

COMMITTENTE



AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO
Porti di Palermo e Termini Imerese

LAVORI DI COMPLETAMENTO DEL MOLO FORANEO DI SOPRAFLUTTO DEL PORTO DI TERMINI IMERESE

**PROGETTO DEFINITIVO
PROGETTO GENERALE**

TITOLO

**RELAZIONE TECNICHE
STUDIO METEOMARINO**

ELABORATO	SCALA	NS. RIF	RIF. ARC. - NA4
B.2	-	B_2.doc	AUTAPA11 - 88

DATA	REVISIONE	REDATTORE	CONTROLLO	APPROVAZIONE
17 giugno 2013	emissione	AL	GI	EC



AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO
Porti di Palermo e Termini Imerese

PROGETTAZIONE IMPIANTI

Ing. Salvatore Acquista
Ing. Enrico Petralia

*Collaboratori per la progettazione
degli impianti*

Geom. Vincenzo D'Amico
Geom. Antonino Martorana

**IL RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO**
Ing. Sergio La Barbera

**COORDINATORE PER
LA SICUREZZA IN FASE
DI PROGETTAZIONE**

Ing. Paolo Tusa



IL PROGETTISTA
*Responsabile dell'integrazione
tra le prestazioni specialistiche*
Ing. Elio Ciralli

Coordinamento
Ing. Giancarlo Inserra

Collaboratori
Arch. Ivana Lorenzano
Ing. Alfredo Lucarelli

AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO

Porti di Palermo e Termini Imerese

LAVORI DI COMPLETAMENTO DEL MOLO FORANEO

DI SOPRAFLUTTO DEL PORTO DI TERMINI IMERESE

PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTO GENERALE

STUDIO METEOMARINO

GIUGNO 2013

VERSIONE:	DESCRIZIONE:	PREPARATO:	APPROVATO:	DATA:
00	EMISSIONE	AL	GI	17 GIU 2013
NOME FILE: B2.DOC			DISTRIBUZIONE: RISERVATA	

INDICE

1. GENERALITÀ	3
2. INQUADRAMENTO GENERALE	4
2.1 CARATTERISTICHE DEL PARAGGIO.....	4
2.2 REGIME CLIMATICO.....	5
2.3 REGIME ANEMOLOGICO	5
2.4 REGIME CORRENTOMETRICO	5
2.4.1 LE CORRENTI DI GRADIENTE	6
2.4.2 LE CORRENTI DI DERIVA	6
2.4.3 LA DIREZIONE DELLA CORRENTE	6
2.4.4 CIRCOLAZIONE GENERALE	7
2.4.5 CIRCOLAZIONE NEL MEDITERRANEO	7
2.4.6 LE CORRENTI PRESSO IL PORTO DI TERMINI IMERESE	8
3. DATI METEOMARINI DISPONIBILI	9
3.1 TIPOLOGIA DELLE FONTI DI DATI METEOMARINI A DISPOSIZIONE	9
3.2 CENSIMENTO DEI DATASET ESISTENTI	9
3.2.1 La rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.)	10
3.2.2 La rete del servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare	11
3.2.3 Il centro europeo per le previsioni meteorologiche (ECMWF)	11
3.2.4 L'atlante MEDATLAS	12
3.2.5 Il servizio meteorologico UKMO	12
4. DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI	14
4.1 RISULTATI DEI PRECEDENTI STUDI	14
4.1.1 Studi del 1981 redatti dal Prof. Ing. Mallandrino	14
4.1.2 Studi del 2002 per il Piano Regolatore Portuale vigente	15
4.1.3 Studi redatti nel 2004 per gli interventi di protezione della costa compresa tra il porto di Termini Imerese e il F. San Leonardo	16
4.1.4 Studi del 2007 redatti dalla società HR Wallingford	17
4.1.5 Studi redatti dallo "Studio Mallandrino S.R.L." nel 2009 per la VAS del PRP	18
4.2 ULTERIORI ELABORAZIONI PER LA STIMA DEGLI EVENTI ESTREMI.....	20
4.2.1 Elaborazione del database ECMWF – "ERA INTERIM"	20
4.2.2 Ulteriori analisi sui database MEDATLAS e METOFFICE	23
4.3 SCELTA DEGLI STATI DEL MARE ESTREMI DI PROGETTO	26
5. ANALISI DEL CLIMA D'ONDA AL LARGO	35
6. TRASFORMAZIONE DELL'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA.....	47
6.1 RIFRAZIONE E SHOALING	47
6.2 MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO	48
6.3 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO	50

6.4	SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE	51
6.5	PROPAGAZIONE DEL CLIMA D'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA	52
6.6	PROPAGAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI DAL LARGO VERSO RIVA	59
7.	ANALISI DEGLI STATI DI MARE DEL SETTORE DI TRAVERSIA SECONDARIA DI TERMINI IMERESE 63	
7.1	RICHIAMI TEORICI	63
7.2	STIMA DEGLI EVENTI ESTREMI GENERATI DAL VENTO	65
8.	ANALISI DEI LIVELLI IDRICI	71
8.1	LIVELLI IDRICI OSSERVATI	71
8.2	LIVELLI IDRICI INDOTTI DALLA MAREA ASTRONOMICA	72
8.3	DETERMINAZIONE DELLO STORM SURGE	73
8.3.1	<i>ELEVAZIONE PER VENTO</i>	73
8.3.2	<i>LIVELLI IDRICI INDOTTI DAI GRADIENTI DI PRESSIONE ATMOSFERICA</i>	75
8.3.3	<i>ELEVAZIONE PER ONDE (WAVE SETUP)</i>	77
8.3.4	<i>OSSERVAZIONI IN MERITO ALLO STORM SURGE</i>	78
8.4	CONSIDERAZIONI FINALI SUI LIVELLI IDRICI	79
8.5	CAMBIAMENTO CLIMATICO	79
8.6	PREVISIONI DEL LIVELLO MEDIO MARINO INDOTTO DAI CAMBIAMENTI CLIMATICI	80
9.	CONCLUSIONI	84

1. GENERALITÀ

L'Autorità Portuale di Palermo, a seguito di due distinte gare espletate, secondo i principi della procedura negoziata, ex art.125, comma 11, del D.Lgs 163/2006, e secondo il criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa, e in virtù dei finanziamenti regionali ex art. 111 della L.R.S. n. 11/2010, ha affidato:

- alla "Progetti e Opere S.R.L." il servizio di redazione del progetto definitivo dei "Lavori di completamento del molo foraneo di sopraflutto del porto di Termini Imerese";
- allo "Studio Mallandrino S.R.L." il servizio di redazione del progetto definitivo dei "Lavori di completamento del molo foraneo di sottoflutto del porto di Termini Imerese".

A supporto di tali progettazioni sono stati redatti una serie di studi specialistici, tra cui il presente "Studio Meteomarino" al fine di eseguire la caratterizzazione ondometrica del paraggio in esame, attraverso la definizione del regime ondometrico al largo e lo studio del fenomeno di trasformazione del moto ondoso dal largo verso riva con l'analisi dei fenomeni di rifrazione, shoaling e frangimento.

Lo studio è stato condotto secondo le seguenti fasi.

Preliminarmente è stato eseguito un inquadramento generale del sito in esame ed è stata eseguita l'individuazione dei fetch geografici ed efficaci per il paraggio in esame.

Si è quindi proceduto alla determinazione del clima d'onda e degli eventi estremi al largo, in base alle fonti meteomarine disponibili.

In seguito, sono state eseguite elaborazioni di calcolo, mediante l'utilizzo di idonei modelli matematici, al fine di investigare i fenomeni di propagazione degli stati del mare dal largo verso riva, derivando le condizioni da porre a base dei successivi studi.

Sono state inoltre con particolare attenzione valutate le ondate generate da venti che agiscono su fetch limitati, come quelli provenienti dal II quadrante, che notoriamente sono causa di notevoli fenomeni di agitazione residua nel sito portuale.

Infine sono state eseguite valutazioni per la previsione dei livelli idrici marini per il sito in esame.

2. INQUADRAMENTO GENERALE

Di seguito si riportano in breve le descrizioni delle caratteristiche del paraggio e del regime climatico, anemologico e correntometrico per sito in esame.

2.1 CARATTERISTICHE DEL PARAGGIO

Il Porto di Termini è situato lungo la costa settentrionale della Sicilia e all'interno dell'unità fisiografica Capo Zafferano – Capo Cefalù.

In particolare esso è situato tra le foci dei fiumi:

- S. Leonardo a est;
- Imera Settentrionale a ovest.

Altri corsi d'acqua di rilievo per il sito in questione sono:

- il fiume Torto,
- il torrente Barratina, avente foce in prossimità dell'attuale molo di sottoflutto.



Figura 2.1 - Stralcio dell'immagine satellitare relativa all'area di interesse

L'individuazione del settore geografico di traversia, che sottende il paraggio in studio, è stata effettuata sulla carta Tecnica Regionale a scala 1:10.000 e sulle carte dell'Istituto Idrografico della Marina, su un punto sulla batimetrica dei 100 m di fronte il sito interesse. Esso risulta compreso tra 300°N e 90°N.

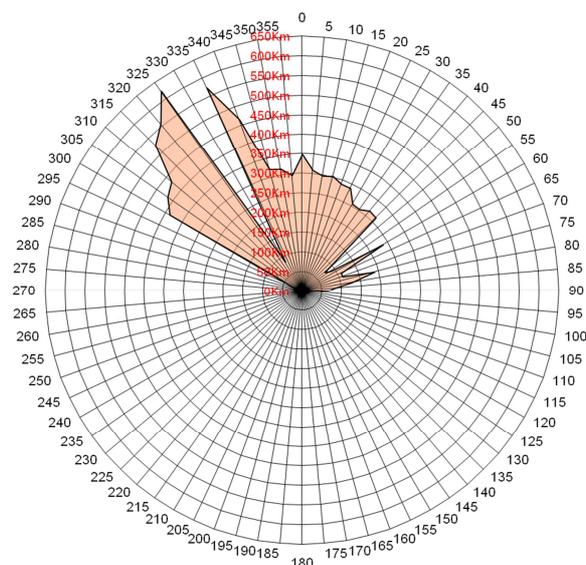


Figura 2.2- Individuazione del settore di traversia per il sito di Termini Imerese

2.2 REGIME CLIMATICO

L'analisi del regime climatico è stata effettuata attraverso l'uso degli annali pubblicati dalla Regione Siciliana (Ufficio Idrografico); in particolare, si sono presi in considerazione i dati inerenti al periodo 1976-1994 registrati presso le stazioni termo-pluviometriche e pluviometriche più prossime all'area in esame. Tali dati climatici risultano essere tra quelli più aggiornati per l'area in esame. A conferma di ciò basta pensare che la Regione Sicilia ha utilizzato tali dati per l'elaborazioni relative a Piano di Assesto Idrogeologico (2006) e ai suoi aggiornamenti.

Per una visualizzazione dei dati termo-pluviometrici si rimanda a quanto riportato nell'elaborato "Studio Climatologico".

In sintesi, i caratteri climatici riportati delineano un clima di tipo temperato mediterraneo caratterizzato da precipitazioni concentrate nel periodo autunnale-invernale e quasi assenti in quello estivo; le temperature raggiungono i valori maggiori nel periodo maggio-settembre mentre da ottobre ad aprile vengono raggiunti i valori minori.

Per maggiori chiarimenti in merito si rimanda all'elaborato "Studio Climatologico".

2.3 REGIME ANEMOLOGICO

Per quanto riguarda l'anemologia, non possedendo dati locali sul clima anemologico riguardanti direttamente la zona del porto di Termini Imerese, si è fatto riferimento ai i dati di anemometrici della stazione dell'Aeronautica Militare di Ustica dal 1971 al 2000, così come riportati nell'atlante climatico redatto dal Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia dell'Aeronautica , il CNMCA. Per maggiori informazioni su tale fonte si rimanda all'elaborato "Studio Climatologico".

In sintesi, i venti di mare, che generano cioè i fenomeni ondosi che impattano il litorale, prevalenti in intensità e frequenza per il paraggio in esame sono quelli del IV quadrante (Maestrale e Tramontana), considerato che i venti dal I quadrante (Grecale e Levante) non sono mai fortissimi e sono peraltro di minor frequenza.

Per la visualizzazione dei diagrammi anemometrici stagionali relativi alla stazione di Ustica si rimanda a quanto riportato nell'elaborato "Studio Climatologico".

2.4 REGIME CORRENTOMETRICO

Con il termine correnti marine viene indicato il movimento di massa d'acqua collegato alla marea, al vento o al moto ondoso. Le correnti, di cui il navigante nota solo l'effetto superficiale, esistono lungo tutta la massa d'acqua, e talvolta solo in determinati strati senza causare effetti visibili in superficie; esse si verificano prevalentemente in acque profonde ed in mari aperti.

Inoltre, mentre le correnti di marea hanno un ciclo temporale ben definito, le correnti marine sono permanenti (o stazionarie) oppure stagionali (o semipermanenti). Esistono diversi tipi di correnti marine e possono essere classificate:

- in base alle cause che le creano (correnti di gradiente e correnti di deriva);
- in relazione alla temperatura dell'acqua che si sposta confrontata con la temperatura dell' acqua che la circonda (correnti calde o fredde);
- in relazione alla profondità ove si verificano (superficiali se interessano lo strato d'acqua dalla superficie ai 200 metri; interne se interessano lo strato d'acqua al di sotto dei 200 metri; di fondo se interessano lo strato d'acqua vicino al fondale marino).

Il moto orizzontale della massa d'acqua superficiale (o corrente superficiale), è dovuto all'azione combinata di correnti di gradiente e di deriva, ed è quello di maggior interesse per le analisi idrodinamiche. Le correnti che interessino seni, baie o foci sono fondamentali ai fini del ricambio idrico e per lo scambio fluido e di sedimenti da e verso il mare aperto.

2.4.1 LE CORRENTI DI GRADIENTE

Sono dovute alla irregolare distribuzione della pressione sulla superficie del mare, ed alla differenza di densità di masse d'acqua adiacenti. Queste correnti si generano quando la superficie dell'acqua assume una certa inclinazione, fatto che accade per l'azione del vento, o per la presenza di masse d'acqua contigue di diversa temperatura e salinità.

Le correnti di gradiente dovute a diversa pressione atmosferica ed all'ammassamento dell'acqua dovuto al vento, tendendo a ristabilire l'orizzontalità della superficie marina, sono di intensità modesta, e pressoché irrilevanti ai fini della navigazione in mare aperto. La situazione cambia in prossimità di costa, se il vento che spira verso la costa è di intensità adeguata, si possono ammassare lungo costa notevoli masse d'acqua che, non potendo rifluire verso il largo a causa del vento contrario, danno luogo a forti correnti che scorrono parallelamente alla costa.

Le correnti di gradiente dovute a differenza di densità si presentano soprattutto negli strati interni della massa d'acqua, e hanno effetto apprezzabile sulla navigazione solo nell'esempio sopra descritto.

2.4.2 LE CORRENTI DI DERIVA

Sono dovute all'azione di trascinamento creato dall'attrito esistente tra la massa d'aria in movimento e la massa d'acqua superficiale del mare. I forti venti costanti come gli alisei che spirano in Oceano Atlantico, ed i monsoni che spirano nell'oceano indiano, sono la causa di gran parte delle correnti di deriva costanti.

Il vento tende a trascinare lo strato superficiale delle acque marina nella sua stessa direzione, il movimento di deriva si trasmette agli strati inferiori con intensità decrescente e direzione man mano variabile; il movimento inizia con ritardo rispetto al momento di inizio dell'azione del vento e solo gradualmente raggiunge la velocità di regime.

Venti leggeri possono generare deboli correnti di deriva in circa sei ore, sono necessarie ben 48 ore di vento forte perché la relativa corrente di deriva raggiunga la velocità di regime.

L'intensità della corrente di deriva a regime è pari a circa l'1,5 % della velocità del vento che l'ha generata, velocità che dipende anche da altri fattori, ed in particolare dall'ampiezza dello specchio d'acqua libero da ostacoli, denominato fetch, esistente nella direzione di provenienza del vento. Fetch limitati non consentono alla corrente di raggiungere velocità della percentuale sopra indicata, anche se il vento spira dalla stessa direzione per periodi di tempo superiori alle 48 ore.

2.4.3 LA DIREZIONE DELLA CORRENTE

Le forze che mettono in movimento sia le correnti di gradiente sia quelle di deriva, tendono a muovere la massa d'acqua in una ben determinata direzione. Nel caso delle correnti di gradiente dal luogo a livello maggiore verso quello a livello minore, nel caso di correnti di deriva nello stesso senso di propagazione del vento (a meno di una differenza di circa 20°). In effetti le direzioni di propagazione sono sensibilmente diverse da quelle sopra descritte; in particolare le correnti che si propagano nell'emisfero Nord subiscono una deviazione verso la destra rispetto

alla direzione di propagazione, quelle che si propagano nell'emisfero Sud subiscono una deviazione verso sinistra.

Le deviazioni sono dovute alla rotazione terrestre che genera la nota forza di Coriolis, che agisce su tutte le masse in movimento sul pianeta, ed il cui effetto è più sentito quanto più è grande la massa in movimento.

Oltre alla forza di Coriolis influiscono sulla direzione e sulla intensità delle correnti marine anche altri fattori, natura e vicinanza della costa, presenza di golfi o stretti, maggiore o minore distanza tra la superficie del mare ed il fondo.

2.4.4 CIRCOLAZIONE GENERALE

Le correnti marine così strettamente legate ai fattori meteorologici, sono oggetto di continui studi dai quali è stato possibile ricavare dei "modelli di circolazione", ossia situazioni standard che si verificano in concomitanza con determinate situazioni meteorologiche stagionali. Esistono innumerevoli modelli di circolazione che si applicano ai diversi bacini, da quelli oceanici che hanno validità temporale di mesi, a quelli di piccoli golfi di particolare interesse e validi solo per particolari situazioni di vento o insolazione.

In questa sede daremo qualche lineamento generale della circolazione superficiale del Mediterraneo.

2.4.5 CIRCOLAZIONE NEL MEDITERRANEO

Nel bacino del Mediterraneo le correnti sono solitamente deboli e di direzione variabile. La circolazione superficiale è fortemente influenzata dai venti che al largo possono generare correnti superficiali di intensità fino ai due nodi.

Poiché l'evaporazione dovuta all'effetto del sole è tale da non poter essere compensata dall'apporto di acqua fluviale e piovana, è sempre presente una corrente entrante dallo stretto di Gibilterra. In sostanza il Mediterraneo viene rifornito da acqua oceanica che, dopo aver passato lo stretto di Gibilterra, fluisce verso Est. In realtà in corrispondenza dello stretto la direzione della corrente non è sempre entrante, ma ciò è dovuto alla sovrapposizione alla corrente di gradiente appena descritta, della corrente di marea che in quell'area ha valori sensibili.

La corrente entrante nel Mediterraneo si spinge verso Est dividendosi in un ramo principale ed in altri secondari; il ramo principale, sotto l'effetto della forza di Coriolis, dirige verso destra e si addossa alla costa africana perdendo intensità fino ad estinguersi; l'intensità della corrente si mantiene fra 0,8 ed 1 nodo lungo le coste dell'Algeria, quindi diminuisce procedendo verso oriente; nello stretto di Sicilia l'intensità varia tra 0,4 ed 1 nodo. A questo andamento generale si sovrappongono numerose e varie situazioni particolari.

Gli estratti di seguito riportati danno un'indicazione chiara della circolazione superficiale del mediterraneo e della zona d'interesse; le frecce mostrano la direzione media della corrente.

3. DATI METEOMARINI DISPONIBILI

3.1 TIPOLOGIA DELLE FONTI DI DATI METEOMARINI A DISPOSIZIONE

Una delle fasi fondamentali per la redazione di uno studio meteomarino è rappresentata dal reperimento dei dati affidabili, desunti dai database disponibili.

Tra le fonti di dati più diffusi per le coste italiane si citano :

- Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.) dell'ISPRA;
- Registrazioni anemologiche dell'Aeronautica Militare Italiana;
- Centro europeo per le previsioni meteorologiche ECMWF;
- Atlante "MEDATLAS";
- Servizio meteorologico britannico UKMO;
- Marina Militare Olandese (KNMI).

Attualmente esiste una certa quantità di dati meteomarini a disposizione; tuttavia, ciascuna delle suddette fonti è caratterizzata da limiti e imprecisioni per ragioni diverse.

Alcuni database, quali quello della R.O.N. sono stati realizzati mediante registrazione diretta di dati con sistemi di misura ondametrici: le boe ondametriche, però, pur fornendo dati abbastanza affidabili, sono spazialmente distribuite in quantità limitata e soggette a problematiche funzionali relative alla continuità di funzionamento.

Altri database, tra i quali UKMO e ECMWF, invece, sono stati realizzati a partire da dati meteorologici (vento, pressione atmosferica, etc.) elaborati mediante opportuni modelli matematici, i quali hanno restituito una stima degli stati del mare.

Tali modelli numerici hanno una copertura sistematica nello spazio e nel tempo, che, facendo ricorso a numerosi parametri di calibrazione per la stima dei dati ondametrici, forniscono una rappresentazione modellistica della realtà.

La strada attualmente seguita per la realizzazione di un buon database meteomarino è rappresentata dall'uso sinergico di tutte le fonti a disposizione; proprio secondo tale metodologia è stato realizzato il database MEDATLAS, dove i dati ondametrici e da satellite sono stati utilizzati per calibrare e validare i dati desunti dai modelli matematici. Tali attività comportano un impegno in termini temporali ed economici notevole.

Per sopperire ai limiti delle fonti, di norma, in funzione della domanda ingegneristica o scientifica da soddisfare, si esegue un'analisi comparativa tra le stesse fonti, scegliendo per il sito di interesse quelle che forniscano i dati maggiormente cautelativi.

3.2 CENSIMENTO DEI DATASET ESISTENTI

La scrivente si è attivata per ricercare i dataset disponibili per l'area in esame che sono:

- Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.) dell'ISPRA;
- Registrazioni anemologiche dell'Aeronautica Militare Italiana;
- dataset del Centro europeo per le previsioni meteorologiche ECMWF.
- Atlante "MEDATLAS";
- Dataset del Servizio meteorologico britannico UKMO.

Di seguito si riporta uno stralcio relativo all'ubicazione del punto di misura di ognuno dei dataset indicati e del sito di Termini Imerese (evidenziato con una linea rossa).



Figura 3.1- Localizzazione dei punti di riferimento di ogni fonte di dati e ubicazione del sito di interesse

Ogni dataset sopraindicato è stato usato da esperti e da professionisti del settore, per affrontare la tematica della valutazione degli eventi estremi al largo per il sito di Termini Imerese.

Di seguito si riporta una breve descrizione per ciascuno dei suddetti dataset.

3.2.1 La rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.)

La Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.) dell'ISPRA è attiva dal luglio 1989. La RON originaria era composta da otto boe direzionali. Il numero delle stazioni odierno è 14.

I siti strumentati sono:

- Capo Linaro (Civitavecchia),
- Capo Gallo (Palermo),
- Punta della Maestra (alto Adriatico),
- Capo Comino (Sardegna),
- La Spezia,
- Alghero,
- Ortona,
- Ponza,
- Monopoli,
- Crotona,
- Catania,
- Mazara,
- Cetraro,
- Ancona.

La diffusione dei dati avviene principalmente via Internet, Televideo RAI e "Global Telecommunication System", il network usato a livello mondiale per trasmissione dei dati

meteorologici e delle previsioni di meteorologiche gestito dalla Organizzazione Internazionale di Meteorologia.

Ogni boa, ancorata su fondali dell'ordine di 100 metri, segue il movimento della superficie dell'acqua e permette di determinare l'altezza e la direzione delle onde. Gli strumenti sono dotati di un sistema di localizzazione satellitare per il controllo continuo della posizione.

Le boe forniscono i seguenti parametri sintetici:

- H_s (metri) altezza d'onda significativa spettrale;
- T_p (secondi) periodo di picco;
- T_m (secondi) periodo medio;
- D_m (°N) direzione media di propagazione;
- altri parametri spettrali per banda di frequenza.

Il funzionamento, anche se discontinuo della rete ormai da più di 20 anni, con un rendimento complessivo superiore al 92% in termini di dati archiviati, permette di avere a disposizione una gran quantità di dati validi per elaborazioni scientifiche ed ingegneristiche.

Dalla fine del 1997 vengono forniti dati anche in tempo reale ed elaborazioni statistiche e climatologiche per il periodo disponibile.

Il sito strumentato più prossimo al sito di Termini Imerese è quello di Capo Gallo, che ha coordinate 38° 14' 60"N e 13° 19' 0.1"E. I dati validati sono relativi al periodo 2004-2007.

Per maggiori chiarimenti sul funzionamento della rete si rimanda a quanto pubblicato dall'ente gestore della rete.

3.2.2 La rete del servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare

Il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare gestisce un complesso sistema di osservazione, costituito da:

- Stazioni di superficie presidiate
- Stazioni di superficie automatiche
- Stazioni per la rilevazione dei parametri atmosferici in quota

A tale sistema si aggiunge la stazione nazionale per l'acquisizione e l'elaborazione in tempo reale dei dati dai satelliti METEOSAT e TIROS.

Tutte le stazioni effettuano osservazioni a orari stabiliti rigorosamente in sede internazionale e sono identificate da un indicativo numerico sulla pubblicazione dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale, O.M.M. "Stazioni di Osservazione". Le osservazioni sono rappresentative di un'area di circa 70 chilometri di raggio e vengono effettuate ogni 3 ore. Per scopi aeronautici, la cadenza delle osservazioni è ogni ora o ogni mezz'ora.

Per maggiori chiarimenti sul dataset si rimanda alle pubblicazioni tecniche dell'ente gestore.

In particolare, come vedremo nel proseguo di questo studio, per gli studi redatti nel 1981 dal Prof. Ing. Mallandrino è stato fatto riferimento ai dati anemologici registrati presso la stazione di Ustica nel periodo che va dal 1951 al 1973.

3.2.3 Il centro europeo per le previsioni meteorologiche (ECMWF)

L'ECMWF, il Centro europeo per le previsioni meteorologiche, utilizza un modello meteorologico globale con una risoluzione che cresce gradualmente nel tempo. I parametri

meteorologici sono utilizzati per il modello WAM per le previsioni ondametriche III generazione, in due versioni differenti, la prima valida a livelli globale e la seconda specifica per il Mediterraneo e il nord Atlantico.

L'ECMWF elabora dati riferiti ad una griglia a geometria regolare orientata in direzione Nord con celle aventi dimensioni unitaria di 0.5° (circa 50 Km). Il dominio geografico di interesse è compreso tra longitudine 10°W e 26°E e latitudine 30°N e 56°N. A tale scopo sono acquisiti giornalmente i dati meteorologici di analisi sull'intero dominio geografico e le previsioni ogni 6 ore.

I risultati sono organizzati secondo i seguenti archivi:

- ERA-40, i cui dati, sottoposti a rianalisi tramite misure satellitari, archiviati sono relativi alla modellazione del periodo 1951 - 2001;
- ERA-15 i cui dati, sottoposti a rianalisi tramite misure satellitari, sono relativi al periodo 1978-1994.
- ERA-INTERIM il cui dati, sottoposti a rianalisi tramite misure satellitari, sono relativi al periodo 1979-2010.

I tre archivi si differenziano anche per la risoluzione spaziale e per il numero di parametri disponibili.

In particolare si è fatto riferimento ai dati archiviati in ERA-INTERIM in quanto relativi al periodo 1979-2010 e la distribuzione spaziale dei dati è tali che il nodo di calcolo è prossimo al sito di interesse. E' stato fatto riferimento al nodo con coordinate 39°N, 13.5°E.

Per maggiori chiarimenti sul dataset e sui modelli applicati si rimanda a quanto pubblicato dall'ente gestore.

3.2.4 L'atlante MEDATLAS

L'atlante MEDATLAS, realizzato da un consorzio di sei compagnie con sede in Italia, Francia e Grecia è una raccolta di dati ondametrici e anemologici per tutto il Mediterraneo.

Esso fornisce statistiche su tutto il Mediterraneo, basati sulla raccolta, campionamento, verifica e interpretazione di dati ondametrici, satellitari e da modello numerico. La copertura temporale di tali dati è decennale in riferimento al periodo 1991-2002.

Nella fattispecie, i dati ondametrici delle boe ondametriche dell'APAT (oggi ISPRA) e i dati satellitari ERS1, ERS2 e TOPEX/Poseidon sono stati usati per validare e calibrare i dati dei modelli matematici di vento e onde dell'ECMWF. Tutti questi sono serviti a creare statistiche per tutto il Mediterraneo. Tali statistiche sono rappresentati sia in forma grafica che in forma tabellare.

Per maggiori chiarimenti sulle modalità di realizzazione dell'atlante si rimanda alle pubblicazioni tecniche presenti in letteratura.

Per la caratterizzazione degli eventi estremi al largo del sito di Termini Imerese era stato fatto riferimento al punto di coordinate 39°N, 14°E .

3.2.5 Il servizio meteorologico UKMO

Il dataset del Servizio meteorologico britannico UKMO, detto anche "Met. Office", è realizzato a partire dai dati di pressione atmosferica acquisiti con continuità; da essi, tramite il proprio modello meteorologico di seconda generazione, sono ricavati dapprima i relativi dati di

vento; tali dati sono elaborati quindi, tramite il proprio modello di generazione d'onda spettrale che restituisce i valori altezza d'onda significativa e periodo medio per assegnato settore di provenienza. Tale modello è tarato sulla base dei dati di moto ondoso misurati direttamente in varie località significative. Lo stesso Istituto elabora e fornisce tabelle statistiche che sintetizzano i dati di output del modello e nelle quali sono riportate le frequenze di occorrenza dei livelli di altezza significativa ed il periodo medio, per settore di provenienza. I dati sono disponibili a partire dal 1985. Il sito Met. Office più prossimo al sito di Termini Imerese è ha coordinate 38,5°N – 13,9°E.

Per maggiori chiarimenti sul modello e sul dataset si rimanda alle pubblicazioni tecniche dello stesso istituto.

4. DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI

Con l'approccio necessariamente cautelativo occorrente per il livello di progettazione cui si riferisce il presente studio, per la determinazione degli eventi estremi, sono state confrontate le elaborazioni statistiche già condotte nei precedenti studi che hanno interessato il sito in esame; con ulteriori elaborazioni condotte dalla scrivente sui dataset disponibili.

4.1 RISULTATI DEI PRECEDENTI STUDI

In questa sezione vengono riportati i valori degli eventi estremi determinati negli studi redatti da altri professionisti e che hanno riguardato il sito in esame nel recente passato.

Al fine di confrontare i risultati e quindi aumentare l'affidabilità delle stime, la scrivente si è infatti attivata per ricercare gli studi ondametrici disponibili per l'area in esame.

In particolare per la stima degli eventi estremi ondametrici al largo sono stati confrontati i seguenti lavori:

- studio idraulico marittimo del 1981 redatto dal Prof. Ing. Mallandrino, in cui si è pervenuti alla determinazione degli eventi estremi a seguito dell'applicazione del metodo SBM a partire dalle serie anemologiche della stazione di Ustica dal 1951 al 1973;
- lo studio di supporto del Piano Regolatore Portuale vigente (2002) da parte dello "Studio Ci.Gi.Vi."; in cui si è pervenuti alla determinazione degli eventi estremi elaborando il dataset ondametrico fornito dall'Agenzia UKMO britannica,
- studio meteomarino redatto dalla società "Italprogetti" nel 2004 a supporto degli "interventi di recupero e stabilizzazione della spiaggia in erosione con opere di protezione diretta dai fenomeni erosivi a breve termine", per il litorale compreso tra foce del fiume San Leonardo e il molo di sopraflutto del porto di Termini Imerese, in cui si è pervenuti alla determinazione degli eventi estremi elaborando i dati anemologici delle stazioni di Ustica e di Punta Raisi;
- studio meteomarino redatto nel 2007 a supporto della modellazione numerica eseguita dalla società Hr Wallingford, commissionato dal Comune di Termini Imerese, per il progetto sopracitato, in cui si è pervenuti alla determinazione degli eventi estremi elaborando i dati anemologici UKMO;
- gli studi redatti a supporto Rapporto Ambientale per la Procedura di Valutazione Ambientale Strategica relativa al suddetto Piano Regolatore Portuale (2009) da parte dello "Studio Mallandrino S.R.L.", in cui si è pervenuti alla determinazione degli eventi estremi elaborando sia le serie storiche dalla rete ondametrica italiana (RON), presente nell'area con il sito strumento di Capo Gallo, sia il dataset ondametrico dell'altante MEDATLAS.

La descrizione di ognuna di queste fonti sarà oggetto dei seguenti paragrafi.

4.1.1 Studi del 1981 redatti dal Prof. Ing. Mallandrino

Nel 1981, su incarico del "Consorzio per l'Area di Sviluppo Industriale di Palermo", il Prof. Ing. Mallandrino ha eseguito uno studio idraulico marittimo per il sito in esame, ottenendo i dati ondametrici al largo riportati nella seguente tabella e derivanti dall'applicazione del metodo SBM a partire dalle serie anemologiche della stazione di Ustica, gestita dall'Aeronautica. I dati anemometrici elaborati allora erano relativi al periodo 1951-1973.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE					
STUDIO DEL 1981 REDATTO DALL'ING. MALLANDRINO					
R (anni)	H _s (m)				
	325°N	345°N	0°N	25°N	45°N
10	5,16	5,68	6	4,39	3,74
20	6	6,86	7,48	5,4	4,26
30	6,49	7,48	8,19	6,21	4,95
40	6,9	8,02	8,98	6,42	5,21
50	7,14	8,43	9,32	6,42	5,21
60	7,35	8,74	9,74	7,11	5,47
70	7,51	8,98	10,17	7,11	5,74
80	7,65	9,18	10,42	7,11	5,98
90	7,81	9,35	10,42	7,11	6,17
100	7,96	9,63	10,42	7,11	6,18

Tabella 4.1 – Analisi direzionale degli eventi estremi al largo. Elaborazioni relative agli studi del 1981. Database di partenza: dati anemologici della Stazione di Ustica. Periodo di Riferimento: 1951-1973.

4.1.2 Studi del 2002 per il Piano Regolatore Portuale vigente

Per la redazione degli studi del 2002 a supporto del PRP vigente sono stati elaborati i dati ondamentrici forniti del centro metereologico inglese UKMO (United Kingdom Meteorological Office) detto anche "Met. Office".

Per le elaborazioni dei dati Met. Office di interesse per il porto di Termini Imerese è stato fatto riferimento al punto della griglia di coordinate 38,5°N – 13,9°E. I dati sono relativi al periodo 1990-2001.

L'analisi direzionale degli eventi estremi al largo è stata eseguita applicando la distribuzione di Gumbell, secondo la quale la probabilità di non superamento dei livelli di altezza significativa in un dato sito è ben rappresentata dalla seguente forma:

$$P(H_s < h) = \exp(-\exp(-(h-B)/A))$$

essendo A e B i parametri della distribuzione che possono essere tarati sulla base di un fitting dei dati disponibili.

Il passaggio dalla probabilità di non superamento al periodo di ritorno T_R è possibile considerando che $P(H_s < h)$ ed è esprimibile nella seguente forma:

$$P(H_s < h) = 1 - (1/T_R)^{(d_e/8.760)}$$

dove d_e è la durata in ore ipotizzata per ogni singolo evento e 8.760 è il numero di ore presenti in un anno.

Nella successiva tabella sono mostrate le altezze d'onda significativa al variare della direzione per i diversi tempi di ritorno.

Il parametro d_e è stato posto uguale a 8 ore.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
ANALISI CONDOTTE SUL DATABASE ONDAMETRICO METOFFICE (PRP 2002)						
EVENTI ESTREMI DIREZIONALI						
R (ANNI)	H_s (m)					
	300°N	330°N	360°N	30°N	60°N	90°N
1	5,4	3,5	3,6	3,2	2,7	2,3
5	6,9	4,8	5,0	4,4	3,7	3,2
10	7,5	5,3	5,6	4,9	4,2	3,5
50	9,0	6,5	6,9	6,2	5,2	4,4

Tabella 4.2 – Analisi direzionale degli eventi estremi al largo. Elaborazioni relative agli studi del 2002 a supporto del PRP . Database: Dati ondamentrici MetOffice. Periodo di Riferimento:1990-2001.

4.1.3 Studi redatti nel 2004 per gli interventi di protezione della costa compresa tra il porto di Termini Imerese e il F. San Leonardo

Con la redazione del Piano di Assetto Idrogeologico (di seguito indicato come “P.A.I”) della Regione Sicilia, per l’unità Fisiografica 18 “Capo Zafferano a Capo Cefalù”, si è pervenuti all’individuazione dell’area ricadente nel comune di Termini Imerese, compresa tra la foce del Fiume San Leonardo e la radice del molo di sopraflutto, come “area ad elevato rischio R4”.

Il Comune di Termini Imerese si è fatto, quindi, proponente della realizzazione di interventi di recupero e stabilizzazione della spiaggia in erosione che prevedono la realizzazione di scogliere soffolte, da finanziare con sovvenzione del Ministero dell’Ambiente.

A supporto di tale progettazione nel 2004 l’ente proponente ha incaricato la società ItalProgetti di eseguire uno studio meteomarino.

In tale studio, per la definizione degli eventi ondosi estremi, è stata utilizzata una procedura di generazione dei dati ondamentrici sulla base dei dati registrati presso la stazione anemometrica dell’Aeronautica Militare di Ustica per il periodo 1951-1973.

Secondo gli autori, è stata considerata una serie tronca di eventi anemometrici di intensità maggiore o uguale a 20 nodi, secondo gli studi di Tomasicchio (1976).

Agli eventi appartenenti alla serie tronca è possibile associare, per ciascuna direzione di provenienza, i parametri di intensità, durata, fetch efficace e, quindi, un’ipotetica area di generazione del moto ondoso.

Si ottiene così l’input per la procedura di calcolo dell’altezza d’onda generata da venti che si ipotizzano aver spirato costantemente ed uniformemente sull’area di generazione.

Il modello di trasformazione utilizzato da redattore dello studio è quello SMB di Sverdrup-Munk-Bretschneider, secondo la procedura riportata da Milano (1979).

In particolare i dati di vento sono stati normalizzati alla quota di 10 m s.l.m. con formula di Pierson, Silvester e Jin Wu (1974).

I valori ondamentrici sono stati elaborati statisticamente al variare del tempo di ritorno applicando la legge di Gumbell; i parametri della legge sono stati ottenuti imponendo che la curva si adattasse al meglio alla distribuzione dei punti sulla carta di Gumbel H_s/T_R .

Alle altezze d'onda così valutate sono stati associati il periodo e la lunghezza dell'onda. Il periodo dell'onda è stato determinato considerando lo spettro Jonswap, mentre la lunghezza dell'onda è stata considerata l'ipotesi di acqua profonda.

Nello studio citato sono state determinate solo le caratteristiche ondamiche per la direzione "NORD-OVEST", e quindi rappresentative solo degli eventi provenienti dal IV quadrante, ritenute dal redattore del suddetto studio come le più cautelative.

Tempo di ritorno (anni)	Altezza significativa (m)	Periodo (sec)	Lunghezza d'onda (m)
5	6,32	10,43	170,07
10	7,45	11,32	200,3
20	8,53	12,12	229,34
30	9,15	12,55	246,06
50	9,93	13,07	266,95
100	10,97	13,75	266,95

Tabella 4.3 – Analisi direzionale degli eventi estremi al largo. Elaborazioni relative agli studi redatti da Italprogetti nel 2004. Database di partenza: serie anemologiche registrate presso la stazione di Ustica. Periodo di Riferimento: 1951-1973.

4.1.4 Studi del 2007 redatti dalla società HR Wallingford

La società HR Wallingford per conto del Comune di Termini Imprese (PA) nel 2007 ha condotto degli studi di modellazione numerica per verificare ed ottimizzare l'efficacia degli interventi di protezione del litorale costiero previsti nell'ambito del progetto definitivo "Interventi di recupero e stabilizzazione della spiaggia in erosione con opere di protezione diretta per la riduzione dei fenomeni erosivi a breve termine", di cui al paragrafo precedente.

In tale studio come fonte di dati è stata elaborata la serie anemologica ventennale fornita dall'UKMO, per un punto avente coordinate 38°15' N e 13°55.8' E, situato al largo del sito di Termini Imerese. I dati elaborati da chi ha redatto lo studio vanno dal 1986 al 2006.

Utilizzando il modello numerico GTI-SEAMaT sono state derivate le condizioni ondamiche al largo nello stesso punto del modello UKMO.

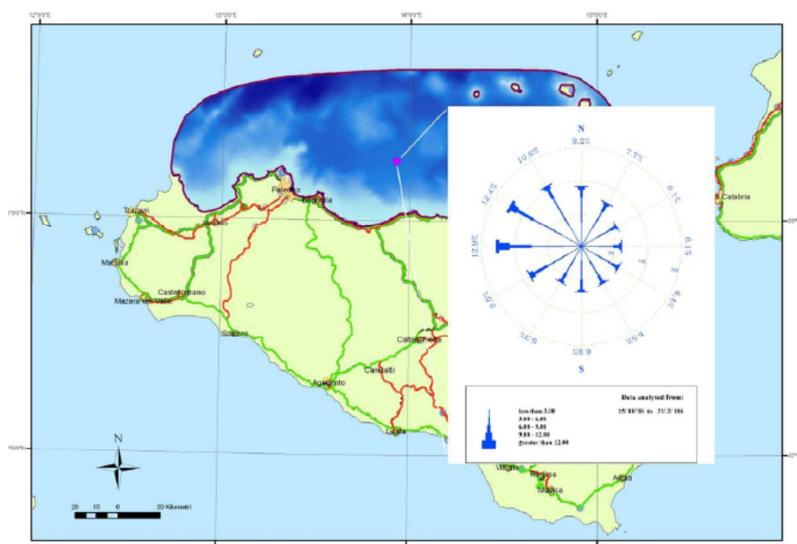


Figura 4.1 - Localizzazione del punto di riferimento delle serie anemologiche UKMO, utilizzato nello studio redatto da HR Wallingford nel 2007 per la protezione dei litorali compresi tra la radice del molo di sopraflutto e la foce del F. S. Leonardo

Il modello è stato calibrato usando i dati UKMO registrati presso Ponza (40°45'N, 13°8.4'E), e i risultati ottenuti sono stati anche confrontati con i dati ondametrici registrati presso i siti strumentati di Capo Gallo e di Cetraro della Rete Ondametrica Nazionale (RON).

I valori estremi sono stati determinati in un punto al largo del tratto di costa compreso tra la foce del F. S. Leonardo e la radice del molo di sopraflutto.

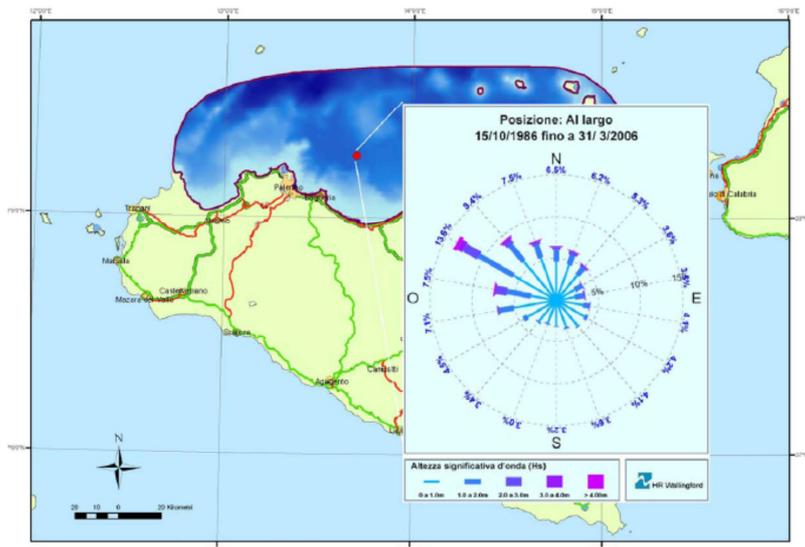


Figura 4.2 - Localizzazione del punto di riferimento in cui sono stati valutati gli eventi estremi ondosi nello studio redatto da HR Wallingford nel 2007 per la protezione dei litorali compresi tra la radice del molo di sopraflutto e la foce del F. S. Leonardo

Gli eventi estremi sono stati calcolati utilizzando la distribuzione di Weibull per i 20 anni di registrazione dei dati.

Nella tabella successiva sono riportati i valori estremi delle onde generate da vento, al variare del tempo di ritorno e della direzione di provenienza per il paraggio in esame.

Periodo di ritorno (anni)	Direzione (°N)												
	-15 15	15 45	45 75	75 105	105 135	135 165	165 195	195 225	225 255	255 285	285 315	315 345	0 360
0.1	2.6	2.29	1.78	1.8	1.14	1.04	1.08	1.01	1.3	2.89	4.42	3.02	4.78
1	4.53	4.22	2.99	2.91	1.77	1.62	1.56	1.57	2.08	4.46	6.85	5.04	6.91
5	5.93	5.66	3.81	3.64	2.21	2.02	1.85	1.95	2.64	5.53	8.56	6.48	8.44
10	6.55	6.3	4.16	3.94	2.39	2.18	1.97	2.11	2.88	5.98	9.30	7.11	9.11
20	7.17	6.95	4.51	4.24	2.57	2.35	2.08	2.26	3.12	6.43	10.03	7.74	9.79
50	7.99	7.82	4.97	4.63	2.81	2.57	2.23	2.47	3.44	7.02	11.00	8.58	10.68
100	8.62	8.49	5.31	4.92	2.99	2.74	2.33	2.62	3.69	7.46	11.74	9.22	11.37
200	9.26	9.17	5.65	5.21	3.17	2.9	2.43	2.78	3.93	7.91	12.48	9.86	12.06

Tabella 4.4 – Studio HR Wallingford del 2007 per la protezione dei litorali compresi tra la radice del molo di sopraflutto e la foce del F.S. Leonardo. Stima degli eventi estremi . Database: dati anemologici MetOffice. Periodo di riferimento:1985-2005.

4.1.5 Studi redatti dallo “Studio Mallandrino S.R.L.” nel 2009 per la VAS del PRP

Negli studi redatti dallo “Studio Mallandrino S.R.L.” nel 2009 di supporto alla procedura di V.A.S. relativa al P.R.P, l’analisi direzionale delle onde al largo è stata eseguita attraverso il ricorso alle registrazioni effettuate dalla boa appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (RON) ubicata al largo di Capo Gallo (PA). Il sito strumentato ha coordinate 38° 14’ 60”N e 13° 19’ 0.1”E. I dati rilevati sono quelli compresi tra il 01/01/2004 ed il 15/10/2007.

Gli eventi estremi al largo del paraggio sono stati valutati con metodo POT (Peaks Over Threshold), che prevede l'individuazione degli stati di mare caratterizzati da un'altezza d'onda significativa H_s superiore ad un valore di soglia, fissato pari a 1,5 m.

In particolare gli stati di mare individuati sono stati oggetto di una elaborazione statistica al fine di ricavare, secondo note funzioni probabilistiche, le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno. Le leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento sono state quelle di Gumbell e di Weibull.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva degli eventi estremi ricavati con la legge di Gumbell.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE					
STUDIO DEL 2009 REDATTO PER LA V.A.S. DEL P.R.P.					
FONTE: DATI BOA R.O.N. DI CAPO GALLO (DAL 2004 AL 2007)					
R (anni)	H_s (m)				
	OMNI	300°N	330°N	0°N	30°N
1	3.88	3.65	3.67	1.79	2.07
2	4.45	4.25	4.43	3	3.02
5	5.18	5	5.37	4.13	3.87
10	5.73	5.57	6.07	4.89	4.44
15	6.05	5.89	6.48	5.32	4.76
20	6.27	6.13	6.77	5.62	4.99
25	6.45	6.3	6.99	5.86	5.17
50	6.99	6.86	7.68	6.57	5.7
100	7.53	7.41	8.37	7.29	6.24
150	7.85	7.73	8.77	7.7	6.55

Tabella 4.5 – Analisi degli eventi estremi al largo. Elaborazioni relative agli studi del 2009 a supporto della procedura di VAS. del PRP. Database: R.O.N.- Capo Gallo. Periodo di Riferimento:2004-2007.

Inoltre, nello stesso studio, è stata condotta anche una analisi omnidirezionale degli eventi estremi al largo facendo ricorso ai dati MedAtlas.

Per la caratterizzazione degli eventi estremi al largo del sito di Termini Imerese era stato fatto riferimento al punto di coordinate 39°N, 14°E .

Gli eventi estremi al largo del paraggio sono stati valutati imponendo un valore di soglia pari a 1,5 m. La legge adottata di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento è stata quella di Gumbell.

TEMPO DI RITORNO	Largo
	Hs
1	5.30
2	5.66
5	6.18
10	6.57
15	6.8
20	6.96
25	7.10
50	7.48
100	7.86
150	8.10
250	8.38
500	8.77
1000	9.15

Hs: altezza significativa in m

Tabella 4.6 – Analisi omnidirezionale degli eventi estremi al largo. Elaborazioni relative agli studi del 2009 a supporto della procedura di VAS del PRP. Database: Medatlas. Periodo di riferimento:1991-2002.

4.2 ULTERIORI ELABORAZIONI PER LA STIMA DEGLI EVENTI ESTREMI

Dai risultati riportati nella sezioni precedenti si evince un certo grado di variabilità delle stime ondametrische già utilizzate.

Ciò dipende dalla tipologia della fonte di riferimento, dai metodi e dai modelli usati per la loro elaborazioni e dal grado di rappresentatività della stessa degli stati del mare del sito di interesse.

Al fine di aumentare l'affidabilità complessiva delle stime, si è scelto quindi di eseguire ulteriori analisi statistiche su alcuni dei dataset disponibili.

In questa sezione vengono descritte le analisi statistiche meteomarine eseguite dalla scrivente utilizzando i database ondametrischi:

- ECMWF – “ERA INTERIM”,
- UKMO;
- MEDATLAS.

Tali analisi completeranno e aggiorneranno le indagini statistiche finora compiute, includendo così tutti i dataset oggi effettivamente disponibili.

4.2.1 Elaborazione del database ECMWF – “ERA INTERIM”

Sono state eseguite ulteriori indagini statistiche per lo studio degli eventi estremi al largo del paraggio di Termini Imerese, utilizzando i dati del database “ERA-INTERIM”, derivante dalla modellazione del modello meteorologico ECMW. Il database “ERA INTERIM” di tipo sintetico è composto da 31 annualità (dal 1979 al 2010) e il passo temporale dei dati è pari a 6 ore.

I dati ondametrischi estratti dai database sono:

- altezza d’onda significativa (m);
- direzione di provenienza (°N).

I dati del modello sono relativi a un grigliato avente maglia di lat 1,5° long 1,5°. E’ stato fatto riferimento al nodo con coordinate 39°N, 13.5°E.

Tramite alcune operazioni di filtro dei dati grezzi, in funzione della data di registrazione e della tipologia di parametro, è stato possibile ricostruire le serie annuali ondamiche omnidirezionali ed estrarre i massimi valori annuali.

Tali dati sono stati analizzati tramite il software ACES, che permette di confrontare l'adattamento al campione ad alcune distribuzioni di uso comune nelle analisi dei valori estremi. Una delle funzioni di probabilità implementate dal software (in accordo per altro con la teoria di Goda del 1988) è la distribuzione di Weibull:

$$F(H_S < h) = 1 - e^{\left\{-e^{\left[\frac{-(h-B)}{A}\right]}\right\}^K}$$

avendo indicato con:

- $F(H_S < h)$: probabilità di non superamento;
- H_S : altezza d'onda significativa;
- h : valore di soglia;
- A, B, K : parametri di taglia, scala e forma della distribuzione.

I parametri A e B sono stimati a partire dai dati della popolazione applicando una regressione di tipo lineare.

Il legame tra l'altezza significativa H_S e il corrispondente tempo di ritorno R è dato dalla relazione lineare:

$$H_S = A'y + B'$$

dove:

- y : variabile ridotta;
- A', B' : parametri caratteristici della relazione;
- $y = [\ln(\Lambda R)]^{\frac{1}{c}}$, avendo indicato con R il numero medio degli eventi per anno e c l'ampiezza dell'intervallo di registrazione degli eventi.

Il grado di incertezza delle previsioni è stato stimato mediante il parametro definito *livello di confidenza*.

In particolare, l'approccio di *Gumbell* (1958) e *Goda* (1988) prevede il calcolo della deviazione standard normalizzata:

$$\sigma_{nr} = \frac{1}{N^{0,5}} [1 + a (y - d + f \ln v)^2]^{0,5}$$

in cui :

- σ_{nr} : deviazione standard normalizzata dell'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno R ;
- n : numero di eventi;
- $a = a_1 e^{(a_2 N^{-1,3} + g[(-\ln q)^{0,5}]}$, dove a_1, a_2, d, f, g sono parametri empirici dipendenti dal valore di K mentre q è il rapporto tra il numero di eventi per anno N_e il numero totale di eventi totali N_t .

La deviazione standard σ_r dell'altezza d'onda significativa si esprime come segue:

$$\sigma_r = \sigma_{nr} \sigma_h$$

in cui σ_h è la deviazione standard del dataset.

Gli intervalli di confidenza sono stati calcolati assumendo che le *altezze d'onda significativa* stimate seguano una distribuzione di tipo normale; l'ampiezza di tali intervalli dipende dai fattori N ed N/N_t

La scelta della migliore distribuzione è stata determinata applicando il metodo dei minimi quadrati, scegliendo la distribuzione che minimizzi la deviazione standard:

$$\sigma_r = [(H_{sm} - A'' y_m + B'')]^2$$

Al variare della direzione è stato scelto di utilizzare la distribuzione migliore, che è quella che fornisce R^2 più elevato e, a parità di R^2 , quella con SQM minore

La distribuzione scelta, quindi, è quella di Weibull con $K=2$; che tra tutte le distribuzioni applicate è quella che si adatta in modo migliore in quanto fornisce il valore $R^2=0,98$ e $SQM =0,05$.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE	
ANALISI CONDOTTE SUL DATABASE ERA -INTERIM	
PERIODO DI RIFERIMENTO: DAL 1979 AL 2010	
EVENTI ESTREMI OMNIDIREZIONALI	
R (anni)	H _s (m)
1	3.74
2	5.1
3	5.45
5	5.81
10	6.22
15	6.43
20	6.57
25	6.67
50	6.97
75	7.13
100	7.24
120	7.31
150	7.39

Tabella 4.7 –Analisi degli eventi estremi omnidirezionali. Anno di elaborazione:2012.Database di riferimento:ERA INTERIM. Periodo di riferimento:1979 – 2010.

Per il database in esame è stata effettuata anche l'analisi direzionale in funzione del tempo di ritorno R (anni); di seguito si riportano le tabelle riassuntive degli eventi estremi direzionali.

Al variare della direzione è stato scelto di utilizzare la distribuzione migliore, che è quella che fornisce R^2 più elevato e, a parità di R^2 , quella con SQM minore.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
ANALISI CONDOTTE SUL DATABASE ERA -INTERIM						
PERIODO DI RIFERIMENTO: DAL 1979 AL 2010						
R (anni)	H _s (m)					
	300°N	330°N	360°N	30°N	60°N	90°N
1	3.74	2.01	1.82	1.20	1.40	1.24
2	5.10	3.85	3.13	2.61	2.48	2.41
3	5.45	4.32	3.47	2.97	2.76	2.71
5	5.81	4.81	3.82	3.34	3.05	3.02
10	6.22	5.36	4.22	3.76	3.37	3.37
15	6.43	5.64	4.42	3.98	3.54	3.55
20	6.57	5.83	4.55	4.12	3.65	3.67
25	6.67	5.96	4.66	4.23	3.73	3.76
50	6.97	6.37	4.95	4.54	3.97	4.01
75	7.13	6.59	5.10	4.71	4.10	4.16
100	7.24	6.74	5.21	4.82	4.19	4.25
120	7.31	6.83	5.28	4.89	4.24	4.31
150	7.39	6.94	5.36	4.98	4.31	4.38

Tabella 4.8 – Analisi degli eventi estremi direzionali eseguita nel 2012. Elaborazioni sul database ERA ENTERIM. Periodo di riferimento:1979 – 2010.

4.2.2 Ulteriori analisi sui database MEDATLAS e METOFFICE

La scrivente ha eseguito ulteriori analisi statistiche, applicando la metodologia di Boccotti (2002) ai database ondametrici MEDATLAS e METOFFICE nel 2011 e nel 2012.

Il punto di riferimento MEDATLAS ha coordinate 39°N, 14°E.

Il punto di riferimento METOFFICE ha coordinate 38,5°N – 13,9°E.

Secondo la metodologia di Boccotti (2002) la soglia significativa h(R) che viene superata dall'altezza significativa h con assegnato periodo di ritorno (R) può essere ricavata secondo il processo iterativo.

Il valore di h(R) cercato è quel valore di h che soddisfa l'uguaglianza:

$$1 + u \left(\frac{h}{w} \right)^u = \frac{b(h)}{R} \exp \left(\frac{h}{w} \right)^u$$

dove

- u e w sono i parametri della distribuzione e dipendono dalla località in esame;
- b(h), è la base "della mareggiata triangolare equivalente".

Il parametro b(h) viene determinato un processo di tipo iterativo.

(Hasselmann 1973) sulla frequenza di picco e sui momenti dello spettro stesso:

Per quanto riguarda i periodi di picco, si è fatto riferimento alla seguente relazione che deriva da considerazioni sullo spettro JONSWAP (Hasselmann 1973) ed in particolare sulla frequenza di picco e sui "momenti" dello spettro stesso:

$$T_p = 8,5 \pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}}$$

Di seguito è riportata la tabella riepilogativa di H_s , e T_p , in funzione di R ricavata durante l'analisi omnidirezionale delle onde estreme con il metodo iterativo, per entrambi i dataset in analisi.

EVENTI ESTREMI. ANALISI OMNIDIREZIONALE. SERIE METOFFICE		
R (anni)	H_s (m)	T_p (s)
1	4.85	9.39
2	5.39	9.90
5	6.08	10.51
10	6.59	10.94
20	7.10	11.36
50	7.76	11.88
100	8.26	12.25
150	8.55	12.46

Tabella 4.9 – Analisi degli eventi estremi eseguita nel 2011. Analisi Omnidirezionale sul dataset ondamentrico Metoffice. Periodo di Riferimento: 1990-2001. Metodologia di Boccotti.

EVENTI ESTREMI. ANALISI OMNIDIREZIONALE. SERIE MEDATLAS		
R (anni)	H_s (m)	T_p (s)
1	4.69	9.23
2	5.18	9.70
5	5.97	10.42
10	6.42	10.80
20	6.85	11.16
50	7.42	11.61
100	7.84	11.94
150	8.09	12.12

Tabella 4.10 – Analisi degli eventi estremi eseguita nel 2011. Analisi Omnidirezionale sul dataset ondamentrico Medatlas. Periodo di Riferimento: 1991-2002. Metodologia di Boccotti.

Sempre nel 2011 sono stati determinati i massimi annuali delle altezze d'onda significativa per fissata direzione. Si è utilizzato l'approccio di Scarsi (1992) in accordo con la teoria di Boccotti.

Secondo questa teoria, la previsione temporale direzionale del periodo di ritorno R in funzione dell'altezza d'onda significativa massima segue la seguente legge:

$$R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \frac{b(h)}{1 + u \left(\frac{h}{w_a} \right)^u - \left[\left(\frac{h}{w_b} \right) + u \left(\frac{h}{w_a} \right)^u * \exp \left(\frac{-h}{w_a} \right) \right]} \exp \left(\frac{h}{w} \right)^u$$

dove:

- u e w sono i parametri della distribuzione e dipendono dalla località in esame;
- $b(h)$, è la base "della mareggiata triangolare equivalente";
- w_a e w_b sono parametri che dipendono dal settore direzionale in esame, entrambi positivi con $w > w_a > w_b$.

Di seguito sono riportati i valori di H_s e del relativo T_p in funzione della direzione (in \mathcal{N}) e del periodo di ritorno R .

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
ANALISI CONDOTTE SUL DATABASE ONDAMETRICO METOFFICE (2011)						
PERIODO DI RIFERIMENTO: 1991-2000 - METODO: BOCCOTTI						
D(°N)	300	330	0	30	60	90
R (Anni)	H _s (m)					
1	2,95	3,40	3,01	1,97	2,50	6,44
2	3,38	3,87	3,42	2,24	2,83	6,85
3	3,64	4,14	3,66	2,39	3,03	7,08
5	3,95	4,48	3,96	2,59	3,27	7,35
10	4,38	4,95	4,37	2,85	3,60	7,72
25	4,95	5,56	4,91	3,20	4,04	8,17
50	5,38	6,03	5,32	3,46	4,37	8,49
75	5,63	6,30	5,56	3,62	4,57	8,68
100	5,81	6,49	5,73	3,73	4,70	8,81
120	5,92	6,62	5,84	3,80	4,79	8,89
150	6,06	6,77	5,97	3,88	4,90	8,99

Tabella 4.11 – Analisi degli eventi estremi al largo di Termini Imerese eseguita nel 2011. Analisi direzionale sul dataset ondamentrico Metoffice. Periodo di Riferimento: 1990-2001. Metodologia di Boccotti-Scarsi.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
ANALISI CONDOTTE SUL DATABASE ONDAMETRICO MEDALTAS (2011)						
PERIODO DI RIFERIMENTO: 1991-2002 - METODO: BOCCOTTI						
D(°N)	300	330	0	30	60	90
R (anni)	H _s (m)					
1	4,03	3,93	3,50	2,47	1,86	2,05
2	4,50	4,38	3,97	2,72	2,03	2,24
3	4,78	4,65	4,24	2,87	2,12	2,35
5	5,13	4,99	4,59	3,05	2,25	2,49
10	5,61	5,45	5,06	3,30	2,41	2,67
25	6,23	6,05	5,68	3,63	2,63	2,92
50	6,71	6,51	6,16	3,88	2,80	3,11
75	6,99	6,78	6,43	4,02	2,89	3,22
100	7,18	6,97	6,63	4,13	2,96	3,30
120	7,31	7,09	6,75	4,19	3,01	3,35
150	7,46	7,23	6,90	4,27	3,06	3,41

Tabella 4.12 – Analisi degli eventi estremi di Termini Imerese eseguita nel 2011. Analisi direzionale sul dataset ondamentrico Medaltas. Periodo di Riferimento: 1991-2002. Metodologia di Boccotti-Scarsi.

Entrambi i database sono stati successivamente sottoposti anche all'analisi direzionale degli eventi estremi al largo applicando la distribuzione di Gumbell:

$$P(H_s < h) = \exp(-\exp(-(h-B)/A))$$

essendo *A* e *B* i parametri della distribuzione che possono essere tarati sulla base di un *fitting* dei dati disponibili. Il passaggio dalla probabilità di non superamento al periodo di ritorno TR è stato eseguito applicando la seguente uguaglianza:

$$P(H_s < h) = 1 - (1/ T_R)$$

Di seguito si riportano le tabelle di riepilogo.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
ANALISI CONDOTTE SUL DATABASE ONDAMETRICO METOFFICE (2012)						
PERIODO DI RIFERIMENTO: 1991-2000 - METODO: GUMBELL						
D(°N)	300	330	0	30	60	90
R (Anni)	H _s (m)					
2	4,29	4,07	3,37	2,69	2,46	2,27
5	5,45	4,69	3,63	3,05	2,97	2,74
10	5,81	5,10	3,81	3,28	3,31	3,04
15	6,02	5,33	3,91	3,41	3,50	3,22
20	6,16	5,49	3,98	3,50	3,64	3,34
25	6,27	5,62	4,04	3,58	3,74	3,43
30	6,36	5,72	4,08	3,63	3,82	3,51
50	6,62	6,00	4,20	3,79	4,06	3,72
75	6,81	6,22	4,30	3,92	4,24	3,89
100	6,95	6,38	4,37	4,01	4,37	4,01
120	7,04	6,48	4,41	4,07	4,45	4,08
150	7,15	6,60	4,46	4,14	4,55	4,17

Tabella 4.13 – Analisi degli eventi estremi di Termini Imerese eseguita nel 2012. Analisi direzionale sul dataset ondamentrico Metoffice. Periodo di Riferimento: 1990-2001. metodologia di Gumbell.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
ANALISI CONDOTTE SUL DATABASE ONDAMETRICO MEDALTAS (2012)						
PERIODO DI RIFERIMENTO: 1991-2002 - METODO: GUMBELL						
D(°N)	300	330	0	30	60	90
R (anni)	H _s (m)					
2	3,73	1,82	1,67	1,36	0,50	1,00
5	4,30	2,43	2,10	1,65	0,98	1,48
10	4,67	2,83	2,38	1,84	1,30	1,80
15	4,89	3,06	2,54	1,94	1,48	1,98
20	5,04	3,22	2,65	2,02	1,61	2,11
25	5,15	3,35	2,74	2,07	1,71	2,21
30	5,24	3,45	2,81	2,12	1,78	2,28
50	5,50	3,73	3,00	2,25	2,01	2,51
75	5,71	3,95	3,16	2,35	2,18	2,68
100	5,85	4,11	3,26	2,42	2,30	2,80
120	5,94	4,20	3,33	2,47	2,38	2,88
150	6,06	4,33	3,42	2,52	2,48	2,98

Tabella 4.14 – Analisi degli eventi estremi di Termini Imerese eseguita nel 2012. Analisi direzionale sul dataset ondamentrico Medaltas. Periodo di Riferimento: 1991-2002. Metodologia di di Gumbell.

4.3 SCELTA DEGLI STATI DEL MARE ESTREMI DI PROGETTO

Al fine di garantire la massima affidabilità, utilizzando tutti gli sforzi elaborativi fin qui compiuti dai vari autori, il dataset degli eventi estremi di progetto è stato costruito confrontando gli eventi estremi degli studi precedenti con quelli elaborati dagli scriventi, secondo la seguente metodologia.

Gli eventi estremi sono stati determinati per settori ondamentrici di ampiezza pari a 30°; le direzioni indagate sono:

- 300 N (286-315 N);
- 330 N (316-345 N);
- 0 N (346-15 N);
- 30 N (16-45 N);
- 60 N (46-75 N);
- 90 N (76-105 N).

Sono stati considerati i tempi di ritorno 1, 5, 10, 25, 50, 100 e 150 anni, in quanto tali casi sono comuni a tutti i dataset ondamentrici considerati e permettono il confronto diretto tra quest'ultimi.

Per ogni tempo di ritorno e per ogni direzione sono a disposizione, generalmente, gli eventi estremi ottenuti dai seguenti studi e/o elaborazioni:

- analisi dei dati anemologici di Ustica (Prof. Ing. Mallandrino;1981);
- analisi sul database ondamentrico UKMO (Studio "Ci.Gi. Vi"; 2002);
- analisi sul database anemologico UKMO (HR Wallingford; 2007);
- analisi sul database ondamentrico della Boa RON di Capo Gallo (Studio Mallandrino SRL; 2009);
- analisi eseguite sul database ondamentrico ECMWF (Progetti e Opere SRL - 2012);
- analisi eseguite sul database ondamentrico UKMO con il metodo di Boccotti (Progetti e Opere SRL; 2011);
- analisi eseguite sul database ondamentrico Medatlas con il metodo di Boccotti (Progetti e Opere SRL; 2011);
- analisi eseguite sul database ondamentrico Metoffice applicando la distribuzione di Gumbell (Progetti e Opere SRL; 2012);
- analisi eseguite sul database ondamentrico Medatlas applicando la distribuzione di Gumbell (Progetti e Opere SRL; 2012).

E' stato tralasciato il confronto dei risultati elaborati usato da "Italprogetti" negli studi del 2004, in quanto rappresentativi degli eventi estremi provenienti da NW, senza ulteriore specifica sull'ampiezza angolare del settore direzionale di riferimento.

Data l'ampiezza delle elaborazioni, si è scelto l'evento estremo di progetto al variare del tempo di ritorno e della direzione al largo, come quello che supera o eguaglia il 75% dei dati disponibili. Tale valore di soglia è stato scelto in analogia ai criteri più diffusi nelle usuali applicazioni statistiche. Il 75° percentile, infatti, è un valore di soglia ricorrente nelle applicazioni statistiche; ad esempio secondo la distribuzione normale, a esso compete il 75% di probabilità che la grandezza in esame assuma proprio tale valore.

Nonostante che la natura stessa degli eventi estremi confrontati, derivanti da fonti diverse ed elaborati con metodologie diverse, implichi che la popolazione costituita da tali valori sia profondamente disomogenea e non adatta ad essere analizzata con usuali strumenti statistici, occorre riconoscere che il metodo utilizzato ha il pregio di tener conto di tutti gli sforzi elaborativi sinora compiuti.

Alla luce di ciò, la scelta di un tale valore di soglia così elevato è senz'altro adeguatamente cautelativa.

Per facilitare la lettura e il confronto, le serie ondamentriche disponibili sono state riportate per ogni caso direzionale su diagrammi aventi le seguenti caratteristiche:

- sull'asse dell'ordinate, in scala lineare, sono riportate le altezze d'onda significativa;
- sull'asse delle ascisse, in scala logaritmica, sono riportati i tempi di ritorno di riferimento.

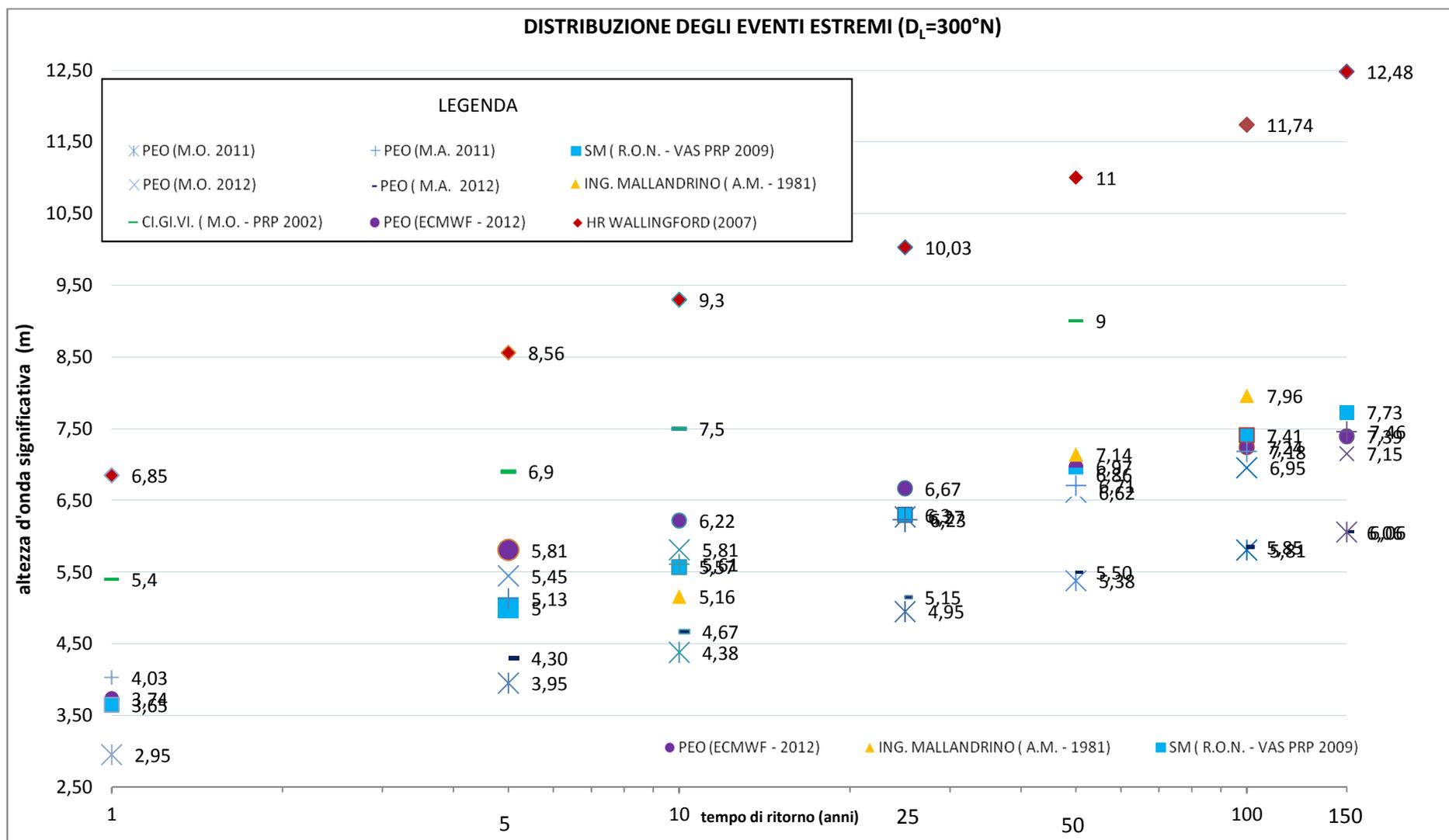


Figura 4.3 - Confronto degli eventi estremi. Direzione al largo: 300°N

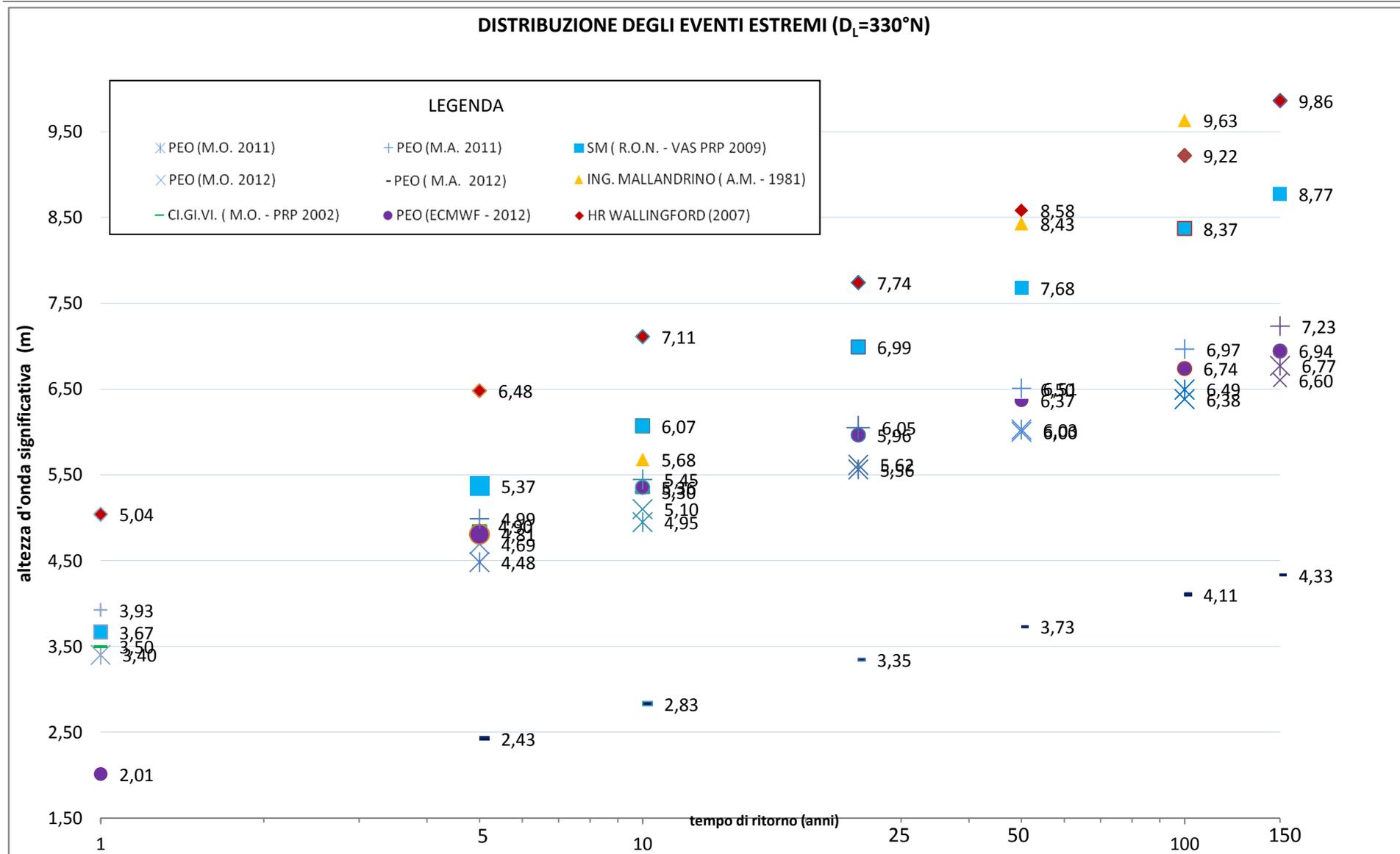


Figura 4.4- Confronto degli eventi estremi. Direzione al largo: 330°N

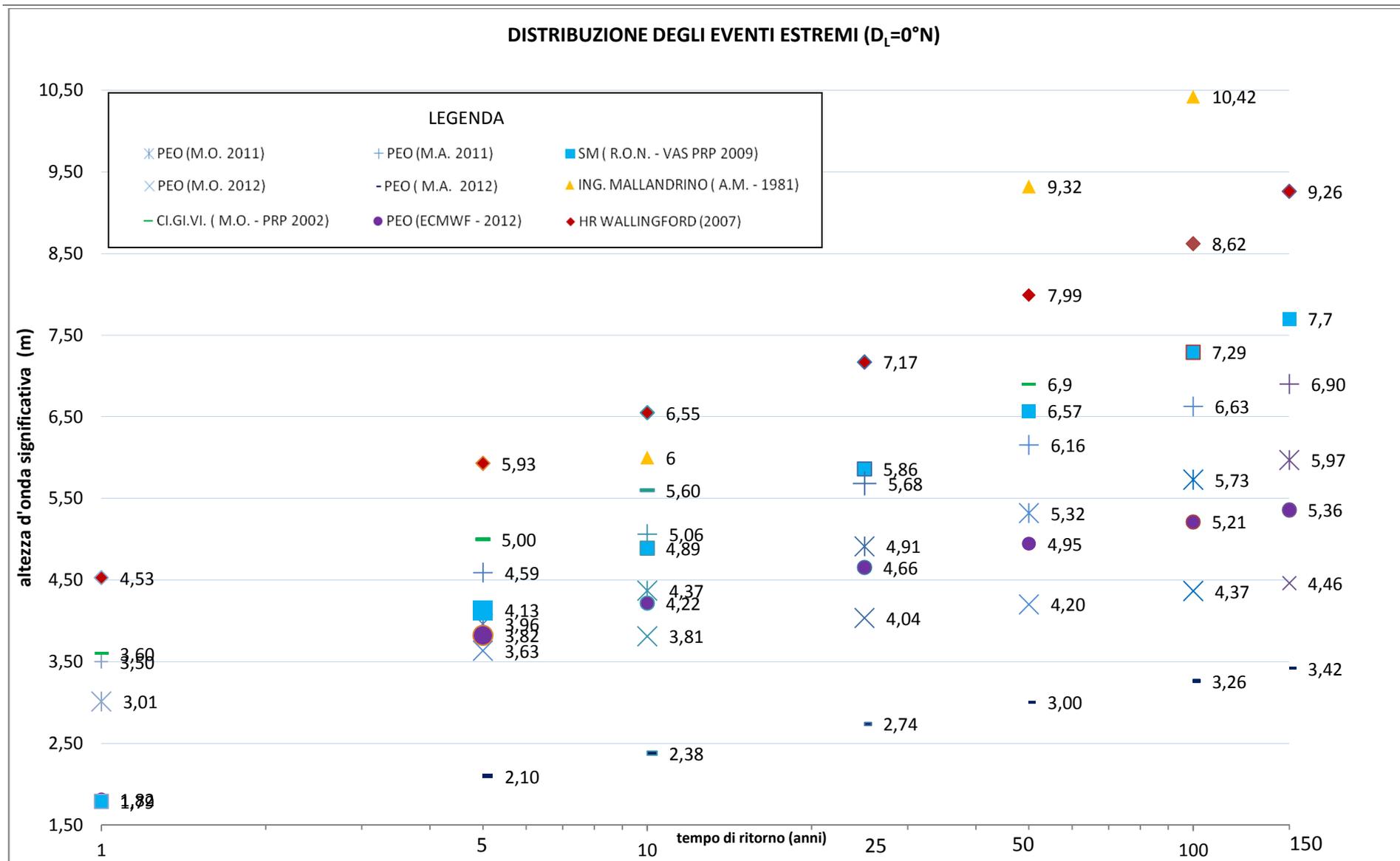


Figura 4.5 - Confronto degli eventi estremi. Direzione al largo: 0°N

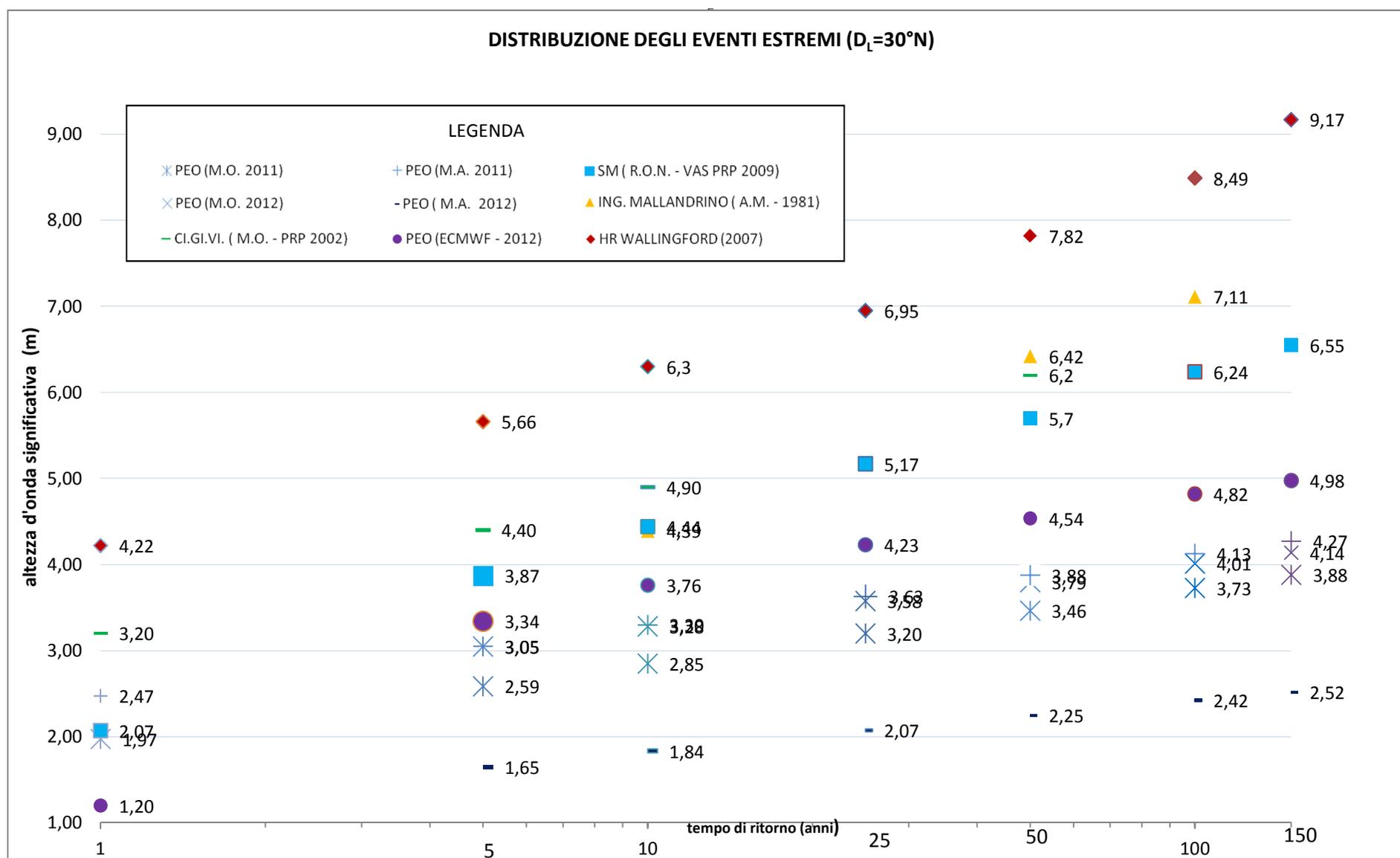


Figura 4.6 - Confronto degli eventi estremi. Direzione al largo: 30°N

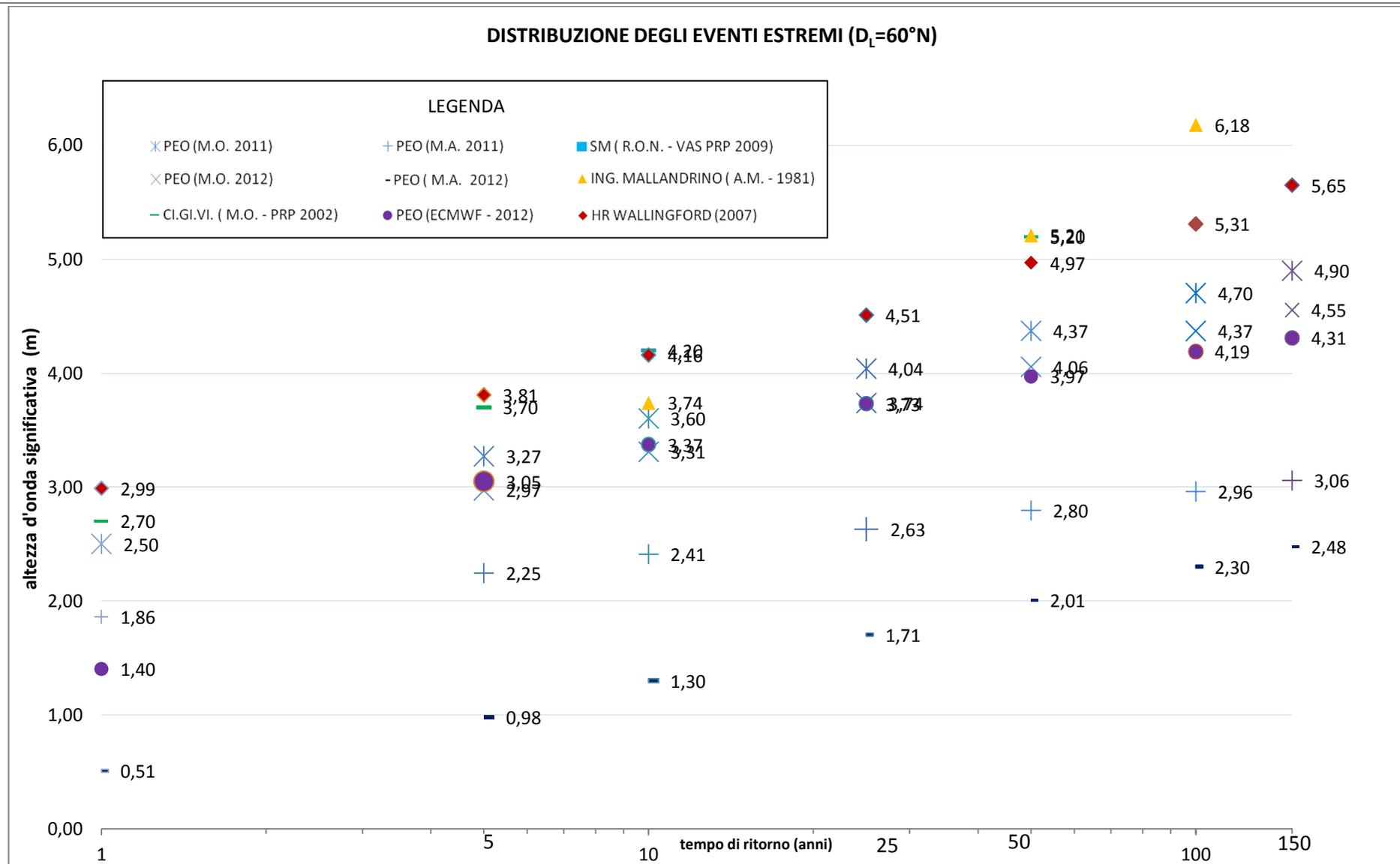


Figura 4.7 - Confronto degli eventi estremi. Direzione al largo: $60^\circ N$

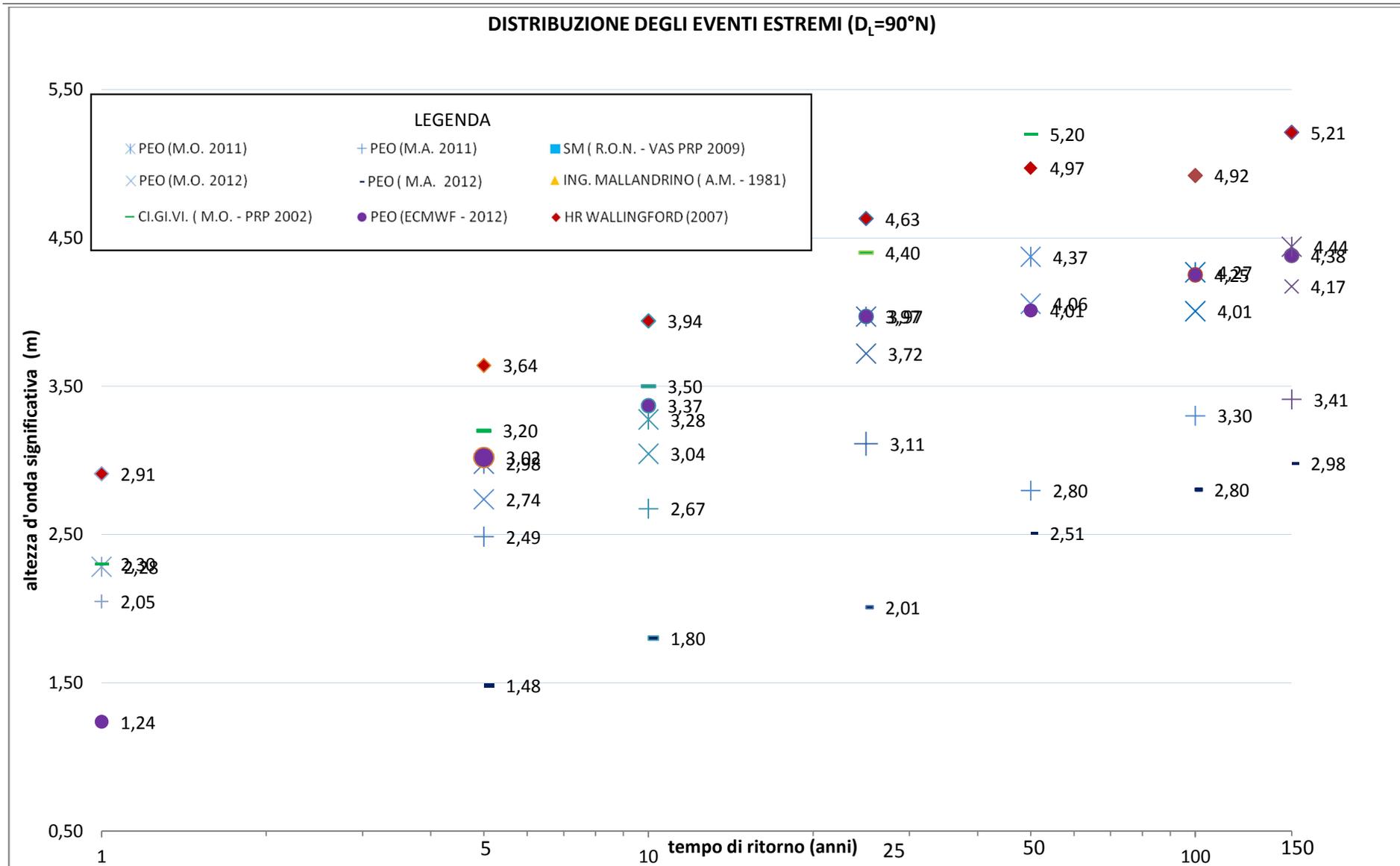


Figura 4.8 - Confronto degli eventi estremi. Direzione al largo: 90°N

Di seguito si riporta, quindi, la tabella riepilogativa degli eventi estremi al largo che saranno utilizzati per le calcolazioni di progetto.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
R (ANNI)	H_s (m)					
	300°N	330°N	360°N	30°N	60°N	90°N
1	5,40	3,93	3,60	3,20	2,50	2,30
5	5,81	4,99	5,00	4,40	3,70	3,02
10	6,22	5,68	5,60	4,90	3,74	3,50
25	6,67	6,99	5,86	5,17	4,04	3,76
50	7,14	7,68	6,57	6,20	4,97	4,01
100	7,41	8,37	7,29	6,24	5,31	4,27
150	7,73	8,77	7,70	6,55	5,65	4,44

Tabella 4.15 – Stima degli eventi estremi di progetto al largo di Termini Imerese

5. ANALISI DEL CLIMA D'ONDA AL LARGO

Per quanto riguarda il clima d'onda al largo del paraggio in esame è stata eseguita dapprima una verifica dell'adattabilità delle fonti.

Tra tutte le fonti disponibili, sono state scelte:

- le tabelle di occorrenza delle registrazioni effettuate dalla boa appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (RON) ubicata al largo di Capo Gallo (PA) nel punto di coordinate $38^{\circ}14'60''N$ e $13^{\circ}19'0,1''E$ e validat e dall'ente Gestore;
- le tabelle di occorrenza dell'Atlante MEDATLAS nel punto di coordinate $39^{\circ}N$, $14^{\circ}E$;
- le tabelle di occorrenza fornite dal UKMO nel punto di coordinate $38,5^{\circ}N$, $13,9^{\circ}E$;

in quanto tali fonti:

- sono in disponibilità diretta di chi ha redatto lo studio,
- sono state validate e fornite da enti ufficiali operanti nel settore a livello internazionale.

Al fine di verificare l'adattabilità delle tre fonti ondametriche sopra indicate al sito in esame è stato condotto il confronto dei campi di generazioni degli stati del mare, individuando i fetch geografici ed efficaci sia per i siti di misura che per quello in studio.

Si ricorda a tal fine che per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento.

In bacini semichiusi di estensione limitata come il Mar Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione.

Nelle figure successive sono rappresentati i diagrammi delle distanze di mare libero del paraggio in studio, la cui ampiezza corrisponde al settore di traversia.

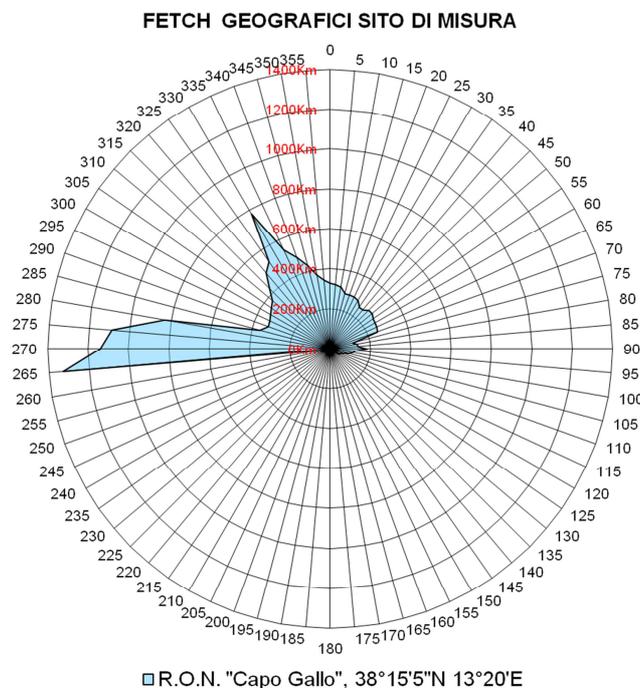


Figura 5.1 - Diagramma di distanza di mare libero per il sito di Capo Gallo

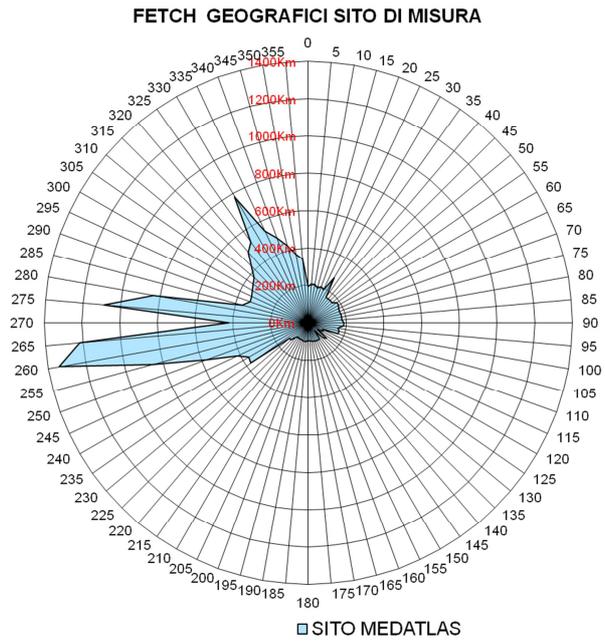


Figura 5.2 - Diagramma di distanza di mare libero per il sito MEDATLAS

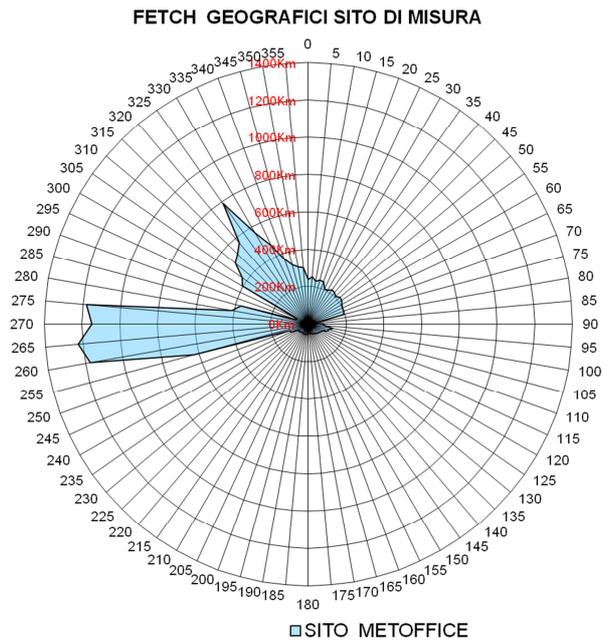


Figura 5.3 - Diagramma di distanza di mare libero per il sito METOFFICE

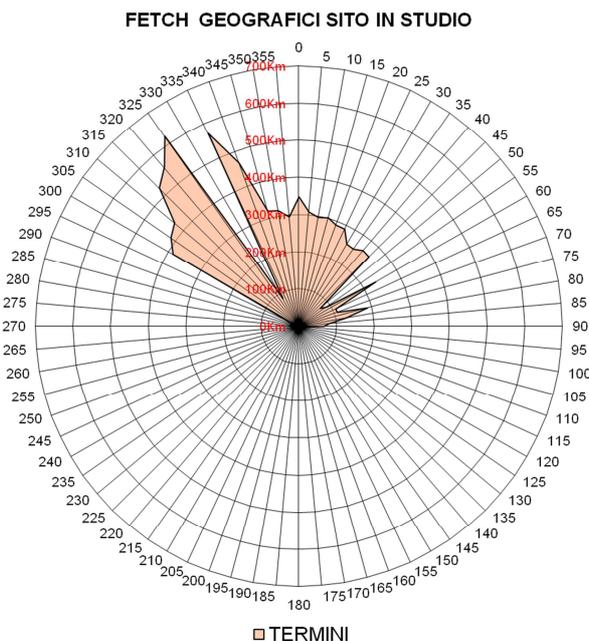


Figura 5.4 - Diagramma di distanza di mare libero per il sito di Termini Imerese

Per completare l'inquadramento geografico del paraggio è necessario determinare i valori dei fetch efficaci sulla base dei valori dei fetch geografici individuati.

Il fetch efficace è definito come la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento.

Per la sua stima occorre tenere conto dell'influenza dovuta alle lunghezze di mare libero associate a direzioni laterali rispetto a quella della direzione principale e della larghezza dell'area di generazione. Di conseguenza la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici.

Il calcolo dei fetch efficaci può essere eseguito in base alla seguente relazione indicata da Sverdrup, Munk e Bretsheneider con i successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1979):

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

- $F_{e,w}$ lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione j_w ;
- F_i lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i -esima j_i ;
- ϕ_w direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo il paraggio;
- $\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$ direzione i -esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕ_w ;
- θ ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso, 45° con il metodo Saiville;
- n termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n=2$).

Nelle figure seguenti sono rappresentati i diagrammi dei fetch efficaci.

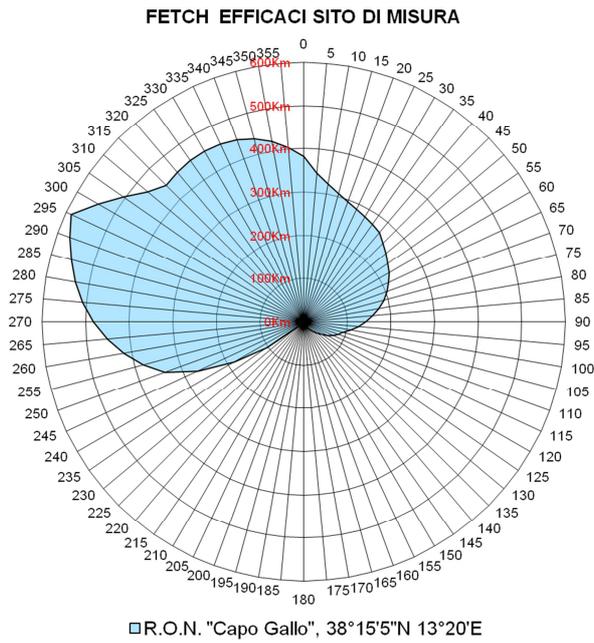


Figura 5.5- Diagramma del fetch efficace per il sito di Capo Gallo

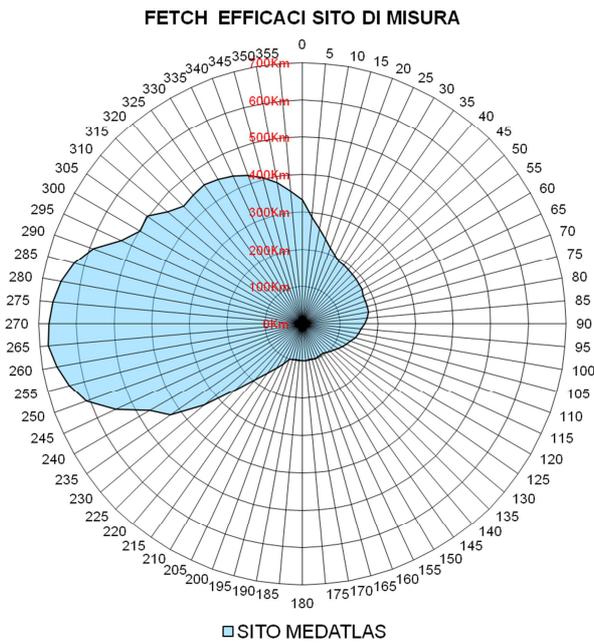


Figura 5.6- Diagramma del fetch efficace per il sito MEDTLAS

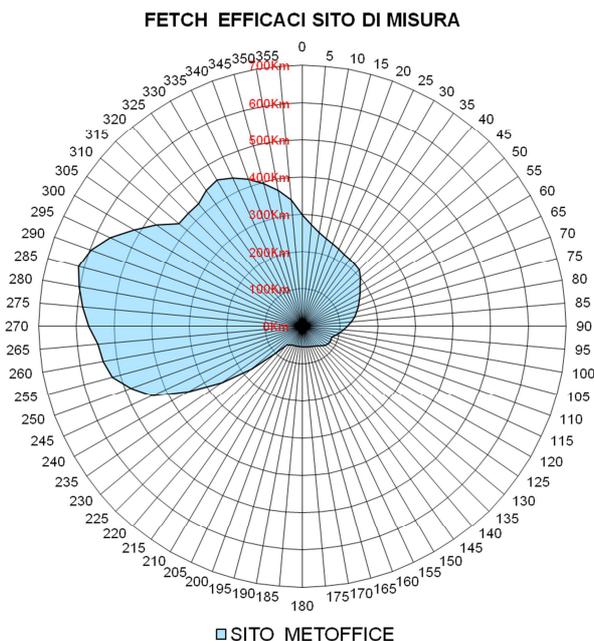


Figura 5.7- Diagramma del fetch efficace per il sito METOFFICE

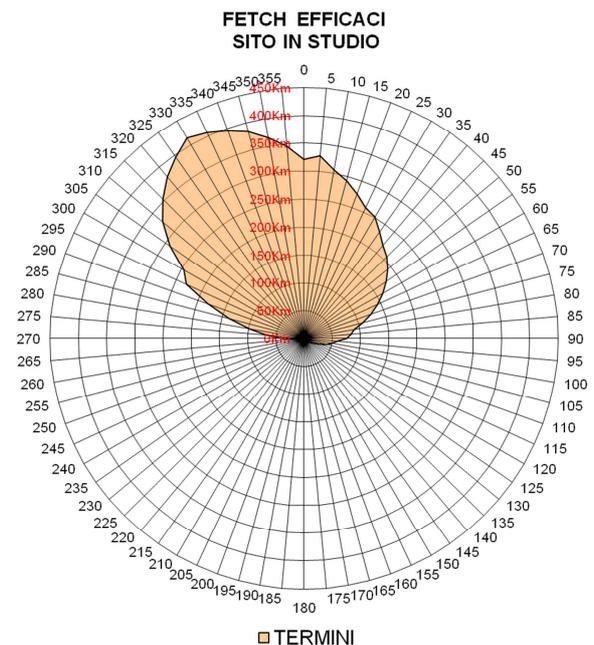


Figura 5.8- Diagramma del fetch efficace per il sito di Termini Imerese

Per valutare l'effettiva adattabilità dei dati acquisiti, si è ricorsi all'impiego di un apposito modello matematico di trasposizione. Il metodo utilizzato consiste nel confronto dei diagrammi dei fetches dei due siti, basandosi sull'ipotesi che la formazione dell'onda dipende dal vento spirante (direzione, intensità e durata) e dalla lunghezza di mare libero (fetch) su cui tale vento spira.

Di seguito si riportano i grafici di sovrapposizione dei fetches geografici ed efficaci per i due siti di interesse.

CONFRONTO TRA I FETCH GEOGRAFICI

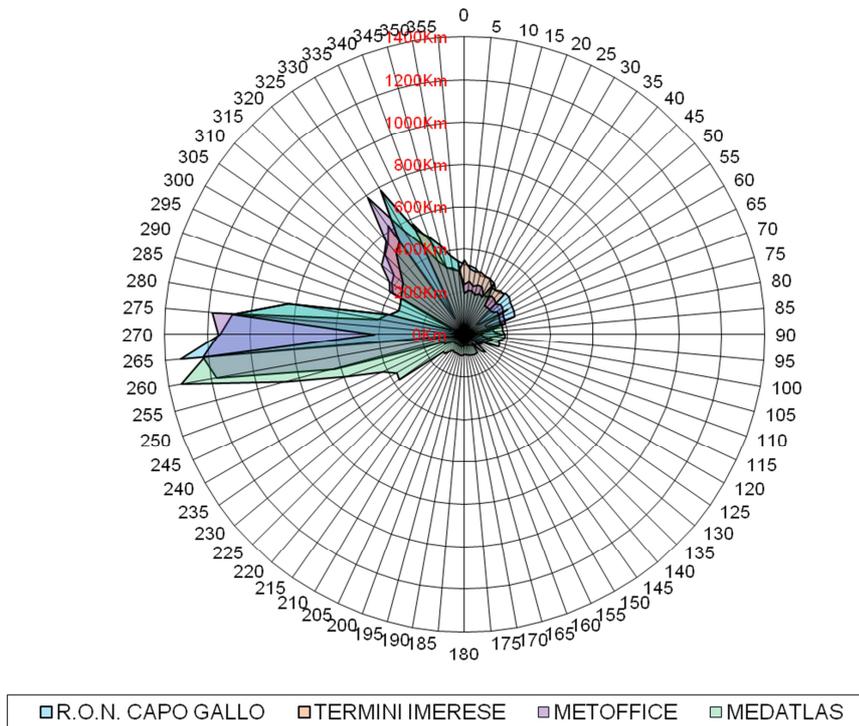


Figura 5.9 - Diagrammi di sovrapposizione del fetch geografici di Capo Gallo e Termini Imerese

CONFRONTO TRA I FETCH EFFICACI

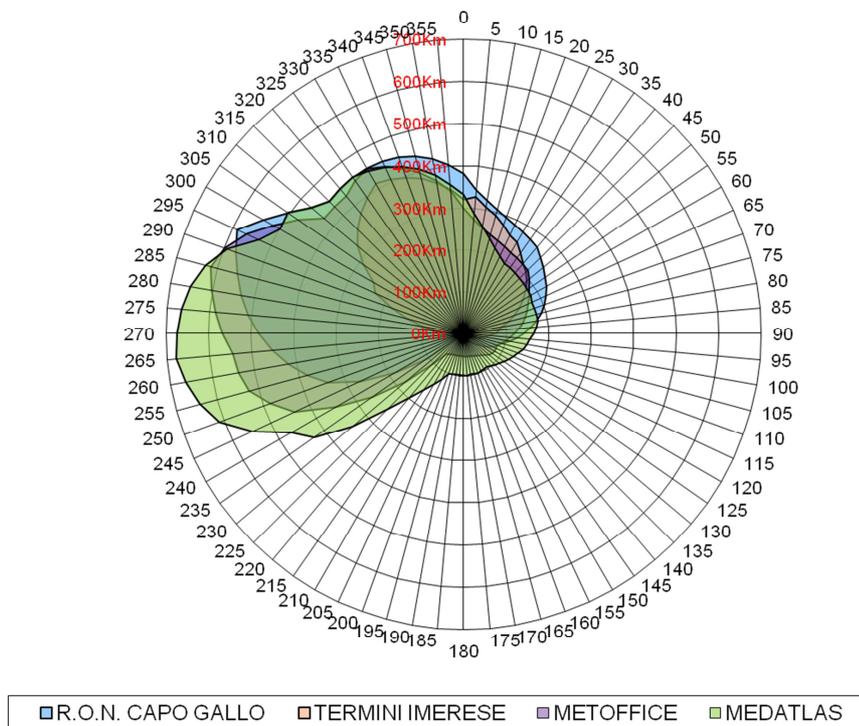


Figura 5.10- Diagrammi di sovrapposizione del fetch efficaci di Capo Gallo e Termini Imerese

Al fine di scegliere la fonte ondometrica maggiormente rappresentativa per il paraggio in esame per le analisi del clima d'onda, la scrivente ha optato per valutare i coefficienti di

trasposizione delle altezze d'onda e del periodo sul paraggio in esame con uno dei metodi citati in letteratura.

Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura e a quello di interesse.

Per poter trasporre le misure di altezze d'onde per questi settori di traversia sono state considerate le equazioni seguenti che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale H_{mo} e il periodo di picco spettrale T_p in funzione della lunghezza del fetch e della velocità del vento, in particolare:

$$\frac{gH_{mo}}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{gT_m}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{3}}$$

dove:

- U_A è il fattore di velocità del vento, dipendente in modo non lineare della velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m.;
- F è il fetch efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Indicando con gli apici O e P , rispettivamente, le grandezze relative al punto di misura e al punto di trasposizione, fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci F_p e F_o , le precedenti relazioni permettono di stabilire la ricercata corrispondenza tra le altezze ed i periodi delle onde relative al punto O e al punto P per fissata direzione:

$$\frac{H_{mo}^P}{H_{mo}^O} = \left| \frac{F^P}{F^O} \right|^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{T_{mo}^P}{T_{mo}^O} = \left| \frac{F^P}{F^O} \right|^{\frac{1}{3}}$$

dove si è ovviamente supposto che il fattore di velocità del vento sia lo stesso nei due punti in esame.

Di seguito si riportano i diagrammi dei coefficienti di trasposizione ottenuti per il paraggio in esame per ognuna delle fonti analizzati per le direzioni 300°N, 330°N, 30°N, 60°N, 90°N.

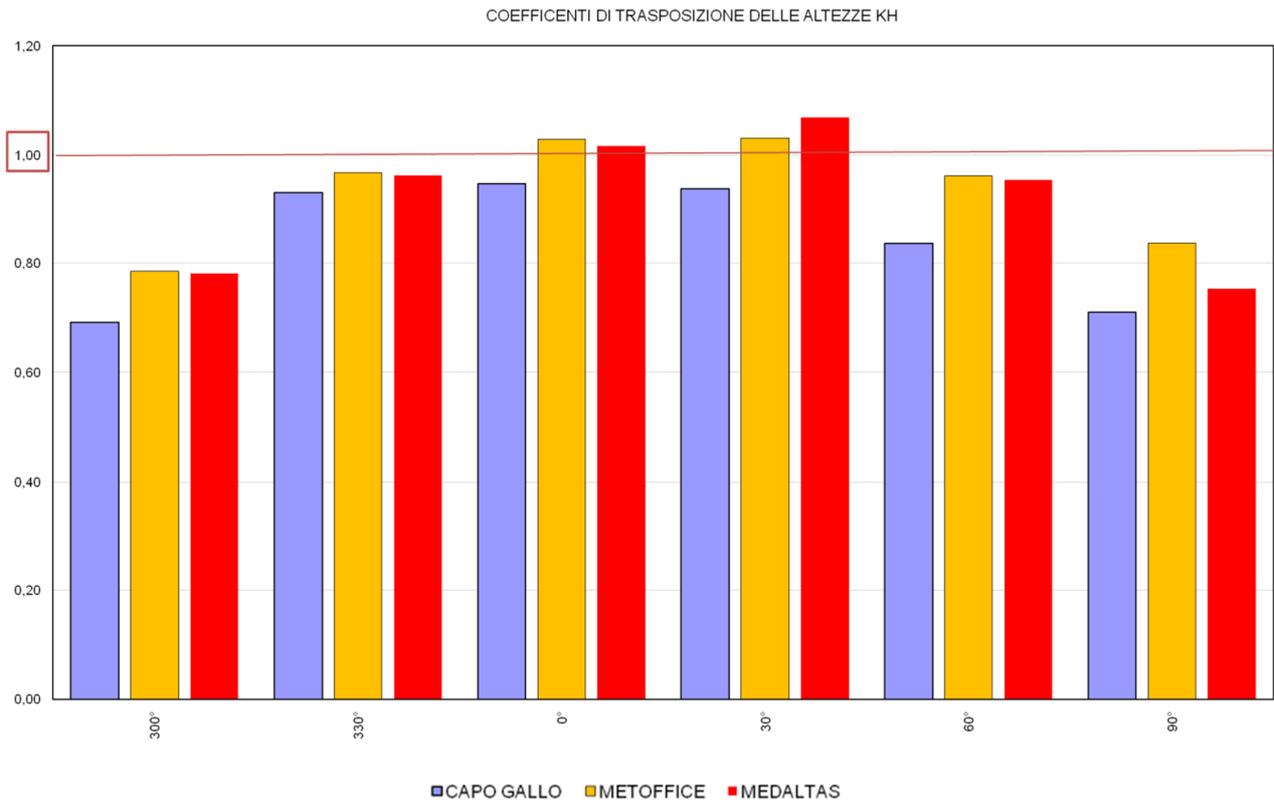


Figura 5.11 - Confronto del campo di generazione ondosa. Diagrammi dei coefficienti di trasposizione delle altezze d'onda

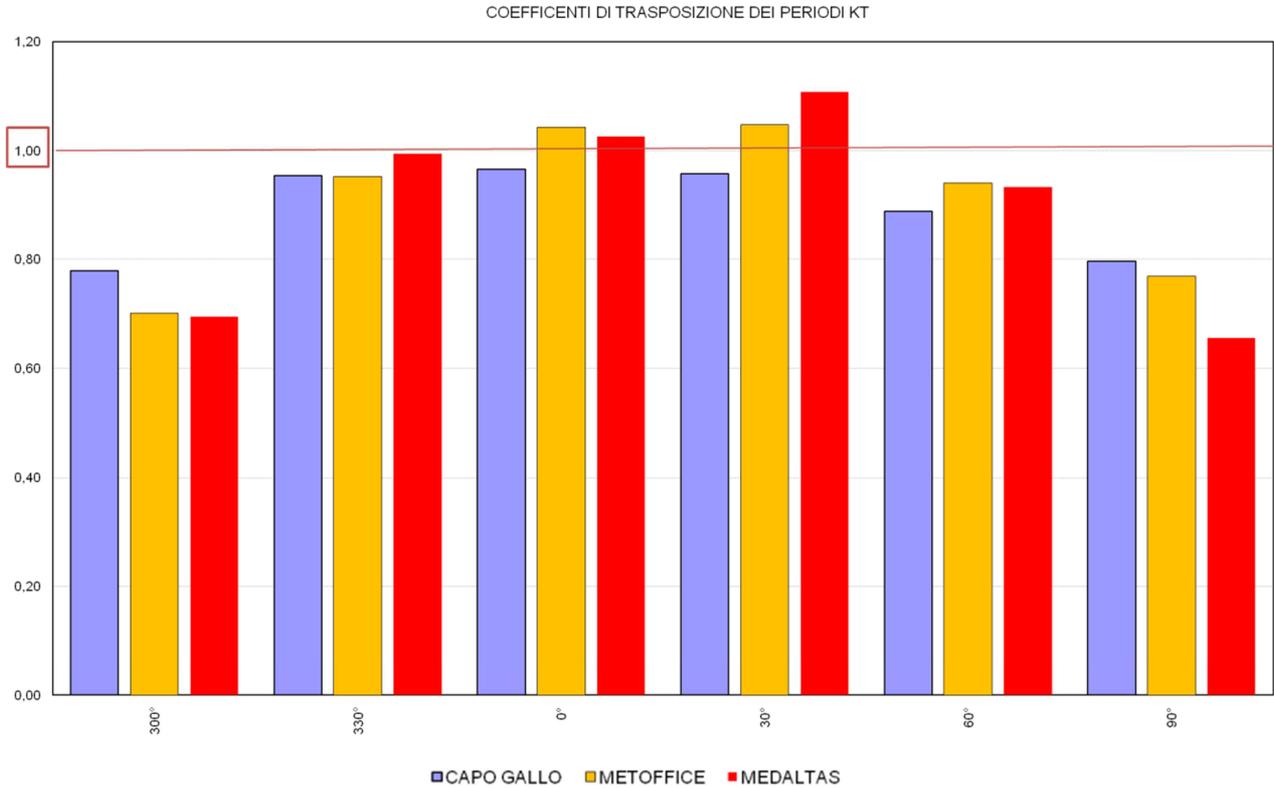


Figura 5.12 - Confronto del campo di generazione ondosa. Diagrammi dei coefficienti di trasposizione dei periodi

Dal confronto tra i diagrammi di trasposizione delle altezze d'onda e dei periodi si osserva che:

- per le direzioni al largo 300°N e 90°N, ogni fonte è caratterizzata da coefficienti minori o uguali a 0,80;
- per le direzioni al largo 330°N e 60°N ogni fonte è caratterizzata da coefficienti compresi tra 0,80 e 1,00;
- per le direzioni al largo 0°N e 30°N, le fonti ME DATLAS e METOFFICE sono caratterizzate da coefficienti di trasposizioni leggermente superiori all'unità mentre il punto di riferimento del dataset R.O.N CAPO GALLO è caratterizzato da coefficienti leggermente inferiori all'unità.

Il dataset della Boa R.O.N. di Capo Gallo è caratterizzato generalmente da coefficienti di trasposizione leggermente inferiori rispetto alle altre fonti in analisi, ma le differenze indotte sulla valutazione delle altezze d'onda sono da ritenere di lieve entità e trascurabili ai fini dell'analisi del clima d'onda.

Il dataset della Boa R.O.N. di Capo Gallo è tuttavia preferibile rispetto alle rimanenti fonti, in quanto esso è derivante da misurazioni ondamentriche dirette: tale fatto lo rende più adatto per le analisi del clima d'onda rispetto agli altri dataset.

Si conviene quindi di fare riferimento per le analisi del clima d'onda ai dati ondometrici disponibili del dataset della boa R.O.N. di Capo Gallo.

Di seguito si riportano la tabella di occorrenza ed il diagramma polare del clima d'onda al largo di Capo Gallo.

Si ricorda a tal proposito che i dati disponibili e validati dall'ente gestore si riferiscono all'arco temporale compreso tra il 01/01/2004 ed il 31/03/2008.

Hs (m)	<=0.5	<=1	<=1.5	<=2	<=2.5	<=3	<=3.5	<=4	<=4.5	<=5	<=5.5	<=6	<=6.5	<=7	<=7.5	<=8	>10	Totale
0	1119	1062	629	235	85	60	38	7										3235
15	928	890	599	233	116	79	23	10	1									2879
30	752	787	410	153	64	20	15	13	3	2	2							2221
45	690	675	438	92	51	57	21	4										2028
60	458	681	351	148	72	46	18	1	2							1		1778
75	390	603	225	26	19	12	4											1279
90	232	430	256	26	6								1				1	952
105	103	219	317	33	3													675
120	63	116	250	33	5	1		1										469
135	24	60	86	6	1	3	2	2	1									185
150	15	24	43	3		3	1		1			1						91
165	8	17	33	5	2	1		4					1					71
180	11	12	38	1	1	2												65
195	9	12	38	4	3	2	1	1	1									71
210	10	12	55	1	2	1	3	1										85
225	19	27	58	13	2	3	1		2		1		1					127
240	19	66	103	25	2	1	1	2	3			1						223
255	86	216	537	209	61	27	7	1										1144
270	254	820	2332	1406	846	413	166	121	49	23	3	1						6434
285	550	1374	2927	1821	788	432	183	71	13	7	10	7	1		1			8185
300	804	1394	2249	1285	658	272	122	46	16	7	5	7	1			1		6867
315	1104	1681	1721	700	305	129	80	31	24	9	4	3	1	1				5793
330	1316	1614	940	365	111	55	30	11	5	2	1		2					4452
345	1309	1094	518	228	87	54	14	2			1				1			3308
Totale	10273	13888	15153	7051	3290	1673	730	329	121	50	27	20	8	1	2	2	1	52617

Tabella 5.1– Clima d'onda al largo di Capo Gallo. Tabella di occorrenza

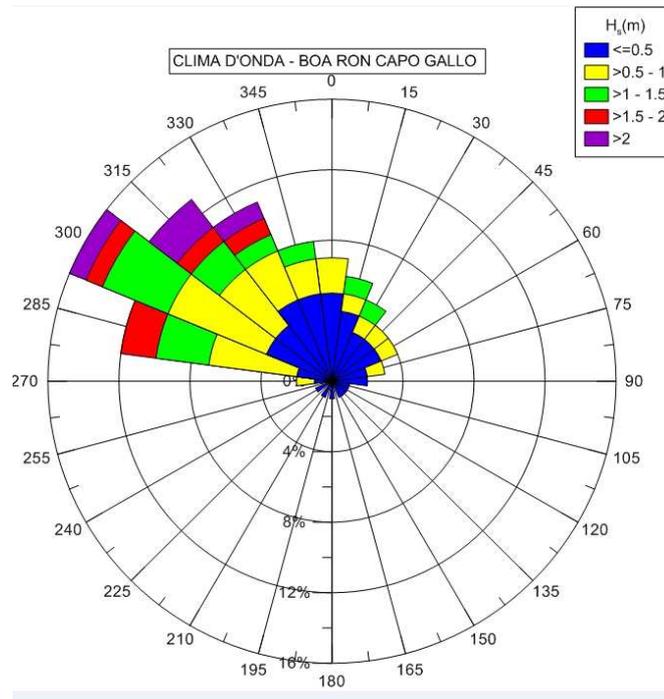


Figura 5.13 - Diagramma polare del clima d'onda al largo di Capo Gallo

Come è possibile osservare dalla tabella e dal diagramma appena riportati:

- il settore di traversia principale è costituito dalle direzioni del IV quadrante (270°N-0°N) a cui compentono sia le frequenze di ac cadimento maggiori che le mareggiate più intense;
- il settore di traversia secondario è costituito dalle direzioni del I quadrante (0°N-90°N);
- il II e il III quadrante sono caratterizzati da direzioni provenienti dalla terra ferma con eventi poco frequenti e di minore entità.

A seguito della costruzione dei diagrammi frequenza di occorrenza/altezza d'onda significativa e a seguito della determinazione della legge empirica di distribuzione del clima d'onda direzionale e omnidirezionale (i cui parametri sono stati tarati sulla base di un fitting dei dati disponibili) è stato possibile eseguire la stima delle altezze d'onda significative degli eventi caratteristici del clima d'onda corrispondenti alle frequenze di accadimento di 5 gg/a e 12h/a.

Di seguito si riporta la tabella riepilogativa.

CAPO GALLO CLIMA D'ONDA AL LARGO		
DIR (°N)	H _s (m)	
	5gg/a	12 h/a
300	2.12	3.02
315	1.65	3.43
330	1.41	3.11
345	0.89	2.50
0	0.81	2.33
15	0.92	2.28
30	0.99	2.22
45	0.81	1.66
60	0.78	2.00
75	0.84	2.16
90	0.61	1.49
OMNI	2.32	3.85

Tabella 5.2 – Eventi caratteristici del clima d'onda al largo di Capo Gallo per 5 gg/anno e 12 h/anno.

Durante la verifica dell'adattabilità dei dati del sito di Capo Gallo al sito di Termini Imerese, sono stati determinati i seguenti coefficienti di trasposizione delle altezze d'onda , con variazione della direzione del moto ondoso al largo secondo settori di ampiezza 15°.

TRASPOSIZIONE DEL CLIMA D'ONDA DA CAPO GALLO A TERMINI IMERESE											
STIMA DEI COEFFICIENTI DI TRASPOSIZIONE											
DIR	300°N	315°N	330°N	345°N	0°N	15°N	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N
KH	0,69	0,88	0,94	0,93	0,94	0,97	0,94	0,90	0,85	0,75	0,72
KT	0,78	0,92	0,96	0,96	0,96	0,98	0,96	0,93	0,89	0,83	0,80

Tabella 5.3 –Coefficienti di trasposizione valutati per il trasporto delClima d'onda al largo da Capo Gallo a Termini Imerese

Applicando i coefficienti di trasposizione delle altezze d'onda al settore di traversia di Termini Imerese si ottiene la seguente tabella di occorrenza.

D (°N)	300	315	330	345	360	15	30	45	60	75	90
H (m)											
<=9.5											
<=9											
<=8.5		1									
<=8											
<=7.5											
<=7		1	1		1						
<=6.5			1	1							1
<=6			1	2						1	
<=5.5	1	1	3								
<=5	1	8	4	1	1					1	
<=4.5	2	5	9	2				2			
<=4	7	7	24	5			1	2		1	
<=3.5	10	62	31	11	2	7	10	3		2	
<=3	8	127	82	30	14	38	23	13	25	19	
<=2.5	271	286	134	55	54	60	79	15	57		4
<=2	436	694	311	111	87	85	117	20	51	118	12
<=1.5	2721	1342	713	372	228	237	239	213	92	148	45
<=1	3045	2376	1766	966	528	638	604	414	440	358	230
<=0.5	2009	2270	2864	3012	2479	2232	1866	1577	1397	1165	1015
TOT	8511	7180	5946	4568	3394	3298	2940	2263	2063	1813	1307

Tabella 5.4 – Clima d'onda al largo di Termini per il settore di traversia 300°N-90°N. Tabella di occorrenza

Di seguito si riporta il diagramma polare del clima d'onda al largo di Termini Imerese.

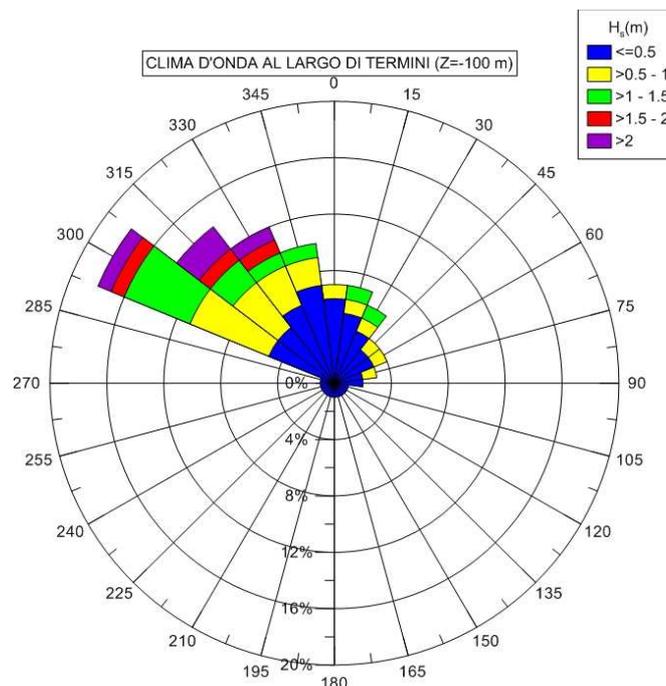


Figura 5.14 - Diagramma polare del clima d'onda al largo di Termini Imerese

Come è possibile osservare dalla tabella e dal diagramma appena riportati, anche per il sito di Termini Imerese:

- il settore di traversia principale è costituito dalle direzioni del IV quadrante (270°N-0°N) a cui compentono sia le frequenze di accadimento maggiori che le mareggiate più intense;
- il settore di traversia secondario è costituito dalle direzioni del I quadrante (0°N-90°N);
- il II e il III quadrante sono caratterizzati da direzioni provenienti dalla terra ferma con eventi poco frequenti e di lieve entità.

Anche per il sito di Termini Imerese è stato possibile eseguire la stima delle altezze d'onda significativa degli eventi caratteristici del clima d'onda corrispondenti alle frequenze di accadimento di 5 gg/a e 12h/a.

Di seguito si riporta la tabella riepilogativa.

TERMINI IMERESE CLIMA D'ONDA AL LARGO		
DIR (°N)	H _s (m)	
	5gg/a	12 h/a
300	1.80	2.86
315	1.90	3.03
330	1.52	3.11
345	1.05	2.40
0	0.72	2.24
15	0.91	2.28
30	0.99	2.22
45	0.80	1.94
60	1.00	2.00
75	0.66	2.08
90	0.58	1.24
OMNI	2.66	3.63

Tabella 5.5 – Eventi caratteristici del clima d'onda al largo di Termini Imerese per 5 gg/anno e 12 h/anno.

6. TRASFORMAZIONE DELL'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA

6.1 RIFRAZIONE E SHOALING

La propagazione del moto ondoso verso riva è caratterizzata da trasformazioni, essenzialmente dovute a:

- *orografia* e tipologia di *fondale*;
- azione della *marea*;
- presenza di *vento*;
- azione delle *correnti*;
- interazione con *infrastrutture* presenti.

Una semplice ed efficace interpretazione dei fenomeni del primo tipo è fornita dalla teoria delle onde di piccola altezza.

Un'onda di oscillazione di periodo costante, che avanza dal largo verso riva, inizia a risentire degli effetti del fondale sottostante ad una profondità h che si ritiene pari a 0,5 volte la lunghezza d'onda L ; gli effetti del fondale sull'onda influiscono sulla celerità con la quale l'onda si propaga (*relazione di Airy*).

Essenzialmente, un medesimo fronte di onda monocromatica sarà caratterizzato da differenti valori della celerità, in funzione dei fondali presenti.

Le conseguenze che ne derivano sono:

- il fronte dell'onda avanza con celerità diverse, subendo una rotazione progressiva man mano che si approssima alla riva, tendendo a disporsi parallelamente alla batimetria del fondale (*rifrazione*);
- la morfologia del paraggio ha effetti diretti sulla concentrazione o sulla dispersione dell'energia, con conseguente aumento o diminuzione dell'altezza dell'onda (*shoaling*).

Un approccio completo per lo studio della trasformazione dell'onda sottocosta deve necessariamente tener conto del fenomeno del *frangimento* e della *dissipazione energetica* ad esso associata, nonché dei fenomeni di *diffrazione*.

Il *frangimento* si verifica allorquando vengano raggiunte determinate condizioni fisiche (in termini di ripidità dell'onda) o a seguito dell'interazione dell'onda con strutture costiere. L'individuazione delle zone di frangimento è, inoltre, determinante ai fini della analisi della operatività e della sicurezza dei bacini protetti, in concomitanza di eventi particolarmente gravosi.

Il fenomeno della *diffrazione* consiste nel trasferimento di energia lateralmente rispetto alla cresta dell'onda; esso risulta evidente allorquando un treno d'onda intercettato da un ostacolo (molo, promontorio etc.) pone in oscillazione la massa liquida dello specchio acqueo retrostante l'ostacolo stesso, con onde di espansione laterale radiali aventi per centro l'estremità di questo. In particolare per questo

Gli effetti indotti dai fenomeni di rifrazione, shoaling e frangimento saranno trattati in questo elaborato mentre quelli relativi alla diffrazione saranno trattati nell'elaborato "Studio dell'Agitazione residua e dell'operatività nautica del sistema portuale", a cui si rimanda.

6.2 MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO

Lo studio dei fenomeni legati alla trasformazione del clima d'onda verso riva è stato affrontato mediante il codice di calcolo STWAVE, il quale prende le mosse da un modello stazionario spettrale alle differenze finite proposto da *J. McKee Smith, D. T. Resio e A. K. Zundel*.

Scopo del modello è fornire una previsione del cambiamento dei parametri dell'onda dello stato di mare (altezza d'onda, periodo, direzione, e forma spettrale) durante la propagazione dal largo verso la riva.

Il codice STWAVE consente di determinare gli effetti indotti sullo stato di mare da rifrazione, shoaling e frangimento; il codice di calcolo consente anche di implementare la presenza di correnti e l'apporto energetico costituito dalla presenza del vento.

L'input delle caratteristiche del moto ondoso incidente è costituito da uno spettro energetico di tipo bidimensionale.

Lo spettro è una rappresentazione statistica del campo d'onda; concettualmente, esso può essere pensato come una sovrapposizione di più onde monocromatiche di diverso periodo e direzione.

Lo spettro rappresenta, quindi, la distribuzione dell'energia associata al moto ondoso in termini di frequenza (spettro monodimensionale) o in termini di frequenza e direzione (spettro bidimensionale).

Lo spettro bidimensionale è descritto da una superficie di equazione $z = f(x,y)$ che restituisce il valore della funzione densità di energia; le variabili x ed y rappresentano, rispettivamente, frequenza e direzione.

Le ipotesi del modello sono:

- fondo con dolce pendenza e riflessione dell'onda trascurabile;
- condizione dell'onda incidente costante su tutto il confine al largo del dominio di calcolo;
- moto stazionario delle onde, delle correnti e dei venti;
- modellazione lineare dei fenomeni di rifrazione e shoaling;
- corrente costante per tutta l'altezza della colonna d'acqua;
- attrito al fondo e fenomeni riflessivi trascurabili.

A ben guardare, l'ultima ipotesi comporta la necessità di ricorrere ad un ulteriore modello di calcolo per lo studio di dettaglio dell'agitazione interna al bacino portuale.

Dal momento che il modello consente di considerare gli effetti dovuti alla presenza di corrente, le equazioni di governo sono esplicitate rispetto un sistema di riferimento solidale alla corrente stessa.

I parametri dell'onda sono contrassegnati dal pedice r , i parametri valutati rispetto al sistema di riferimento assoluto sono contrassegnati dal pedice a .

È possibile esprimere la dispersione dell'onda, rispetto al sistema di riferimento relativo, come segue (Jonsson et al., 1990):

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd$$

dove:

- ω : frequenza angolare;
- g : accelerazione di gravità;
- k : numero d'onda;
- d : profondità.

Nel sistema di riferimento assoluto, l'equazione della dispersione associato all'onda diventa:

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha)$$

dove:

- U : velocità della corrente;
- d : direzione della corrente rispetto all'asse x nel sistema di riferimento assoluto;
- α : angolo che la normale alla cresta dell'onda forma con l'asse x del sistema di riferimento assoluto

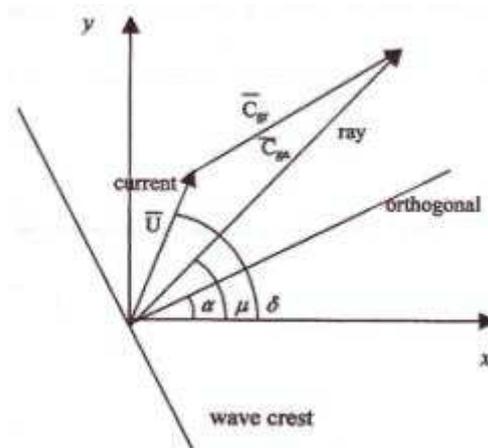


Figura 6.1 - Definizione del sistema di riferimento

Le soluzioni per la rifrazione e lo shoaling richiedono la definizione della celerità dell'onda C e della celerità di gruppo C_{gr} in entrambi i sistemi di riferimento.

Nel sistema di riferimento relativo si ha:

$$C_r = \frac{\omega_r}{k}$$

$$C_{gr} = 0.5C_r \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

La direzione di entrambe le celerità è pari ad a ; nel sistema di riferimento assoluto, le componenti delle celerità lungo x e y si esprimono come:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i$$

Anche la celerità assoluta forma con l'asse x un angolo pari ad α .

La celerità di gruppo assoluta definisce la direzione del raggio d'onda (direzione di propagazione dell'energia) (cfr. Figura 6.1) quest'ultima risulta dunque definita da:

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \sin \cos \alpha + U \cos \delta} \right)$$

L'ortogonale dell'onda indica la perpendicolare alla cresta dell'onda stessa, mentre il raggio d'onda indica la direzione di propagazione dell'energia.

La distinzione tra le due grandezze è necessaria solo nel caso in cui vi sia l'interazione tra onda e corrente; in assenza di quest'ultima, infatti, le due grandezze coincidono.

La direzione dell'ortogonale dell'onda in condizioni stazionarie è fornita dalla seguente espressione (Mei 1989; Jonsson 1990):

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn}$$

dove D è il simbolo di derivata, R è una coordinata nella direzione del raggio d'onda ed n è una coordinata normale all'ortogonale d'onda.

In condizioni stazionarie, l'equazione della conservazione dell'azione dell'onda spettrale lungo la direzione del raggio d'onda è (Jonsson, 1990):

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r}$$

dove il parametro E rappresenta la densità d'energia dello spettro d'onda, funzione della frequenza angolare assoluta ω_a e direzione q , mentre S indica un'entrata o un'uscita di energia.

Il criterio adottato per l'individuazione delle fasce di frangimento è quello proposto da Smith, Resio e Vincent (1997), i quali, a seguito di prove di laboratorio sul frangimento delle onde irregolari, proposero la seguente relazione:

$$(H_{m0})_{\max} = 0.1L \tanh kd$$

Ogni qual volta sia verificato tale criterio, l'energia associata ad ogni frequenza dello spettro viene ridotta.

Infine, per quanto riguarda gli effetti relativi ai fenomeni di diffrazione, occorre evidenziare come il modello simili in maniera semplificata, cioè come una "smussatura" dell'energia dell'onda. L'equazione usata tiene conto della diminuzione di energia dell'onda. Per tale motivo per una conoscenza accurata di tale fenomenologia occorre l'uso di un altro modello numerico adatto a tale scopo (cfr. l'elaborato "Studio dell'Agitazione residua e dell'operatività nautica del sistema portuale).

6.3 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO

Il modello di calcolo utilizzato ha consentito di analizzare la trasformazione subita dalle onde nel procedere dal largo verso riva ed, in particolare, di individuare le fasce di frangimento.

E' stato costruito per la configurazione di stato di fatto, in funzione della direzione di propagazione del moto ondoso, un dominio di calcolo su maglia a celle regolari di dimensioni 15 m x 15 m; il contorno esterno è stato posizionato in corrispondenza della batimetrica dei 100 m rispetto al l.m.m..

L'asse j è stato orientato parallelamente alla linea di costa; l'asse i, ortogonale al primo, è stato orientato positivamente nella direzione che va dal largo verso la costa.

Di seguito si riportano i dati caratteristici del dominio di calcolo, secondo il sistema di riferimento adottato.

- angolo di rotazione: 7°N;
- dimensioni celle: 15 m;
- profondità massima: 100 m;
- settore direzionale: 300°N-90°N.

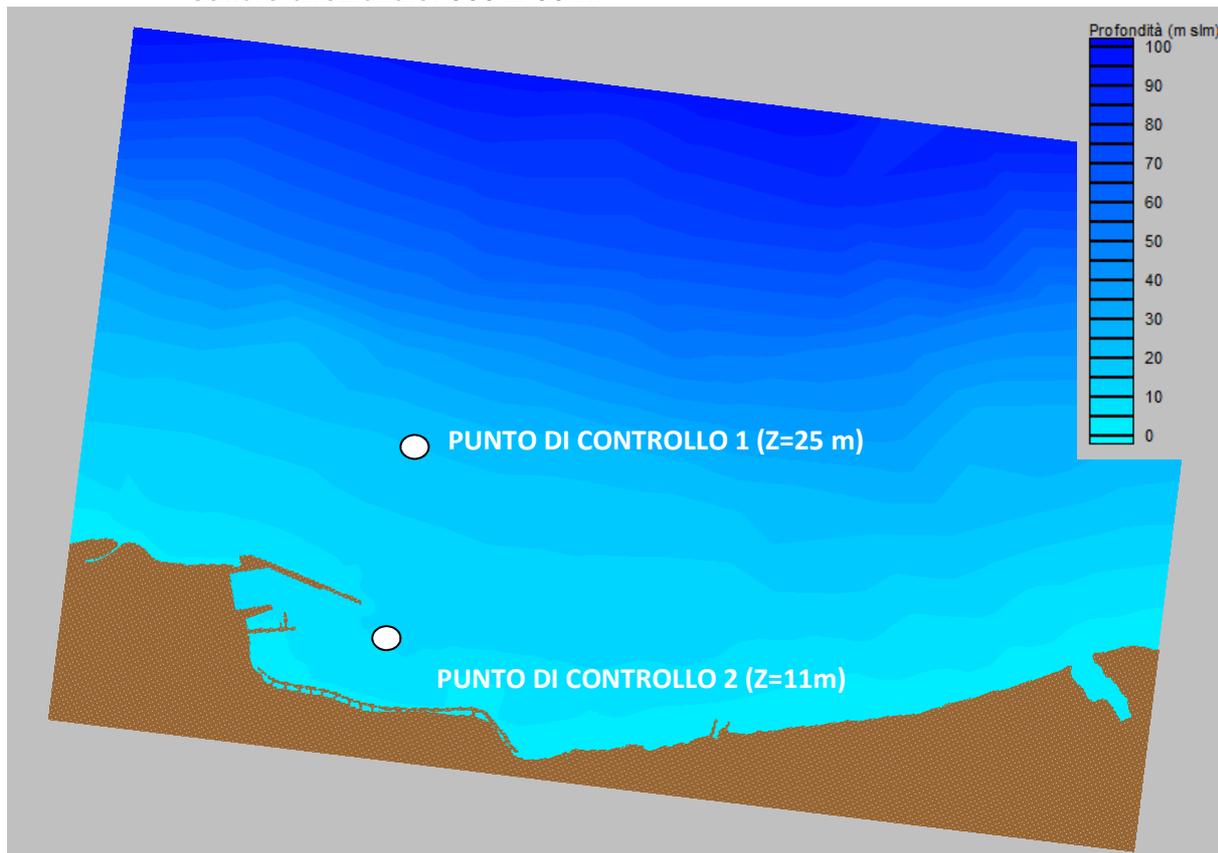


Figura 6.2 – Dominio di calcolo per le simulazioni con il modello STWAVE ed ubicazione dei punti di controllo

6.4 SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE

Come già evidenziato, il codice di calcolo è stato utilizzato per analizzare la trasformazione subita dalle onde nel loro procedere dal largo verso riva ed, in particolare, per individuare le fasce di frangimento per la configurazione di stato di fatto.

Sono stati oggetto di elaborazione:

- gli stati del mare caratteristici del clima d'onda al largo;
- gli stati del mare caratteristici degli eventi estremi per tempo di ritorno variabile da 1 a 150 anni.

A partire dai dati relativi *all'altezza d'onda significativa*, al *periodo* e alla *direzione*, è stato costruito uno spettro energetico bidimensionale, utilizzato come condizione al contorno.

Lo spettro è stato specificato usando una funzione di forma (*Bouws et al. 1985*), caratterizzata, oltre che dalle grandezze suddette, dai parametri γ e nn , identificativi, rispettivamente, del grado di apertura dello spettro nella direzione dell'asse delle frequenze e dell'asse delle direzioni. I valori di γ e nn , sono stati messi in relazione al periodo in esame.

Al termine delle simulazioni sui domini sono state determinate le onde trasformate in corrispondenza della batimetrica di 25 m (punto di controllo 1) e degli 11 m (punto di controllo 2).

6.5 PROPAGAZIONE DEL CLIMA D'ONDA DAL LARGO VERSO RIVA

Per quanto riguarda l'analisi della propagazione verso riva dei treni d'onda del clima d'onda al largo, si è proceduto adottando la seguente metodologia.

Gli stati del mare del clima ondoso del sito di Termini Imerese sono stati ulteriormente filtrati in modo tale da escludere gli eventi ondosi esterni al settore di traversia individuato. Sulla base di queste risultanze, è stata effettuata la ridistribuzione in frequenza delle occorrenze in:

- classi di altezza d'onda significativa di ampiezza pari a 0,5 m all'intervallo compreso tra 0,5 m e 10 m;
- classi direzionali di ampiezza pari a 15°, all'interno del settore compreso tra 300°N e 90°N.

In totale sono state eseguite, applicando il codice STWAVE, 220 elaborazioni

Per quanto riguarda i periodi di picco, si è fatto riferimento alla seguente relazione che deriva da considerazioni sullo spettro JONSWAP (Hasselmann 1973) ed in particolare sulla frequenza di picco e sui momenti dello spettro stesso:

$$T_p = 8,5 \pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}}$$

Al termine delle simulazioni è stato possibile determinare:

- la distribuzione delle direzioni e delle altezze d'onda significativa (clima d'onda locale) nel punto di controllo individuato;
- la fascia di frangenza.

Di seguito si riportano i diagrammi polari del clima d'onda sottocosta nei punti di controllo, già individuati.

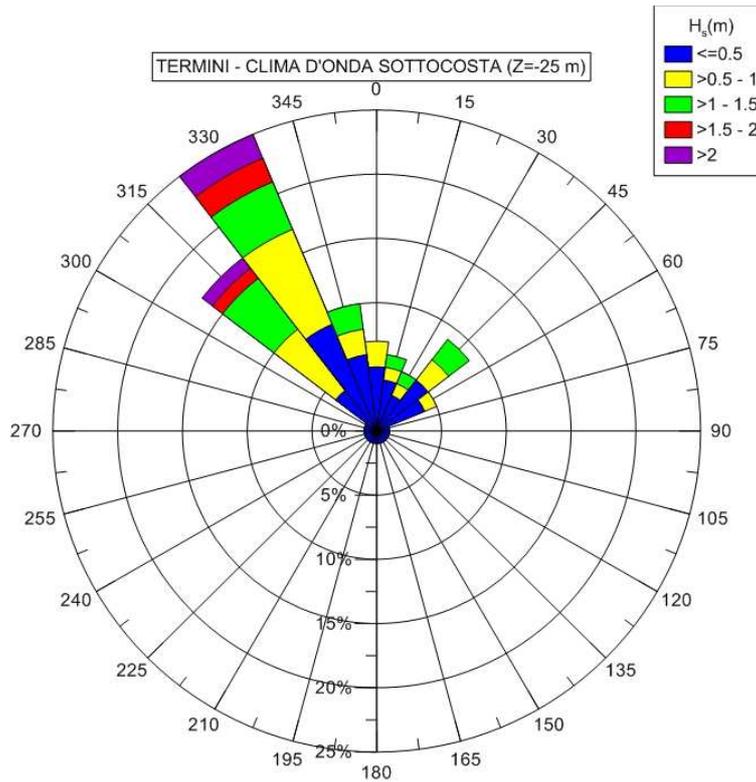


Figura 6.3 - Diagramma polare del clima d'onda locale sottocosta nel punto di controllo 1 (Z=25 m slm).

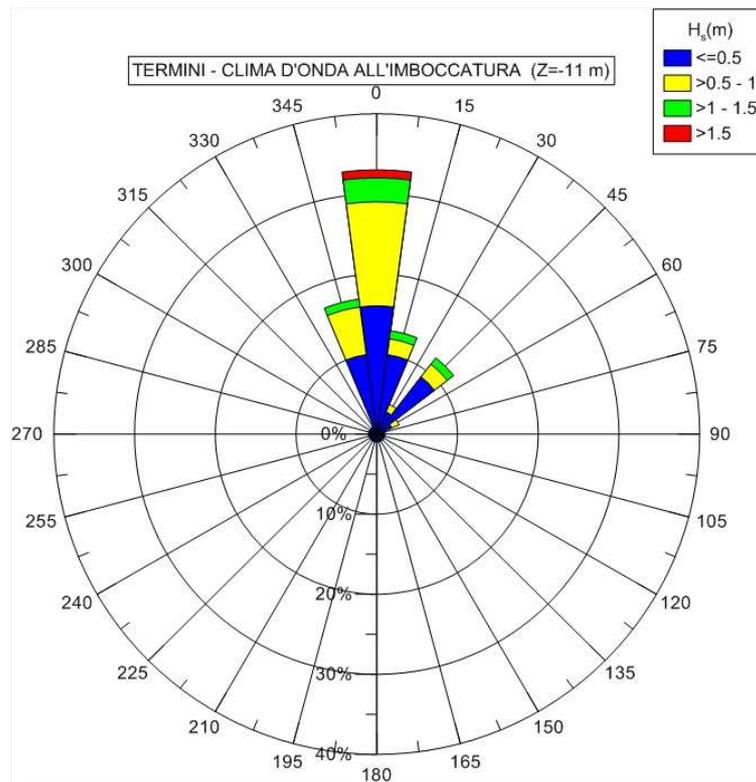


Figura 6.4 - Diagramma polare del clima d'onda locale sottocosta nel punto di controllo 2 (Z=11 m slm).

Alla luce dei dati riportati sul diagramma polare del clima d'onda è possibile confermare che l'onda che si propaga sottocosta da una direzione appartenente al settore di traversia individuato modifica la sua direzione, tendendo a disporsi ortogonalmente alla linea di riva.

In particolare, sulla batimetrica dei -25 m, i treni d'onda sottocosta tendono a disporsi secondo due "direzioni medie di propagazione":

- Maestrale (315 - 0°N), come traversia principale
- Grecale (0° - 70°N), come traversia secondaria

Invece, sulla batimetrica dei -11 m, all'imboccatura del porto, i treni d'onda sottocosta tendono a disporsi secondo due "direzioni medie di propagazione":

- Tramontana (345 - 15°N), come traversia principale
- Grecale (30 -60°N), come traversia secondaria

Si riporta, per entrambi i punti di controllo, la tabella riepilogativa della distribuzione delle altezze d'onda significativa, ottenuta in seno alla propagazione dei treni d'onda, associata alle differenti probabilità di accadimento di 12h/anno e 5gg/anno per le direzioni al largo 300°N,330°N,0°N,30°N,60°N e 90°N.

PROPAGAZIONE DEL CLIMA D'ONDA SOTTOCOSTA - P(h>H) = 5 gg/anno					
AL LARGO		Z=-25 m		Z=-11 m	
H _s (m)	D _s (°N)	H _s (m)	D _s (°N)	H _s (m)	D _s (°N)
1,80	300	1,60	315	0,86	348
1,52	330	1,48	346	1,16	2
0,72	0	0,70	0	0,65	6
0,99	30	0,95	30	0,80	30
1,00	60	0,93	54	0,86	51
0,58	90	0,35	69	0,33	67

PROPAGAZIONE DEL CLIMA D'ONDA SOTTOCOSTA - P(h>H) = 12 h/anno					
AL LARGO		Z=-25 m		Z=-11 m	
H _s (m)	D _s (°N)	H _s (m)	D _s (°N)	H _s (m)	D _s (°N)
2,86	300	2,21	319	1,35	350
3,11	330	2,77	349	2,21	6
2,24	0	2,20	11	1,92	11
2,22	30	2,12	29	1,85	29
2,00	60	1,81	53	1,53	46
1,24	90	1,04	69	0,83	61

Tabella 6.1 - Onde caratteristiche del clima d'onda associate alle frequenze di superamento di 12h/anno e 5gg/anno nei punti di controllo

A titolo esemplificativo, si riportano le immagini relative alla distribuzione delle altezze d'onda significativa sottocosta e della fascia di frangenza; queste sono state ottenute simulando le onde associate alle probabilità di superamento di 12 h/anno, 5 gg/anno per le direzioni al largo di 330°N e 60°N, ben rappresentative del clima d'onda caratteristico del tratto di litorale in esame rispettivamente per gli eventi del IV e del I quadrante.

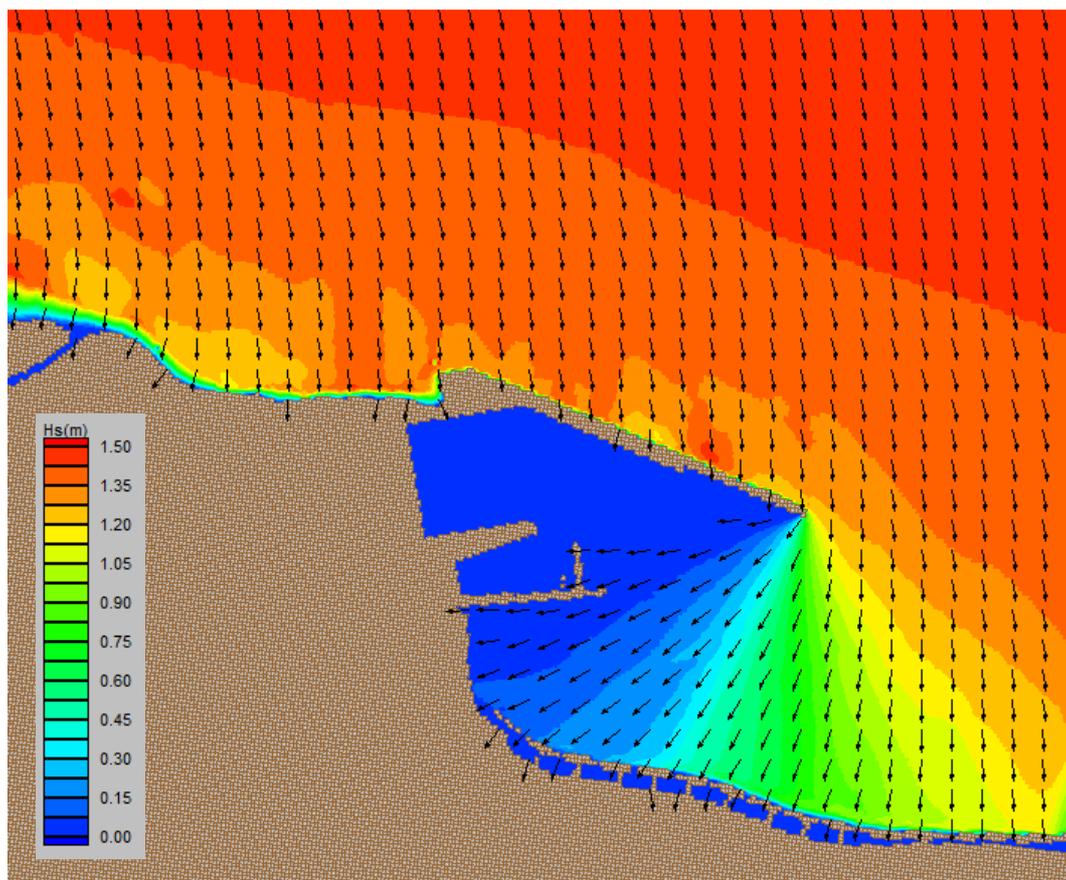


Figura 6.5 - Distribuzione delle altezze d'onda: $H_s = 1,52$ m, $D_L = 330^\circ N$, $F(h>h) = 5$ gg/anno

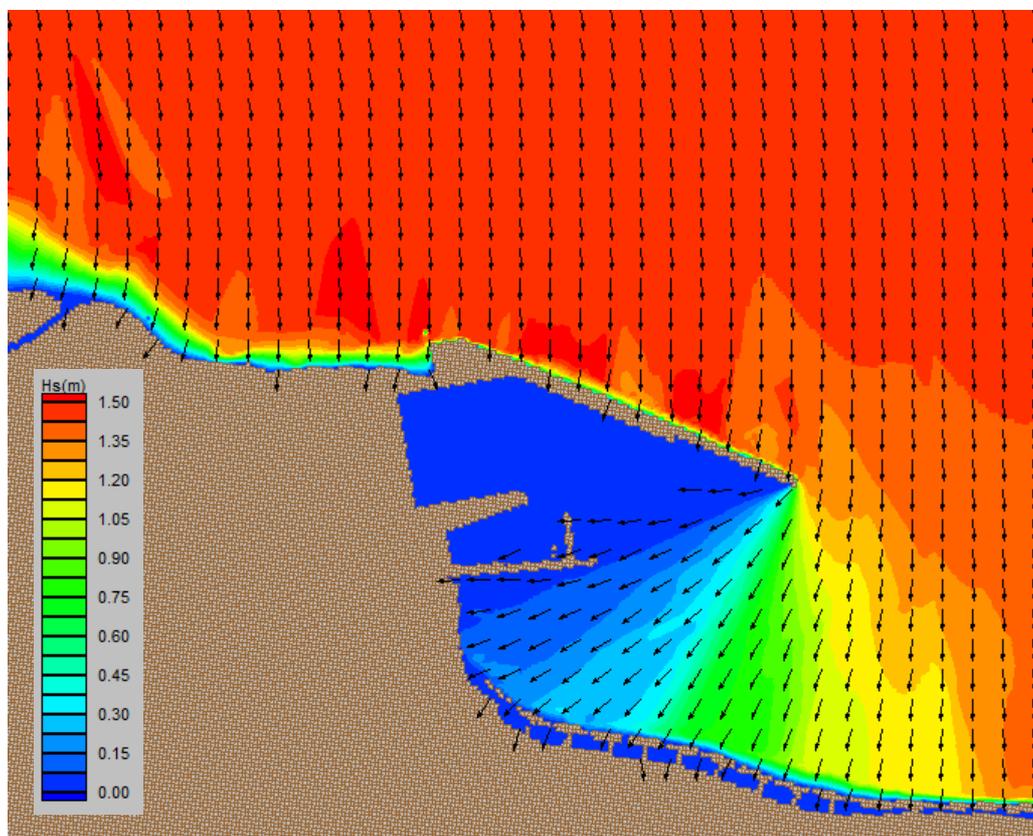


Figura 6.6 - Distribuzione delle altezze d'onda: $H_s = 3,11$ m, $D_L = 330^\circ N$, $F(h>h) = 12$ h/anno

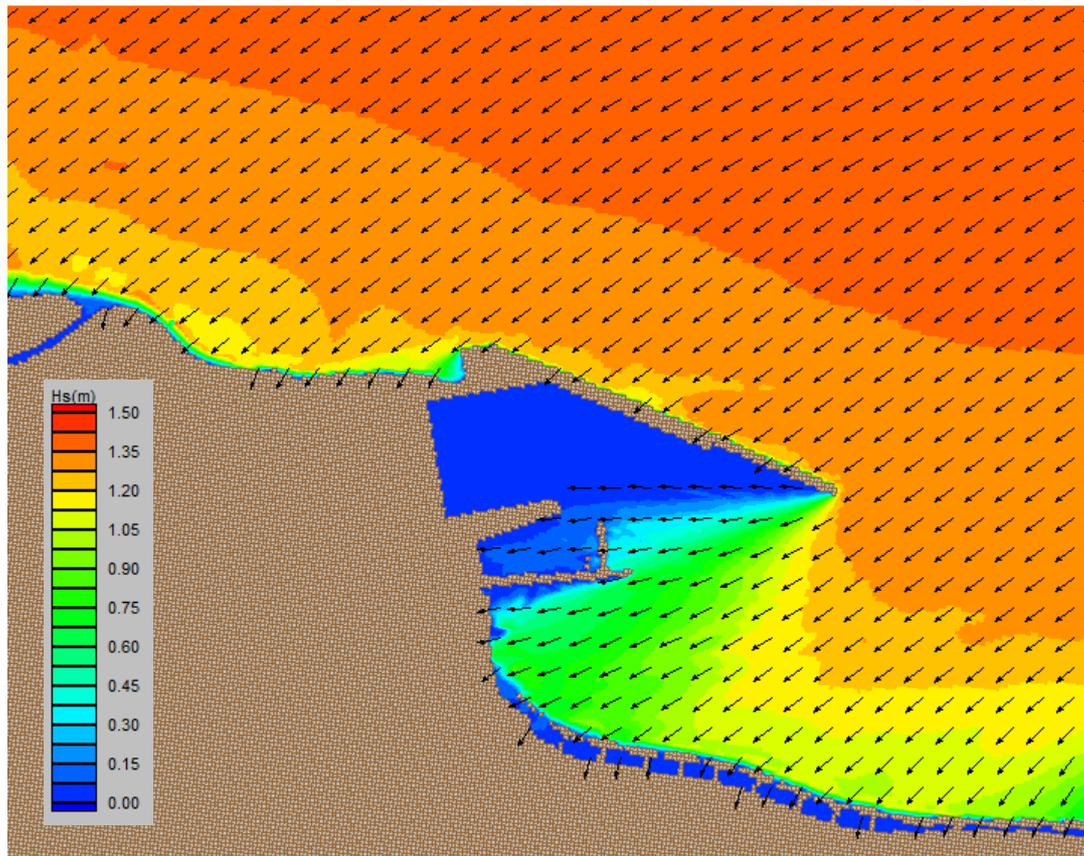


Figura 6.7 - Distribuzione delle altezze d'onda: $H_s = 1,00$ m, $D_L = 60^\circ N$, $F(h>h) = 5$ gg/anno

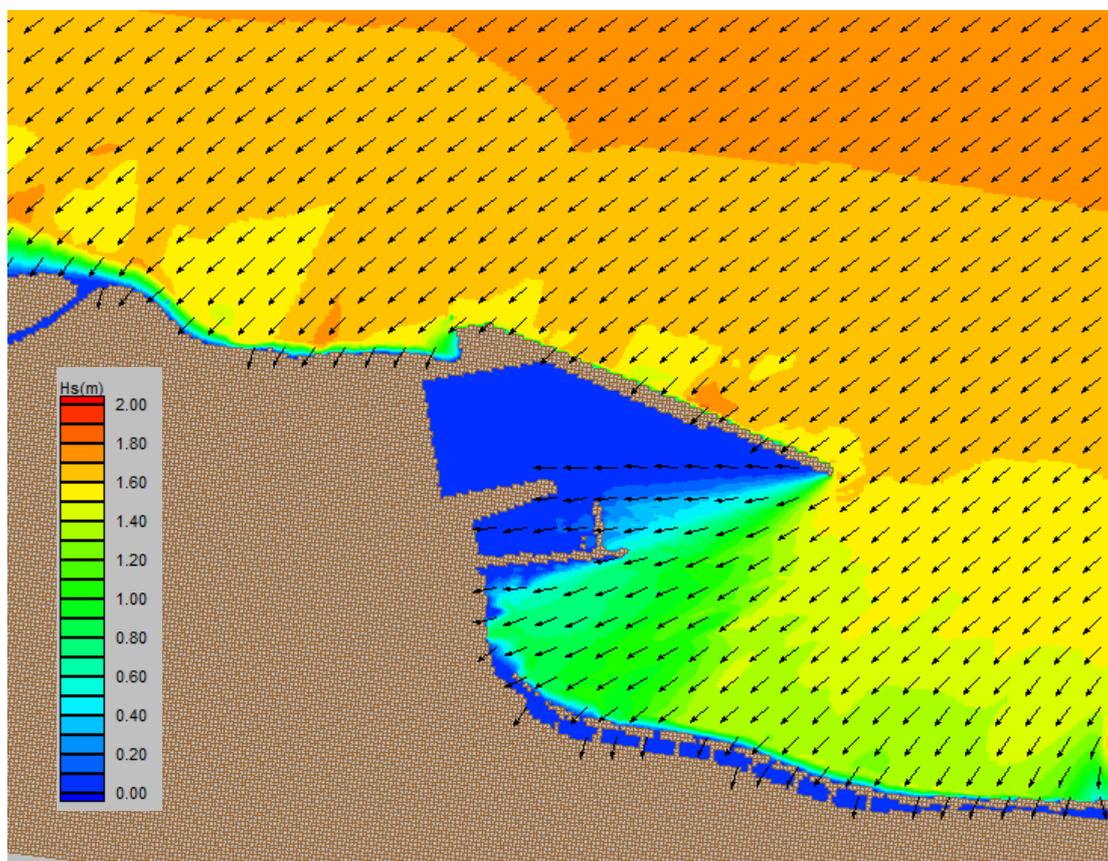


Figura 6.8 - Distribuzione delle altezze d'onda: $H_s = 2,00$ m, $D_L = 60^\circ N$, $F(h>h) = 12$ h/anno

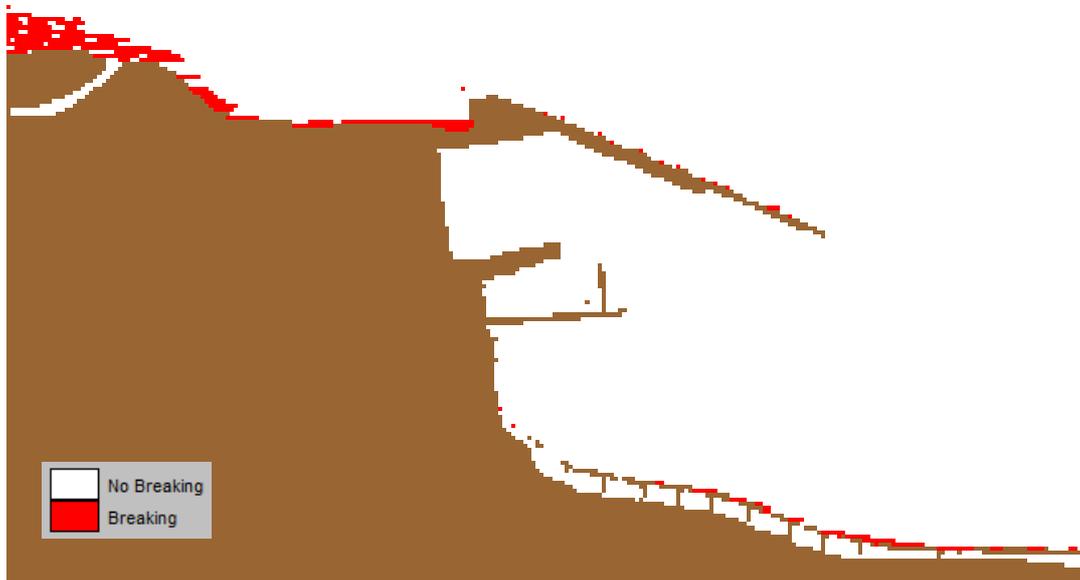


Figura 6.9 – Zona dei frangenti: $H_s = 1,52$ m, $D_L = 330^{\circ}N$, $F(h>h) = 5gg/anno$



Figura 6.10 - Zona dei frangenti: $H_s = 3,11$ m, $D_L = 330^{\circ}N$, $F(h>h) = 12h/anno$

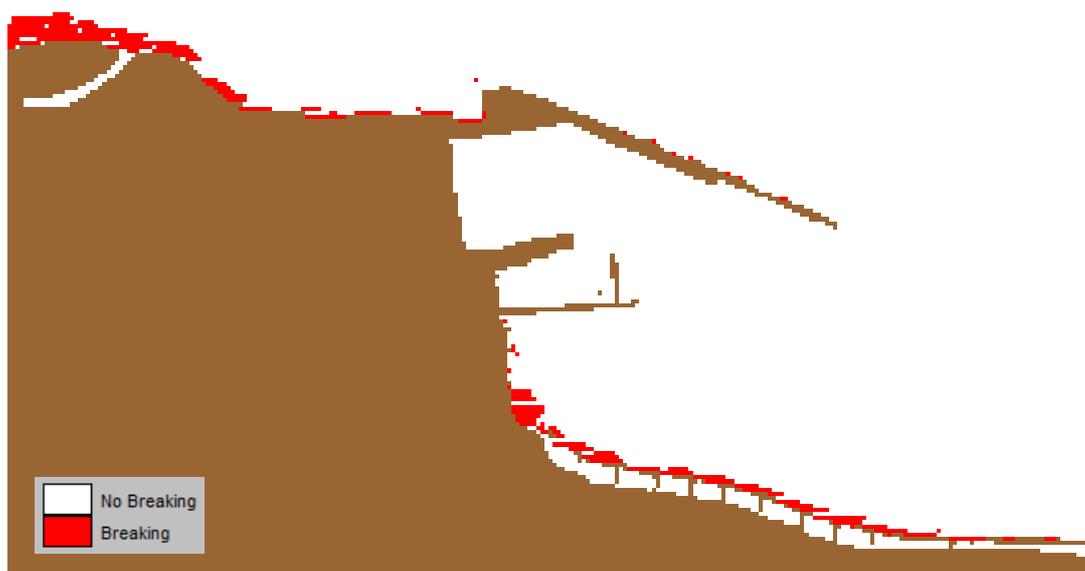


Figura 6.11 - Zona dei frangenti: $H_s = 1,00$ m, $D_L = 60$ N, $F(h>h) = 5$ gg/anno



Figura 6.12 - Zona dei frangenti: $H_s = 2,00$ m, $D_L = 60$ N, $F(h>h) = 12$ h/anno

Dalle immagini sopra riportate è possibile desumere la localizzazione della fascia di frangenza; si osserva come essa è tanto più estesa quanto minore è la frequenza di superamento dell'onda, a parità di direzione di propagazione. Inoltre, per un evento ondoso con frequenza di superamento di 12h/anno la fascia di frangenza si localizza in corrispondenza dei fondali tra i -6,00 e i 7,00 m rispetto al l.m.m. e per gli eventi ondosi con frequenza di superamento di 5gg/anno su fondali tra i -4,00 e -5,00 m rispetto al l.m.m..

6.6 PROPAGAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI DAL LARGO VERSO RIVA

Al fine di ottenere precise informazioni riguardo la trasformazione delle onde caratteristiche degli eventi estremi dal largo sottocosta sono state effettuate le relative simulazioni tramite il modello di calcolo STWAVE.

Tali simulazioni sono relative ai treni d'onda al variare del tempo di ritorno R, ovvero 1, 5, 10, 25, 50, 100 e 150 anni.

Le direzioni indagate sono 300°N, 330°N, 0°N, 30°N, 60°N e 90°N.

Il numero totale di simulazioni eseguite è 42.

È stata, quindi, determinata la distribuzione delle direzioni e delle altezze d'onda significativa nel dominio di calcolo, in funzione di assegnati tempi di ritorno.

Si riporta, di seguito, la tabella riepilogativa degli eventi estremi sottocosta al variare del tempo di ritorno R.

Gli eventi estremi a seguito dei fenomeni di propagazione dal largo verso riva tendono a disporsi con direzione di propagazione ortogonale alla linea di costa.

In particolare, sulla batimetrica dei -25 m, i treni d'onda sottocosta tendono a disporsi all'interno del settore compreso tra 325° e 66°N.

In particolare, sulla batimetrica dei -11 m, i treni d'onda sottocosta tendono a disporsi all'interno del settore compreso tra 359° e 55°N.

A titolo esemplificativo si riportano anche le immagini relative alla distribuzione delle altezze d'onda significativa sottocosta e della fascia di frangenza per il tempo di ritorno da 150 anni per le onde aventi direzione d'attacco al largo provenienti da 330°N e 60°N, ben rappresentative dei fenomeni di propagazione degli eventi estremi dal largo verso riva provenienti rispettivamente dal IV e dal I quadrante.

eventi estremi sottocosta						
R (ANNI)	AL LARGO		Z=-25		Z=-11	
	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)
1	5.40	300	3.50	328	2.57	359
5	5.81	300	3.75	325	2.73	358
10	6.22	300	3.99	327	3.01	359
25	6.67	300	4.25	327	3.26	0
50	7.14	300	4.39	326	3.45	0
100	7.41	300	4.52	328	3.63	0
150	7.73	300	4.73	329	3.95	1
R (ANNI)	AL LARGO		Z=-25		Z=-11	
	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)
1	3.93	330	3.44	340	2.63	2
5	4.99	330	4.17	342	3.31	4
10	5.68	330	5.01	342	4.11	3
25	6.99	330	5.80	343	4.80	5
50	7.68	330	6.65	345	5.38	8
100	8.37	330	7.53	346	5.42	8
150	8.77	330	8.02	346	5.55	6
R (ANNI)	AL LARGO		Z=-25		Z=-11	
	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)
1	3.60	0	3.25	2	2.78	12
5	5.00	0	4.53	3	3.98	14
10	5.60	0	4.96	4	4.38	16
25	5.86	0	5.46	3	4.44	14
50	6.57	0	5.93	4	5.33	15
100	7.29	0	6.90	4	5.51	16
150	7.70	0	7.42	4	5.70	16
R (ANNI)	AL LARGO		Z=-25		Z=-11	
	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)
1	3.20	30	3.00	29	2.55	28
5	4.40	30	4.09	27	3.67	29
10	4.90	30	4.52	27	4.13	28
25	5.17	30	4.94	26	4.55	28
50	6.20	30	5.46	27	5.09	29
100	6.24	30	5.90	27	5.60	28
150	6.55	30	6.38	27	5.82	27
R (ANNI)	AL LARGO		Z=-25		Z=-11	
	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)
1	2.50	60	2.20	52	1.86	45
5	3.70	60	2.56	49	2.16	42
10	3.74	60	2.91	49	2.48	42
25	4.04	60	3.26	48	2.81	40
50	4.97	60	3.98	45	3.49	39
100	5.31	60	4.34	44	3.82	37
150	5.65	60	4.84	47	4.28	40
R (ANNI)	AL LARGO		Z=-25		Z=-11	
	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)	Hs (m)	Ds (°N)
1	2.30	90	1.60	66	1.23	55
5	3.02	90	1.83	64	1.41	54
10	3.50	90	2.05	62	1.61	51
25	3.76	90	2.14	65	1.72	52
50	4.01	90	2.29	61	1.81	50
100	4.27	90	2.42	63	1.93	49
150	4.44	90	2.50	60	2.00	48

Tabella 6.2 - Grandezze caratteristiche dei treni d'onda sottocosta al variare della direzione di propagazione D e del tempo di ritorno R nei punto di controllo 1 e 2

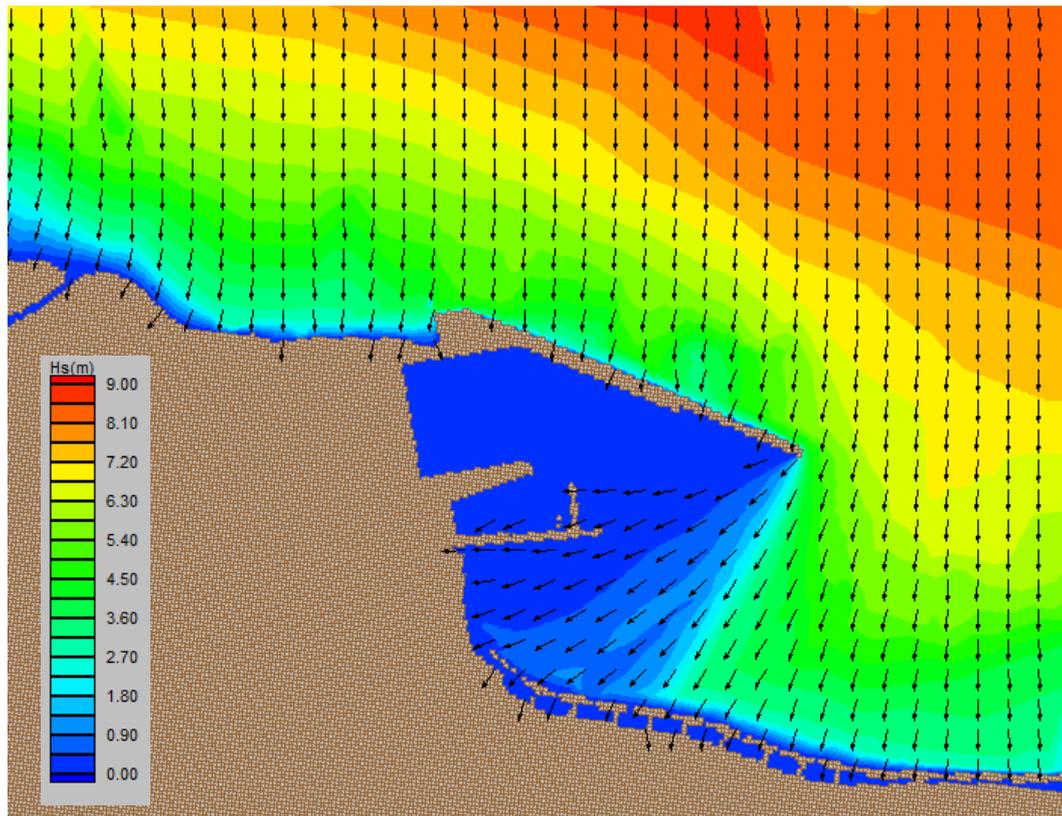


Figura 6.13 - Distribuzione delle altezze d'onda: $H_s = 8,77$ m, $D_L = 330^\circ N$, $R = 150$ anni

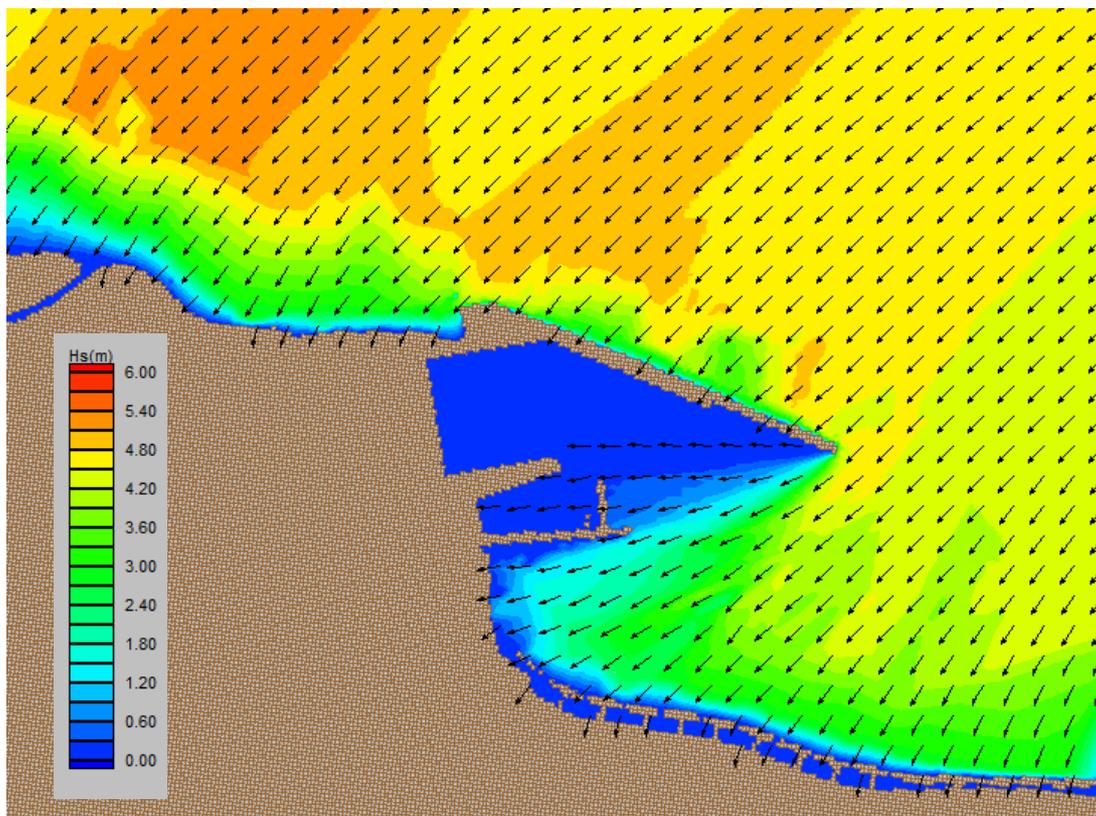


Figura 6.14 - Distribuzione delle altezze d'onda: $H_s = 5,65$ m, $D_L = 60^\circ N$, $R = 150$ anni



Figura 6.15 - Zona dei frangenti – Caratteristiche ondamiche al largo: $H_s = 8,77$ m, $D_L = 330^\circ N$, $R = 150$ anni



Figura 6.16- Zona dei frangenti - Caratteristiche ondamiche al largo: $H_s = 5,65$ m, $D_L = 60^\circ N$, $R = 150$ anni

Dalle immagini sopra riportate è possibile desumere la localizzazione della fascia di frangenza; essa si localizza su fondali prossimi a -6,00 m slm per le ondatazioni provenienti da $60^\circ N$ per $R=150$ anni e su fondali prossimi ai -8,00 m slm per le ondatazioni provenienti da $330^\circ N$ per $R=150$ anni

7. ANALISI DEGLI STATI DI MARE DEL SETTORE DI TRAVERSIA SECONDARIA DI TERMINI IMERESE

Da osservazioni in situ è noto che il sito portuale è caratterizzato da alcune criticità in termini di agitazione residua per quanto riguarda il moto ondoso generato dall'azione del vento, proveniente dal II quadrante, generalmente inteso a livello locale come "scirocco".

Infatti è noto che il porto è ben riparato dai venti settentrionali ed occidentali. Lo scirocco, invece, scendendo violentissimo da levante del monte S. Calogero, alza mare vivo all'interno di tutto il porto e può mettere a repentaglio il naviglio ormeggiato alla radice del molo di sopraflutto.

Tale fenomeno è dovuto alla generazione del moto ondoso per vento persistente su fetch tuttavia limitati.

Si è quindi ritenuto opportuno analizzare tale occorrenza meteomarina in dettaglio.

Dapprima verrà descritta la metodologia di riferimento per le analisi, per proseguire poi nella descrizione dei risultati ottenuti.

7.1 RICHIAMI TEORICI

La previsione dell'entità delle onde generate da vento sia in acque profonde che in acque basse sono state affrontate e sviluppate con metodi di calcolo sia per domini di mare aperto che per corpi idrici limitati per fetch (SPM, Vincent 1984; Smith 1991).

Il metodo di Smith valido per le previsioni relativi a corpi idrici limitati per fetch si differenzia rispetto al metodo SPM per la legge di resistenza utilizzata.

Le assunzioni alla base sono:

- le aliquote di energia legate alla presenza di altre tipologia di treni d'onda è trascurabile;
- la lunghezza massima del fetch deve essere minore di 75 miglia;
- intensità e direzione del vento costanti;
- quota di osservazione dei dati anemometrici $Z=10$ m;
- condizioni di stabilità atmosfera neutrali;
- coefficiente di resistenza $C_d=0.001$

Ai fini della previsione della crescita dell'onda occorre conoscere non l'intensità del vento osservata U_{obs} , bensì quella relativa a $Z=10$ m in condizioni di stabilità atmosferiche neutrali, U_e .

La velocità del vento modificata U_e viene calcolata secondo le teorie di Cardone (1976) e di Resio (1987), riportata per altro nel manuale di riferimento del software ACES, a cui si rimanda per maggiori chiarimenti.

In particolare si fa riferimento alla seguente espressione:

$$U_e = U^* (\ln 1000/z_0) - \Delta T$$

in cui:

- U^* è la velocità di attrito;
- K è la costante di Von Karman;
- z_0 è la lunghezza di scabrezza superficiale;
- ΔT è il gradiente di temperatura, indicatore delle condizioni di stabilità atmosferica (=0 se le condizioni sono neutrali).

Inoltre Vincent ha suggerito che U_e sia modificata in funzione degli effetti non lineari derivanti dal wind stress generato sulla superficie marina; facendo riferimento alla legge di resistenza di Garratt (1977)

$$\tau = \rho_a C_d U^2$$

in cui:

- ρ è la densità dell'aria,
- $C_d = 0.001 (0.75 + 0.067U)$

L'intensità del vento in condizioni neutrali viene linearizzata tramite la seguente espressione:

$$U_a = U_e (C_d / 0.001)^{0.5}$$

La previsione delle onde generate da vento segue 4 formulazioni diverse a seconda della tipologia di bacino.

Si hanno 4 casi:

- bacini di grandi dimensioni (bacini di mare aperto) :
 - di acque profonde
 - di acque basse
- bacini di piccole dimensioni (bacini limitati per fetch):
 - di acque profonde
 - di acque basse

Nei bacini di mare aperto la generazione delle onde è limitata dalle dimensioni della perturbazione meteorologica e la larghezza del fetch è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza. La previsione dell'onda generata da vento può essere limitata sia per durata sia per fetch e viene effettuata in funzione della lunghezza del fetch lungo la direzione del vento.

Nei corpi idrici limitati o di geometria complessa, quali laghi, fiumi, baie invece viene applicata la metodologia di SMITH (1991) dello sviluppo dell'onda limitata per fetch lungo le direzioni "OFF-Wind", in funzione della geometria del bacino.

Il sistema di riferimento adottato prevede un sistema ad assi radiali, con centro nel punto di interesse e in cui il verso positivo è quella uscente; la direzione 0 coincide con la direzione del nord geografico e l'avanzamento delle gradazioni è in senso orario.

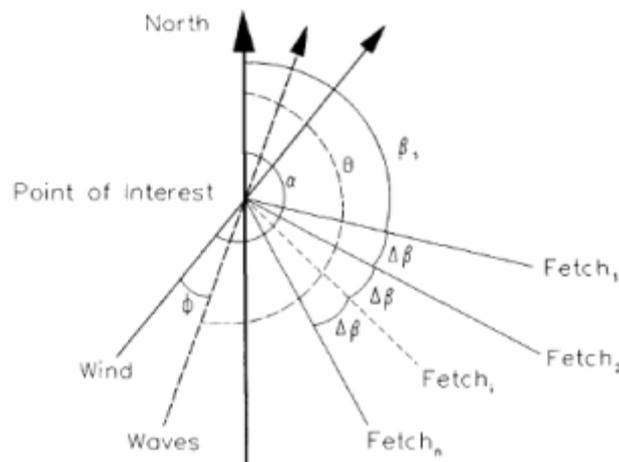


Figura 7.1 - Sistema di riferimento adottato per la previsione delle onde generate dal vento

Secondo il metodo, il periodo dell'onda, espresso in funzione delle lunghezze del fetch lungo le direzioni del vento, è quello massimo.

Secondo questo approccio la geometria del bacino viene descritta dalle lunghezze radiali del fetch dal punto di interesse alla linea di costa.

La direzione dell'onda generata dal vento si ottiene trovando il punto di massimo della funzione

$$F_{\varphi}^{0.28} (\cos \varphi)^{0.44}$$

L'angolo φ è definito come l'angolo di direzione del vento associato alla lunghezza del Fetch efficace F_{φ} ; in particolare φ_{\max} è l'angolo che massimizza l'espressione e rappresenta l'angolo tra l'onda generata e il vento generatore.

La previsione delle onde generate di vento si differenzia nei seguenti casi:

- bacini di acque profonde
- bacini in acque basse.

Per ognuno dei due casi si può fare riferimento alle condizioni di mare aperto (open water) e di bacino chiuso (restricted fetch).

La previsione delle onde generate da vento in acque profonde viene ricondotta all'analisi delle limitazioni al loro sviluppo per via della durata della perturbazione o della lunghezza del fetch.

La previsione delle onde generate dal vento in acque basse viene ricondotta al caso delle acque profonde con fetch limitati, ma modificate tenendo conto degli effetti dovuti all'attrito del fondo.

Per maggiori chiarimenti sulle formulazioni da applicare si rimanda alla letteratura tecnica.

7.2 STIMA DEGLI EVENTI ESTREMI GENERATI DAL VENTO

Per la valutazione degli eventi estremi generati da vento, per il sito del porto di Termini Imerese, si è fatto riferimento ai dati anemologici registrati dalla strumentazione R.M.N. di Palermo, gestita dall'ISPRA.

Il sito di misura è stato scelto come rappresentativo del sito di interesse in quanto :

- è prossimo geograficamente;
- l'area di generazione dei campi anemometrici è simile,
- i dati disponibili coprono un range temporale molto recente e sufficientemente ampio che va dal 1998 al 2012.

Tramite alcune operazioni di filtraggio dei dati grezzi in funzione della data di registrazione e della tipologia di parametro, è stato possibile ricostruire le serie annuali direzionali, estrarre i massimi valori annuali e le loro durate per tutti gli eventi anemologici generati da terra e cioè tra 90°N e 330°N. In particolare le operazioni di filtro per il parametro direzione di provenienza sono state eseguite considerando settori di ampiezza 30°.

ANALISI ANEMOLOGICA DIREZIONALE- EVENTI MASSIMI ANNUALI											
ANNO	1998		1999		2000		2001		2002		
D(°N)	i _w (m/s)	d _w (h)									
90	3.7	5	5.8	4	11	8	8.4	1	10.8	1	
120	8.1	4	7.2	3	12.2	4	8.7	3	13.4	1	
150	6.4	4	9.2	1	13.1	3	13.6	8	14.8	4	
180	5.1	3	8.5	1	10.5	3	9.5	4	13.3	3	
210	4.2	1	7.8	3	10.5	3	6.8	3	7.9	3	
240	5.6	2	7.9	6	10.1	3	8.3	3	9.2	4	
270	3.8	1	7.2	3	9	1	9.2	3	6.9	4	
300	5.1	2	23	8	12.2	3	9.9	3	10.8	5	

ANNO	2003		2004		2005		2006		2007	
D(°N)	i _w (m/s)	d _w (h)								
90	10.4	1	11.3	4	12.9	5	10.5	4	8.9	2
120	10.2	1	15.7	2	10.8	1	15.6	1	15	1
150	15	8	17.8	5	10.1	2	15.9	2	11.7	1
180	6.9	1	14.9	3	10.6	3	9.9	1	8.3	1
210	7.8	3	10	1	7.6	1	8.4	1	7.7	1
240	7.3	5	8.2	4	9.6	2	9.1	1	8.6	1
270	12.8	4	8.1	1	10.8	4	9.8	1	8.5	1
300	11.6	6	12.4	4	9.6	1	12.2	3	16	8

ANNO	2008		2009		2010		2011		2012	
D(°N)	i _w (m/s)	d _w (h)								
90	9.2	3	14.7	1	14.3	5	12.6	1	17.6	1
120	10.1	1	13.7	1	9.7	3	12	5	11	3
150	10.1	4	12.9	3	9.6	3	15.7	4	10.7	1
180	6.1	1	12.3	3	7	1	5.8	2	8.5	3
210	6.2	1	7.5	5	7.4	3	7.8	1	6.6	3
240	8.4	3	8.2	3	9.5	5	7.3	5	8.2	3
270	7.5	4	7.6	3	8.1	3	8.1	4	9.1	8
300	15.2	5	14.6	12	11.2	1	14.8	1	16	1

Tabella 7.1 – Analisi degli eventi estremi anemologici direzionali . Elaborazioni sul database RMN (Palermo). Eventi Massimi Annuali

Tali dati sono stati analizzati statisticamente per la valutazione dei valori estremi.

In particolare è stata applicata la distribuzione di Weibull, secondo quanto indicato

$$F(I < i) = 1 - e^{\left\{-e^{\left[\frac{-(i-B)}{A}\right]}\right\}^K}$$

avendo indicato con:

- $F(H_S < h)$: probabilità di non superamento;
- i : velocità del vento a $Z=10$ m;
- i : valore di soglia;
- A, B, K : parametri di taglia, scala e forma della distribuzione.

I parametri A, B e K sono determinati a partire dai dati della popolazione applicando una regressione di tipo lineare in modo tale da utilizzare la distribuzione, che è quella che fornisce R^2 più elevato e a parità di R^2 quella con SQM minore.

Di seguito si riportano le tabelle riepilogative dei probabili eventi anemologici direzionali per i tempi di ritorno 1,5,10,25,50,100 e 150 anni.

ANALISI ANEMOLOGICHE - VALORI ESTREMI (m/s)								
R(anni)	DIREZIONI (°N)							
	90	120	150	180	210	240	270	300
1	4.1	4.9	5.4	2.9	4.6	5.6	4.5	5.4
5	13.7	14.0	15.1	11.6	8.8	9.3	10.1	16.3
10	15.6	15.8	17.0	13.4	9.7	10.1	11.2	18.4
25	17.7	17.7	19.2	15.3	10.6	10.9	12.4	20.8
50	19.1	19.0	20.6	16.5	11.2	11.4	13.2	22.4
100	20.4	20.2	21.9	17.7	11.8	11.9	13.9	23.8
150	21.1	20.9	22.6	18.3	12.1	12.2	14.3	24.6

Tabella 7.2 – Analisi degli eventi estremi anemologici direzionali . Elaborazioni sul database RMN (Palermo)

Come è noto, l'affidabilità delle previsioni dipende dall'ampiezza temporale di dati da elaborare: in particolare l'affidabilità delle previsioni è ottimale per tempi di ritorno minori o uguali a 3 volte l'ampiezza temporale del dataset disponibile; ciò implica che le previsioni con i tempi di ritorno più elevati (100 e 150 anni) vanno considerate con cautela.

Di seguito si riportano la tabella relativa alle distanze del fetch geografico per il sito di Termini Imerese.

L'origine del sistema di riferimento radiale è il punto di controllo sulla batimetrica dei - 11 m s.l.m. in prossimità della attuale testata del molo di sopraflutto. La discretizzazione del dominio è stata effettuata in senso orario a partire dal nord geografico.

TERMINI IMERESE Distanze di Mare Libero						
D(°N)	0	30	60	90	120	150
F (km)	357.7	258.7	241.2	9.2	1.6	0.81
D(°N)	180	210	240	270	300	330
F (km)	0.64	0.73	1.15	1.8	17	90.9

Tabella 7.3 – Distanze di mare libero in prossimità del Porto di Termini Imerese (Z= - 11 mslm).

Date le caratteristiche del paraggio in esame e osservate le distanze di mare libero, si è investigato l'intero settore compreso tra le direzioni 90°N e 330°N al fine di valutare i fenomeni di generazione del moto ondoso del vento su specchi acquei limitati per fetch.

Per ciascuna delle simulazioni effettuate sono stati indicati:

- intensità, direzione e durata del vento a 10 m slm;
- latitudine;
- profondità dei fondali nel punto di determinazione;
- lunghezze del fetch all'interno.

In particolare per ogni intensità di vento indagata, sono stati valutati più stati del mari al variare della durata dell'evento anemometrico; con il fine di individuare, ove possibile, la durata caratteristica "dello stato di mare completamente sviluppato", cioè quella durata caratteristica dell'evento meteorologico oltre la quale le caratteristiche dell'onda generata da vento rimangono costanti. Sono state simulate durate degli eventi pari a 1,3,6,9,12 e 24 ore. Di seguito si riporta la tabella riassuntiva relativa alla previsione delle onde generate da vento nel punto di interesse per i vari tempi di ritorno.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =90°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	4,1	0,18	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	67
5	13,7	0,66	0,73	0,77	0,80	0,82	0,88	
10	15,6	0,76	0,83	0,89	0,92	0,95	1,01	
25	17,7	0,87	0,95	1,01	1,05	1,08	1,16	
50	19,1	0,94	1,03	1,09	1,14	1,17	1,25	
100	20,4	1,00	1,10	1,17	1,22	1,25	1,34	
150	21,1	1,04	1,15	1,21	1,26	1,29	1,39	

Tabella 7.4 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=90°N.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =120°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	4,9	0,22	0,24	0,26	0,27	0,28	0,28	67
5	14,0	0,68	0,74	0,79	0,82	0,84	0,90	
10	15,8	0,77	0,84	0,90	0,93	0,96	1,03	
25	17,7	0,87	0,95	1,01	1,05	1,08	1,16	
50	19,0	0,93	1,02	1,09	1,13	1,16	1,24	
100	20,2	0,99	1,09	1,16	1,20	1,24	1,33	
150	20,9	1,03	1,13	1,20	1,25	1,28	1,37	

Tabella 7.5 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=120°N.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =150°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	5,4	0,24	0,26	0,28	0,30	0,31	0,32	67
5	15,1	0,72	0,79	0,84	0,87	0,89	0,96	
10	17,0	0,82	0,90	0,95	0,99	1,02	1,09	
25	19,2	0,93	1,05	1,15	1,21	1,23	1,32	
50	20,6	1,03	1,17	1,24	1,29	1,33	1,43	
100	21,9	1,12	1,24	1,33	1,38	1,42	1,53	
150	22,6	1,17	1,28	1,37	1,43	1,57	1,59	

Tabella 7.6 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=150°N.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =180°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	2,9	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	112
5	11,6	0,40	0,43	0,46	0,48	0,49	0,53	
10	13,4	0,46	0,51	0,54	0,56	0,58	0,62	
25	15,3	0,53	0,58	0,62	0,65	0,66	0,71	
50	16,5	0,58	0,63	0,67	0,70	0,72	0,77	
100	17,7	0,62	0,68	0,73	0,75	0,78	0,83	
150	18,3	0,64	0,71	0,75	0,78	0,80	0,86	

Tabella 7.7 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=180°N.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =210°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	4,6	0,20	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	293
5	8,8	0,40	0,44	0,47	0,48	0,50	0,53	
10	9,7	0,44	0,49	0,52	0,54	0,55	0,59	
25	10,6	0,49	0,53	0,57	0,59	0,61	0,65	
50	11,2	0,52	0,57	0,60	0,62	0,64	0,69	
100	11,8	0,55	0,60	0,64	0,66	0,68	0,73	
150	12,1	0,56	0,61	0,65	0,68	0,70	0,75	

Tabella 7.8 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=210°N.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =240°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	5,6	0,25	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	293
5	9,3	0,42	0,46	0,49	0,51	0,53	0,56	
10	10,1	0,46	0,51	0,54	0,56	0,58	0,62	
25	10,9	0,51	0,55	0,58	0,61	0,62	0,67	
50	11,4	0,53	0,58	0,61	0,64	0,65	0,70	
100	11,9	0,55	0,60	0,64	0,67	0,68	0,73	
150	12,2	0,67	0,73	0,78	0,81	0,83	0,89	

Tabella 7.9 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=240°N.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =270°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	4,5	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	293
5	10,1	0,37	0,42	0,46	0,48	0,50	0,55	
10	11,2	0,43	0,49	0,53	0,56	0,58	0,63	
25	12,4	0,50	0,56	0,61	0,65	0,67	0,74	
50	13,2	0,55	0,62	0,67	0,71	0,73	0,81	
100	13,9	0,59	0,66	0,72	0,76	0,79	0,87	
150	14,3	0,61	0,69	0,75	0,79	0,82	0,90	

Tabella 7.10 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=270°N.

ONDE DI TRAVERSIA SECONDARIA								
D _{wind} =300°N								
R(anni)	i _w (m/s)	H _s (m)						D _{wave} (°N)
		d _w =1h	d _w =3h	d _w =6h	d _w =9h	d _w =12h	d _w =24h	
1	5,4	0,15	0,17	0,19	0,20	0,20	0,20	293
5	16,3	0,74	0,83	0,91	0,96	0,99	1,09	
10	18,4	0,87	0,99	1,08	1,14	1,18	1,31	
25	20,8	1,04	1,18	1,29	1,36	1,41	1,56	
50	22,4	1,16	1,32	1,44	1,51	1,57	1,73	
100	23,8	1,26	1,44	1,57	1,65	1,72	1,89	
150	24,6	1,31	1,51	1,64	1,72	1,81	1,99	

Tabella 7.11 – Stima degli eventi estremi generati dal vento sull'imboccatura del porto (Z=- -11 m s.l.m.). D_{wind}=300°N.

I fenomeni anemologici provenienti dal II quadrante generano stati del mare con direzione media di propagazione compresa tra 67°N e 112°N . Tra gli eventi ondosi generati da vento e aventi direzione media di propagazione tra 67°N e 112°N , quelli più gravosi, al variare del tempo di ritorno dell'evento R, sono quelli indotti dai fenomeni anemologici con $D_{\text{wind}}=150^{\circ}\text{N}$. Si osserva che il valore estremo per il tempo di ritorno pari a 150 anni delle altezze d'onda generate dall'azione dei venti spiranti dal secondo quadrante, con una durata dell'evento anemologico pari a 24 ore assume valori prossimi a 1,59 m.

8. ANALISI DEI LIVELLI IDRICI

La variazione dei livelli idrici marini influenza la meccanica delle onde che si propagano, determinando condizioni più o meno gravose rispetto a quelle riferite al livello medio del mare.

Considerazioni superficiali sui livelli idrici effettivamente verificabili possono comportare una errata stima di onde, e quindi delle azioni indotte da quest'ultime, con gravi conseguenze sul calcolo strutturale delle opere, per esempio, come è avvenuto in una cospicua casistica.

I livelli idrici effettivi in un sito sono condizionati essenzialmente da:

- *marea*;
- *storm surge*, ovvero dalla combinazione di più effetti meteorologici connessi alla tempesta, tra cui l'elevazione da *gradiente di pressione*, dal *wind stress* e da *wave setup*.

La combinazione degli effetti delle suddette componenti è una caratteristica peculiare dei luoghi, differente tempesta per tempesta; pertanto, ai fini dello studio, l'unica previsione possibile prende le mosse da considerazioni di natura statistica.

Considerando che per ogni tempesta vi sarà una condizione di variazione del livello idrico, dettata dai fenomeni di storm surge e marea insistenti in quel dato istante, occorrerà definire, ai fini dei calcoli ingegneristici, la condizione maggiormente significativa per la tipologia di analisi che si desidera condurre.

Per il sito in esame esistono database meteomarini (pressione, altezze d'onda, velocità del vento) utilizzabili per la stima dei livelli idrici, ma, purtroppo, non misure dirette.

Assume, inoltre, rilevanza sempre crescente la consapevolezza degli effetti del cambiamento climatico, tematica sulla quale vi è ammissione concorde circa le influenze dirette sulle zone costiere.

8.1 LIVELLI IDRICI OSSERVATI

La stima dei livelli idrici è, in genere, un processo complesso, in quanto il reperimento di dati locali per periodi di tempo sufficientemente lunghi è difficoltoso.

Di norma ci si affida, quindi, a:

- misure di livello idrico in siti prossimi a quello in esame;
- analisi numeriche mediante modelli di calcolo che descrivano, con le dovute semplificazioni, la fisica del fenomeno;
- osservazioni in situ, spesso determinanti ai fini della corretta individuazione delle escursioni massime e minime.

In questo studio si farà riferimento al sito strumentato della rete R.M.N, il cui ente gestore è l'ISPRA, più prossimo al sito in esame che è quello localizzato a Palermo; i dati disponibili coprono il range temporale che va dal 1992 al 2012.

È opportuno evidenziare che i dati sull'escursione dei livelli idrici, come letti da un mareografo, sono strettamente dipendenti dalle condizioni orografiche del sito ove il mareografo è installato (verosimilmente all'interno di porti) ed includono sia la componente di variazione dei livelli idrici denominata *storm surge* oltre che il sovrizzo indotto dalla marea astronomica.

Purtroppo la serie storica è contrassegnata da un carattere di discontinuità, per problemi legati al funzionamento della strumentazione mareografica.

Dai dati rilevati, si osserva che il range di variazione del livello idrico per il sito di riferimento, nel periodo di osservazione, è variabile tra -0,44 m e +0,66 m.

L'intervallo di variazione dei livelli idrici massimi è compreso tra 12 e 66 cm, con valore medio pari a 47 cm.

L'intervallo di variazione dei livelli idrici minimi è compreso tra -7 e -44 cm, con valore medio pari a -28 cm.

Si riporta di seguito il grafico delle oscillazioni di livello idrico derivanti dai rilievi effettuati per l'anno 2011, per facilità di rappresentazione.

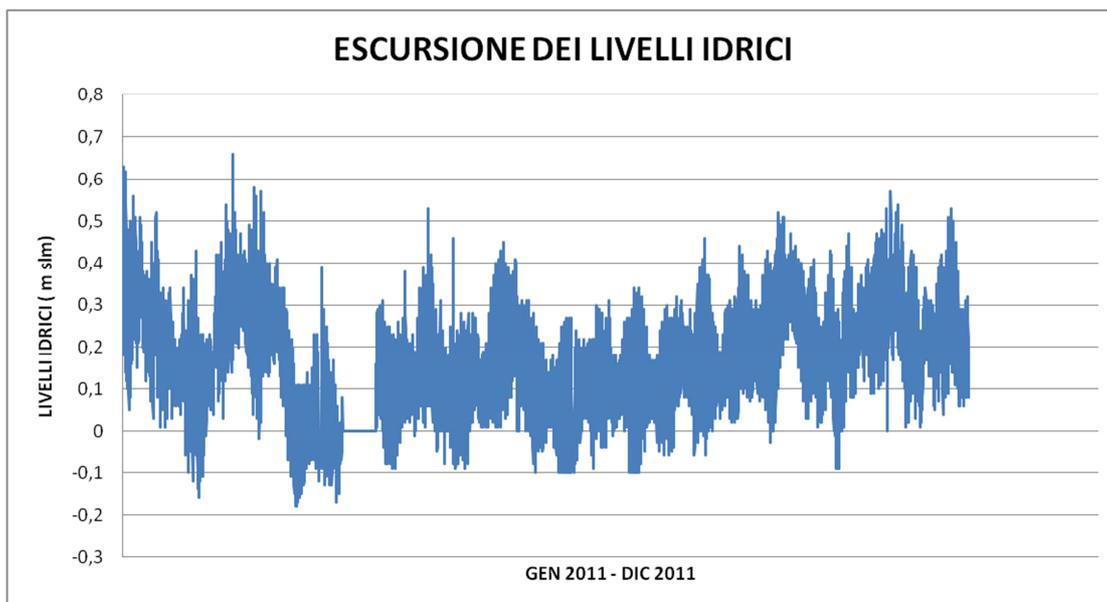


Figura 8.1 - Rilevamenti del mareografo di Palermo per l'anno 2011

A titolo di confronto è stata inoltre effettuata l'estrazione dei livelli idrici a partire dai 20 valori estremi annuali registrati.

ANALISI DEI LIVELLI IDRICI - REGISTRAZIONI ESTREME ANNUALI - MAREOGRAFO RMN DI PALERMO																				
Anni	1992	1993	1994	1995	1996	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
H _{max} (cm)	37	23	29	39	60	37	12	54	55	56	45	54	48	45	43	55	63	66	58	57
H _{min} (cm)	-40	-42	-44	-22	-16	-18	-7	-36	-26	-30	-36	-34	-38	-29	-30	-34	-26	-18	-10	-10

Tabella 8.1 – Analisi statistica dei livelli idrici registrati presso la stazione RMN di Palermo. Valori estremi annuali

8.2 LIVELLI IDRICI INDOTTI DALLA MAREA ASTRONOMICA

Di seguito sono state effettuate alcune considerazioni sull'aliquota dell'escursione dei livelli idrici dovuta alla marea astronomica.

Il fenomeno periodico della marea astronomica, come è noto, è caratterizzato dalla sovrapposizione di più componenti, ciascuna delle quali caratterizzata da un periodo e da un'ampiezza relativa.

L'andamento della marea lungo i litorali siciliani è di tipo semidiurno.

L'ISPRA, nel 2011, ha eseguito uno studio di tali fattori per ognuno dei siti strumentati della rete mareografica nazionale, fornendo i valori relativi alle costanti di ampiezza relativa.

Per il presente studio si è fatto riferimento ai dati forniti per la stazione di Palermo, in quanto località più prossima al sito di interesse. Sono state considerate le seguenti componenti principali, alle quali competono gli effetti maggiori in termini di escursione dei livelli idrici:

COMPONENTE	SIMBOLO	PERIODO (h)
LUNARE DIURNA	O1	25,82
SOLARE DIURNA	P1	24,07
LUNI-SOLARE DIURNA	K1	23,93
LUNARE ELLITTICA	N2	12,66
LUNARE PRINCIPALE	M2	12,42
SOLARE PRINCIPALE	S2	12,00
LUNI-SOLARE SEMIDIURNA	K2	11,97

Tabella 8.2 - Componenti principali di marea

Di seguito si riportano i valori stimati di *ampiezza relativa* stimati per la località di Palermo.

COMPONENTE	SIMBOLO	AMP. REL. (cm)
LUNARE DIURNA	O1	1,23
SOLARE DIURNA	P1	0,83
LUNI-SOLARE DIURNA	K1	2,89
LUNARE ELLITTICA	N2	2,32
LUNARE PRINCIPALE	M2	1,43
SOLARE PRINCIPALE	S2	4,28
LUNI-SOLARE SEMIDIURNA	K2	1,13

Tabella 8.3 - Valori dei coefficienti di ampiezza relativa per il sito di Palermo

Cumulando i valori sopra riportati si osserva che l'ampiezza massima di marea astronomica è pari a circa 15 cm; ciò implica che sia verosimile valutare l'escursione massima dei livelli idrici indotta dal fenomeno della marea astronomica pari a circa 30 cm, con andamento semidiurno.

8.3 DETERMINAZIONE DELLO STORM SURGE

Di seguito sono descritte le considerazioni che consentono la stima dei livelli idrici per storm surge.

Dapprima saranno descritte le valutazioni delle aliquote indotte dall'azione del vento, dai gradienti barometrici e dal moto ondoso in frangenza.

Infine saranno state eseguite alcune considerazioni finali sullo storm surge.

8.3.1 ELEVAZIONE PER VENTO

L'azione del vento radente sugli specchi idrici comporta una leggera inclinazione degli stessi, nella medesima direzione della forza agente; l'aliquota di innalzamento del livello idrico derivata dall'azione del vento è denominata *wind setup*.

Seguendo le linee guida presenti nel manuale *CECW-EH EM 1110-2-1414* del *U.S. Corps of Engineers*, per bacini chiusi, di semplice forma e dimensioni comparabili, è possibile stimare l'innalzamento del livello idrico rispetto al l.m.m. come segue:

$$S_w = \frac{U^2 F}{(404,41 d)}$$

avendo indicato con:

- S_W : wind setup, innalzamento del livello rispetto al l. m. m., [m].;
- U : velocità del vento (valore massimo registrato alla quota di 10 metri), [m/s];
- F : fetch efficace, [km];
- Z : profondità media dei fondali sul fetch, [m].

Sono riportati, nella tabella successiva, per le direzioni in esame, i valori di fetch efficace.

D (°N)	F (km)
300	250
330	340
0	327
30	251
60	170
90	120

Tabella 8.2 - Fetch efficaci per la stima del wind setup

Per quanto riguarda la stima delle velocità del vento, si è fatto alla scala *Beaufort*, che permette di correlare range di velocità di vento probabili per gli stati del vento in funzione di un range di altezze d'onda probabili per alcuni stati di mare.

SCALA BEAUFORT DEL VENTO						
Grado	Nome del vento	Nodi	km/h	Effetti		Altezza onde (metri)
				Terra	Mare	
0	Calma	<1	<1	Il fumo si alza verticalmente	Mare piatto	-
1	Bava di vento	1-3	1-5	Il vento piega il fumo	Piccole increspature senza creste bianche di spuma.	0,1
2	Brezza leggera	4-6	6-11	Si avverte sul viso	Increspature corte ma più evidenti con creste che non si rompono.	0,2 - 0,3
3	Brezza tesa	7-10	12-19	Agita le foglie	Onde molto piccole; le creste cominciano a rompersi.	0,6 - 1
4	Moderato	11-16	20-28	Solleva carte	Onde piccole che cominciano ad allungarsi; spuma più frequente e più evidente.	1 - 1,5
5	Teso	17-21	29-38	Agita i rami	Onde moderate che assumono una forma più allungata; possibilità di qualche spruzzo.	2 - 2,5
6	Fresco	22-27	39-49	Agita grossi rami	Onde più grandi; le creste di spuma bianca sono estese.	3 - 4
7	Forte	28-33	50-61	Distacca il cammino	Il mare si gonfia; spuma bianca al rompersi delle onde	4 - 5,5
8	Burrasca	34-40	62-74	Agita grossi alberi	Onde di media altezza e maggiore lunghezza; le creste iniziano a rompersi in spruzzi.	5,5 - 7,5
9	Burrasca forte	41-47	75-88	Asporta camini e tegole	Onde alte; si formano compatte strisce di schiuma lungo la direzione del vento.	7 - 10
10	Tempesta	48-55	89-102	Sradica gli alberi	Onde alte con creste e mare biancastro; le onde precipitano in modo intenso; la visibilità è ridotta	9 - 12,5
11	Fortunale	56-63	103-117	Gravi devastazioni	Onde eccezionalmente alte (le navi di media stazza scompaiono per alcuni istanti); la visibilità è ridotta	11,5 - 16
12	Uragano	64 e più	118 e oltre	Gravissime catastrofi	L'aria è piena di schiuma; il mare è completamente bianco; la visibilità è fortemente ridotta	14 e oltre

Tabella 8.3 – Scala Beaufort per correlazione tra velocità del vento e stato del mare.

R (ANNI)	DIREZIONI (°N)											
	300		330		0		30		60		90	
	H _s (m)	V(m/s)										
1	5,40	14,00	3,93	12,00	3,60	11,50	3,20	10,47	2,50	10,30	2,30	10,20
5	5,81	17,20	4,99	13,20	5,00	14,00	4,40	12,20	3,70	11,00	3,02	10,60
10	6,22	18,50	5,68	16,20	5,60	16,00	4,90	13,60	3,74	11,20	3,50	11,20
25	6,67	19,00	6,99	20,00	5,86	18,30	5,17	16,10	4,04	13,50	3,76	12,00
50	7,14	20,50	7,68	21,00	6,57	19,50	6,20	18,30	4,97	13,80	4,01	13,80
100	7,41	21,00	8,37	22,00	7,29	20,50	6,24	19,00	5,31	14,20	4,27	13,90
150	7,73	21,20	8,77	23,00	7,70	21,00	6,55	19,50	5,65	15,90	4,44	13,95

Tabella 8.4 – Correlazione tra stati del mare e stati del vento tramite la scala Beaufort.

Infine, è stato possibile effettuare un'analisi dell'aliquota dell'elevazione del livello marino dovuto al vento S_w , al variare del periodo di ritorno R .

Per l'applicazione in esame si è fatto riferimento ad una profondità media sul fetch efficace pari a 300 m s.l.m..

Di seguito si riportano le tabelle riepilogative dei dati ottenuti.

TERMINI IMERESE - WIND SETUP (m)						
DIREZIONI (°N)						
R (ANNI)	300	330	0	30	60	90
1	0.40	0.40	0.36	0.30	0.22	0.21
5	0.61	0.72	0.53	0.31	0.25	0.23
10	0.71	0.82	0.69	0.50	0.26	0.26
25	0.74	0.96	0.90	0.70	0.38	0.30
50	0.89	1.07	1.03	0.90	0.39	0.39
100	0.93	1.21	1.13	0.97	0.42	0.40
150	1.00	1.24	1.17	0.78	0.52	0.42

Tabella 8.5 – Innalzamento del livello idrico dovuto al wind setup al variare del periodo di ritorno R

Come si può osservare nei tabulati appena individuati i valori maggiori sono quelli che caratterizzano la direzione di provenienza dal IV quadrante.

8.3.2 LIVELLI IDRICI INDOTTI DAI GRADIENTI DI PRESSIONE ATMOSFERICA

I gradienti di pressione che si formano tra il centro della tempesta e le zone periferiche rappresentano una delle cause che provocano la variazione dei livelli idrici.

L'elevazione prodotta dalle variazioni di pressione atmosferica causate da una tempesta sono state oggetto di rilevamenti sul campo da parte del CERC.

Valori di innalzamento del livello del mare per pressione atmosferica di 1013 mbars sono desumibili dall'applicazione della metodologia proposta nel manuale *CECW-EH EM 1110-2-1414*.

I dati di pressione disponibili provengono dai rilievi effettuati dalla stazione di misura più prossima, la stazione R.M.N. di Palermo e si riferiscono al periodo 1998-2012; tali misure barometriche sono purtroppo discontinue ed evidenziano livelli di pressione che oscillano tra 1.041e 983 mbars.

Nella seguente figura si riporta il diagramma temporale dei dati rilevati nel 2009 a titolo esemplificativo.

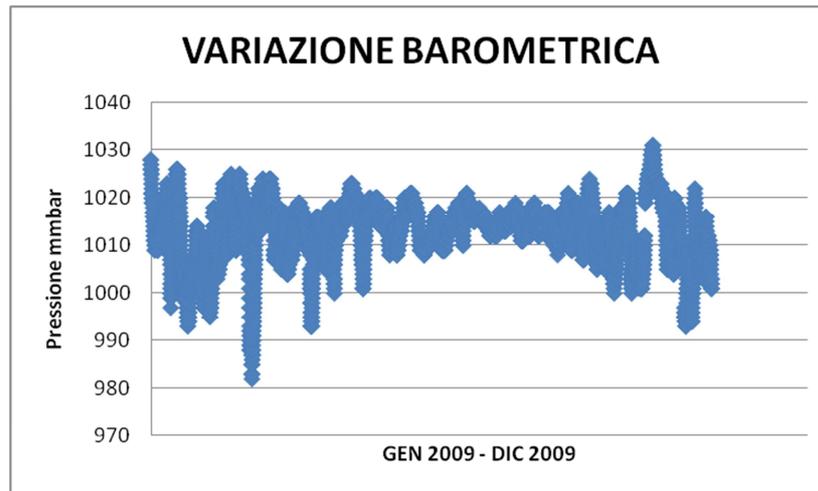


Figura 8.4 - Misure barometriche rilevate nel sito R.M.N. di Palermo (2009)

Nella tabella successiva si riporta lo schema di riferimento per l'escursione dei livelli idrici causata dalle variazioni barometriche; da esso si evince che generalmente, per bacini chiusi, si osserva una escursione di 10 cm per una variazione di pressione di 10 mbars.

Storm Central mb	Pressure in. of Hg	Water Level Rise* ft
900	26.58	3.78
910	26.87	3.45
920	27.17	3.11
930	27.46	2.78
940	27.76	2.44
950	28.05	2.11
960	28.35	1.77
970	28.64	1.44
980	28.94	1.10
990	29.23	0.77
1000	29.53	0.43

*Relative to water level for atmospheric pressure of 1013 millibars = 29.91 inches of Hg.

Tabella 8.6 - Escursioni del livello idrico causate da gradienti di pressione(rif. documento CECW-EH EM 1110-2-1414 d- US Corps of Engineers

Effettuando le dovute conversioni tra i sistemi di misura, si osserva che l'oscillazione del livello idrico per effetto dei gradienti di pressione S_p può variare tra -37 cm e +40 cm rispetto al l.m.m.

In questo studio si ritiene opportuno considerare questi risultati valevoli anche per il sito di Termini Imerese.

È stato quindi effettuata, ai fini dello storm surge, l'analisi statistica dei valori di sovrizzo indotto dalla variazione barometrica a partire dai valori estremi annuali dei dati di pressione disponibili e registrati presso il sito strumentato di Palermo.

L'adattabilità della serie storica alla distribuzione statistica, al variare dei parametri caratteristici, è stata verificata valutando i valori dell'indice correlazione R^2 , e dello scarto quadratico medio, SQM ; in particolare, sono stati applicati i seguenti criteri:

- indice di correlazione più elevato;
- a parità di indice di correlazione, minor valore dello scarto quadratico medio.

R(anni)	S _p (m)
1	0.16
5	0.31
10	0.34
25	0.37
50	0.40
100	0.42
150	0.43

Tabella 8.7 – Stima dei valori estremi massimi del sovrizzo idrico dovuto alle variazioni barometriche, al variare del tempo di ritorno

8.3.3 ELEVAZIONE PER ONDE (WAVE SETUP)

Per determinare l'aliquota di *storm surge* definita *wave setup*, legata al fenomeno del frangimento dell'onda, è possibile utilizzare l'espressione riportata nel manuale *CECW-EH EM 1110-2-1414*:

$$S_{wave} = 0,15 d_b - \frac{g^{1/2} (H'_0)^2 T_s}{64 \pi d_b^{3/2}} \cos \alpha$$

dove:

- d_b : profondità di frangimento;
- g : accelerazione di gravità;
- H'_0 : altezza d'onda al largo non rifratta;
- T_s : periodo dell'onda;
- α : angolo di incidenza della cresta d'onda.

I parametri d_b e H'_0 derivano dalla teoria sul frangimento di *Weggel* (1972) e *Komar e Gaughan* (1973).

L'analisi dei dati è stata condotta in maniera tale da stimare le aliquote di *storm surge* dovute al fenomeno del frangimento, S_{wave} , associandole al periodo di ritorno R ; il parametro H'_0 , dal quale deriva la profondità di frangimento d_b , viene fatto corrispondere al valore di $H_S(R)$ che deriva dall'analisi statistica degli eventi estremi.

A conferma dei risultati, si è utilizzata la teoria di *Goda*, (1985) secondo la quale il *wave setup* è pari al massimo a $0,15 H'_0$, limite di soglia indicativo e pienamente rispettato dai risultati.

Di seguito si riportano il prospetto riepilogativo dei valori stimati della profondità di frangimento d_b , in funzione di H_S , e dei valori di *wave setup* S_{wave} .

TERMINI IMERESE						
SOVRALZO PER FRANGIMENTO S_{wave} [m]						
R [anni]	direzioni (°N)					
	300	330	0	30	60	90
1	0.71	0.66	0.63	0.47	0.48	0.44
5	0.97	0.85	0.80	0.69	0.60	0.52
10	1.00	0.92	0.86	0.77	0.67	0.61
25	1.04	1.00	0.95	0.88	0.72	0.66
50	1.13	1.06	1.07	0.95	0.76	0.71
100	1.15	1.13	1.08	1.03	0.81	0.75
150	1.19	1.16	1.12	1.07	0.84	0.77

Tabella 8.8 – Sovralzo per frangimento S_{wave} al variare del tempo di ritorno T e della direzione D

Anche in questo caso, i valori maggiori sono quelli che caratterizzano la direzione di provenienza dal IV quadrante.

8.3.4 OSSERVAZIONI IN MERITO ALLO STORM SURGE

Al fine della stima dei fenomeni di variazione del livello idrico marino indotto dallo storm surge, occorre definire le modalità secondo le quali tre contributi si combinano.

Assumendo che le aliquote dello storm surge, in linea teorica, siano da considerarsi come dovute a fenomeni stocasticamente indipendenti la loro frequenza congiunta, che corrisponde alla frequenza dell'innalzamento idrico per Storm Surge, sarebbe pari al prodotto delle singole frequenze di accadimento di ciascuna componente.

Al fine di individuare le occorrenze di massima entità, dovrebbero essere calcolate tutte le possibili combinazioni tra le frequenze di accadimento dei singoli contributi.

L'applicazione diretta in via cautelativa del principio della sovrapposizione degli effetti condurrebbe alla stima di livelli massimi di storm surge derivante dalla somma diretta di tutti e tre i contributi, poco verosimili.

Studi recenti redatti dalla società HR Wallingford a supporto della progettazione definitiva degli interventi di protezione del litorale interessanti il tratto di arenile compreso tra la radice del molo di sopraflutto e la foce del F. San Leonardo, indicano per il sito che la probabilità di occorrenza cumulata tra innalzamento idrico per tempesta ed escursione di marea è molto bassa e quindi, secondo quanto riportato nello studio suddetto, risulta poco probabile che i livelli idrici in presenza di mareggiate superino il valore di 0,5 m s.l.m.

Si è quindi optato per la determinazione dei livelli idrici per storm surge da applicare in base all'analisi statistica dei livelli massimi registrati presso il sito strumentato di Palermo, seppur quest'ultimi condizionati da un breve periodo di osservazione e dagli effetti di schermatura indotti dalla localizzazione della strumentazione all'interno di un sito protetto.

Si ricorda che i dati sull'escursione dei livelli idrici, come letti da un mareografo, includono sia la componente di variazione dei livelli idrici denominata *storm surge* oltre che il sovrалzo indotto dalla marea astronomica: quindi se tali dati vengono depurati del contributo relativo alla marea astronomica si ottiene esattamente l'aliquota di storm surge ricercata; inoltre se i dati sono disponibili in numero ragionevole, la loro elaborazione statistica fornisce previsioni dei sovrалzi per storm surge molto affidabili.

I livelli idrici massimi annuali registrati a Palermo, quindi, sono stati depurati del contributo relativo alla marea astronomica.

ANALISI DEI LIVELLI IDRICI PER STORM SURGE - REGISTRAZIONI ESTREME ANNUALI - MAREOGRAFO RMN DI PALERMO																					
Anni	1992	1993	1994	1995	1996	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
H _{max} (cm)	22	8	14	24	45	22	8	39	40	41	30	39	33	30	28	40	48	51	43	42	

Tabella 8.9 – Livelli idrici registrati presso la stazione RMN di Palermo. Valori massimi annuali depurati dal contributo della marea astronomica.

Tali dati sono stati elaborati applicando la distribuzione di Weibull. L'adattabilità della serie storica alla distribuzione statistica, al variare dei parametri caratteristici, è stata verificata valutando i valori dell'indice correlazione R^2 , e dello scarto quadratico medio, SQM; in particolare, sono stati applicati i seguenti criteri:

- indice di correlazione più elevato;
- minor valore dello scarto quadratico medio, a parità di indice di correlazione.

STORM SURGE							
Elaborazioni statistiche dei dati registrati presso il sito RMN di Palermo (1992-2012)							
R(anni)	1	5	10	25	50	100	150
SS (m)	0,09	0,43	0,49	0,57	0,62	0,66	0,69

Tabella 8.10 – Analisi statistiche dei livelli idrici depurati dal contributo di marea. Sovralzo per storm surge al variare del tempo di ritorno R.

8.4 CONSIDERAZIONI FINALI SUI LIVELLI IDRICI.

In via cautelativa, si è scelto porre di considerare il livello idrico massimo con tempo di ritorno pari a 150 anni per il sito di Termini Imerese pari a 1,2 m.

Tale valore è la somma delle seguenti aliquote:

- ampiezza della marea astronomica: 0,15 m;
- innalzamento per storm surge a 150 anni valutato per il sito R.M.N di Palermo: 0,70 m;
- stima dell'incidenza degli effetti di schermatura del sito di misura: 0,35 m.

La necessità di calcolare quest'ultima aliquota nasce dal fatto che i dati sui livelli idrici, come letti da un mareografo, sono di fatto influenzati dalla localizzazione dello strumento stesso, quasi sempre installato in prossimità di uno specchio acqueo protetto, anziché in mare aperto. L'incidenza degli effetti di schermatura del sito di misura è stata valutata pari al 50% dell'innalzamento per storm surge. Tale valore percentuale è stato stimato come adeguatamente cautelativo.

Il valore di livello idrico massimo stimato andrà considerato, nelle successive elaborazioni, relativamente alle finalità ingegneristiche di pertinenza.

8.5 CAMBIAMENTO CLIMATICO

E' concordemente accettato che il cambiamento climatico in atto ha, tra i suoi effetti salienti, la modifica dei livelli del mare e delle coste.

Generalmente, il clima influenza il volume delle grandi masse d'acqua della terra; ciò sia per la relazione diretta con la temperatura dell'acqua (espansione/contrazione termica) sia per il mutare del rapporto fra acque allo stato liquido e acque allo stato solido (ghiacci).

La tendenza corrente all'innalzamento del livello del mare non si manifesta con incrementi identici per ciascun punto del globo, comportando una limitazione alla previsione dei futuri scenari.

La discussione scientifica in corso si incentra sulle modificazioni di bilancio della radiazione solare dovute all'aumento dei gas serra nell'atmosfera, a causa delle attività antropiche. L'effetto, ovvero l'alterazione delle temperature e della circolazione nell'atmosfera e negli oceani, ha comportato notevoli variazioni meteorologiche.

Tra gli aspetti più evidenti è opportuno annoverare, negli ultimi 150 anni, l'incremento di temperatura media della superficie globale di 0,3°C - 0,6°C. Le previsioni climatiche prevedono che gli effetti diverranno ancor più pronunciati nelle prossimi decenni; inoltre, le proiezioni al 2100 suggeriscono che la temperatura potrebbe subire incrementi da 0,6°C a 4°C.

L'incremento della temperatura comporterà lo scioglimento delle calotte polari, provocando la formazione di fenomeni atmosferici molto gravosi, responsabili degli squilibri idrodinamici.

Quest'ultimo aspetto del fenomeno è quello che interessa maggiormente l'ingegneria costiera, soprattutto per gli aspetti che riguardano la stabilità e l'operatività delle strutture.

L'incremento dei livelli idrici marini causerà:

- una maggior frequenza dei fenomeni di *overtopping*, allagamenti di spiazzali e banchine, con conseguenziale arresto delle operazioni di carico e scarico merci e passeggeri;
- una maggiore esposizione ad agenti corrosivi delle strutture (pontili, pali e banchine);
- un incremento delle forzanti indotte dal moto ondoso;
- un'aumento dei fenomeni di erosione della linea di riva.

Appare evidente, quindi, la necessità di analizzare gli effetti di tale aumento per la progettazione di opere di elevata durabilità.

8.6 PREVISIONI DEL LIVELLO MEDIO MARINO INDOTTO DAI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Negli ultimi anni il livello marino ha subito un repentino incremento e le previsioni numeriche annunciano che in futuro il gradiente subirà brusche accelerazioni.

Bindoff et al., (2007) hanno osservato che il livello medio marino mondiale è aumentato di $1,7 \pm 0,5$ mm/anno nel XX secolo, con un gradiente leggermente maggiore nel periodo 1961-2003.

Le proiezioni climatiche suggeriscono che la velocità di incremento del livello medio dei mari aumenterà sino ai 2,5 mm/anno; nel 2100 il livello medio dei mari supererà quello riscontrato nel 2009 di circa 0,2 m-0,5 m e, in particolare, nelle regioni polari si potrebbero raggiungere incrementi compresi tra 0,6 m-1,00 m (*Horton et al.*, 2008).

I cambiamenti climatici si manifesteranno soprattutto in termini di:

- aumento della durata dei periodi caldi e siccitosi e della frequenza delle piogge torrenziali;

- incremento dei cicloni tropicali e dei livelli estremi di marea.

La distribuzione spazio-temporale dei venti in termini di velocità, direzione, frequenza e durata degli eventi estremi subiranno delle sostanziali modifiche; in particolare, le previsioni annunciano che la percentuale dei venti con velocità maggiori di 15 m/s aumenterà in modo particolare nell'emisfero boreale

Un medesimo scenario si prospetta anche per i regimi di moto ondoso.

In particolare *Trenberth et al.*, (2007) prevedono un significativo trend di crescita per i valori di altezza dell'onda significativa a livello mondiale, sino ad un massimo di 0,4 m per decade nell'Oceano Atlantico.

Per quanto riguarda i fenomeni di *storm surge* e innalzamento dei *livelli di marea*, le valutazioni effettuate sono alquanto incerte, per via dell'impossibilità di effettuare simulazioni numeriche atte all'individuazione dei trend atmosferici e barometrici.

Ciò a causa delle carenze previsionali dei modelli di forecasting regionali e locali, ancora oggi in via di sviluppo.

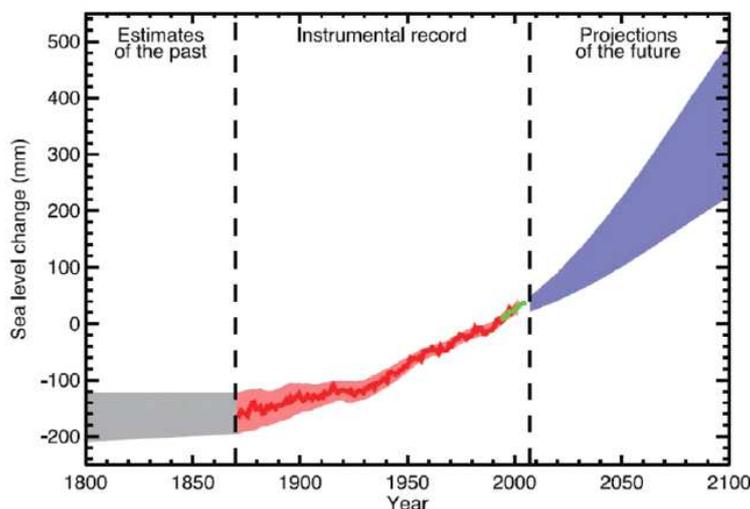


Figura 8.5 - Previsione della variazione del livello del mare (Bindolff et al., 2007)

Nel 2007 è stato redatto dall'organizzazione dell'O.N.U., l'I.P.C.C.- Intergovernmental Panel on Climate Change - il "Quarto rapporto sul Cambiamento Climatico". Le valutazioni in esso riportate, rispetto al livello del mare degli anni 1980-1999, rispecchiano i trend descritti precedentemente, prevedendo il seguente scenario:

- 2050: incremento del livello medio dei mari pari a 18 ± 6 cm;
- 2100: incremento del livello medio dei mari pari a 35 ± 14 cm.

La regionalizzazione degli effetti del riscaldamento globale nel bacino del Mar Mediterraneo è da anni oggetto di numerosi studi; in Figura 8.6 sono riportate le stazioni di misura dei livelli del mare nel bacino del Mediterraneo ed i trends misurati in Italia.

Occorre sottolineare che, dalle sole osservazioni, non è possibile trarre valutazioni affidabili per gli scenari futuri, in quanto necessitano di integrazione dei modelli di atmosfera e oceano. Alcuni autori, tuttavia, concordano su un trend di crescita del livello idrico nel Mediterraneo pari a circa metà del trend globale.

Per lunghi tempi di ritorno, in via cautelativa, è possibile considerare i seguenti incrementi dei livelli idrici delle coste italiane:

- 2050: incremento del livello medio dei mari pari a 9 ± 3 cm;
- 2100: incremento del livello medio dei mari pari a 18 ± 7 cm.

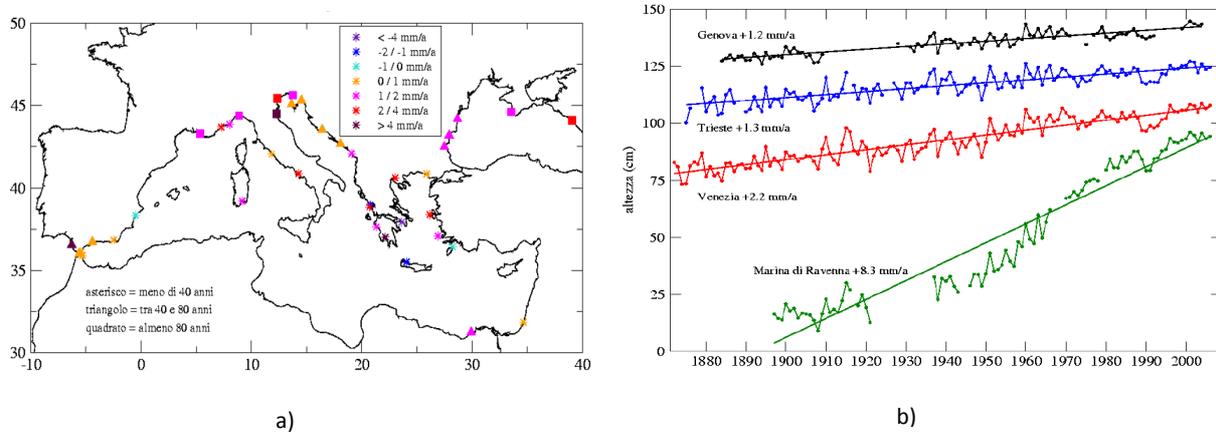


Figura 8.6 – a) Stazioni di misura nel Mar Mediterraneo, b) Trends dei livelli idrici osservati in Italia

Nel 2012, gli studiosi Chiari e Zecca, a partire da considerazioni sull'innalzamento delle temperature per via delle emissioni in atmosfera e sull'influenza sullo scioglimento dei ghiacciai, applicando il modello MAGICC, hanno valutato la variazione a lungo termine dei livelli idrici marini al variare della temperatura media globale secondo la seguente espressione:

$$dH/dt = a(T - T_0) + b dT/dt$$

dove t è il tempo in anni, H è il livello idrico marino, T è la temperatura media globale finale, T_0 è la "temperatura di equilibrio tra mare e clima" e a e b sono parametri da calibrare.

La temperatura finale è un parametro correlato ai possibili scenari ipotizzati, in funzione dei livelli di emissioni in atmosfera di CO_2 così classificati:

- alto;
- medio;
- basso;
- interventi di mitigazione.

I parametri T_0 , a e b sono stati derivati dagli studi di Rahmstorf (2009), e valgono:

- $T_0 = -0,41 \pm 0,03^\circ\text{C}$ (temperatura di riferimento per il periodo 1951-1980);
- $a = 0,56 \pm 0,05 \text{ cm}/(\text{yr} \cdot ^\circ\text{C})$;
- $b = -4,9 \pm 1,0 \text{ cm}/^\circ\text{C}$.

Di seguito si riportano i diagrammi di previsione di innalzamento dei livelli idrici marini e dei relativi gradienti.

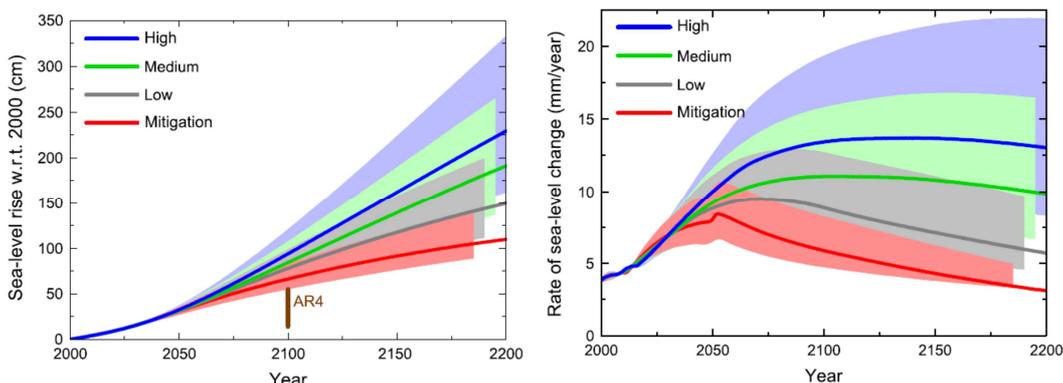


Figura 8.7 – Livelli idrici previsti da Chiari e Zecca (2012).

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa dei possibili incrementi dei livelli idrici.

Scenario	Sea-level rise w.r.t. 2000 (cm)			
	2100		2200	
	Mean	Range	Mean	Range
High	94	73–120	229	163–332
Medium	84	67–107	191	141–272
Low	78	63–99	150	117–208
Mitigation	66	56–82	110	94–145

Tabella 8.11 – Livelli idrici previsti da Chiari e Zecca (2012).

Secondo le previsioni di Chiari e Zecca:

- l’innalzamento medio marino al 2100 sarà compreso tra 66 cm e 94 cm rispetto al livello attuale;
- l’innalzamento medio marino al 2200 sarà compreso tra 110 cm e 229 cm rispetto al livello attuale.

Tali valori sono stati riportati solamente a scopo conoscitivo e sono da considerarsi con cautela, in quanto, a tutt’oggi, non sufficientemente supportati da riscontri scientifici a conferma di essi.

In tal senso è utile informare che nel 2014 è prevista la pubblicazione da parte dell’I.P.C.C. del “*Quinto rapporto sul Cambiamento Climatico*”.

9. CONCLUSIONI

Nel presente studio sono state definite le principali condizioni metomarine per la caratterizzazione del paraggio in esame.

L'individuazione del settore geografico di traversia, che sottende il paraggio in studio, è stata effettuata sulla carta Tecnica Regionale a scala 1:10.000 e sulle carte dell'Istituto Idrografico della Marina, su un punto sulla batimetrica dei 100 m di fronte il sito interesse.

Esso risulta compreso tra 300°N e 90°N.

Per per la stima degli eventi estremi ondametrici al largo del litorale di Termini Imerese sono stati identificati dapprima tutti i dataset ondametrici disponibili utilizzati in precedenti studi per l'area in esame.

La scrivente ha quindi eseguito ulteriori elaborazioni su alcuni dataset al fine di verificare e confrontare al meglio i risultati.

In particolare sono stati considerati:

- il dataset ondametrico fornito dall'agenzia britannica UKMO, già utilizzato per il paraggio di Termini Imerese durante la redazione degli studi di supporto del Piano Regolatore del Porto vigente (2002) da parte dello Studio "Ci.Gi.Vi" e sottoposto ad ulteriori elaborazioni da parte della scrivente nel 2011 e nel 2012;
- il dataset ondametrico dell'atlante MedAtlas, relativo al periodo 1991-2002, realizzato da un consorzio di sei compagnie con sede in Italia, Francia e Grecia, già utilizzato per il paraggio di Termini Imerese durante la redazione del Rapporto Ambientale per la Procedura di Valutazione Ambientale Strategica relativa al suddetto Piano Regolatore del Porto (2009) da parte dello "Studio Mallandrino S.R.L." e sottoposto ad ulteriori elaborazioni da parte della scrivente nel 2011 e nel 2012;
- le serie ondametriche storiche dalla rete ondametrica italiana R.O.N., relativi al periodo 2004-2007, presenti nell'area con il sito strumento di Capo Gallo, già utilizzate per il paraggio di Termini Imerese durante la redazione del Rapporto Ambientale per la Procedura di Valutazione Ambientale Strategica relativa al suddetto Piano Regolatore Portuale (2009) da parte dello "Studio Mallandrino S.R.L.";
- le serie ondametriche sintetiche Era-Interim, relative al periodo 1979-2010, derivate dal modello ECMWF ed elaborate dalla scrivente nel 2012;
- dati ondametrici, derivanti dall'applicazione del metodo SBM a partire dalle serie anemologiche della stazione aeronautica di Ustica per il periodo 1951-1973, utilizzati nello studio idraulico marittimo del 1981 redatto dall'Ing. Mallandrino;
- i dati ondametrici stimati per la redazione dello studio meteomarino a supporto della modellazione numerica eseguita dalla società Hr Wallingford (2007) commissionato dal Comune di Termini Imerese, per gli interventi di recupero e stabilizzazione della spiaggia in erosione con opere di protezione diretta da fenomeni erosivi a breve termine, lungo il tratto di costa compreso tra la foce del fiume S. Leonardo e del molo di sopraflutto del porto e in cui il database ondametrico è stato derivato dai dati anemologici MetOffice relativi al periodo 1986 - 2006.

A seguito di un confronto diretto tra tutte le risultanze degli studi condotti, è stata determinata una tabella di sintesi degli eventi estremi. Questa si è ottenuta scegliendo ogni

evento estremo, al variare del tempo di ritorno e della direzione al largo, in modo tale che esso eguagli o superi il 75% dei dati analoghi disponibili. La soglia utilizzata è tipica delle usuali applicazioni statistiche di questo tipo.

Nonostante l'approccio possa presentare alcuni aspetti scientificamente criticabili, è pur vero che il metodo utilizzato ha il pregio di tener conto di tutti gli sforzi elaborativi sinora compiuti da diversi esperti negli anni, e quindi definisce valori della grandezza sui quali è possibile concordare largamente. L'approccio è inoltre senz'altro cautelativo, e ciò conforta sia l'importanza dell'opera sia il livello di progettazione a cui ci si riferisce.

Sono stati così determinati gli eventi estremi al largo per le direzioni 300°N, 330°N, 0°N, 30°N, 60°N e 90°N e per i tempi di ritorno 1,5, 10, 25, 50, 100 e 150 anni.

ANALISI DEGLI EVENTI ESTREMI AL LARGO DI TERMINI IMERESE						
R (ANNI)	H _s (m)					
	300°N	330°N	360°N	30°N	60°N	90°N
1	5,40	3,93	3,60	3,20	2,50	2,30
5	5,81	4,99	5,00	4,40	3,70	3,02
10	6,22	5,68	5,60	4,90	3,74	3,50
25	6,67	6,99	5,86	5,17	4,04	3,76
50	7,14	7,68	6,57	6,20	4,97	4,01
100	7,41	8,37	7,29	6,24	5,31	4,27
150	7,73	8,77	7,70	6,55	5,65	4,44

Tabella 9.1 – Stima degli eventi estremi di progetto al largo di Termini Imerese

Per quanto riguarda il clima d'onda al largo, il database ondometrico registrato grazie alla boa della RON di Capo Gallo, sotto forma di tabelle di occorrenze, a seguito di opportune considerazioni, è stato ritenuto identificativo anche del paraggio di Termini Imerese. Le occorrenze sono state trasposte al largo del paraggio in esame, applicando un metodo di trasposizione basato sul confronto dei fetch geografici ed efficaci. Inoltre sono stati determinati gli eventi caratteristici del clima d'onda al largo con frequenza di superamento pari a 5 gg/anno e 12 h/anno, utili per alcune elaborazioni specifiche.

TERMINI IMERESE CLIMA D'ONDA AL LARGO		
DIR (°N)	H _s (m)	
	5gg/a	12 h/a
300	1.80	2.86
315	1.90	3.03
330	1.52	3.11
345	1.05	2.40
0	0.72	2.24
15	0.91	2.28
30	0.99	2.22
45	0.80	1.94
60	1.00	2.00
75	0.66	2.08
90	0.58	1.24
OMNI	2.66	3.63

Tabella 9.2 – Eventi caratteristici del clima d'onda al largo di Termini Imerese per 5 gg/anno e 12 h/anno.

Ci si è quindi dedicati alla trasformazione degli stati del mare nella loro evoluzione dal largo verso riva. Sono state quindi effettuate opportune simulazioni numeriche tramite modelli matematici idonei (STWAVE e CGWAVE) e sono stati quindi stimati sia gli eventi estremi che gli eventi caratteristici del clima d'onda sottocosta.

A seguito di tali simulazioni è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

- l'onda che si propaga dal largo verso riva tende a disporsi con direzione di propagazione ortogonali alla linea di riva;
- sulla batimetria dei -25 m i treni d'onda sottocosta tendono a disporsi secondo le direzioni comprese nel settore tra 324°N e 65°N;
- sulla batimetria dei -11 m i treni d'onda sottocosta tendono a disporsi secondo le direzioni comprese nel settore tra 0°N e 56°N;
- la fascia di frangenza si localizza a ridosso della costa, e risulta tanto più ampia quanto minore è la frequenza di accadimento del moto ondoso in esame.

In particolare, quindi, per ogni punto di controllo a differente profondità, è stato possibile identificare una coppia di "mean wave directions":

- sulla batimetria dei -25 m :
 - Maestrale (325°N-0°N), come traversia principale;
 - Grecale (0°N-75°N), come traversia secondaria;
- sulla batimetria dei -11 m:
 - Tramontana (345°N-15°N), come traversia principale e;
 - Grecale (30°N-60°N), come traversia secondaria.

Stante la situazione peculiare del porto di Termini Imerese che soffre di forti agitazioni interne per venti di terra (Il quadrante, scirocco) sono stati valutati specificamente gli eventi estremi sulla batimetria dei -11 m s.l.m. dovuti a tali condizioni meteorologiche.

In particolare si osserva che gli stati del mare più gravosi e generati dai venti spiranti dal II quadrante sulla batimetria dei -11 m s.l.m. sono quelli indotti dagli eventi anemologici da 150°N. Gli stati del mare assumono una direzione leggermente inclinata rispetto a quello del vento generatore; nel punto di controllo i treni d'onda generati assumono la direzione $D_{wave}=67°N$. Il valore estremo per il tempo di ritorno pari a 150 anni delle altezze d'onda generate dall'azione del venti spiranti dal secondo quadrante, con una durata dell'evento anemologico pari a 24 ore, assume valori prossimi a 1,59 m.

Inoltre per il litorale di Termini Imerese sono stati identificati come rappresentativi dei livelli idrici in situ i dati provenienti dalla stazione R.M.N. di Palermo.

L'ampiezza massima di marea è stata valutata pari a circa 15 cm. L'escursione di marea è stata valutata pari a circa 30 cm.

Sono state eseguite considerazioni sull'innalzamento idrico per i fenomeni di "storm surge", dovuti agli effetti relativi ai gradienti barometrici, al frangimento dell'onda e all'azione del vento per alcuni tempi di ritorno di maggior interesse.

In via cautelativa, si è scelto porre di considerare il livello idrico massimo a 150 anni pari a +1,2 m sul Imm. Tale valore andrà considerato, nelle successive elaborazioni, relativamente alle finalità ingegneristiche di effettiva pertinenza.

Non si è trascurato, infine, di eseguire considerazioni sulla variazione dei livelli idrici marini indotti dai cambiamenti climatici.