Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo

Regione Liguria

# Comune di S.Margherita Ligure (GE)



## OPERE MARITTIME - RIPRISTINO E RINFORZO MOLO DI SOPRAFLUTTO A DIFESA DELL'ABITATO DI SANTA MARGHERITA LIGURE

CIG 77501856FB

## PROGETTO DEFINITIVO

Responsabile del procedimento

Dott. Ing. Pietro Feriani

Progettazione

ACQUA TECNO

Dott. Ing. Paolo Turbole

Titolo elaborato

STUDIO METEOMARINO

Elaborato

A.2255 | PD | | EG

**PD.SM**

Scala

Data

Febbraio 2019

| Revisione | Data | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



# Sommario

1. INTRODUZIONE ..... 4
2. REPERIMENTO ED ELABORAZIONE DEI DATI ..... 7
2.1. Disponibilità dei dati ondosi ..... 7
2.2. Dati ondosi utilizzati nel progetto ..... 9
2.3. Caratterizzazione del clima ondoso all'interno del golfo del Tigullio ..... 10
3. ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI ..... 18
3.1. Calcolo del periodo di ritorno ..... 18
3.2. Selezione delle mareggiate omogenee e indipendenti ..... 20
3.3. Individuazione del modello probabilistico più idoneo ..... 23
3.3.1. Distribuzione di Gauss o Normale ..... 24
3.3.2. Distribuzione Log-Normale ..... 25
3.3.3. Distribuzione di Gumbel ..... 26
3.3.4. Distribuzione di Frechet ..... 28
3.3.5. "Test grafico" ..... 29
3.3.6. Test statistico di Kolmogorov – Smirnov ..... 31
3.4. Stima dell'altezza d'onda significativa di progetto ..... 32
4. CONCLUSIONI ..... 34

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



# Indice delle figure

**Figura 1.** Vista planimetrica del Porto di santa Margherita Ligure nella configurazione di stato attuale – immagine presa da Google Earth. ..... 4
**Figura 2.** Vista della diga di sopraflutto del Porto di Santa Margherita Ligure dopo il collasso provocato dalla mareggiata del 29/10/2018. ..... 5
**Figura 3.** Alcuni danni riportati dalla diga a seguito della mareggiata del 29/10/2018. ..... 6
**Figura 4.** Inquadramento geografico del paraggio di Santa Margherita Ligure (GE). ..... 7
**Figura 5.** Griglia computazionale del Mar Mediterraneo caratterizzata da una risoluzione di circa 10 km, elaborata dal DICCA (Dipartimento di Ingengneria Civile, Chimica e Ambientale) dell'Università di Genova. ..... 8
**Figura 6.** Indicazione del punto P1 interno al Golfo del Tigullio e del punto P2, scelti per l'estrazione dei dati ondosi e meteorologici. ..... 10
**Figura 7.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata di eventi ondosi, divisi per classi di altezza d'onda significativa e settori direzionali di provenineza aventi ampiezza pari a 10°. ..... 12
**Figura 8.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata delle percentuali di occorrenza degli eventi ondosi, divisi per settori direzionali di 10° e classi di altezza significativa. ..... 13
**Figura 9.** Diagramma di distribuzione percentuale delle frequenze di occorrenza degli eventi ondosi suddivisi in classi di altezza d'onda significativa, per settori direzionali di ampiezza pari a 30°. ..... 14
**Figura 10.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata di eventi ondosi, divisi per classi di periodo di picco e settori direzionali di provenineza aventi ampiezza pari a 10°. ..... 15
**Figura 11.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata delle percentuali di occorrenza degli eventi ondosi, divisi per classi di periodo di picco e settori direzionali di provenineza aventi ampiezza pari a 10°. ..... 16
**Figura 12.** Diagramma di distribuzione percentuale delle frequenze di occorrenza degli eventi ondosi suddivisi in classi di periodo di picco, per settori direzionali di ampiezza pari a 30°. ..... 17
**Figura 13.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione di Gauss o Normale. ..... 25
**Figura 14.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione Log - Normale. ..... 26
**Figura 15.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione di Gumbel. ..... 28
**Figura 16.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione di Frechet. ..... 29
**Figura 17.** Confronto tra le funzioni di distribuzione cumulata. ..... 30
**Figura 18.** Confronto tra le funzioni di densità di probabilità. ..... 30
**Figura 19.** Andamento dell'altezza significativa in funzione del valore del periodo di ritorno. ..... 33

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



# Indice delle tabelle

**Tabella 1.** Durata minima di vita (Tv) per opere o strutture di carattere definitivo. ..... 19
**Tabella 2.** Massima probabilità di danneggiamento ammissibile (Pf) nel periodo di vita dell'opera. ..... 20
**Tabella 3.** Popolazioni di dati al variare della tipologia di analisi, per una soglia di troncamento pari a 2.5 m. ..... 22
**Tabella 4.** Test statistico di Kolmogorov – Smirnov. ..... 31
**Tabella 5.** Altezze d'onda significativa e probabilità cumulate al variare del periodo di ritorno. ..... 32
**Tabella 6.** Parametri dell'onda di progetto. ..... 33
**Tabella 7.** Valori estremi di altezza d'onda nel punto P1, divisi per tipologia di analisi e periodi di ritorno – soglia di troncamento pari a 2.5 m. ..... 35
**Tabella 8.** Caratteristiche dell'onda di progetto per il dimensionamento delle opere, corrispondente ad un periodo di ritorno pari a 154 anni. ..... 35

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



## 1. INTRODUZIONE

A seguito degli ultimi eventi di mareggiata risalenti allo scorso 29 ottobre 2018, l'Acquatecno S.r.l. è stata incaricata dal Comune di Santa Margherita Ligure (GE) di riprogettare la diga di sopraflutto di stato attuale (Figura 1), tenendo conto anche dell'onda che ne ha provocato il collasso e d in seguito studiare nuove soluzioni dell'imboccatura portuale, al fine di garantire una minore agitazione residua interna.

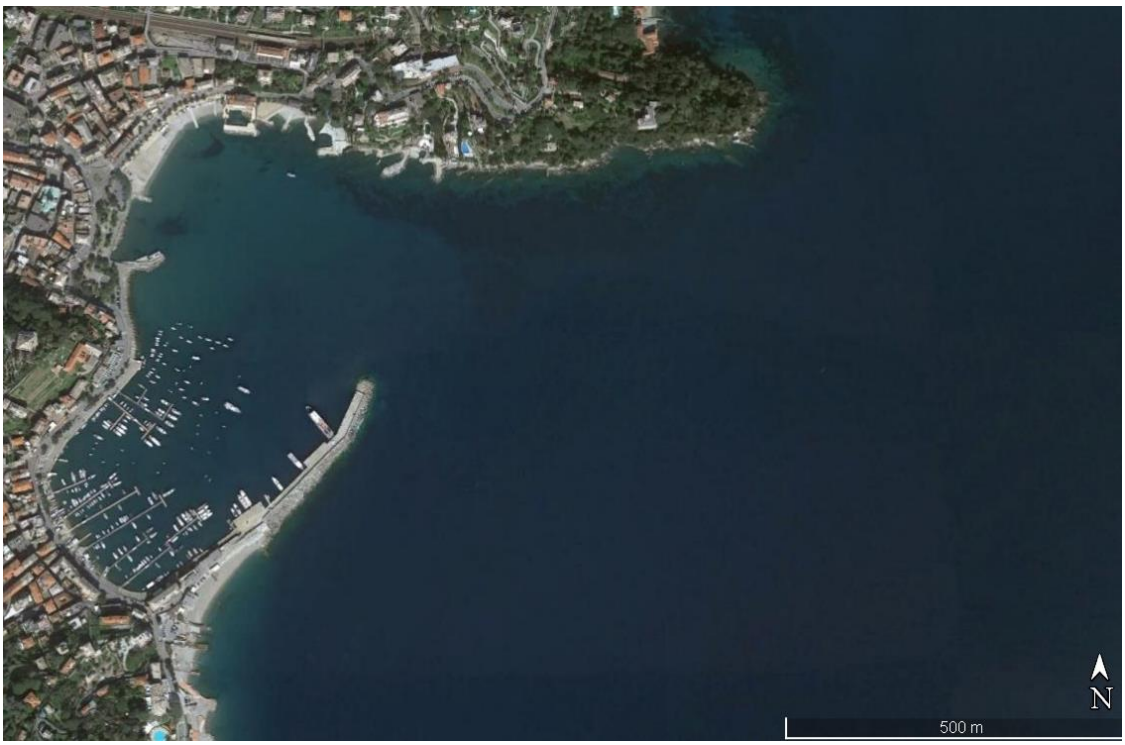



**Figura 1.** Vista planimetrica del Porto di santa Margherita Ligure nella configurazione di stato attuale – immagine presa da Google Earth.

In ragione dei cambiamenti climatici che caratterizzano gli ultimi anni, si è reso per tanto necessario, in via preliminare alla progettazione marittima, sviluppare uno studio meteomarino che tenesse conto dei dati ondosi più recenti, meglio descritti nel capitolo successivo.

Il presente documento dunque costituisce la relazione illustrativa dello studio meteomarino, della metodologia attuata, delle tecniche di elaborazioni dei dati e dei risultati ottenuti.

Di seguito sono riportate alcune immagini illustrative della condizione attuale della diga di sopraflutto, a seguito della mareggiata sopramenzionata (Figura 2 e Figura 3).

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



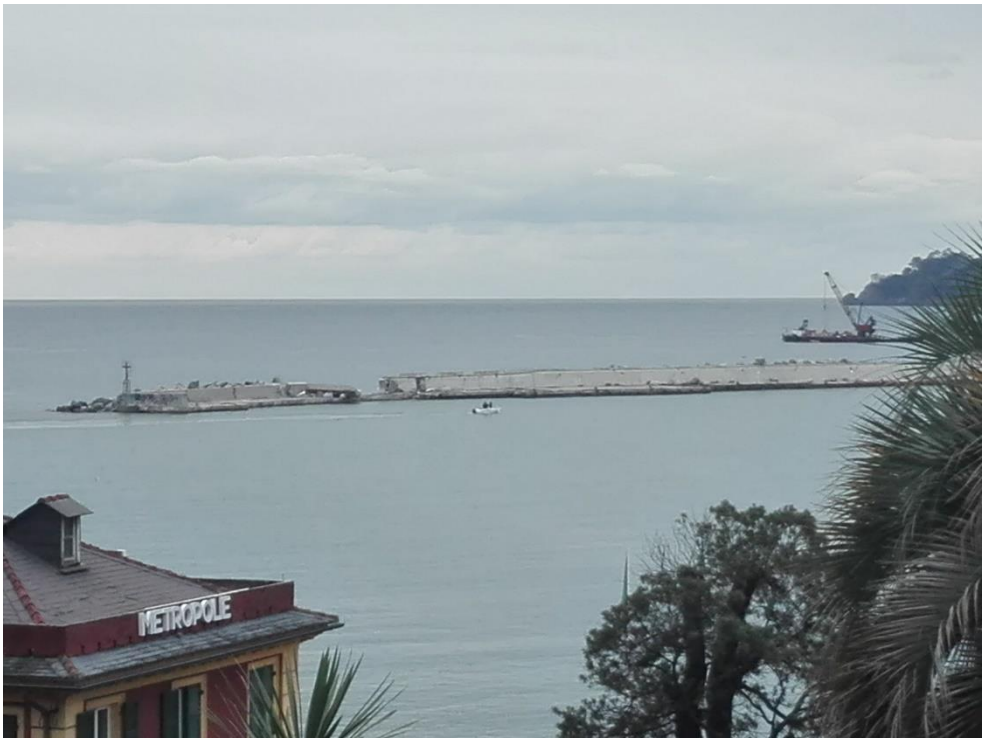





**Figura 2.** Vista della diga di sopraflutto del Porto di Santa Margherita Ligure dopo il collasso provocato dalla mareggiata del 29/10/2018.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo





**Figura 3.** Alcuni danni riportati dalla diga a seguito della mareggiata del 29/10/2018.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



## 2. REPERIMENTO ED ELABORAZIONE DEI DATI

Il primo passo per lo sviluppo dello studio meteo marino è stato l'individuazione di serie di dati ondosi utilizzabili per il paraggio in esame, ovvero il Porto di Santa margherita Ligure (GE) è situato sulla riviera ligure di levante, all'interno del Golfo del Tigullio, nella parte nord-occidentale del promontorio di Portofino (Figura 4):

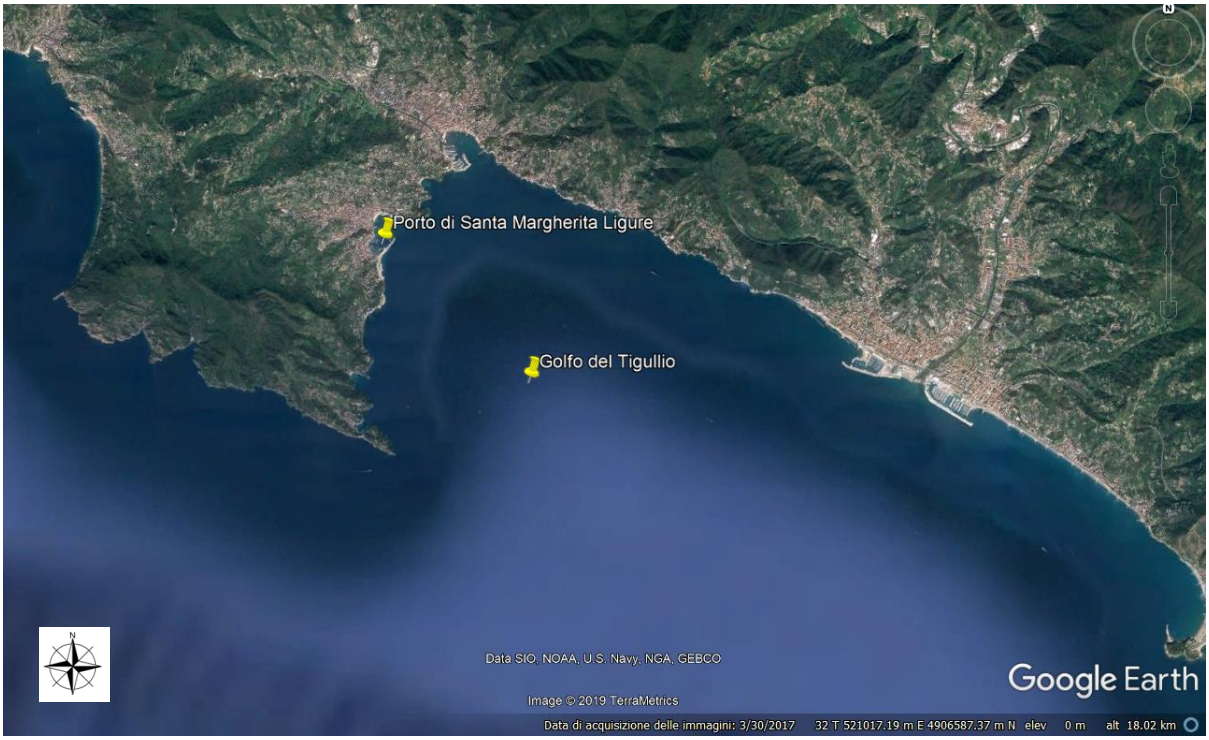



**Figura 4.** Inquadramento geografico del paraggio di Santa Margherita Ligure (GE).

### 2.1. Disponibilità dei dati ondosi

A valle di un'indagine conoscitiva volta a sondare la disponibilità di fonti affidabili e complete di dati ondosi, si è deciso di utilizzare le serie messe a disposizione dall'Università di Genova. Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) infatti ha svolto una rianalisi delle condizioni atmosferiche e ondose, producendo un database di hindcast che copre il periodo compreso tra gennaio 1979 e dicembre 2018. Tale rianalisi è stata sviluppata utilizzando il NCEP Climate Forecast System Reanalysis.

Il modello utilizzato per la rianalisi dei dati ondosi è Wavewatch III (version 3.14), implementato sull'intero bacino del Mediterraneo (Figura 5), rappresentato da un dominio computazionale a maglia

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



regolare, avente una risoluzione di 0.1273×0.09 gradi corrispondente a circa 10 km alla latitudine di 45°N. Il modello è forzato da un campo di vento orario ottenuto dal modello atmosferico.

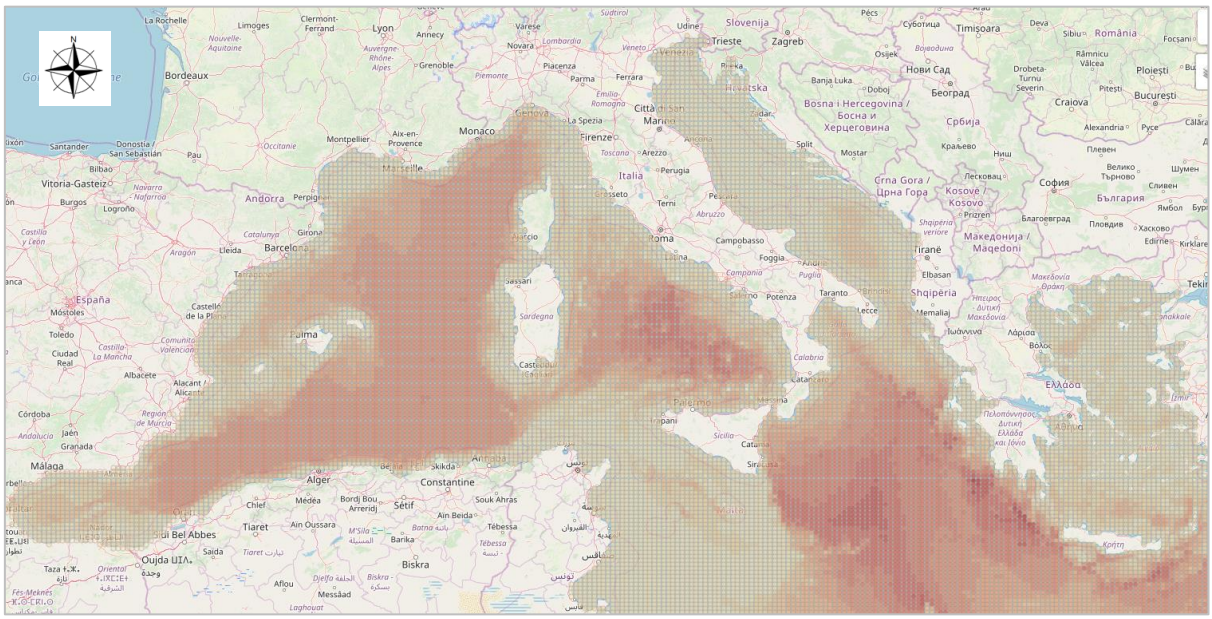



**Figura 5.** Griglia computazionale del Mar Mediterraneo caratterizzata da una risoluzione di circa 10 km, elaborata dal DICCA (Dipartimento di Ingengneria Civile, Chimica e Ambientale) dell'Università di Genova.

La validazione del modello è effettuata confrontando i risultati numerici con le osservazioni delle boe, utilizzando parametri come altezza d'onda significativa, periodo medio e direzione media di propagazione. Per maggiori dettagli vedere appendice e/o consultare il sito:

http://www.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html

Il risultato consiste in una serie oraria di dati, meteorologici e ondosi, in ogni punto della griglia suddetta, comprendente i seguenti parametri:

- YYYY - anno
- MM - mese
- DD - giorno
- hh - ora
- mm - minuti
- ss - secondi
- Hs – Altezza d'onda significativa [m]

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



- Tm – Periodo medio [s]
- Tp – Periodo di picco [s]
- Dirm – Direzione media [°N]
- Dirp – Direzione di picco [°N]
- Spread – Spreading direzionale [°]
- Depth - Profondità [m]
- Lm – Lunghezza d'onda media [m]
- Lp – Lunghezza di picco [m]
- uw – Velocità del vento Ovest-Est [m/s]
- vw – Velocità del vento Sud-Nord [m/s]

### 2.2. Dati ondosi utilizzati nel progetto

Nel caso studio sono stati estratti:

- vent'anni di dati, per il periodo gennaio 1999 – dicembre 2018, dal punto P1 interno al Golfo del Tigullio (in rosso in Figura 6) avente coordinate (lon [E] = 9.2527, lat [N] = 44.31), situato ad una profondità di 87.1 m, utilizzati in seguito per la caratterizzazione climatica e per l'analisi statistica;
- un anno di dati, per il periodo gennaio 2018 – dicembre 2018, dal Punto P2 (in blu in Figura 6) di coordinate (lon [E] = 9.2527, lat [N] = 44.22), ad una profondità di circa 759 m, utilizzato in seguito per analizzare la mareggiata del 29/10/2018.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



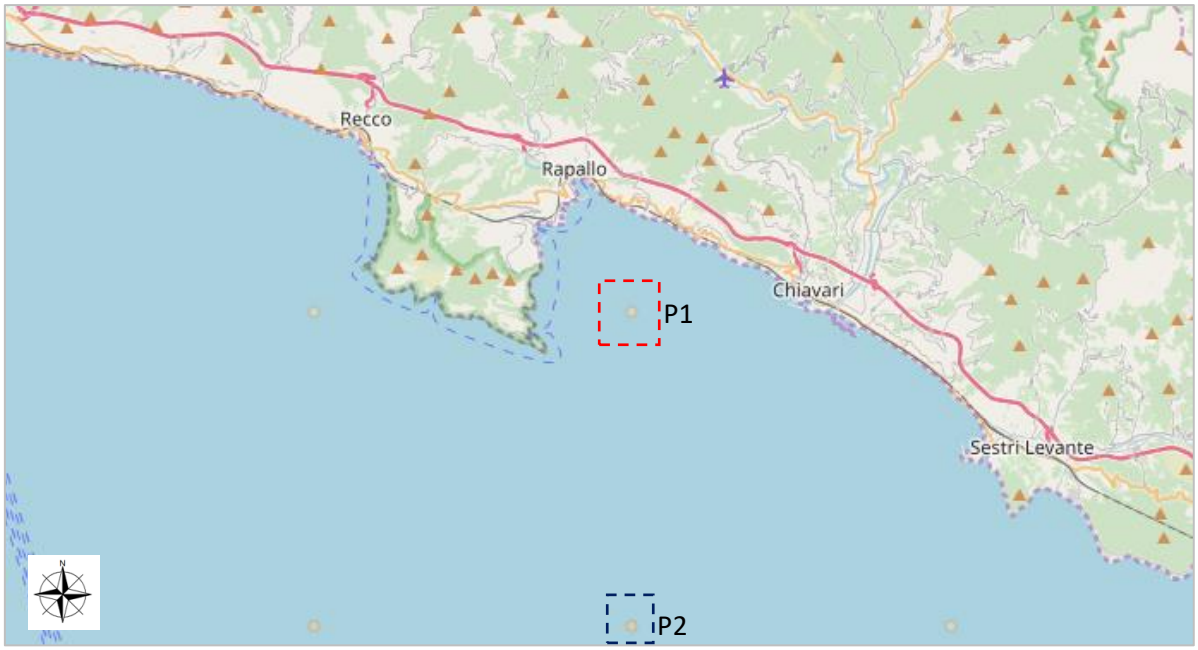



**Figura 6.** Indicazione del punto P1 interno al Golfo del Tigullio e del punto P2, scelti per l'estrazione dei dati ondosi e meteorologici.

### 2.3. Caratterizzazione del clima ondoso all'interno del golfo del Tigullio

Di seguito sono riportate le tabelle rappresentanti la distribuzione degli eventi ondosi relativi alla serie di dati estratta dal punto P1, divisi per classi di altezza significativa, secondo settori direzionali di provenienza aventi ampiezza pari a 10° (Figura 7 e Figura 8). La Figura 9 rappresenta la distribuzione percentuale degli stessi eventi ondosi per settori direzionali, caratterizzati da un'ampiezza di 30°; per facilità di lettura del grafico, le 14 classi di altezza d'onda significativa definite nelle tabelle sono state accorpate, per un totale di 7 classi. Le figure Figura 10, Figura 11 e Figura 12 rappresentano invece le distribuzioni degli eventi ondosi classificati secondo il valore dei periodi di picco.

Dall'analisi di tabelle e figure sopramenzionate si evince che:

- Si può considerare come traversia del paraggio ul settore ricadente nell'intervallo 135°N – 255°N;
- All'interno di tale settore è possibile individuare una traversia principale, coincidente con l'intervallo 195°N – 225°N (Ostro – Libeccio), e una traversia secondaria ricadente negli intervalli 135°N – 195°N (Scirocco – Ostro) e 225°N – 255°N (Libeccio – Ponente);

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



- Di tutti gli eventi ondosi, più o meno intensi, l'85 % proviene dal settore che è stato individuato come traversia; di questi circa il 53 % proviene dalla traversia principale, circa il 47 proviene dalla traversia secondaria;
- Considerando il settore di traversia principale, circa l'84 % è costituito da onde aventi altezze significative inferiori a 3 m, solo lo 0.2 % delle onde è caratterizzato da $Hs \geq 4$ m;
- Nel settore di traversia secondaria l'84.7 % degli eventi è rappresentato da onde aventi altezza significativa inferiore ai 3 m;
- Le onde rappresentate dai periodi di picco più elevati, appartenenti alle classi 9.0 s – 12.0 s e superiori a i 12.0 s, provengono principalmente dal settore di Libeccio.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



| | |
|---|---|
| Punto di coordinate | lon [E] = 9.2527, lat [N] = 44.31 |
| Profondità | 87.1 m |
| Numero di dati | 175320 |

| | | Classi di altezza d'onda significativa [m] | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 < Hs < 0.5 | 0.5 ≤ Hs < 1.0 | 1.0 ≤ Hs < 1.5 | 1.5 ≤ Hs < 2.0 | 2.0 ≤ Hs < 2.5 | 2.5 ≤ Hs < 3.0 | 3.0 ≤ Hs < 3.5 | 3.5 ≤ Hs < 4.0 | 4.0 ≤ Hs < 4.5 | 4.5 ≤ Hs < 5.0 | 5.0 ≤ Hs < 5.5 | 5.5 ≤ Hs < 6.0 | 6.0 ≤ Hs < 6.5 | 6.5 ≤ Hs < 7.0 |
| Classi di direzione media di provenienza [°N] | 0 ≤ θm < 5 | 92 | 98 | 32 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 5 ≤ θm < 15 | 241 | 162 | 34 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 15 ≤ θm < 25 | 256 | 202 | 65 | 15 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 25 ≤ θm < 35 | 438 | 290 | 92 | 13 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 35 ≤ θm < 45 | 648 | 545 | 330 | 184 | 97 | 22 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 45 ≤ θm < 55 | 691 | 978 | 775 | 478 | 285 | 124 | 15 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 55 ≤ θm < 65 | 739 | 1134 | 671 | 287 | 195 | 47 | 17 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 65 ≤ θm < 75 | 635 | 647 | 267 | 77 | 22 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 75 ≤ θm < 85 | 495 | 369 | 138 | 22 | 10 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 85 ≤ θm < 95 | 468 | 297 | 79 | 20 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 95 ≤ θm < 105 | 381 | 197 | 62 | 15 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 105 ≤ θm < 115 | 399 | 180 | 72 | 23 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 115 ≤ θm < 125 | 491 | 231 | 76 | 18 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 125 ≤ θm < 135 | 685 | 452 | 147 | 41 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 135 ≤ θm < 145 | 1287 | 1064 | 348 | 91 | 24 | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 145 ≤ θm < 155 | 2789 | 1644 | 637 | 190 | 56 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 155 ≤ θm < 165 | 5739 | 2111 | 716 | 236 | 79 | 21 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 165 ≤ θm < 175 | 8116 | 2549 | 687 | 170 | 72 | 36 | 7 | 8 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 175 ≤ θm < 185 | 7213 | 2506 | 613 | 121 | 45 | 13 | 2 | 5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 185 ≤ θm < 195 | 7409 | 3286 | 874 | 170 | 52 | 15 | 5 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 195 ≤ θm < 205 | 8811 | 5781 | 2182 | 722 | 198 | 56 | 22 | 8 | 6 | 8 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 205 ≤ θm < 215 | 13083 | 8778 | 5224 | 2206 | 838 | 290 | 92 | 32 | 15 | 9 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| | 215 ≤ θm < 225 | 14666 | 6781 | 4085 | 2568 | 1203 | 621 | 294 | 112 | 59 | 40 | 12 | 11 | 4 | 0 |
| | 225 ≤ θm < 235 | 6897 | 3114 | 1250 | 395 | 130 | 54 | 41 | 27 | 17 | 14 | 10 | 1 | 0 | 0 |
| | 235 ≤ θm < 245 | 2854 | 960 | 394 | 134 | 48 | 10 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 245 ≤ θm < 255 | 1877 | 499 | 215 | 90 | 29 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 255 ≤ θm < 265 | 1543 | 303 | 159 | 66 | 16 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 265 ≤ θm < 275 | 1267 | 232 | 81 | 41 | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 275 ≤ θm < 285 | 933 | 230 | 72 | 41 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 285 ≤ θm < 295 | 519 | 228 | 71 | 26 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 295 ≤ θm < 305 | 319 | 202 | 58 | 23 | 5 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 305 ≤ θm < 315 | 245 | 174 | 58 | 28 | 7 | 5 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 315 ≤ θm < 325 | 189 | 179 | 56 | 31 | 13 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 325 ≤ θm < 335 | 203 | 156 | 60 | 25 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 335 ≤ θm < 345 | 155 | 189 | 75 | 19 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 345 ≤ θm < 355 | 205 | 164 | 66 | 23 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 355 ≤ θm < 360 | 83 | 80 | 27 | 7 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Figura 7.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata di eventi ondosi, divisi per classi di altezza d'onda significativa e settori direzionali di provenineza aventi ampiezza pari a 10°.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



| | | Classi di altezza d'onda significativa [m] | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 < Hs < 0.5 | 0.5 ≤ Hs < 1.0 | 1.0 ≤ Hs < 1.5 | 1.5 ≤ Hs < 2.0 | 2.0 ≤ Hs < 2.5 | 2.5 ≤ Hs < 3.0 | 3.0 ≤ Hs < 3.5 | 3.5 ≤ Hs < 4.0 | 4.0 ≤ Hs < 4.5 | 4.5 ≤ Hs < 5.0 | 5.0 ≤ Hs < 5.5 | 5.5 ≤ Hs < 6.0 | 6.0 ≤ Hs < 6.5 | 6.5 ≤ Hs < 7.0 | |
| Classi di direzione media di provenienza [°N] | 0 ≤ θm < 5 | 0.052 | 0.056 | 0.018 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.129 |
| | 5 ≤ θm < 15 | 0.137 | 0.092 | 0.019 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.251 |
| | 15 ≤ θm < 25 | 0.146 | 0.115 | 0.037 | 0.009 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.308 |
| | 25 ≤ θm < 35 | 0.250 | 0.165 | 0.052 | 0.007 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.479 |
| | 35 ≤ θm < 45 | 0.370 | 0.311 | 0.188 | 0.105 | 0.055 | 0.013 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.045 |
| | 45 ≤ θm < 55 | 0.394 | 0.558 | 0.442 | 0.273 | 0.163 | 0.071 | 0.009 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.911 |
| | 55 ≤ θm < 65 | 0.422 | 0.647 | 0.383 | 0.164 | 0.111 | 0.027 | 0.010 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.765 |
| | 65 ≤ θm < 75 | 0.362 | 0.369 | 0.152 | 0.044 | 0.013 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.942 |
| | 75 ≤ θm < 85 | 0.282 | 0.210 | 0.079 | 0.013 | 0.006 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.591 |
| | 85 ≤ θm < 95 | 0.267 | 0.169 | 0.045 | 0.011 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.493 |
| | 95 ≤ θm < 105 | 0.217 | 0.112 | 0.035 | 0.009 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.376 |
| | 105 ≤ θm < 115 | 0.228 | 0.103 | 0.041 | 0.013 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.387 |
| | 115 ≤ θm < 125 | 0.280 | 0.132 | 0.043 | 0.010 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.468 |
| | 125 ≤ θm < 135 | 0.391 | 0.258 | 0.084 | 0.023 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.760 |
| | 135 ≤ θm < 145 | 0.734 | 0.607 | 0.198 | 0.052 | 0.014 | 0.002 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.609 |
| | 145 ≤ θm < 155 | 1.591 | 0.938 | 0.363 | 0.108 | 0.032 | 0.005 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.038 |
| | 155 ≤ θm < 165 | 3.273 | 1.204 | 0.408 | 0.135 | 0.045 | 0.012 | 0.005 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 5.083 |
| | 165 ≤ θm < 175 | 4.629 | 1.454 | 0.392 | 0.097 | 0.041 | 0.021 | 0.004 | 0.005 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 6.644 |
| | 175 ≤ θm < 185 | 4.114 | 1.429 | 0.350 | 0.069 | 0.026 | 0.007 | 0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 6.002 |
| | 185 ≤ θm < 195 | 4.226 | 1.874 | 0.499 | 0.097 | 0.030 | 0.009 | 0.003 | 0.003 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 6.740 |
| | 195 ≤ θm < 205 | 5.026 | 3.297 | 1.245 | 0.412 | 0.113 | 0.032 | 0.013 | 0.005 | 0.003 | 0.005 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 10.151 |
| | 205 ≤ θm < 215 | 7.462 | 5.007 | 2.980 | 1.258 | 0.478 | 0.165 | 0.052 | 0.018 | 0.009 | 0.005 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 17.439 |
| | 215 ≤ θm < 225 | 8.365 | 3.868 | 2.330 | 1.465 | 0.686 | 0.354 | 0.168 | 0.064 | 0.034 | 0.023 | 0.007 | 0.006 | 0.002 | 0.000 | 17.372 |
| | 225 ≤ θm < 235 | 3.934 | 1.776 | 0.713 | 0.225 | 0.074 | 0.031 | 0.023 | 0.015 | 0.010 | 0.008 | 0.006 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 6.816 |
| | 235 ≤ θm < 245 | 1.628 | 0.548 | 0.225 | 0.076 | 0.027 | 0.006 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 2.511 |
| | 245 ≤ θm < 255 | 1.071 | 0.285 | 0.123 | 0.051 | 0.017 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.547 |
| | 255 ≤ θm < 265 | 0.880 | 0.173 | 0.091 | 0.038 | 0.009 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.194 |
| | 265 ≤ θm < 275 | 0.723 | 0.132 | 0.046 | 0.023 | 0.004 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.929 |
| | 275 ≤ θm < 285 | 0.532 | 0.131 | 0.041 | 0.023 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.730 |
| | 285 ≤ θm < 295 | 0.296 | 0.130 | 0.040 | 0.015 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.484 |
| | 295 ≤ θm < 305 | 0.182 | 0.115 | 0.033 | 0.013 | 0.003 | 0.002 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.349 |
| | 305 ≤ θm < 315 | 0.140 | 0.099 | 0.033 | 0.016 | 0.004 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.296 |
| | 315 ≤ θm < 325 | 0.108 | 0.102 | 0.032 | 0.018 | 0.007 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.269 |
| | 325 ≤ θm < 335 | 0.116 | 0.089 | 0.034 | 0.014 | 0.005 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.259 |
| | 335 ≤ θm < 345 | 0.088 | 0.108 | 0.043 | 0.011 | 0.005 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.256 |
| | 345 ≤ θm < 355 | 0.117 | 0.094 | 0.038 | 0.013 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.265 |
| | 355 ≤ θm < 360 | 0.047 | 0.046 | 0.015 | 0.004 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.114 |
| | 100.000 | 53.081 | 26.804 | 11.891 | 4.918 | 1.990 | 0.775 | 0.295 | 0.120 | 0.059 | 0.041 | 0.015 | 0.008 | 0.003 | 0.001 | 100.000 |

**Figura 8.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata delle percentuali di occorrenza degli eventi ondosi, divisi per settori direzionali di 10° e classi di altezza significativa.

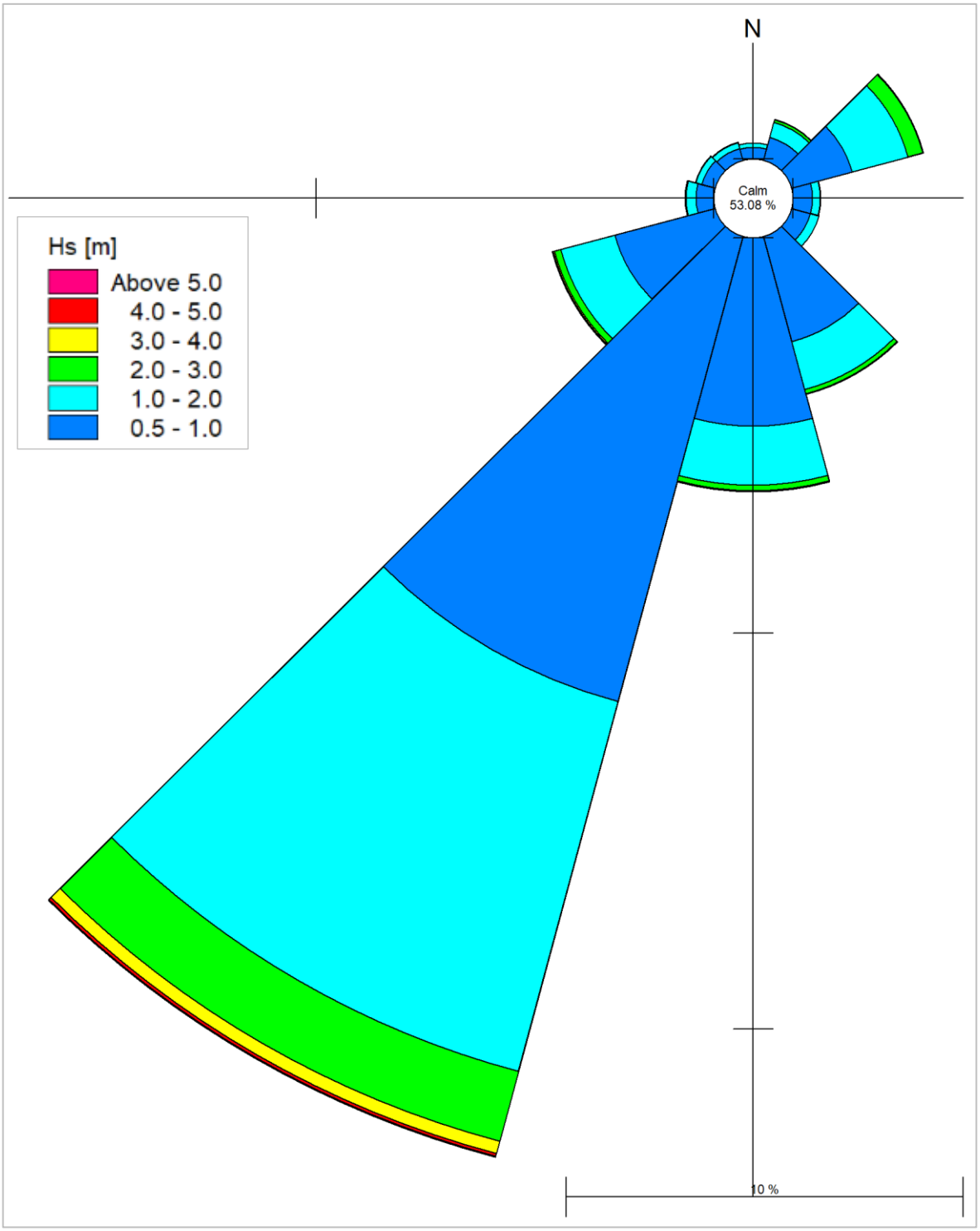



**Figura 9.** Diagramma di distribuzione percentuale delle frequenze di occorrenza degli eventi ondosi suddivisi in classi di altezza d'onda significativa, per settori direzionali di ampiezza pari a 30°.

| | | Classi di periodo di picco [s] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 < Tp < 3.0 | 3.0 ≤ Tp < 6.0 | 6.0 ≤ Tp < 9.0 | 9.0 ≤ Tp < 12.0 | Tp ≥ 12 |
| Classi di direzione media di provenienza [°N] | 0 ≤ θm < 5 | 71 | 142 | 10 | 3 | 0 |
| | 5 ≤ θm < 15 | 193 | 225 | 12 | 10 | 0 |
| | 15 ≤ θm < 25 | 247 | 274 | 11 | 8 | 0 |
| | 25 ≤ θm < 35 | 422 | 399 | 13 | 5 | 1 |
| | 35 ≤ θm < 45 | 646 | 1152 | 30 | 4 | 0 |
| | 45 ≤ θm < 55 | 707 | 2565 | 65 | 11 | 2 |
| | 55 ≤ θm < 65 | 739 | 2261 | 80 | 14 | 0 |
| | 65 ≤ θm < 75 | 574 | 1005 | 52 | 19 | 2 |
| | 75 ≤ θm < 85 | 393 | 538 | 69 | 35 | 1 |
| | 85 ≤ θm < 95 | 313 | 408 | 93 | 49 | 2 |
| | 95 ≤ θm < 105 | 183 | 320 | 104 | 48 | 4 |
| | 105 ≤ θm < 115 | 123 | 351 | 138 | 62 | 5 |
| | 115 ≤ θm < 125 | 144 | 456 | 158 | 60 | 2 |
| | 125 ≤ θm < 135 | 222 | 866 | 188 | 51 | 5 |
| | 135 ≤ θm < 145 | 423 | 1985 | 338 | 72 | 3 |
| | 145 ≤ θm < 155 | 610 | 3870 | 776 | 68 | 3 |
| | 155 ≤ θm < 165 | 876 | 6089 | 1685 | 254 | 8 |
| | 165 ≤ θm < 175 | 814 | 7384 | 2979 | 460 | 11 |
| | 175 ≤ θm < 185 | 491 | 6707 | 2912 | 400 | 12 |
| | 185 ≤ θm < 195 | 357 | 7225 | 3805 | 419 | 11 |
| | 195 ≤ θm < 205 | 287 | 10486 | 6439 | 568 | 16 |
| | 205 ≤ θm < 215 | 370 | 15706 | 12559 | 1826 | 113 |
| | 215 ≤ θm < 225 | 500 | 13716 | 12165 | 3989 | 86 |
| | 225 ≤ θm < 235 | 746 | 5380 | 3560 | 2239 | 25 |
| | 235 ≤ θm < 245 | 429 | 2009 | 1186 | 762 | 16 |
| | 245 ≤ θm < 255 | 381 | 1211 | 632 | 478 | 10 |
| | 255 ≤ θm < 265 | 362 | 1077 | 328 | 322 | 4 |
| | 265 ≤ θm < 275 | 242 | 1026 | 188 | 170 | 3 |
| | 275 ≤ θm < 285 | 137 | 857 | 117 | 162 | 7 |
| | 285 ≤ θm < 295 | 72 | 558 | 104 | 111 | 3 |
| | 295 ≤ θm < 305 | 58 | 401 | 68 | 80 | 4 |
| | 305 ≤ θm < 315 | 45 | 372 | 48 | 53 | 1 |
| | 315 ≤ θm < 325 | 46 | 358 | 36 | 31 | 1 |
| | 325 ≤ θm < 335 | 86 | 328 | 19 | 20 | 1 |
| | 335 ≤ θm < 345 | 99 | 324 | 12 | 12 | 2 |
| | 345 ≤ θm < 355 | 119 | 307 | 19 | 19 | 0 |
| | 355 ≤ θm < 360 | 68 | 129 | 1 | 1 | 0 |

**Figura 10.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata di eventi ondosi, divisi per classi di periodo di picco e settori direzionali di provenineza aventi ampiezza pari a 10°.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



| Classi di direzione media di provenienza [°N] | Classi di periodo di picco [s] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 < Hs < 0.5 | 0.5 ≤ Hs < 1.0 | 1.0 ≤ Hs < 1.5 | 1.5 ≤ Hs < 2.0 | 2.0 ≤ Hs < 2.5 | |
| | 0 ≤ θm < 5 | 0.040 | 0.081 | 0.006 | 0.002 | 0.000 | 0.129 |
| | 5 ≤ θm < 15 | 0.110 | 0.128 | 0.007 | 0.006 | 0.000 | 0.251 |
| | 15 ≤ θm < 25 | 0.141 | 0.156 | 0.006 | 0.005 | 0.000 | 0.308 |
| | 25 ≤ θm < 35 | 0.241 | 0.228 | 0.007 | 0.003 | 0.001 | 0.479 |
| | 35 ≤ θm < 45 | 0.368 | 0.657 | 0.017 | 0.002 | 0.000 | 1.045 |
| | 45 ≤ θm < 55 | 0.403 | 1.463 | 0.037 | 0.006 | 0.001 | 1.911 |
| | 55 ≤ θm < 65 | 0.422 | 1.290 | 0.046 | 0.008 | 0.000 | 1.765 |
| | 65 ≤ θm < 75 | 0.327 | 0.573 | 0.030 | 0.011 | 0.001 | 0.942 |
| | 75 ≤ θm < 85 | 0.224 | 0.307 | 0.039 | 0.020 | 0.001 | 0.591 |
| | 85 ≤ θm < 95 | 0.179 | 0.233 | 0.053 | 0.028 | 0.001 | 0.493 |
| | 95 ≤ θm < 105 | 0.104 | 0.183 | 0.059 | 0.027 | 0.002 | 0.376 |
| | 105 ≤ θm < 115 | 0.070 | 0.200 | 0.079 | 0.035 | 0.003 | 0.387 |
| | 115 ≤ θm < 125 | 0.082 | 0.260 | 0.090 | 0.034 | 0.001 | 0.468 |
| | 125 ≤ θm < 135 | 0.127 | 0.494 | 0.107 | 0.029 | 0.003 | 0.760 |
| | 135 ≤ θm < 145 | 0.241 | 1.132 | 0.193 | 0.041 | 0.002 | 1.609 |
| | 145 ≤ θm < 155 | 0.348 | 2.207 | 0.443 | 0.039 | 0.002 | 3.038 |
| | 155 ≤ θm < 165 | 0.500 | 3.473 | 0.961 | 0.145 | 0.005 | 5.083 |
| | 165 ≤ θm < 175 | 0.464 | 4.212 | 1.699 | 0.262 | 0.006 | 6.644 |
| | 175 ≤ θm < 185 | 0.280 | 3.826 | 1.661 | 0.228 | 0.007 | 6.002 |
| | 185 ≤ θm < 195 | 0.204 | 4.121 | 2.170 | 0.239 | 0.006 | 6.740 |
| | 195 ≤ θm < 205 | 0.164 | 5.981 | 3.673 | 0.324 | 0.009 | 10.151 |
| | 205 ≤ θm < 215 | 0.211 | 8.958 | 7.163 | 1.042 | 0.064 | 17.439 |
| | 215 ≤ θm < 225 | 0.285 | 7.823 | 6.939 | 2.275 | 0.049 | 17.372 |
| | 225 ≤ θm < 235 | 0.426 | 3.069 | 2.031 | 1.277 | 0.014 | 6.816 |
| | 235 ≤ θm < 245 | 0.245 | 1.146 | 0.676 | 0.435 | 0.009 | 2.511 |
| | 245 ≤ θm < 255 | 0.217 | 0.691 | 0.360 | 0.273 | 0.006 | 1.547 |
| | 255 ≤ θm < 265 | 0.206 | 0.614 | 0.187 | 0.184 | 0.002 | 1.194 |
| | 265 ≤ θm < 275 | 0.138 | 0.585 | 0.107 | 0.097 | 0.002 | 0.929 |
| | 275 ≤ θm < 285 | 0.078 | 0.489 | 0.067 | 0.092 | 0.004 | 0.730 |
| | 285 ≤ θm < 295 | 0.041 | 0.318 | 0.059 | 0.063 | 0.002 | 0.484 |
| | 295 ≤ θm < 305 | 0.033 | 0.229 | 0.039 | 0.046 | 0.002 | 0.349 |
| | 305 ≤ θm < 315 | 0.026 | 0.212 | 0.027 | 0.030 | 0.001 | 0.296 |
| | 315 ≤ θm < 325 | 0.026 | 0.204 | 0.021 | 0.018 | 0.001 | 0.269 |
| | 325 ≤ θm < 335 | 0.049 | 0.187 | 0.011 | 0.011 | 0.001 | 0.259 |
| | 335 ≤ θm < 345 | 0.056 | 0.185 | 0.007 | 0.007 | 0.001 | 0.256 |
| | 345 ≤ θm < 355 | 0.068 | 0.175 | 0.011 | 0.011 | 0.000 | 0.265 |
| | 355 ≤ θm < 360 | 0.039 | 0.074 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.114 |
| | 100.000 | 7.184 | 56.164 | 29.089 | 7.355 | 0.208 | 100.000 |

**Figura 11.** Tabella rappresentante la distribuzione incondizionata delle percentuali di occorrenza degli eventi ondosi, divisi per classi di periodo di picco e settori direzionali di provenineza aventi ampiezza pari a 10°.

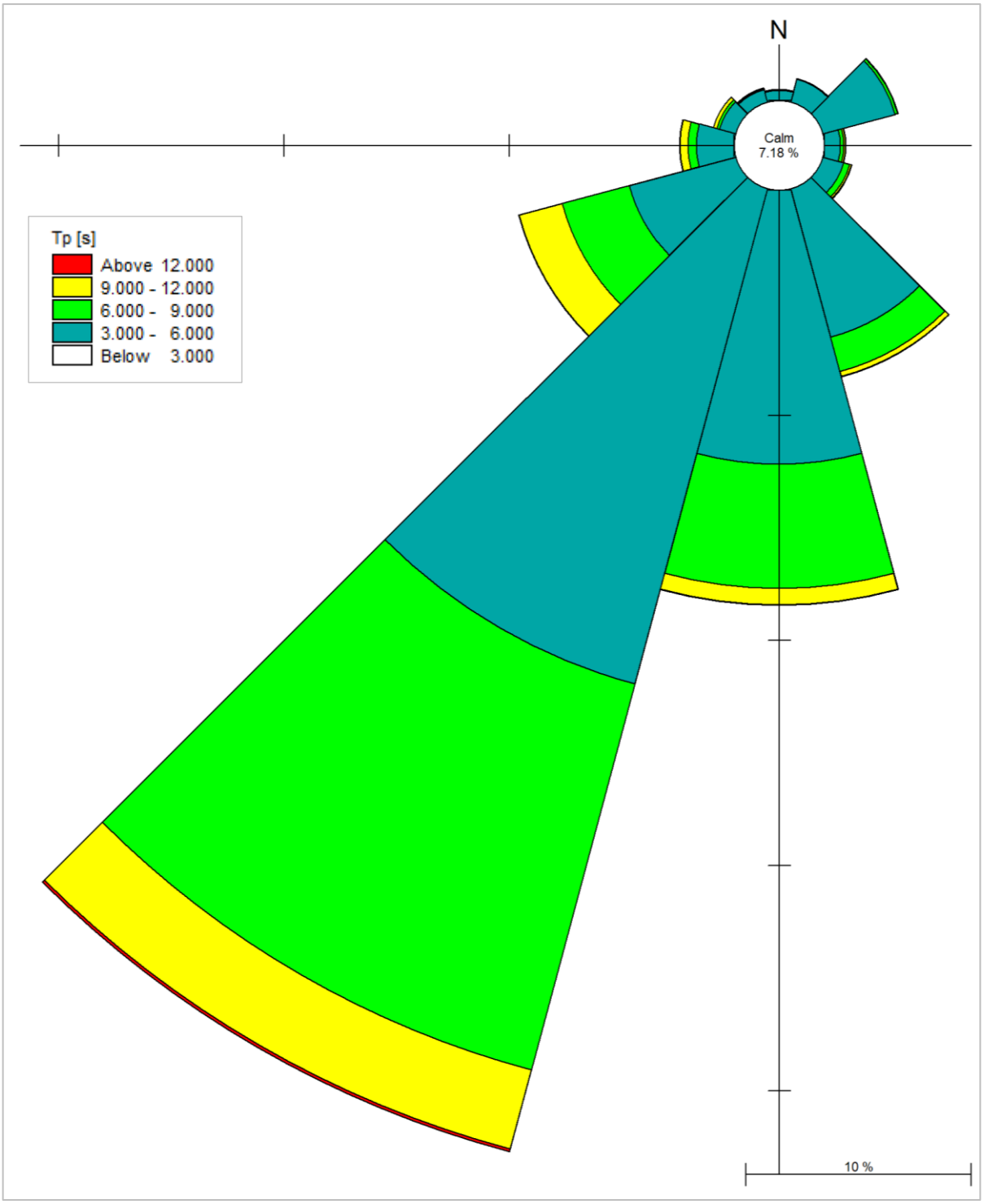



**Figura 12.** Diagramma di distribuzione percentuale delle frequenze di occorrenza degli eventi ondosi suddivisi in classi di periodo di picco, per settori direzionali di ampiezza pari a 30°.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



# 3. ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI

L'onda di progetto deve essere rappresentativa delle condizioni ambientali che possono considerarsi pericolose ai fini della stabilità delle strutture marittime e pertanto deve essere associata al tempo di vita previsto per l'opera stessa.

In generale, l'onda di progetto può essere sia un'onda significativa, rappresentante uno stato di mare, sia un'onda individuale, rappresentante una singola onda random d'altezza massima all'interno di uno stato di mare. In entrambi i casi, l'onda di progetto è definita mediante un'altezza, un periodo e una direzione di provenienza.

Il "rischio" da associare all'onda di progetto si specifica attraverso il periodo di ritorno Tr degli stati di mare che la contengono e con la probabilità che questi si verifichino durante la vita prevista dell'opera.

Le fasi da affrontare in un'analisi volta alla previsione dei massimi valori che l'altezza d'onda può assumere in un determinato arco temporale si possono riassumere come segue:

- selezione dei dati omogenei e indipendenti tra quelli disponibili;
- individuazione del modello probabilistico che meglio rappresenta i dati selezionati;
- determinazione del massimo valore di altezza d'onda atteso in un fissato arco di tempo, in base al modello probabilistico individuato.

## 3.1. Calcolo del periodo di ritorno

Al fine di valutare l'onda di determinare l'onda di progetto, bisogna a monte valutare la vita utile dell'opera in base al contesto in cui è inserita e alle funzionalità che la caratterizzano. È necessario inoltre valutare il livello di rischio legato alla probabilità di superamento dell'onda di progetto durante la vita utile dell'opera e ai danni che le onde possono comportare a valle del superamento suddetto, e la possibilità di ripristinare la normale funzionalità dell'opera mediante interventi di manutenzione.

Si fa perciò riferimento ai valori consigliati dalle *Istruzioni Tecniche Italiane per la Progettazione delle dighe marittime* (1996) del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici riportate di seguito.

In Tabella 1 per infrastrutture di uso generale si intendono le opere di difesa di complessi civili, commerciali o industriali, non destinati ad uso specifico. Le infrastrutture di uso specifico invece sono

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



identificabili con opere di difesa di singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi e piattaforme di carico e scarico, di piattaforme petrolifere, ecc.

Per quanto riguarda il livello di sicurezza richiesto, il livello 1 si riferisce a opere o installazioni che comportano un rischio minimo di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso (difese costiere, opere in porti minori ecc.). Il livello 2 è relativo a opere o installazioni il cui collasso comporterebbe un moderato rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale (opere di grandi porto ecc.). Il livello di sicurezza 3 è riferito a opere o installazioni per la protezione dall'inondazione, comportanti un elevato rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale in caso di collasso (difese di centri urbani o industriali, ecc.).

**Tabella 1.** Durata minima di vita (Tv) per opere o strutture di carattere definitivo.

| Tipo dell'opera | Livello di sicurezza richiesto | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| | Vita di progetto (anni) | | |
| Infrastrutture d'uso generale | 25 | 50 | 100 |
| Infrastrutture d'uso specifico | 15 | 25 | 50 |

Considerando la Tabella 2 per la scelta della probabilità di danneggiamento, si deve per prima cosa distinguere tra danneggiamento incipiente e distruzione totale dell'opera, in base alle deformazioni subite e alla difficoltà di riparare il danno. Per strutture rigide (dighe a parete verticale) si assume la condizione di distruzione totale, poiché i danni sono solitamente molto difficili da riparare. Per strutture flessibili o riparabili, si assume la condizione di danneggiamento incipiente, ovvero il danneggiamento predefinito in base alla tipologia di struttura, al di sopra del quale si deve intervenire con lavori di manutenzione. Per quanto riguarda il fattore di rischio per la vita umana, si parla di rischio limitato quando non c'è ragione di prevedere la perdita di vite umane in caso di danneggiamento, altrimenti si ha il rischio elevato. Relativamente alla ripercussione economica, si distingue tra bassa, media e alta a seconda se il rapporto tra la somma dei costi diretti di danneggiamento e quelli indiretti dovuti alla perdita di funzionalità dell'opera e il costo totale per la realizzazione dell'opera è minore di 5, compreso tra 5 e 20 o maggiore di 20.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



**Tabella 2.** Massima probabilità di danneggiamento ammissibile (Pf) nel periodo di vita dell'opera.

| Danneggiamento incipiente | | |
|---|---|---|
| Ripercussione economica | Rischio per la vita umana | |
| | Limitato | Elevato |
| Bassa | 0.5 | 0.3 |
| Media | 0.3 | 0.2 |
| Alta | 0.25 | 0.15 |
| Distruzione totale | | |
| Ripercussione economica | Rischio per la vita umana | |
| | Limitato | Elevato |
| Bassa | 0.2 | 0.15 |
| Media | 0.15 | 0.1 |
| Alta | 0.1 | 0.05 |

Scelti i parametri di cui sopra, si calcola il periodo di ritorno dell'onda di progetto con la formula che segue:

$$T_r = \frac{T_v}{[-\ln(1 - P_f)]}$$

Nel caso in esame è stata considerata una vita utile dell'opera pari a 25 anni, una condizione di distruzione totale dell'opera con ripercussione economica media e rischio per la vita umana basso, ottenendo così un periodo di ritorno pari a 154 anni.

### 3.2. Selezione delle mareggiate omogenee e indipendenti

Le serie temporali modellate sono rappresentative delle condizioni meteomarine locali, e caratterizzate da una cadenza prefissata. Tale cadenza, chiamata scala di aggregazione della serie, influisce sulla risoluzione con cui si osservano le variazioni della grandezza che è oggetto d'indagine. Maggiore è la scala di aggregazione, minore è il dettaglio con cui è descritta la variabilità della grandezza osservata.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



La scala di aggregazione, inoltre, influenza anche l'indipendenza dei dati che formano la serie temporale. Per un fenomeno continuo, lentamente variabile, come quello del moto ondoso, minore è la scala di aggregazione e maggiore è il grado di correlazione tra i dati osservati.

Uno dei passaggi più delicati dell'inferenza statistica è la selezione dei dati da analizzare dalla serie temporale osservata. In particolare, tale cernita deve assicurare l'omogeneità e l'indipendenza dell'insieme del campione fornito. Nasce, pertanto, l'esigenza di definire criteri di selezione in base ai quali estrarre dalla serie temporale quei valori che siano, contemporaneamente, descrittivi del fenomeno fisico e mutuamente indipendenti.

Le popolazioni statistiche estratte dai dati osservati possono essere distinte in due diversi tipi, in relazione al procedimento seguito per la loro formazione: il primo prevede il campionamento regolare della serie osservata e genera una popolazione temporalmente aggregata; l'altro prevede un campionamento ad evento e quindi genera una popolazione temporalmente disaggregata. Il primo procedimento è riconducibile al metodo del campione totale, il secondo è riconducibile al metodo delle durate parziali sopra soglia, o al metodo dei massimi annuali.

Il metodo del campione totale non assicura a priori né l'indipendenza né l'omogeneità dei dati che formano l'insieme campionario. Al contrario, il metodo delle durate parziali sopra soglia, previa la definizione di opportuni criteri di individuazione degli eventi, permette la cernita di dati sia omogenei che indipendenti.

La definizione dell'evento "mareggiata" permette di semplificare l'insieme campionario per l'inferenza statistica. La mareggiata si può definire come la successione temporale degli stati di mare caratterizzati da valori d'altezza, periodo e direzione del moto ondoso, variabili in fissati intervalli. È regola caratterizzare una mareggiata assegnandole i valori d'altezza, periodo e direzione corrispondenti al culmine d'intensità della successione degli stati di mare. In particolare, si considera come mareggiata la successione temporale degli stati di mare caratterizzati da:

- persistenza dell'altezza d'onda sopra la soglia di 1 metro maggiore di 12 ore consecutive;
- attenuazione dell'altezza d'onda sotto la soglia di 1 metro per meno di 6 ore consecutive;
- appartenenza della direzione di provenienza a un determinato settore angolare (± 30° rispetto alla direzione iniziale).

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



L'indipendenza campionaria della serie dei colmi è assicurata imponendo un valore di soglia per l'intervallo che intercorre tra i picchi di due mareggiate successive. Nel caso in esame, tale intervallo è pari a 48 ore.

L'indipendenza dell'insieme formato da mareggiate susseguitesi con cadenza non inferiore a due giorni non ne assicura l'omogeneità. Tale requisito può essere conseguito vagliando ulteriormente il campione indipendente. In particolare, sono utilizzati nelle analisi soltanto i valori superiori ad una seconda soglia d'altezza d'onda, più alta di quella prescelta nella definizione della mareggiata. La definizione della soglia di troncamento per la serie disaggregata, quindi, può essere finalizzata a separare le mareggiate generate da venti di tempesta, ciclonici o anticiclonici, da quelle generate da brezze costiere, anche se intense. Inoltre, nel caso dei nostri mari, in cui le aree di generazione sono limitate e irregolari, la definizione della seconda soglia può essere sfruttata per distinguere le mareggiate generate da vaste perturbazioni meteorologiche, che si estendono su scale continentali, dalle mareggiate generate da perturbazioni locali, che si estendono su scale regionali. In ogni caso, la scelta della soglia è un'operazione molto delicata, poiché essa condiziona notevolmente le stime dell'altezza d'onda con assegnato tempo di ritorno. Una soglia troppo bassa, infatti, conduce ad avere molti elementi nel campione, la maggior parte dei quali non è rappresentativa di condizioni estreme. Tali circostanze determinano previsioni stabili ma sovrastimate dell'altezza d'onda con assegnato tempo di ritorno. Al contrario, una soglia troppo alta conduce ad avere pochi elementi campionari, anche se tutti rappresentativi di condizioni estreme. Tali circostanze determinano previsioni dell'altezza d'onda variabili con la numerosità campionaria.

A valle di un'analisi di sensitività della soglia e tenuto conto di quanto detto sopra a proposito dell'adeguata numerosità del campione, la soglia di troncamento è stata posta pari a **Hs = 2.5 m**.

La valutazione dei campioni per la statistica è stata inizialmente condotta considerando sia un'analisi omnidirezionale, sia un'analisi direzionale secondo i settori 195°N – 225°N (Ostro – Libeccio) e 135°N – 195°N (Scirocco – Ostro). Si riportano di seguito le numerosità dei campioni statistici a seconda del tipo di analisi.

**Tabella 3.** Popolazioni di dati al variare della tipologia di analisi, per una soglia di troncamento pari a 2.5 m.

| | Soglia di troncamento Hs >2.5 m | | |
|---|---|---|---|
| | Omnidirezionale | 195°N – 225°N | 135°N – 195°N |
| Numerosità del campione | 184 | 125 | 15 |

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



Oltre a dover portare in conto un'opportuna numerosità del campione, come detto in precedenza, si è ritenuto opportuno considerare anche la direzione di provenienza dell'evento di mareggiata che ha portato al collasso del muro paraonde dell'attuale diga di sopraflutto, risalente al 29 ottobre 2018. Tale mareggiata infatti è stata caratterizzata da un'altezza d'onda significativa massima pari a 6.7 m, un periodo di picco pari a 11.2 s e una direzione media di provenienza pari a circa 215°N (settore Libeccio) che è stato possibile stimare analizzando i dati acquisiti per il punto P2 di largo. Lo stesso evento di mareggiata nel punto P1 interno al golfo ha presentato un valore dell'altezza significativa massima pario a 6.51 m ed un periodo di picco pari a 11 s. È stato quindi eseguito il calcolo ed in seguito la propagazione (PD_SR_Studio di propagazione ondosa) delle onde relative al punto P1 provenienti da entrambi i settori individuati (vedere Tabella 7 delle Conclusioni); soltanto a valle di tali propagazioni si è scelta come onda di progetto quella appartenente alla traversia principale (195°N – 225°N) assegnandole come direzione media di provenienza il limite inferiore del settore, ovvero 195°N.

Nel paragrafo 3.4 si riporta il calcolo dell'altezza di progetto e seguita quindi con l'analisi direzionale degli eventi estremi relativa al settore di traversia principale (195°N – 225°N), della serie tronca con soglia a 2.5 m.

### 3.3. Individuazione del modello probabilistico più idoneo

La rappresentazione dei picchi di mareggiata mediante un'appropriata legge di distribuzione di probabilità introduce nuove problematiche. Infatti, la distribuzione di probabilità delle altezze d'onda non è nota a priori. In linea di principio, dunque, qualsiasi distribuzione di probabilità può essere verosimile. Nella prassi operativa, tale presupposto obbliga i progettisti a definire alcuni criteri di scelta, volti ad individuare tra le possibili distribuzioni la legge di probabilità che meglio rappresenta alcune caratteristiche statistiche dei dati, per esempio un migliore adattamento della coda della distribuzione ai valori estremi rilevati.

Le distribuzioni utilizzate nello studio in esame sono la Normale, la log-Normale, la Gumbel e la Frechet. Si procederà ora alla stima dei parametri per ciascuna di queste distribuzioni e alla verifica di adattamento attraverso un primo test "grafico" che mette a confronto le leggi di distribuzione cumulata con la funzione ottenuta empiricamente, e mediante test statistici. Si riportano di seguito le descrizioni dei modelli probabilistici sopra citati.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



### 3.3.1. Distribuzione di Gauss o Normale

La distribuzione di normale o gaussiana dipende soltanto da due parametri statistici del campione della variabile che si sta studiando, ovvero μ la media del campione e σ il suo scarto quadratico medio o deviazione standard. Si riportando di seguito le espressioni della funzione di densità di probabilità f(H) e della distribuzione di probabilità cumulata F(H):

$$f(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

$$F(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{H} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dH$$

Dove la media e lo scarto sono rispettivamente:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{N} H_i}{N}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (H_i - \mu)^2}{N-1}}$$

Dove N è la numerosità del campione.

Nel caso in esame si ha:

- μ = 3.356
- σ = 0.857

Di seguito si riporta il confronto grafico tra la frequenza cumulata empirica e la distribuzione cumulata teorica (Figura 13).

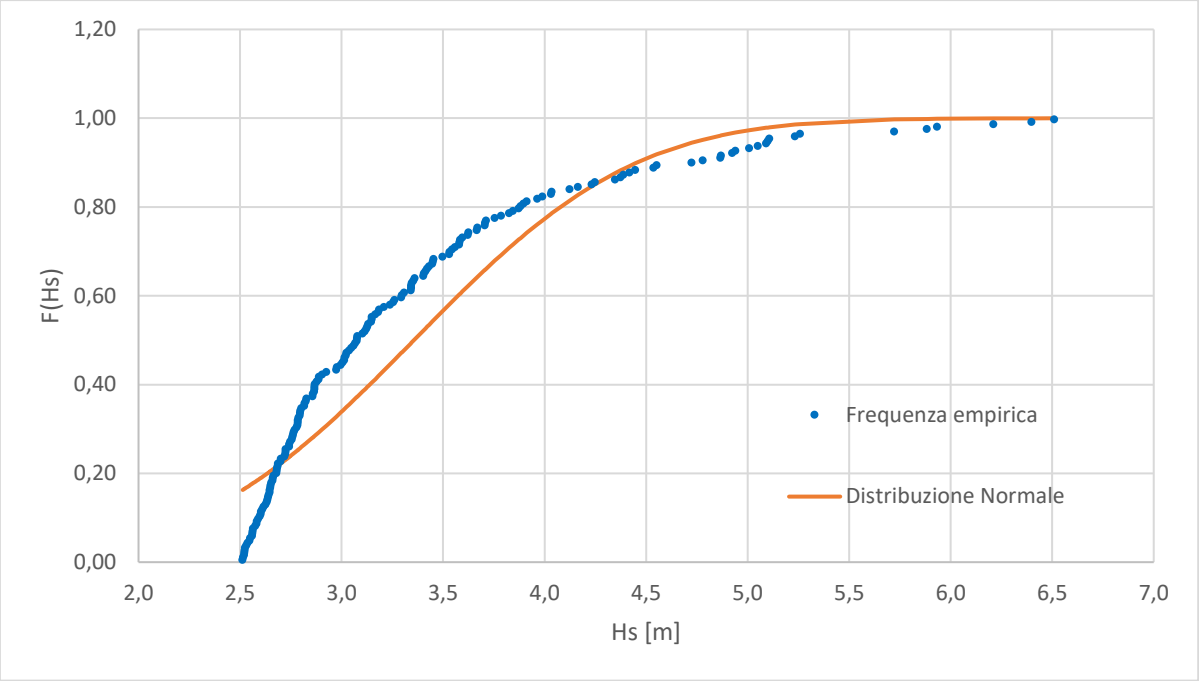



**Figura 13.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione di Gauss o Normale.

### 3.3.2. Distribuzione Log-Normale

La Distribuzione Log-Normale a due parametri è caratterizzata dal fatto che a seguire la legge normale non è la variabile originaria H, ma il suo logaritmo:

$$y = \ln(H)$$

La media e la varianza della variabile y sono legati alla media e alla varianza della variabile originaria H dalle relazioni:

$$\boldsymbol{\mu(y) = \ln[\mu(H)] - \frac{1}{2}\ln\left[1 + \frac{\sigma^2(H)}{\mu^2(H)}\right] = 1.183}$$

$$\boldsymbol{\sigma^2(y) = \ln\left[1 + \frac{\sigma^2(H)}{\mu^2(H)}\right] = 0.051}$$

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



L'espressione della densità di probabilità e quella della distribuzione cumulata sono:

$$f(H) = \frac{1}{H\sqrt{2\pi}s(y)} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(H) - m(y)}{s(y)}\right]^2\right\}$$

$$F(H) = \frac{1}{s(y)\sqrt{2\pi}} \int_0^Q \frac{1}{H} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(H) - m(y)}{s(y)}\right]^2\right\}$$

Di seguito si riporta il confronto grafico tra la frequenza cumulata empirica e la distribuzione cumulata teorica (Figura 14).

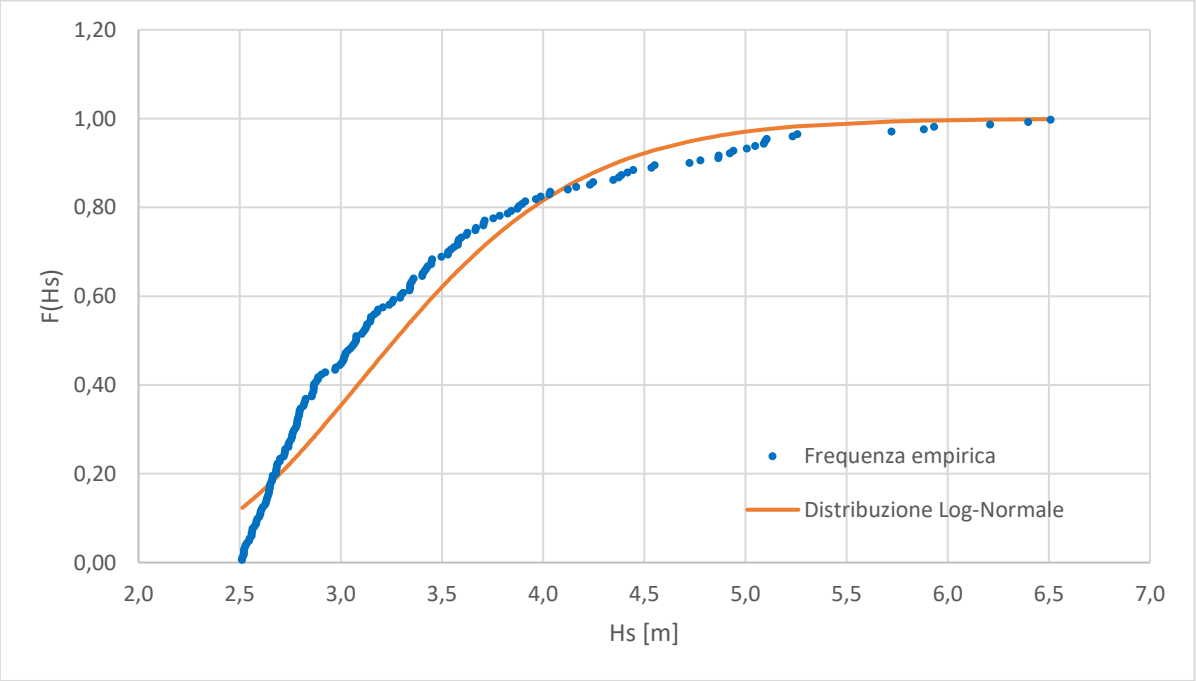



**Figura 14.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione Log - Normale.

### 3.3.3. Distribuzione di Gumbel

La Distribuzione di Gumbel, così come la distribuzione di Frechet che verrà analizzata in seguito, sono entrambe distribuzioni bi-parametriche asintotiche del massimo valore, rispettivamente del I e del II tipo: queste distribuzioni interpretano le osservazioni dei valori massimi di variabili casuali, come è ad esempio il caso delle altezze d'onda significative. Il tipo della forma asintotica dipende dal modo in cui la funzione di probabilità della distribuzione originaria tende a uno: il I tipo, ovvero la distribuzione di

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



Gumbel, corrisponde a distribuzioni la cui funzione di probabilità, illimitata superiormente, tende a uno in forma esponenziale. Il II tipo, ovvero la distribuzione di Frechet, corrisponde a distribuzioni la cui funzione di probabilità, ancora illimitata superiormente, tende a uno secondo la forma della distribuzione di Pareto, ovvero molto più lentamente della forma esponenziale. Per quanto riguarda la distribuzione di Gumbel, la sua caratteristica è che la funzione di probabilità F(x) si può approssimare, per i valori grandi della x, con una curva che tende esponenzialmente ad uno al tendere ad infinito di x.

Dopo aver calcolato i due parametri della distribuzione, dipendenti dalla media e dallo scarto come calcolati al par. 3.3.1:

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{1.2825}{\boldsymbol{\sigma}} = 1.496$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\mu} - 0.45\boldsymbol{\sigma} = 2.970$$

È possibile determinare la densità di probabilità f(H) e la distribuzione di probabilità cumulata F(H) mediante le espressioni che seguono:

$$f(H) = \alpha e^{-e^{-\alpha(H-\varepsilon)}-\alpha(H-\varepsilon)}$$

$$P(H) = e^{-e^{-a(H-\varepsilon)}}$$

Di seguito si riporta il confronto grafico tra la frequenza cumulata empirica e la distribuzione cumulata teorica (Figura 15).

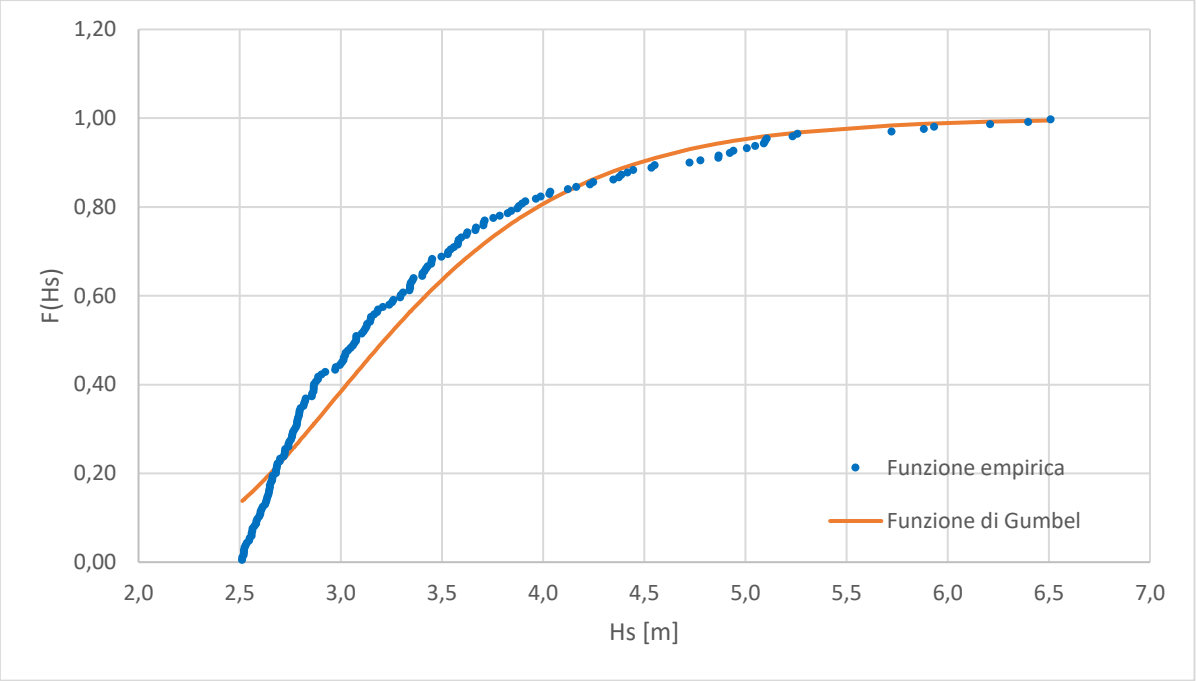



**Figura 15.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione di Gumbel.

Densità di probabilità:

$$p(H) = \exp\left[-\left(\frac{H}{\varepsilon}\right)^{-k}\right]\frac{k}{\varepsilon}\left(\frac{H}{\varepsilon}\right)^{-(k+1)}$$

Distribuzione cumulata di probabilità:

$$P(H) = \exp\left[-\left(\frac{H}{\varepsilon}\right)^{-k}\right]$$

### 3.3.4. Distribuzione di Frechet

Le Distribuzioni di questa famiglia, per le quali al crescere della variabile x la funzione di probabilità tende a uno molto lentamente, sono del tipo della distribuzione di Pareto, limitata inferiormente con limite in zero.

I due parametri possono essere stimati con il metodo dei momenti:

$$k = \frac{1.2825}{\boldsymbol{\sigma}(y)} = \mathbf{5.674}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{exp}[\boldsymbol{\mu}(y) - 0.45006 * \boldsymbol{\sigma}(y)] = 2.\mathbf{949}$$

dove σ(y) e μ(y) sono i parametri della distribuzione Log-Normale, precedentemente calcolati.

Le funzioni di densità di probabilità e di probabilità cumulata sono date dalle relazioni:

$$\mathbf{f}(H) = \mathbf{exp}\left[-\left(\frac{H}{\boldsymbol{\varepsilon}}\right)^{-k}\right]\frac{k}{\boldsymbol{\varepsilon}}\left(\frac{H}{\boldsymbol{\varepsilon}}\right)^{-(k+1)}$$

$$F(H) = \exp\left[-\left(\frac{H}{\varepsilon}\right)^{-k}\right]$$

Di seguito si riporta il confronto tra la distribuzione cumulata teorica e quella empirica (Figura 16).

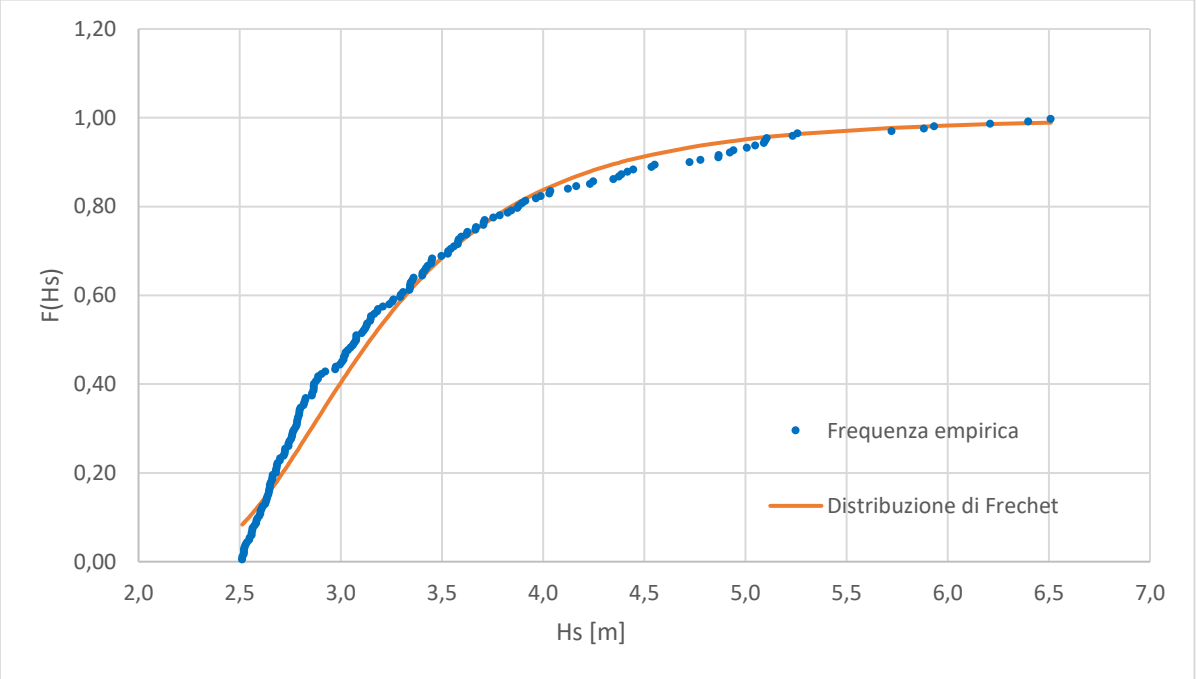



**Figura 16.** Confronto tra frequenza cumulata empirica e distribuzione di Frechet.

### 3.3.5. "Test grafico"

Un primo test per la scelta del modello statistico più idoneo da utilizzare è il confronto grafico tra le distribuzioni teoriche e quella empirica. A tal proposito in Figura 17 è rappresentato il confronto tra la distribuzione di probabilità cumulata empirica e le distribuzioni teoriche considerate; dal grafico si evince che la distribuzione di Frechet è quella che meglio approssima l'andamento della funzione determinata empiricamente. Ciò è confermato nella Figura 18, rappresentante il confronto tra le funzioni

di densità di probabilità; tutte le funzioni teoriche presentano difficoltà a rappresentare i valori di altezza d'onda inferiori a 3.0 m, ma la funzione di Frechet è quella che nell'intervallo 2.5 m < Hs < 3.0 m più si avvicina alla frequenza empirica.

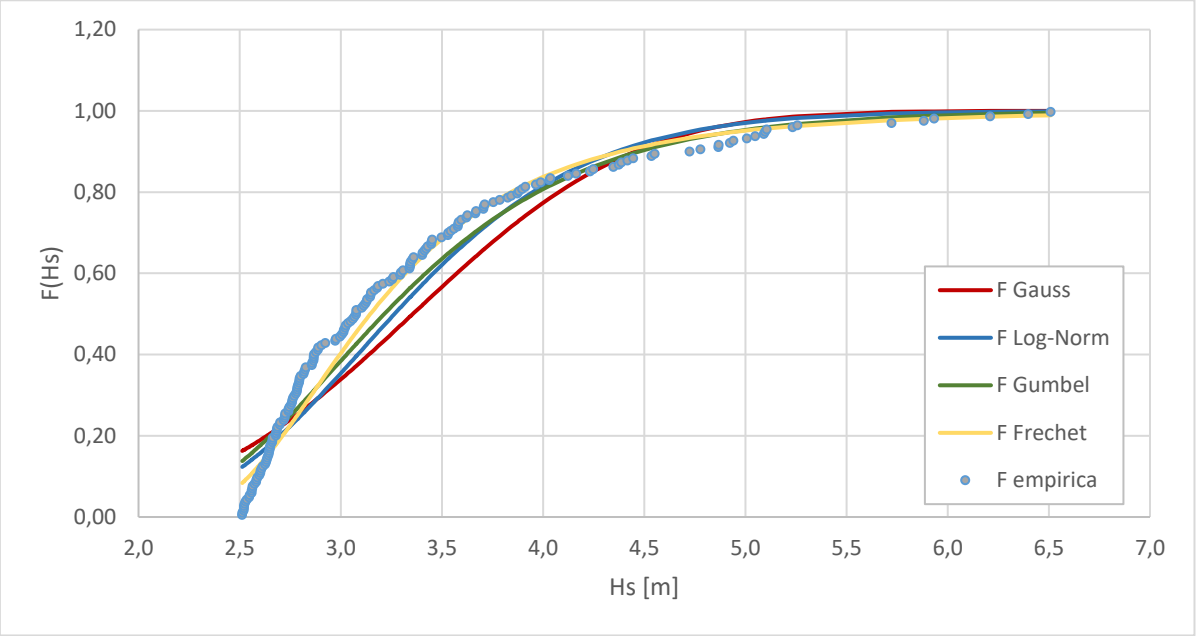



**Figura 17.** Confronto tra le funzioni di distribuzione cumulata.

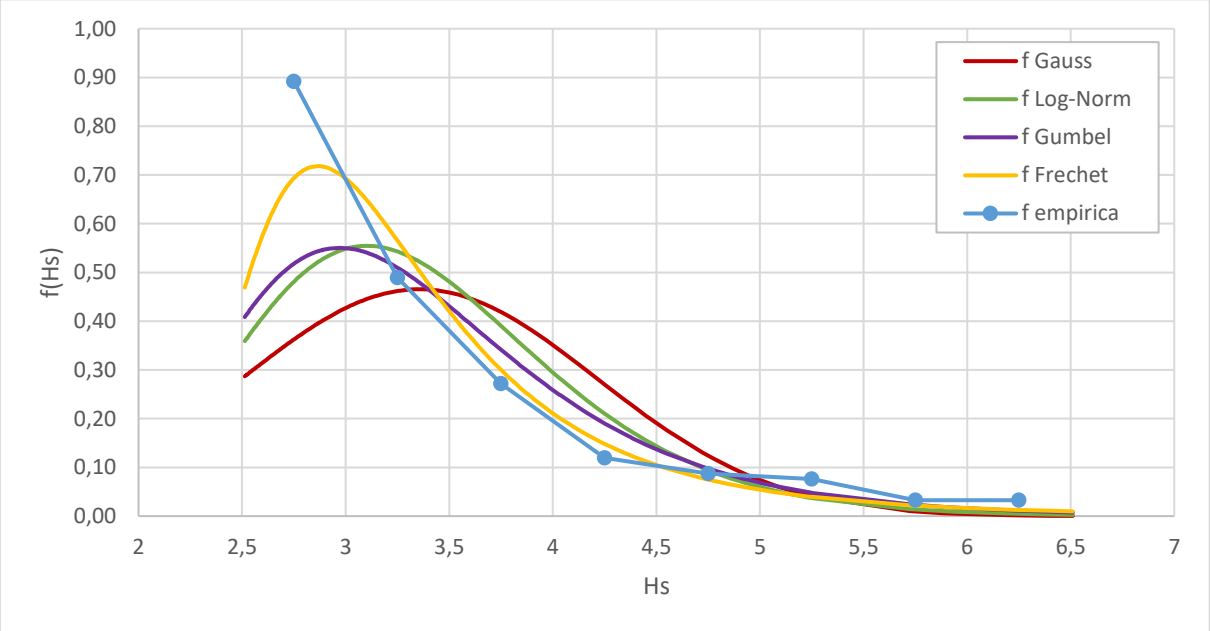



**Figura 18.** Confronto tra le funzioni di densità di probabilità.

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



### 3.3.6. Test statistico di Kolmogorov – Smirnov

Il test di adattamento di Kolmogorov – Smirnov si basa sul confronto tra le probabilità cumulate, relative alle varie distribuzioni che si vogliono testare, e la frequenza empirica del campione.

In particolare, la statistica di questo test tiene conto dello scarto massimo in valore assoluto fra le i-esime frequenze cumulate e le i-esime probabilità di non superamento, secondo la relazione:

$$D = \max|F_i - F_0(x_i)|$$

Come si può vedere dalla precedente relazione, il test si basa sulla probabilità cumulata: questo consente di non dover classificare il campione, ma di poter adottare direttamente le funzioni di probabilità già precedentemente definite per ogni distribuzione in esame.

In questo caso, la statistica del test è a sua volta una variabile casuale. L'andamento della sua distribuzione è dato da:

$$\lim_{N\to+\infty} \text{prob}\left[D\sqrt{N} \le z\right] = \frac{\sqrt{2\pi}}{z}\sum_{j=1}^{\infty} \exp\left[\frac{-(2j-1)^2\pi^2}{8z^2}\right]$$

dove z è un generico valore. A causa della difficoltà nell'esplicitare la distribuzione della statistica D, si adotta un valore limite pari a:

$$D_\alpha = \frac{1.36}{\sqrt{N}} = 0.100$$

relativo ad un livello di significatività pari a 0.05, per campioni aventi una numerosità superiore a 35. In questo modo, basterà semplicemente valutare la statistica per ogni distribuzione di cui si vuole testare l'adattamento, e verificare la disequazione:

$$D \le D_\alpha$$

Dalla tabella che segue si evince che il modello di Frechet è l'unico per cui il test ha dato esito positivo.

**Tabella 4.** Test statistico di Kolmogorov – Smirnov.

| D K-S | D Gauss | D Log-Norm | D Gumbel | D Frechet |
|---|---|---|---|---|
| 0.100 | 0.157 | 0.123 | 0.132 | 0.093 |
| $D \le D_{KS}$ | **no** | **no** | **no** | **ok** |

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



### 3.4. Stima dell'altezza d'onda significativa di progetto

Scelto il modello matematico probabilistico più idoneo ai dati in esame (par. 3.3**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), si procede alla stima del valore di altezza d'onda significativa relativo ad un periodo di ritorno pari a **154 anni** di cui si è discusso al paragrafo 3.1. Applicando la relazione che lega il periodo di ritorno alla funzione di probabilità:

$$\mathrm{P_{Tr}(H)} = 1 - \frac{1}{\mathrm{Tr}} = 0.993$$

Si ottiene il valore di probabilità cumulata legato al periodo di ritorno di progetto dell'opera.

Invertendo inoltre la distribuzione di Frechet si ottiene il valore di latezza d'onda significativa:

$$Hs = \varepsilon * \left(-log(P_{Tr})\right)^{\left(-\frac{1}{k}\right)}$$

$$Hs = 7.18\, m$$

A mezzo dello stesso procedimento sono state determinate le altezze d'onda significativa relative ai periodi di ritorno pari a 5, 10, 50 e 100 anni:

**Tabella 5.** Altezze d'onda significativa e probabilità cumulate al variare del periodo di ritorno.

| Tr [anni] | Ptr | Hs [m] |
|---|---|---|
| 5 | 0.800 | 3.85 |
| 10 | 0.900 | 4.39 |
| 50 | 0.980 | 5.88 |
| 100 | 0.990 | 6.65 |

Si ritiene opportuno evidenziare che l'altezza d'onda significativa del colmo della mareggiata del 29/10/2018, sia essa riferita al punto P1 (6.51 m) o al punto P2 (6.70 m), è ben minore del valore di Hs che caratterizza l'onda di progetto. Anche la direzione associata a tale onda, ovvero 195°N, è cautelativa rispetto alla direzione media della suddetta mareggiata (circa 215°N).

Dalla tabella 5 si nota inoltre che il picco della mareggiata dello scorso 29 ottobre corrisponde ad un'onda centennale (Tr = 100 anni).

Si riporta di seguito l'andamento dell'altezza significativa Hs in funzione del periodo di ritorno Tr (Figura 19).

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



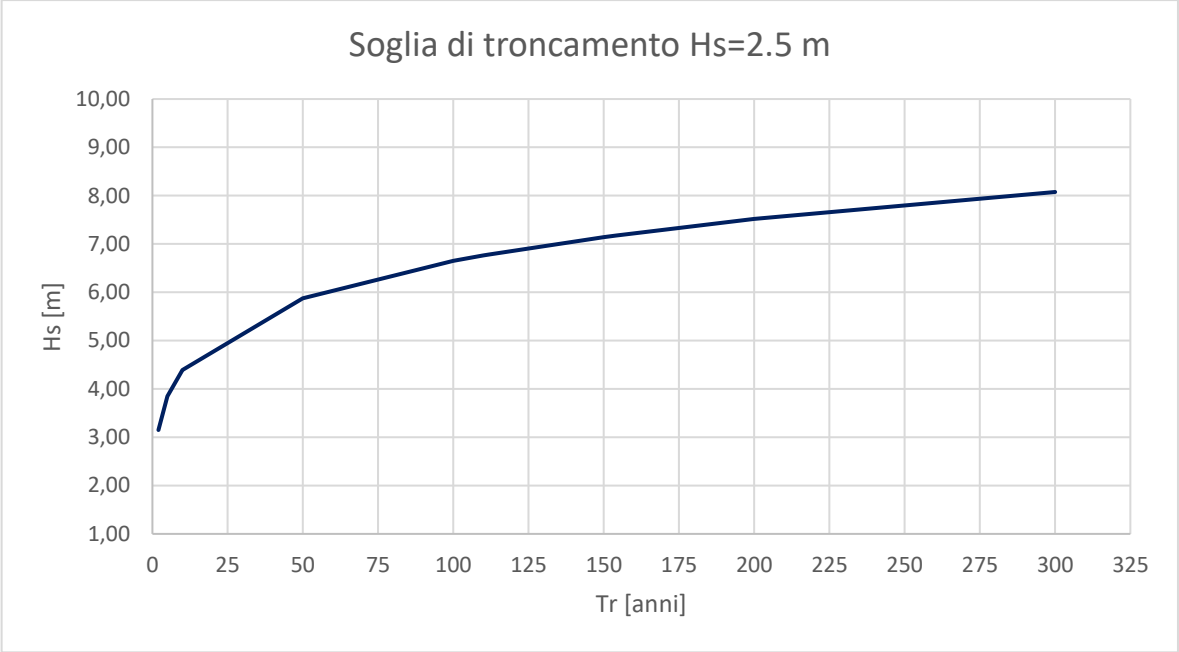



**Figura 19.** Andamento dell'altezza significativa in funzione del valore del periodo di ritorno.

Ricapitolando, a valle di un'attenta analisi dei dati, l'onda di progetto determinata presenta le seguenti caratteristiche:

**Tabella 6.** Parametri dell'onda di progetto.

| Tr [anni] | Hs [m] | Tp [s] | Dir [°N] |
|---|---|---|---|
| 154 | 7.18 | 11.5 | 195 |

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



## 4. CONCLUSIONI

A seguito del collasso di parte della diga di sopraflutto del porto di Santa Margherita Ligure, la società Acquatecno S.r.l. è stata incaricata da parte del Comune di Santa Margherita Ligure (GE) di redigere un progetto definitivo incentrato sulla riprogettazione della diga esistente e sullo studio di eventuali soluzioni per la modifica dell'imboccatura portuale, al fine di ottimizzare i livelli di agitazione ondosa interna al bacino.

Visti i recenti eventi di mareggiata risalenti al 29/10/2018 che hanno portato appunto alla distruzione parziale dell'opera, si è ritenuto opportuno elaborare uno studio meteomarino che tenesse in conto anche le ondazioni che hanno caratterizzato gli ultimi avvenimenti.

Sono pertanto stati acquisiti, dal database di hindcast del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova (DICCA), 20 anni di dati (gennaio 1999 – dicembre 2018) rappresentativi del clima ondoso all'interno del golfo del Tigullio (punto P1) ed un anno di dati (gennaio 2018 – dicembre 2018) al largo del promontorio di Portofino (punto P2). Dall'elaborazione della serie ventennale acquisita è stato possibile individuare una traversia principale coincidente con il settore di Ostro-Libeccio (195°N – 225°N) ed una secondaria rappresentata dal settore di Scirocco – Ostro (135°N – 195°N).

È stata altresì effettuata un'analisi statistica degli eventi estremi considerando la serie di dati tronca, avendo stimato la soglia di troncamento pari a Hs = 2.5 m. La valutazione dei campioni per la statistica è stata inizialmente condotta considerando sia un'analisi omnidirezionale, sia un'analisi direzionale secondo i due distinti settori di traversia. Dei quattro modelli statistici inizialmente considerati, Frechet è risultato più idoneo a rappresentare i campioni ottenuti. Mediante il modello sopramenzionato sono stati ricavati i valori di altezza d'onda significativa, relativi ai periodi di ritorno di 5, 10, 50, 100 e 154 anni (Tabella 7). Dalla tabella si evince che le altezze maggiori, per ogni valore del Tr, sono quelle ottenute per il settore di traversia principale.

Al fine di dimensionare correttamente l'opera in progetto è stato determinato, secondo le *Istruzioni Tecniche Italiane per la Progettazione delle dighe marittime* (1996) del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, un periodo di ritorno di 154 anni. Per una ragionevole scelta dell'onda di progetto si è ritenuto opportuno considerare anche la direzione di provenienza dell'evento di mareggiata sopramenzionata. Questa infatti è stata caratterizzata da un'altezza d'onda significativa massima pari a 6.7 m, un periodo di picco pari a 11.2 s e una direzione media di provenienza pari a circa 215°N (settore Libeccio) che è stato possibile stimare analizzando i dati acquisiti per il punto P2 di largo. Lo stesso evento di mareggiata

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



nel punto P1 interno al golfo ha presentato un valore dell'altezza significativa massima pari a 6.51 m ed un periodo di picco pari a 11 s. A valle dei calcoli svolti ed in seguito delle propagazioni (PD_SR_Studio di propagazione ondosa) delle onde relative al punto P1, in ragione di quanto detto a proposito della mareggiata di riferimento, è stata scelta come onda di progetto quella proveniente dal settore di traversia principale (195°N -225°N), assegnandole cautelativamente una direzione media di provenienza pari al limite inferiore del settore stesso (Tabella 8).

**Tabella 7.** Valori estremi di altezza d'onda nel punto P1, divisi per tipologia di analisi e periodi di ritorno – soglia di troncamento pari a 2.5 m.

| | | **Hs [m]** | | |
|---|---|---|---|---|
| **Tr [anni]** | **Ptr** | Settore 195°N - 225°N | Settore 135°N -195°N | Omnidirezionale |
| 5 | 0.800 | 3.85 | 3.18 | 3.80 |
| 10 | 0.900 | 4.39 | 3.46 | 4.33 |
| 50 | 0.980 | 5.88 | 4.16 | 5.78 |
| 100 | 0.990 | 6.65 | 4.50 | 6.53 |
| **154** | **0.994** | **7.18** | **4.73** | **7.05** |

**Tabella 8.** Caratteristiche dell'onda di progetto per il dimensionamento delle opere, corrispondente ad un periodo di ritorno pari a 154 anni.

| **Hs [m]** | **Tp [s]** | **Dir [°N]** |
|---|---|---|
| 7.18 | 11.5 | 195 |

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



# 5. APPENDICE

**DICCA MeteOcean Re-Analysis 1979-2017**

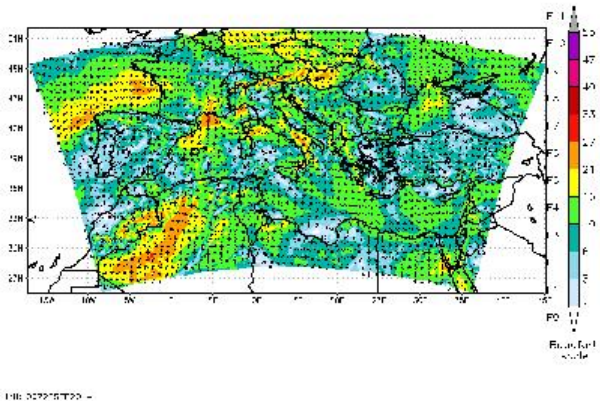
The MeteOcean group at DICCA has performed a re-analysis of atmospheric and wave conditions, producing an hindcast database spanning from January 1979 till the end of December 2017 over the domain employed for the atmospherical and wave condition simulations.

The hindcast dataset for wave characteristics can be employed for Coastal and Ocean Engineering studies and researches. DICCA MeteOcean group is willing to collaborate and share its knowledge for research and consulting projects.

Meteorological re-analyses have been developed employing NCEP Climate Forecast System Reanalysis, CFSR for the period from January 1979 to December 2010 and CFSv2 for the period January 2011 to December 2018.

**The numerical models**

The numerical model chain employed in this study consists in a meteorological model for the reanalysis and simulation of winds and atmospheric fields and a third generation model for the description of generation and propagation of wind and swell waves in the Mediterranean basin.



WRF simulation domain

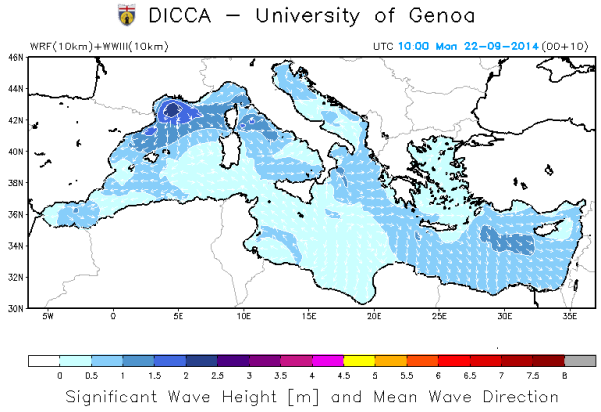
**The wind model**

The wind forcing employed in the simulations has been provided by the 10-m wind fields obtained using the non-hydrostatic mesoscale model WRF-ARW version 3.3.1 (Skamarock et al., 2008). A single computational domain has been implemented for the WRF model, covering the whole Mediterranean with a ~10 km resolution Lambert conformal grid.

Initial and boundary conditions for the atmospheric simulations with the WRF model were provided from the CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) database (Saha et al., 2010). Use of CFSR wind field reanalysis for wave modeling proved to compare well with measurements even though sometimes it is possible to miss the highest wave events (e.g. Chawla et al., 2013; Cox et al., 2011; Splinder et al., 2011).

Simulations has been performed by means of 24-hr-long WRF simulations, with outputs saved every hour, updating the analysis every 24 hours, whereas the boundary conditions were imposed every three hours. This kind of approach leads to unavoidable discontinuities in the wind fields every 24 hours. However, we believe that this is a minor drawback since the influence of such discontinuity on the wave field is reasonably small due to the delayed response of wave growth and development to the wind forcing.

On the other way, making a continuous WRF simulation would certainly trigger signicant errors in the wind output, since longer term forecasts progressively drift away from reality, compensating the advantage of eliminating discontinuities.




WavewatchIII simulation domain

Comune di Santa Margherita Ligure, Prot. N. 0009218 del 13-03-2019 in arrivo



**The wave model**

The re-analysis of wave conditions relies on the third generation wave model WavewatchIII, version 3.14 (Komen et al., 1994; Tolman, 2009), for the description of wave generation and evolution processes of the wave field.

Following the set-up employed for wind simulations, WWIII has been implemented in the Mediterranean basin on a regular grid (hereinafter referred to as R10) with a resolution of 0.1273×0.09 degrees, corresponding almost to 10 km at the latitude of 45°N, and ETOPO1 data has been used for the interpolation on the computational grid of the bathymetry.

The model has been forced with the wind fields obtained from the atmospheric model with an hourly time step.

Validation of the hindcast has been developed through the comparison between the numerical results and wave buoy observations, employing integrated parameters such as the significant wave height $H_s$, the mean wave period $T_m$ and the mean propagation direction $\vartheta_m$ (see Mentaschi et al., 2013; Mentaschi et al., 2015).

Re-analysis simulations output are recorded hourly in all points of the computation grid for both meterological and wave quantities.

**Coastal and Ocean Engineering Applications**

Hindcast dataset can be used in order to perform researches and studies in the field of Coastal and Ocean Engineering. The availability of an extended time serie with a good spatial resolution allows in fact to have a detailed and reliable knowledge of wave climate in any point of the numerical domain (i.e. inside the Mediterranean Sea).

It is then possible to perfom all kind of analysis on the wave data for Metocean Engineering purposes, ranging from offshore structure design to coastal morphodynamics studies.