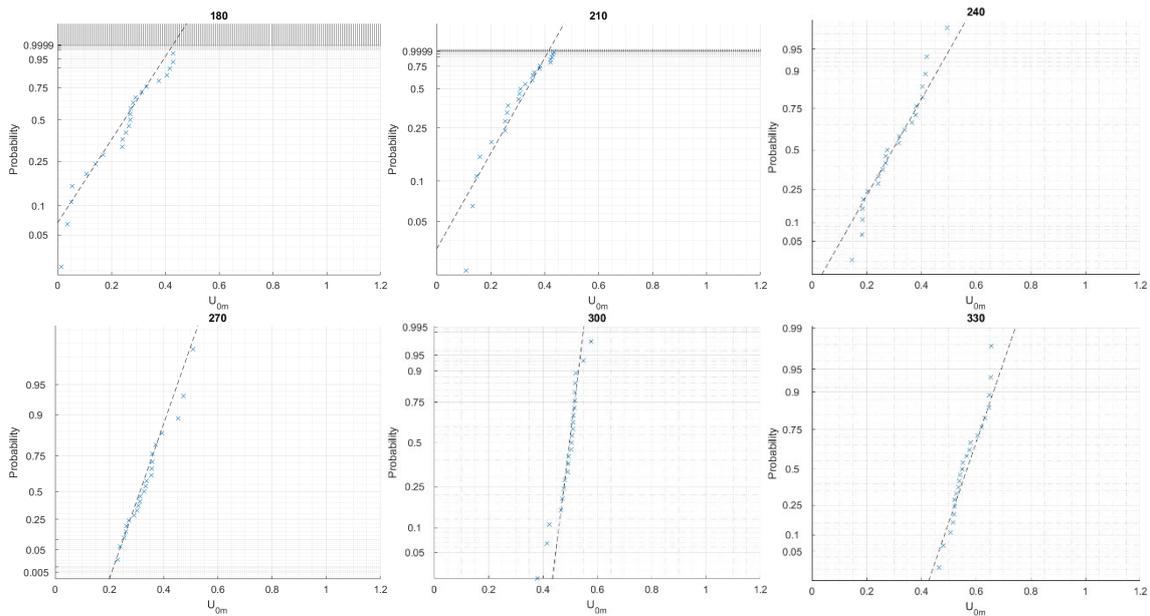


Figura 59 Velocità della corrente totale estrema, distribuzioni direzionali marginali teoriche GEV, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzioni estratte da serie temporale (croci azzurre), da 180° a 330°

5.3.2 Valori estremi omnidirezionali e direzionali, per i vari periodi di ritorno

Le velocità estreme della corrente (totale) derivate con il tipo di distribuzione scelta, i.e. GEV considerando 2 eventi/anno, omnidirezionale e direzionali marginali, sono riportate in Tabella 24.

$U_{0m,TR,tot}$		Periodo di ritorno T_R [y]			
		1	10	50	100
Direzione [°N]	OMNI	0.82	1.02	1.13	1.17
	0	0.52	0.65	0.72	0.75
	30	0.41	0.57	0.65	0.68
	60	0.31	0.52	0.65	0.70
	90	0.21	0.42	0.59	0.67
	120	0.20	0.36	0.42	0.44
	150	0.24	0.38	0.43	0.45
	180	0.27	0.42	0.44	0.44
	210	0.34	0.43	0.43	0.43
	240	0.30	0.45	0.51	0.53
	270	0.32	0.47	0.56	0.61
	300	0.50	0.56	0.58	0.58
	330	0.56	0.66	0.70	0.71

Tabella 24 Velocità della corrente (totale) estrema, omnidirezionale e direzionale marginale, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo delle distribuzioni direzionali marginali estreme GEV, considerando 2 eventi all'anno

5.4 Livello del mare

Le serie temporali considerate per l'estrazione degli eventi estremi sono le stesse considerate per le analisi delle condizioni meteomarine tipiche:

- Variabili: livello del mare
- Database: TPXO92 (componente mareale), MEDSEA (componente stocastica)
- Coordinate di riferimento: 41.5625 N, 16.9167 E
- Periodo temporale coperto / discretizzazione: dal 01/01/1990 al 31/12/2019 / 1 ora

Si noti che queste analisi sono fatte solo per la componente totale del livello del mare.

5.4.1 Studio di sensibilità

I risultati dello studio di sensibilità condotto sui valori estremi del livello del mare totale, per un periodo di ritorno T_R di 100 anni, sono presentati in Figura 60, confrontando le probabilità dei valori estremi estratti dalla serie temporale considerata con le probabilità ottenute con le distribuzioni teoriche considerate, illustrati in Figura 61 (GEV), Figura 62 (Weibull) e Figura 63 (Gumbel). In base a questi risultati la distribuzione scelta è la seguente:

- Tipo di distribuzione: Weibull
- Numero di eventi all'anno: 2

La bontà della corrispondenza tra la distribuzione scelta e i massimi estratti dalle serie temporali per le distribuzioni marginali, omnidirezionale e direzionali, è rappresentata in Figura 64.

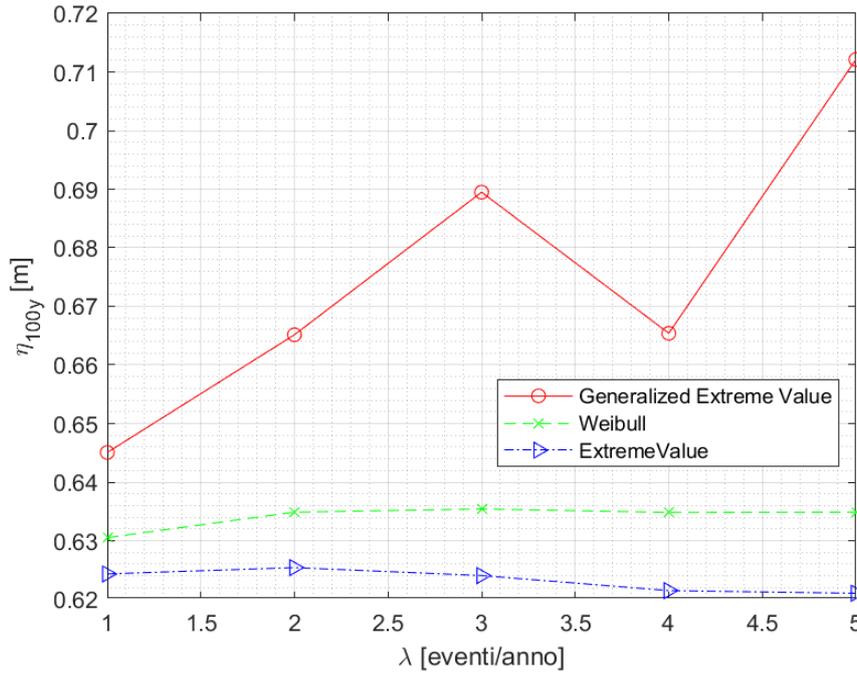


Figura 60 Livello del mare totale, periodo di ritorno di 100 anni: analisi di sensibilità variando tipo di distribuzione di frequenza e numero di eventi all'anno. Valori estremi estratti da serie dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

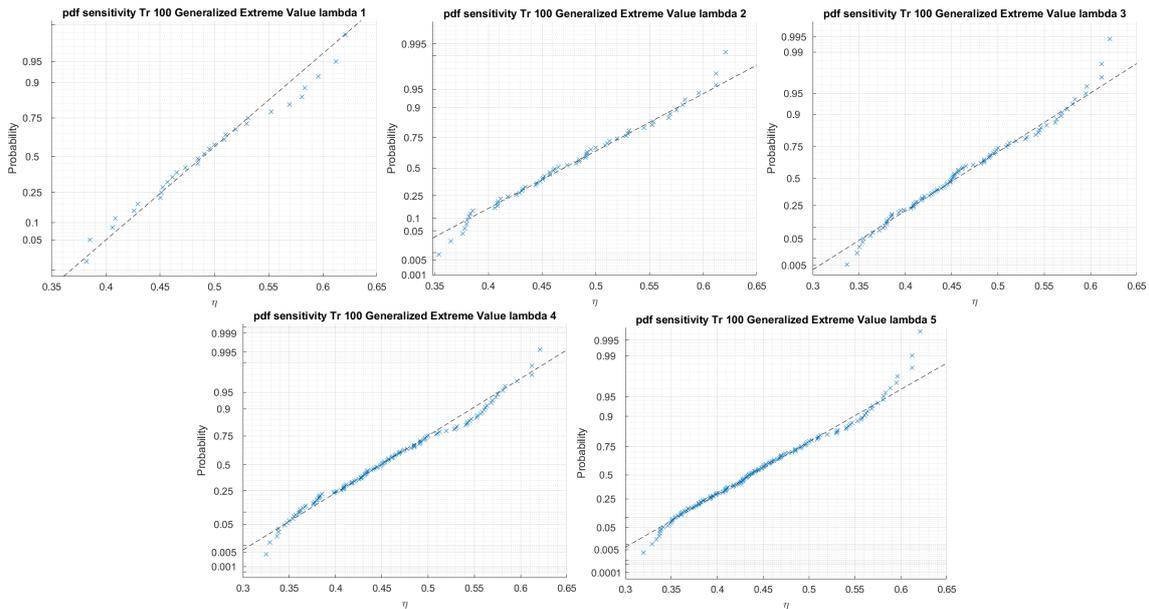


Figura 61 Probabilità η estremo (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica GEV, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

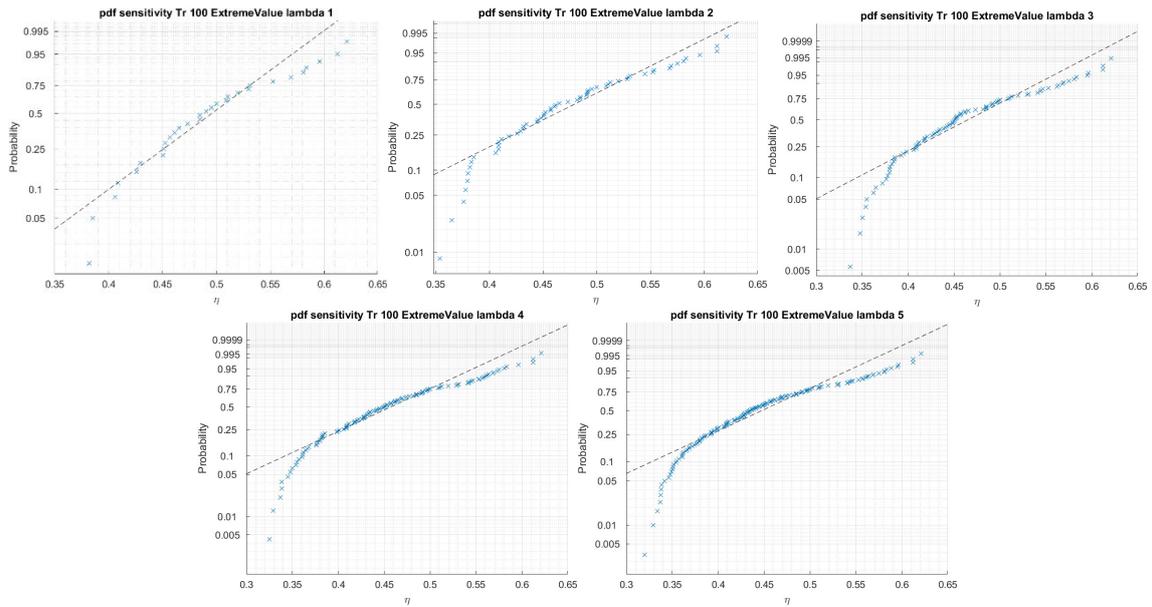


Figura 62 Probabilità η estremo (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **Extreme Value (Gumbel)**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

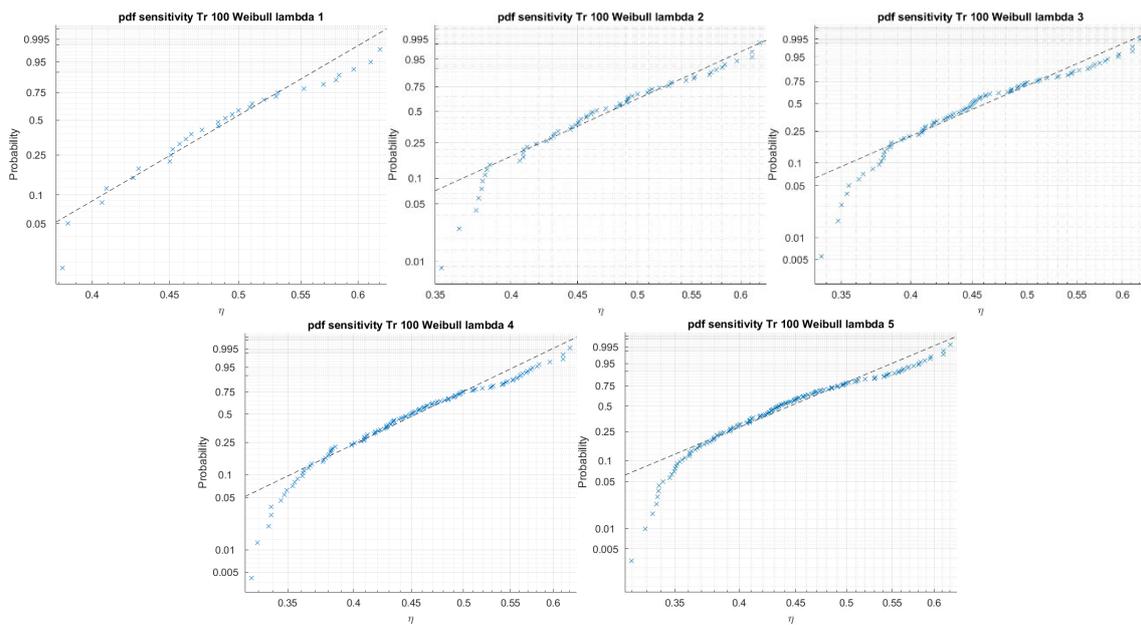


Figura 63 Probabilità η estremo (omnidirezionale) da serie temporale VS distribuzione teorica **Weibull**, da 1 a 5 eventi/anno (lambda). Valori estremi estratti da serie temporale dal 01/01/1990 al 31/12/2019, discretizzazione 1 ora

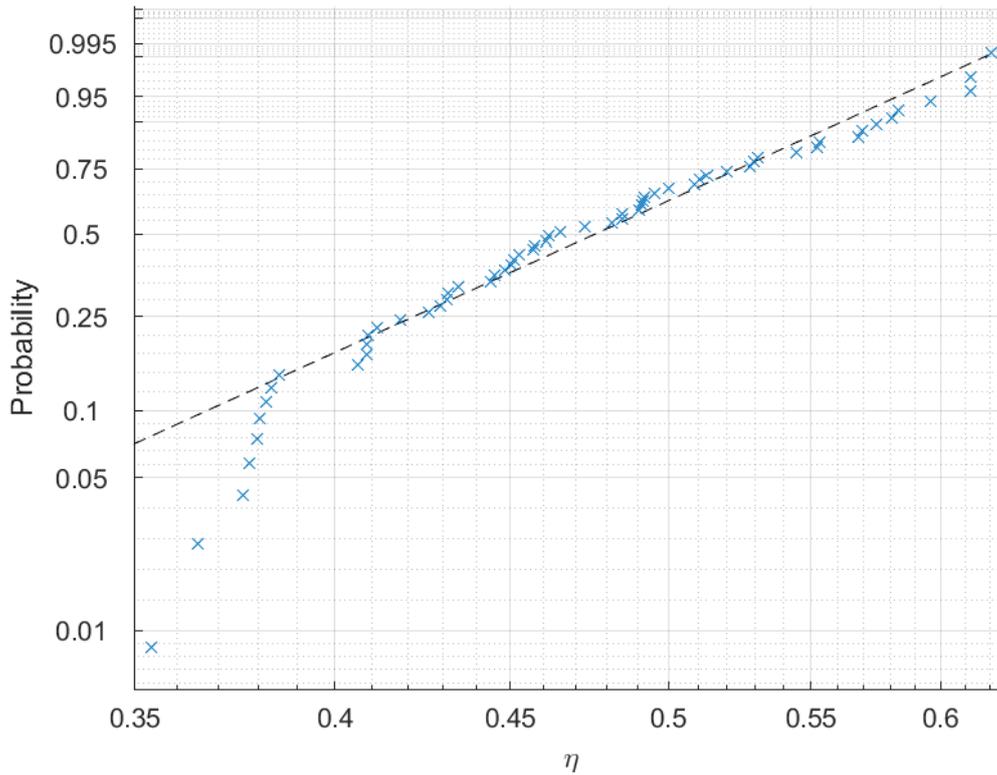


Figura 64 Livello del mare totale estremo, distribuzione teorica Weibull, 2 eventi/anno (linea arancione) VS distribuzione estratta da serie temporale (croci azzurre)

5.4.2 Valori estremi per i vari periodi di ritorno

I livelli del mare (totale) estremi derivate con il tipo di distribuzione scelta, i.e. Weibull considerando 2 eventi/anno sono riportati in Tabella 25.

$\eta_{TR,tot}$	Periodo di ritorno T_R [y]			
	1	10	50	100
	0.48	0.59	0.62	0.63

Tabella 25 Livelli del mare (totale) estremi, con finestra media di 1h, per i periodi di ritorno di 1,10,50,100 anni, secondo la distribuzione Weibull, considerando 2 eventi all'anno

6 CONCLUSIONI

La presente relazione tecnica definisce le condizioni meteomarine di progetto, tipiche ed estreme, per il Parco eolico offshore nel mare Adriatico meridionale (Bari), situato nel mare Adriatico del sud.

Per i parametri relativi al vento e alle onde si è utilizzato il database di dati di rianalisi (*hindcast*) ERA5, considerando il periodo da 01/01/1980 al 31/12/2021. Per le correnti marine, così come per il livello del mare, si sono considerate separatamente la componente deterministica (di origine mareale), basata sui dati estratti dal database TPXO9.2, e la componente stocastica, basata sui dati del database MEDSEA, entrambi per il periodo temporale da 01/01/1990 al 31/12/2019. Per i parametri relativi alla salinità e alla temperatura del mare, in funzione della profondità, si è utilizzato il database MEDSEA, per il periodo da 01/01/1990 al 31/12/2019. Le caratteristiche principali di questi database sono fornite nella sezione 3, insieme alle considerazioni sul buon funzionamento dei modelli utilizzati da questi database e, dove necessario, illustrando il processo di calibrazione utilizzato. Come mostrato in Figura 5 a pag. 17, per tutti questi database si è riusciti ad estrarre le relative informazioni in un punto all'interno dell'area di mare interessata dal parco eolico previsto.

I risultati presentati, relativi alle condizioni tipiche ed estreme, sono considerati rappresentativi delle condizioni meteomarine previste nel luogo considerato, e applicabili per il FEED.

6.1 Suggerimenti per future attività

Per il sito in esame non sono state fornite delle misurazioni locali, per cui i dati presentati in questo report sono basati su modelli *hindcast*, riconosciuti a livello internazionale, revisionati dalla comunità scientifica, e dove possibile calibrati tramite le misurazioni da satellite disponibili (si consulti la sezione 3 per ulteriori dettagli). Tuttavia, le analisi condotte e i risultati ottenuti possono essere ulteriormente raffinate mettendole a confronto con delle misurazioni effettuate a livello locale. Pertanto, si consiglia di reiterare le analisi effettuate e presentate in questo report una volta che tali misurazioni effettuate a livello locale siano disponibili.

BIBLIOGRAFIA

- Artegiani, A. *et al.* (1997) 'The adriatic sea general circulation. Part I: Air-sea interactions and water mass structure', *Journal of Physical Oceanography*, 27(8), pp. 1492–1514. doi: 10.1175/1520-0485(1997)027<1492:TASGCP>2.0.CO;2.
- Bertotti, L. and Cavaleri, L. (2009) 'Wind and wave predictions in the Adriatic Sea', *Journal of Marine Systems*, 78, pp. S227–S234. doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.01.018.
- Bleck, R. and Benjamin, S. G. (1993) 'Regional Weather Prediction with a Model Combining Terrain-following and Isentropic Coordinates. Part I: Model Description', *Monthly Weather Review*, 121(6), pp. 1770–1785. doi: 10.1175/1520-0493(1993)121<1770:RWPWAM>2.0.CO;2.
- Bleck, R. and Boudra, D. B. (1981) 'Initial Testing of a Numerical Ocean Circulation Model Using a Hybrid (Quasi-Isopycnic) Vertical Coordinate', *Journal of Physical Oceanography*, 11(6), pp. 755–770. doi: 10.1175/1520-0485(1981)011<0755:ITOANO>2.0.CO;2.
- Cavaleri, L. and Sclavo, M. (2006) 'The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea', *Coastal Engineering*, 53(7), pp. 613–627. doi: 10.1016/j.coastaleng.2005.12.006.
- CMEMS (2022a) 'Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model'. doi: 10.48670/moi-00305.
- CMEMS (2022b) 'GLOBAL OCEAN L4 SIGNIFICANT WAVE HEIGHT FROM REPROCESSED SATELLITE MEASUREMENTS'. doi: 10.48670/moi-00179.
- DNVGL (2017) 'DNVGL-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads'. DNV GL AS.
- Drudi, M., Grandi, A. and Clementi, E. (2019) *For Mediterranean Sea Physical Reanalysis Product*.
- Egbert, G. D., Bennett, A. F. and Foreman, M. G. G. (1994) 'TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model', *Journal of Geophysical Research*, 99(C12), p. 24821. doi: 10.1029/94JC01894.
- Egbert, G. D. and Erofeeva, S. Y. (2002) 'Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), pp. 183–204. doi: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2.
- Escudier, R. *et al.* (2021) 'Mediterranean Sea Production Centre MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004'. Available at: https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1.
- Faganeli, J. *et al.* (1989) 'Pelagic organic matter in the Adriatic Sea in relation to winter hydrographic conditions', *Journal of plankton research*, 11(6), pp. 1129–1141.
- Giesen, R., Stoffelen, A. and Verhoef, A. (2022) *Product User Manual For Global Ocean Hourly Sea Surface Wind and Stress from Scatterometer and Model Products WIND_GLO_PHY_L4_NRT_012_004*.
- IEC (2019) *IEC 61400-3-1:2019 Wind energy generation systems Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines*.
- Katalinić, M., Ćorak, M. and Parunov, J. (2014) 'Analysis of wave heights and wind speeds in the Adriatic Sea', in *Maritime Technology and Engineering*. 1st editio. CRC Press, p. 6. doi: 9780429226663.
- Large, W. G. *et al.* (1997) 'Sensitivity to Surface Forcing and Boundary Layer Mixing in a Global Ocean Model: Annual-Mean Climatology', *Journal of Physical Oceanography*, 27(11), pp. 2418–2447. doi: 10.1175/1520-0485(1997)027<2418:STSFAB>2.0.CO;2.
- Large, W. G., McWilliams, J. C. and Doney, S. C. (1994) 'Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization', *Reviews of Geophysics*, 32(4), p. 363. doi:

10.1029/94RG01872.

Mosetti, F. (1984) 'Caratteristiche fondamentali dell'idrologia dell'Adriatico', *Bollettino di oceanologia teorica e applicata*, 11(2), pp. 169–194.

Orlic, M., Gacic, M. and La Violette, P. E. (1992) 'The currents and circulation of the adriatic sea', *Oceanologica Acta*, 15(2), pp. 109–124. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00100/21145/>.

van Ormondt, M., Nederhoff, K. and van Dongeren, A. (2020) 'Delft Dashboard: a quick set-up tool for hydrodynamic models', *Journal of Hydroinformatics*, 22(3), pp. 510–527. doi: 10.2166/hydro.2020.092.

Ovchinnikov, I. M. *et al.* (1985) 'Formation of deep Eastern Mediterranean waters in the Adriatic Sea', *Oceanology*, 25(6), pp. 704–707.

Roether, W. and Schlitzer, R. (1991) 'Eastern Mediterranean deep water renewal on the basis of chlorofluoromethane and tritium data', *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 15(3–5), pp. 333–354.

Simon, B. (2013) *Coastal Tides*. Institut océanographique.

Stephenson, A. G. (2016) 'Harmonic analysis of tides', pp. 1–17. Available at: <https://cran.r-project.org/package=TideHarmonics>.

Zore-Armanda, M. (1969) 'Water exchange between the Adriatic and the eastern Mediterranean', *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 16(2), pp. 171–178.

Zore, M. (1956) 'On gradient currents in the Adriatic Sea', *Acta adriat.*, 8(6), pp. 1–38.