

**F. PASANISI, C. TEBANO**

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali  
Divisione Modelli e tecnologie per la riduzione  
degli impatti antropici e dei rischi naturali  
Laboratorio Ingegneria sismica e prevenzione dei rischi naturali  
Centro Ricerche Portici, Napoli

## **CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA ONDOSO AL LARGO DI DUE SITI COSTIERI SICILIANI**

RT/2017/23/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

F. PASANISI, C. TEBANO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali  
Divisione Modelli e tecnologie per la riduzione  
degli impatti antropici e dei rischi naturali  
Laboratorio Ingegneria sismica e prevenzione dei rischi naturali  
Centro Ricerche Portici, Napoli

## CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA ONDOSONO AL LARGO DI DUE SITI COSTIERI SICILIANI

RT/2017/23/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA ONDOSO AL LARGO DI DUE SITI COSTIERI SICILIANI

F. Pasanisi, C. Tebano

### Riassunto

Sono presentati i risultati degli studi finalizzati alla caratterizzazione del clima ondoso al largo dei siti di Palermo e di Augusta-Priolo, sulla costa della Sicilia. Le attività descritte sono state condotte nell'ambito del Progetto PON R&C "Marine Hazard". I dati ondametrici di largo sono stati ricavati dalle misure registrate alle stazioni di Palermo e Catania della Rete Ondametrica Nazionale. I dati sono stati analizzati per ricavare informazioni sul clima ondoso medio annuo di largo. Successivamente, è stata condotta un'analisi statistica degli eventi estremi per stimare le altezze d'onda attese al variare del periodo di ritorno.

**Parole chiave:** Onde di largo, clima ondoso medio annuo, onde estreme.

### Abstract

*Results of investigations aimed at characterization of the offshore wave climate at Palermo and Augusta-Priolo sites, along the coast of Sicily, are presented. The activities reported were performed in the framework of the PON R&C Project "Marine Hazard". Offshore wave data were derived from the measurements taken at the Palermo and Catania gauging stations of the Italian Data Buoy Network (RON). Wave data were analyzed to derive information on the offshore mean annual wave climate. Then, a statistical analysis of extreme events was performed to estimate expected wave heights for different return periods.*

**Keywords:** *Offshore waves, mean annual wave climate, extreme waves.*



# INDICE

1. PREMESSA	7
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	8
3. ACQUISIZIONE E SELEZIONE DEI DATI ONDAMETRICI	10
3.1 Metodi indiretti	10
3.2 Metodi diretti	13
3.3 Trasposizione geografica delle misure ondametriche	14
3.4 Procedura automatizzata per la trasposizione geografica	15
3.5 Criteri di scelta per le fonti di dati ondametrici	17
4. CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA ONDOSI DI LARGO	18
4.1 Dati ondametrici utilizzati	18
4.2 Fetch geografici ed efficaci	19
4.3 Clima ondoso medio al largo del sito di Palermo	22
4.4 Clima ondoso medio al largo del sito di Augusta-Priolo	22
5. ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI	26
5.1 Metodologia	26
5.2 Elaborazioni per il sito di Palermo	30
5.3 Elaborazioni per il sito di Augusta-Priolo	38
6. BIBLIOGRAFIA	48



## 1. PREMESSA

Nel presente rapporto sono descritti gli studi condotti per la caratterizzazione del clima ondoso al largo dei siti di Palermo e di Augusta-Priolo, lungo la costa siciliana.

Le attività svolte si inquadrano nell'ambito del Progetto *PON Ricerca e Competitività* "Marine Hazard - Sviluppo di tecnologie innovative per l'identificazione, monitoraggio e mitigazione di fenomeni di contaminazione naturale e antropica", autorizzato da ENEA con Determinazione n. 56/2016/SSPT-PROTER del 23/03/2016.

In particolare, l'obiettivo realizzativo OR.4 "Messa a punto di tecnologie e strategie gestionali per la salvaguardia e il restauro ambientale delle praterie di *Posidonia oceanica*" prevede, tra le varie attività, la caratterizzazione del regime idrodinamico indotto dal moto ondoso in siti campione indicati come potenzialmente idonei ad ospitare interventi di ripristino della prateria di *Posidonia oceanica*.

Si è proceduto, pertanto, alla preliminare caratterizzazione del clima ondoso al largo delle aree individuate. Tali attività costituiscono il primo passo dello studio idrodinamico, propedeutico alle elaborazioni successive previste nel Progetto.

Sulla base di quanto sopra specificato, è doveroso evidenziare che le attività descritte nel presente rapporto sono state condotte esclusivamente a scopo di ricerca scientifica e tecnologica, ai fini dello sviluppo del Progetto "Marine Hazard". Al di fuori di tale ambito, i risultati presentati devono essere intesi come puramente indicativi delle caratteristiche generali dei siti investigati ed il loro eventuale uso per qualsiasi scopo è da considerarsi a discrezione e sotto l'esclusiva responsabilità dell'utilizzatore.

In particolare, il contenuto del presente rapporto non può essere inteso come sostitutivo o integrativo di studi specialistici o di documentazione a supporto di interventi di pianificazione o progettazione a qualsiasi livello.

## 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Le due aree oggetto di studio sono localizzate sulla costa siciliana. La prima area si trova nel Golfo di Palermo, che si affaccia sul Mar Tirreno lungo la costa settentrionale dell'isola; la seconda area (Augusta-Priolo) è situata sulla costa orientale della Sicilia e si affaccia sul Mar Ionio.

In Fig. 1 si può osservare l'inquadratura geografica generale delle aree di studio.

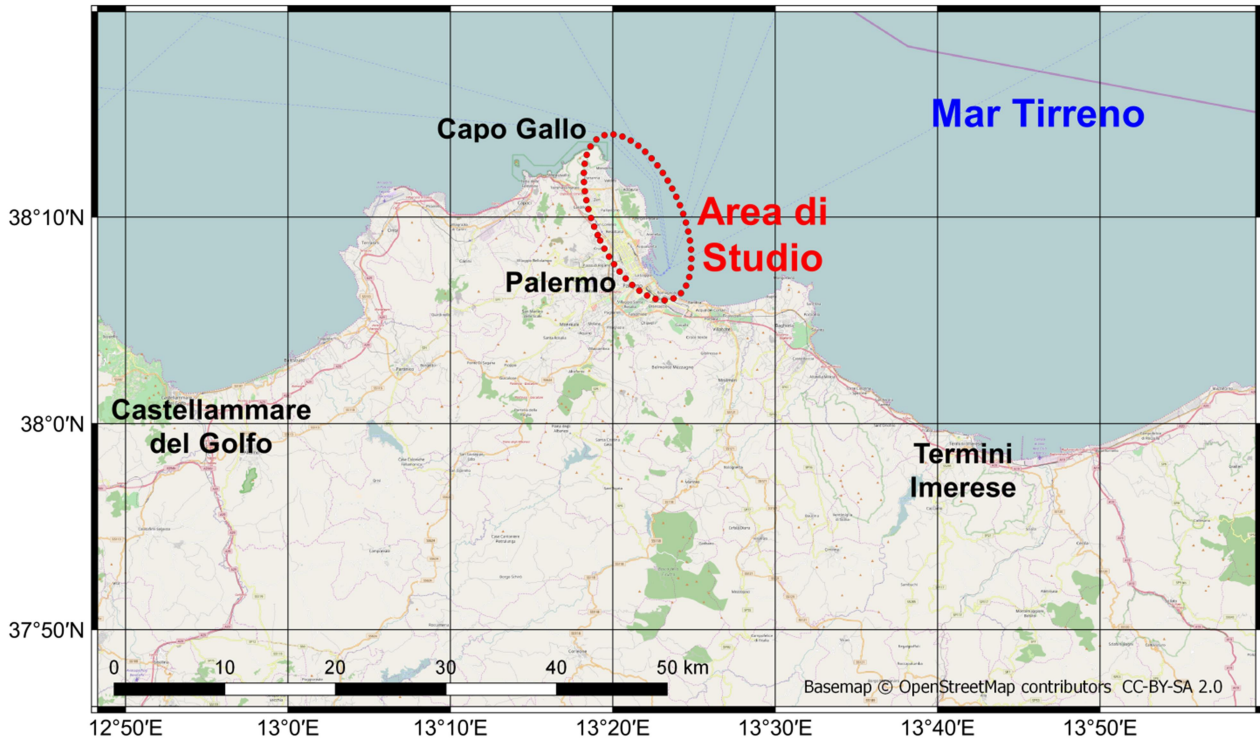


*Figura 1. Inquadratura geografica delle aree di studio. Coordinate riferite al sistema WGS84, EPSG 4326. Basemap © OpenStreetMap contributors, licenza CC-BY-SA 2.0*

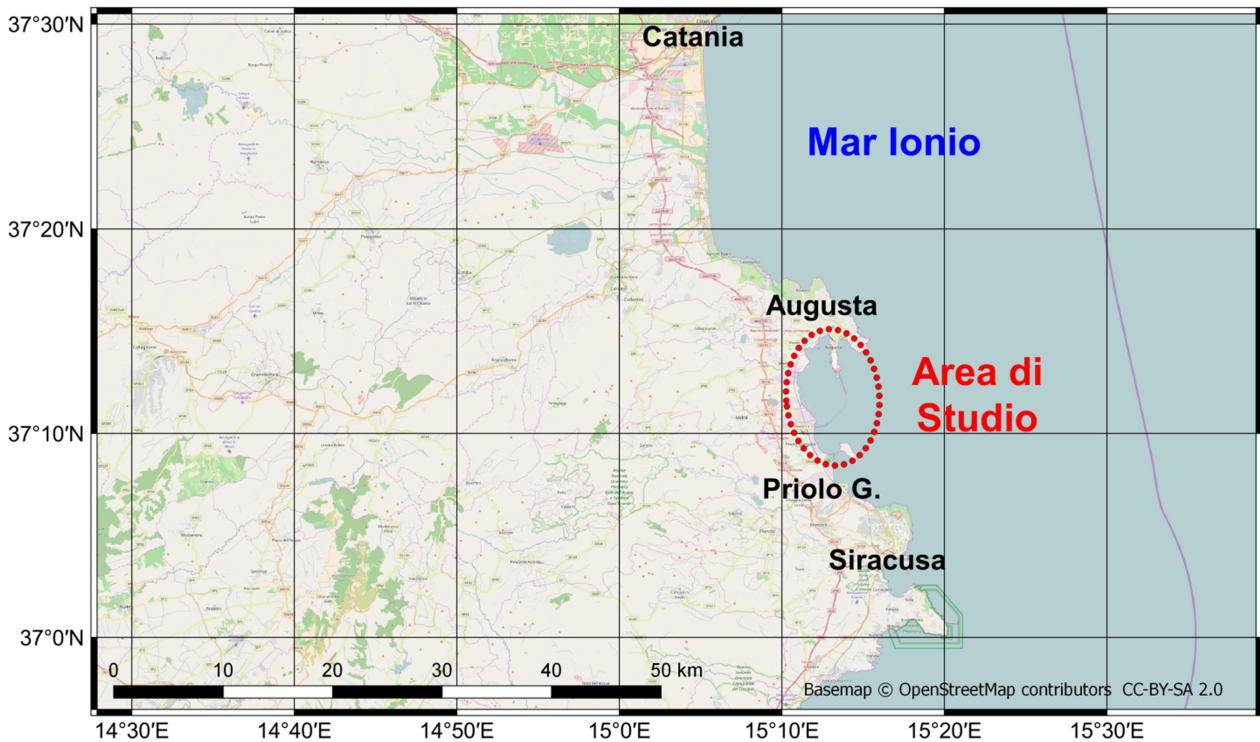
Come illustrato in Fig. 2, l'area di studio di Palermo comprende un tratto di costa di lunghezza circa 20 km, da Capo Gallo fino, orientativamente, alla parte centrale del Golfo di Palermo, subito a Est delle opere che delimitano l'area portuale. Per effetto della configurazione della costa, il sito risulta esposto alla traversia ondosa proveniente dai settori settentrionali.

La seconda area di studio è illustrata in Fig. 3. Essa comprende il tratto di costa che si estende, orientativamente, in direzione Nord-Sud per circa 15 km tra la Rada di Augusta ed il Seno di Priolo. Tale area costiera si trova all'interno del Sito di Interesse Nazionale (SIN) di Priolo, che si estende per circa 30 km lungo la fascia costiera dei comuni di Augusta, Melilli, Priolo Gargallo e Siracusa. Il sito è esposto alle onde provenienti dai quadranti orientali.

Le considerazioni precedenti relative alla traversia ondosa saranno meglio chiarite nella sezione dedicata alla misura dei fetch geografici ed efficaci.



*Figura 2. Particolare dell'area di studio di Palermo. Coordinate riferite al sistema WGS84, EPSG 4326*



*Figura 3. Particolare dell'area di studio di Augusta-Priolo. Coordinate riferite al sistema WGS84, EPSG 4326*

### 3. ACQUISIZIONE E SELEZIONE DEI DATI ONDAMETRICI

Il primo passo nello studio del clima ondoso di un paraggio è l'acquisizione di una serie statisticamente significativa di dati storici rappresentativi delle onde incidenti al largo di esso.

I dati vengono poi elaborati per ricostruire sia il clima ondoso medio annuo, normalmente espresso in termini di frequenza media associata a classi di direzioni e altezze d'onda, sia le condizioni ondose estreme attese per determinati valori del periodo di ritorno, utilizzando adeguate funzioni di distribuzione probabilistica.

I dati ondametrici possono essere ottenuti utilizzando metodi differenti, riconducibili, in generale, a due grandi famiglie:

1. metodi indiretti, ovvero metodi empirici e modelli matematici in cui le caratteristiche del moto ondoso vengono ricostruite a partire da dati anemometrici. Il processo è indicato normalmente con i nomi di *forecasting* o *hindcasting* [1], rispettivamente, quando vengono elaborate misure attuali o previsioni di vento, ovvero quando vengono processati dati storici per la ricostruzione di una serie temporale di condizioni ondametriche;
2. metodi diretti, ovvero la misura in sito dei parametri ondosi in stazioni prossime all'area di studio.

#### 3.1 Metodi indiretti

Storicamente, i metodi per la stima indiretta dei parametri ondosi (altezza, periodo e direzione) a partire dai dati anemometrici si sono diffusi prima delle misure dirette del moto ondoso, che necessitano di una tecnologia più evoluta rispetto alle misure di vento.

I primi metodi empirici in tale ambito sono stati sviluppati negli Stati Uniti a partire dal secondo conflitto mondiale, inizialmente per scopi militari. Tali metodi si basano sullo studio della crescita e della dissipazione delle onde per effetto del trasferimento di energia dal vento al mare, accoppiato ad osservazioni sperimentali, dalle quali sono state derivate formule di natura empirica [1–3].

Tra i metodi empirici noti in letteratura, il più largamente adottato, ed ancora oggi in uso, è il metodo SMB [4], così chiamato dal nome degli autori Sverdrup, Munk e Bretschneider. Utilizzando tale metodo, con riferimento alle condizioni di profondità illimitata e nell'ipotesi di un evento meteorologico in cui il vento soffia con velocità e direzione costante, i parametri ondosi sono legati alle caratteristiche del vento dalle seguenti equazioni:

$$\frac{g H_m}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{g T_p}{U_A} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\frac{g t}{U_A} = 68.8 \cdot \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

in cui i simboli hanno il seguente significato:

- $H_m$  = altezza d'onda significativa spettrale;
- $T_p$  = periodo di picco spettrale dell'onda;
- $F$  = “fetch” associato alla direzione da cui proviene il vento, come definito nel seguito;
- $U_A$  = “wind stress factor”, che esprime una misura della velocità del vento;
- $t$  = durata dell'evento meteorologico.

Il fetch viene definito come l'estensione lineare, misurata lungo la direzione del vento, di un tratto di mare ideale di forma rettangolare su cui il vento soffia con velocità e direzione costante. Tale grandezza esprime quantitativamente l'esposizione di un paraggio alla traversia ondosca proveniente da una determinata direzione.

L'equazione (3), noto il fetch  $F$ , restituisce il valore minimo della durata  $t_{min}$  al di sopra del quale si può ipotizzare che la trasmissione di energia dal vento al mare non dipenda più dalla durata stessa. Se la durata  $t$  dell'evento meteorologico è maggiore di  $t_{min}$  (condizioni stazionarie o “limitate dal fetch”) l'altezza ed il periodo dell'onda risultanti possono essere calcolati direttamente utilizzando, rispettivamente, la (1) e la (2). Nel caso, invece, in cui risulta  $t < t_{min}$  (condizioni non stazionarie o “limitate dalla durata”) è necessario calcolare, utilizzando la (3), il fetch ridotto  $F_t$  per il quale è verificata la condizione  $t = t_{min}$ . Tale valore del fetch, evidentemente inferiore al fetch reale  $F$ , viene poi utilizzato nelle (1) e (2) per determinare  $H_m$  e  $T_p$ .

Le formule presentate si riferiscono a condizioni ideali. Nella realtà, le condizioni meteorologiche variano da punto a punto e l'area di generazione delle onde ha una forma diversa da quella rettangolare, rendendo necessarie ulteriori ipotesi e formulazioni correttive.

Per quanto riguarda le condizioni meteo, si può ragionevolmente assumere che l'ipotesi di vento uniforme nel corso di un singolo evento sia verificata per aree di generazione di una limitata estensione superficiale e confinate dalla costa (es. laghi o insenature). Il fetch associato ad una determinata direzione del vento può essere quindi misurato semplicemente tracciando una linea retta orientata secondo la direzione del vento fino al limite geografico costituito dalla più vicina costa sopravvento. Il fetch così calcolato viene definito “fetch geografico”. Tali considerazioni possono essere considerate valide anche per l'intero bacino del Mare Mediterraneo; tuttavia, per tenere conto dell'ampiezza delle perturbazioni che originano i venti nei nostri mari, si fissa un limite massimo all'estensione dei fetch geografici, normalmente pari a 500 km.

Per quanto riguarda la forma dell'area di generazione, in letteratura sono state proposte differenti formulazioni correttive rispetto all'ipotesi di fetch uniforme. Tali formulazioni, di natura teorica e sperimentale, tengono conto anche del fatto che, nel processo di generazione e propagazione delle onde, l'energia trasmessa dal vento non si distribuisce su una singola direzione, ma lungo un settore direzionale di ampiezza finita (*directional spreading*). È stato introdotto, pertanto, il concetto di “fetch efficace” [5,6], che, nella sua forma più generale, è espresso dalla formula:

$$F_{eff} = \frac{\sum_{i=-\theta_w}^{\theta_w} F_i \cdot (\cos \theta_i)^{n+1}}{\sum_{i=-\theta_w}^{\theta_w} (\cos \theta_i)^n} \quad (4)$$

in cui:

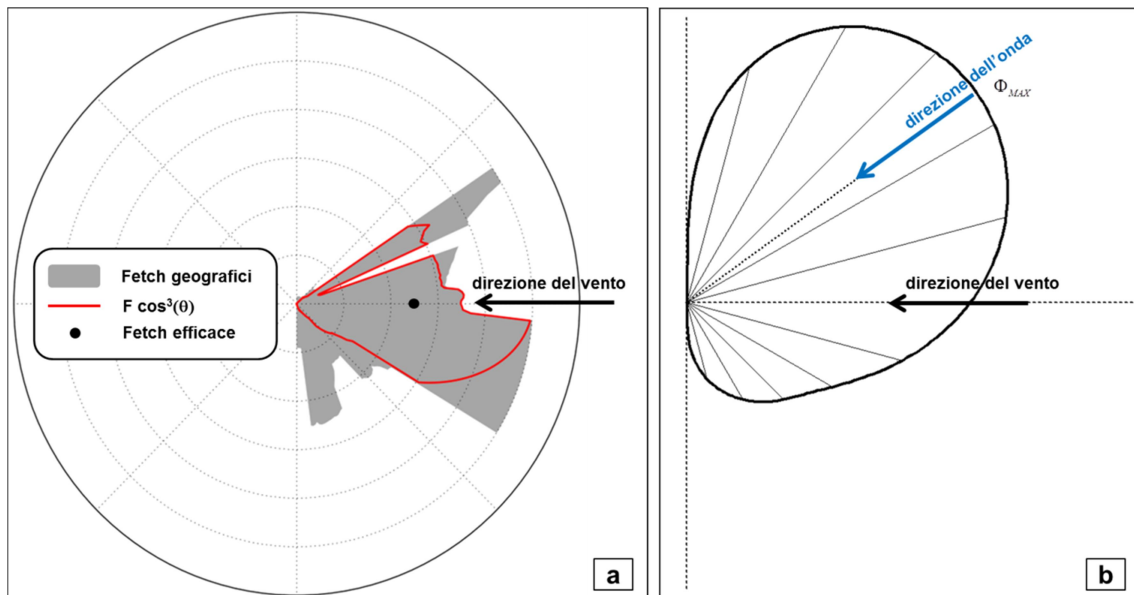
- $F_{eff}$  = fetch efficace relativo alla direzione media di provenienza del vento  $\theta$ ;
- $\theta_w$  = semi-ampiezza del settore direzionale, centrato sulla direzione  $\theta$ , all'interno del quale si distribuisce l'energia ondosa; a seconda delle formulazioni, si considerano normalmente settori di ampiezza  $90^\circ$  ( $\theta_w = 45^\circ$ ) o di  $180^\circ$  ( $\theta_w = 90^\circ$ );
- $\theta_i$  = angolo rispetto alla direzione del vento, variabile nell'intervallo  $[-\theta_w, \theta_w]$ ;
- $F_i$  = fetch geografico misurato lungo la direzione di angolo  $\theta_i$  rispetto al vento;
- $n$  = esponente che tiene conto della legge che descrive la dispersione direzionale dell'energia ondosa; valori tipicamente utilizzati sono  $n=1$  o  $n=2$ .

Un'altra conseguenza della dispersione direzionale è che la direzione media di propagazione del moto ondoso non coincide necessariamente con la direzione del vento che lo ha generato. Tra i vari lavori riportati in letteratura, si fa normalmente riferimento agli studi di Donelan [7], ripresi successivamente da Smith [8], secondo cui, con riferimento alla simbologia usata in precedenza, l'angolo tra la direzione del moto ondoso risultante e la direzione del vento è quello, all'interno dell'intervallo  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , a cui corrisponde il valore massimo della funzione:

$$\Phi(\theta_i) = (\cos\theta_i)^{0.44} \cdot (F_i)^{0.28} \quad (5)$$

Nelle applicazioni pratiche [9], gli angoli ed i relativi fetch nelle formule (4) e (5) vengono discretizzati, tipicamente con un passo di  $1^\circ$ .

Le funzioni presentate nelle formule (4) e (5) sono illustrate graficamente in Fig. 4.



**Figura 4.** a) Stima del fetch efficace: in grigio sono riportati i fetch geografici, in rosso i contributi al fetch efficace corrispondenti ad un settore di  $180^\circ$  centrato sulla direzione del vento. b) Stima della deviazione tra la direzione del vento e la direzione dell'onda attraverso la massimizzazione della funzione (5)

Accanto ai metodi empirici descritti in precedenza, sono stati sviluppati modelli matematici in grado di simulare il processo di generazione del moto ondoso a partire dalle caratteristiche del vento. In tali modelli, il

meccanismo di trasferimento di energia dal vento al mare, insieme ai fenomeni dissipativi, viene descritto tramite equazioni che vengono integrate numericamente [10–12].

L'interesse per questi modelli è andato notevolmente crescendo negli ultimi decenni, di pari passo con lo sviluppo delle capacità di calcolo e con la disponibilità di dati meteorologici [13,14] ed esiste un'estesa letteratura sull'argomento. Tuttavia, dal momento che in questo studio non sono stati utilizzati modelli matematici di previsione ondosa, una loro disamina esula dagli scopi del presente rapporto.

### 3.2 Metodi diretti

Le più antiche stime dirette del moto ondoso di cui si ha notizia sono le osservazioni visive da navi in transito o da stazioni di osservazione costiere fisse. Tali osservazioni, di solito discontinue ed inevitabilmente affette da un elevato grado di soggettività, vengono citate solo per interesse storico.

Le prime misure strumentali delle caratteristiche ondose attraverso una boa si possono fare risalire agli anni '60 dello scorso secolo. Nel corso degli anni successivi, la ricerca scientifica e tecnologica e l'industria hanno reso disponibili metodologie e strumenti via via più affidabili, basati su varie formulazioni teoriche e con differenti modalità operative.

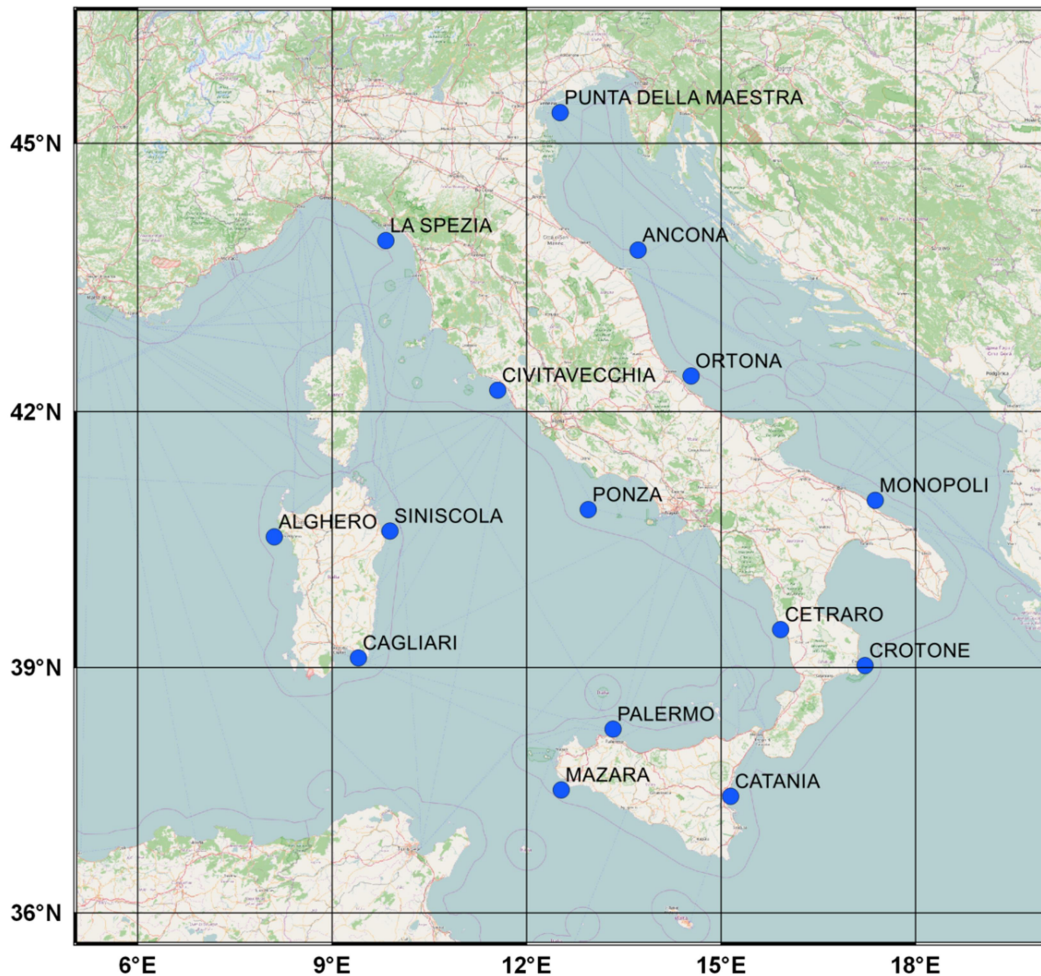
In generale, i metodi disponibili per la misura in sito delle caratteristiche ondose [15] possono essere compresi in tre grandi categorie:

- 1) misure condotte al di sotto della superficie marina, ad esempio mediante trasduttori di pressione o correntometri acustici Doppler;
- 2) misure condotte sulla superficie marina, ad esempio mediante piattaforme, pali o boe ondometriche;
- 3) misure condotte al di sopra della superficie marina, ad esempio mediante tecniche Radar, o Lidar, o tramite l'utilizzo di osservazioni satellitari.

L'esigenza di disporre di serie continue di misure ondometriche condotte con regolarità secondo standard assegnati ha portato, in varie nazioni, alla nascita di reti di misura distribuite lungo le coste, tipicamente gestite da autorità pubbliche. Le prime esperienze riportate in letteratura sono relative agli Stati Uniti, ed in particolare alla costa pacifica, lungo cui, nella metà degli anni '70 dello scorso secolo, fu installato il primo nucleo della rete di monitoraggio nota come *CDIP-Coastal Data Information Program* [16].

In Italia, la Rete Ondometrica Nazionale (RON), gestita da ISPRA, è stata inaugurata nel luglio 1989 [17]. Nella sua configurazione iniziale, la rete era costituita da 8 boe direzionali, dislocate su una profondità di circa 100 m, al largo dei siti di La Spezia, Alghero, Ortona, Ponza, Monopoli, Crotone, Catania e Mazara del Vallo. I dati venivano registrati per circa 30 minuti ogni 3 ore, con la possibilità di intervalli più piccoli in occasione di mareggiate più intense.

Nel corso degli anni, la RON è stata progressivamente estesa con l'aggiunta di ulteriori stazioni di misura ed aggiornata con l'adozione di più moderne tecniche di misura, posizionamento e gestione dei dati [18,19]. Attualmente, la rete è costituita da 15 boe ondometriche che consentono una copertura sufficientemente dettagliata delle coste italiane. La posizione delle stazioni è illustrata in Fig. 5.



*Figura 5. Stazioni di misura della Rete Ondametrica Nazionale. Coordinate riferite al sistema WGS84, EPSG 4326. Basemap © OpenStreetMap contributors, licenza CC-BY-SA 2.0*

### 3.3 Trasposizione geografica delle misure ondametriche

Il metodo della trasposizione geografica delle misure ondametriche, formulato da Contini e De Girolamo [20], permette, una volta note le caratteristiche ondose registrate in una stazione di misura, di stimare le caratteristiche ondose in una stazione “virtuale” posta al largo del paraggio che si vuole investigare.

Le ipotesi alla base del metodo sono elencate nel seguito:

- 1) le aree di generazione delle onde al largo della stazione di misura reale e della stazione di misura virtuale sono interessate, per ciascun evento registrato, dalle medesime condizioni di vento. Tale ipotesi si può considerare valida se i due siti sono sufficientemente prossimi tra di loro e, in particolare, se presentano una esposizione simile alla traversia ondosa;
- 2) l'estensione delle aree di generazione al largo dei due siti è descritta attraverso il criterio del fetch efficace, come definito in precedenza;
- 3) per ciascuno degli eventi ondosi registrati, la generazione dell'onda non dipende dalla durata del vento. Con riferimento alla terminologia relativa al metodo SMB, si ipotizza cioè che gli eventi siano limitati dal valore del fetch.

Nelle ipotesi introdotte, in base al metodo SMB l'altezza ed il periodo significativo dell'onda possono essere stimati in funzione del fetch e del *wind stress factor* utilizzando le equazioni (1) e (2). Dal momento che le condizioni di vento ai due siti sono le stesse, dividendo membro a membro le suddette equazioni scritte per la stazione reale e la stazione virtuale, si ottengono le due equazioni:

$$\frac{(H_m)_V}{(H_m)_R} = \left( \frac{F_V}{F_R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\frac{(T_p)_V}{(T_p)_R} = \left( \frac{F_V}{F_R} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Nelle formule (6) e (7) i pedici *V* e *R* si riferiscono, rispettivamente, alla stazione virtuale ed alla stazione reale. I fetch  $F_V$  e  $F_R$  sono i fetch efficaci calcolati alle due stazioni utilizzando la formula (4). I rapporti che compaiono a secondo membro nelle due formule sono definiti "coefficienti di trasposizione", e consentono di ricavare il valore dell'altezza e del periodo significativo alla stazione virtuale corrispondenti alle registrazioni effettuate alla stazione di misura reale.

Per applicare correttamente il metodo di trasposizione è necessario, per il singolo evento, considerare la direzione del vento che ha generato l'onda a cui si riferisce la registrazione. Questa grandezza normalmente non è nota, ma può essere stimata massimizzando la funzione (5) introdotta in precedenza.

La procedura da seguire prevede, pertanto, i seguenti passi:

- 1) calcolo dei fetch geografici ed efficaci alla stazione di misura reale ed alla stazione virtuale, per ciascuna possibile direzione del vento;
- 2) calcolo dei coefficienti di trasposizione delle altezze e dei periodi, utilizzando la (6) e la (7), per ciascuna possibile direzione del vento;
- 3) acquisizione dei dati ondametrici di altezza, periodo e direzione di provenienza dell'onda relativi all'evento considerato;
- 4) stima della direzione del vento alla stazione reale a partire dalla direzione dell'onda, massimizzando la funzione (5) per i vari valori dei fetch efficaci  $F_R$ ;
- 5) stima dell'altezza e del periodo dell'onda alla stazione virtuale, utilizzando i coefficienti di trasposizione relativi alla direzione del vento calcolata al punto precedente;
- 6) stima della direzione dell'onda alla stazione virtuale a partire dalla direzione del vento, massimizzando la funzione (5) per i vari valori dei fetch efficaci  $F_V$ .

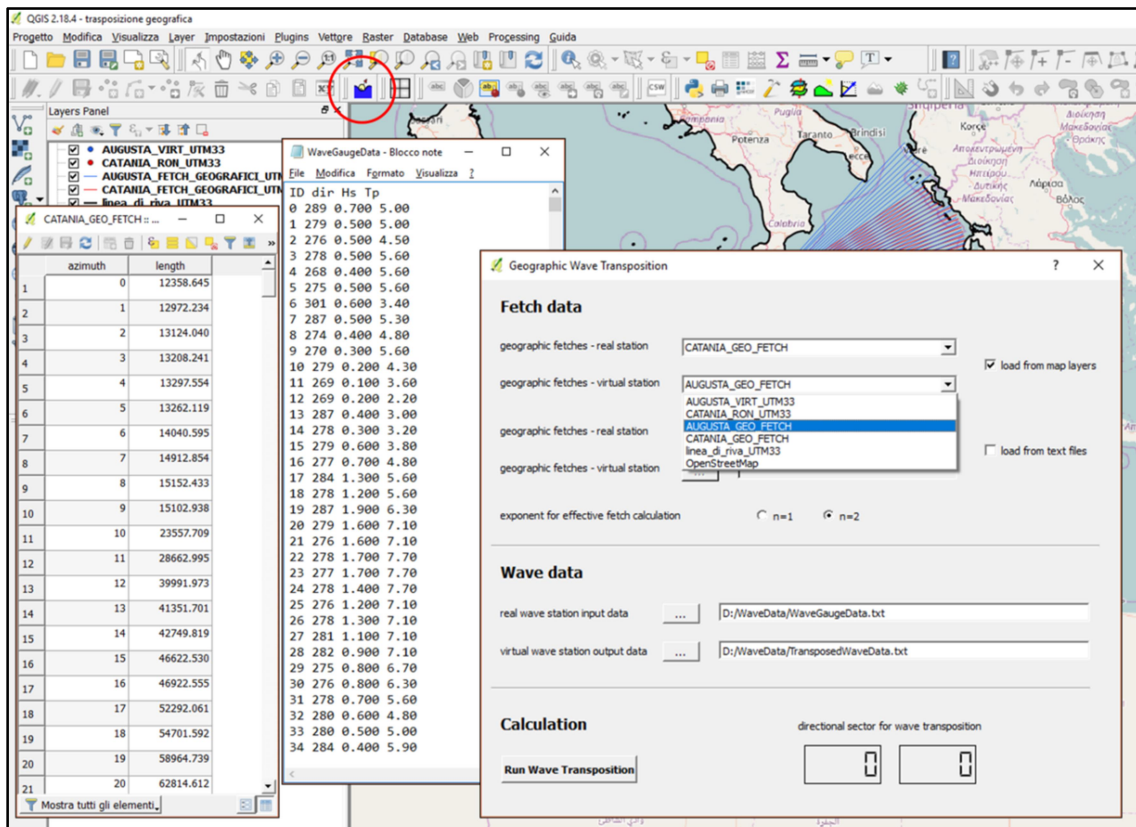
Pertanto, una volta che siano verificate le ipotesi di base, applicando la procedura specificata a tutti i dati ondametrici disponibili è possibile ricostruire, con un processo di *hindcasting*, una serie di misure virtuali al largo del paraggio di interesse.

### 3.4 Procedura automatizzata per la trasposizione geografica

Il metodo di trasposizione geografica è universalmente apprezzato e largamente utilizzato tra i professionisti ed i ricercatori che operano nei settori della dinamica dei litorali e dell'ingegneria marittima e costiera.

Il metodo presenta una relativa semplicità concettuale, anche se nelle applicazioni pratiche, in cui normalmente vengono processate serie storiche costituite da un elevato numero di dati, l'onere di calcolo può essere considerevole.

Pertanto, è stato recentemente sviluppato l'applicativo QWaveTransposition [21], che opera come una plugin del software QGIS [22], tra i più diffusi Sistemi Informativi Geografici liberi ed *open source* attualmente disponibili. La scelta della piattaforma QGIS è stata dettata dall'esigenza di coniugare le potenzialità del GIS in termini di cartografia, gestione dei dati e geo-processing con la possibilità di implementare applicazioni specifiche sfruttando l'ambiente di sviluppo Python, che è automaticamente integrato in QGIS.



**Figura 6.** Utilizzo della plugin QWaveTransposition per la trasposizione geografica dei dati ondametrici. L'icona corrispondente è evidenziata nel cerchio di colore rosso. Basemap © OpenStreetMap contributors, licenza CC-BY-SA 2.0

L'applicazione è dotata di un'interfaccia grafica (GUI) per la gestione dei dati di input e output e la definizione dei principali parametri di calcolo (Fig. 6). In particolare, l'interfaccia è costituita da tre sezioni, come specificato nel seguito.

- 1) **FETCH DATA.** In questa sezione vengono inseriti i dati relativi ai fetch geografici misurati alla stazione reale ed alla stazione virtuale. I dati possono essere caricati selezionando dai layer presenti nella mappa gli shape file contenenti i fetch discretizzati ad intervallo  $1^\circ$  sull'intero settore di ampiezza  $360^\circ$ , secondo la convenzione nautica. Alternativamente, è possibile specificare il percorso di un file di testo in cui per ciascun valore dell'azimut nell'intervallo  $0-360^\circ$  è specificata la lunghezza del fetch. Infine, l'utente seleziona il valore dell'esponente  $n$  da utilizzare nella formula (4) per il calcolo dei fetch efficaci.

- 2) **WAVE DATA.** In questa sezione l'utente specifica i percorsi del file di input contenente i dati ondametrici registrati alla stazione di misura e del file di output contenente la serie ondametrica trasposta alla stazione virtuale. I dati di input/output sono file di testo in cui a ciascuna riga corrisponde un evento, identificato da un numero progressivo, seguito dai valori di direzione, altezza e periodo dell'onda.
- 3) **CALCULATION.** Una volta specificati tutti i parametri, può essere eseguita la trasposizione. L'applicazione calcola preliminarmente i fetch efficaci alle due stazioni e gli angoli di deviazione tra le direzioni del vento e del mare. I fetch efficaci sono calcolati adottando un settore direzionale di ampiezza 180°. Successivamente, viene applicata la procedura di trasposizione a ciascuna registrazione ondametrica. La serie ondametrica trasposta viene trascritta nel file di output al termine dell'elaborazione.

Ulteriori file di output restituiscono i valori dei fetch e degli angoli di deviazione tra la direzione del vento e quella delle onde.

### **3.5 Criteri di scelta per le fonti di dati ondametrici**

La scelta della fonte dei dati ondametrici di largo costituisce, evidentemente, un momento fondamentale dello studio meteomarinario di un paraggio. In particolare, nei casi in cui sono disponibili più sorgenti di dati, anche di diversa natura, la scelta è delicata e, in generale, non può essere definito un criterio univoco di selezione.

Un primo fondamentale requisito è costituito dalla necessità di disporre di un campione sufficientemente numeroso di dati, distribuiti in un intervallo temporale statisticamente significativo ai fini delle elaborazioni.

Nel caso in cui si utilizzano dati ricavati da misure strumentali, sia direttamente, sia attraverso metodi di ricostruzione indiretta, tra i vari aspetti da prendere in considerazione si segnalano:

- significatività della stazione di misura rispetto al sito da investigare, considerando la posizione geografica e l'esposizione alla traversia ondosia;
- durata della serie e frequenza delle misure;
- accuratezza e precisione dello strumento, e modalità di validazione dei dati;
- efficienza della rete di misura, considerando gli episodi di fuori servizio per manutenzione o eventuali malfunzionamenti dovuti a cause di diversa natura.

Se si utilizzano metodi di ricostruzione indiretta del moto ondoso, occorre portare in conto anche le incertezze legate alla schematizzazione del processo di generazione delle onde tramite metodi empirici o modelli matematici. In particolare, nel caso dei modelli matematici, è importante considerare la risoluzione della griglia di calcolo, la frequenza temporale degli output e le modalità di acquisizione dei dati di input.

Evidentemente, la scelta dipende, oltre che dal giudizio soggettivo di chi esegue lo studio, dal particolare sito da investigare, che condiziona in modo decisivo la disponibilità dei dati.

## 4. CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA ONDOSO DI LARGO

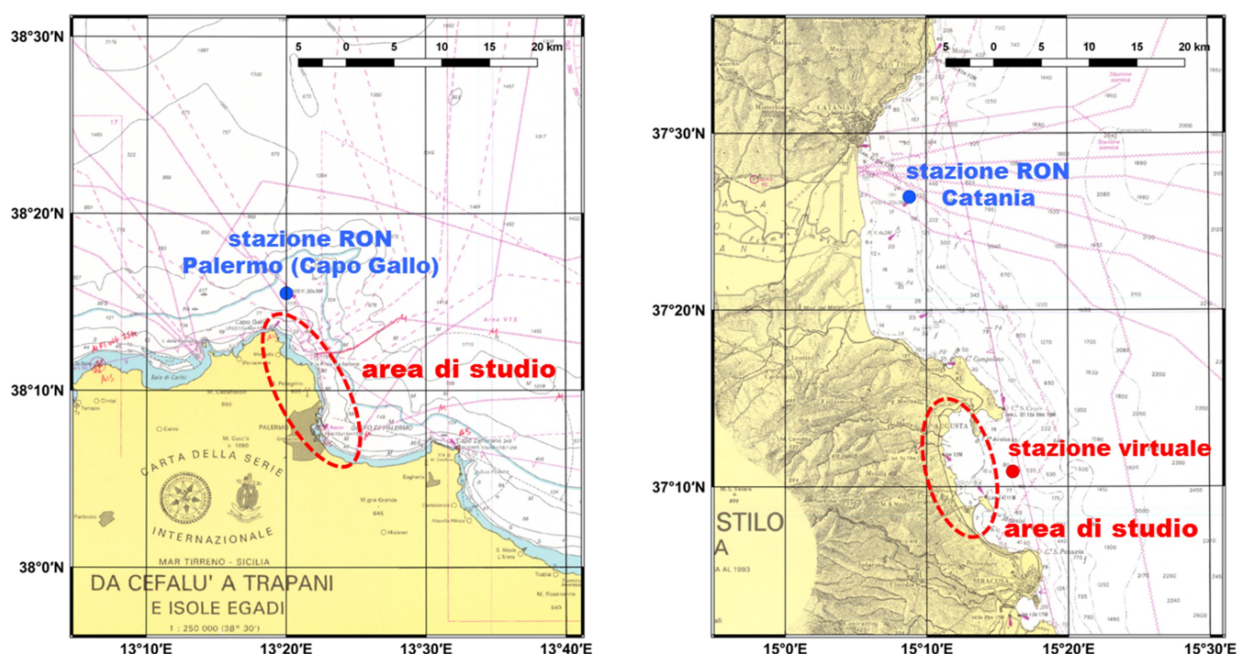
### 4.1 Dati ondametrici utilizzati

Nel presente studio, sulla base delle considerazioni discusse nella sezione precedente, il clima ondosato di largo è stato caratterizzato utilizzando i dati della Rete Ondametrica Nazionale [18,19].

Per il sito di Palermo è stata presa a riferimento la stazione RON di Palermo, al largo di Capo Gallo, posizionata su un fondale di profondità 145 m. La boa si trova nelle immediate vicinanze dell'area di studio e pertanto si è ritenuto accettabile utilizzare direttamente le misure ondametriche disponibili per la caratterizzazione del clima ondosato, senza ricorrere alla trasposizione geografica.

Per il sito di Augusta-Priolo sono stati utilizzati i dati della stazione RON di Catania, situata circa 30 km a Nord dell'area di studio, su un fondale di profondità 90 m. Tenendo conto della distanza e dell'esposizione alla traversia ondosata della boa e dell'area di indagine, si è scelto di utilizzare il metodo di trasposizione geografica, posizionando una stazione virtuale nel punto di coordinate 37°10'51''N, 15°16'05''E, al largo dell'area di indagine, su un fondale di profondità circa 90 m.

In Fig. 7 sono illustrate le posizioni delle stazioni di misura, le cui informazioni principali sono riportate in Tab. 1.



**Figura 7.** Posizioni delle stazioni ondametriche utilizzate per la caratterizzazione del clima ondosato di largo, riportate sulla cartografia nautica dell'Istituto Idrografico della Marina. Coordinate riferite al sistema WGS84, EPSG 4326

STAZIONE RON	COORDINATE GEOGRAFICHE (WGS84)	INIZIO PERIODO	FINE PERIODO
Palermo	38°15'30"N 13°20'00"E	29/03/2002 09:00	03/11/2014 11:30
Catania	37°26'24"N 15°08'48"E	01/07/1989 00:00	31/12/2014 20:30

**Tabella 1.** Posizioni delle boe ondametriche ed estremi temporali delle serie di misure utilizzate nello studio

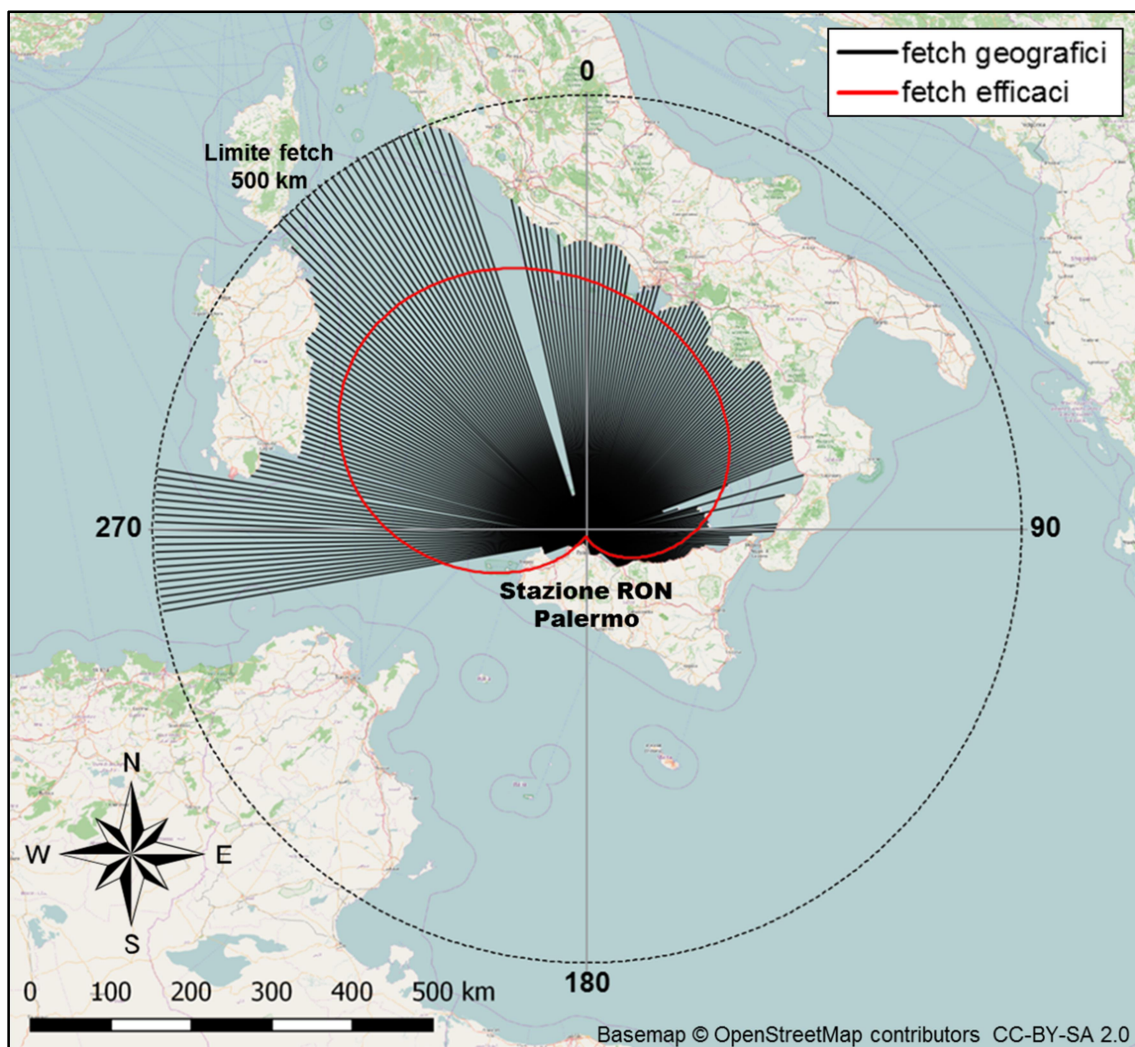
## 4.2 Fetch geografici ed efficaci

Una volta individuate le stazioni ondametriche, si è proceduto alla misura dei fetch geografici ed al calcolo dei fetch efficaci.

I fetch geografici sono stati misurati a partire dal punto identificativo della stazione di misura, traguardando la più vicina costa sopravento con rette orientate lungo direzioni comprese nel settore 0-360°, ad intervalli di 1°. Le misure sono state condotte utilizzando funzioni di geo-processing disponibili in QGIS; il sistema di riferimento adottato è UTM33N/WGS84, EPSG 32633.

I fetch efficaci sono stati calcolati utilizzando l'applicativo QWaveTransposition descritto in precedenza, imponendo all'esponente nella formula (4) il valore  $n=2$ .

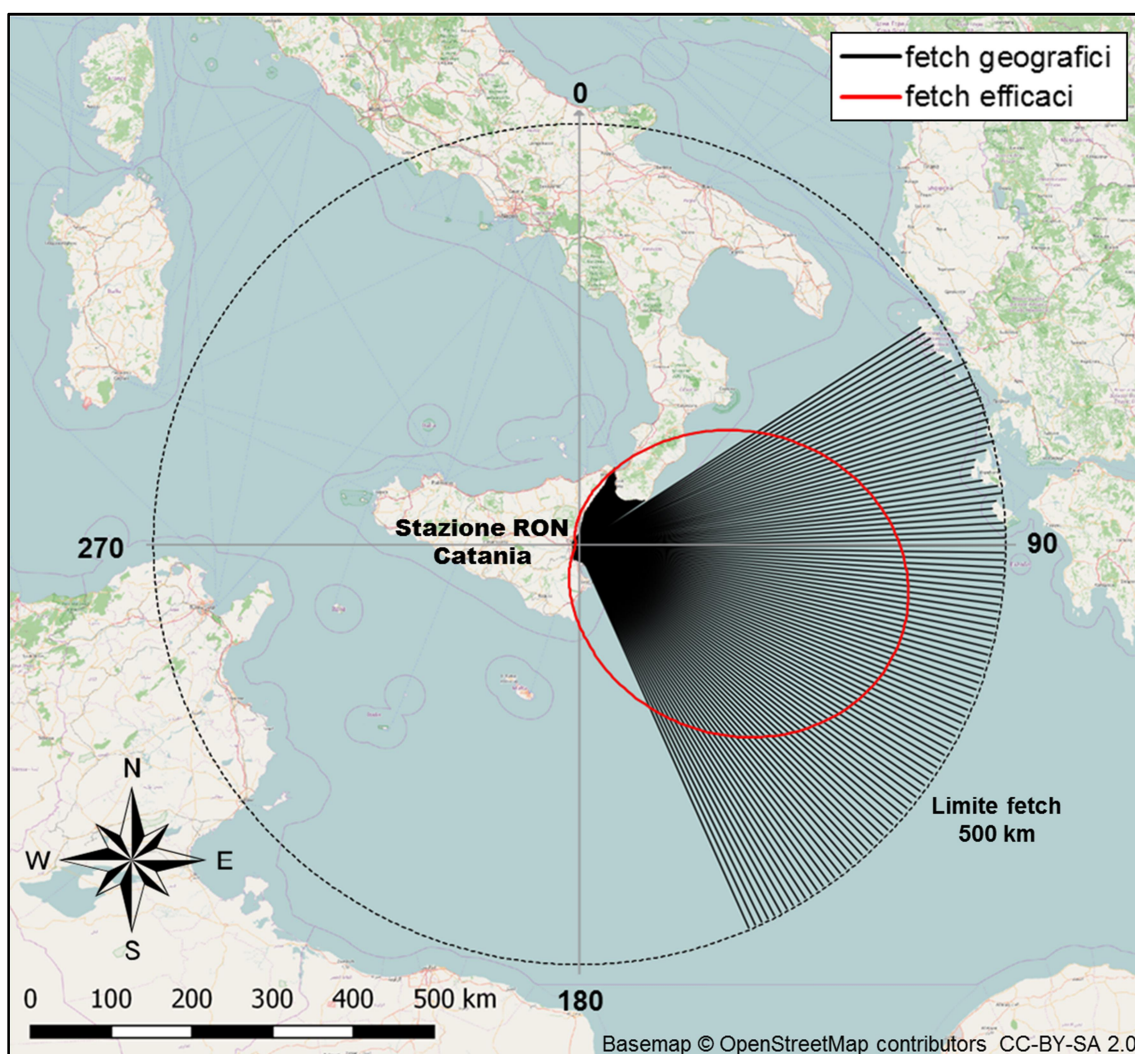
Nelle Figg. 8, 9 e 10 sono riportati i diagrammi polari dei fetch geografici ed efficaci, rispettivamente, per la boa di Palermo, la boa di Catania ed il punto di trasposizione al largo del sito di Augusta-Priolo (stazione virtuale).



*Figura 8. Fetch geografici ed efficaci alla stazione RON di Palermo*

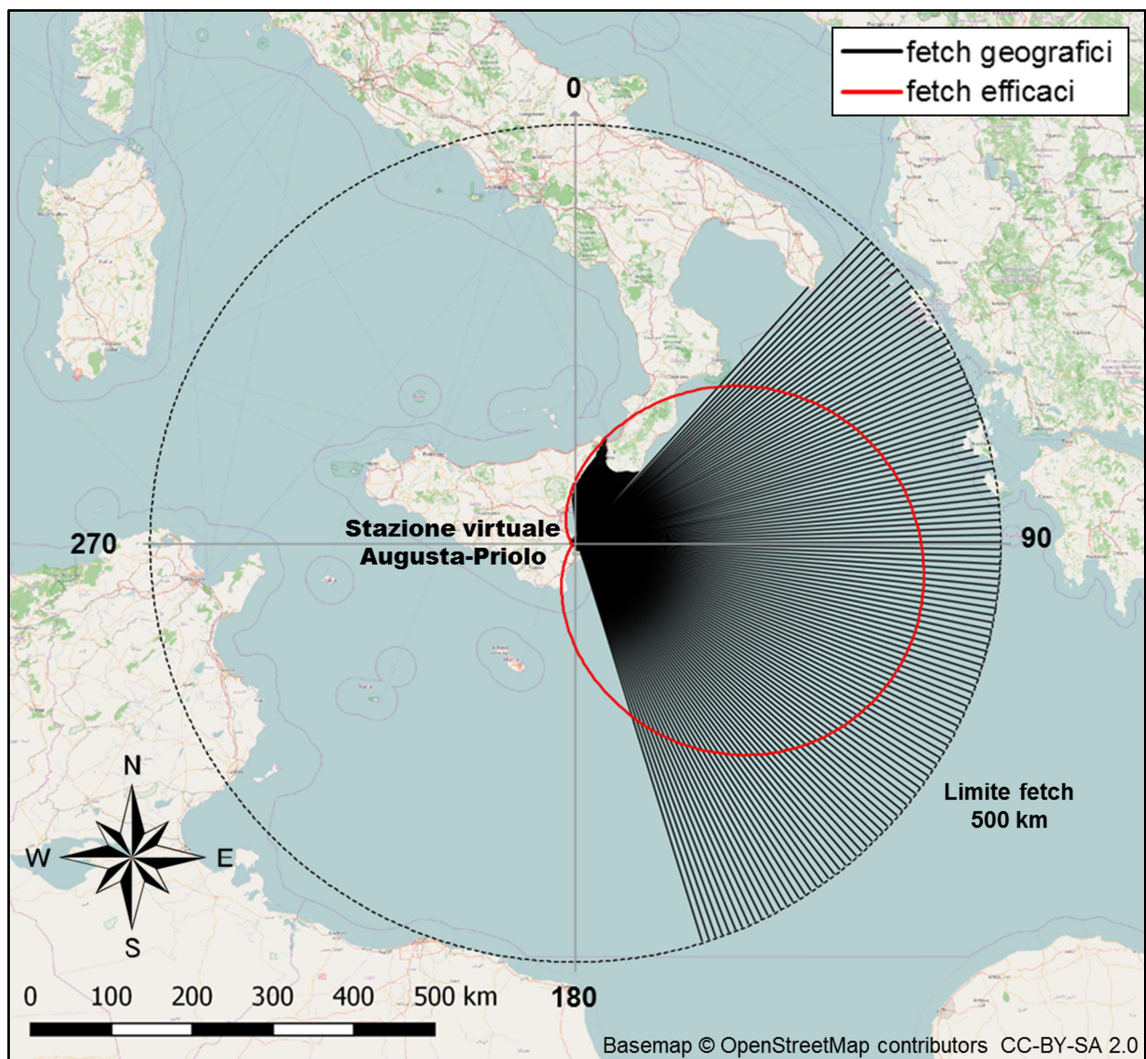
Per quanto riguarda la boa di Palermo, si osserva che i fetch geografici maggiori corrispondono al primo quadrante (0-90°N) e, soprattutto, al quarto quadrante (270-360°N), nel quale viene raggiunto il valore limite di 500 km. I fetch efficaci, evidentemente, presentano un andamento più uniforme rispetto ai fetch geografici, con valori massimi prossimi ai 350 km per le direzioni di Nord-Ovest.

Per la boa di Catania è evidente l'azione schermante della costa orientale della Sicilia e della costa meridionale della Calabria; al di là di questi limiti geografici, nel primo e nel secondo quadrante i fetch geografici sono limitati dalla costa greca e albanese, oppure si estendono verso il mare aperto fino al limite teorico dei 500 km. I fetch efficaci presentano un valore massimo di poco inferiore ai 400 km, che viene attinto in corrispondenza della direzione Est-Sudest.



*Figura 9. Fetch geografici ed efficaci alla stazione RON di Catania*

Il sito di Augusta-Priolo presenta un'esposizione alla traversia ondosa analoga a quella della boa di Catania. Anche in questo caso i fetch geografici di estensione maggiore sono compresi nel primo e secondo quadrante. Tuttavia, l'effetto schermante della costa siciliana e calabrese è meno marcato rispetto a quanto si verifica per la boa di Catania, ed i fetch sono nel complesso più elevati. I massimi valori del fetch efficace, superiori a 400 km, corrispondono alle direzioni comprese tra Est e Sudest.



*Figura 10. Fetch geografici ed efficaci al largo di Augusta-Priolo*

### 4.3 Clima ondoso medio al largo del sito di Palermo

I dati ondametrici di largo utilizzati per il sito di Palermo sono riportati in Fig. 11 in forma di diagramma di scatter polare.

Per descrivere il clima ondoso medio annuo, i dati ondametrici sono stati suddivisi in classi di altezza significativa e direzione di provenienza, per ciascuna delle quali è stato conteggiato il numero di eventi e derivata la frequenza relativa di apparizione. Le ampiezze delle classi di altezza d'onda e direzione utilizzate sono pari, rispettivamente a 0.50 m e 10°.

I risultati sono illustrati graficamente nel diagramma polare di tipo *Wave Rose* di Fig. 12. Nel grafico, il raggio dei settori circolari associati a ogni classe direzionale è proporzionale alla frequenza relativa di ciascuna classe di altezza d'onda compresa nella classe.

Coerentemente con quanto osservato circa l'esposizione del paraggio, è evidente la prevalenza degli stati di mare provenienti dal quarto quadrante. In particolare, i settori con le maggiori frequenze annue di apparizione, superiori al 10%, sono centrati sulle direzioni 280-290°N. Complessivamente, oltre il 50% delle onde incidenti proviene dai settori 270-320°N.

### 4.4 Clima ondoso medio al largo del sito di Augusta-Priolo

Come anticipato in precedenza, per il sito di Augusta-Priolo è stato utilizzato il metodo della trasposizione geografica dei dati ondametrici. A partire dalle registrazioni disponibili alla boa RON di Catania, è stata quindi ricostruita la corrispondente serie di dati alla stazione ondametrica virtuale posizionata al largo del sito di Augusta-Priolo.

Nel diagramma di Fig. 13 sono riportati i coefficienti di trasposizione per le altezze e per i periodi d'onda, ricavati dai fetch efficaci misurati alle due stazioni. In accordo con la distribuzione dei fetch, i coefficienti di trasposizione alla stazione virtuale di Augusta-Priolo sono maggiori dell'unità per quasi tutte le direzioni; i coefficienti di trasposizione più elevati corrispondono alle direzioni settentrionali.

Nei grafici di Fig. 14-a e 14-b sono illustrati, rispettivamente, gli angoli tra la direzione delle onde e la direzione del vento, e le direzioni delle onde risultanti al variare della direzione del vento, valutati per entrambe le stazioni in funzione della distribuzione dei fetch efficaci. Dalla Fig. 14-b si può osservare, in particolare, che le onde con direzioni all'ondametro comprese, orientativamente, nel settore 210-330°N sono escluse, di fatto, dal procedimento di trasposizione geografica, in quanto ad esse non è possibile assegnare univocamente una direzione di provenienza del vento. Questa circostanza equivale a trascurare il contributo al clima ondoso delle onde provenienti dalle direzioni a cui corrispondono i fetch minori.

I risultati della trasposizione geografica sono illustrati graficamente nelle Figg. 15 e 16.

Si può osservare, coerentemente con la distribuzione di fetch, la prevalenza degli stati di mare provenienti dai quadranti orientali. La più elevata frequenza di apparizione, superiore al 10%, è associata al settore centrato sulla direzione 40°N. Complessivamente, le onde provenienti dai settori 30-90°N presentano una frequenza di poco inferiore al 60%, mentre quelle provenienti dai settori 100-140°N presentano una frequenza di poco inferiore al 32%.

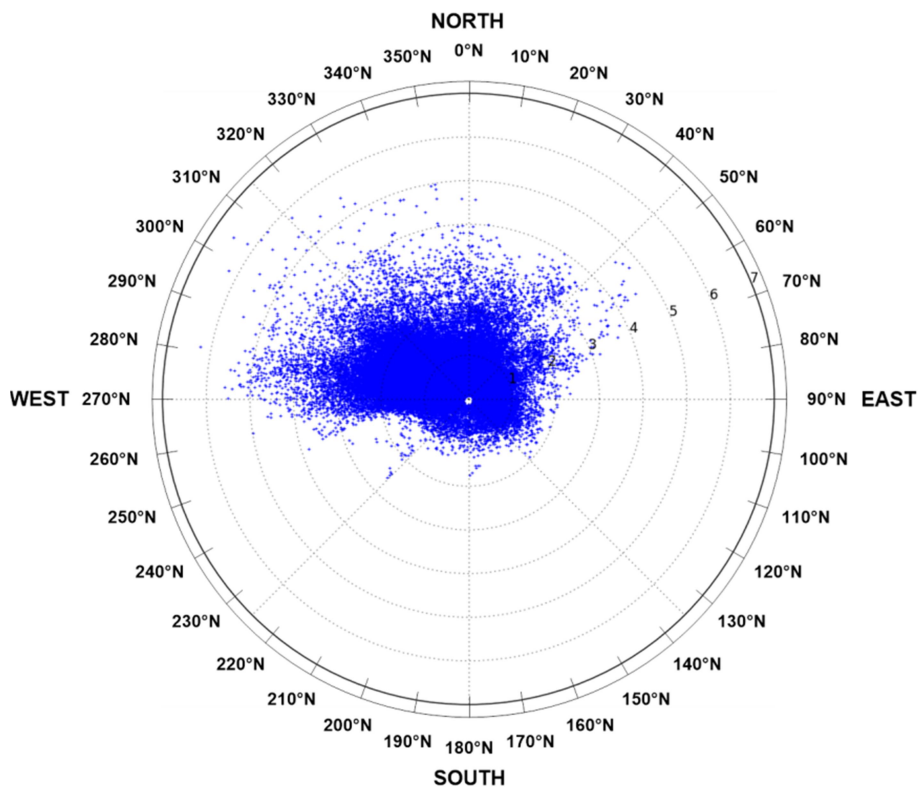


Figura 11. Dati ondametrici utilizzati per il sito di Palermo. Dati ISPRA-Servizio Mareografico “Rete Ondametrica Nazionale”, Stazione di Palermo

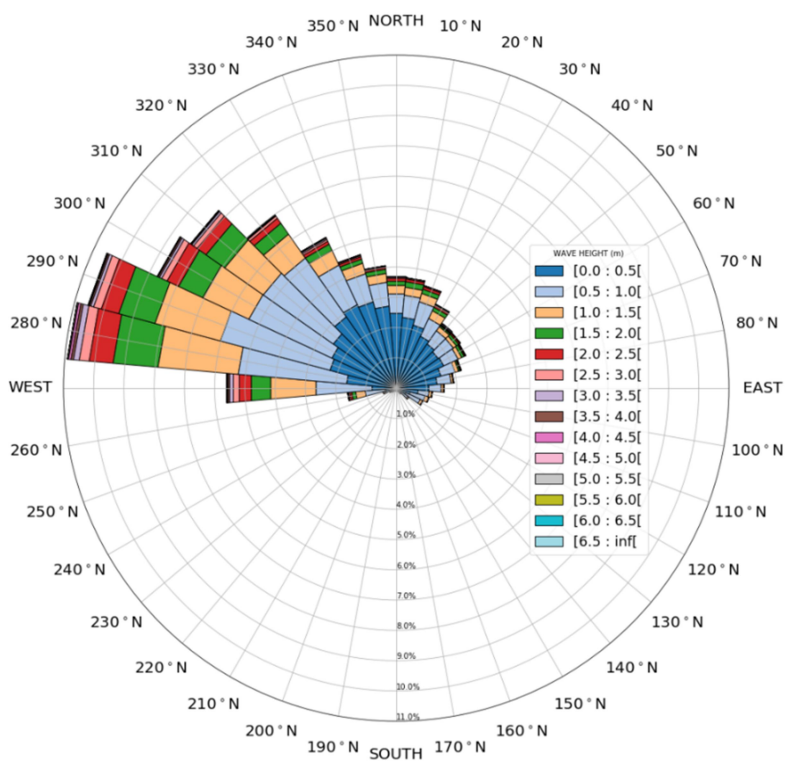


Figura 12. Clima ondoso medio al largo di Palermo. Elaborazioni su dati ISPRA-Servizio Mareografico “Rete Ondametrica Nazionale”, Stazione di Palermo

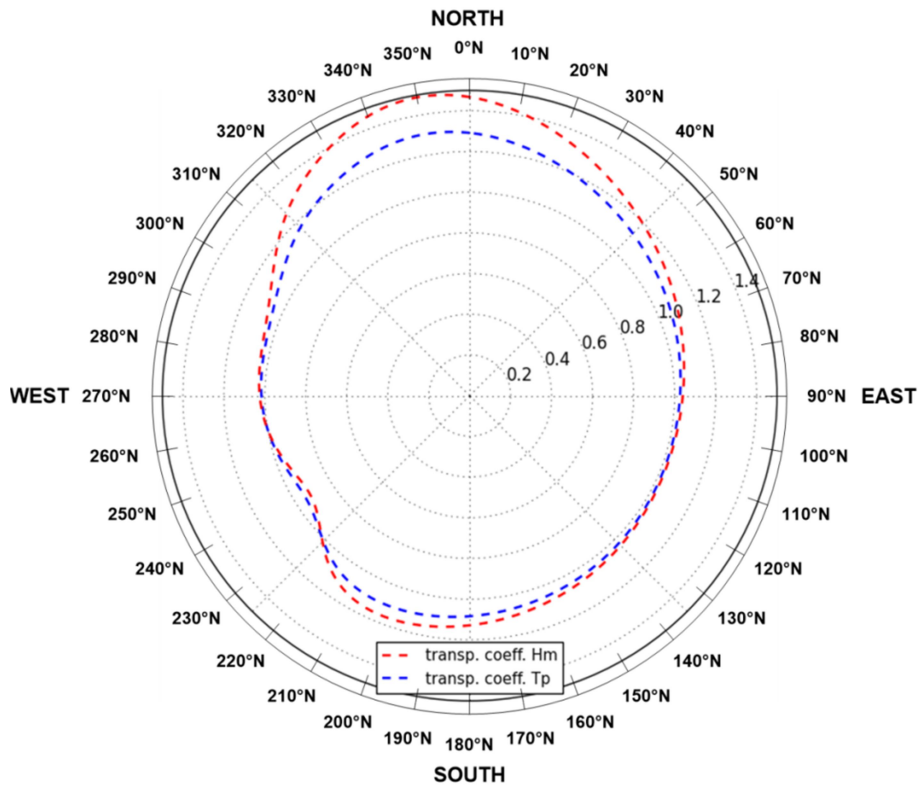


Figura 13. Coefficienti di trasposizione geografica per la stazione virtuale al largo di Augusta-Priolo

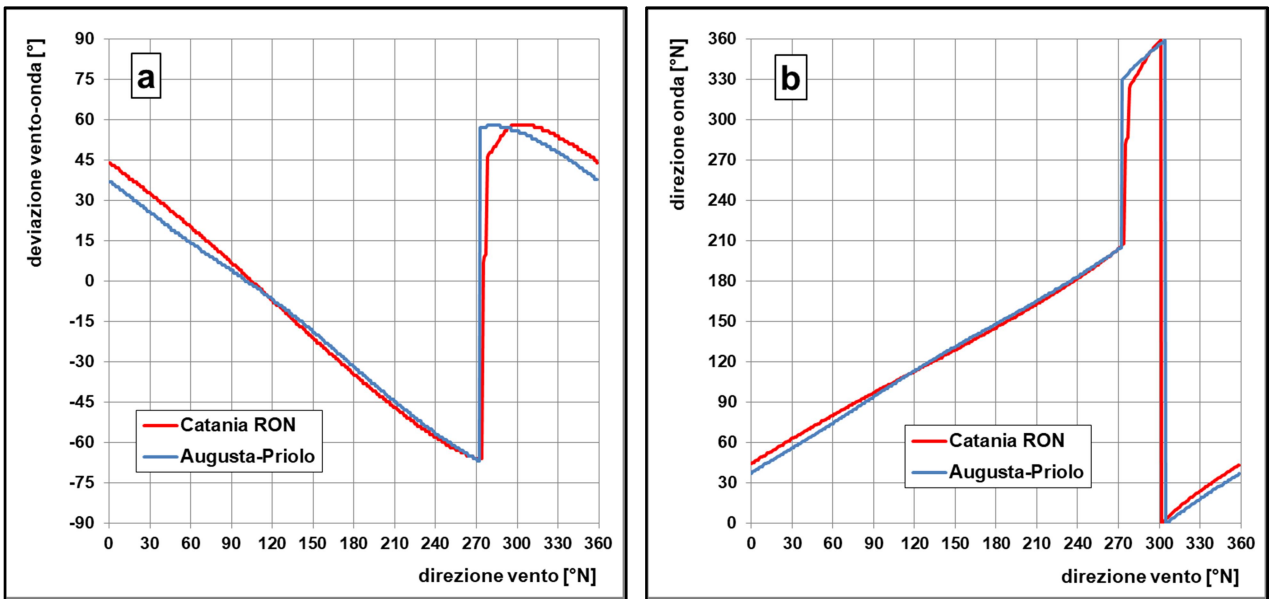
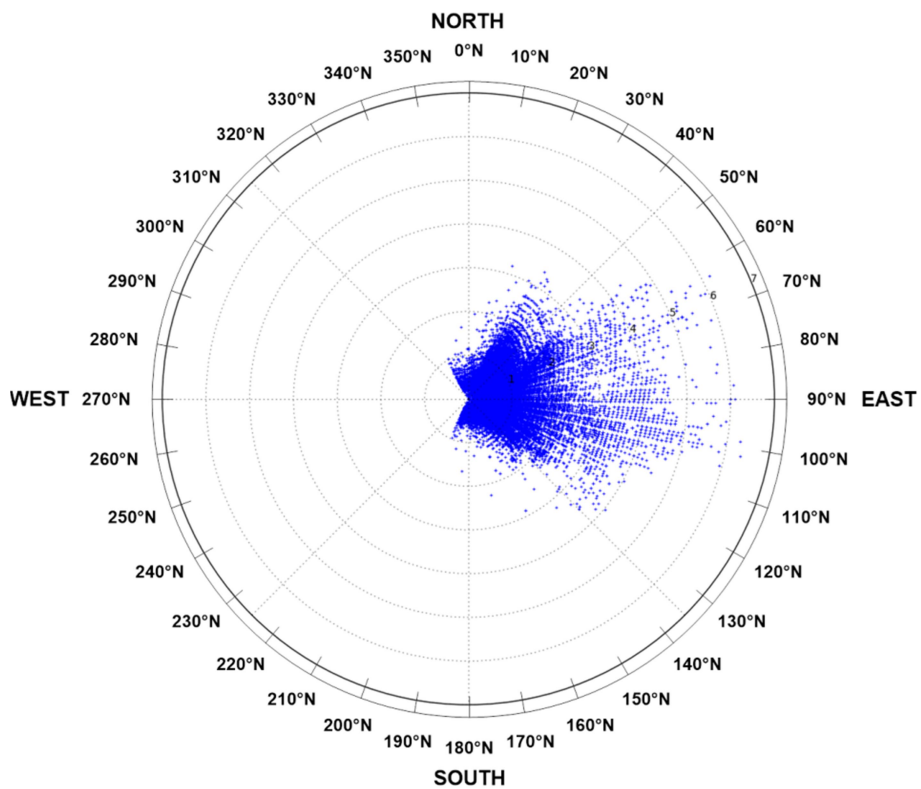
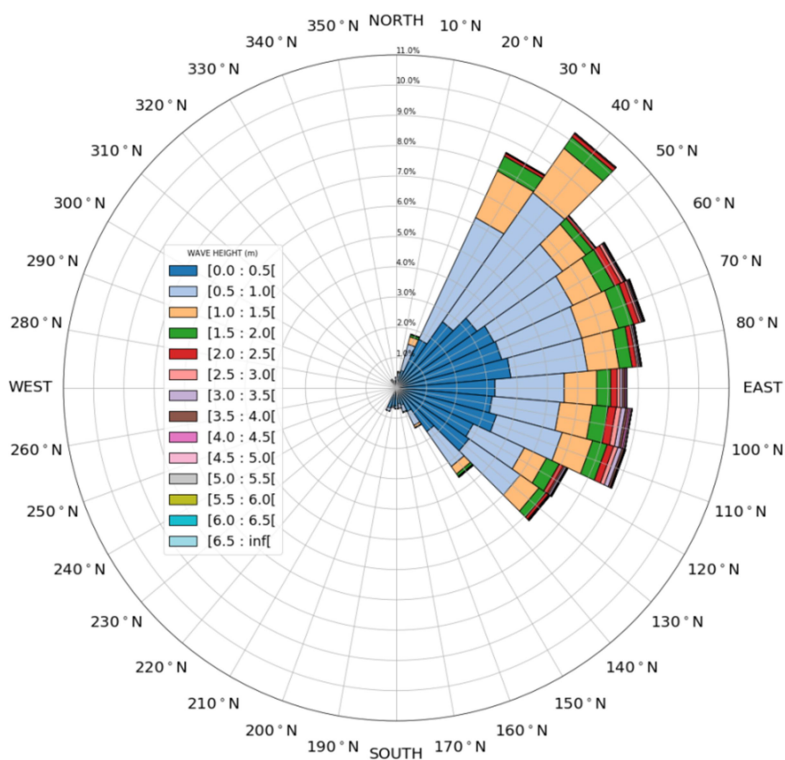


Figura 14. a) Angoli tra la direzione delle onde e la direzione del vento. b) Direzioni delle onde al variare della direzione del vento



**Figura 15.** Dati ondametrici al largo di Augusta-Priolo. Trasposizione geografica eseguita su dati ISPRA-Servizio Mareografico "Rete Ondametrica Nazionale", Stazione di Catania



**Figura 16.** Clima ondoso medio al largo di Augusta-Priolo. Trasposizione geografica ed elaborazioni eseguite su dati ISPRA-Servizio Mareografico "Rete Ondametrica Nazionale", Stazione di Catania

## 5. ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI

### 5.1 Metodologia

I dati ondosi al largo dei due siti di studio sono stati elaborati statisticamente per stimare le caratteristiche delle onde estreme attese in un assegnato intervallo temporale. Tale analisi è di fondamentale interesse in numerose applicazioni di ingegneria costiera.

Il primo passo dell'analisi delle onde estreme è la selezione, all'interno della serie storica disponibile, di un set di dati statisticamente significativi. Nel presente studio sono stati adottati due diversi approcci, coerentemente con lo stato dell'arte della materia [23,24].

Il primo approccio è il metodo dei massimi annuali (*annual maxima method*), che consiste nel selezionare il massimo valore dell'altezza d'onda registrata per ciascun anno di osservazione. Tale metodo è largamente consolidato e molto utilizzato per lo studio di numerosi fenomeni naturali, in accordo con la classica teoria dei valori estremi. Affinché sia possibile ottenere una serie significativa di dati, è necessario che il numero di anni di osservazione sia sufficientemente elevato. Inoltre, è necessario che non siano presenti interruzioni significative nelle registrazioni annuali, considerando, in particolare, che nei nostri mari, le onde più intense tendono a concentrarsi in determinati periodi dell'anno.

Il secondo approccio è quello dei valori sopra soglia (*peak over threshold method*), che consiste nel selezionare gli eventi caratterizzati da valori di altezza d'onda superiori ad un determinato valore di soglia. Rispetto al metodo dei massimi annuali, questo secondo metodo tende a sfruttare maggiormente la numerosità dei dati disponibili.

Nel caso del moto ondoso, considerata la natura del fenomeno, gli eventi a cui viene applicato il metodo dei valori sopra soglia vengono identificati con le "mareggiate", identificate da una sequenza di registrazioni temporali che soddisfano determinati requisiti. Considerazioni teoriche ed empiriche suggeriscono, per l'individuazione della mareggiata, i seguenti criteri:

- presenza di onde con altezza significativa  $H_m > 1.0$  m per almeno 12 ore consecutive;
- riduzione dell'altezza d'onda significativa a valori  $H_m < 1.0$  m per meno di 6 ore consecutive;
- direzione di provenienza delle onde compresa in settore direzionale di ampiezza massima  $\pm 30^\circ$  rispetto alla direzione iniziale.

A ciascuna mareggiata, definita in base ai criteri precedenti, viene associato un unico valore di altezza, periodo e direzione, corrispondente al picco di mareggiata, ovvero alla registrazione con il massimo relativo di altezza significativa.

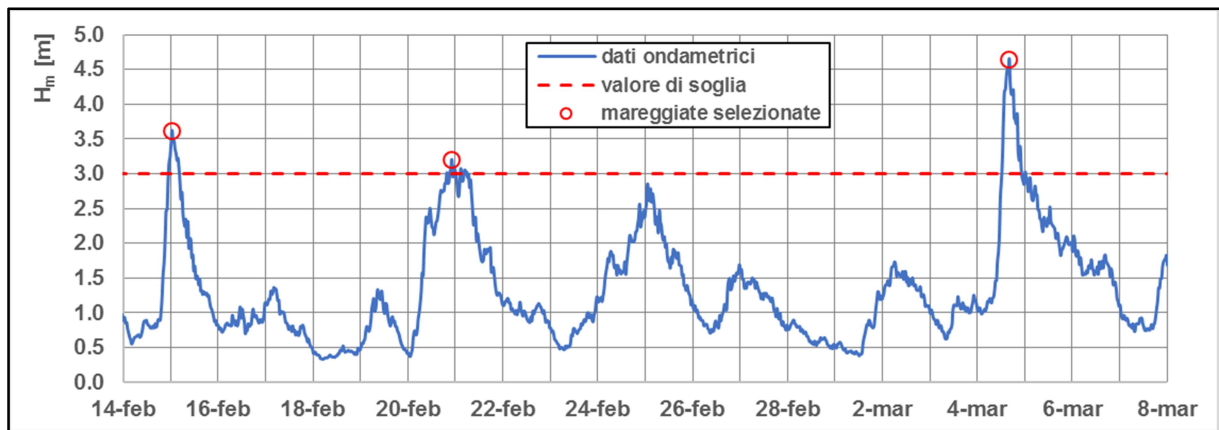
È necessario, inoltre, per garantire l'indipendenza tra due mareggiate consecutive, che i loro valori di picco siano sufficientemente distanziati nel tempo; considerazioni di carattere statistico suggeriscono di considerare un intervallo minimo tra due picchi consecutivi compreso tra due e quattro giorni.

La scelta del valore di soglia, evidentemente, condiziona in modo determinante il campione di dati e, conseguentemente, le stime dei valori estremi attesi. Se si sceglie una soglia molto bassa, si ottiene un campione numeroso, in cui però sono presenti dati che potrebbero non essere propriamente riconducibili ad eventi "estremi". Se, invece, la soglia è molto alta, si rischia di ottenere un campione troppo poco numeroso

ai fini dell'analisi. Nel presente lavoro, tenendo conto di entrambe le esigenze, si è scelto un valore di soglia pari a 3.0 m per entrambi i siti. Le altezze d'onda estreme stimate con tale valore soglia sono risultate confrontabili con quelle ottenute mediante il metodo dei massimi annuali.

A scopo di esempio, in Fig. 17 è illustrata una sequenza di dati ondametrici nella quale si possono distinguere vari eventi di mareggiata, definiti in base ai criteri esposti in precedenza. Sono, inoltre, evidenziati i valori di altezze al colmo di mareggiata superiori alla soglia prefissata di 3.0 m

Infine, per ciascun sito, in base alla distribuzione dei fetch, alla frequenza direzionale degli eventi osservati e, in particolare, alla frequenza direzionale dei picchi di mareggiata, è possibile definire dei sotto-settori direzionali all'interno dei quali le mareggiate soddisfano requisiti di omogeneità rappresentativi del regime climatico e dell'esposizione del paraggio. L'analisi statistica è stata quindi condotta considerando sia l'intero campione indipendentemente dalla direzione di provenienza (omnidirezionale), sia considerando separatamente gli eventi appartenenti a ciascuno dei sotto-settori di traversia individuati.



**Figura 17.** Esempio di una sequenza di dati ondametrici, dalla quale sono state selezionate le altezze al colmo di mareggiata da utilizzare nell'analisi degli eventi estremi, secondo il metodo dei valori sopra soglia

Il campione di dati rappresentativo degli eventi estremi, selezionati mediante uno dei metodi esposti in precedenza, viene successivamente analizzato utilizzando un opportuno modello probabilistico. Nel presente lavoro, secondo l'approccio comunemente utilizzato nelle applicazioni di ingegneria costiera [23,24], sono state utilizzate le leggi di distribuzione di Gumbel (o Fisher-Tippett di tipo I, FT-I) e di Weibull.

Le funzioni di distribuzione  $F(x)$ , che esprimono la probabilità di non superamento di un valore di altezza d'onda prefissato  $x=H$ , assumono le seguenti espressioni:

$$\text{Gumbel:} \quad F(x) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{x-B}{A} \right) \right] \quad (8)$$

$$\text{Weibull:} \quad F(x) = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{x-B}{A} \right)^k \right] \quad (9)$$

I parametri  $A$  e  $B$  che compaiono nelle funzioni di distribuzione sono definiti, rispettivamente, “fattore di scala” e “fattore di posizione”, e vengono stimati in base ai dati campionari. Nella distribuzione di Weibull

compare anche il “fattore di forma”  $k$ , per il quale vengono utilizzati normalmente i valori  $k=0.75$ ,  $k=1.0$ ,  $k=1.4$  e  $k=2.0$ .

È prassi comune rappresentare graficamente le distribuzioni (8) e (9) su una cosiddetta “carta probabilistica”, ovvero un grafico in cui sull’asse delle ordinate è riportata la variabile  $x$  (altezza d’onda), mentre sull’asse delle ascisse è riportata una variabile  $y$ , detta “variabile ridotta”, la cui espressione dipende dalla particolare funzione di distribuzione prescelta:

$$\text{Gumbel:} \quad y = -\ln\{-\ln[F(x)]\} \quad (10)$$

$$\text{Weibull:} \quad y = \{-\ln[1-F(x)]\}^{\frac{1}{k}} \quad (11)$$

Utilizzando la variabile ridotta  $y$ , le funzioni di distribuzione sono rappresentate sulla carta probabilistica da una linea retta di equazione:

$$x = Ay + B \quad (12)$$

Il passo successivo dell’analisi è stimare i valori dei parametri  $A$  e  $B$  per i quali si verifica il migliore adattamento tra i dati campionari e le funzioni di distribuzione prescelte. A tale scopo, la probabilità teorica di non superamento di un valore di altezza d’onda viene identificata con la frequenza campionaria di non superamento, che può essere stimata in base ai dati disponibili.

I dati campionari vengono, pertanto, preliminarmente ordinati in senso decrescente, in modo che al valore massimo della distribuzione corrisponda il numero d’ordine  $i=1$  ed al valore minimo corrisponda il numero  $i=N$ , essendo  $N$  il numero di dati che costituiscono il campione. La frequenza campionaria di non superamento corrispondente al valore di altezza d’onda di posizione  $i$  può essere quindi stimata dalla formula:

$$\hat{F}_i = 1 - \frac{i - \alpha}{N + \beta} \quad (13)$$

Nella (13)  $\alpha$  e  $\beta$  sono due costanti che dipendono dalla funzione di distribuzione adottata. I valori normalmente utilizzati sono i seguenti:

$$\text{Gumbel:} \quad \alpha = 0.44 \quad \beta = 0.12 \quad (14)$$

$$\text{Weibull:} \quad \alpha = 0.20 + \frac{0.27}{\sqrt{k}} \quad \beta = 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}} \quad (15)$$

Le frequenze calcolate mediante la (13) vengono indicate con il termine “*plotting position*”.

Utilizzando le variabili ridotte definite dalle (10) e (11) in relazione alla funzione di distribuzione prescelta, ciascun dato del campione viene rappresentato da un punto sul piano probabilistico. Mediante il metodo dei minimi quadrati viene quindi definita la retta di regressione che presenta il migliore adattamento ai dati, di equazione:

$$x = \hat{A} y + \hat{B} \quad (16)$$

Per effetto della scelta delle variabili, la pendenza  $\hat{A}$  e l’intercetta  $\hat{B}$  della retta (16) rappresentano una stima, rispettivamente, dei coefficienti  $A$  e  $B$  della distribuzione probabilistica ipotizzata.

L’adattamento dei dati alla distribuzione può essere quantificato mediante il coefficiente di determinazione  $R^2$ , definito come:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

in cui:

- $x_i$  : dati del campione;
- $\hat{x}_i$  : valori stimati dalla formula di regressione (16);
- $\bar{x}$  : valore medio del campione.

Una volta individuati i parametri della distribuzione, è possibile stimare i valori estremi di altezza d'onda significativa attesi in un assegnato intervallo temporale. A tale scopo, si fa riferimento al periodo di ritorno  $T_R$ , normalmente espresso in anni, definito come l'intervallo medio che intercorre tra due eventi successivi in cui un determinato valore estremo di altezza significativa viene uguagliato o superato.

Indicando con  $H_{TR}$  l'altezza d'onda associata al periodo di ritorno  $T_R$ , e con  $\lambda$  il numero medio annuo di eventi che compongono il campione, la probabilità media di non superamento dell'altezza  $H_{TR}$  è data dalla seguente relazione:

$$F(H_{TR}) = 1 - \frac{1}{\lambda T_R} \quad (18)$$

Pertanto, l'altezza d'onda associata al periodo di ritorno  $T_R$  può essere calcolata mediante la (16), per i seguenti valori della variabile  $y$ :

$$\text{Gumbel:} \quad y_{TR} = -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{\lambda T_R} \right) \right] \quad (19)$$

$$\text{Weibull:} \quad y_{TR} = \left[ \ln(\lambda T_R) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (20)$$

Nelle applicazioni di ingegneria marittima e costiera, la scelta del periodo di ritorno rappresenta un momento fondamentale della progettazione, perché in base ad esso viene normalmente calcolata l'altezza d'onda di progetto da utilizzare in fase di dimensionamento. Nel presente lavoro, in assenza di specifiche esigenze progettuali, sono stati riportati i risultati ottenuti per alcuni valori caratteristici del periodo di ritorno, selezionati esclusivamente a scopo di esempio.

## 5.2 Elaborazioni per il sito di Palermo

In base alla distribuzione dei fetch e del clima ondoso medio al largo del sito di Palermo, l'analisi delle onde estreme è stata condotta sia per l'intero settore di traversia (omnidirezionale), sia per i seguenti sotto-settori direzionali:

- Settore N-W, comprendente le direzioni 230-350°N
- Settore N-E, comprendente le direzioni 350-90°N

In Fig. 18 sono rappresentati graficamente gli eventi estremi caratterizzati dai massimi annuali delle altezze d'onda ricavati dai dati ondametrici, con riferimento ai due settori direzionali individuati. Dal campione sono state escluse le annualità in cui le registrazioni o erano assenti, oppure presentavano lunghi periodi di interruzione. È stato riscontrato, coerentemente con l'esposizione del paraggio, che le onde massime provenienti dal settore 230-350°N sono, in ogni anno di osservazione, maggiori di quelle del settore 350-90°N. Pertanto, i campioni di massimi annuali utilizzati per il settore 230-350°N e per il settore omnidirezionale coincidono.

In Fig. 19, analogamente, sono riportati gli eventi con altezze d'onda al picco di mareggiata superiori alla soglia 3.0 m. Anche in questo caso si nota la prevalenza degli stati di mare provenienti dal settore 230-350°N, sia per quanto riguarda il numero di eventi, sia per i valori di altezza d'onda.

Nelle Figg. 20, 22, 24, 26 e 28, per ciascuno dei campioni considerati, sono riportate su carta probabilistica le *plotting position* dei massimi annuali di altezza d'onda, adattate alle diverse funzioni di distribuzione. Per ciascuna retta di regressione è evidenziato il valore del coefficiente di determinazione  $R^2$ .

Sia pure con alcune inevitabili differenze per ciascun campione, si può osservare un generale buon adattamento dei dati alle distribuzioni probabilistiche. Le distribuzioni con il migliore adattamento sono quella di Gumbel e quella di Weibull con  $k=1.4$  e  $k=2$ , mentre i valori minori di  $R^2$  corrispondono alla distribuzione di Weibull con  $k=0.75$ .

Nelle Figg. 21, 23, 25, 27 e 29 sono riportate, per ciascun campione analizzato, le altezze d'onda estreme al variare del periodo di ritorno previste in base ai differenti modelli probabilistici. Si osserva che le distribuzioni di Gumbel e di Weibull per  $k=1.4$  presentano, in generale, risultati abbastanza prossimi tra di loro. Si osserva, inoltre, che per i periodi di ritorno più elevati le altezze d'onda previste in base alla distribuzione di Weibull crescono al diminuire del parametro di forma  $k$ .

I risultati relativi ad alcuni valori caratteristici del periodo di ritorno sono presentati, per le diverse distribuzioni probabilistiche, nella Tab. 2.

Prendendo a riferimento, a titolo di esempio, il settore omnidirezionale e la distribuzione di Weibull con  $k=1.4$ , si osserva che le altezze d'onda estreme variano da circa 5.0 m per un periodo di ritorno di 1 anno, a circa 7.3 m per un periodo di ritorno di 50 anni.

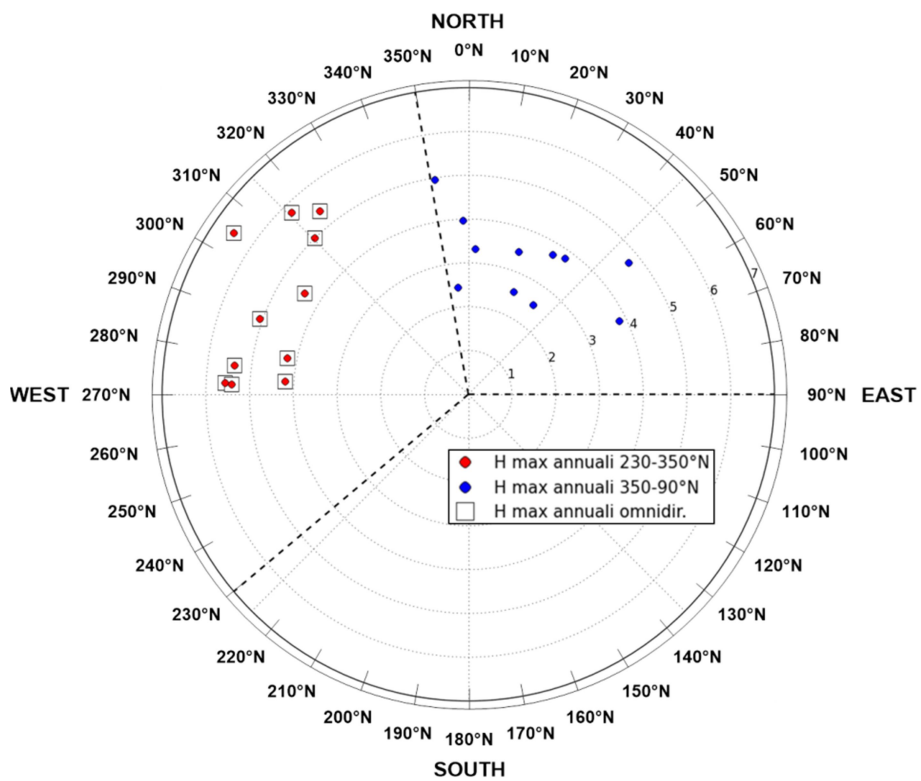


Figura 18. Altezze d'onda massime annuali al largo del sito di Palermo. Elaborazioni su dati ISPRA-Servizio Mareografico "Rete Ondametrica Nazionale", Stazione di Palermo

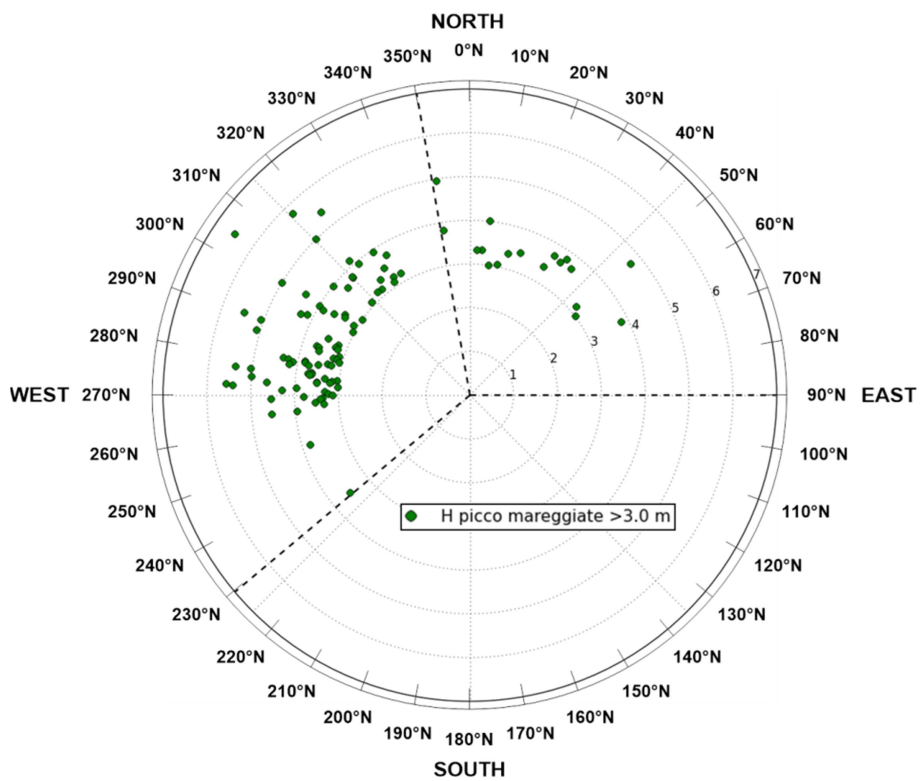


Figura 19. Altezze d'onda al picco di mareggiata maggiori di 3.0 m al largo del sito di Palermo. Elaborazioni su dati ISPRA-Servizio Mareografico "Rete Ondametrica Nazionale", Stazione di Palermo

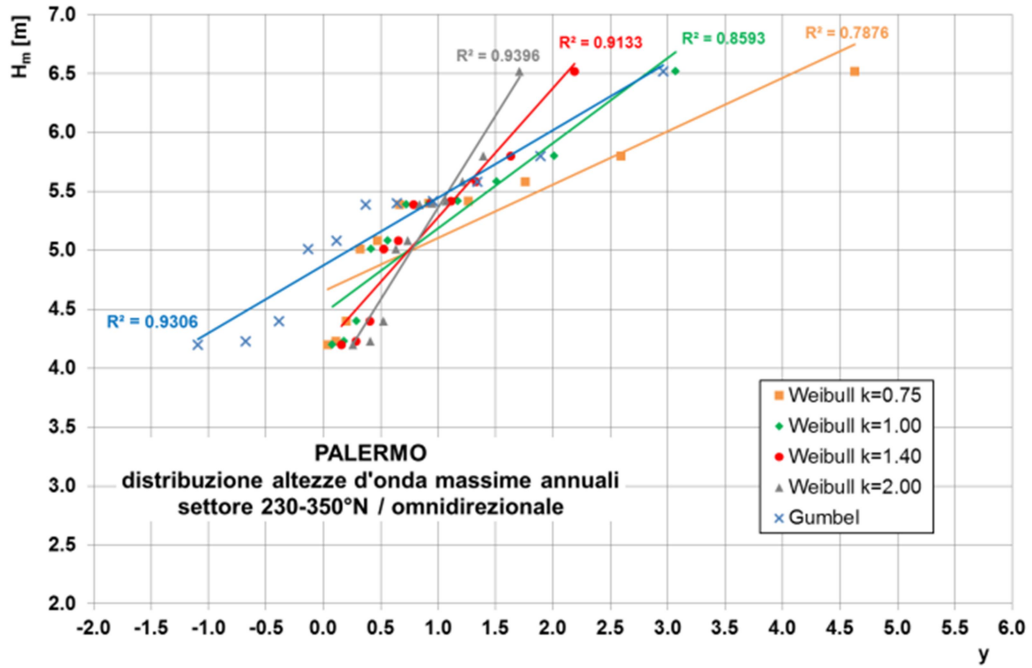


Figura 20. Carta Probabilistica. Palermo, massimi annuali, settore 230-350°N e omnidirezionale

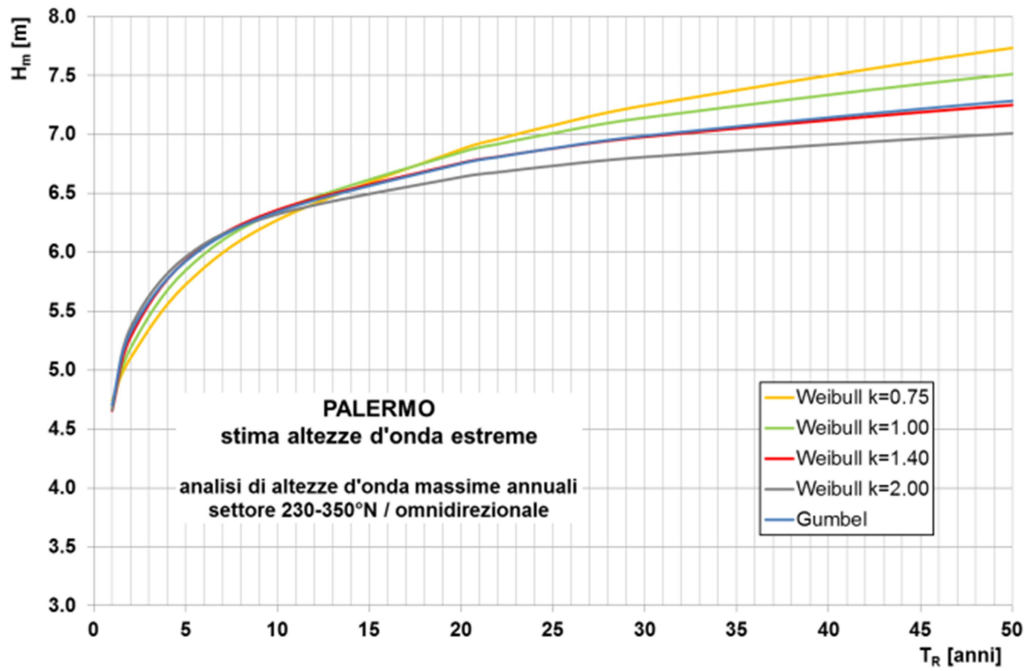


Figura 21. Previsione di altezze d'onda estreme. Palermo, massimi annuali settore 230-350°N e omnidirezionale

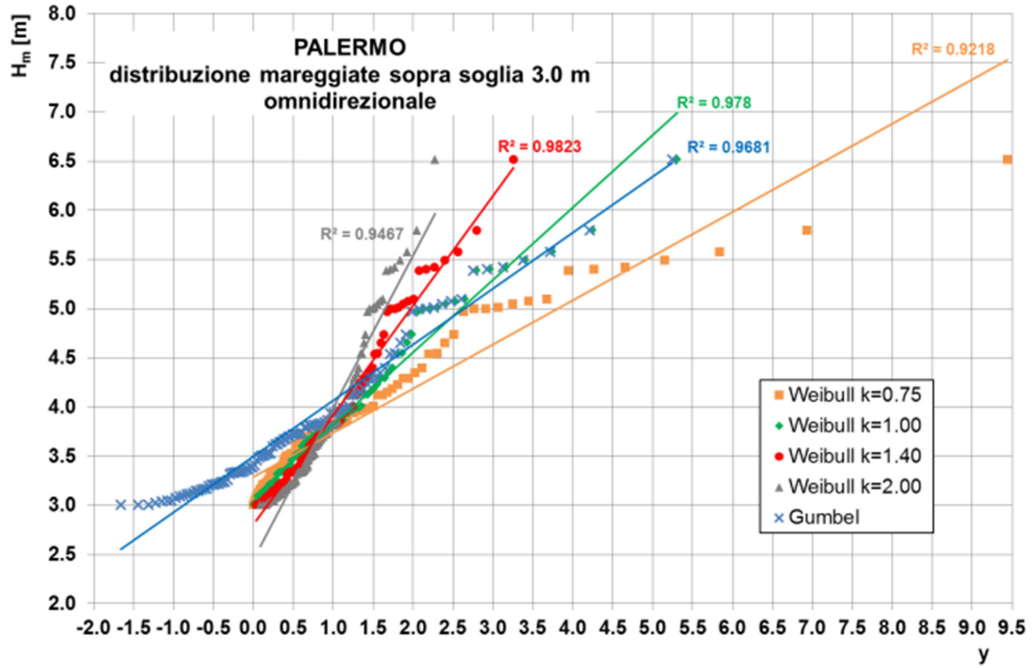


Figura 22. Carta Probabilistica. Palermo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore omnidirezionale

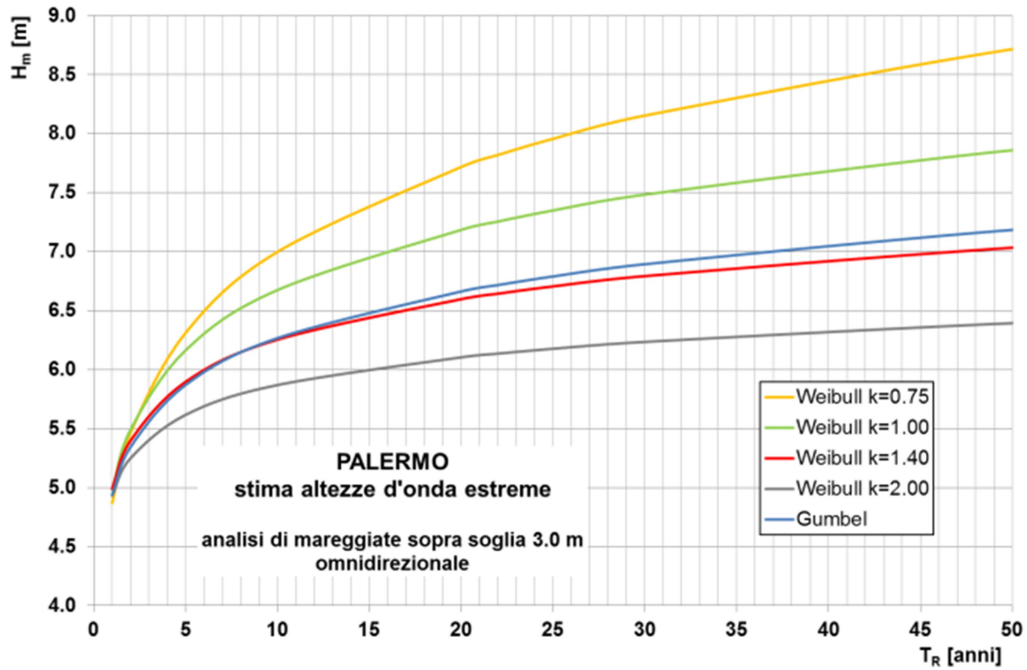


Figura 23. Previsione di altezze d'onda estreme. Palermo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore omnidirezionale

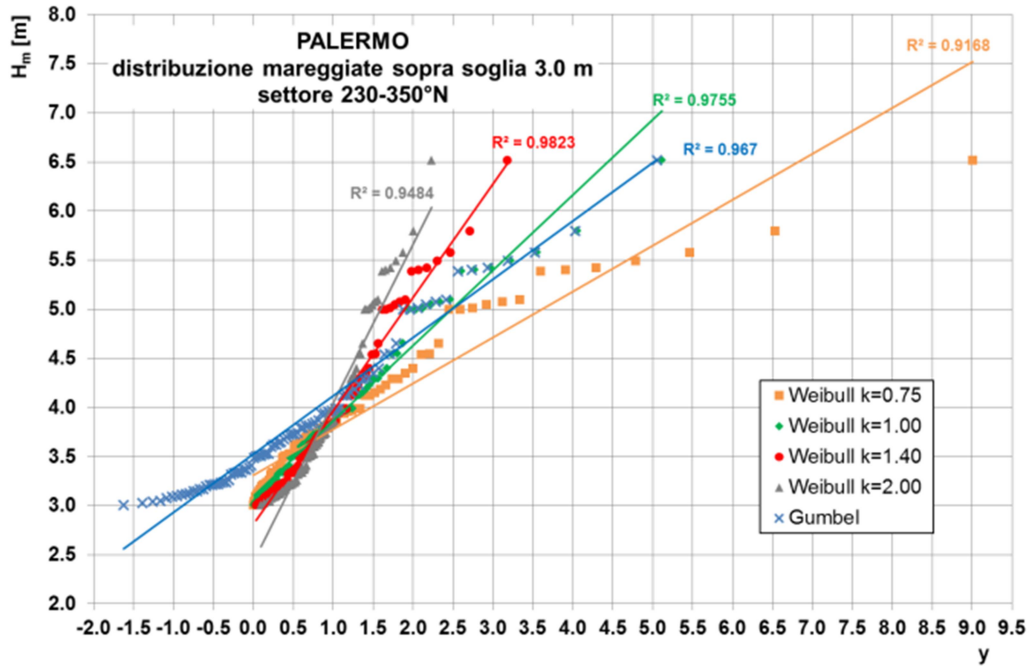


Figura 24. Carta Probabilistica. Palermo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore 230-350°N

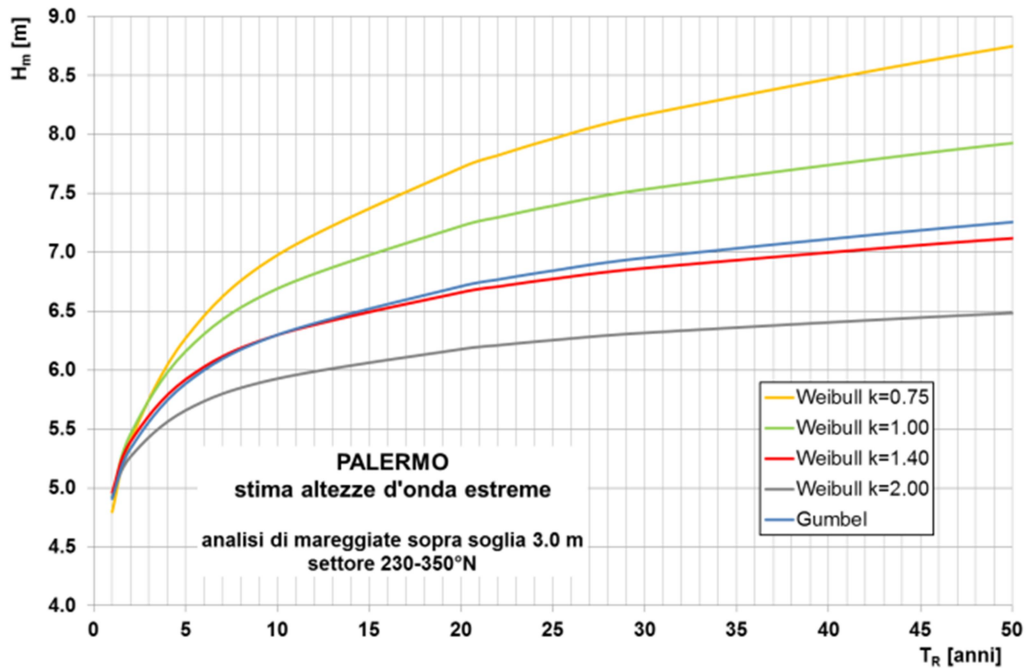


Figura 25. Previsione di altezze d'onda estreme. Palermo, mareggiate sopra soglia 3.0m, settore 230-350°N

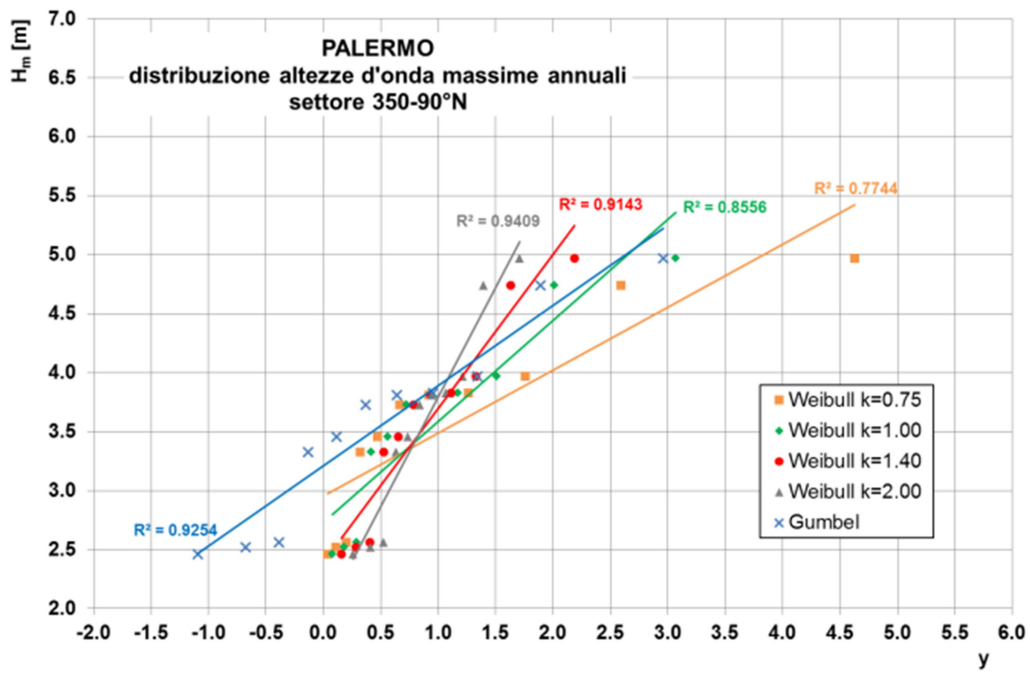


Figura 26. Carta Probabilistica. Palermo, massimi annuali, settore 350-90°N

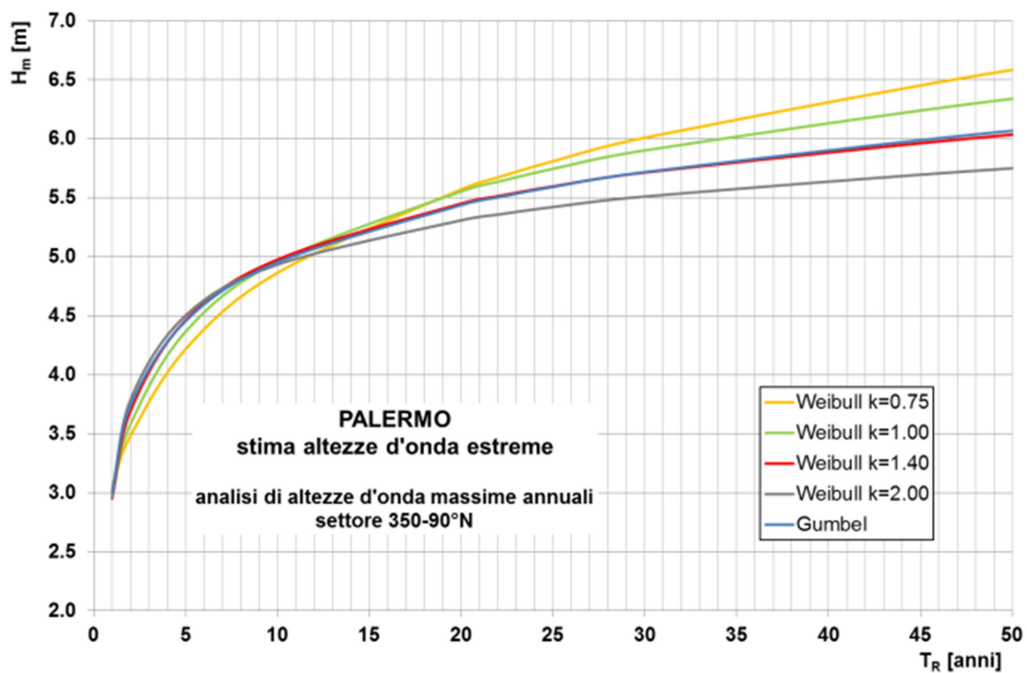


Figura 27. Previsione di altezze d'onda estreme. Palermo, massimi annuali, settore 350-90°N

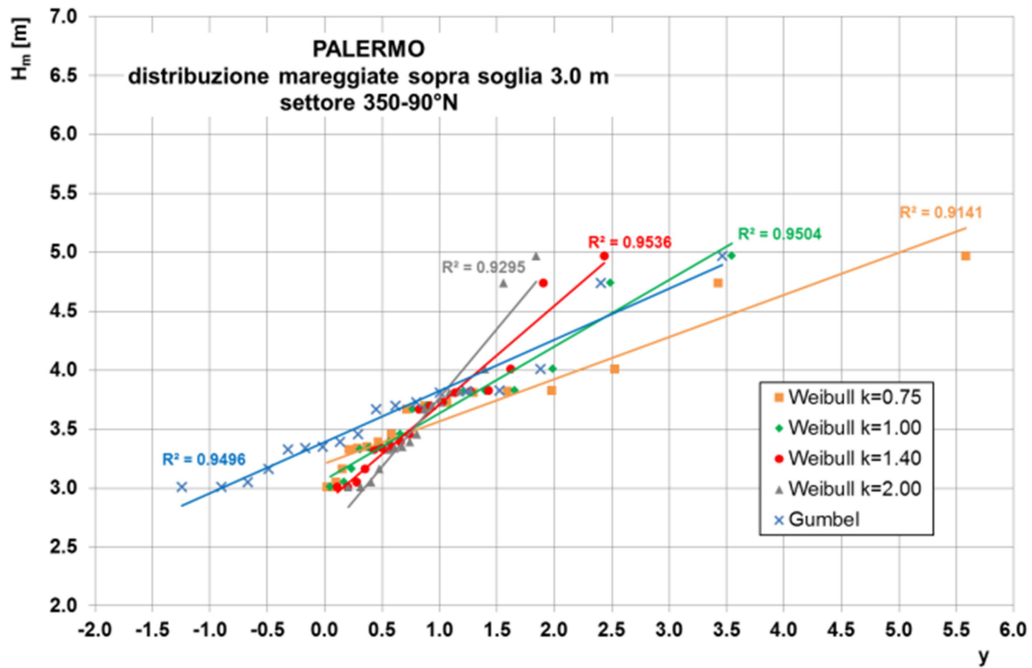


Figura 28. Carta Probabilistica. Palermo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, setto 350-90°N

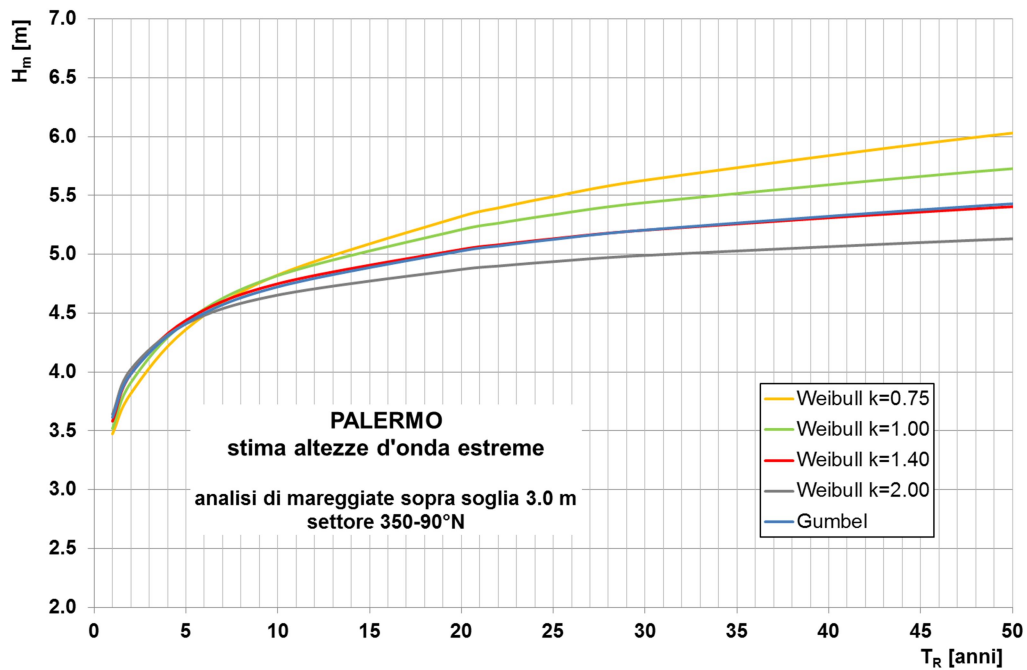


Figura 29. Previsione di altezze d'onda estreme. Palermo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, setto 350-90°N

<b>PALERMO - massimi annuali 230-350°N/omnidir. - altezze d'onda previste H<sub>m</sub> [m]</b>					
<b>T<sub>R</sub> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	4.71	4.74	4.68	4.65	4.66
2.0	5.32	5.10	5.18	5.28	5.36
5.0	5.92	5.73	5.85	5.93	5.96
10.0	6.34	6.27	6.35	6.36	6.32
20.0	6.75	6.87	6.85	6.76	6.64
22.0	6.81	6.96	6.92	6.81	6.68
25.0	6.88	7.08	7.01	6.88	6.73
30.0	6.99	7.25	7.14	6.98	6.81
50.0	7.28	7.73	7.51	7.25	7.01
<b>PALERMO - mareggiate H&gt;3.0 m omnidir. - altezze d'onda previste H<sub>m</sub> [m]</b>					
<b>T<sub>R</sub> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	4.94	4.87	4.98	4.99	4.93
2.0	5.34	5.46	5.49	5.40	5.25
5.0	5.87	6.31	6.16	5.90	5.62
10.0	6.27	7.00	6.67	6.25	5.87
20.0	6.66	7.72	7.18	6.60	6.10
22.0	6.72	7.82	7.25	6.64	6.14
25.0	6.79	7.96	7.35	6.71	6.18
30.0	6.89	8.15	7.48	6.79	6.24
50.0	7.18	8.72	7.86	7.03	6.39
<b>PALERMO - mareggiate H&gt;3.0 m 230-350°N - altezze d'onda previste H<sub>m</sub> [m]</b>					
<b>T<sub>R</sub> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	4.91	4.80	4.93	4.96	4.93
2.0	5.33	5.40	5.46	5.39	5.26
5.0	5.89	6.27	6.16	5.92	5.66
10.0	6.30	6.98	6.69	6.30	5.93
20.0	6.71	7.72	7.22	6.66	6.18
22.0	6.77	7.82	7.30	6.71	6.21
25.0	6.84	7.96	7.39	6.77	6.25
30.0	6.95	8.17	7.53	6.87	6.32
50.0	7.26	8.75	7.93	7.12	6.48
<b>PALERMO - massimi annuali 350-90°N - altezze d'onda previste H<sub>m</sub> [m]</b>					
<b>T<sub>R</sub> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	3.01	3.06	2.99	2.95	2.96
2.0	3.74	3.48	3.58	3.69	3.79
5.0	4.46	4.22	4.37	4.46	4.50
10.0	4.95	4.86	4.96	4.98	4.93
20.0	5.44	5.57	5.55	5.45	5.31
22.0	5.50	5.67	5.64	5.51	5.36
25.0	5.59	5.81	5.75	5.60	5.42
30.0	5.72	6.01	5.90	5.71	5.51
50.0	6.07	6.58	6.34	6.04	5.75

PALERMO - mareggiate $H > 3.0$ m 350-90°N - altezze d'onda previste $H_m$ [m]					
$T_R$ [anni]	Gumbel	Weibull $k=0.75$	Weibull $k=1.00$	Weibull $k=1.40$	Weibull $k=2.00$
1.0	3.61	3.47	3.52	3.58	3.64
2.0	3.98	3.82	3.91	3.98	4.02
5.0	4.41	4.36	4.43	4.44	4.41
10.0	4.72	4.82	4.82	4.75	4.65
20.0	5.03	5.32	5.21	5.04	4.87
22.0	5.07	5.39	5.26	5.08	4.90
25.0	5.13	5.49	5.34	5.13	4.94
30.0	5.21	5.63	5.44	5.20	4.99
50.0	5.43	6.03	5.73	5.40	5.13

Tabella 2. Altezze d'onda estreme previste al largo del sito di Palermo, al variare del periodo di ritorno

### 5.3 Elaborazioni per il sito di Augusta-Priolo

Per il sito di Augusta-Priolo, accanto all'intero settore di traversia, sono stati individuati, ai fini dell'analisi delle onde estreme, i seguenti sotto-settori direzionali:

- Settore N-E, comprendente le direzioni 30-90°N
- Settore S-E, comprendente le direzioni 90-150°N

I settori direzionali sono stati definiti sulla base dell'esposizione del paraggio e del clima ondosio, e sono coerenti con le analisi relative alla stazione RON di Catania presentate nell'Atlante delle Onde nei Mari Italiani [17].

In Fig. 30 sono riportati i diagrammi di scatter polare dei massimi annuali di altezza d'onda per il settore omnidirezionale e per i due settori individuati in precedenza. Anche in questo caso, non sono stati considerati gli anni in cui le registrazioni o erano assenti, o presentavano lunghi periodi di interruzione. Si osserva che i massimi annuali omnidirezionali sono presenti in entrambi i sotto-settori.

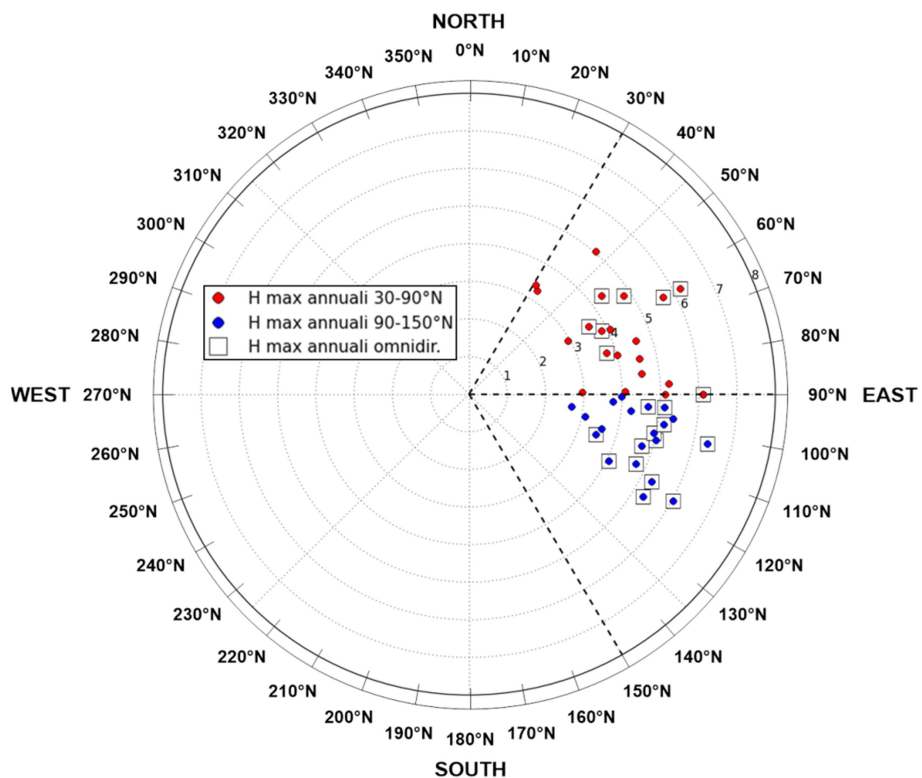
In Fig. 31 sono riportati gli eventi con altezze al picco di mareggiata superiori a 3.0 m. Gli eventi sono ripartiti in maniera sostanzialmente uniforme nei due settori direzionali.

Nelle Figg. 32, 34, 36, 38, 40 e 42, per ciascuno dei campioni considerati, sono riportate su carta probabilistica le *plotting position* dei massimi annuali di altezza d'onda, adattate alle diverse funzioni di distribuzione. Nelle Figg. 33, 35, 37, 39, 41 e 43 sono riportate, per ciascun campione analizzato, le altezze d'onda estreme al variare del periodo di ritorno previste in base ai differenti modelli probabilistici.

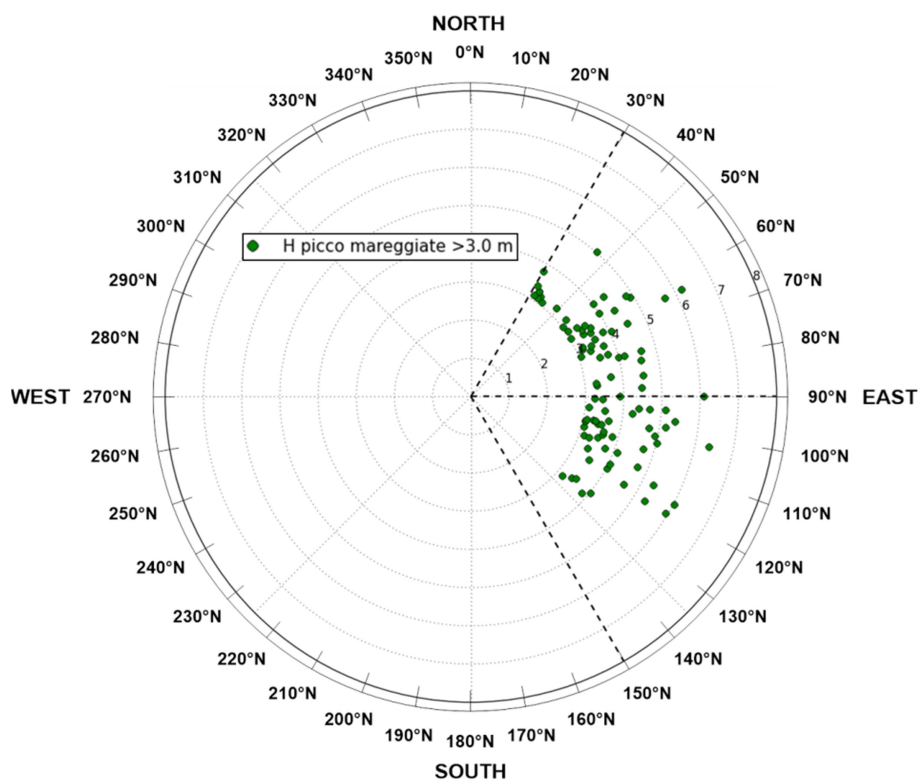
Sia per quanto riguarda l'adattamento dei dati alle distribuzioni statistiche, sia per le previsioni di altezza d'onda valgono considerazioni del tutto analoghe a quelle già presentate per il sito di Palermo.

I risultati relativi ad alcuni valori caratteristici del periodo di ritorno sono presentati nella Tab. 3.

Prendendo a riferimento, ad esempio, il settore omnidirezionale e la distribuzione di Weibull con  $k=1.4$ , si osserva che le altezze d'onda estreme variano da circa 4.6 m per un periodo di ritorno di 1 anno, a circa 7.3 m per un periodo di ritorno di 50 anni.



**Figura 30.** Altezze d'onda massime annuali al largo del sito di Augusta-Priolo. Trasposizione geografica ed elaborazioni eseguite su dati ISPRA-Servizio Mareografico "Rete Ondametrica Nazionale", Stazione di Catania



**Figura 31.** Altezze d'onda al picco di mareggiata maggiori di 3.0 m al largo del sito di Augusta-Priolo. Trasposizione geografica ed elaborazioni eseguite su dati ISPRA-Servizio Mareografico "Rete Ondametrica Nazionale", Stazione di Catania

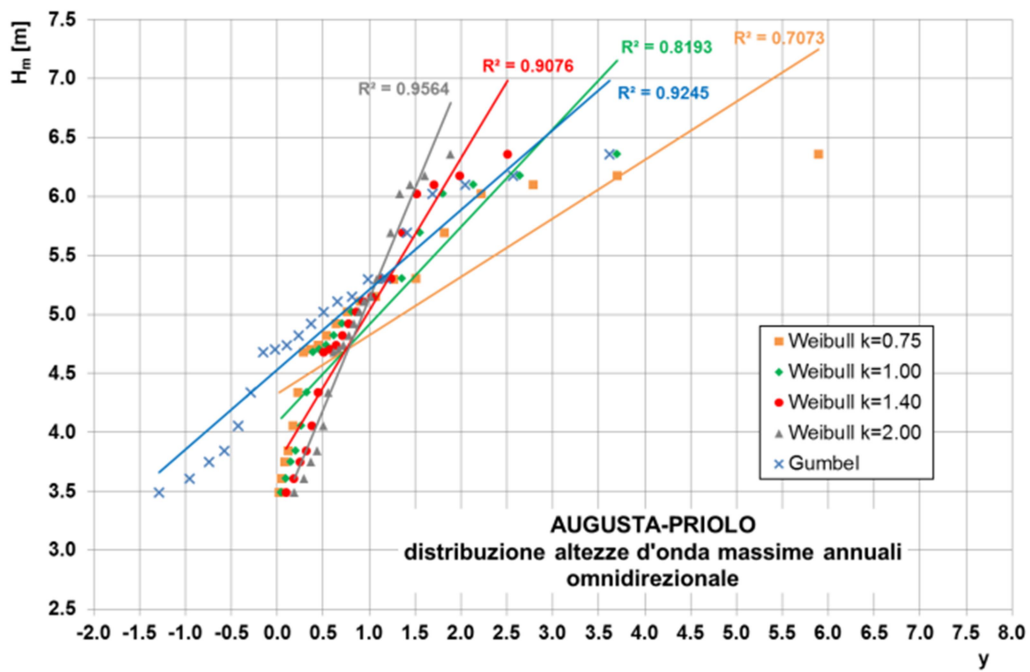


Figura 32. Carta Probabilistica. Augusta-Priolo, massimi annuali, settore omnidirezionale

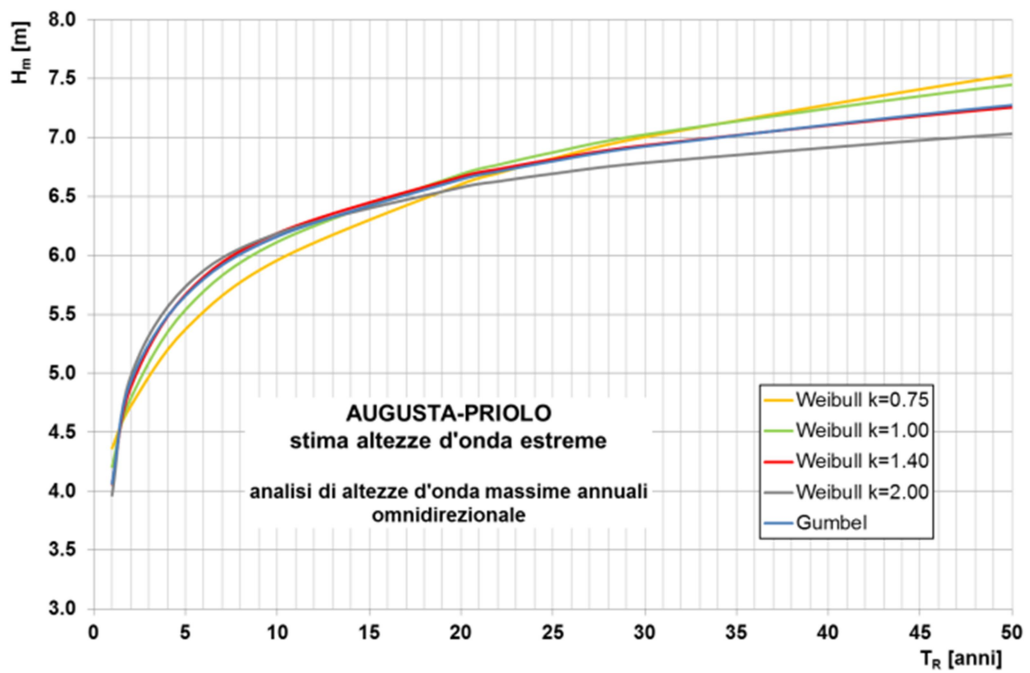


Figura 33. Previsione di altezze d'onda estreme. Augusta-Priolo, massimi annuali, settore omnidirezionale

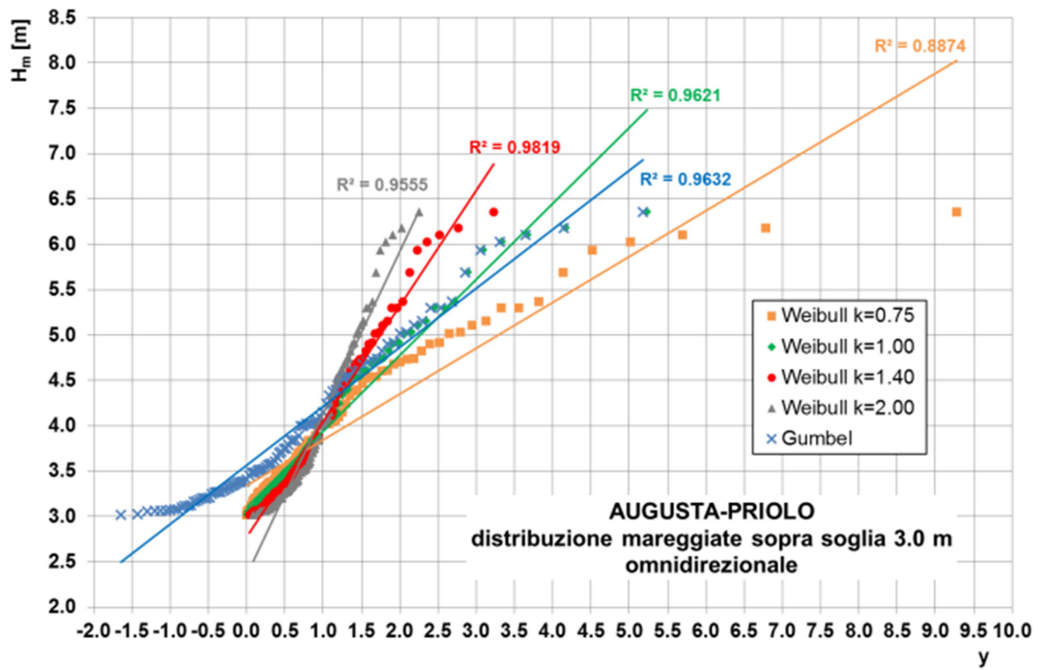


Figura 34. Carta Probabilistica. Augusta-Priolo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore omnidirezionale

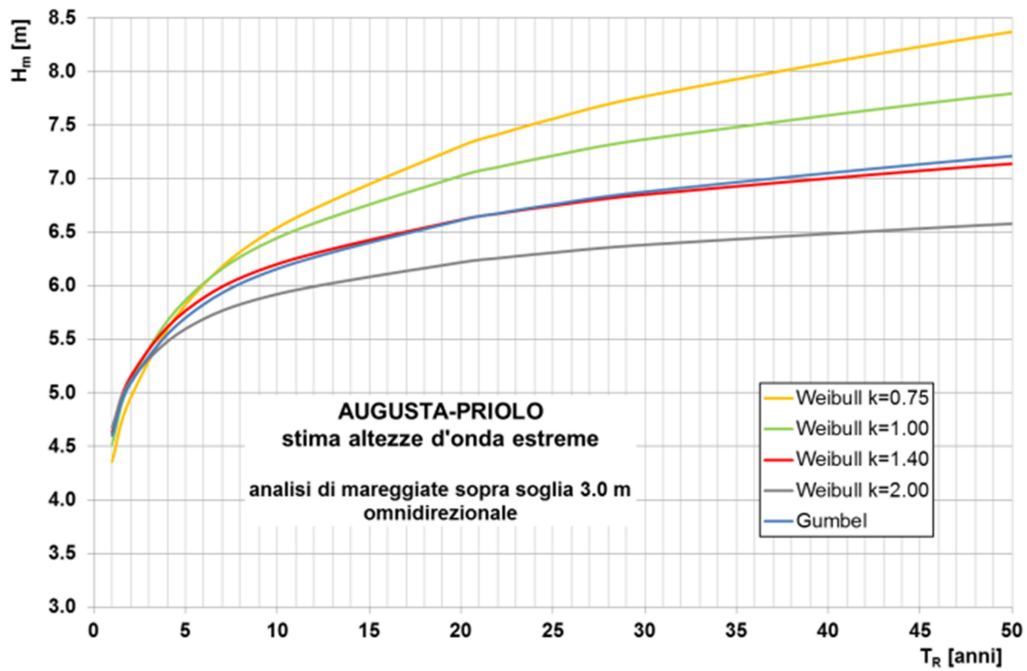


Figura 35. Previsione di altezze d'onda estreme. Augusta-Priolo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore omnidirezionale

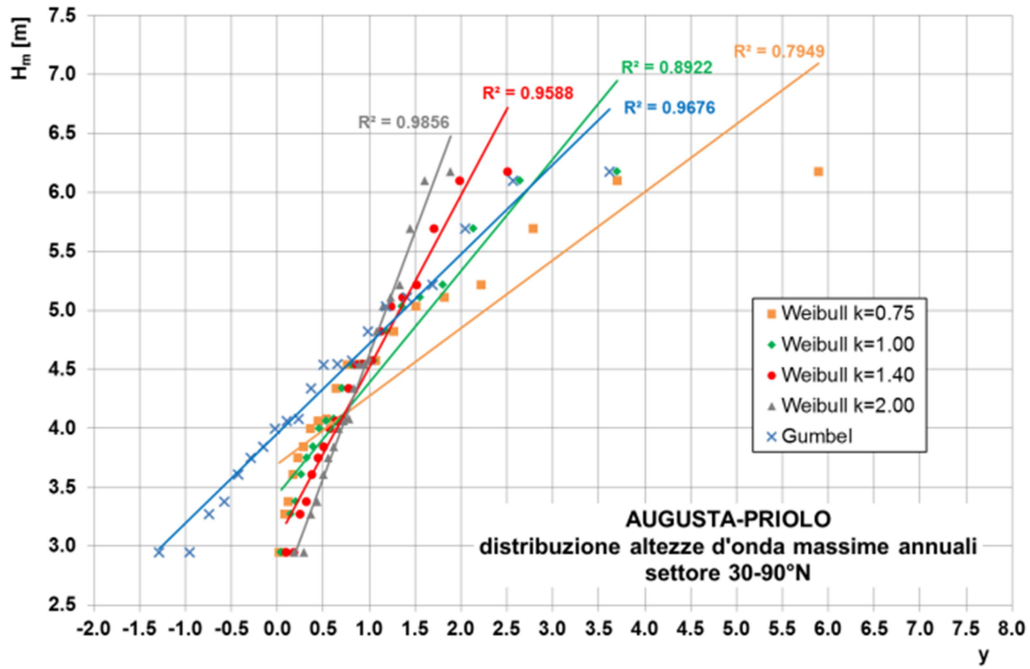


Figura 36. Carta Probabilistica. Augusta-Priolo, massimi annuali, settore 30-90°N

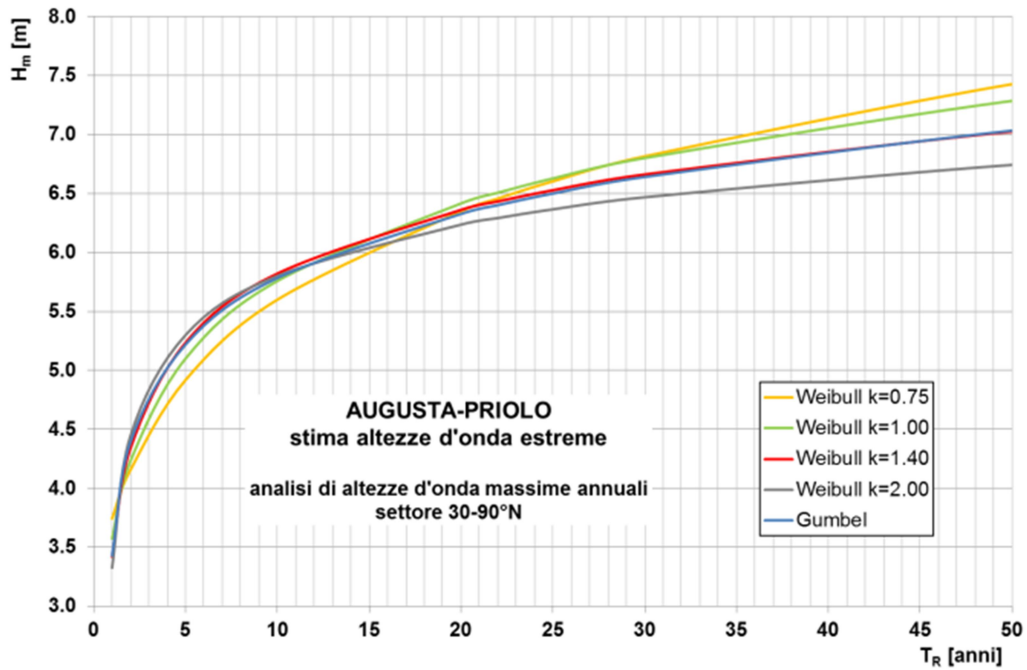


Figura 37. Previsione di altezze d'onda estreme. Augusta-Priolo, massimi annuali, settore 30-90°N

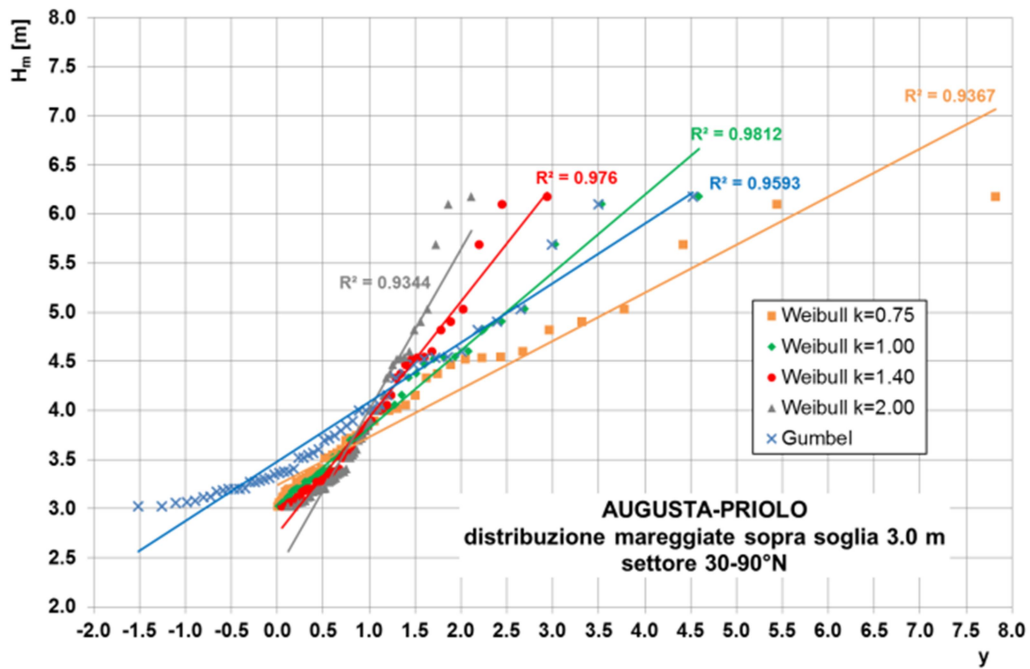


Figura 38. Carta Probabilistica. Augusta-Priolo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore 30-90°N

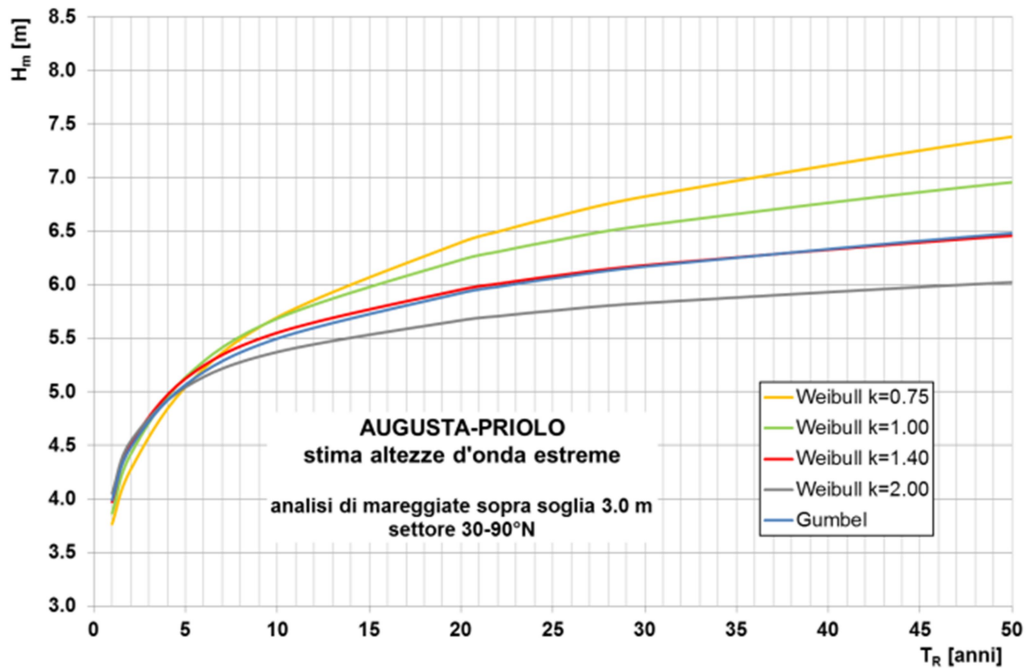


Figura 39. Previsione di altezze d'onda estreme. Augusta-Priolo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore 30-90°N

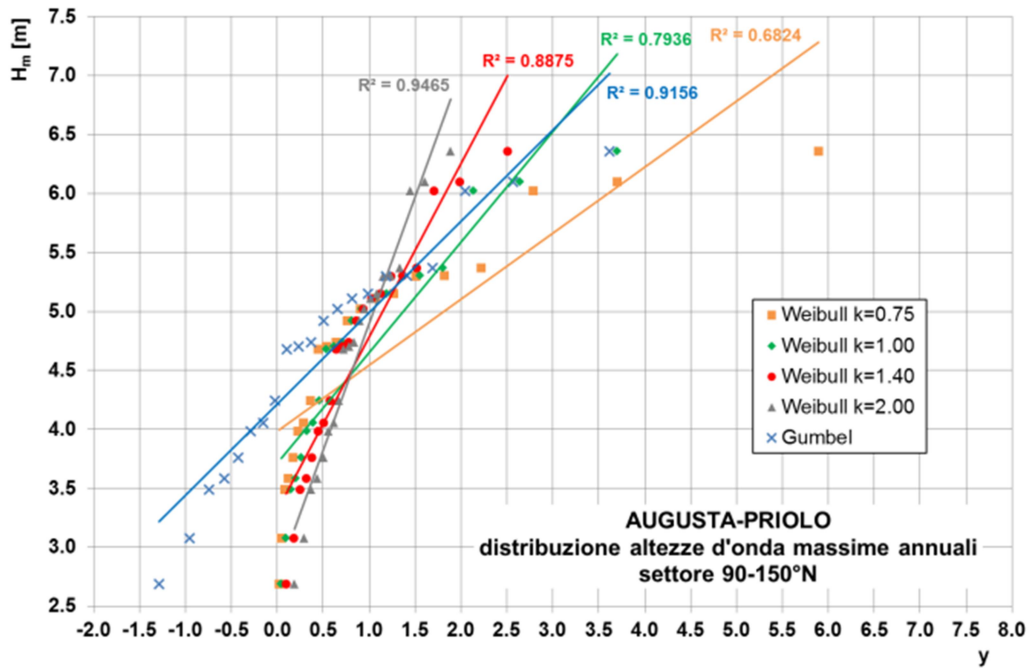


Figura 40. Carta Probabilistica. Augusta-Priolo, massimi annuali, settore 90-150°N

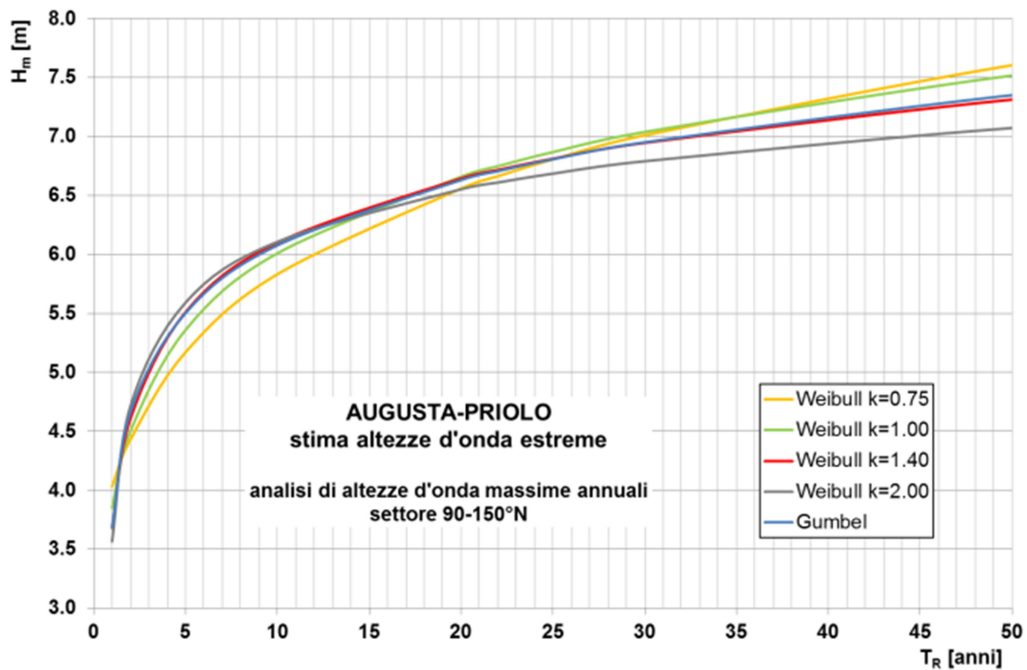


Figura 41. Previsione di altezze d'onda estreme. Augusta-Priolo, massimi annuali, settore 90-150°N

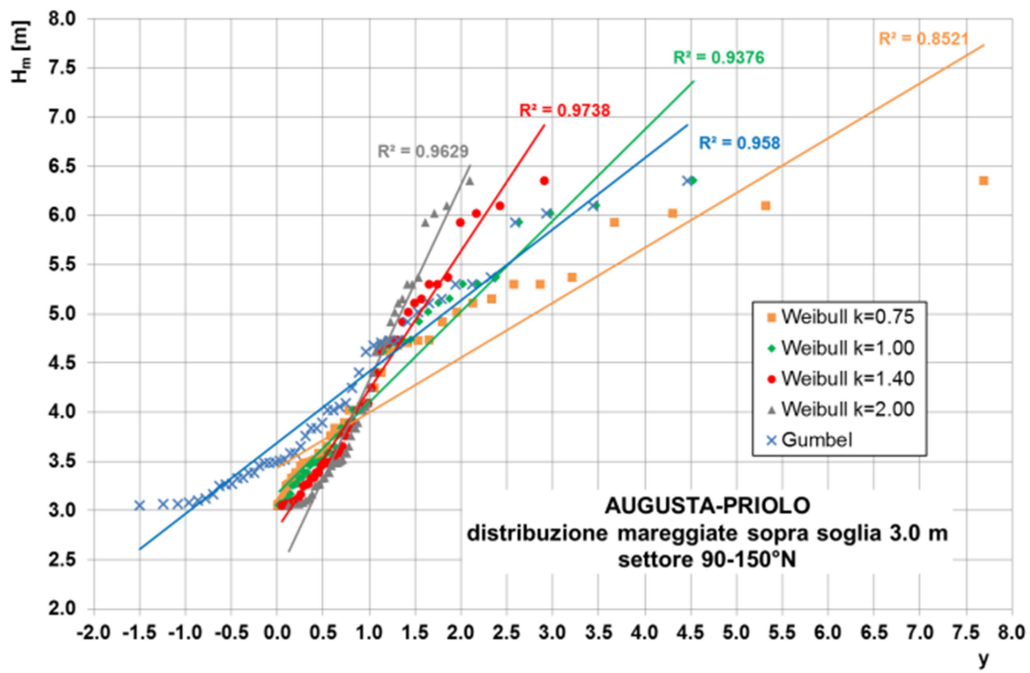


Figura 42. Carta Probabilistica. Augusta-Priolo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore 90-150°N

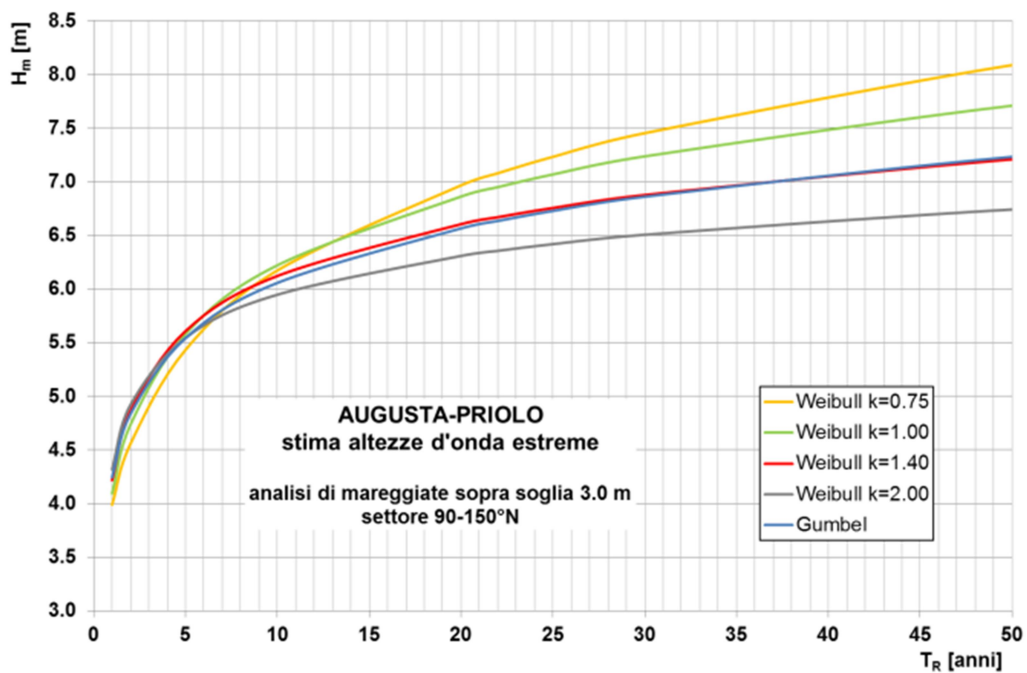


Figura 43. Previsione di altezze d'onda estreme. Augusta-Priolo, mareggiate sopra soglia 3.0 m, settore 90-150°N

<b>AUGUSTA-PRIOLO - massimi annuali omnidir. - altezze d'onda previste <math>H_m</math> [m]</b>					
<b><math>T_R</math> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	4.07	4.36	4.21	4.06	3.96
2.0	4.92	4.72	4.78	4.87	4.97
5.0	5.66	5.37	5.54	5.67	5.74
10.0	6.16	5.96	6.11	6.19	6.19
20.0	6.65	6.60	6.69	6.67	6.58
22.0	6.71	6.70	6.77	6.73	6.63
25.0	6.80	6.82	6.87	6.82	6.69
30.0	6.92	7.00	7.03	6.93	6.79
50.0	7.27	7.53	7.45	7.26	7.03
<b>AUGUSTA-PRIOLO - mareggiate <math>H&gt;3.0</math> m omnidir. - altezze d'onda previste <math>H_m</math> [m]</b>					
<b><math>T_R</math> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	4.60	4.36	4.52	4.63	4.68
2.0	5.09	4.95	5.10	5.15	5.11
5.0	5.70	5.82	5.87	5.77	5.60
10.0	6.16	6.54	6.45	6.20	5.92
20.0	6.61	7.30	7.03	6.62	6.22
22.0	6.67	7.41	7.11	6.67	6.26
25.0	6.76	7.56	7.21	6.74	6.31
30.0	6.88	7.77	7.36	6.85	6.38
50.0	7.21	8.37	7.79	7.14	6.58
<b>AUGUSTA-PRIOLO - massimi annuali 30-90°N - altezze d'onda previste <math>H_m</math> [m]</b>					
<b><math>T_R</math> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	3.43	3.74	3.57	3.42	3.32
2.0	4.39	4.15	4.23	4.34	4.44
5.0	5.22	4.92	5.10	5.23	5.30
10.0	5.78	5.60	5.76	5.82	5.80
20.0	6.33	6.35	6.42	6.36	6.24
22.0	6.40	6.46	6.51	6.43	6.29
25.0	6.50	6.60	6.63	6.53	6.37
30.0	6.64	6.82	6.80	6.66	6.47
50.0	7.03	7.43	7.29	7.03	6.74
<b>AUGUSTA-PRIOLO - mareggiate <math>H&gt;3.0</math> m 30-90°N - altezze d'onda previste <math>H_m</math> [m]</b>					
<b><math>T_R</math> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	3.99	3.77	3.86	3.97	4.05
2.0	4.48	4.27	4.41	4.50	4.53
5.0	5.07	5.04	5.14	5.12	5.04
10.0	5.50	5.70	5.68	5.55	5.37
20.0	5.92	6.39	6.23	5.95	5.67
22.0	5.98	6.49	6.31	6.01	5.71
25.0	6.06	6.63	6.41	6.08	5.76
30.0	6.17	6.82	6.55	6.18	5.83
50.0	6.48	7.38	6.96	6.46	6.02

<b>AUGUSTA-PRIOLO - massimi annuali 90-150°N - altezze d'onda previste <math>H_m</math> [m]</b>					
<b><math>T_R</math> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	3.68	4.03	3.85	3.68	3.57
2.0	4.66	4.43	4.50	4.61	4.71
5.0	5.50	5.17	5.36	5.51	5.59
10.0	6.08	5.83	6.01	6.10	6.11
20.0	6.63	6.56	6.66	6.64	6.55
22.0	6.71	6.66	6.75	6.72	6.61
25.0	6.81	6.80	6.87	6.81	6.69
30.0	6.95	7.01	7.04	6.95	6.79
50.0	7.35	7.60	7.52	7.31	7.07
<b>AUGUSTA-PRIOLO - mareggiate <math>H&gt;3.0</math> m 90-150°N - altezze d'onda previste <math>H_m</math> [m]</b>					
<b><math>T_R</math> [anni]</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Weibull k=0.75</b>	<b>Weibull k=1.00</b>	<b>Weibull k=1.40</b>	<b>Weibull k=2.00</b>
1.0	4.24	3.99	4.09	4.22	4.32
2.0	4.83	4.56	4.73	4.86	4.92
5.0	5.54	5.43	5.58	5.61	5.54
10.0	6.06	6.17	6.22	6.12	5.95
20.0	6.56	6.97	6.86	6.60	6.31
22.0	6.63	7.08	6.95	6.67	6.36
25.0	6.73	7.23	7.07	6.75	6.42
30.0	6.86	7.45	7.24	6.88	6.51
50.0	7.23	8.09	7.71	7.21	6.74

*Tabella 3. Altezze d'onda estreme previste al largo del sito di Augusta-Priolo, al variare del periodo di ritorno*

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Arthur, R.S., 1950. “Wave Forecasting and Hindcasting”, *Proceedings of 1st International Conference on Coastal Engineering*, Long Beach, CA, USA, pp. 82–87.
- [2] Sverdrup, H.U., Munk, W.H., 1947. *Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for Forecasting*, H.O. Pub. 601, U.S. Navy Department - Hydrographic Office, Washington, DC, USA.
- [3] Bretschneider, C.L., 1965. *Generation of Waves by Wind. State of the Art*, Report SN-134-6, National Engineering Science Company, Washington, DC, USA.
- [4] USACE, 1984. *Shore Protection Manual*, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, USA.
- [5] Saville, T.J., 1954. *The Effect of Fetch Width on Wave Generation*, Technical Memorandum 70, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
- [6] Seymour, R.J., 1977. “Estimating Wave Generation on Restricted Fetches”, *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 103(2), pp. 251–264.
- [7] Donelan, M.A., 1980. “Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods, and Directions”, *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, Burlington, Ontario, Canada, pp. 47–61.
- [8] Smith, J.M., 1991. *Wind-Wave Generation on Restricted Fetches*, Miscellaneous Paper CERC-91-2, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, USA.
- [9] Leenknecht, D.A., Szuwalski, A., Sherlock, A.R., 1992. *Automated Coastal Engineering System Technical Reference*, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, USA.
- [10] Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., 1994, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, New York, USA.
- [11] Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. “A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions”, *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), pp. 7649–7666.
- [12] Cavaleri, L., Alves, J.-H.G.M., Ardhuin, F., Babanin, A., Banner, M., Belibassakis, K., Benoit, M. et al., 2007. “Wave Modelling—The State of the Art”, *Progress in Oceanography*, 75, pp. 603–674.
- [13] Catini, F., Montagna, F., Franco, L., Bellotti, G., Corsini, S., Inghilesi, R., Orasi, A., 2010. “Development of a High-Resolution Nearshore Wave Forecasting/hindcasting System for the Italian Coasts”, *Proceedings of 32nd International Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, pp. 409–422.
- [14] Carillo, A., Sannino, G., Lombardi, E., 2015. “Wave Energy Potential: A Forecasting System for the Mediterranean Basin,” *Energia, Ambiente e Innovazione*, Special Issue II-2015, pp. 16–21.

- [15]WMO, 1998. *Guide to Wave Analysis and Forecasting*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- [16]*The Coastal Data Information Program*, <http://www.cdip.ucsd.edu/> (accesso effettuato il 30/05/2017).
- [17]Corsini, S., Inghilesi, R., Franco, L., Piscopia, R., 2006, *Atlante delle Onde nei Mari Italiani*, Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT), Università degli studi di Roma Tre, Roma.
- [18]Bencivenga, M., Nardone, G., Ruggiero, F., Calore, D., 2012. “The Italian Data Buoy Network (RON)”, *Advances in Fluid Mechanics IX, WIT Transactions on Engineering Sciences*, 74, pp. 321–332.
- [19]RON. *Rete Ondametrica Nazionale*, <http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/> (accesso effettuato il 30/05/2017).
- [20]Contini, P., De Girolamo, P., 1998. “Impatto Morfologico di Opere a Mare: Casi di Studio”, *Atti VIII Convegno AIOM–Associazione di Ingegneria Offshore e Marina*, Lerici (SP).
- [21]Pasanisi, F., Tebano, C., 2016. “A QGIS Plugin for Offshore Wave Hindcasting Based on Geographic Transposition of Wave Gauge Data”, *Journal of Applied Engineering Sciences*, 6(19), 2/2016, pp. 33-40.
- [22]QGIS. *A Free and Open Source Geographic Information System*, <http://www.qgis.org/> (accesso effettuato il 30/05/2017).
- [23]Goda, Y., 1988. “On the Methodology of Selecting Design Wave Height”, *Proceedings of 21st International Conference on Coastal Engineering*, Costa del Sol-Malaga, Spain, pp. 899–913.
- [24]Mathiesen, M., Goda, Y., Hawkes, P.J., Mansard, E., Martin, M.J., Peltier, E., Thompson, E.F., Van Vledder, G., 1994. “Recommended Practice for Extreme Wave Analysis”, *Journal of Hydraulic Research*, 32(6), pp. 803–814.

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
giugno 2017