



INTERVENTI DI MESSA IN SICUREZZA DELLA SPIAGGIA IN LOCALITA' S'ARENA SCOADA

Progetto esecutivo

Il Sindaco
Luigi Tedeschi

Il Responsabile Unico del Procedimento
Ing. Sara Angius



Criteria Srl (Mandataria)
Città: Ricerche: TERritorio: Innovazione: Ambiente
via Cugia, 14 09129 Cagliari (Italy)
tel. +39 070303583 - fax +39 070301180
E-mail: criteria@criteriaweb.com;
www.criteriaweb.com

Arch. Paolo Falqui – *direttore tecnico*

Geol. Maurizio Costa – *direttore tecnico*

Ing. Silvia Putzolu – *coordinamento operativo*



PRIMA INGEGNERIA STP S.S. (mandante)
Via G. Civinini, 8 – 57128 Livorno
p.iva 01530730496
Tel/Fax 0586 372660
E-mail: info@primaingegneria.it;
www.primaingegneria.it

Ing. Maurizio Verzoni

Ing. Pietro Chiavaccini

Ing. Nicola Buchignani

Ing. Nicola Verzoni

GRUPPO DI LAVORO

Progettazione
Ing. Nicola Buchignani
Ing. Pietro Chiavaccini
Geol. Maurizio Costa
Ing. Francesca Etzi
Arch. Paolo Falqui
Ing. Silvia Putzolu
Ing. Maurizio Verzoni
Ing. Nicola Verzoni

Geologia e Geotecnica
Geol. Maurizio Costa
Geol. Antonio Pitzalis
Geol. Giuseppe Serventi

Aspetti ambientali e naturalistici
Biol. Patrizia Carla Sechi
Nat. Riccardo Frau

Analisi meteomarine
Ing. Pietro Chiavaccini

Sicurezza
Ing. Nicola Buchignani

Rilievi, GIS e Cartografia
Cinzia Marcella Orrù

1.3.3 STUDIO METEOMARINO

INDICE

1	PREMESSA.....	1
2	UBICAZIONE DEI PARAGGIO	1
	2.1INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO	3
	2.1.1 Sistema fisiografico	3
	2.2ANALISI DEI FETCH	3
3	REGIME DEI VENTI.....	6
	3.1ANALISI STATISTICA DEI VENTI ESTREMI	9
4	CORRENTI	11
5	VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO	15
6	REGIME ONDOSI	18
	6.1IL METODO DELLA TRASPOSIZIONE	18
7	VALORI ESTREMI DI MOTO ONDOSI A LARGO	26
	7.1CONFRONTO CON DATI PGRA.....	30
8	STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSI VERSO RIVA.....	31
	8.1PROPAGAZIONE SOTTO COSTA DEI DATI DI MOTO ONDOSI	31
9	CARATTERISTICHE DELLE OPERE DI DIFESA.....	39
	9.1CONFRONTO CON DATI PGRA.....	42
10	VALUTAZIONI CONCLUSIVE.....	43
11	APPENDICE	45

1 PREMESSA

Il presente studio meteomarino individua le condizioni climatiche e di esposizione del litorale di San Vero Milis zona S'Arena Scoada.

Allo scopo di definire l'esposizione ai fattori meteomarini dei paraggi di interesse, sono state svolte ricerche e studi finalizzati al reperimento di dati storici di misure dirette di onde in direzione e intensità. I valori di altezza significativa (H_s), direzione di provenienza (DD) e periodo di picco dell'onda (T_p), sono stati elaborati dai dati provenienti dalla stazione ondometrica (gestita dalla Rete Ondometrica Nazionale (RON)) ubicata ad Alghero ($40^{\circ}33'11.99''$ N, $08^{\circ}07'00.01''$ E, rilevamenti dal 01/07/89 al 05/04/08).

I dati della rete RON sono stati integrati con i dati di intensità e direzione del vento registrati alla stazione della Rete Mareografica Nazionale (RMN) situate all'interno di Carloforte ($39^{\circ}08'52.73''$ N, $08^{\circ}18'34.26''$ E, rilevamenti dal 23/07/98 al 31/12/09) che hanno fornito i valori di velocità media del vento (VV) e direzione di provenienza (DD).

Il procedimento adottato è stato di:

- Caratterizzazione del paraggio e dei fetch geografici di riferimento;
- Determinazione del regime dei venti e di moto ondoso;
- Definizione dell'onda a largo;
- Analisi della propagazione dell'onda verso riva e determinazione dei parametri per il dimensionamento delle opere foranee;
- Verifica preliminare degli effetti sul sistema marino costiero conseguente la realizzazione delle opere.

2 UBICAZIONE DEL PARAGGIO

La corretta determinazione delle condizioni ondose in un certo paraggio è fondamentale per una duplice finalità:

1. definire la probabilità di occorrenza di agitazioni estreme prevedibili durante la vita economica di un'opera marittima al fine di disporre e dimensionare correttamente le opere di difesa;
2. ricostruire il regime ondoso medio e di circolazione idrodinamica costiera.

L'esposizione di un paraggio è data dall'intensità delle agitazioni ondose che possono raggiungerlo per effetto dei venti foranei, cioè dei venti provenienti dal largo.

Per un paraggio costiero il regime ondoso è limitato geograficamente alle sole direzioni di traversa, ovvero alle direzioni da cui possono arrivare le agitazioni ondose (mari); tale settore di traversa viene suddiviso usualmente in:

- traversa principale, da cui provengono i mari più violenti;
- traversa secondaria, che include le direzioni meno pericolose.

Per un'analisi del settore di traversia si fa riferimento al cosiddetto fetch efficace, ovvero alla porzione di mare che costituisce, sotto l'azione diretta dei venti, l'area di generazione dell'evento di moto ondoso.

Il sito oggetto di investigazione sono ubicati nella parte occidentale dell'isola su un arco costiero complessivo di circa 10 km.

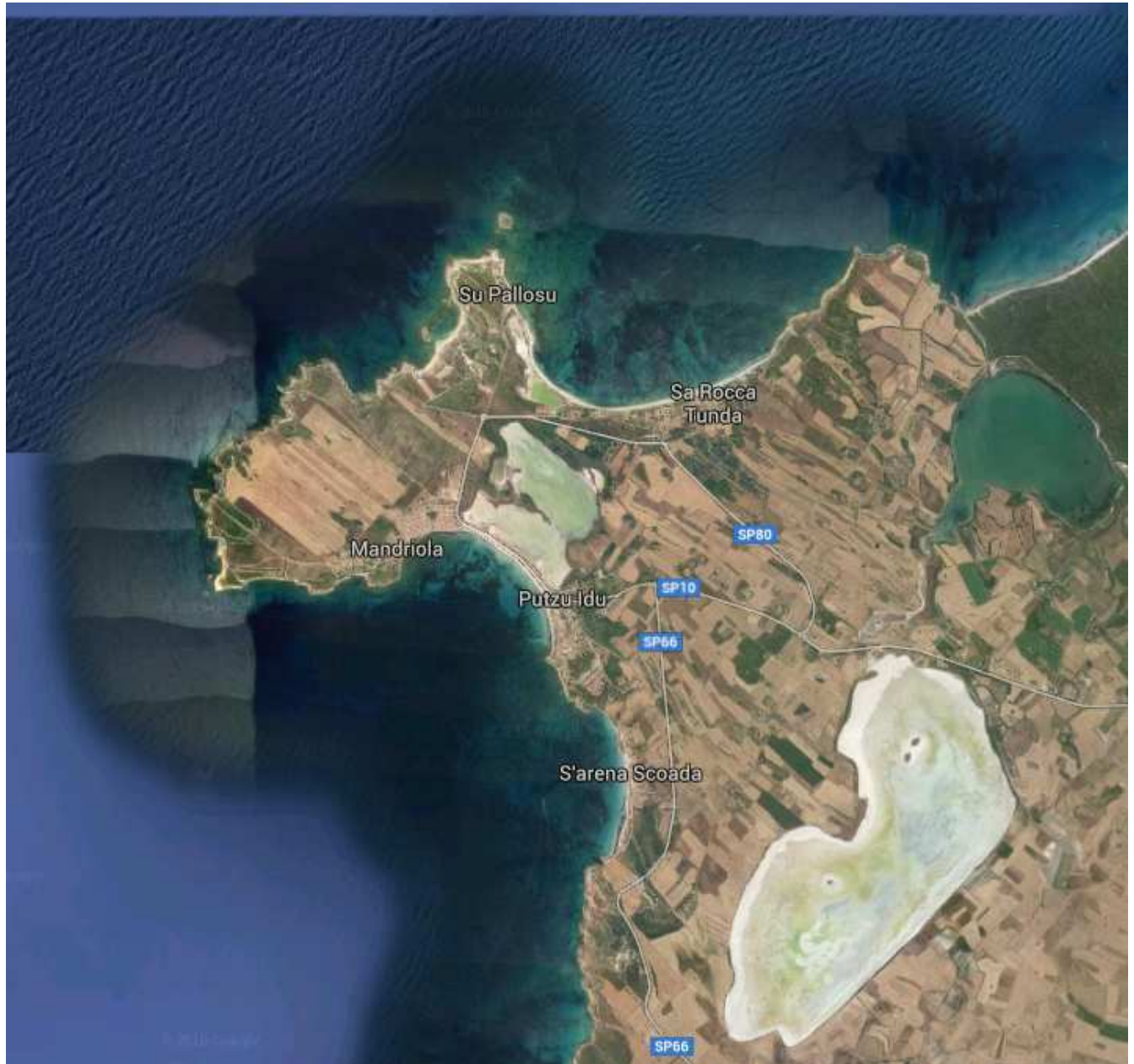


Figura 1 Siti oggetto dello studio

Φ_w è la direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;

$\Phi_i \leq \Phi_w \pm \Theta$ è la direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di 2Θ considerato nell'intorno della direzione Φ_w . Il metodo classico di Saville prevede un valore di $\Theta = 45^\circ$, mentre la metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di $\Theta = 90^\circ$;

$F_{e,w}$ è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione Φ_w ;

F_i è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima Φ_i (si fa riferimento alla lunghezza calcolata su base cartografica), eventualmente assunta come valore medio relativo ad un settore di 15° nell'intorno della direzione i-esima Φ_i ;

n è il termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n=2$).

Il calcolo dei fetches è stata eseguito nei punti individuati in Figura 3, posizionati a distanza dalla costa tale da consentir la valutazione anche dei settori di traversia secondari.

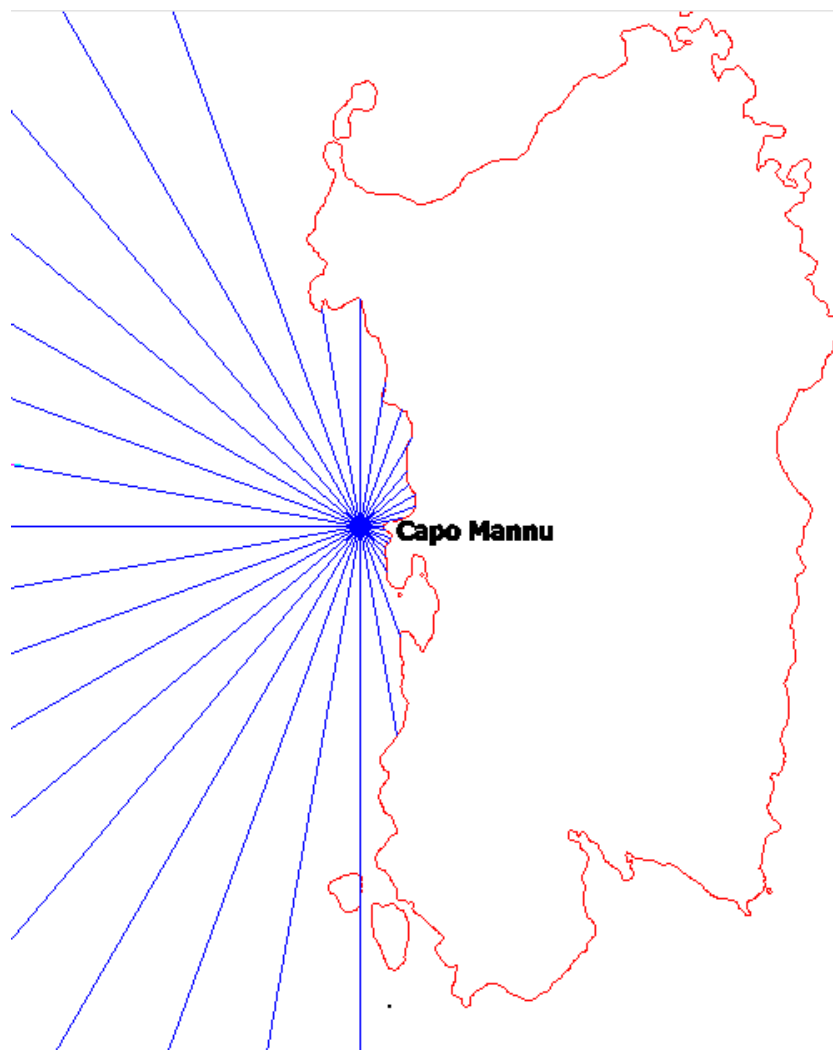


Figura 3 Punto di calcolo del paraggio

A fronte di un fetch geografico massimo dell'ordine di 500km (nel Mar Mediterraneo le perturbazioni cicloniche hanno estensioni massime dell'ordine dei 500km, pertanto i fetch geografici sono stati limitati a tale dimensione), si individua un fetch efficace massimo pari a circa 420 km circa riferibile al settore nord occidentale (280° °N). Il settore di traversia principale è in pratica ricompreso tra 250° N e 300° N. Anche le altre direzioni del III e IV quadrante presentano comunque elevate distanze di fetch e pertanto pur considerandosi settori secondari sono suscettibili di moti ondosi significativi. Il paraggio è ridossato invece dalle direzioni del I e II quadrante.

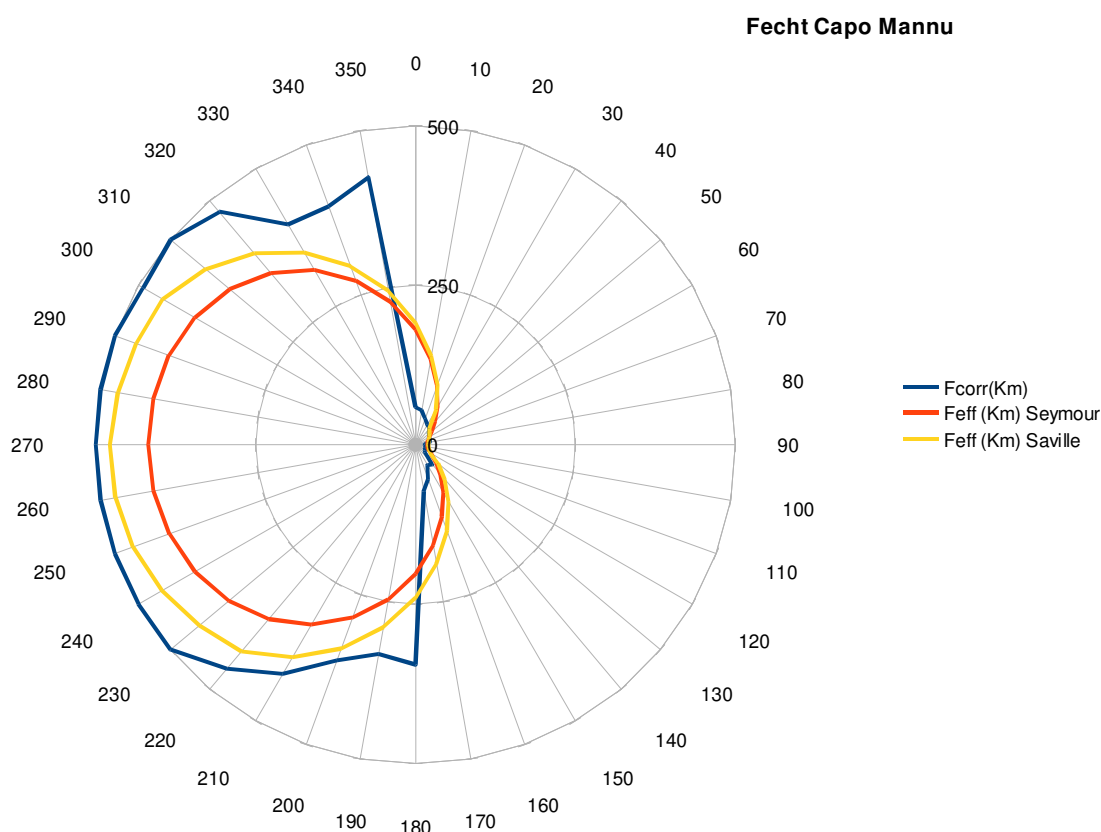


Figura 4 Fetches per il paraggio di Capo Mannu

La tabella riassuntiva dei fetch è riportata nelle tabelle che seguono. Nel proseguo si considera come fetch di riferimento quello di Seymour.

DIREZIONE	F_{geo} (Km)	$F_{geo \text{ corr}}$ (Km)	F_{eff} (Km) Seymour	F_{eff} (Km) Saville	DIREZIONE	F_{geo} (Km)	$F_{geo \text{ corr}}$ (Km)	F_{eff} (Km) Seymour	F_{eff} (Km) Saville
0	59,1	59,1	180,5	191,3	190	333,3	333,3	246,7	290,6
10	54,7	54,7	136,6	141,2	200	360,0	360,0	288,7	340,1
20	43,4	43,4	98,8	100,0	210	415,3	415,3	326,1	384,8

DIREZIONE	F _{geo} (Km)	F _{geo} corr (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville	DIREZIONE	F _{geo} (Km)	F _{geo} corr (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville
30	36,8	36,8	68,9	64,0	220	458,2	458,2	357,0	423,1
40	34,1	34,1	47,3	33,0	230	561,7	500,0	381,0	441,0
50	26,5	26,5	33,4	28,8	240	1073,9	500,0	398,1	457,7
60	24,0	24,0	25,3	25,0	250	808,0	500,0	409,4	469,8
70	24,2	24,2	21,2	22,3	260	721,8	500,0	415,8	476,6
80	22,5	22,5	19,2	20,3	270	688,3	500,0	418,1	478,3
90	14,1	14,1	18,4	19,9	280	610,0	500,0	416,5	472,5
100	16,4	16,4	18,9	20,5	290	501,3	500,0	410,3	464,61
110	15,8	15,8	21,7	22,8	300	492,0	492,0	398,4	456,2
120	17,0	17,0	28,4	26,8	310	553,9	500,0	379,2	428,2
130	19,4	19,4	40,6	45,8	320	476,7	476,7	351,7	391,8
140	40,7	40,7	59,7	71,3	330	399,0	399,0	316,1	347,7
150	37,0	37,0	86,2	103,5	340	397,6	397,6	273,8	297,8
160	57,3	57,3	119,9	143,3	350	425,7	425,7	227,4	245,1
170	74,2	74,2	159,5	189,3					
180	344,7	344,7	202,7	240,0					

Tabella 1 Dati di fetch del paraggio di Capo Mannu

Il paraggio di riferimento è posizionato in un fondale di circa 100 m, in cui la propagazione del moto ondoso non risente dei fenomeni di attrito a fondo.

3 REGIME DEI VENTI

Il regime annuale o stagionale dei venti e dei mari in un paraggio si ricava elaborando statisticamente i dati disponibili anche per pochi anni e viene comunemente rappresentato con una tabella o con un diagramma polare (rosa) che fornisce per ogni settore di provenienza la frequenza percentuale delle osservazioni suddivise in opportune classi di intensità. Per il presente lavoro si analizza il regime dei venti nel paraggio di Carloforte ricavabili dalle serie della stazione RMN (Rete Mareografica Nazionale) presente nella località. Ogni stazione di misura RMN, infatti, oltre ad essere corredata di strumenti di misura della marea, è dotata di diversi sensori, tra cui il sensore anemometrico, che misura velocità e direzione del vento a 10m dal suolo.

Il diagramma dei venti di Carloforte mette in evidenza che i venti regnanti, cioè più frequenti, sono diretti lungo l'asse maestrale/scirocco (NO-SE), così come i venti più forti, cioè dominanti che hanno le frequenze maggiori nella medesima direzione. Lungo le due direzioni si registrano

lunghezze di fetch elevate con conseguente possibilità di sviluppo di mareggiate di intensità anche rilevante.

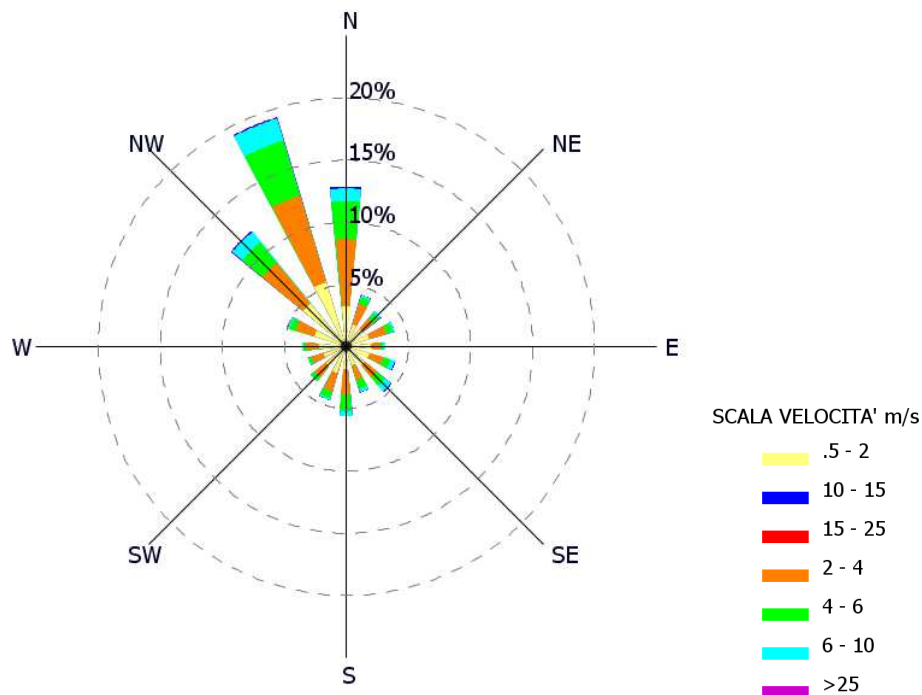


Figura 5 Rosa del regime dei venti per il paraggio di Carloforte (periodo 1998-2009)

Direzione (°N)	Velocità (m/s)										TOTALE
	<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	>18	
0-22.5	5,99	16,40	6,76	1,53	0,25	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	30,97
22.5-45	8,34	43,95	34,01	13,68	5,75	1,43	0,08	0,01	0,00	0,00	107,26
45-67.5	16,16	77,62	86,73	48,73	8,64	1,01	0,05	0,00	0,00	0,00	238,94
67.5-90	17,27	38,27	20,59	8,30	0,72	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	85,23
90-112.5	13,10	10,97	1,05	0,17	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,36
112.5-135	14,27	10,11	1,07	0,16	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,63
135-157.5	5,50	12,08	7,34	3,41	0,89	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	29,34
157.5-180	2,78	11,64	18,43	12,78	4,69	1,06	0,12	0,01	0,00	0,00	51,51
180-202.5	4,05	22,18	13,87	3,29	0,46	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	43,88
202.5-225	4,79	16,25	6,57	6,67	2,23	0,15	0,01	0,00	0,00	0,00	36,67
225-247.5	3,94	25,61	14,99	15,88	11,75	3,00	0,39	0,00	0,00	0,00	75,57
247.5-270	4,14	31,60	21,07	11,71	4,92	1,02	0,08	0,03	0,00	0,00	74,56
270-292.5	4,14	27,64	14,81	3,18	0,42	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	50,25
292.5-315	4,21	29,10	19,28	2,28	0,52	0,12	0,03	0,00	0,00	0,00	55,55
315-337.5	4,68	19,00	17,45	4,91	0,87	0,34	0,12	0,01	0,00	0,00	47,38
337.5-360	3,15	10,17	6,32	1,86	0,23	0,16	0,01	0,01	0,00	0,00	21,91
TOTALE	116,53	402,60	290,32	138,53	42,42	8,58	0,94	0,08	0,00	0,00	1000,00

Tabella 2 Dati anemometrici registrati a Carloforte alla stazione periodo 1998-2009 (numero rilevazioni 95052)

I dati si riferiscono al vento di 10 min (V_{600}) ed a una stazione a terra. Poiché le analisi vengono in genere eseguite con il vento medio di durata 1 h (V_{3600}) viene impiegata la seguente relazione per determinare quest'ultimo valore:

$$V_{3600} = \frac{V_{600}}{1.277 + 0.296 \tanh\left(0.9 \log_{10}\left(\frac{45}{600}\right)\right)}$$

I valori misurati nella stazione RMI differiscono da quelli a largo in quanto risentono dell'attrito del suolo e di altri fattori legati alla diversa temperatura terra-aria. Le velocità a largo (V_L) sono in genere superiori ad eccezione di quelle relative ad eventi intensi e possono essere determinate facendo riferimento alla relazione (Coastal Engineering Manual, 2005):

$$V_L = V_T R_T$$

dove V_T è la velocità misurata a terra e R_T un coefficiente determinabile con il grafico di Figura 6. Per velocità maggiori di 18.5 m/s $R_L=0.9$.

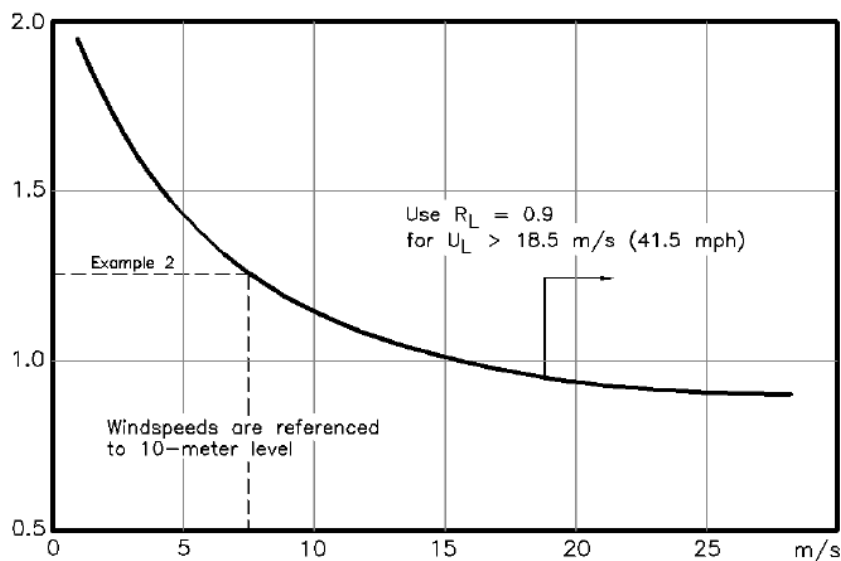


Figura 6 Curva coefficiente R_T in funzione della velocità del vento a terra (V_T - asse x)- da Coastal Engineering Manual

La correzione per la diversa temperatura tra aria ed acqua si determina invece tramite il grafico di Figura 7.

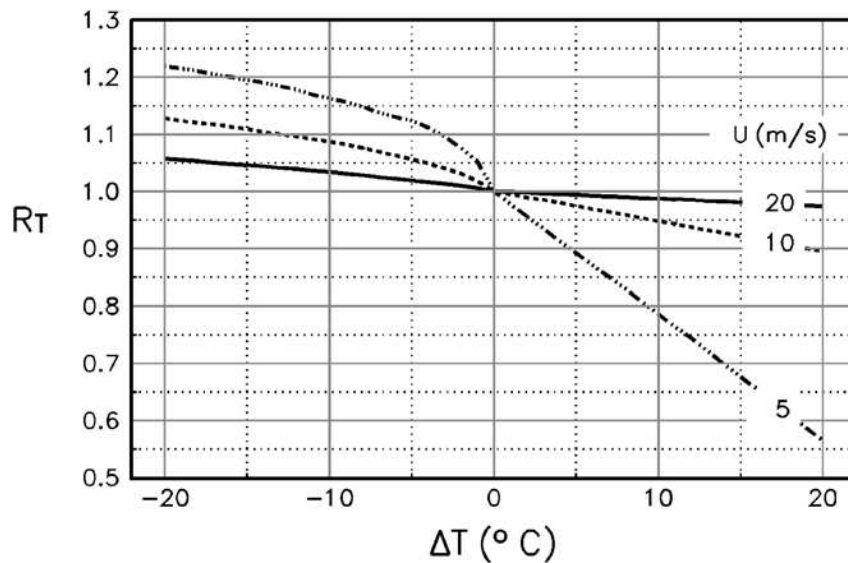


Figura 7 Fattore di correzione in funzione della diversa temperatura aria-mare

Si evidenzia che i dati rilevati sono coerenti con le serie sintetiche determinate.

3.1 Analisi statistica dei venti estremi

L'analisi statistica del vento è finalizzata a determinare, per fissati tempi di ritorno e direzioni di provenienza, il valore della velocità massima (media sull'ora) che è responsabile della generazione del moto ondoso.

Nel caso in esame, la popolazione campionaria è estratta dai dati di vento seguendo il metodo delle durate parziali sopra soglia (POT "Peak Over Threshold"- Goda, 1988) che prevede un campionamento ad evento generando una popolazione di dati temporalmente disaggregata. L'indipendenza campionaria della serie dei massimi è assicurata imponendo un valore di soglia $V_s > 10 \text{ m/s}$ fissando un intervallo che intercorre tra due eventi successive di almeno 24 ore.

L'analisi statistica è stata condotta per il complesso di tutte le direzioni (verifica omnidirezionale) e per settori di 90°.

Ad ogni valore di velocità è stato associato una probabilità di non superamento così determinata:

$$F(x_i) = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}$$

essendo N il numero complessivo di dati a disposizione, m il numero di ordine dell'i-esimo dato, α e β parametri funzione del tipo di distribuzione statistica adottata, il cui valore è riportato in Tabella 14.

Distribuzione	A	B
Gumbel	0.44	0.12
Frechet	$0.44+0.52/k$	$0.12-0.11/k$
Weibull	$0.2+0.27/k^{0.5}$	$0.2+0.23/k^{0.5}$

Tabella 3 Parametri α e β

La relazione che lega l'altezza d'onda alla probabilità di non superamento è di tipo lineare

$H = \hat{B} + \hat{A} y$ ed è funzione della variabile ridotta y , determinata a seconda delle distribuzioni:

$y = -\ln(-\ln(F))$ (Gumbel)

$y = k[(-\ln(F))^{-1/k} - 1]$ (Frechet)

$y = [(-\ln(1 - F))^{1/k}]$ (Weibull)

I parametri \hat{B} e \hat{A} sono calcolati utilizzando il metodo dei minimi quadrati, mentre k è fissato a priori:

$k=2.5, 3.33, 5.0, 10.0$ (Frechet)

$k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$ (Weibull)

Gli eventi considerati sono risultati 110 nei 12 anni di dati disponibili.

I risultati per la statistica per il settore 0-360°N sono riportate nelle tabelle che seguono.

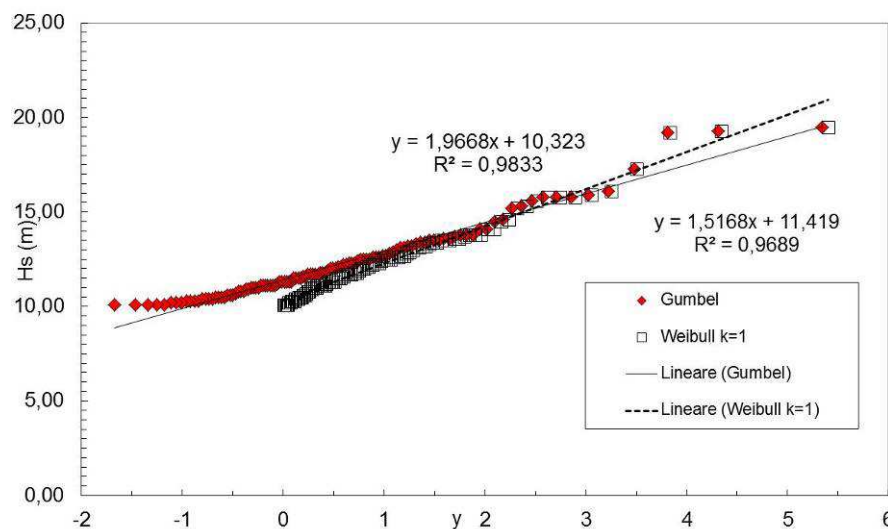


Figura 8 Andamento dei massimi di velocità nel settore 180-360 al variare della variabile ridotta y

Tr (anni)	y	Vmax m/s (Gumbel)	Vmax m/s (Weibull k=1.0)
2	1,29	15,9	16,2
10	3,01	18,4	19,3
30	4,13	20,0	21,5
50	4,64	20,8	22,5
100	5,34	21,9	23,9

Tabella 4 Risultati per la statistica del vento nel settore 0-360

Analogamente si riportano i risultati per i singoli quadranti.

Tr (anni)	0-90°		90-180°		180-270°		270-360°	
	Vmax m/s (Gumbel)	Vmax m/s (Weibull k=1.4)	Vmax m/s (Gumbel)	Vmax m/s (Weibull k=1.0)	Vmax m/s (Gumbel)	Vmax m/s (Weibull k=1.4)	Vmax m/s (Gumbel)	Vmax m/s (Weibull k=1.0)
2	14,2	14,2	17,5	17,4	14,9	14,8	17,5	17,3
10	16,3	16,4	20,3	21,0	17,8	17,9	21,3	22,1
30	17,7	17,8	22,2	23,4	19,6	19,7	23,8	25,4
50	18,3	18,3	23,1	24,5	20,4	20,4	25,0	26,9
100	19,2	19,1	24,3	26,1	21,5	21,4	26,5	29,0

Tabella 5 Risultati per la statistica del vento nei diversi quadranti

I valori sopra riportati si riferiscono alla serie di dati orari e riferiti alla stazione di misura.

4 CORRENTI

Le correnti marine sono movimenti semipermanenti delle masse d'acqua prodotti da diverse cause: differenze di densità, vento, maree, onde frangenti.

Le correnti non producono forze rilevanti ai fini della resistenza delle strutture marittime, ma possono svolgere una intensa azione sulla dinamica litoranea.

Nel bacino del Mediterraneo le correnti superficiali sono solitamente deboli e di direzione variabile. La circolazione superficiale è fortemente influenzata dai venti che al largo possono generare correnti di intensità max di 0.3 m/s.

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. Il Mediterraneo viene rifornito da acqua oceanica che dopo aver passato lo stretto di Gibilterra fluisce verso Est.

La corrente entrante in 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 0,05 ed 0,08 m/s lungo le coste dell'Algeria, quindi diminuisce procedendo verso oriente.

A questo andamento generale si sovrappongono numerose e varie situazioni particolari.

Lungo la penisola c'è una corrente modesta di 0,08 m/s verso nord lungo le coste che all'altezza della Sardegna devia per ridiscendere. Un'altra, altrettanto modesta, che sale lungo le coste del Tirreno settentrionale e nel golfo di Genova per ridiscendere verso la Sardegna (Figura 9).

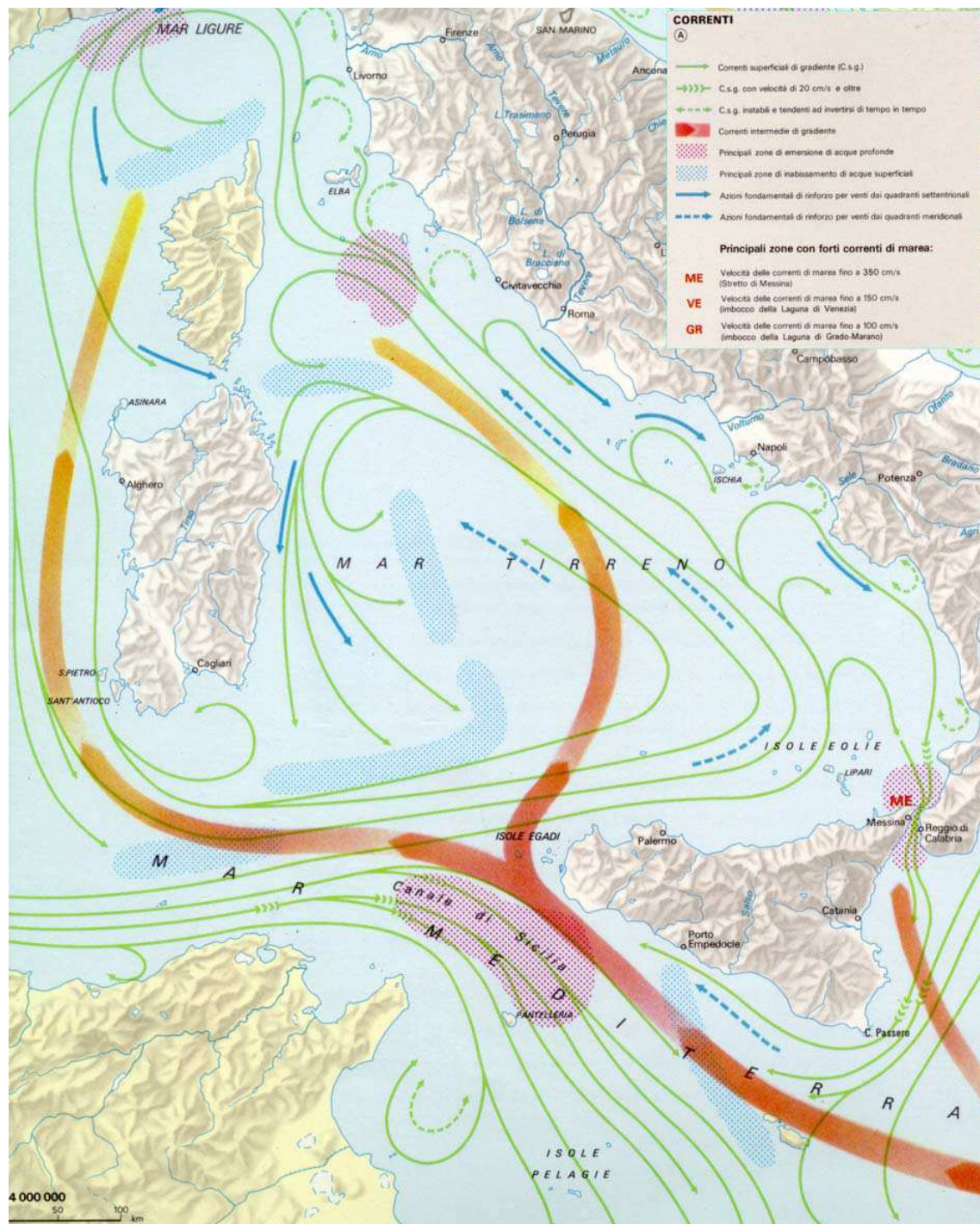


Figura 9 Correnti nel Mediterraneo (da Atlante Tematico CNR)

Per l'intera Sardegna, la velocità della corrente marina è stata assunta pari a 0,1 m/s in quanto tale valore medio risulta il più probabile; in particolare, l'insieme dei valori inferiori a 0,2 m/s copre l'80% delle situazioni, mentre le situazioni di calma sono dell'ordine del 5%. Tale corrente è tipicamente orientata parallelamente alla costa, in direzione NS.

Per quel che riguarda le correnti di deriva (dovute all'azione di trascinamento creato dall'attrito esistente tra la massa d'aria in movimento e la massa d'acqua superficiale del mare) il vento tende a trascinare lo strato superficiale delle acque marine nella sua stessa direzione, mentre negli strati inferiori il movimento di deriva si trasmette 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 (il 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.

Per una stima correnti indotte dal vento si può ricorrere alla teoria di Ekman. Nota la velocità del vento V in una determinata direzione la corrente superficiale U_0 ad essa associata è data da:

$$U_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \tau_{y\eta}}{D_E \cdot \rho |f|}$$

dove D_E è la profondità di Ekman o profondità d'influenza dell'attrito, f il parametro di Coriolis (pari a $f=2\Omega \sin \varphi$ dove φ è la latitudine in °N e Ω la velocità angolare della terra pari a circa 7.27×10^{-5} rad/s) $\tau_{y\eta}$ è lo stress del vento sulla superficie marina (approssimativamente proporzionale al quadrato della velocità del vento e agente nella direzione del vento).

Il valore della tensione tangenziale determinata dal vento si assume pari a

$$\tau_{\eta} = \rho_a C_D V^2$$

dove C_D è il coefficiente di resistenza (circa 1.4×10^{-3} e ρ_a la densità dell'aria pari a 1.225 kg/m^3 su l.m.m).

La profondità di Ekman è definita mediante

$$D_E = \pi \sqrt{\frac{2A_z}{|f|}}$$

dove A_z è la viscosità vorticosità cinematica dell'acqua (variabile tra 5×10^4 e $10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$).

Sperimentalmente Ekman trovò un legame tra la velocità del vento e la velocità della corrente in superficie (per latitudini superiori in valore assoluto a 10°N)

$$\frac{U_0}{V} = \frac{0.0127}{\sqrt{\sin|\varphi|}}$$

Sostituendo le espressioni sopra indicate si ottiene una relazione semplificata per il calcolo della profondità di Ekman o di influenza dell'attrito (con V in m/s e D_E in m)

$$D_E = \frac{4.3V}{\sqrt{\sin|\varphi|}}$$

Le componenti delle correnti U_x e U_y rispettivamente nella direzione perpendicolare e parallela a quella in cui spira il vento sono date al variare della profondità da:

$$U_x(z) = \pm U_0 \cdot e^{-\frac{\pi}{D_E}z} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{D_E}z\right)$$

$$U_y(z) = U_0 \cdot e^{-\frac{\pi}{D_E}z} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{D_E}z\right)$$

Il segno + vale per l'emisfero settentrionale, il segno - per quello meridionale. La profondità z è positiva verso il basso.

Poiché i siti in esame sono posizionati ad una latitudine di circa 39°N le espressioni sopra si semplificano come:

$$U_0 = 0.0158 \cdot V$$

$$D_E = 5.36 \cdot V$$

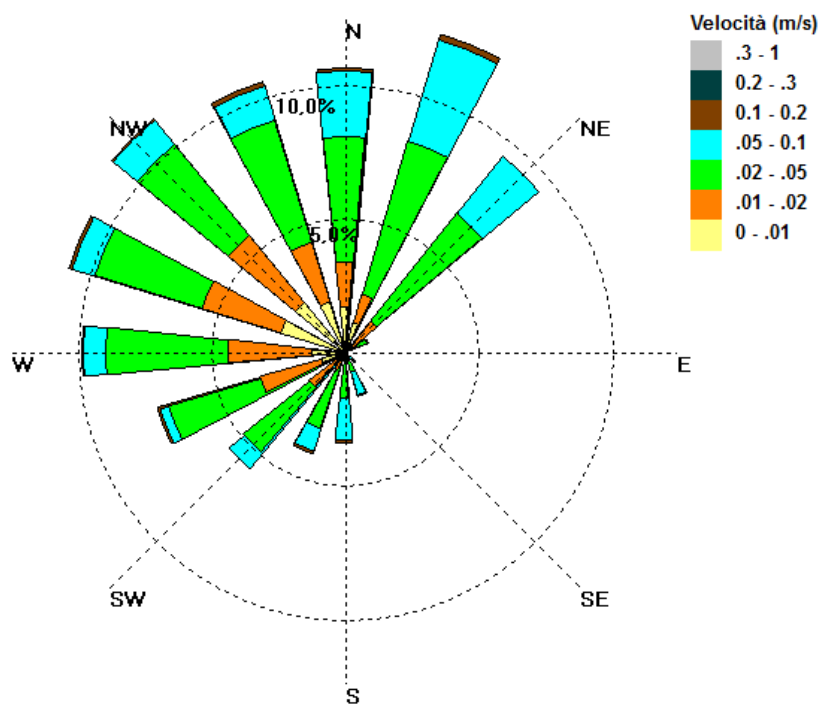
L'applicazione della relazione di Ekman presuppone un tempo di permanenza di sufficiente a creare uno stato stazionario, ed è in genere valida lontano dalle coste ed in acque profonde (piattaforma continentale). Tuttavia può essere utile per definire un ordine di grandezza delle correnti. Come velocità del vento e direzione di provenienza si considera il valore medio giornaliero.

Applicando tale metodologia di calcolo all'intera serie dei venti misurati a Carloforte nei loro valori medi giornalieri, ed assumendo una profondità media di circa 5 m (pari a circa la metà della profondità di chiusura) si ottiene la tabella percentuale in funzione delle direzioni e delle classi di velocità riportata in Tabella 6 e riportata in grafico in Figura 10.

Direzione	Velocità (m/s)										TOTALE
	<0,01	0,01-0,02	0,02-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,75	>0,75	
0-22.5	7,96	16,95	56,24	35,18	2,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,90
22.5-45	4,37	7,96	57,52	52,13	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	123,78
45-67.5	1,28	5,65	22,34	12,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,35
67.5-90	0,77	0,00	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28
90-112.5	0,26	0,00	0,00	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
112.5-135	0,00	0,00	0,77	2,05	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,08

Direzione	Velocità (m/s)										TOTALE
	<0,01	0,01-0,02	0,02-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,75	>0,75	
135-157.5	0,00	0,00	3,85	5,65	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,02
157.5-180	0,00	0,00	8,73	12,84	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,63
180-202.5	0,00	0,77	21,31	12,84	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,21
202.5-225	0,26	4,37	31,84	11,56	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48,28
225-247.5	1,03	16,69	45,20	8,47	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	71,91
247.5-270	2,82	17,21	49,31	9,24	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	79,10
270-292.5	5,91	32,87	56,75	9,24	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	105,80
292.5-315	13,87	29,53	58,29	12,07	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	115,05
315-337.5	11,81	27,99	56,24	16,18	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	113,25
337.5-360	13,10	16,95	52,13	22,34	3,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	107,60
TOTALE	63,43	176,94	520,80	222,39	16,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1000,00

Tabella 6 Percentuali di occorrenza (per mille) delle correnti prodotte da vento per direzione e classe di velocità



WindRose PRO

Figura 10 Correnti medie giornaliere a 5 m di profondità con i dati della stazione di Carloforte

Le correnti presentano per circa il 98.5% dei casi valori inferiori a 0.1 m/s mentre il rimanente 1.5% non supera gli 0.2 m/s. La media delle velocità risulta di 0.04 m/s. Di conseguenza il loro effetto può ritenersi del tutto trascurabile nei confronti del moto ondoso e del trasporto solido, prevalendo su queste le correnti indotte dalle onde.

5 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

Le maree, le sesse, le onde, i venti, la pressione barometrica e le correnti sono le principali cause delle continue variazioni del livello marino, dette escursioni di marea, la cui conoscenza è

necessaria per una corretta determinazione della profondità dei fondali e delle fondazioni delle opere marittime.

I livelli di marea misurati sono il risultato della combinazione tra le oscillazioni dovute alla marea astronomica (funzione della posizione relativa della terra, della luna e del sole) ed alle oscillazioni dovute alle variazioni della pressione atmosferica (marea barometrica), nonché all'azione del vento (*wind setup*).

La valutazione dell'effetto di marea può essere effettuata in riferimento alle costanti armoniche in cui può essere scomposta l'oscillazione

$$\eta_m = \sum_i A_i \cdot \cos(\omega_i t + \alpha_i)$$

dove η_m è il livello di marea all'istante t , A_i e α_i sono rispettivamente l'ampiezza e la fase delle componenti dell'onda di marea e ω_i la frequenza angolare.

Le componenti considerate sono solitamente quelle rappresentate in Tabella 7.

Denominazione	Simbolo	Periodo ore	Denominazione	Simbolo	Periodo ore
Lunare principale	M2	12.42	Luni-solare diurna	K1	23.93
Lunare principale	S2	12.00	Lunare diurna principale	O1	25.82
Lunare ellittica maggiore	N2	12.66	Solare diurna principale	P1	24.07
Lunare-solare semidiurna	K2	11.97	Lunare ellittica maggiore	Q1	26.87

Tabella 7 Componenti armoniche

Alcuni valori per il mar Tirreno e di Sardegna sono riportati in Tabella 7.

Porto	M2	S2	N2	K1	O1
Carloforte	7.0-199°	2.7-220°	1.4-188°	3.6-166°	1.7-95°
Porto Torres	7.35-209°	2.9-229°	1.5-200°	3.4-175°	1.6-99°
Cagliari	8.5-255°	3.6-273°	1.8-248°	3.2-200°	1.6-121°

Tabella 8 Armoniche di marea per porti del Mar Tirreno (cm e gradi)

I valori di marea (alta e bassa) ottenuti con le analisi armoniche sono dell'ordine dei 25-30 cm e sono coerenti con i valori ricavabili dalle registrazioni del mareografo di Carloforte (rete RMN) (Figura 11).

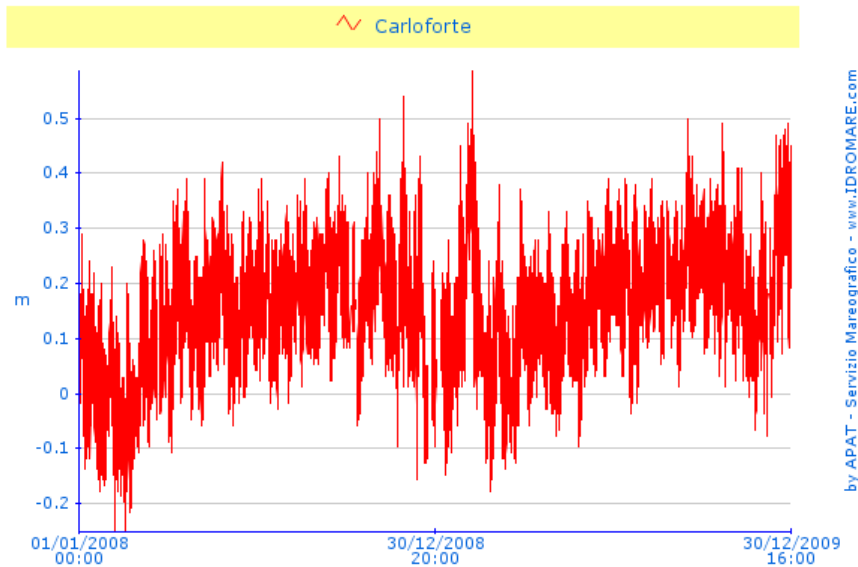


Figura 11 Andamento del livello del mare medio giornaliero nel porto di Carloforte nel periodo compreso tra il 01.01.2008 ed il 31.12.2009.

Per quanto riguarda la pressione barometrica è noto che una diminuzione di pressione rispetto a quella atmosferica di riferimento (1013.25 mb) determina un innalzamento del livello medio marino. Il corrispondente innalzamento del l.m.m può essere valutato secondo la relazione:

$$\Delta\eta_p = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

Poiché la differenza di pressione in diminuzione per gli ambiti del mediterraneo sono di circa 35 mb, gli innalzamenti del l.m.m attesi sono dell'ordine dei 35 cm.

Per quanto riguarda il sovrizzo del vento, questo può essere determinato mediante la seguente relazione empirica:

$$S = \frac{Kp \cdot Lp \cdot U^2}{g(D - d - S)} \ln\left(\frac{D}{d + S}\right)$$

dove D è la profondità limite assunta per la piattaforma continentale (circa 200 m), $Lp=3$ km è l'estensione della piattaforma continentale $kp=3.2 \times 10^{-6}$ e U la velocità del vento (variabile in funzione del Tr) e d è la profondità di riferimento. Assumendo una velocità del vento di circa 22 m/s si ottiene un valore del sovrizzo di circa 9 cm.

La somma dei contributi varia intorno a 70 cm. In realtà si deve considerare che per i fenomeni, specialmente nei loro valori estremi, non si verifica la piena concomitanza dei sovrizzi di varia natura. Pertanto, ai fini progettuali, si può cautelativamente assumere una riduzione del 25% della somma dei contributi di sovrizzo meteorologico e astronomico ottenendo valori di circa 50 cm. Il valore sopra indicato non ha comunque significativi effetti sui fenomeni di propagazione del moto ondoso da largo verso riva.

6 REGIME ONDOSO

Nell'analisi della morfodinamica costiera, negli studi di difesa dei litorali e nella progettazione di opere marittime è fondamentale conoscere il regime di moto ondoso ed in particolare la distribuzione di frequenza congiunta di accadimento altezza d'onda- direzione di provenienza.

Il paraggio in questione non è dotato di stazione ondometrica. La boa più vicina risulta quella di Alghero posta a circa 60 km a nord che comunque presenta simili distanze di fetch in particolare nel III e IV quadrante che sono quelle di interesse per il paraggio in esame. Pertanto la procedura di analisi del moto ondoso che viene adottata consiste nella applicazione del metodo della trasposizione del moto ondoso dalla boa di Alghero al paraggio di Capo Mannu per le onde del III e IV quadrante;

6.1 Il metodo della trasposizione

Il metodo di trasposizione dei dati si basa sull'ipotesi che il moto ondoso registrato dall'ondametro sia stato generato da un evento climatico in grado di interessare l'area di generazione delle mareggiate che investono la fascia costiera in esame.

Sotto questa ipotesi e considerando costante il fattore di velocità del vento, si determina la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relative al punto in cui è collocato l'ondametro (O) e quello di interesse (P) mediante la seguente formula:

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

dove F^P e F^O sono le rispettive lunghezza dei fetches efficaci per una data direzione. All'onda generata con il metodo della trasposizione deve essere previsto un massimo di altezza funzione della velocità massima del vento prevedibile e della lunghezza di fetch efficace disponibile in una determinata direzione

Ai fini dell'analisi è quindi necessario definire anche le caratteristiche di fetch della boa RON di Alghero.



Figura 12 Boa Ron di Alghero e boa virtuale “Capo Mannu”

Come individuabile in Figura 13 ed in Tabella 9 (la metodologia di determinazione del fetch è la stessa indicata in precedenza) la traversia principale è disposta tra 210 e 310 ° N e risulta leggermente più ampia di quanto determinato per il paraggio di Capo Mannu.

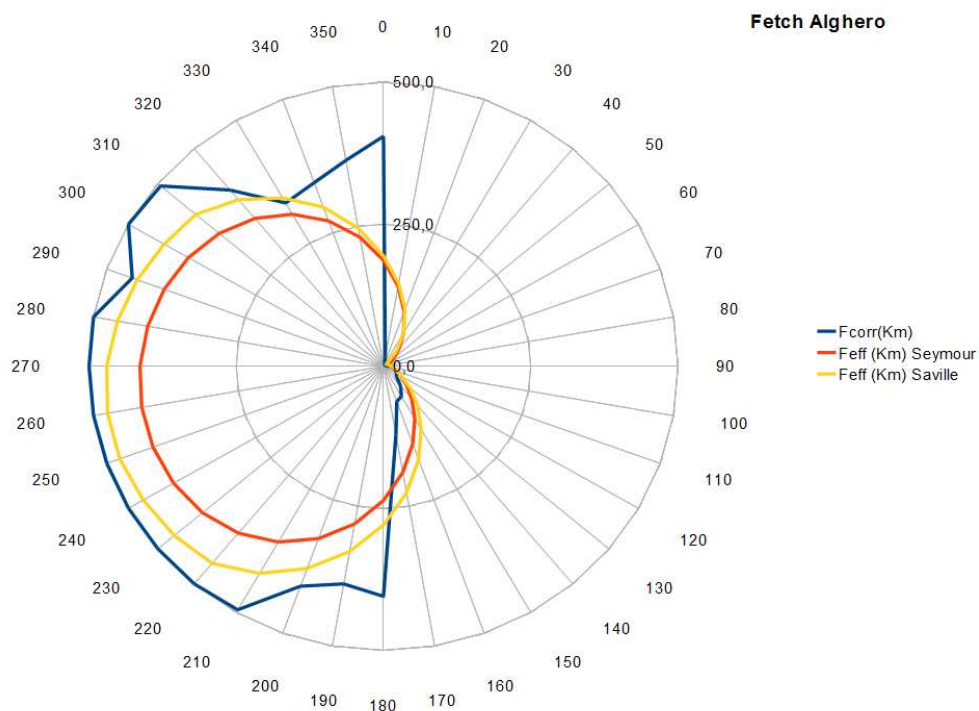


Figura 13 Fetches per il paraggio di Alghero

DIR (°N)	F _{geo} (Km)	F _{geo} corr (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville	DIR (°N)	F _{geo} (Km)	F _{geo} corr (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville
0	405,0	405,0	186,6	194,7	190	389,0	389,0	281,75	331,1
10	17,0	17,0	142,9	148,1	200	412,0	412,0	322,97	378,9
20	5,0	5,0	102,6	107,1	210	495,0	495,0	357,33	420,9
30	4,0	4,0	68,4	68,4	220	530,0	500,0	383,42	452,9
40	3,0	3,0	41,9	34,3	230	694,0	500,0	401,18	463,5
50	3,0	3,0	23,6	5,9	240	1190,0	500,0	411,69	471,1
60	3,0	3,0	13,3	6,4	250	776,0	500,0	416,49	476,6
70	3,0	3,0	9,34	8,3	260	724,0	500,0	416,85	475,7
80	4,0	4,0	9,797	10,8	270	628,0	500,0	413,45	470,0
90	16,0	16,0	12,65	14,4	280	514,0	500,0	406,52	458,8
100	17,0	17,0	16,95	19,3	290	454,0	454,0	396,36	445,04
110	22,0	22,0	23,60	25,2	300	509,0	500,0	382,6	430,2
120	25,0	25,0	34,30	34,3	310	494,0	494,0	364,1	416,0
130	29,0	29,0	50,83	59,3	320	405,0	405,0	339,8	382,8
140	45,0	45,0	74,65	89,9	330	332,0	332,0	309,1	342,3
150	61,0	61,0	106,33	127,7	340	344,0	344,0	272,3	298,2
160	66,0	66,0	145,26	174,4	350	368,0	368,0	230,7	247,0

DIR (°N)	F _{geo} (Km)	F _{geo} corr (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville	DIR (°N)	F _{geo} (Km)	F _{geo} corr (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville
170	122,0	122,0	189,52	225,9					
180	405,0	405,0	236,17	279,3					

Tabella 9 Dati di fetch alla boa RON di Alghero

Nella Figura 14, Figura 15 e Figura 16 sono rappresentati il clima ondoso registrato dall'ondametro di Alghero. Nella rosa dei mari, gli eventi di moto ondoso, il cui numero indicato è in per mille, sono suddivisi per classi di altezza d'onda significativa (Hs) e direzione di provenienza (°N). Come indicato nella legenda a fianco, le classi individuate sono 10 di 1 m e, per quanto riguarda le direzioni di provenienza, i settori sono in totale 36 e di ampiezza pari a 10° ciascuno. Appare evidente che per l'ondametro di Alghero la direzione regnante coincide con la direzione dominante e si colloca intorno ai 300° N. I dati tabellari espressi in termini per mille che forniscono le relazioni tra direzione di provenienza ed altezza d'onda e tra periodo ed altezza sono riportate in Tabella 10 e Tabella 11.

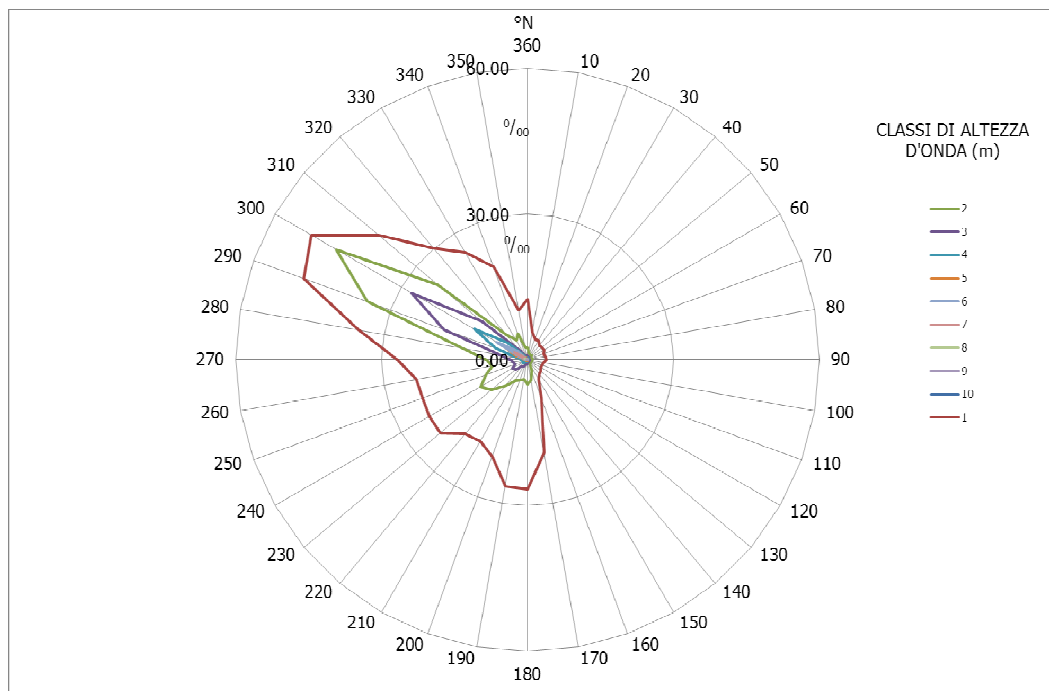


Figura 14- Rosa dei mari alla boa RON di Alghero

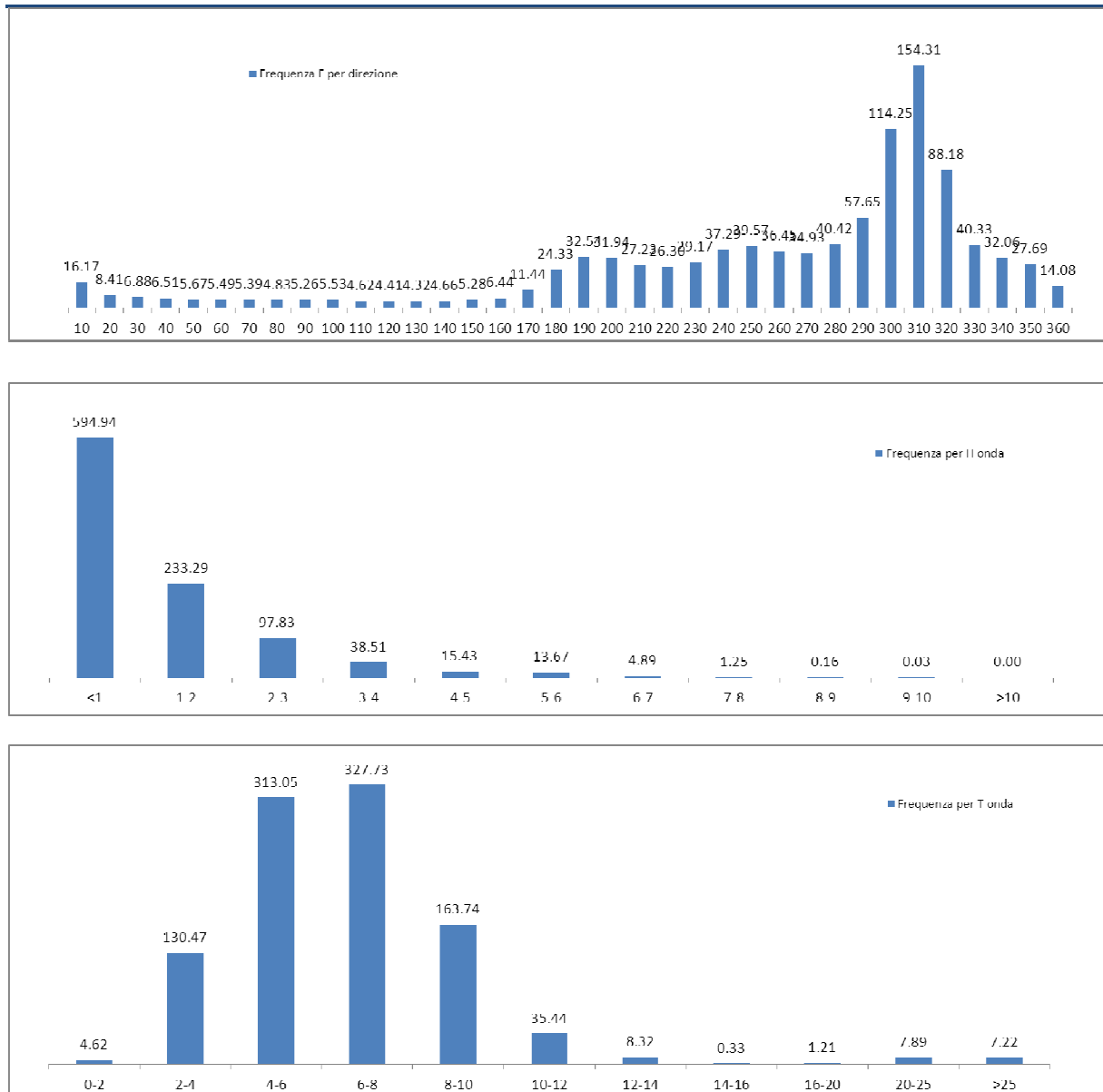


Figura 15- Clima ondoso alla boa Ron di Alghero

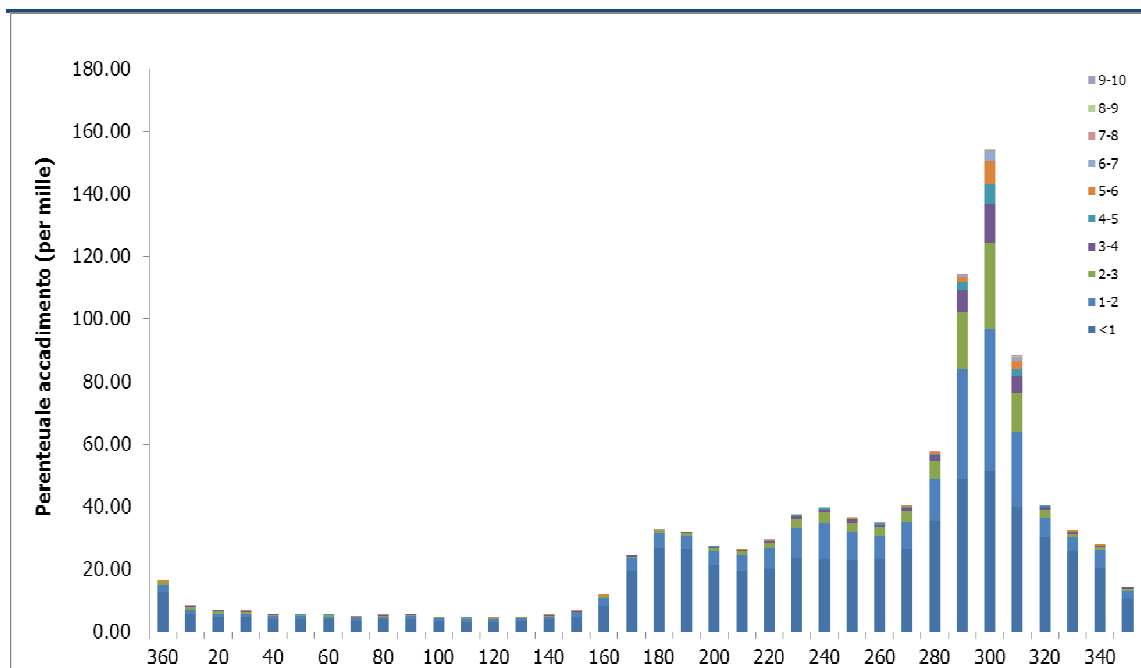


Figura 16- Clima ondoso alla Boa RON di Alghero per direzione e classi di altezza d'onda

Direzione	Altezza (m)											TOTALE
	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	>10	
0-10	12.52	2.47	0.80	0.25	0.11	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	16.17
10-20	5.74	1.37	0.70	0.47	0.07	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	8.41
20-30	4.53	1.36	0.60	0.26	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.88
30-40	4.56	1.13	0.55	0.21	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.51
40-50	3.82	1.24	0.33	0.19	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.67
50-60	3.99	0.99	0.31	0.13	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.49
60-70	3.96	0.92	0.33	0.11	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.39
70-80	3.53	0.90	0.21	0.13	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.83
80-90	3.82	1.03	0.26	0.11	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.26
90-100	3.91	1.02	0.38	0.14	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.53
100-110	3.40	0.84	0.23	0.11	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	4.62
110-120	3.13	0.89	0.31	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.41
120-130	3.16	0.80	0.28	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.32
130-140	3.56	0.75	0.22	0.10	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	4.66
140-150	3.77	0.99	0.37	0.12	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.28
150-160	4.67	1.29	0.34	0.13	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.44
160-170	8.32	2.49	0.45	0.12	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.44
170-180	19.34	4.26	0.50	0.16	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.33
180-190	26.68	4.95	0.65	0.19	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	32.54
190-200	26.48	4.08	0.90	0.37	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.94
200-210	21.24	4.49	0.99	0.41	0.08	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	27.23
210-220	19.40	4.96	1.48	0.37	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.30
220-230	19.93	6.83	1.80	0.46	0.14	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	29.17
230-240	23.45	9.55	3.14	0.88	0.16	0.11	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	37.29
240-250	23.30	11.16	3.55	1.11	0.28	0.09	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	39.57
250-260	23.01	9.02	2.76	1.09	0.26	0.24	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	36.45
260-270	23.19	7.39	2.98	0.78	0.45	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	34.93
270-280	26.65	8.43	3.37	1.11	0.52	0.26	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	40.42
280-290	35.40	13.57	5.59	1.78	0.70	0.51	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	57.65
290-300	48.95	35.02	18.24	7.01	2.68	1.52	0.61	0.17	0.03	0.01	0.00	114.25
300-310	51.30	45.49	27.64	12.66	6.11	7.44	3.03	0.61	0.03	0.00	0.00	154.31
310-320	39.90	24.03	12.31	5.42	2.38	2.80	0.89	0.33	0.08	0.02	0.00	88.18
320-330	30.07	6.55	2.29	0.98	0.26	0.11	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	40.33
330-340	25.48	4.65	1.27	0.47	0.14	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.06
340-350	20.38	5.76	1.00	0.39	0.12	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.69
350-360	10.38	2.59	0.70	0.26	0.11	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.08
TOTALE	594.94	233.29	97.83	38.51	15.43	13.67	4.89	1.25	0.16	0.03	0.00	1000.00

Tabella 10 Dati alla Boa RON di Alghero. Tabella direzioni - altezza - $\%_{\infty}$ di accadimento

Periodo	Altezza (m)											TOTALE
	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	>10	
0-2	4.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.62
2-4	129.81	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	130.47
4-6	274.90	37.54	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	313.05
6-8	159.18	142.45	24.43	1.62	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	327.73
8-10	9.57	52.18	68.18	26.08	5.60	1.93	0.17	0.02	0.00	0.00	0.00	163.74
10-12	0.47	0.33	4.58	10.56	8.98	8.45	1.77	0.28	0.01	0.00	0.00	35.44
12-14	0.12	0.01	0.01	0.26	0.79	3.24	2.86	0.86	0.15	0.03	0.00	8.32
14-16	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.08	0.05	0.01	0.00	0.00	0.33
16-20	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21
20-25	7.85	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.89
>25	7.06	0.08	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	7.22
TOTALE	594.94	233.29	97.83	38.51	15.43	13.67	4.89	1.25	0.16	0.03	0.00	1000.00

Tabella 11 Dati nella Boa RON di Alghero. Tabella periodo - altezza - $^{\circ}/_{\infty}$ di accadimento

Applicando il metodo della trasposizione al Paraggio di Capo Mannu si ottengono i dati riportati di seguito. La distribuzione delle mareggiate più intense risulta analoga a quella registrata ad Alghero. La direzione delle mareggiate più violente risulta compresa tra 280 e 330°N. Altre mareggiate intense (5-6 m di altezza d'onda) si registrano da libeccio.

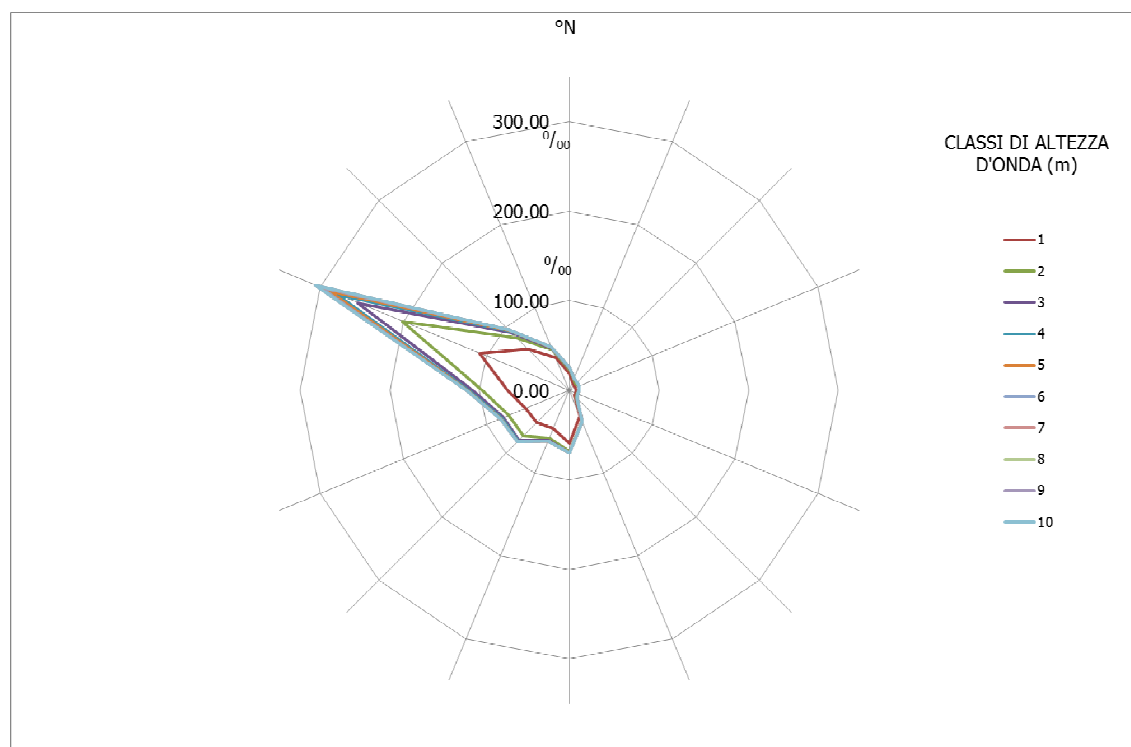


Figura 17- Rosa dei mari a Capo Mannu con i dati d'onda trasposti da Alghero

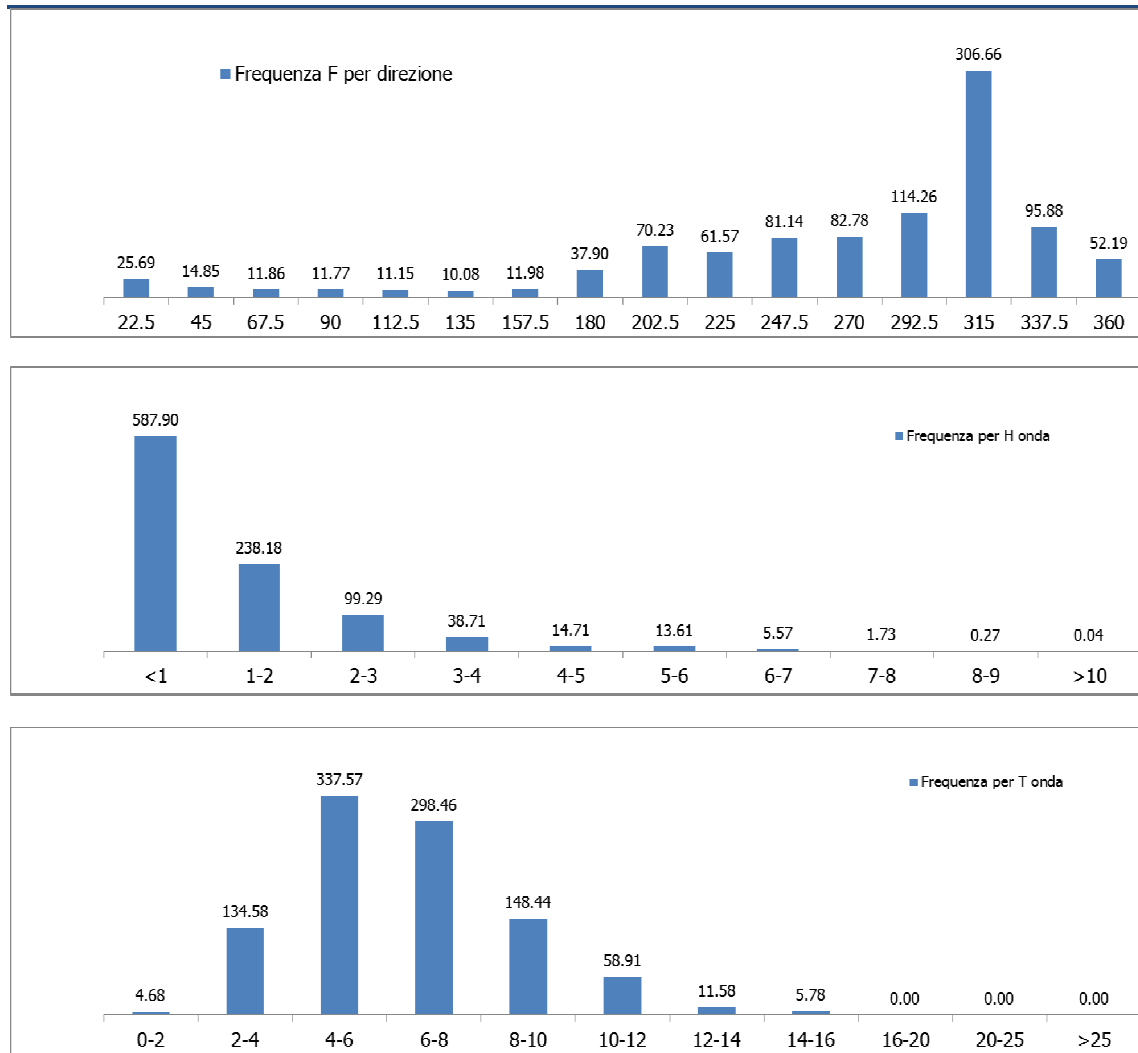


Figura 18- Clima ondoso trasposto al paraggio di Capo Mannu con i dati d'onda trasposti da Alghero

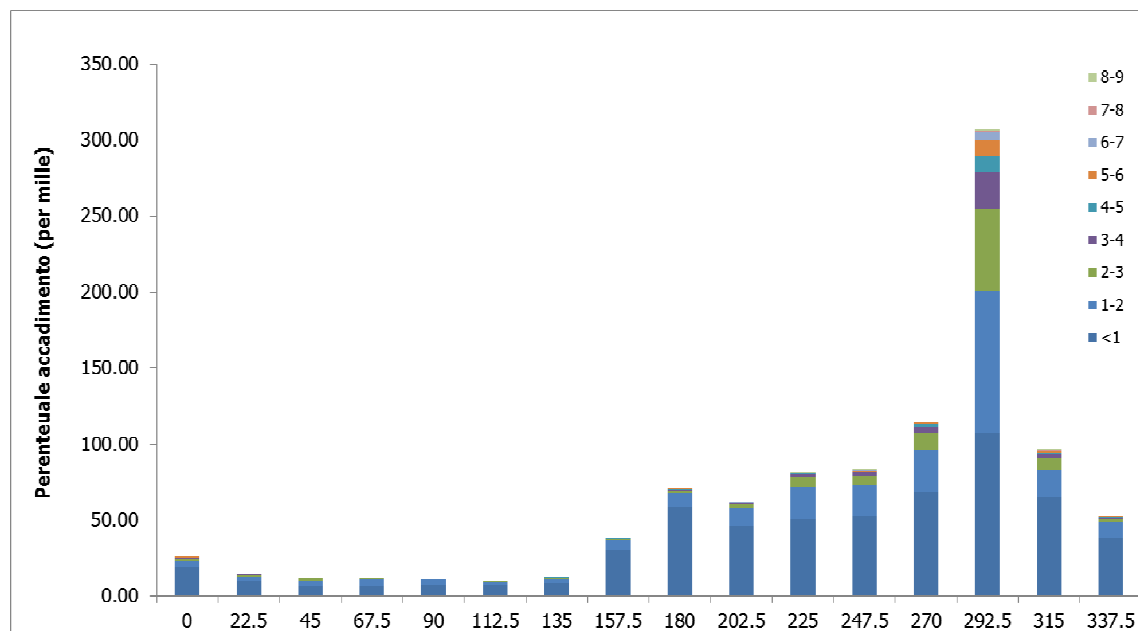


Figura 19- Clima ondoso trasposto al paraggio di Capo Mannu con i dati d'onda trasposti da Alghero

Direzione	Altezza (m)										TOTALE
	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	>10	
0-22.5	19.10	4.08	1.55	0.75	0.18	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	25.69
22.5-45	9.84	2.99	1.44	0.56	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.85
45-67.5	7.22	2.90	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.86
67.5-90	7.23	4.47	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.77
90-112.5	7.78	3.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.15
112.5-135	7.60	1.92	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.08
135-157.5	9.20	1.90	0.74	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.98
157.5-180	30.46	6.23	0.84	0.30	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.90
180-202.5	58.77	9.26	1.62	0.47	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	70.23
202.5-225	46.36	11.36	2.91	0.74	0.16	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	61.57
225-247.5	51.06	20.92	6.68	1.86	0.48	0.08	0.04	0.02	0.02	0.00	81.14
247.5-270	52.97	19.77	6.59	2.18	0.73	0.42	0.09	0.01	0.01	0.00	82.78
270-292.5	68.75	27.48	11.26	3.94	1.53	1.03	0.22	0.05	0.01	0.00	114.26
292.5-315	107.66	93.24	53.89	24.12	10.16	10.92	4.90	1.52	0.22	0.04	306.66
315-337.5	65.02	18.22	7.31	2.85	1.03	0.99	0.31	0.14	0.01	0.00	95.88
337.5-360	38.88	10.06	2.09	0.82	0.24	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	52.19
TOTALE	587.90	238.18	99.29	38.71	14.71	13.61	5.57	1.73	0.27	0.04	1000.00

Tabella 12 Dati al paraggio di Capo Mannu (trasposizione da Alghero). Tabella periodo - altezza - % di accadimento

7 VALORI ESTREMI DI MOTO ONDOSO A LARGO

L'individuazione dei valori estremi di moto ondoso viene in maniera indipendente a partire dai dati di vento e di mare trasposti da Alghero. L'analisi viene fatta per direzioni di 45°, considerando settori di 45° a cavallo della determinata direzione, ed è finalizzata a determinare, per fissati tempi di ritorno e direzioni di provenienza, il valore della altezza significativa massima applicando leggi di distribuzione statistica all'insieme campionario.

Per quanto riguarda i valori estremi ottenuti dai dati di vento della stazione di Carloforte in funzione del fetch massimo in una determinata direzione, la metodologia applicata basata sulle equazioni di Jonswap fornisce i valori di Tabella 13 (i dati di vento al variare del tempo di ritorno fanno riferimento alla statistica di Weibull). Le onde $H_{1/10}$ e $H_{1/100}$ sono definite attraverso la metodologia di Reylegh in funzione dell'onda significativa H_{M0} .

Dir (°N)	Tr	F (km)	V (m/s)	H_{M0}	T_p	$H_{1/10}$	$H_{1/100}$
0	2	250.6	15,7	4.01	9.85	5.10	6.70
0	10	250.6	20,1	5.14	10.70	6.53	8.58
0	30	250.6	23,6	6.04	11.29	7.66	10.08
0	50	250.6	25,3	6.47	11.55	8.22	10.80
0	100	250.6	27,7	7.08	11.91	9.00	11.83
45	2	68.9	14,2	1.90	6.20	2.42	3.18
45	10	68.9	16,4	2.20	6.50	2.79	3.67
45	30	68.9	17,8	2.39	6.68	3.03	3.99
45	50	68.9	18,3	2.45	6.74	3.12	4.10
45	100	68.9	19,1	2.56	6.84	3.25	4.28
90	2	20.3	16,8	1.22	4.36	1.55	2.04

Dir (°N)	Tr	F (km)	V (m/s)	H _{M0}	T _P	H _{1/10}	H _{1/100}
90	10	20.3	20,5	1.49	4.66	1.89	2.49
90	30	20.3	23,1	1.68	4.85	2.13	2.81
90	50	20.3	24,3	1.77	4.93	2.25	2.95
90	100	20.3	25,9	1.88	5.04	2.39	3.15
135	2	86.2	17,4	2.61	7.14	3.31	4.36
135	10	86.2	21,0	3.15	7.61	4.00	5.26
135	30	86.2	23,4	3.51	7.89	4.46	5.86
135	50	86.2	24,5	3.67	8.01	4.67	6.14
135	100	86.2	26,1	3.91	8.18	4.97	6.54
180	2	267.7	16,0	4.23	10.14	5.37	7.06
180	10	267.7	18,6	4.92	10.66	6.24	8.21
180	30	267.7	20,2	5.34	10.95	6.78	8.92
180	50	267.7	20,8	5.50	11.06	6.98	9.18
180	100	267.7	21,7	5.74	11.22	7.28	9.58
225	2	398.1	14,8	4.77	11.27	6.06	7.97
225	10	398.1	17,9	5.77	12.01	7.33	9.64
225	30	398.1	19,7	6.35	12.40	8.06	10.60
225	50	398.1	20,4	6.58	12.54	8.35	10.98
225	100	398.1	21,4	6.90	12.75	8.76	11.52
270	2	418.1	15,9	5.25	11.74	6.67	8.77
270	10	418.1	20,7	6.84	12.81	8.68	11.42
270	30	418.1	23,9	7.89	13.44	10.03	13.18
270	50	418.1	25,4	8.39	13.72	10.66	14.01
270	100	418.1	27,5	9.08	14.09	11.54	15.17
315	2	398.4	17,3	5.58	11.88	7.08	9.32
315	10	398.4	22,1	7.13	12.89	9.05	11.90
315	30	398.4	25,4	8.19	13.50	10.40	13.68
315	50	398.4	26,9	8.67	13.76	11.02	14.48
315	100	398.4	29,0	9.35	14.11	11.88	15.62

Tabella 13 Valori estremi di altezza d'onda nella boa Virtuale Capo Mannu

Per quanto riguarda i valori estremi a partire dai dati d'onda trasposti da Alghero si utilizza anche in questo caso il metodo delle durate parziali sopra soglia (POT "Peak Over Threshold"- Goda, 1988). L'indipendenza campionaria della serie dei massimi è assicurata imponendo un valore di soglia relativo ai dati di altezza d'onda $H_s > 4\text{m}$ e fissando un intervallo che intercorre tra due eventi successivi pari a 24 ore.

L'analisi statistica è stata condotta per il complesso di tutte le direzioni (verifica omnidirezionale) che interessano la boa virtuale. Ad ogni valore di altezza d'onda è stato associato una probabilità di non superamento così determinata:

$$F(x_i) = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}$$

essendo N il numero complessivo di dati a disposizione, m il numero di ordine dell'i-esimo dato, α e β parametri funzione del tipo di distribuzione statistica adottata, il cui valore è riportato in Tabella 14.

Distribuzione	α	β
Gumbel	0.44	0.12
Frechet	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$
Weibull	$0.2 + 0.27/k^{0.5}$	$0.2 + 0.23/k^{0.5}$

Tabella 14 Parametri α e β

La relazione che lega l'altezza d'onda alla probabilità di non superamento è di tipo lineare $H = B + Ay$ ed è funzione della variabile ridotta y, determinata a seconda delle distribuzioni:

$$y = -\ln(-\ln(F)) \quad (\text{Gumbel})$$

$$y = k[(-\ln(F))^{-1/k} - 1] \quad (\text{Frechet})$$

$$y = [(-\ln(1 - F))^{1/k}] \quad (\text{Weibull})$$

I parametri B e A sono calcolati utilizzando il metodo dei minimi quadrati, mentre k è fissato a priori:

k=2.5, 3.33, 5.0, 10.0 (Frechet)

k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0 (Weibull)

In Figura 20 è riportato a titolo esemplificativo l'andamento dei dati estremi e le rette interpolanti sul piano di Gumbel per il settore 292.5-337.5°N.

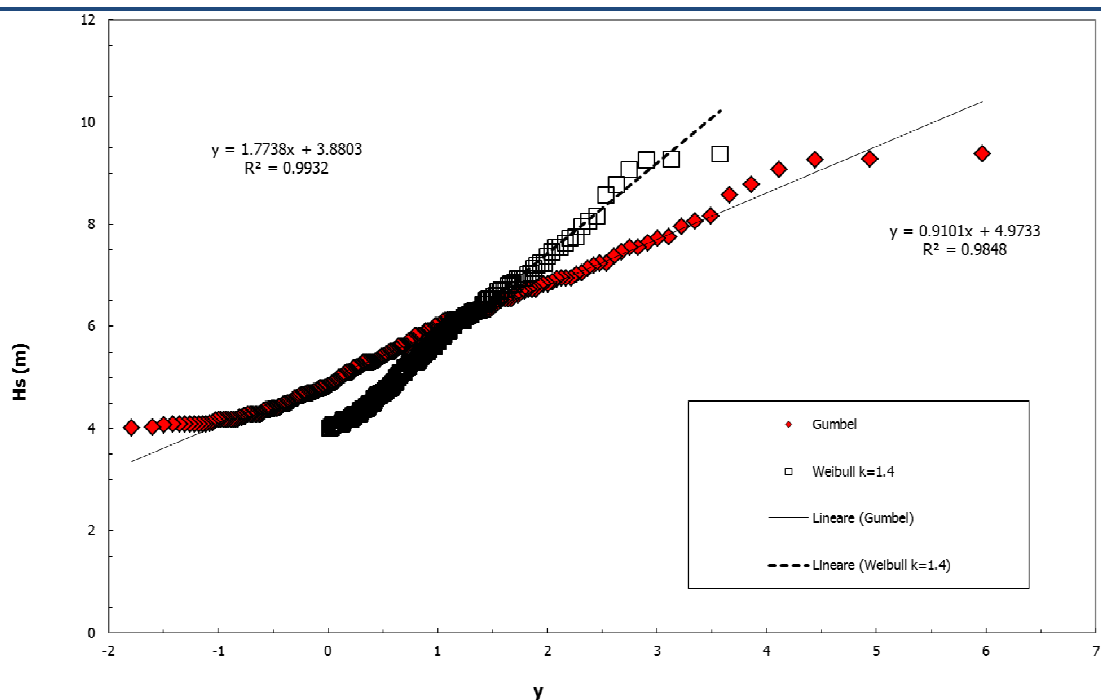


Figura 20 Andamento dei dati sul piano di Gumbel dei dati impiegati per la statistica nel settore 292.5-337.5° N (direzione 315° N)

I massimi valori di altezza d'onda significativa al variare del tempo di ritorno con i dati trasposti dall'ondametro di Alghero sono riportati in Tabella 15. Si fa riferimento alla legge di Weibull con $k=1.4$ che è quella che presenta il migliore coefficiente di correlazione

Dir	225°N		270°N		315°N	
Tr	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
2	-	-	6.6	10.5	7.8	11.4
10	4.8	9.0	8.2	11.7	9.2	12.4
30	5.2	9.3	9.2	12.4	10.1	13.0
50	5.3	9.4	9.7	12.7	10.5	13.2
100	5.5	9.6	10.3	13.1	11.0	13.5

Tabella 15 Valori estremi di altezza d'onda nella boa virtuale Campo Mannu

Come tempo di ritorno di riferimento si considera $T_r=50$ anni. Le due metodologie di calcolo forniscono dati analoghi nel settore di traversia principale (180-360°N) con valori leggermente più elevati con la metodologia di trasposizione. Per il I e II quadrante non vi sono dati significativi e si ritiene opportuno fare riferimento alla statistica a partire dai dati della velocità del vento. Vi è comunque da tenere presente che Sant'Arena Scoada, come meglio visibile nel seguito, è protetta a Nord da Capo Mannu, per cui tali direzioni di moto ondoso sono sostanzialmente ininfluenti.

I risultati riassuntivi ricavati sono indicati in Tabella 16.

Dir	0°N		45°N		90°N		135°N		180°N		225°N		270°N		315°N	
Tr	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
50	6.47	11.55	2.39	6.68	3,8	8,2	5,8	10,8	5,1	10,5	5.3	9.4	9.7	12.7	10.5	13.2

Tabella 16 Valori estremi di altezza d'onda nella boa virtuale Capo Mannu ricavati nel presente studio

7.1 CONFRONTO CON DATI PGRA

Nel 2015 in accordo al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni è stato redatto da parte dell'Autorità di Bacino Regionale della Sardegna uno studio sul rischio di inondazione delle aree costiere. E' stata applicata una metodologia di analisi che a partire da dati di vento e degli ondometri ha consentito di definire l'altezza d'onda a largo per l'intera isola ed i valori di innalzamento del livello meteo marino. Di seguito si riportano i principali valori dei dati climatici che sono stati ricavati per il paraggio in esame, indicato nel Dominio n. 1 alle tavole 039-032 e 034 confrontati con quelli del presente studio

Tr	PGRA				Presente studio			
Anni	H0	Tp	Dir	V (m/s)	H0	Tr	Dir	V (m/s)
2	8.2	12.3	280	15,7	7.8	11.4	315	17.3
20	9.9	12.9	280	19.6				
50					10.5	13.2	315	26.9

Tabella 17 Confronto tra dati PGRA e presente studio per il sito di S'Arena Scoada

Tr	PGRA				Presente studio			
Anni	H0	Tp	Dir	V (m/s)	H0	Tr	Dir	V (m/s)
2	8.4	12.43	310	15,7	7.8	11.4	315	17.3
20	10.1	13.0	310	19.6				
50					10.5	13.2	315	26.9

Tabella 18 Confronto tra dati PGRA e presente studio per il sito di Su Pallosu

I valori derivati dal PGRA risultano simili a quelli impiegati nel presente studio. La definizione dei fetch più dettagliata nel presente studio, ha fornito direzioni di provenienza leggermente ruotate verso il maestrale, sebbene questa deviazione non abbia in pratica effetto sulla

propagazione del moto ondoso verso riva. Anche le velocità di vento presentano simili valori con quelli del presente studio che appaiono leggermente più cautelativi.

I valori del sovrizzo dovuto a marea/vento e depressione barica vengono valutati variabili tra 0,6 m per $T_r=2$ anni e 0,83 m per $T_r=20$ anni. Nel presente lavoro il contributo massimo è stato ritenuto di 70 cm circa (non funzione del T_r). Essendo il sovrizzo funzione di fenomeni non dipendenti e la cui concomitanza non segue le leggi probabilistiche degli eventi estremi si è stimato un valore massimo di circa 50 cm.

8 STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDO SO VERSO RIVA

In questo capitolo sono illustrati i risultati ottenuti dall'applicazione al caso in esame del software del pacchetto SMS (CMS-Wave). Infatti, note le caratteristiche delle onde di riferimento a largo e costruito il modello numerico è possibile descrivere, con buona approssimazione, quale siano le condizioni a riva. Nei successivi paragrafi sono descritte le fasi della costruzione del modello ed i risultati ottenuti dalle simulazioni.

8.1 Propagazione sotto costa dei dati di moto ondoso

Per definire il clima meteomarino in prossimità dei diversi siti è stato eseguito uno studio di propagazione del moto ondoso da largo verso riva dei valori estremi precedentemente determinati mediante il modello di rifrazione diretta CMS-WAVE. Tale modello consente di considerare i principali meccanismi che influiscono sulla propagazione delle onde su fondali via via decrescenti verso la terra ferma. La presenza di batimetrie non completamente regolari comporta che oltre ai principali fenomeni di shoaling e rifrazione non possano essere ritenuti trascurabili i processi dissipativi di attrito sul fondo e frangimento.

La costruzione del modello si articola:

- definizione delle batimetrie;
- la generazione della griglia necessaria per il calcolo numerico alle differenze finite;
- la definizione delle condizioni al contorno;
- periodo di simulazione e passo di integrazione.

Per la costruzione delle batimetrie a largo e sottocosta sono utilizzati i dati forniti dalla Carta Nautica, pubblicata dall'Istituto Idrografico della Marina.

Con le informazioni a disposizione è stata generata una griglia, collocata in modo che il sito oggetto di studio sia in posizione centrale. In questo modo la zona di progetto non è influenzata da effetti di bordo dovuti al contorno della griglia.

Il modello di propagazione è ottimizzato per direzioni di provenienza in una range $\pm 45^\circ$ rispetto al fronte di propagazione. La griglia è orientata a $90^\circ N$ con dimensioni 17,8 kmx19,7 e celle di dimensioni 25 m. All'interno è stata ricavata una griglia annidata di dimensioni 3,0x4,5 km (S'Arena Scoada) con celle 10 m (Figura 21).

Le griglie sono create come supporto per il modello CMS-WAVE, modello bidimensionale alle differenze finite basato sulla conservazione dell'azione dell'onda utilizzato per la propagazione del moto ondoso.

Trovandoci in acque alte in presenza di fetch efficaci ristretti, per ogni onda è adottato uno spettro di tipo JONSWAP:

$$S(f) = \gamma e^{\alpha} \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^2 f^5} e^{-5/4 \left(\frac{f}{f_p} \right)^4}$$

dove γ è stato assunto pari a 3.3 per $T_p \leq 10$ pari a 4 per $T_p > 10$, mentre α è stato rispettivamente assunto pari a 4 nel primo caso, 8 nel secondo ed f_p il periodo di picco (esprimibile come l'inverso del periodo di picco). I risultati della propagazione sono sintetizzati di seguito in forma tabellare e grafica per tutti gli spettri ondosi simulati (tipo JONSWAP). Nei grafici che seguono sono utilizzati i seguenti simboli:

H_{s0} = altezza d'onda significativa al largo;

Az_{m0} = direzione di provenienza al largo;

T_{s0} = periodo d'onda al largo;

$k = H_{s0}/H_{sr}$

Az_{mr} = direzione di provenienza a riva;

H_{sr} = altezza d'onda significativa a riva;

T_{sr} = periodo d'onda a riva;



Figura 21. Batimetria di riferimento e griglia di calcolo - (direzioni 225-270-315°)

Gli eventi estremi analizzati si riferiscono ad eventi con $T_r=50$ anni che vengono riportati (Tabella 19) insieme ai dati di velocità del vento li hanno generati.

Caso	Dir (°N)	Hs(m)	Tp (s)
1	225	5.3	9.4
2	270	9.7	12.7
3	315	10.5	13.2
4	0	5.16	9.93

Tabella 19 Eventi estremi analizzati

Il modello è stato applicato considerando l'effetto dell'attrito di fondo (considerato in termini di coefficiente di Manning e posto pari a $0.02 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$), degli effetti non lineari, di frangimento, di diffrazione. Date le dimensioni non elevate delle griglie di indagine si è trascurato il contributo del vento nella zona di indagine.

I risultati hanno evidenziato una significativa esposizione del paraggio di S'Arena Scoada per tutte le direzioni di provenienza di maggiore esposizione (III e IV quadrante), mentre è sostanzialmente protetto da Capo Mannu per la direzione di 0°N.

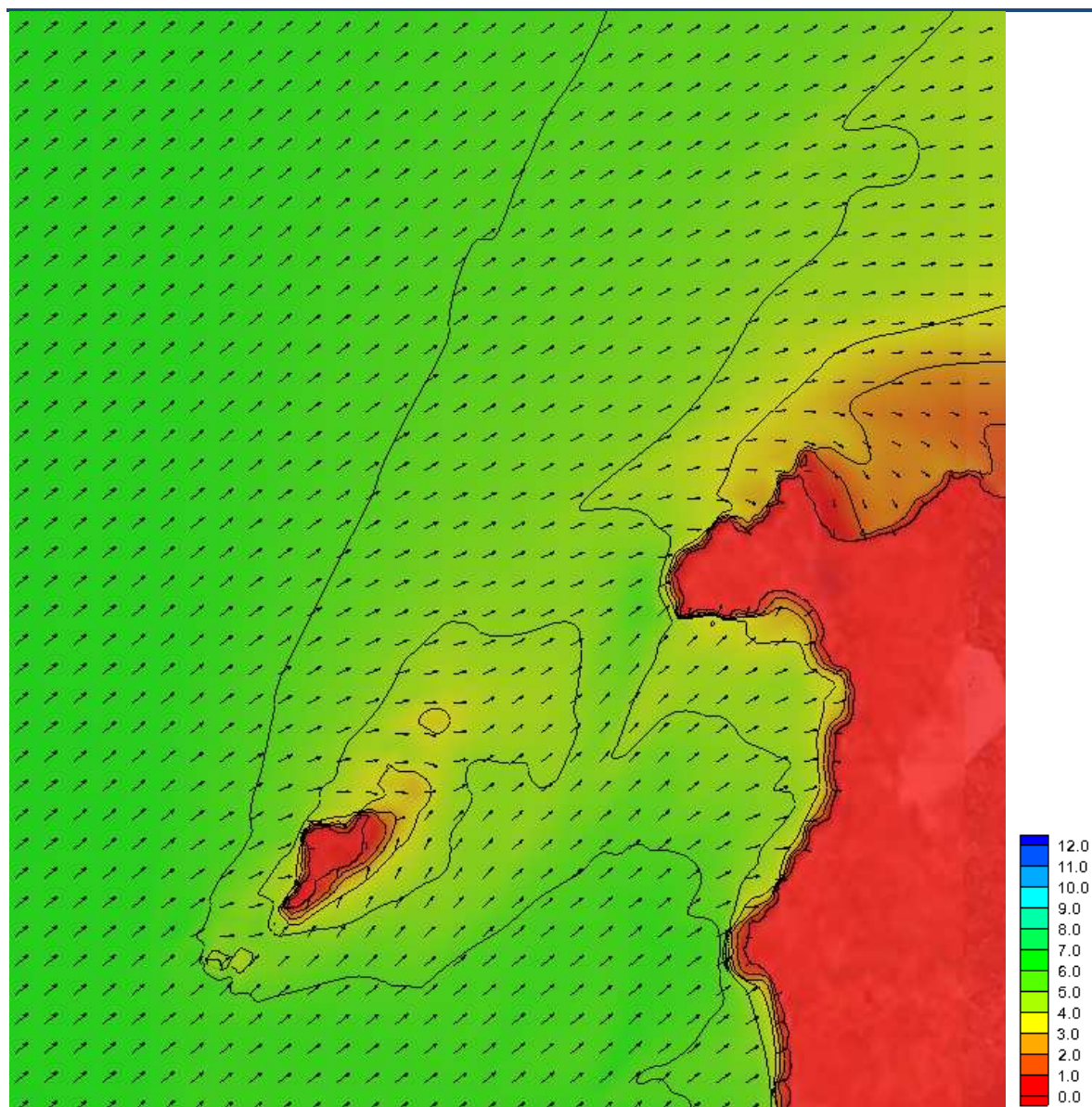


Figura 22 Piano d'onda caso 1 (Dir=225°N)-legenda altezza d'onda in m

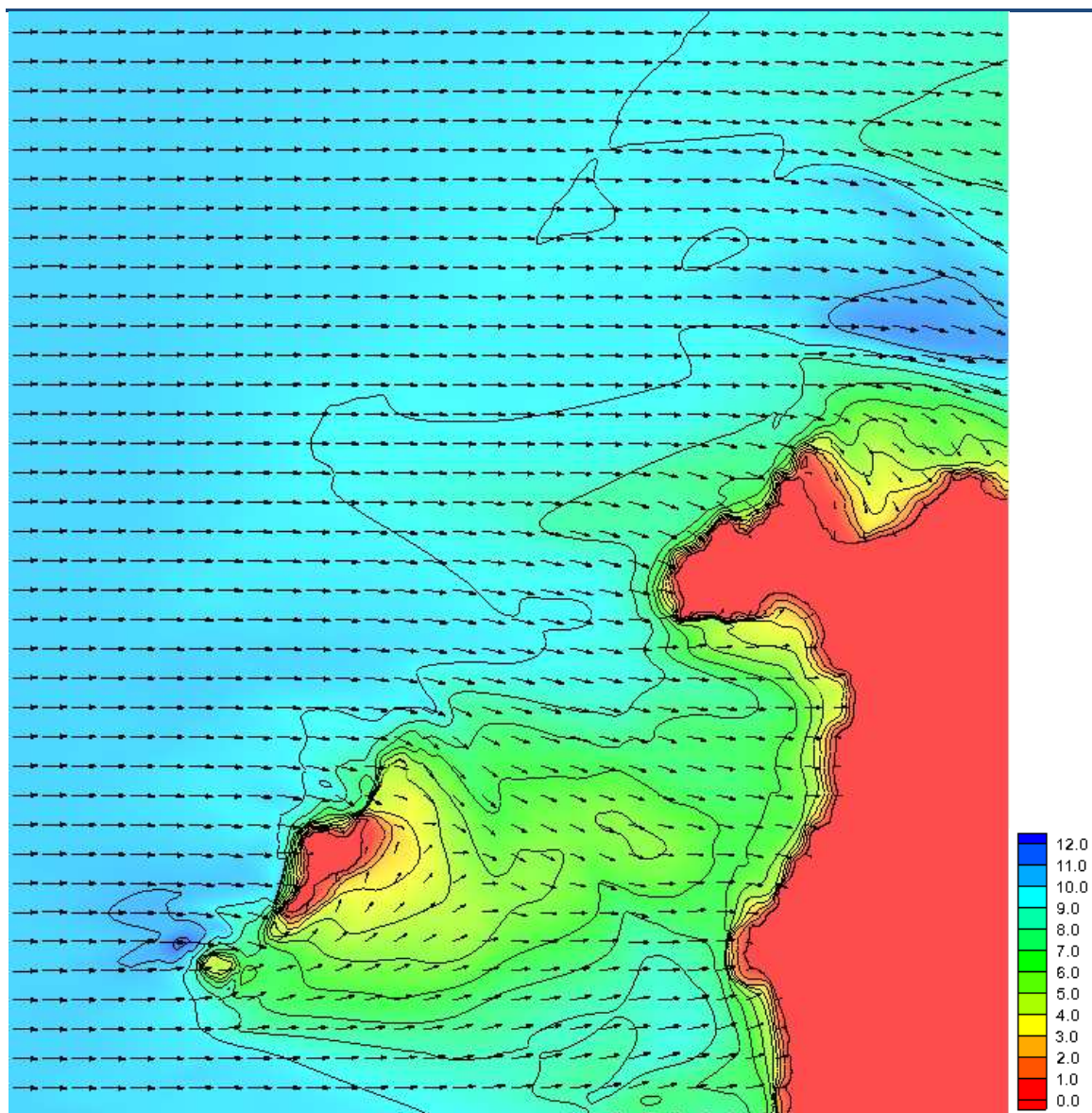


Figura 23 Piano d'onda caso 2 (Dir=270° N)-legenda altezza d'onda in m

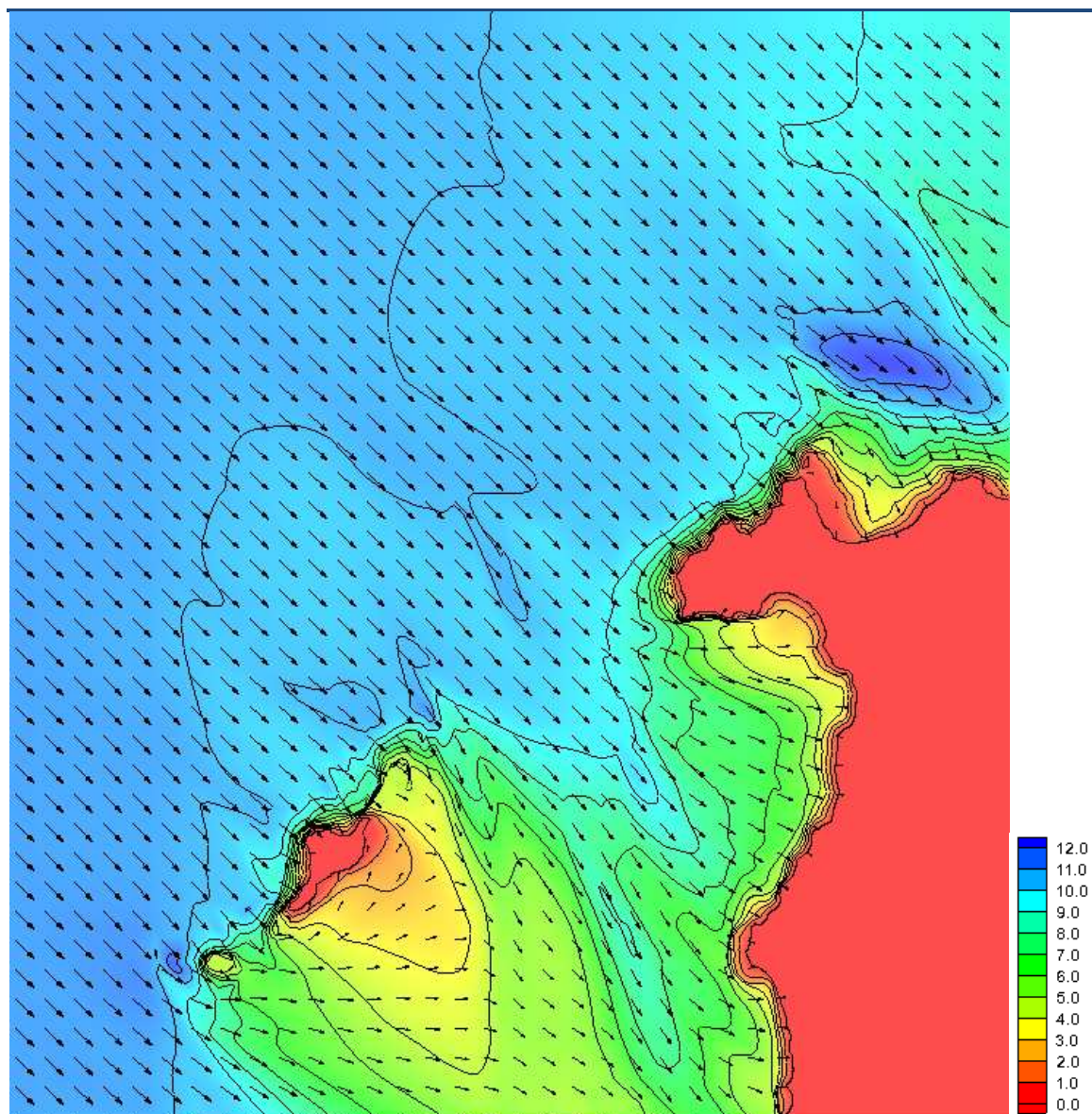


Figura 24 Piano d'onda caso 3 (Dir=315° N)-legenda altezza d'onda in m

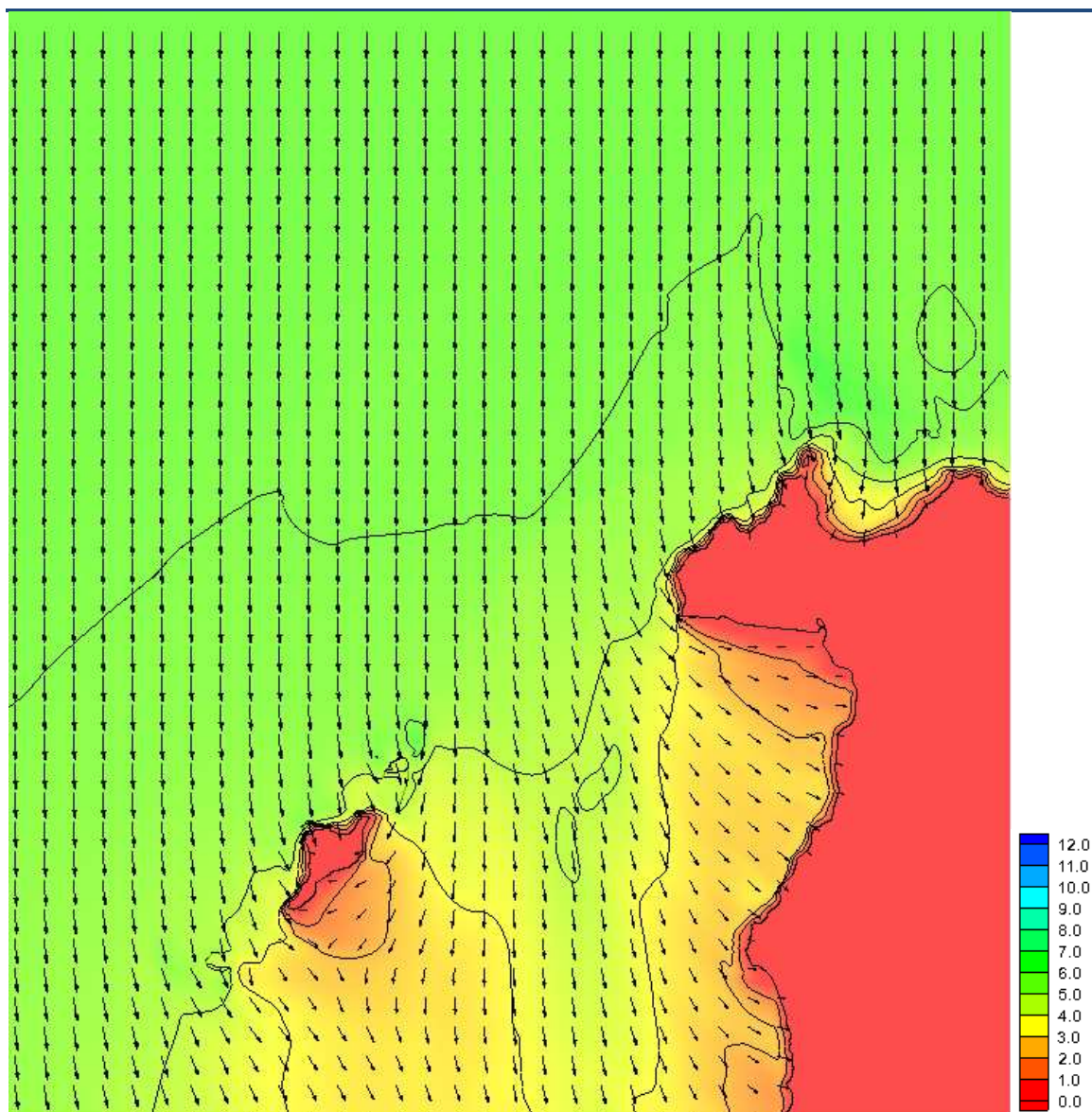


Figura 25 Piano d'onda caso 4 (Dir=0°N)-legenda altezza d'onda in m

Più in dettaglio si osserva che risulta maggiormente sollecitante la situazione per la direzione di 270° N, in cui l'onda mantiene valori di 2 m a circa 100 metri dalla linea di riva (distanza pari ad una lunghezza d'onda). In effetti propagandosi verso riva, con i successivi frangenti l'onda tende a ridurre l'altezza fino pochi decimetri. Valori analoghi si hanno per la direzione di maestrale, che in particolare nel tratto più a sud non risente più della diffrazione del promontorio di Capo Mannu.

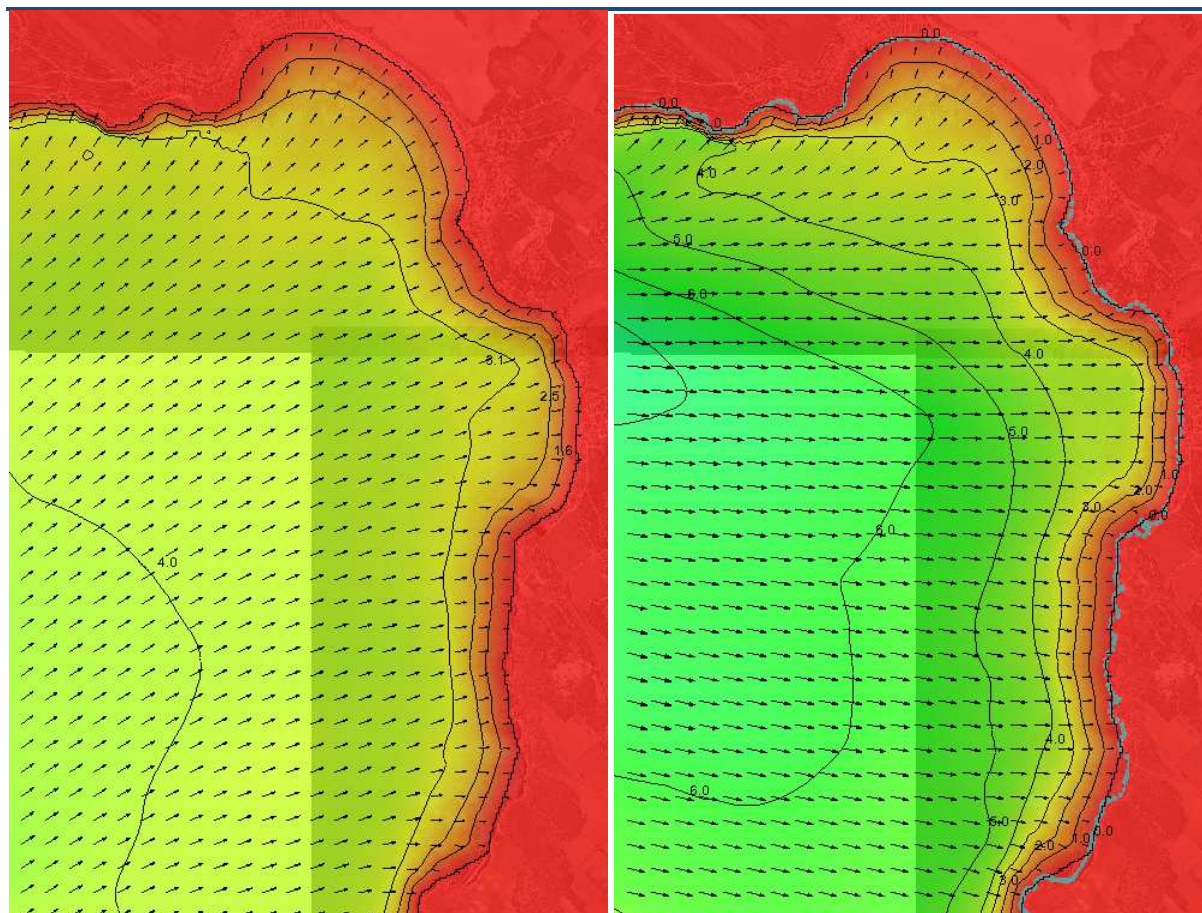


Figura 26 Dettaglio del piano d'onda a S'Arena Scoada caso 1 (Dir=235°N) e caso 2 (Dir=270°N)

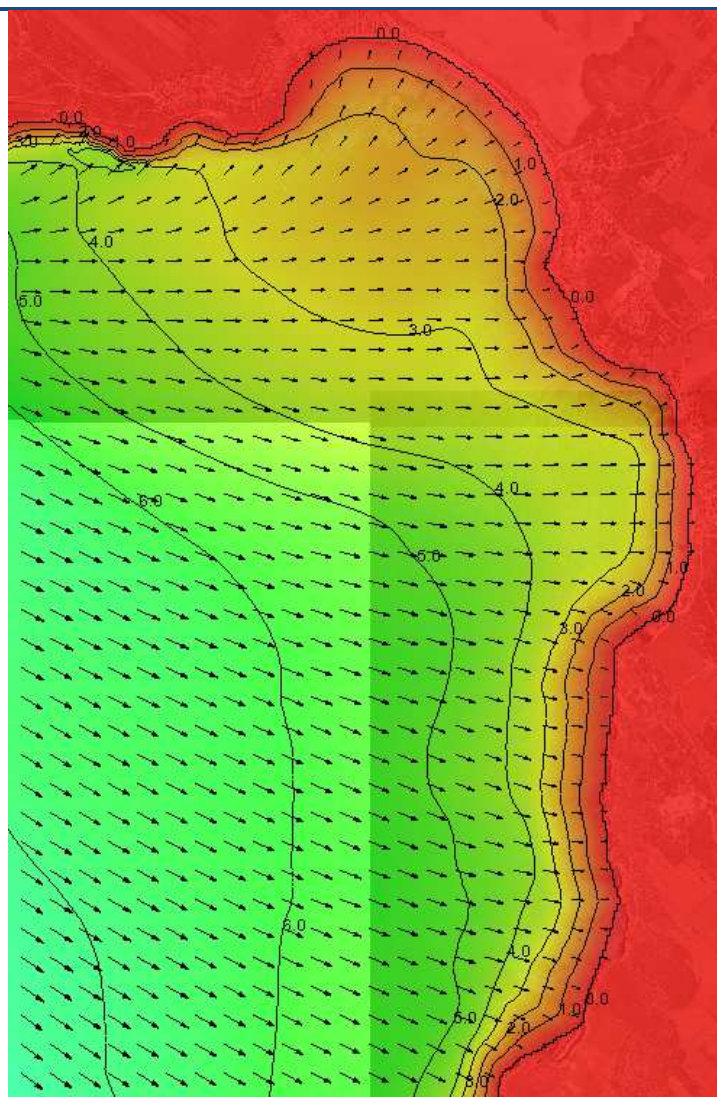


Figura 27 Dettaglio del piano d'onda a S'Arena Scoada caso 3 (Dir=315°N)

9 CARATTERISTICHE DELLE OPERE DI DIFESA

I parametri principali di progettazione delle opere marittime sono legati alla altezza d'onda, al suo periodo ed al fondale in cui viene inserita l'opera. In questo caso vengono proposte opere emerse da disporre nella zona di risalita del moto ondoso su cui i principali effetti di instabilità sono dovuti a scalzamento delle opere.

In assenza di indicazioni precise sulla morfologia dei fondali e della granulometria delle spiagge si fanno delle valutazioni di massima sulla risposta della spiaggia sotto l'azione del moto ondoso. In particolare si considera una sezione tipica a S'Arena Scoda come in Figura 28.

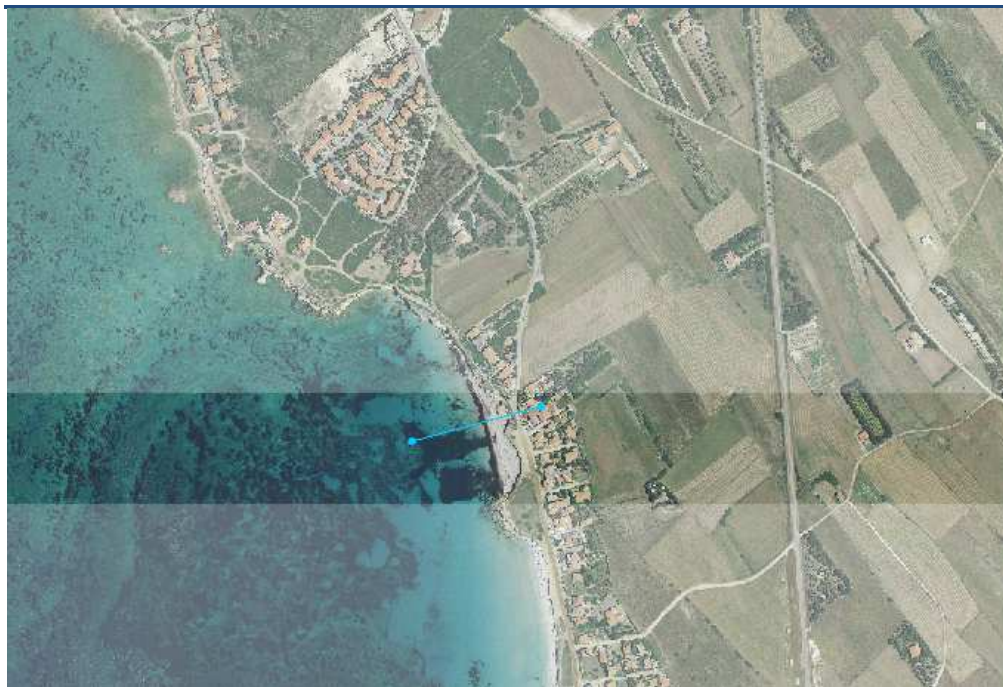


Figura 28 Transetto a Sant'Arena Scoada

La pendenza media dei fondali rilevabile dalle carte nautiche risulta di circa il 2% presso S'Arena Scoada. Per la granulometria si è assunto sabbia con $d_{50}=1$ mm.

L'azione del moto ondoso è riferita a $T_r=50$ anni e presenta i seguenti valori:

- $H_s=2.8$ $T_p=12.5s$ per S'Arena Scoada (corrispondente alla direzione di $270^\circ N$) ad un fondale di riferimento di 4 m

CASO DI S'ARENA SCOADA

Il profilo di spiaggia appare stabile anche sotto mareggiate con $T_r=50$ anni. L'azione del moto ondoso (ipotizzato con un sovrizzo di marea di 0.3m ma senza altri effetti di "storm surge" sopra descritti che possono portare ad innalzamenti del l.m.m ben più elevati) arriva ad interessare anche il piede della retrostante falesia (coerentemente con i fenomeni di scalzamento presenti) sul litorale. Evidente dal profilo dell'altezza d'onda la successione di frangenti (su 4 m di fondale e su circa 3 dove si ha anche possibile formazione di accumuli di fondo (ripples)

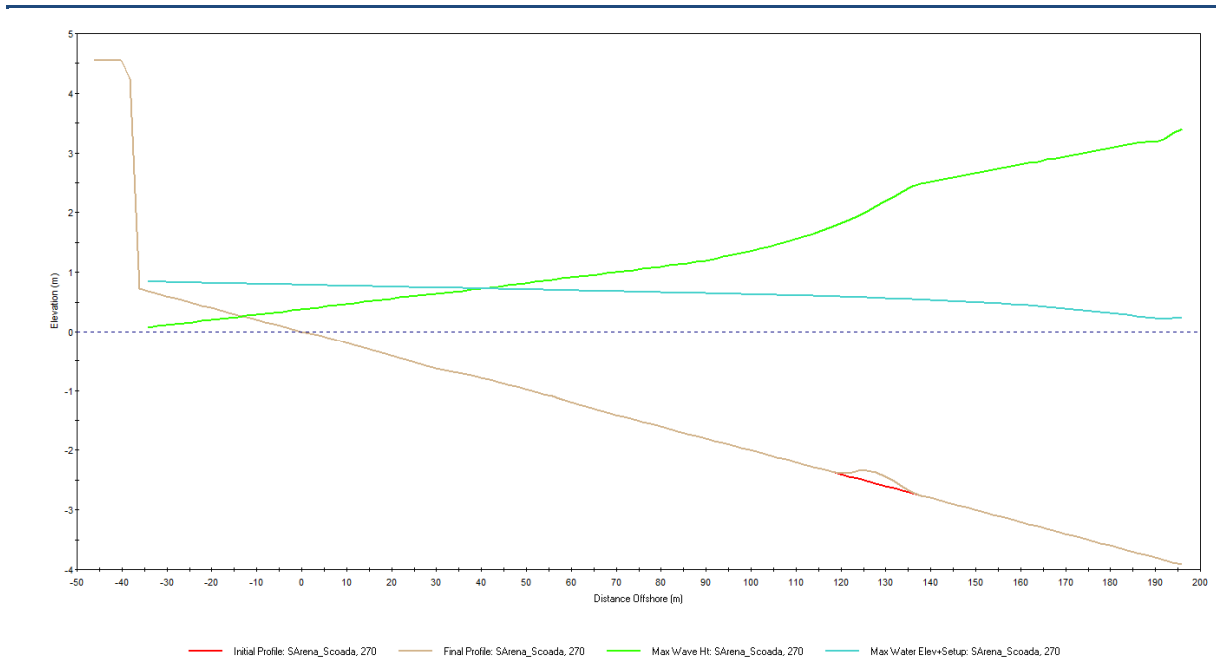


Figura 29 Andamento del profilo d'onda a S'Arena Scoada per mareggiate da 270°N, Tr=50 anni nello stato attuale

Nel profilo di progetto si osserva come ad essere interessati dal fenomeno erosivo è il piede della nuova scogliera di protezione. L'elevato peso dei massi previsti (nella fascia 2-4 t) consente di evitare fenomeni di rotolamento dei massi che a seguito di tali scalzamenti tenderanno a spofondare sotto il peso proprio.

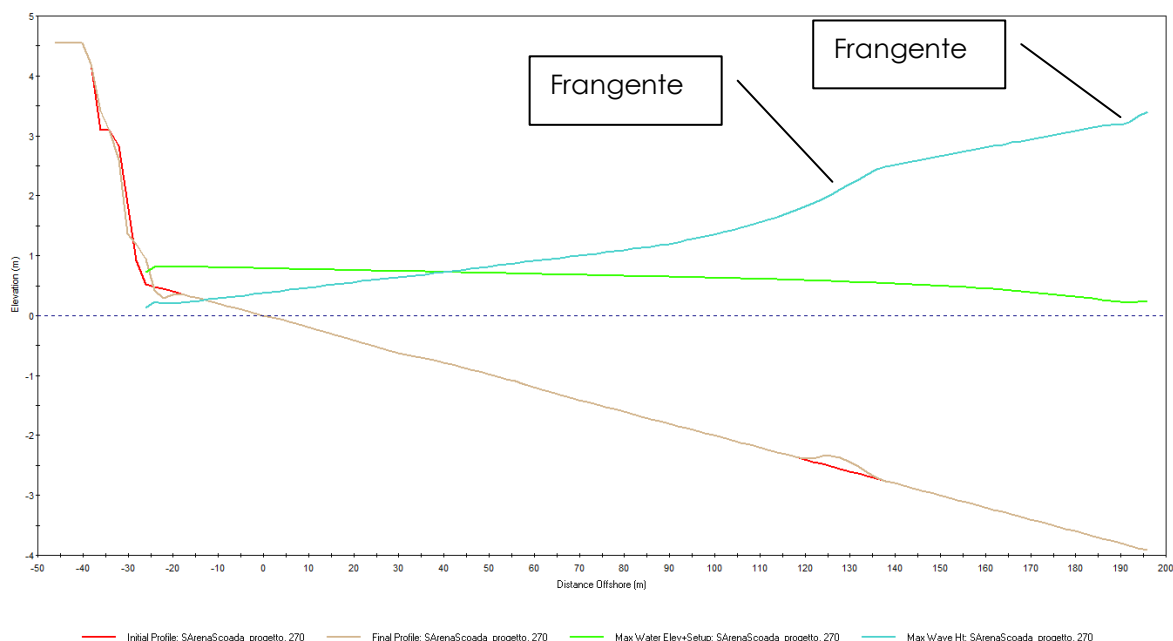


Figura 30 Andamento del profilo d'onda a S'Arena Scoada per mareggiate da 270°N, Tr=50 anni nello stato di progetto

Per quanto riguarda le strutture previste, le scogliere in massi di protezione a S'Arena Scoada (indicativamente con scarpa 1:2 e massi da 2-4 t) presentano stabilità e scarsa propensione al danneggiamento diretto. Sono però suscettibili di sprofondamenti a causa dello scalzamento al

piede, qualora il basamento fosse costituito da sabbia e non da roccia. Volutamente sono stati adottati massi di grande diametro per evitarne il rotolamento e consentire il semplice approfondimento fino al raggiungimento di substrati stabili.

9.1 Confronto con dati PGRA

La risalita stimata nel paraggio di S'Arena Scoada, tenendo conto dei valori dei vari effetti di sovrалzo comprensivi di marea, effetto barico, stormsurge da vento e set-up di moto ondoso sono stimati nel PGRA come segue:

Tr	S'Arena Scoada
2	2.36
20	2.59

I valori risultano ben più elevati rispetto a quelli determinati nel presente lavoro che fornisce setup massimi di moto ondoso di circa 1 m a S'Arena Scoada (per Tr=50 anni), inclusivi di 30 cm di marea.

Prendendo a riferimento le stesse onde di ingresso del PGRA (per Tr=2 anni) e gli stessi fondali di riferimento (10 m) i valori massimi di risalita assumono valori di circa 1.25m a S'Arena Scoada (Figura 31), in linea pertanto con i valori di PGRA considerando che deve essere aggiunto il valore di sovrалzo (marea+sovrалzo barico+stormsurge vento) stimato in circa 50 cm.

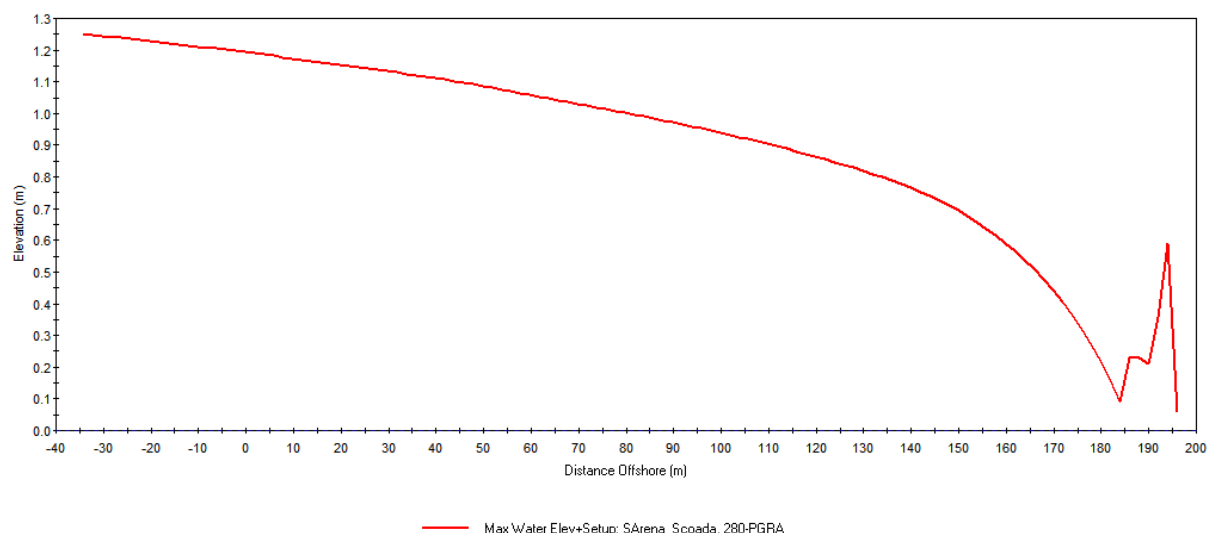


Figura 31 Andamento del sovrалzo a S'Arena Scoada per mareggiate come da PGRA, Tr=2 anni

I risultati confermano che il problema della risalita va affrontato con dati di maggiore dettaglio essendo un fenomeno estremamente influenzato dalla modalità di propagazione in acque

basse e dall'attenuazione che subisce il moto ondoso. Su questo incide la topografia che alla risoluzione della carta nautica non costituisce base attendibile su cui effettuare approfondimenti.

10 VALUTAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio illustra le caratteristiche del clima meteomarinò nel paraggio di S'Arena Scoada dove sono presenti diffusi fenomeni erosivi delle falesie. L'analisi meteomarina è stata condotta a partire da dati di vento e di mare disponibili (stazione RNM di Carloforte e Boa Ondametrica di Alghero, ora non più funzionante) facendo una analisi statistica delle massime onde attese nel paraggio per diversi tempi di ritorno.

Attraverso modello di propagazione diretto è stato analizzato il clima sottocosta. Tali modelli sono stati basati su dati batimetrici ricavati dalle carte nautiche, mentre sarebbe auspicabile avere anche dati batimetrici (almeno fino a 200 m dalla linea di riva) ottenuti da specifici rilievi. Questo per tenere conto della variabilità delle forme di fondo che possono incidere sulla posizione dei frangenti e sulla rifrazione dell'onda. Di conseguenza le valutazioni sotto costa vanno considerate di massima, soprattutto in riferimento ai fenomeni di risalita del moto ondoso. La mancanza di dati batimetrici di dettaglio non consente inoltre di fare valutazioni sul quadro correntometrico.

Le analisi condotte hanno confermato comunque la gravosità del clima meteomarinò che incide determinando facili condizioni di sommergenza ai piedi della falesia, rendendo necessarie opere di attenuazione. Le scogliere è opportuno vengano fatte con massi da 2-4-t di peso e con scarpa minima 1:2.

11 APPENDICE

In appendice si riportano i codici di calcolo dei modelli utilizzati, tratti dai capitoli dei manuali riguardanti le equazioni che governano le simulazioni. Nell'elenco puntato che segue, accanto ad ogni modello è riportato il riferimento al manuale dal quale queste informazioni sono tratte. La licenza del software impiegato è intestata a PrimalIngegneria STP (n. 703 di Aquaveo inc-USA).

BOUSS2D (Bouss-2d: A boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors. Report 1 Theoretical Background and User's Manual. O.G. Nwogu e Z. Demirbilek Settembre 2001).

STWAVE (Stwave: Steady-State Spectral Wave Model. User's Manual for Stwave, Version 3.0 J.Mckee Smith et al. Febbraio 2001).

CMS-WAVE (Wave-Action Balance Equation Diffraction (Wabed Model: Tests of Wave Diffraction and Reflection at Inlets. L. Lin et al. Luglio 2006).

Il modello CMS-WAVE è quello che meglio si adatta allo studio del moto ondoso in acque basse ed in presenza di strutture perché tiene conto sia dei fenomeni di rifrazione che di diffrazione. Il modello è di recente elaborazione e tra il materiale bibliografico a disposizione, oltre alla pubblicazione appena citata, vi è quella dal titolo Wabed Model in the SMS: Part 2. Graphical Interface di Z. Demirbilek et al. Maggio 2007, che descrive gli aspetti del modello legati all'interfaccia grafica. Sebbene la pubblicazione riguardante il codice di calcolo e la descrizione delle equazioni che governano il modello non sia ancora disponibile, nell'articolo del luglio 2006, è riportato il confronto tra i risultati ottenuti da esperienze di laboratorio e quelli forniti dall'applicazione del codice di calcolo Wabed. Nella pubblicazione, dunque, sono comprovate l'efficienza e l'affidabilità del modello. Tale modello rappresenta una evoluzione del modello STWAVE di cui si descrivono le principali caratteristiche

CODICE DI CALCOLO DEL MODELLO STWAVE

Il modello STWAVE è un modello alle differenze finite e si basa sull'equazione di equilibrio dell'azione dell'onda. Le onde sono modellate mediante uno spettro bidimensionale della densità di azione e l'interazione delle onde con le correnti è valutata considerando la relazione:

$$w_r^2 = gk \tanh(kd)$$

dove w è la frequenza angolare, r il pedice che indica che il sistema di riferimento è relativo alla corrente, k il numero d'onda, d la profondità di acqua.

Nel sistema di riferimento assoluto al relazione diviene:

$$w_a = w_r + kU \cos(\vartheta - \alpha)$$

dove a è il pedice che indica il sistema di riferimento assoluto, U è la velocità della corrente, δ la direzione della corrente, α la direzione ortogonale all'onda. Il numero d'onda k è determinato iterativamente, risolvendo le due equazioni.

Il modello STWAVE è in grado di tenere conto gli effetti di rifrazione, shoaling, diffrazione e frangimento. Per tenere conto dei fenomeni di rifrazione e di shoaling è necessario conoscere la

celerità dell'onda C e quella di gruppo C_g . La direzione di entrambe le celerità è a, ortogonale all'onda ed i moduli sono così calcolati:

$$C_r = w_r / k \quad C_g = 0.5C_r \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right)$$

In termini assoluti le celerità si calcolano:

$$C_a = C_r + U \cos(\partial - x)$$

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

dove i è la notazione tensoriale per le componenti in direzione x e y . In questo caso, la direzione della celerità dell'onda è sempre quella ortogonale mentre la direzione della celerità di gruppo è data:

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

La direzione della celerità di gruppo è fondamentale nel caso si debbano descrivere le interazioni onde-corrente. Infatti con le correnti l'energia delle onde si muove lungo la direzione della celerità di gruppo mentre, nel caso si consideri solo l'azione delle onde le direzioni delle due celerità coincidono. Tenendo conto dell'interazione onde-correnti l'equazione che governa la conservazione dell'azione dello spettro d'onda lungo la direzione di propagazione della celerità di gruppo è data:

$$(C_{ga})_i \frac{\delta}{\delta x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - x) E(w_a, \alpha)}{w_r} = \sum \frac{S}{w_r}$$

dove E è la densità di energia dell'onda divisa per ρ_w , la densità dell'acqua, S l'energia sorgente.

Gli effetti dei fenomeni di diffrazione, invece, sono valutati attraverso la relazione:

$$E_j(w_a, \alpha) = 0.55E_j(w_a, \alpha) + 0.225[E_{j+1}(w_a, \alpha) + E_{j-1}(w_a, \alpha)]$$

dove E è la densità di energia in una data frequenza e direzione e j è il pedice che indica la colonna della griglia.

Infine, i limiti per il frangimento sono calcolati secondo la formula di Miche:

$$H_{m0_{max}} = 0.1L \tanh(kd)$$