

PIANO REGOLATORE PORTUALE

Del. G.R. n. 63/22 del 25 novembre 2016



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA



COMUNE DI DORGALI

Provincia di Nuoro

Studio meteomarino

CRITERIA

Arch. Paolo Falqui
Ing. Silvia Cuccu
Arch. Elisabetta Sanna

Consulenti:



Prima STPSS

Ing. Pietro Chiavaccini
Ing. Maurizio Verzoni
Ing. Nicola Buchignani

Settembre 2019

CRITERIA

città : ricerca : territorio : innovazione : ambiente

C.R.I.T.E.R.I.A.Srl

sede legale:

via Cugia 14

09129 Cagliari

tel 070 303583

fax 070 301180

p.iva 02694380920

R.E.A. 217276

cap.soc. € 10.400

criteriaweb.com

www.criteriaweb.com

Arch. Paolo Falqui

Ing. Silvia Cuccu

Arch. Elisabetta Sanna



Prima STPSS

Ing. Pietro Chiavaccini

Ing. Maurizio Verzoni

Ing. Nicola Buchignani

Indice

1	PREMESSA	1
2	UBICAZIONE DEL PARAGGIO	2
3	REGIME DEI VENTI	6
4	CORRENTI	8
5	VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO	11
6	REGIME ONDOSI	13
	6.1 Valori estremi di moto ondoso a largo	15
	6.2 Eventi storici	17
7	STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSI VERSO RIVA	18
	7.1 Propagazione sotto costa dei dati di moto ondoso	18
	7.2 Analisi del moto ondoso sotto costa per gli eventi estremi	19
8	CONCLUSIONI.....	41

1 PREMESSA

In tutte le applicazioni di ingegneria marittima e costiera è necessario definire preliminarmente le condizioni di "esposizione" del sito di interesse rispetto a vento, moto ondoso, correnti e livelli marini.

Le analisi di questi fattori meteomarini sono finalizzate a determinare:

- condizioni medie climatiche;
- condizioni estreme.

Allo scopo di definire l'esposizione ai fattori meteomarini del tratto di litorale di Dorgali, sono state, dunque, svolte ricerche e studi finalizzati al reperimento di tutti i dati disponibili, che, selezionati ed elaborati, hanno fornito le caratteristiche meteomarine necessarie per lo studio per il potenziamento del porto di Cala Gonone.

In particolare si è fatto riferimento ai dati della rete Ondametrica nazionale che presenta come stazioni più significative quella di Capo Comino/Siniscola - Capo Comino (40°31'59.99"N, 09°55'00.10" E) rilevamenti dal 02/01/03 al 12/09/05 e dal 06/02/2010 al 25/01/2011.

L'elaborazione dei dati ha portato alla definizione di un valore di altezza e direzione delle onde mediante il quale, attraverso apposito software, si è potuti risalire ad una serie di piani d'onda che fornissero il risultato finale cercato, che è molto vicino ai valori forniti dallo studio del 2000 "Studio preliminare per il potenziamento del porto di Cala Gonone in Comune di Dorgali – Studio Sirito e HR Wallingford Ltd.

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 traversia, ovvero alle direzioni da cui possono arrivare le agitazioni ondose (mari); tale settore di traversia viene suddiviso usualmente in:

- traversia principale, da cui provengono i mari più violenti;
- traversia 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.

Cala Gonone nel comune di Dorgali è ubicata nel settore Nord-orientale, a circa 72 km a sud di Olbia e 40 a nord di Arbatax.

Ponendosi a est su un fondale di circa 150 m l'esposizione maggiore si verifica nel settore 45-90° N e 135-180°N. L'andamento dei fetch geografici è riportato in dettaglio in Figura 1.

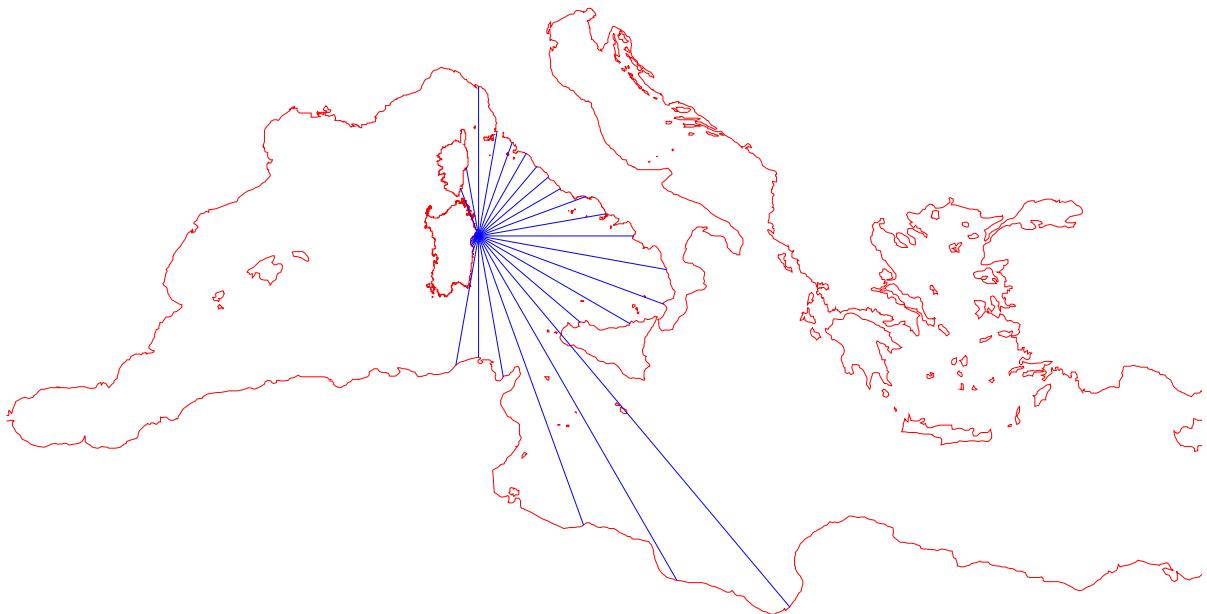


Figura 1. Settore di traversia del paraggio a largo di Orosei con indicazione dei fetch geografici

Entro il settore di traversia del paraggio in esame, è stato determinato il settore "efficace", ovvero la porzioni di mare effettivamente coinvolta dal fenomeno di generazione del moto ondoso (Figura 2).

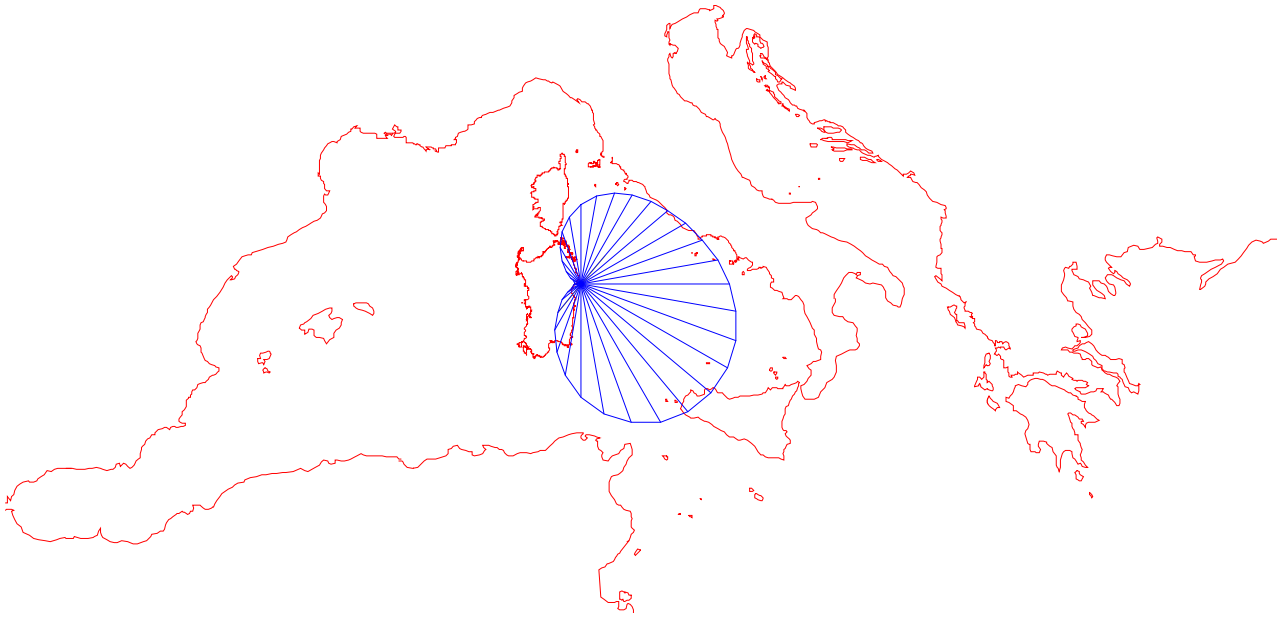


Figura 2. Indicazione dei fetch efficaci per il paraggio di Orosei

Per il tratto di costa antistante il paraggio di interesse, 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 ha un fetch efficace massimo pari a circa 380 km circa ed è riferibile al settore sud orientale (135°N).

Per la trasformazione dei dati di fetch da geografici ad efficaci si è fatto riferimento ad una relazione, derivata dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991), di seguito riportata nella sua forma più generale:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\Phi_i = \Phi_w - \Theta}^{\Phi_w + \Theta} F_i \cos^{n+1}(\Phi_i - \Phi_w)}{\sum_{\Phi_i = \Phi_w - \Theta}^{\Phi_w + \Theta} \cos^n(\Phi_i - \Phi_w)}$$

dove:

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 $n=2$).

La tabella riassuntiva dei fetch è riportata in Tabella 1 mentre l'andamento grafico è riportato in Figura 3. Nel proseguo si considera come fetch di riferimento quello riferito a Seymour.

Tabella 1. Dati di fetch del paraggio di Cala Gonone

DIREZIONE	F _{geo} (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville	DIREZIONE	F _{geo} (Km)	F _{eff} (Km) Seymour	F _{eff} (Km) Saville
0	411.8	180.8	210.2	190	362.0	208.1	225.2
10	288.5	202.4	235.3	200	47.5	162.0	170.8
20	274.3	218.9	257.6	210	33.1	119.4	119.9
30	263.0	231.7	270.7	220	30.5	83.3	80.3
40	250.5	243.3	283.7	230	28.2	55.6	49.5
50	251.7	256.2	290.5	240	25.1	36.3	22.9
60	260.5	272.0	311.1	250	20.0	24.2	19.4
70	314.8	291.1	335.5	260	16.4	17.5	17.0
80	355.9	312.6	356.5	270	13.3	14.7	14.9
90	427.0	334.5	382.5	280	10.4	15.0	13.2
100	500.0	354.3	407.1	290	10.1	19.3	18.5
110	500.0	369.8	429.0	300	10.7	29.0	29.6
120	482.0	379.5	439.6	310	11.2	45.1	56.0
130	367.0	381.7	440.3	320	11.4	67.5	84.3
140	500.0	374.9	433.6	330	12.8	94.9	116.1
150	500.0	358.3	404.2	340	139.0	124.9	149.1
160	500.0	331.7	366.7	350	190.0	154.4	181.1
170	394.0	296.3	323.2				
180	334.1	254.1	280.2				

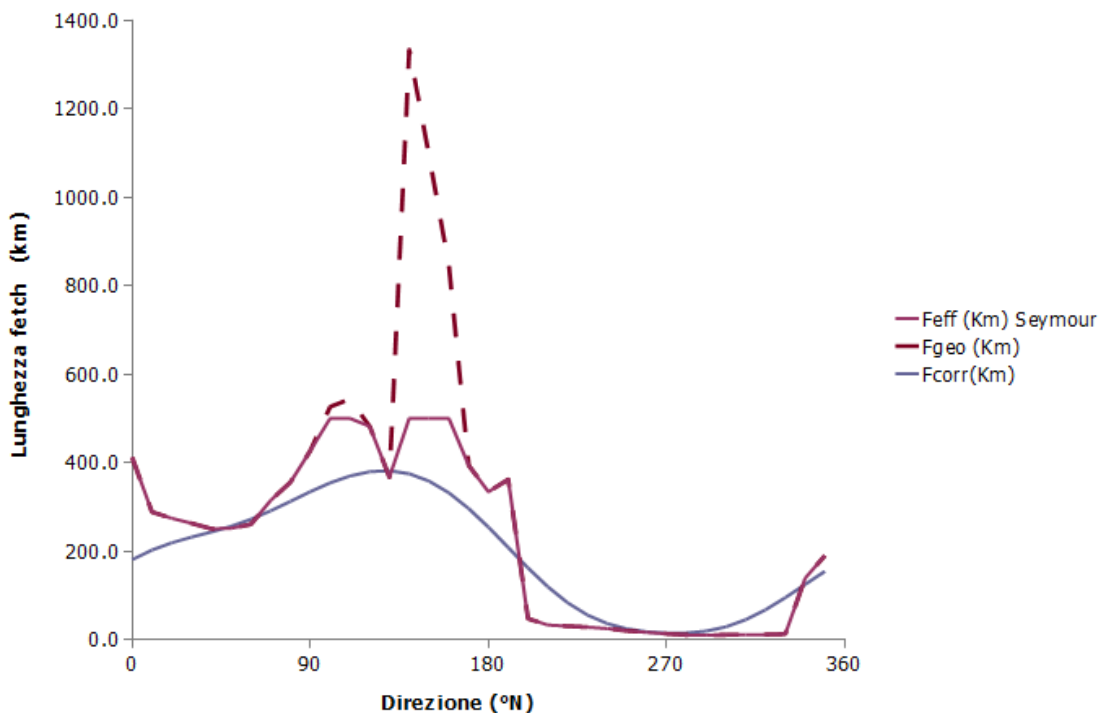


Figura 3. Andamento dei fetches per il paraggio di Cala Gonone

Si nota che le direzioni provenienti dal I e II quadrante (0-180°N) presentano fetches superiori a 200 km, valori che presuppongono la formazione di moto ondoso significativo.

3 REGIME DEI VENTI

Per determinare il regime dei venti si fa riferimento alle serie sintetiche ricavate dalla pubblicazione Wind and Wave Atlas of Mediterranean Sea-MedAtlas (Western European Union-2004) che fornisce nel punto di coordinate N4428245.6360-E1585390.0010 (40°N-10°E- Figura 4) la serie sintetica dei dati di vento. I dati forniti riguardano 10 anni di dati (1989-1998) e sono forniti in forma tabellare (Tabella 2). Si evidenzia come le direzioni regnanti, cioè più frequenti riguardino le direzioni lungo l'asse maestrale/scirocco (NO-SE) con velocità attese che non superano i 18 m/s (Figura 6). La velocità media si attesta a 4.8 m/s.



Figura 4. Indicazione del punto in cui sono disponibili dati MedAtlas 40N,10E (periodo 1989-1998)

Tabella 2. Dati riassuntivi dei venti per il punto di coordinate 40N,10E (periodo 1989-1998)

Direzione	Altezza (m)																TOTALE
	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	09-10	10-12	12-14	14-16	16-18	>18		
0-15	1.01	2.01	3.02	4.03	3.02	2.01	1.01	2.01	1.01	1.01	2.01	1.01	0.00	0.00	0.00	23.16	
15-30	2.01	4.03	6.04	6.04	5.04	3.02	2.01	2.01	1.01	1.01	2.01	1.01	0.00	0.00	0.00	35.25	
30-45	2.01	5.04	6.04	5.04	4.03	2.01	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.19	
45-60	1.01	5.04	6.04	4.03	3.02	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.15	
60-90	2.01	6.04	5.04	4.03	2.01	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.16	
60-75	2.01	5.04	6.04	3.02	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.13	
75-90	3.02	6.04	6.04	3.02	2.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.16	
105-120	2.01	7.05	7.05	4.03	2.01	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.18	
120-135	2.01	6.04	8.06	6.04	3.02	2.01	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.21	
135-150	1.01	6.04	9.06	7.05	6.04	4.03	2.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.26	
150-165	3.02	6.04	12.08	10.07	8.06	7.05	4.03	2.01	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	55.39	
165-180	3.02	7.05	11.08	9.06	10.07	7.05	4.03	4.03	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	58.41	
180-195	2.01	5.04	8.06	8.06	8.06	6.04	4.03	2.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.31	
195-210	2.01	5.04	6.04	7.05	7.05	5.04	3.02	2.01	1.01	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	39.27	
210-225	2.01	5.04	7.05	5.04	4.03	3.02	3.02	2.01	1.01	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	33.23	
225-240	3.02	5.04	7.05	6.04	5.04	4.03	2.01	1.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.25	
240-255	2.01	5.04	7.05	8.06	6.04	4.03	3.02	2.01	2.01	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	40.28	
255-270	2.01	6.04	8.06	8.06	7.05	7.05	4.03	2.01	2.01	2.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	49.35	
270-285	2.01	6.04	8.06	8.06	9.06	7.05	5.04	5.04	4.03	2.01	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	58.41	
285-300	2.01	6.04	10.07	11.08	9.06	7.05	6.04	6.04	4.03	3.02	3.02	1.01	0.00	0.00	0.00	68.48	
300-315	2.01	7.05	10.07	10.07	11.08	8.06	6.04	4.03	4.03	3.02	3.02	2.01	0.00	0.00	0.00	70.49	
315-330	2.01	5.04	11.08	11.08	9.06	8.06	6.04	5.04	3.02	3.02	2.01	1.01	0.00	0.00	0.00	66.47	
330-345	2.01	6.04	9.06	12.08	8.06	7.05	6.04	4.03	2.01	2.01	1.01	1.01	0.00	0.00	0.00	60.42	
345-360	1.01	6.04	10.07	9.06	8.06	6.04	4.03	3.02	3.02	2.01	3.02	1.01	1.01	0.00	0.00	57.40	
TOTALE	48.34	132.93	187.31	169.18	140.99	104.73	72.51	53.37	35.25	22.16	24.17	8.06	1.01	0.00	0.00	1000.00	

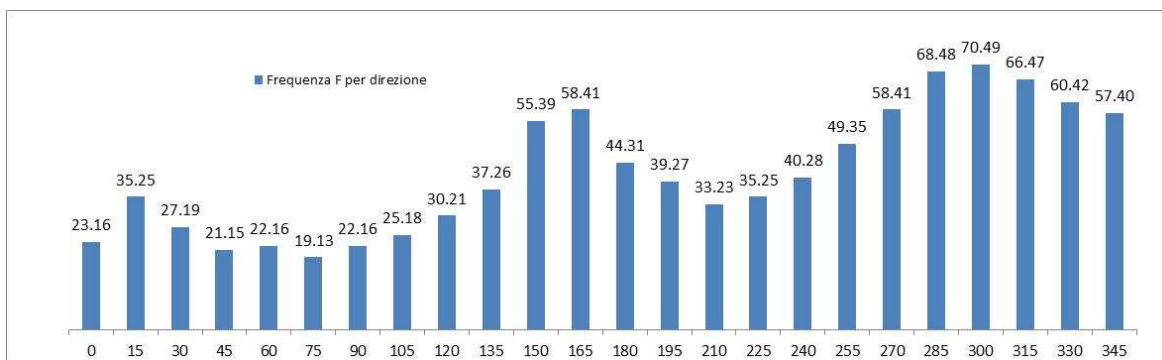


Figura 5. Frequenza dei venti per il punto di coordinate 40N,10E (periodo 1989-1998) in funzione della direzione di provenienza

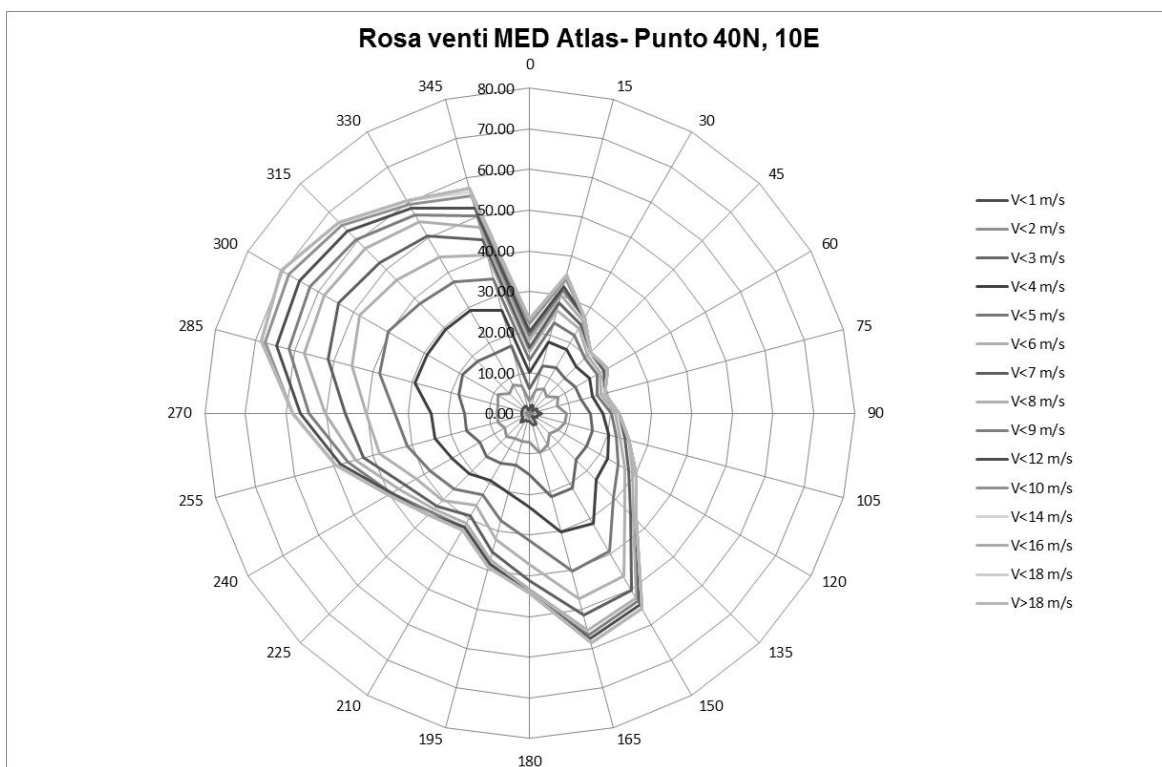


Figura 6. Rosa del regime dei venti per il punto di coordinate 40N,10E (periodo 1989-1998)

Le direzioni prevalenti (venti con maggiore intensità in questo caso si considerano i venti con $V > 10 \text{ m/s}$) si riferiscono invece al I e IV quadrante. In particolare a quelli del primo quadrante cui sono associati fetches significativi per il paraggio in esame corrispondono condizioni di mare importanti.

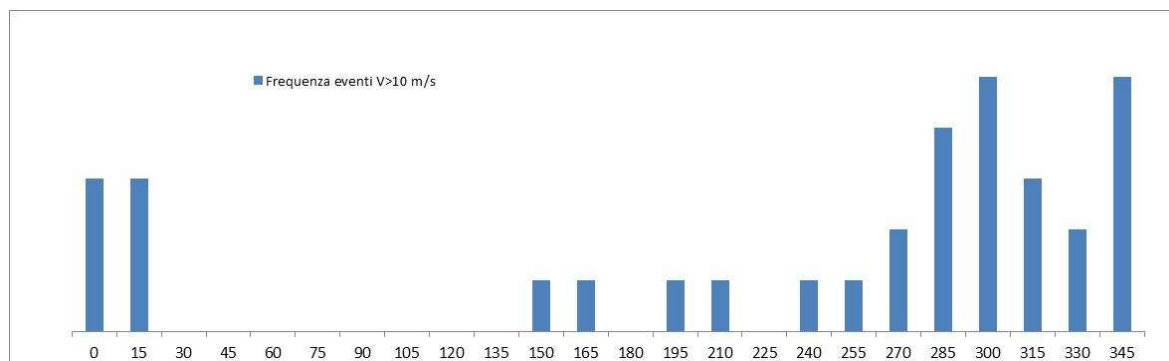


Figura 7. Frequenza dei venti con velocità $> 10 \text{ m/s}$ in funzione della direzione

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.

Per l'intera Sardegna, la velocità della corrente marina è stimabile in circa 0,1 m/s ed 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 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.

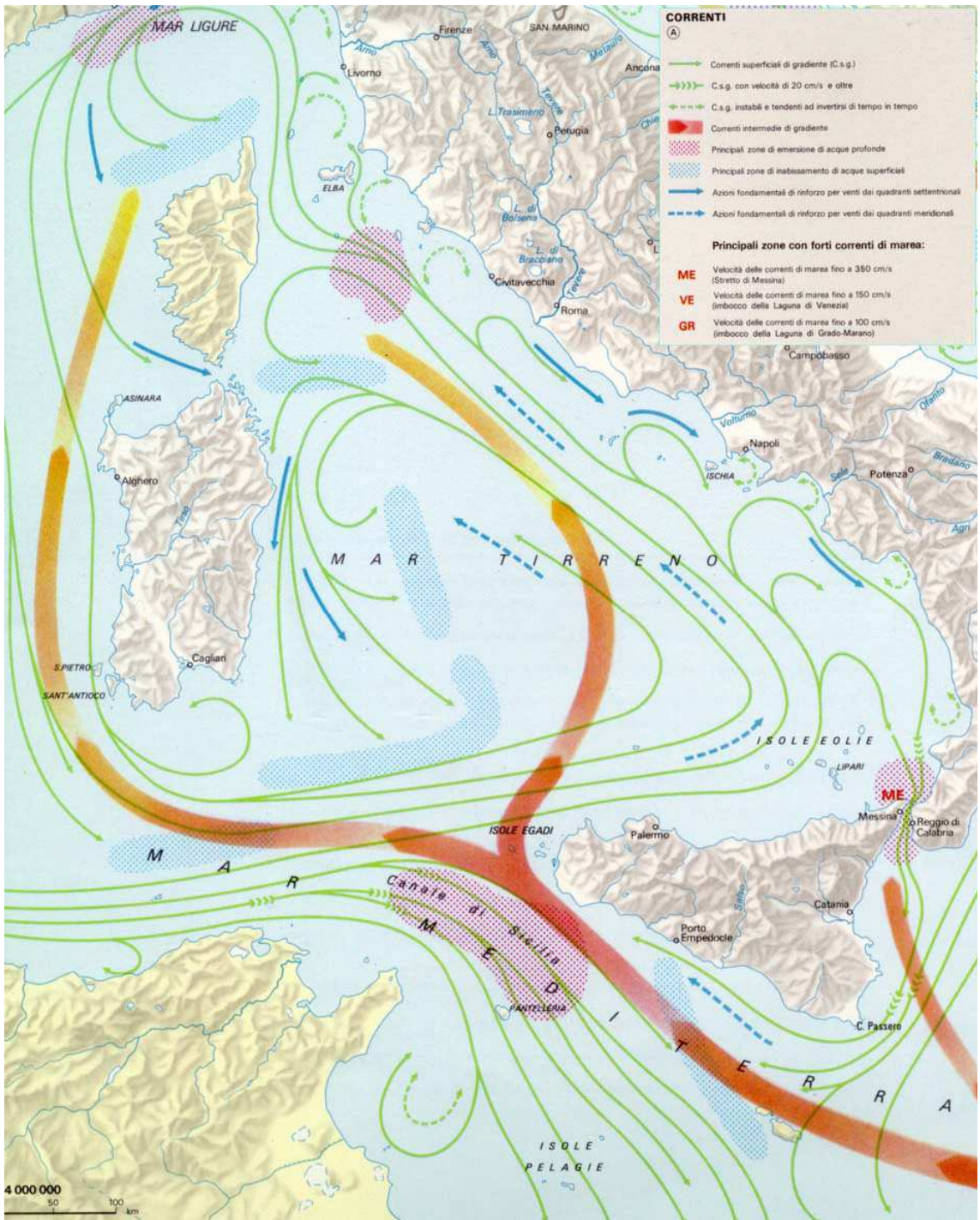


Figura 8. Correnti nel Mediterraneo (da Atlante Tematico CNR)

Per una stima delle 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 vorticoso 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)

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

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)

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

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

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

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

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

Poiché Cala Gonone è posizionata ad una latitudine di circa 40°N le espressioni sopra si semplificano come:

$$U_0 = 0.016 \cdot V$$

$$D_E = 5.49 \cdot V$$

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. Assumendo una velocità media del vento di circa 4.8 m/s la velocità della corrente in superficie risulta $U_0 = 0.076 \text{ m/s}$ (7.6 cm/s) e la profondità di influenza è di $D_E = 26.3 \text{ m}$.

Il valore di velocità media delle correnti così ottenuto risulta estremamente modesto e 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 3.

Tabella 3. Componenti armoniche

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

Alcuni valori per il mar Ligure e Tirreno sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Armoniche di marea per porti del Mar Tirreno (cm e gradi)

Porto	M2	S2	N2	K1	O1
Genova	9.0-240°	3.1-256°	2.0-232°	3.2-188°	1.2°190
Civitavecchia	11.2-257°	4.3-284°	2.3-237°	2.9-208°	1.5-110°
Cagliari	8.5-255°	3.6-273°	1.8-248°	3.2-200°	1.6-121°
Marsiglia	6.7-230°	2.4-247°	1.5-227°	3.5-188°	2.7-97°

Sommando i vari contributi si ottengono valori di marea di +/- 25 cm.

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 $k_p=3.2 \times 10^{-6}$ 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 20 m/s si ottiene un valore del sovrizzo di circa 8 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 i 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 si trova nelle vicinanze della boa della rete ondometrica di Capo Comino/Siniscola che ha anche analoghe caratteristiche di esposizione.

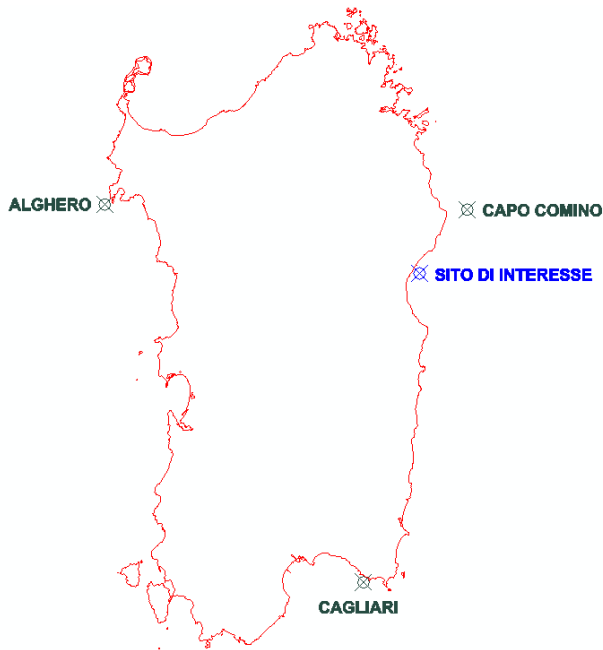
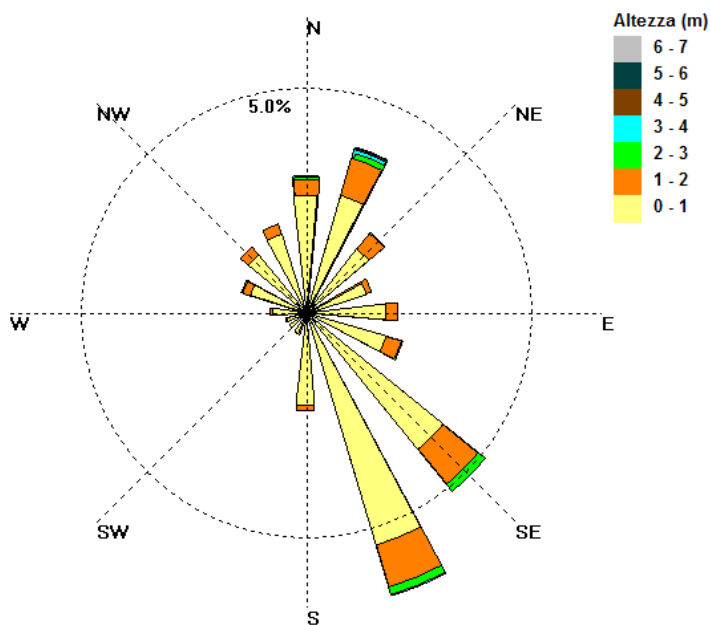


Figura 9. Boe della Rete RON e sito di interesse

Pertanto come dati per determinare il clima di moto ondoso si sono considerati direttamente quelli della stazione di Capo Comino senza effettuarne la trasposizione. I risultati evidenziano uno stato del mare regnante con direzione scirocco (coerentemente con i dati di vento) mentre i valori più intensi si registrano nel I quadrante. I valori massimi si attestano intorno ai 5 m.



WindRose PRO

Figura 10. Rosa dei mari a Capo Comino

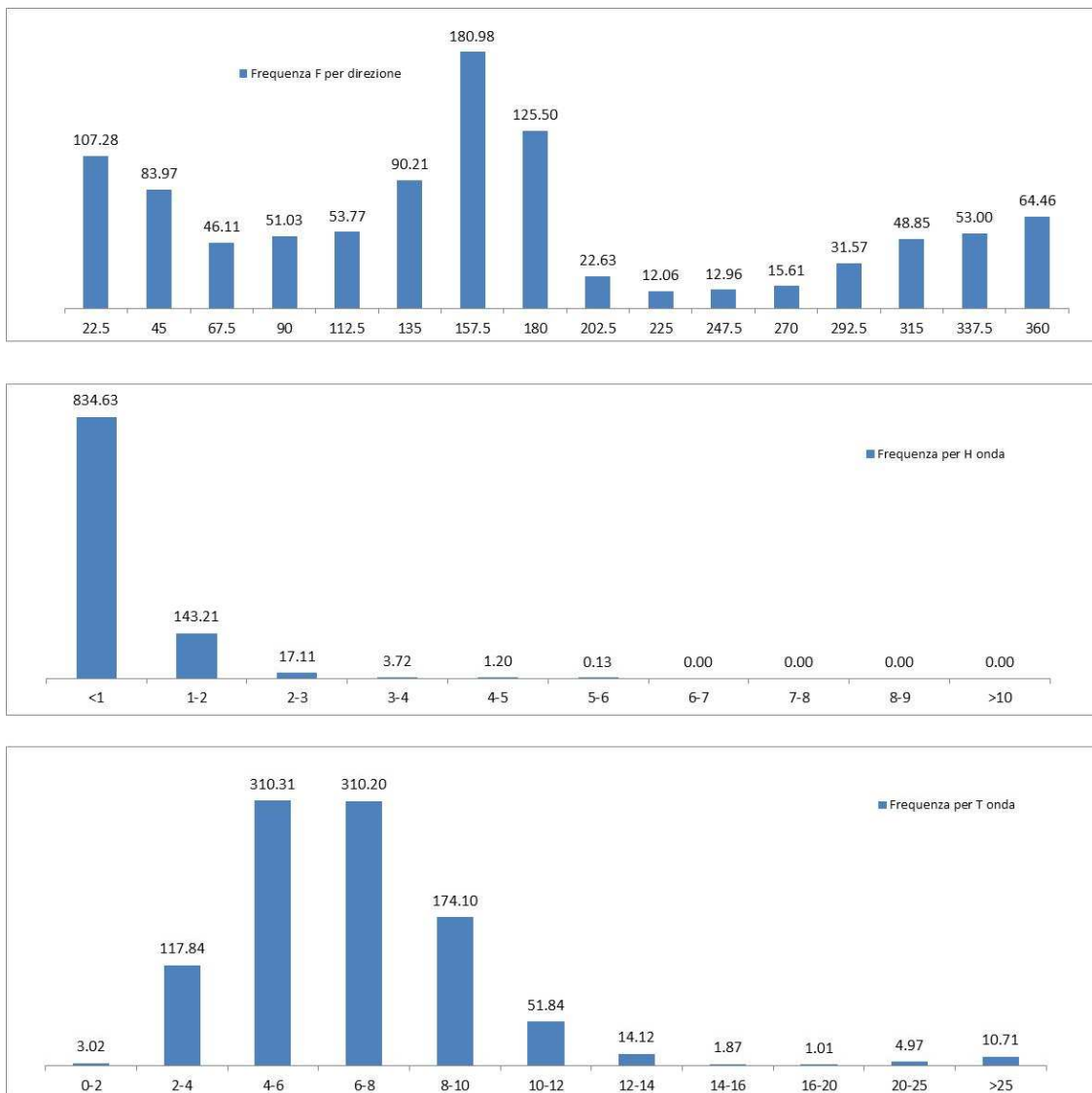


Figura 11. Clima ondoso nella boa Ron di Capo Comino

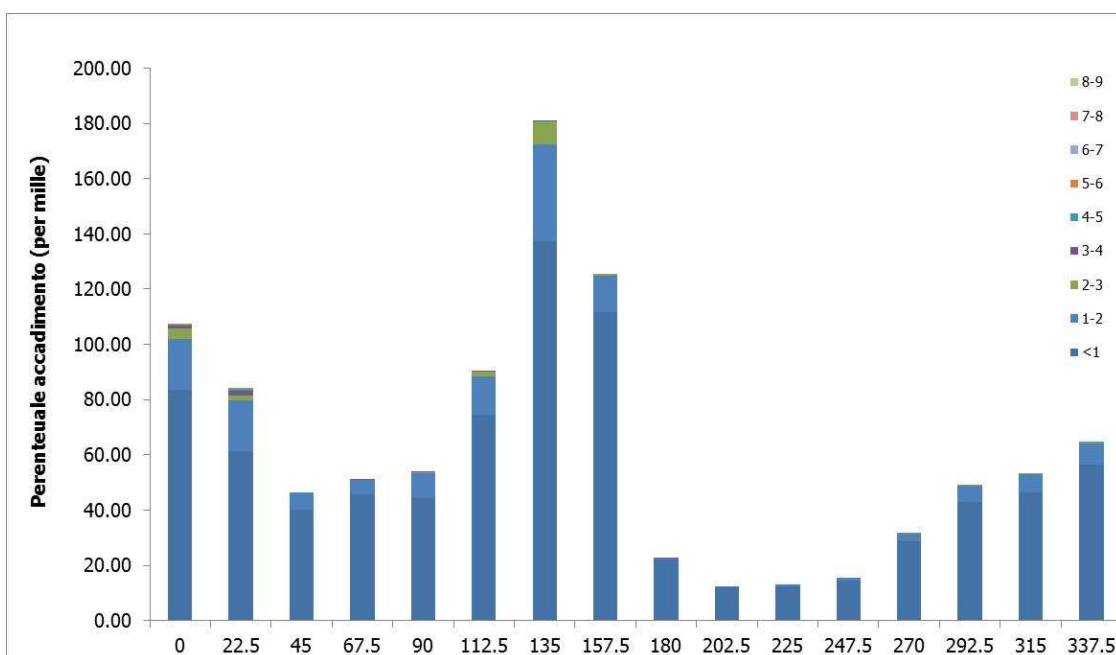


Figura 12. Clima ondoso nella Boa Ron di Capo Comino per direzione e classi di altezza d'onda

Tabella 5. Dati a largo di Cala Gonone altezza –periodo di picco- % di accadimento

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	83.63	18.35	3.72	1.03	0.47	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	107.28
22.5-45	61.51	18.14	1.75	1.88	0.64	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	83.97
45-67.5	40.08	5.90	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46.11
67.5-90	45.77	5.00	0.21	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.03
90-112.5	44.36	9.15	0.17	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.77
112.5-135	74.69	13.73	1.71	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.21
135-157.5	137.48	34.82	8.30	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	180.98
157.5-180	111.52	13.26	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	125.50
180-202.5	22.11	0.47	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.63
202.5-225	11.89	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.06
225-247.5	12.58	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.96
247.5-270	14.50	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.61
270-292.5	28.83	2.69	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.57
292.5-315	42.78	6.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.85
315-337.5	46.28	6.63	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.00
337.5-360	56.63	7.36	0.30	0.13	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	64.46
TOTALE	834.63	143.21	17.11	3.72	1.20	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1000.00

6.1 Valori estremi di moto ondoso a largo

L'individuazione dei valori estremi di moto ondoso viene fatta a partire dai dati di moto ondoso della stazione di Capo Comino/Siniscola con la metodologia di seguito descritta. L'analisi viene fatta per direzioni di 45°, considerando settori di 90° 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.

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 relativo ai dati di altezza d'onda $H_s > 2m/s$ 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 stazione di Capo Comino e per le direzioni principali di 45-90 e 135° N. 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, a e β parametri funzione del tipo di distribuzione statistica adottata, il cui valore è riportato in Tabella 6.

Tabella 6. Parametri α e β

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}

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)

Gli eventi considerati provenienti da tutte le direzioni sono risultati 56 nei 4 anni di dati disponibili. In Figura 13 è riportato a titolo esemplificativo l'andamento dei dati estremi e le rette interpolanti sul piano di Gumbel per il settore 0-90°N.

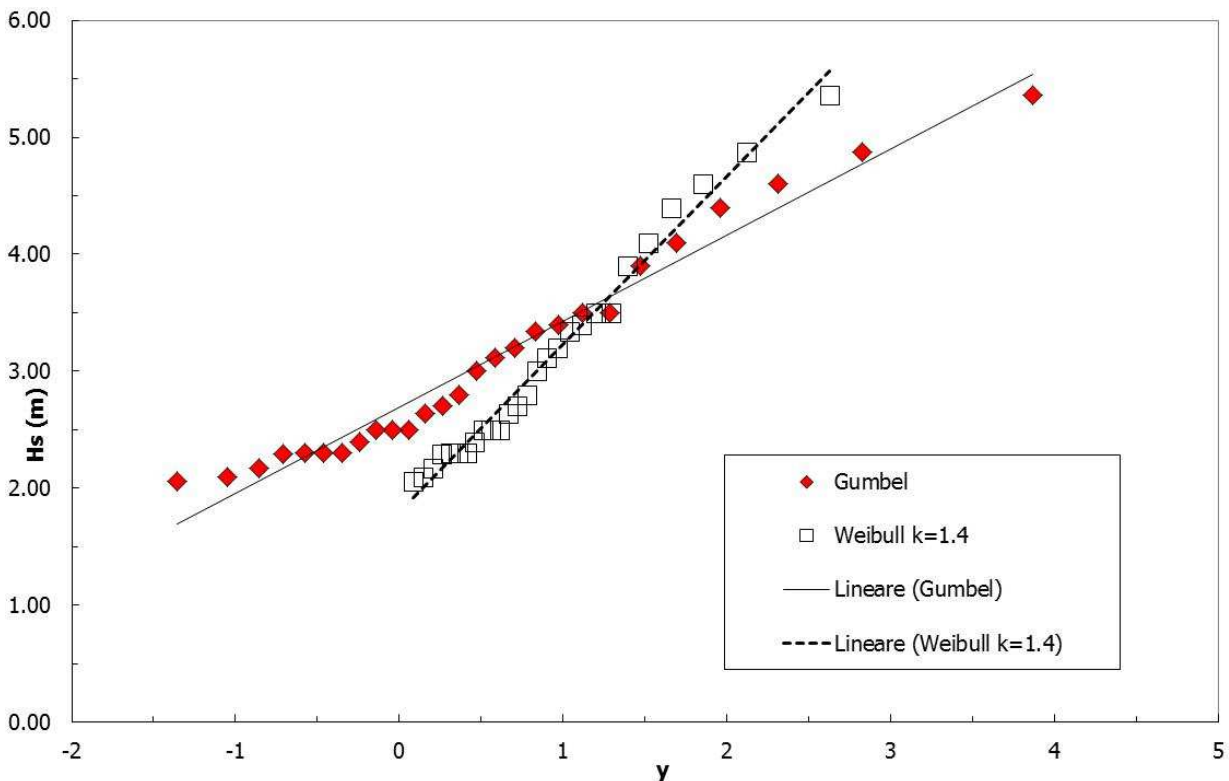


Figura 13. Andamento dei dati sul piano di Gumbel dei dati impiegati per la statistica nel settore 0-90°N (direzione 45°N)

Tabella 7. Valori estremi di altezza d'onda a largo di Cala Gonone

Dir	0-360°N		0°N		45°N		90°N		135°N	
	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)
2	4.7	8.9	4.2	8.4	4.6	8.7	4.1	8.3	3.4	7.5
10	6.0	10.0	5.7	9.8	5.8	9.8	5.2	9.4	4.0	8.2
30	6.9	10.7	6.8	10.6	6.6	10.5	5.9	10.0	4.4	8.6
50	7.3	11.0	7.2	11.0	7.0	10.8	6.3	10.2	4.6	8.8
100	7.8	11.4	7.9	11.5	7.5	11.2	6.7	10.5	4.9	9.0

Come tempo di ritorno di riferimento si considera Tr=50 anni e date le caratteristiche geografiche di Cala Gonone si considerano solamente le direzioni tra 45 e 135° evidenziate in Tabella 7.

6.2 Eventi storici

Uno dei principali eventi che si è verificato nel paraggio risale al 29/10/1997. Tale evento creò numerosi danni all'infrastruttura portuale. La provenienza del vento era dal primo quadrante. Dati storici in termini di vento ed intensità non sono stati resi disponibili. Le registrazioni degli ondometri sono riferibili ad Alghero in cui fu rilevata un'altezza massima di 2.9m per una direzione di circa 0°-45°N.

Per tale direzione la boa ondometrica ad Alghero ha un fetch efficace medio di circa 90 km (Figura 14) a fronte di un valore medio per il paraggio in esame di circa 220 km.

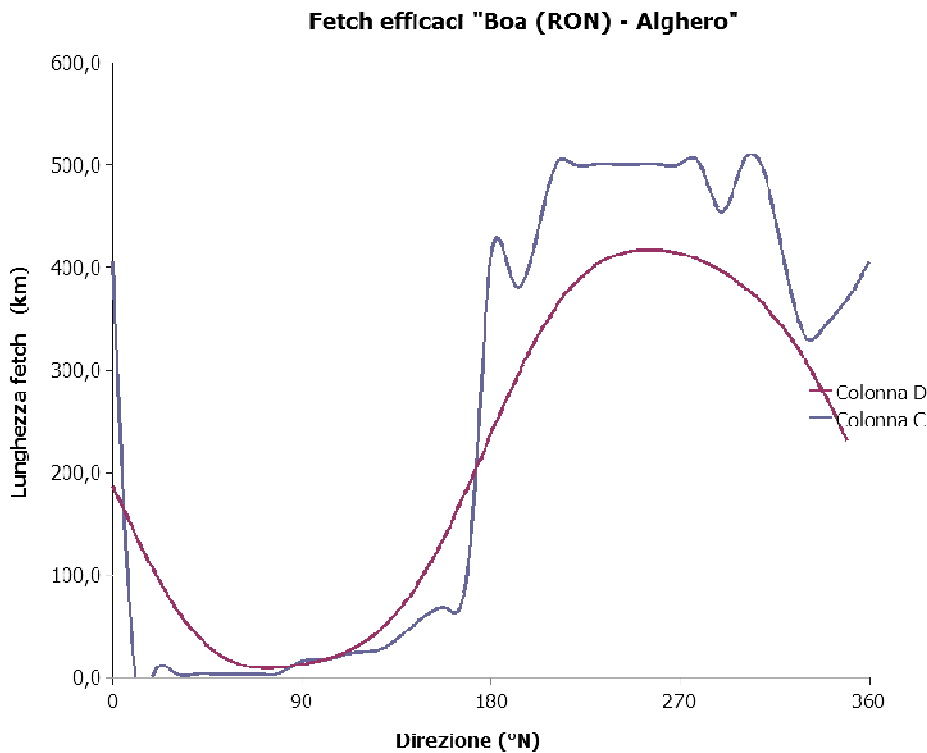


Figura 14. Fetch alla boa Ron di Alghero

Adottando in via semplificativa il metodo della trasposizione si può stimare il valore dell'onda nell'evento dell'ottobre 1997 nella zona di Cala Gonone.

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:

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

dove F^P e F^O sono le rispettive lunghezze dei fetches efficaci per una data direzione.

Con queste ipotesi l'altezza stimata dell'evento dell'ottobre 1997 diventa

$$H_{evento} = 2.9 * (220/90)^{0.5} = 4.5m$$

Si tratta di un valore di poco inferiore a quello determinato con l'analisi statistica. Quest'ultima pertanto si può considerare cautelativa ai fini della definizione degli eventi estremi.

7 STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO 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.

7.1 Propagazione sotto costa dei dati di moto ondoso

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 condizione a contorno.

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.

L'andamento delle batimetrie è riportato in Figura 15.

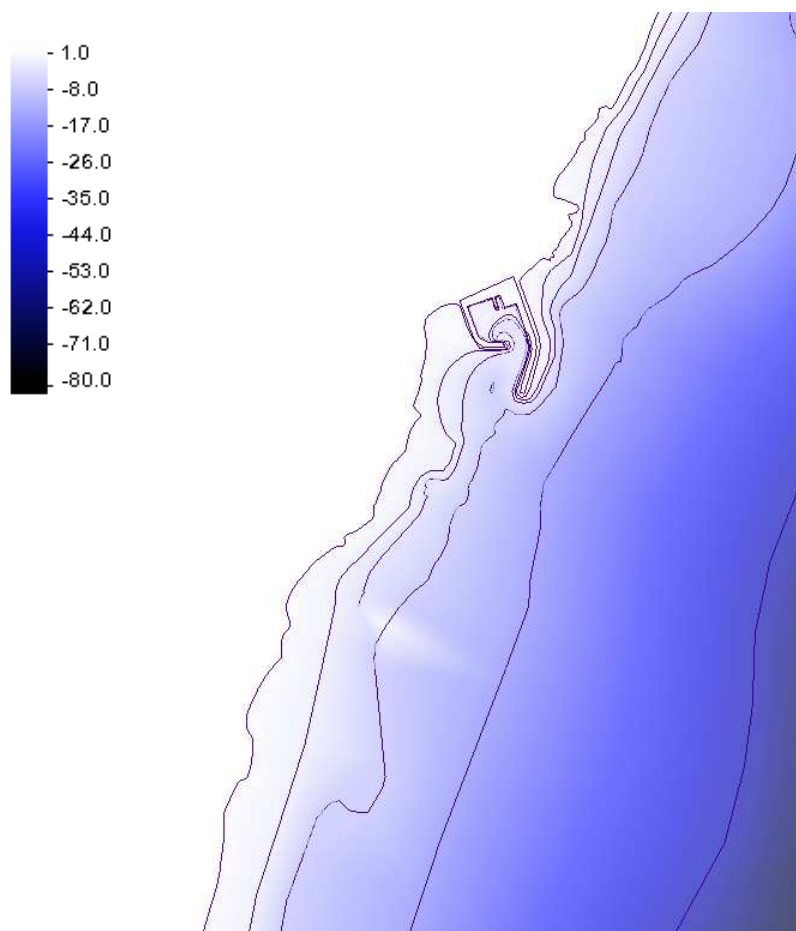


Figura 15. Batimetria di riferimento

7.2 Analisi del moto ondoso sotto costa per gli eventi estremi

Gli eventi estremi analizzati si riferiscono ad eventi con $T_r=50$ anni.

Tabella 8. Eventi estremi

Caso	Dir (°N)	H (m)	Tp (s)
1	45	7.0	10.8
2	90	6.3	10.2
3	135	4.6	8.8

La propagazione del moto ondoso da largo verso riva evidenzia una scarsa modifica in tutti e tre i casi sia in termini di altezza d'onda che di direzione.

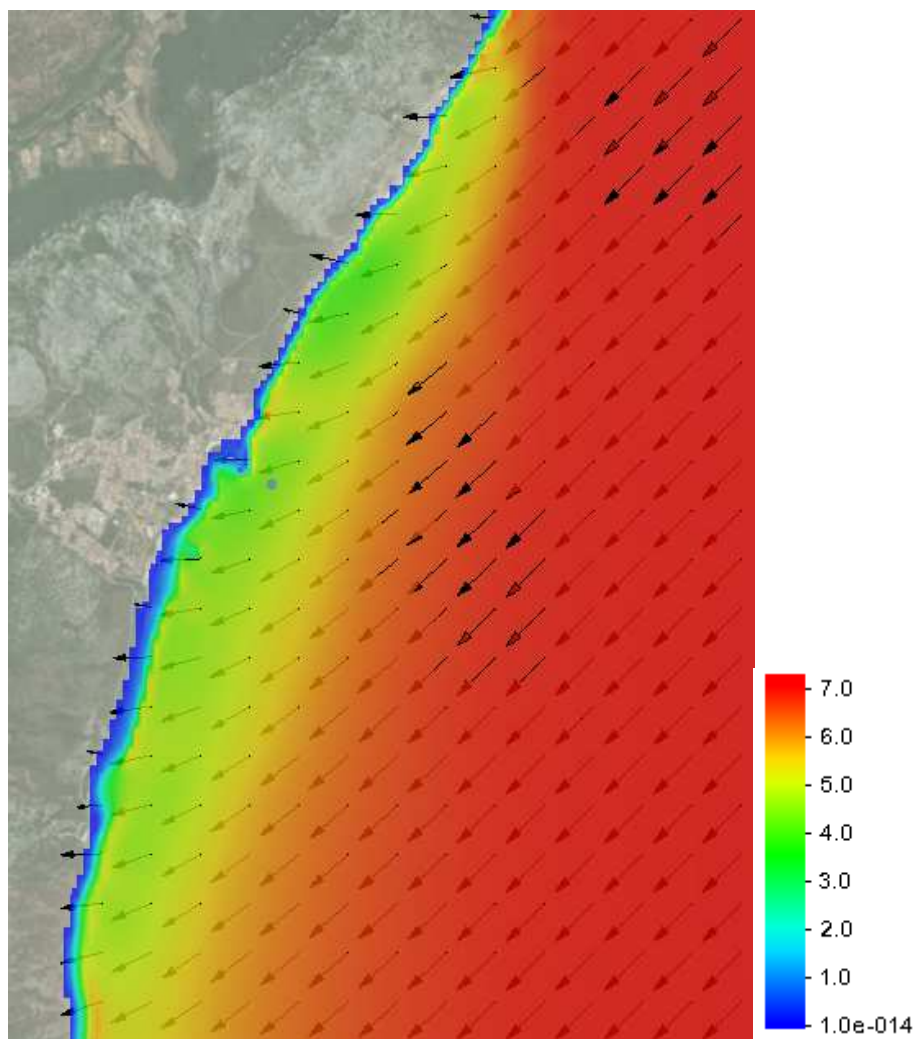


Figura 16. Altezza d'onda e direzione nel caso 1 (Dir 45°N H=7m Tp=10.8s)

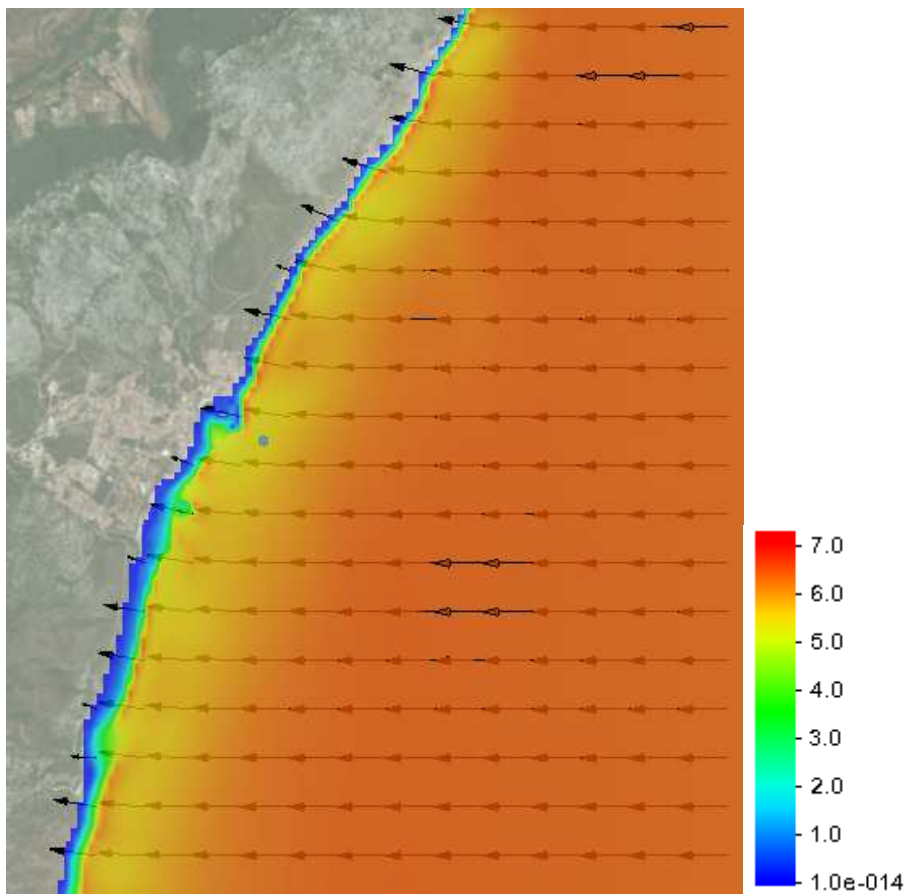


Figura 17. Altezza d'onda e direzione nel caso 2 (Dir 90°N H=6.3m Tp=10.2s)

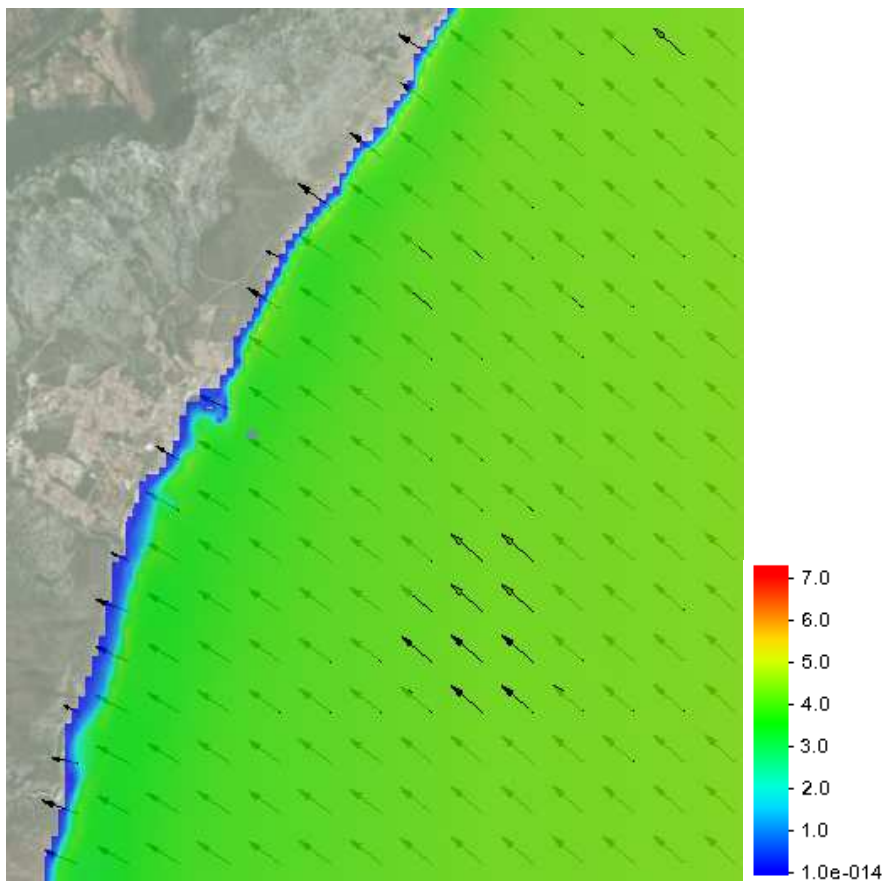


Figura 18. Altezza d'onda e direzione nel caso 3 (Dir 135°N H=4.6m Tp=8.8s)

In prossimità della griglia di dettaglio l'onda si riduce ai valori di Tabella 9.

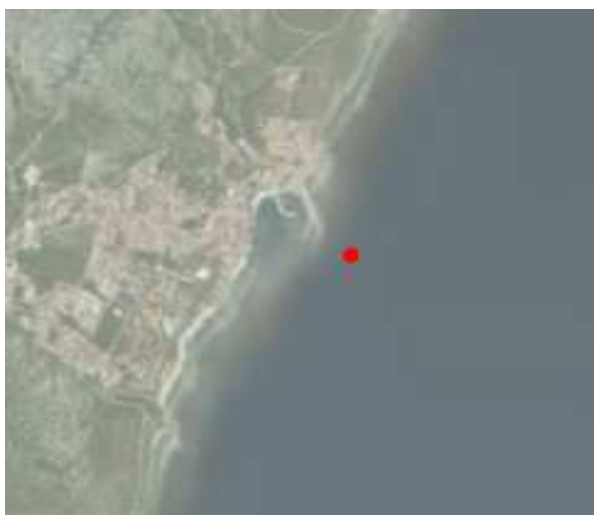


Figura 19. Punto di ingresso alla griglia di dettaglio

Tabella 9. Variazione dell'altezza d'onda nel punto di interesse

Caso	H (m)	Dir(°N)
1	4.4	77
2	5.4	101
3	3.3	123

I risultati sono simili ai valori assunti dal citato "Studio Sirito" del 2000. In questo caso i valori delle altezze d'onda sono stati definiti per direzioni tra i 40° e i 100°, tra i 100° e i 140° e tra i 140° e i 180° assumendo valore di altezza d'onda pari a $H_s=5m$.

Poiché ai fini dell'agitazione interna risultano significativi i casi di provenienza dal I quadrante e dalla direzione 140-180 si svolgono analisi di dettaglio prendendo in considerazione le direzioni di 40°, 70° e 160° ed assumendo un'altezza d'onda significativa pari a 5m, come indicato dagli studi di Aprile del 2000. Questi valori infatti risultano più gravosi rispetto a quanto ricavato con la propagazione da largo verso riva ed i cui dati sono riportati in Tabella 9.

L'analisi del moto ondoso è stata eseguita con software Artemis considerando un settore di dimensioni adeguate intorno al porto di Cala Gonone delimitato da un rettangolo inclinato di 160N (direzione presa perpendicolare a quella di 70°). E' stata utilizzata una mesh a maglia triangolare con dimensione 5x5 ed applicata sia allo stato attuale che alle varianti di ampliamento.

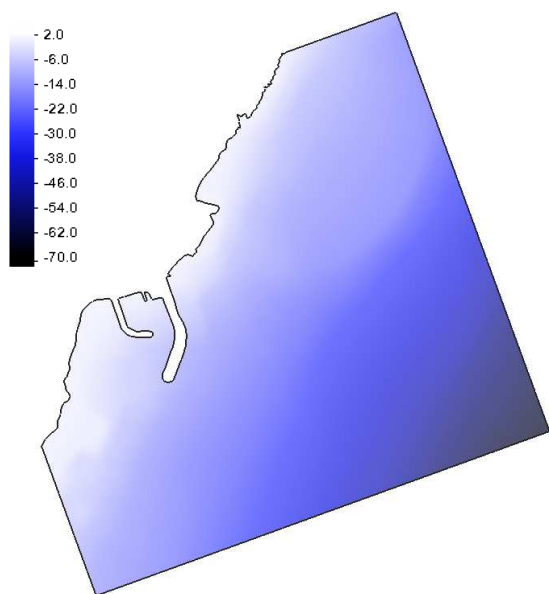


Figura 20. Mesh batimetria stato attuale

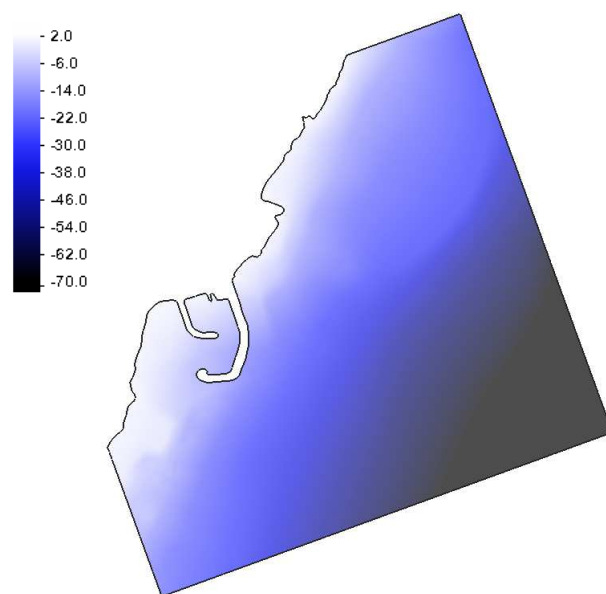


Figura 21. Mesh batimetria scenario 1

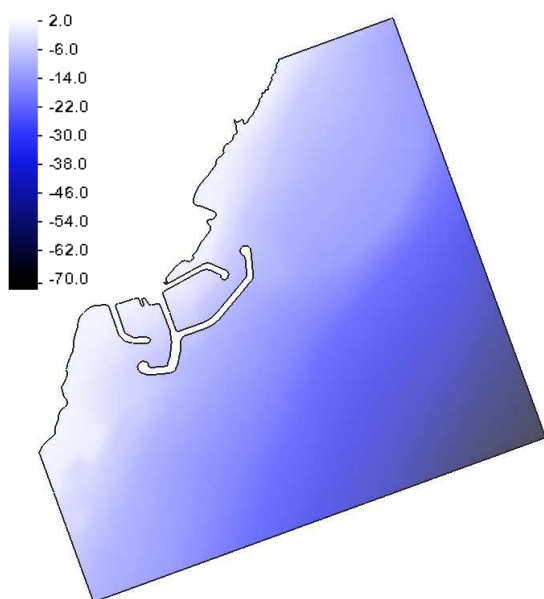


Figura 22. Mesh batimetria scenario 2

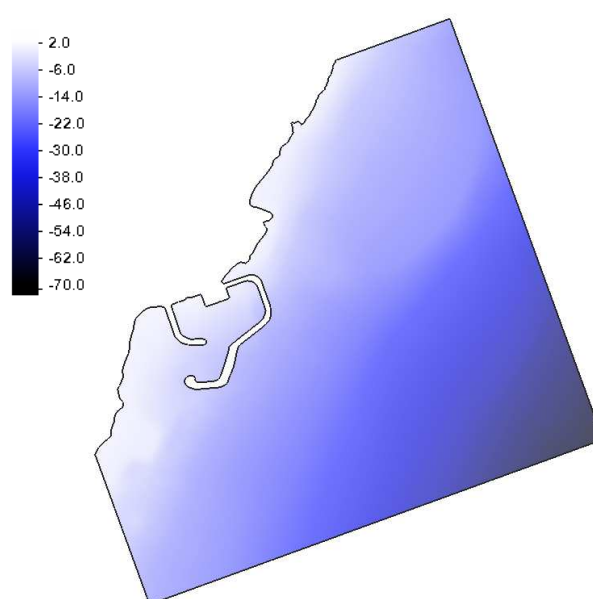


Figura 23. Mesh batimetria scenario 3A

Per ottenere delle informazioni più precise per l'agitazione all'interno del porto, per quanto riguarda lo scenario 2 è stata creata un'ulteriore mesh perpendicolare alla direzione di 40° e quindi inclinata di 130N.

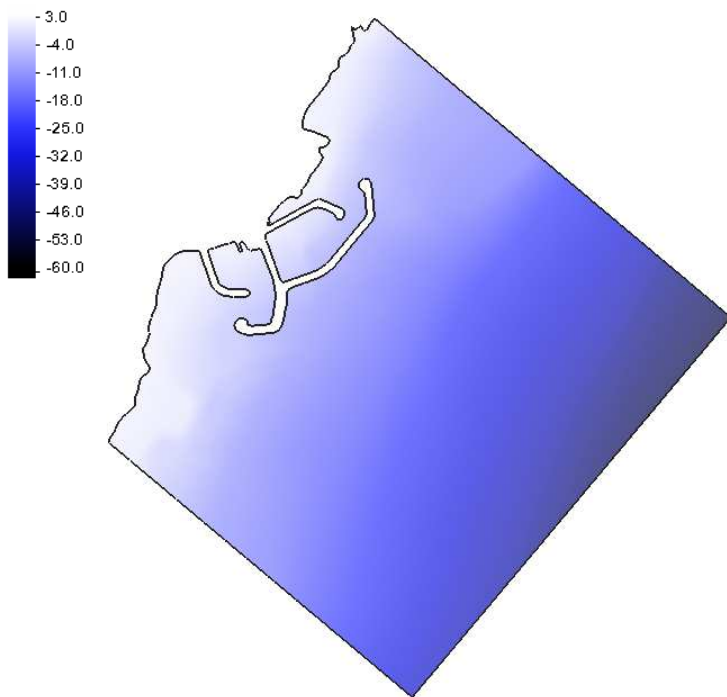


Figura 24. Mesh batimetria seconda ipotesi perpendicolare alla direzione di 40°

Relativamente all'ipotesi 3 di ampliamento è stata analizzata anche l'eventuale minore inclinazione del prolungamento del molo di sopraflutto in direzione sud, al fine di agevolare maggiormente l'ingresso al porto (scenario 3B).

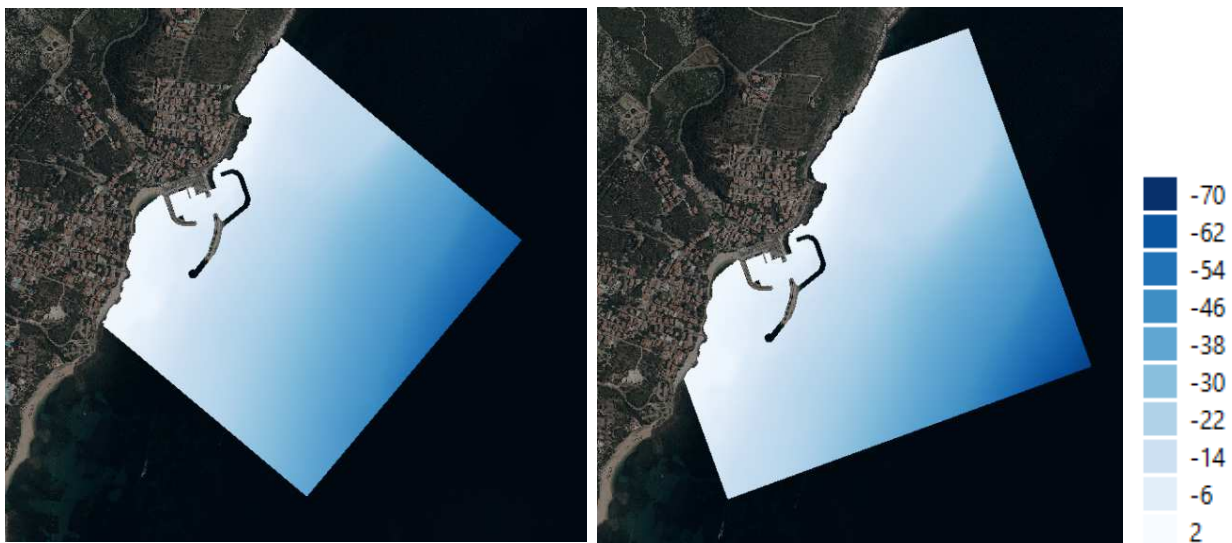


Figura 25. Mesh batimetria scenario 3B

Dall'analisi si osserva l'attenuazione del moto ondoso in tutti gli scenari di ampliamento come si può vedere dalle seguenti immagini dove vengono riportati i risultati delle simulazioni con vento proveniente da 40°, 70° e 160° .

7.2.1 *Simulazioni stato attuale*

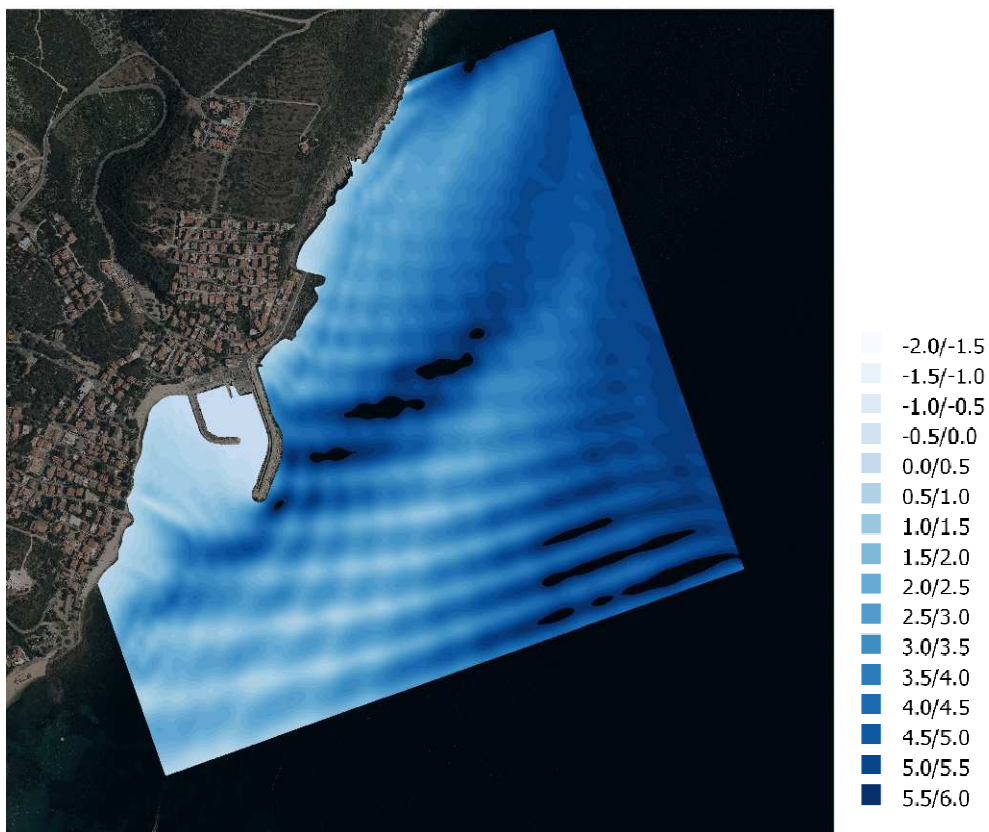


Figura 26. Altezza d'onda stato attuale (40°N)

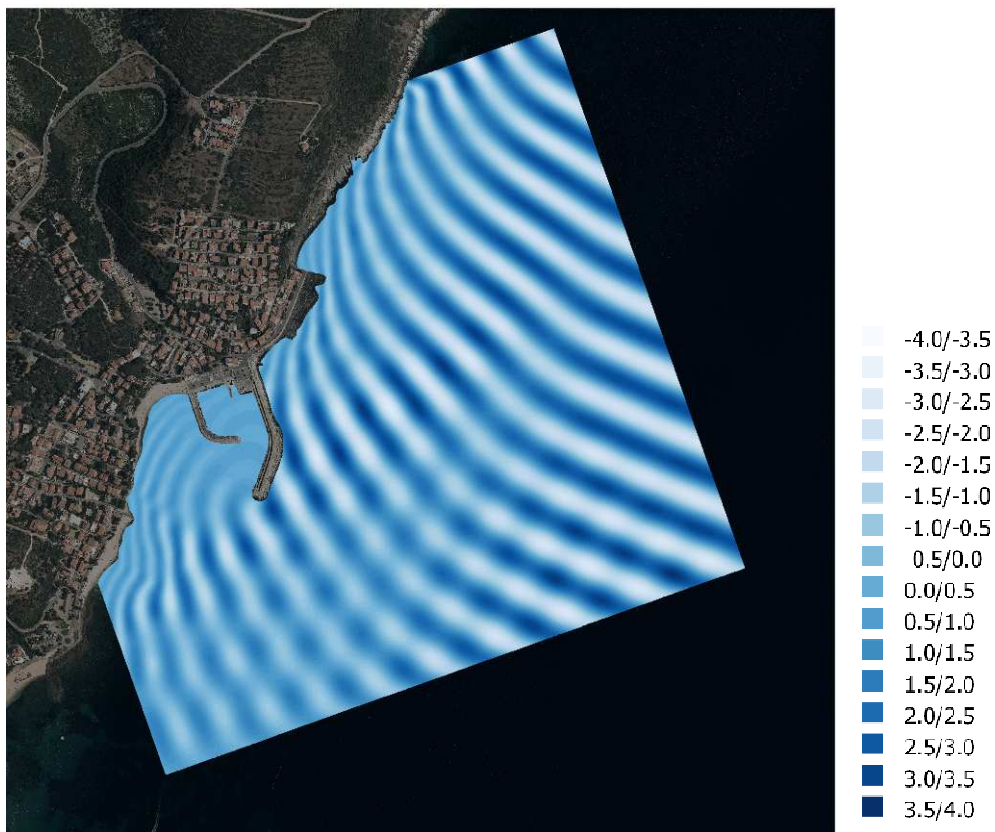


Figura 27. Superficie marina stato attuale (40°N)

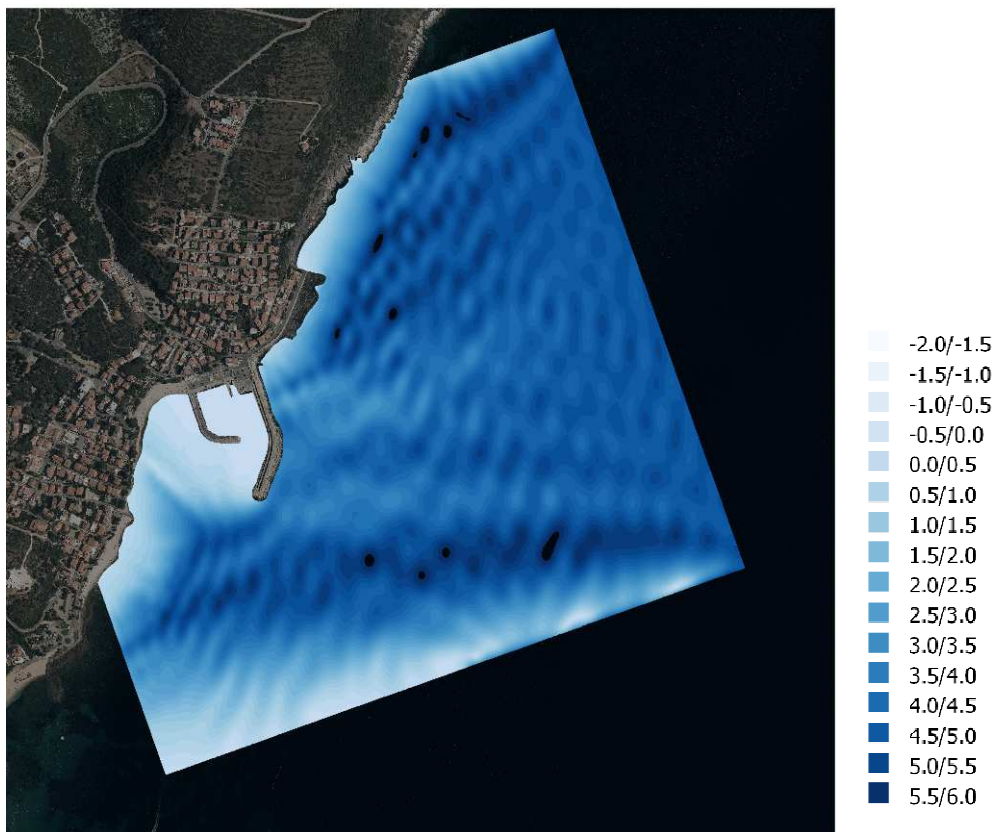


Figura 28. Altezza d'onda stato attuale (70°N)

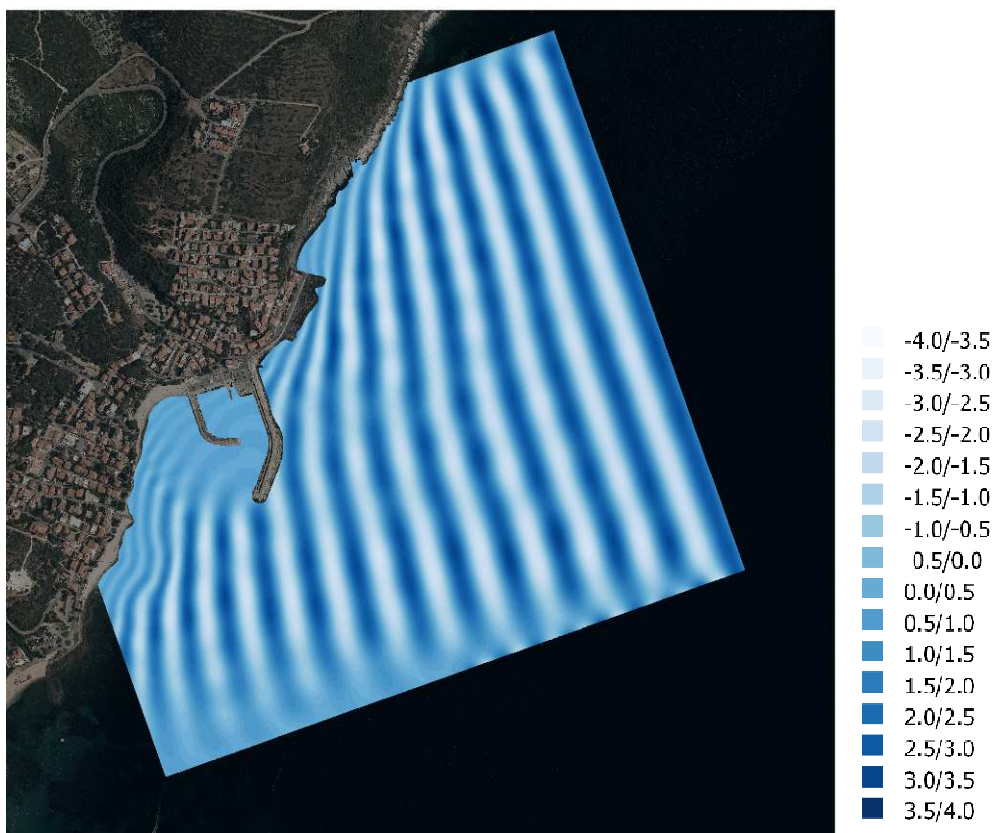


Figura 29. Superficie marina stato attuale (70°N)

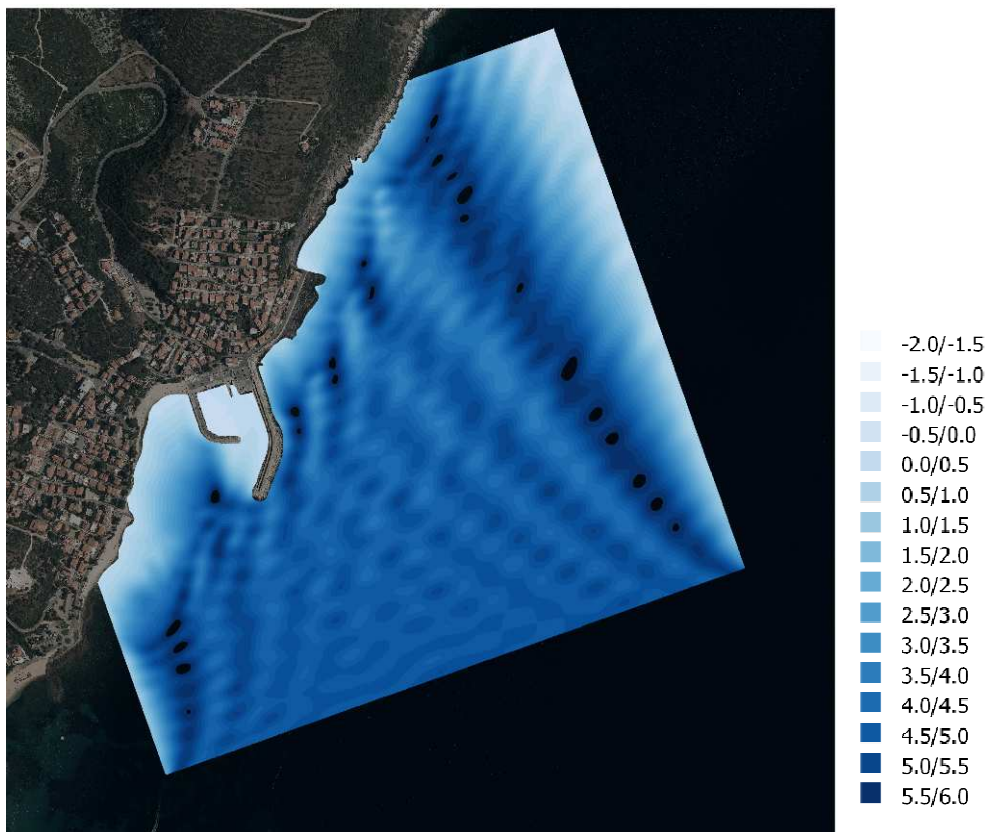


Figura 30. Altezza d'onda stato attuale (160°N)

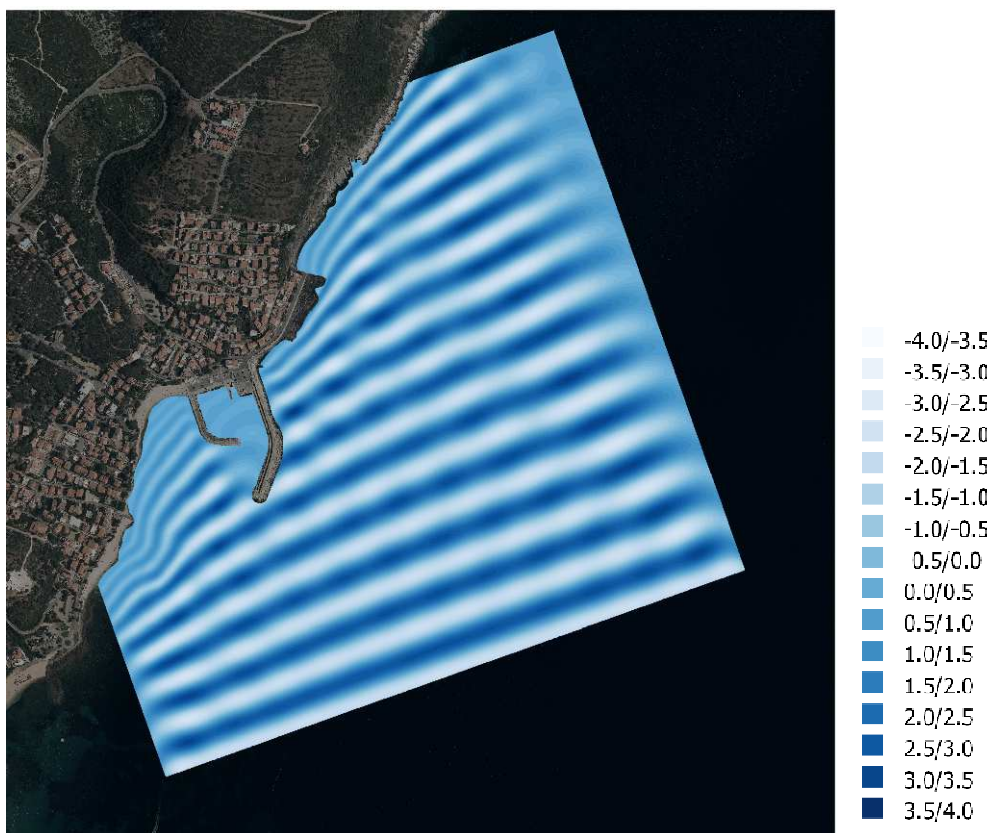


Figura 31. Superficie marina stato attuale (160°N)

7.2.2 Simulazioni scenario 1

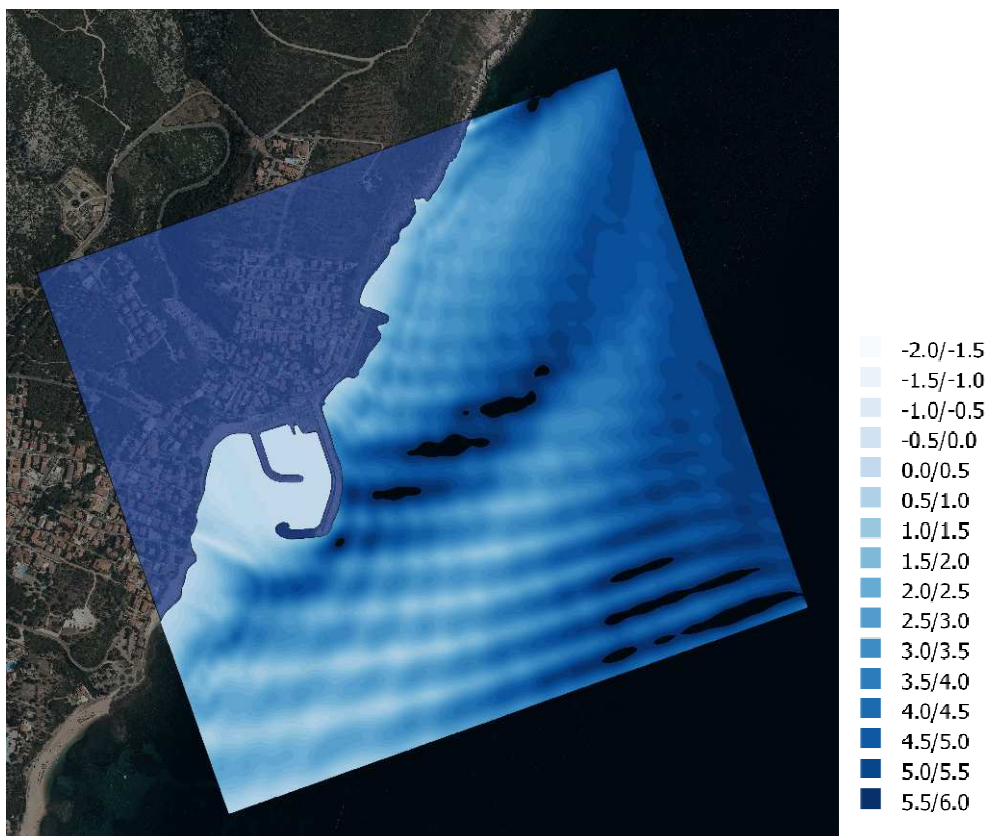


Figura 32. Altezza d'onda scenario 1 (40°N)

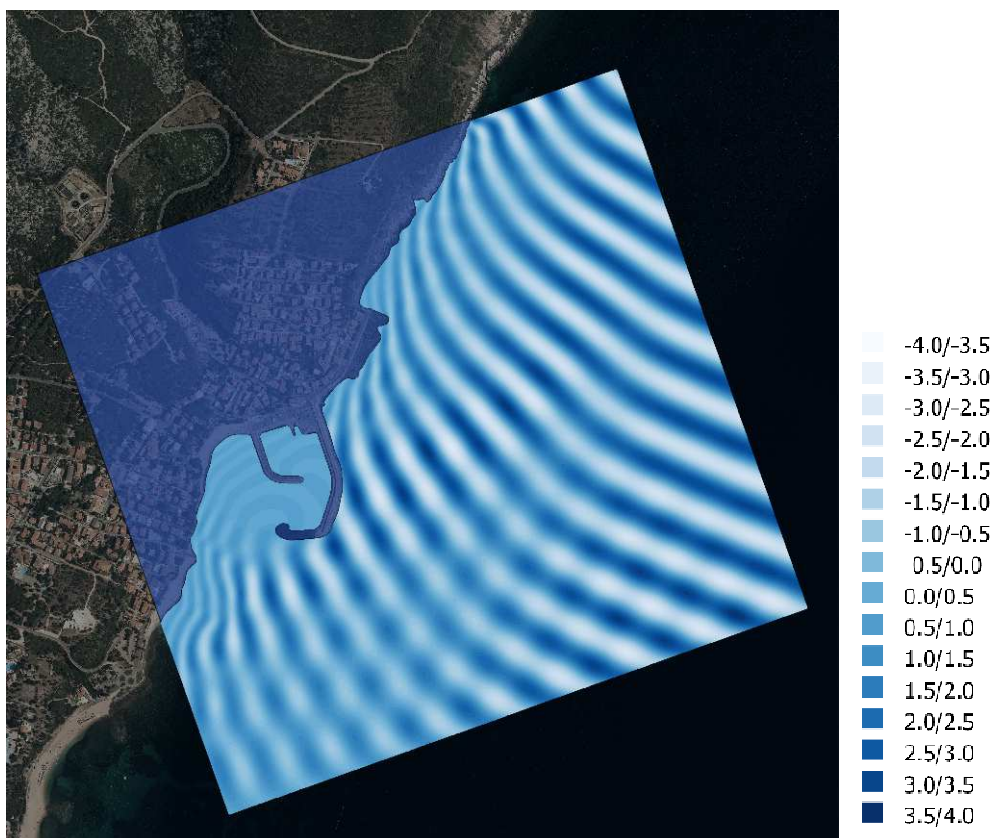


Figura 33. Superficie marina scenario 1 (40°N)

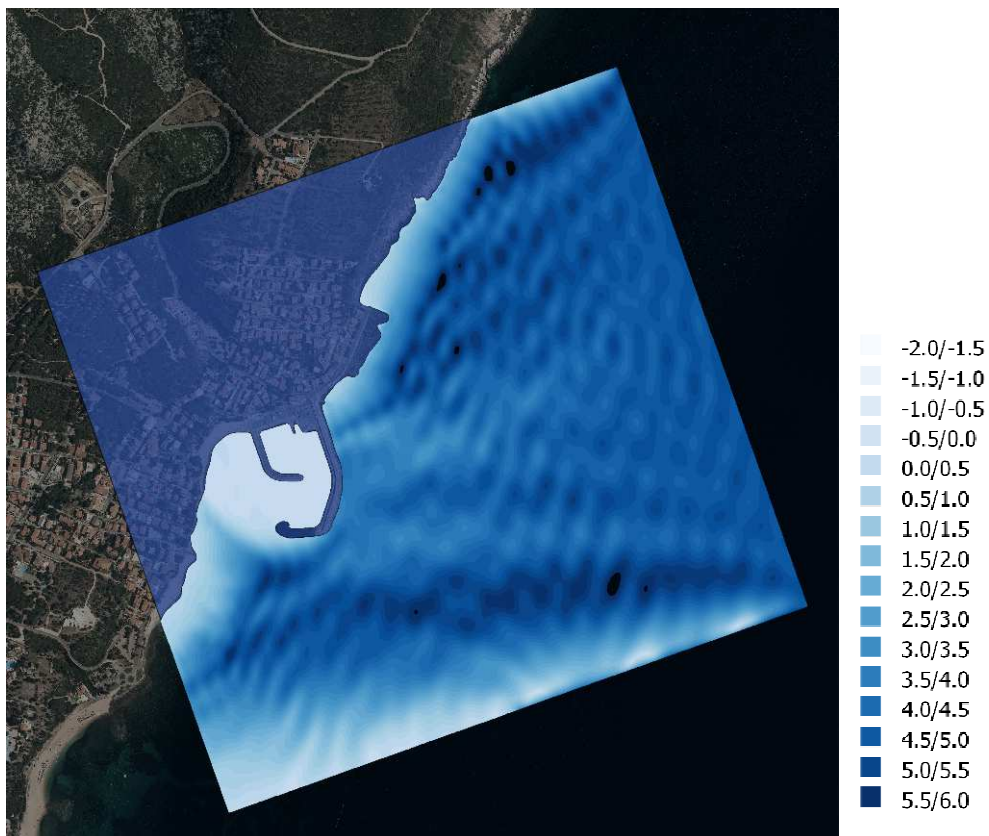


Figura 34. Altezza d'onda scenario 1 (70°N)

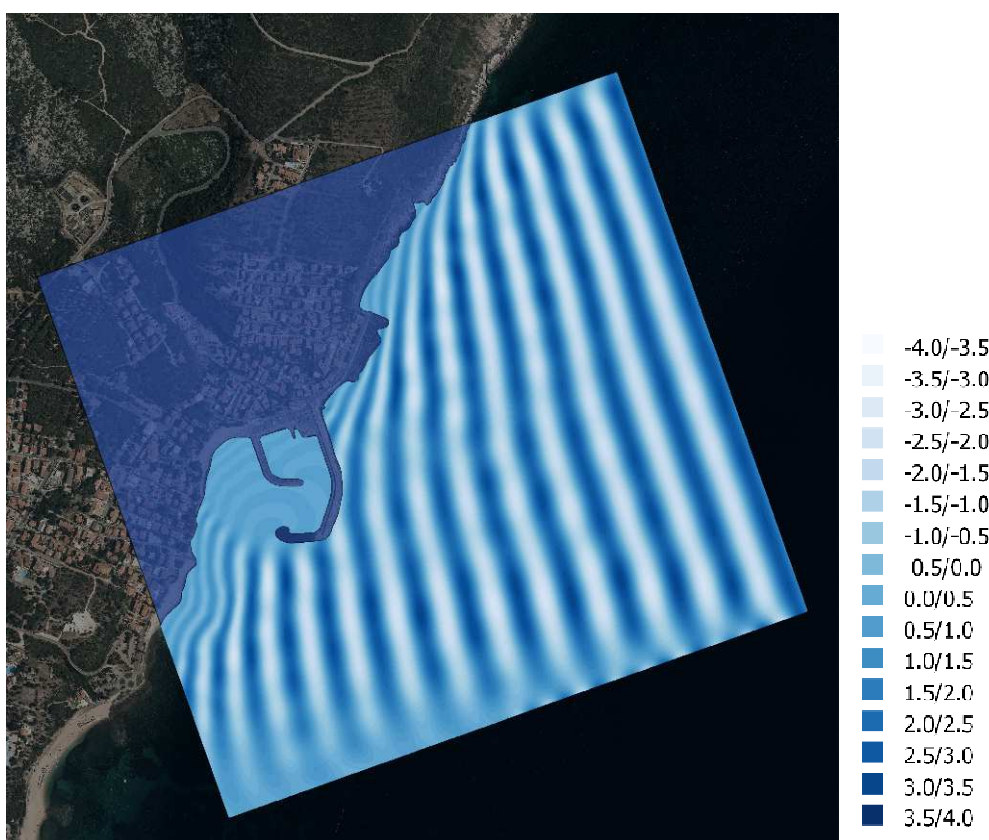


Figura 35. Superficie marina scenario 1 (70°N)

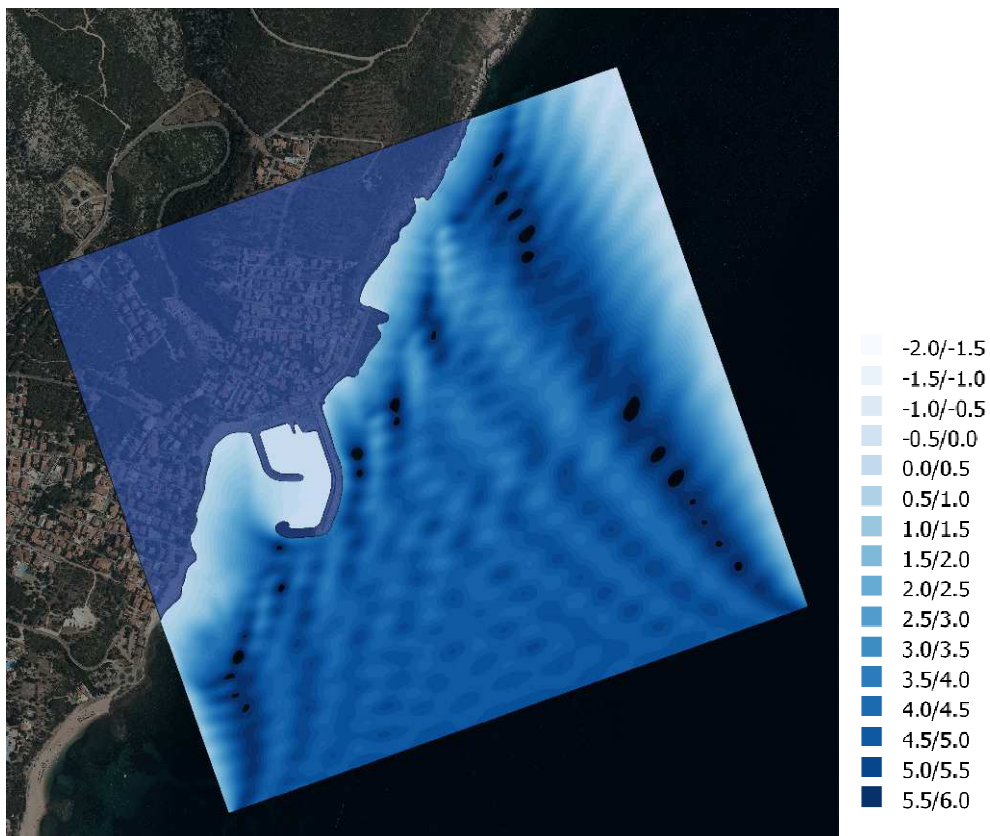


Figura 36. Altezza d'onda scenario 1 (160°N)

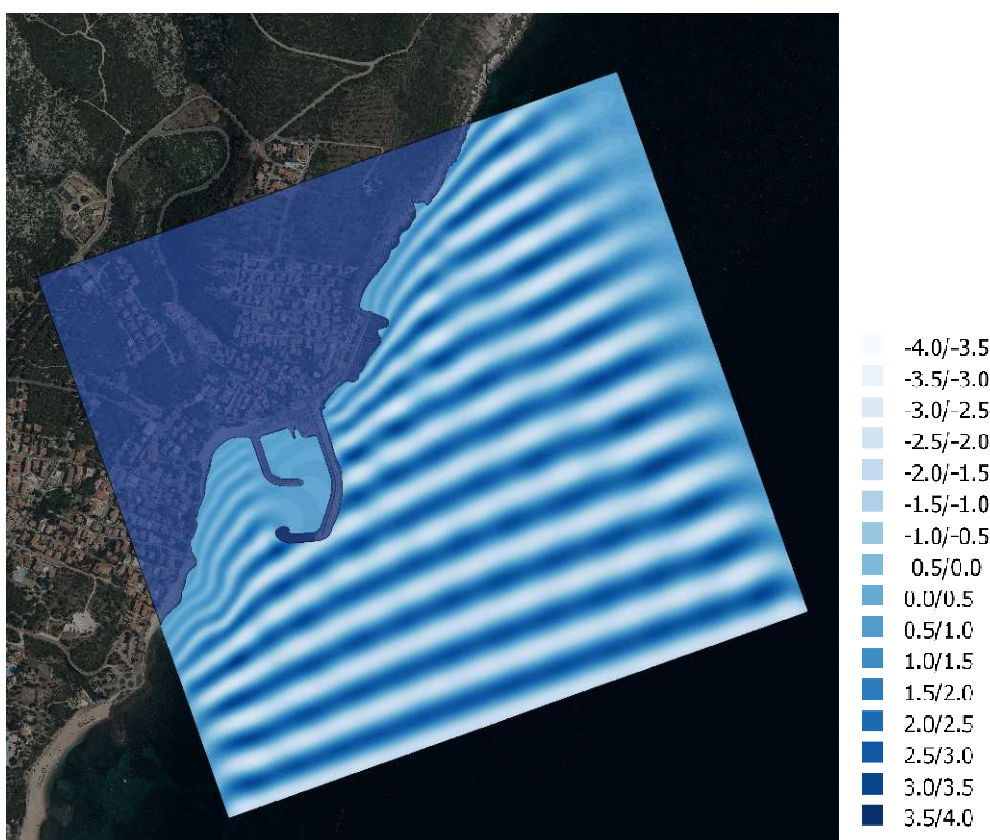


Figura 37. Superficie marina scenario 1 (160°N)

7.2.3 Simulazioni scenario 2

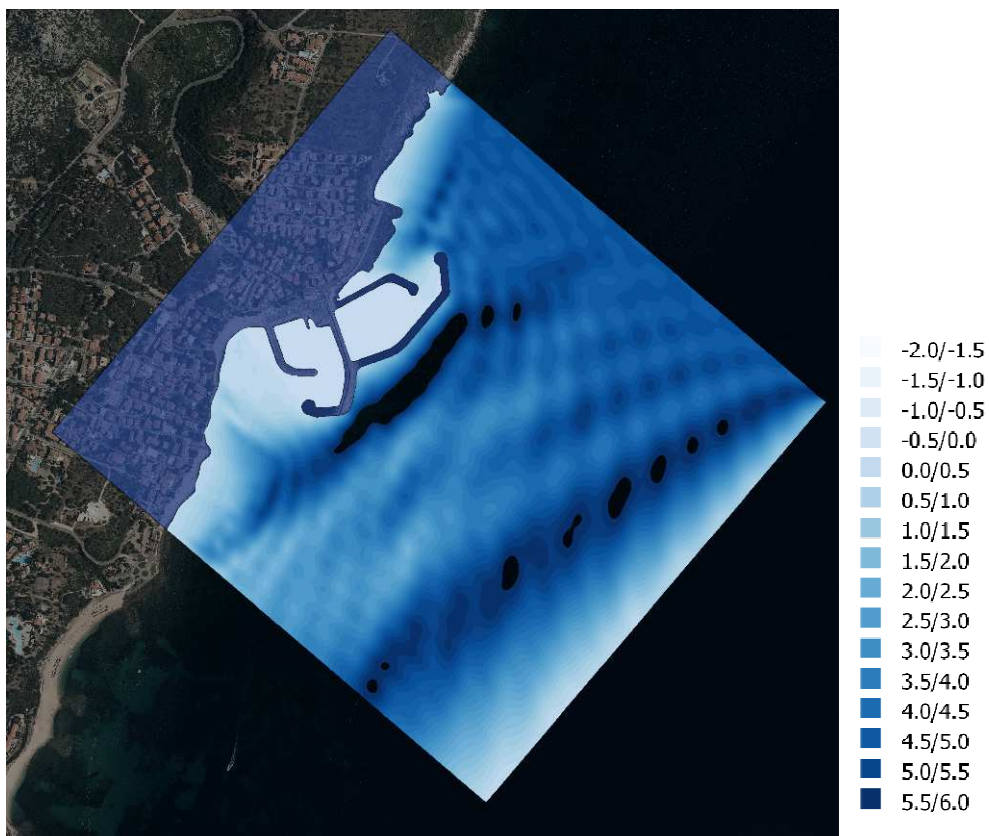


Figura 38. Altezza d'onda scenario 2 (40°N)

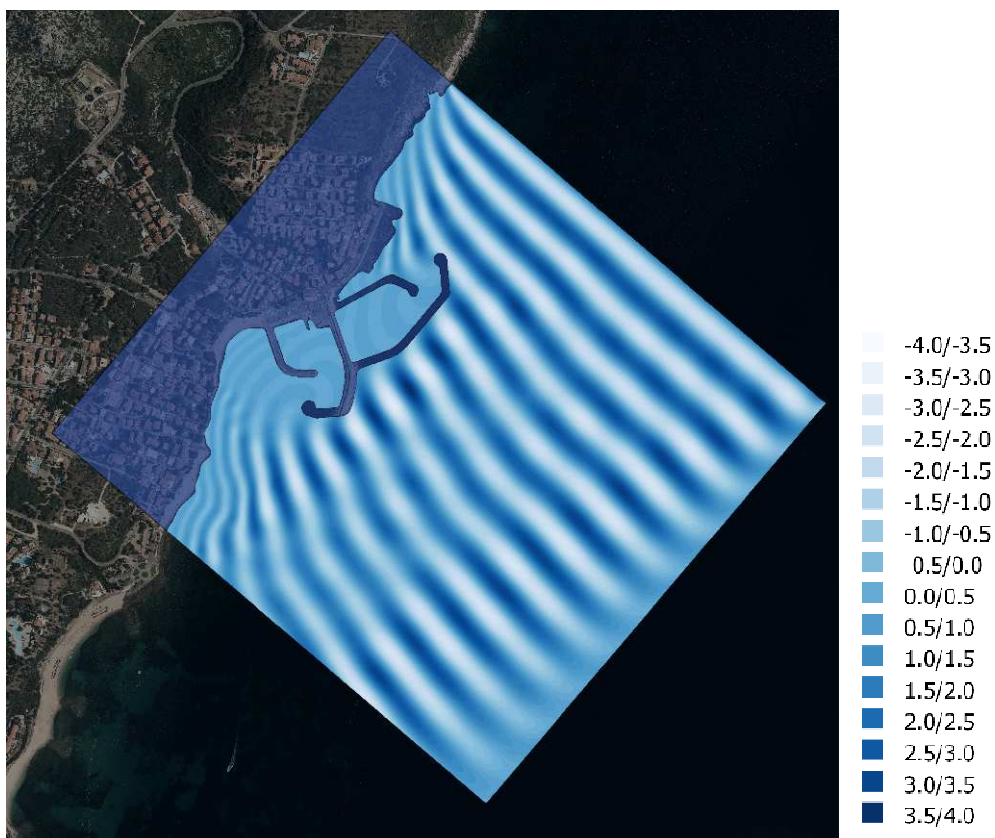


Figura 39. Superficie marina scenario 2 (40°N)

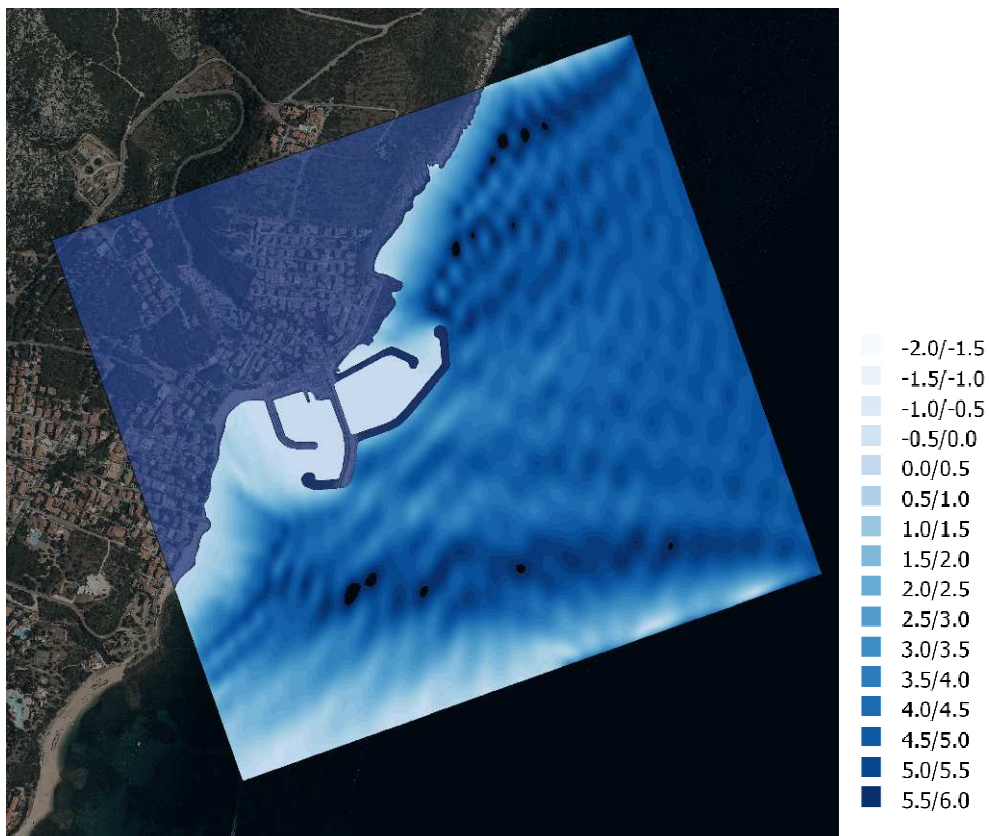


Figura 40. Altezza d'onda scenario 2 (70°N)

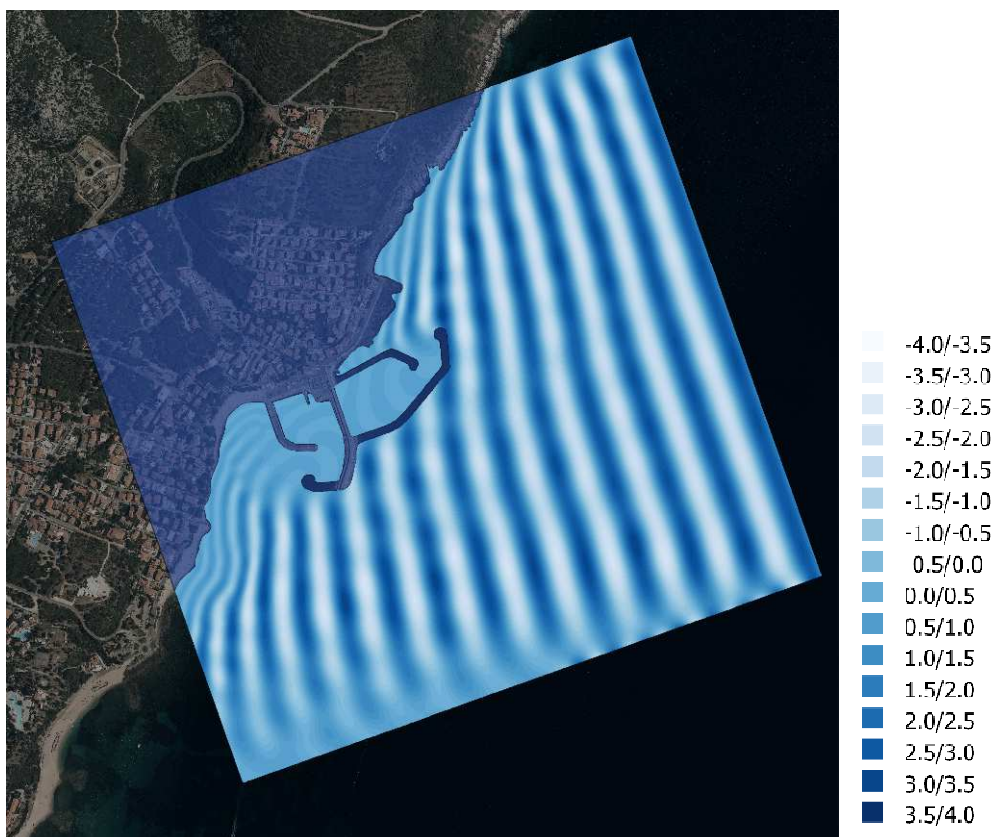


Figura 41. Superficie marina scenario 2 (70°N)

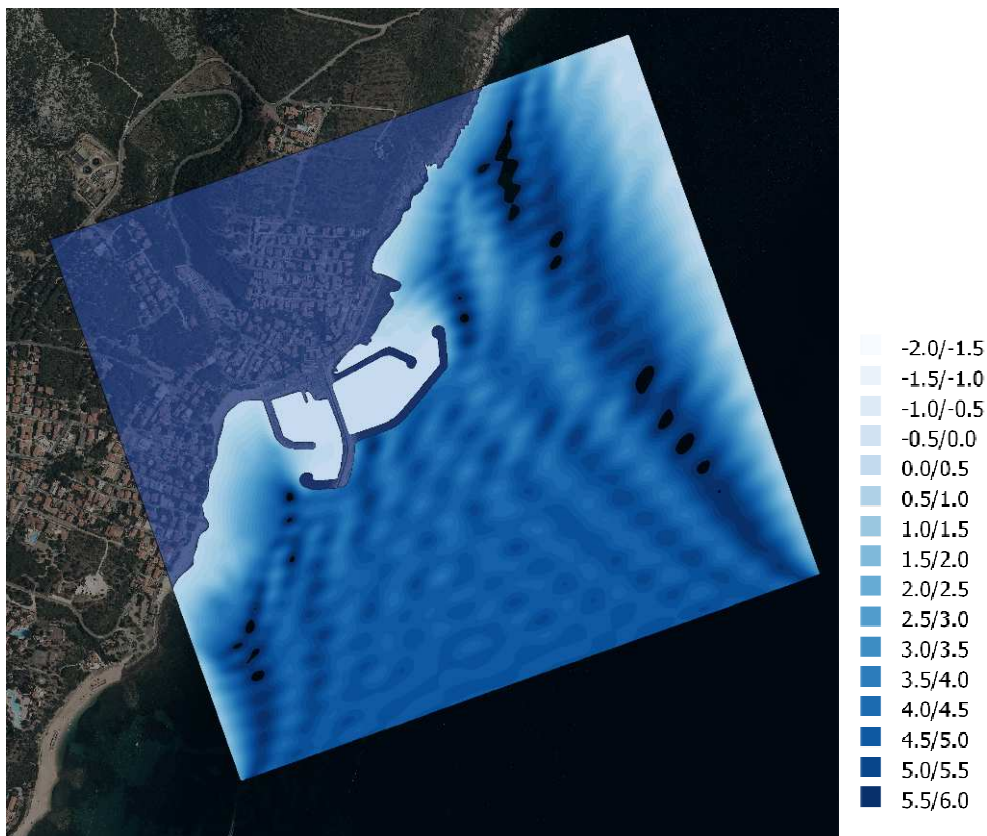


Figura 42. Altezza d'onda scenario 2 (160°N)

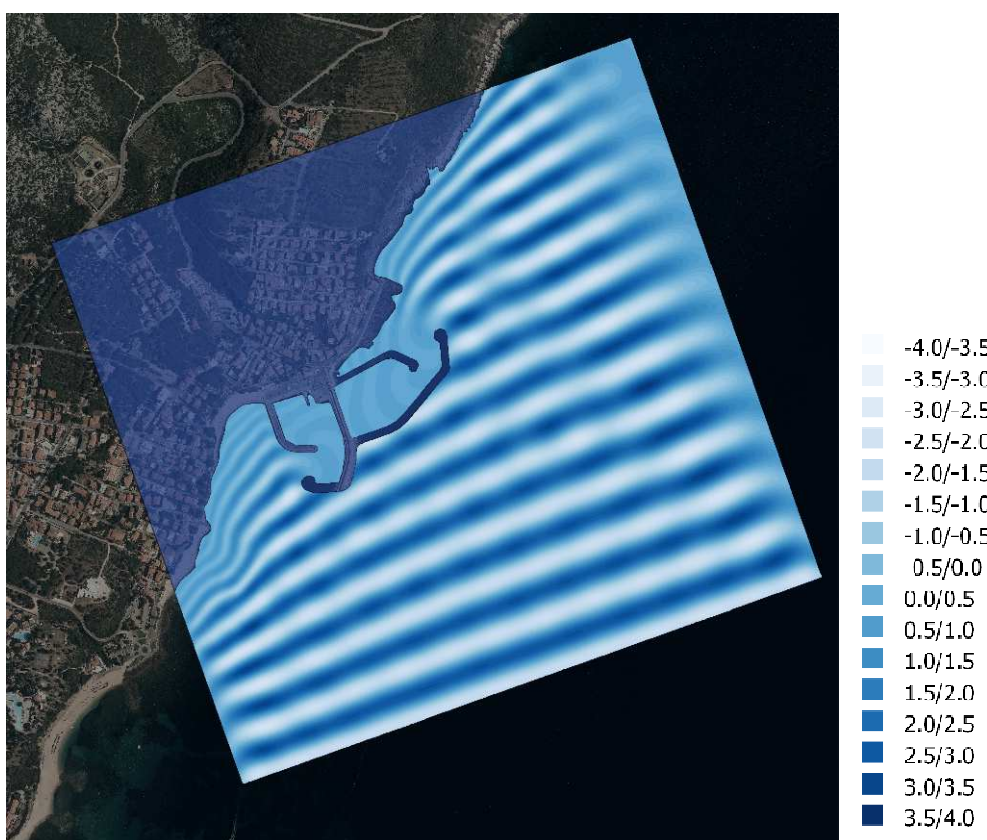


Figura 43. Superficie marina scenario 2 (160°N)

7.2.4 *Simulazioni scenario 3A*

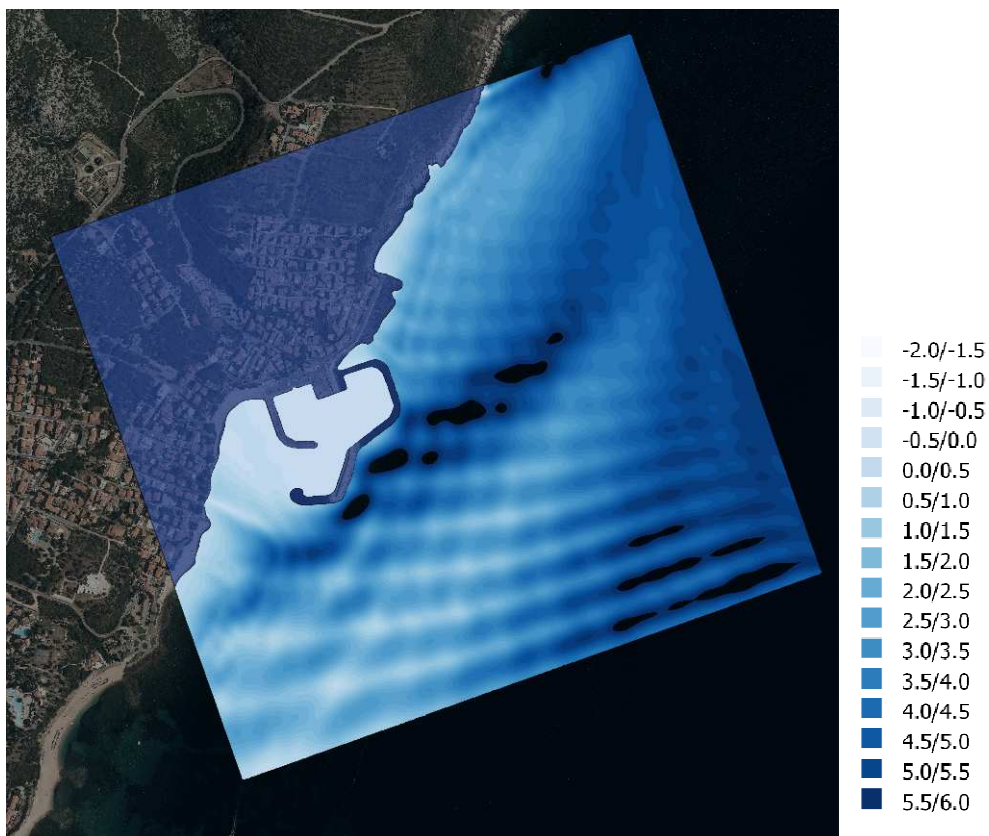


Figura 44. Altezza d'onda scenario 3A (40°N)

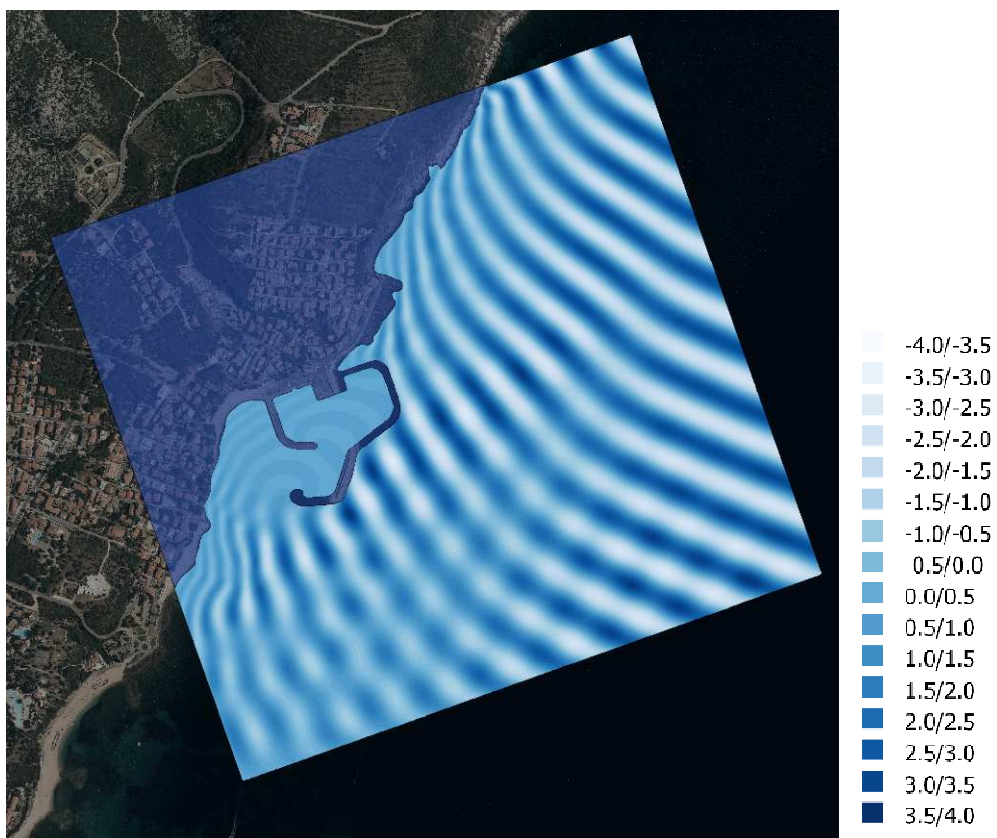


Figura 45. Superficie marina scenario 3A (40°N)

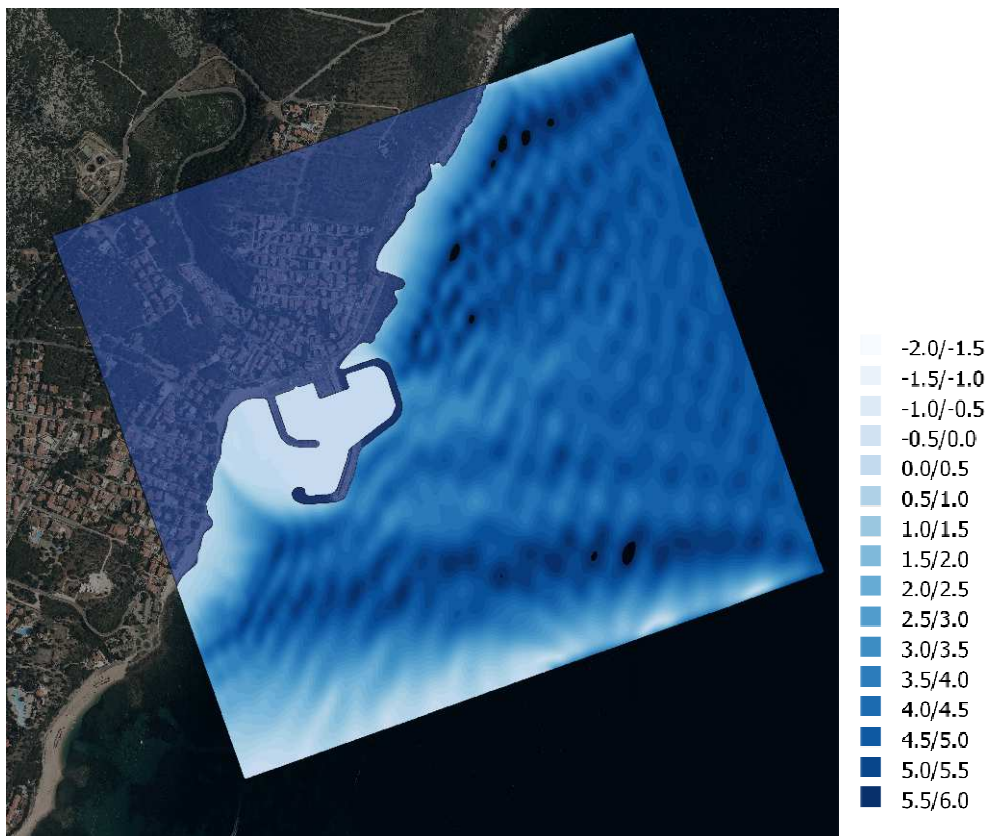


Figura 46. Altezza d'onda scenario 3A (70°N)

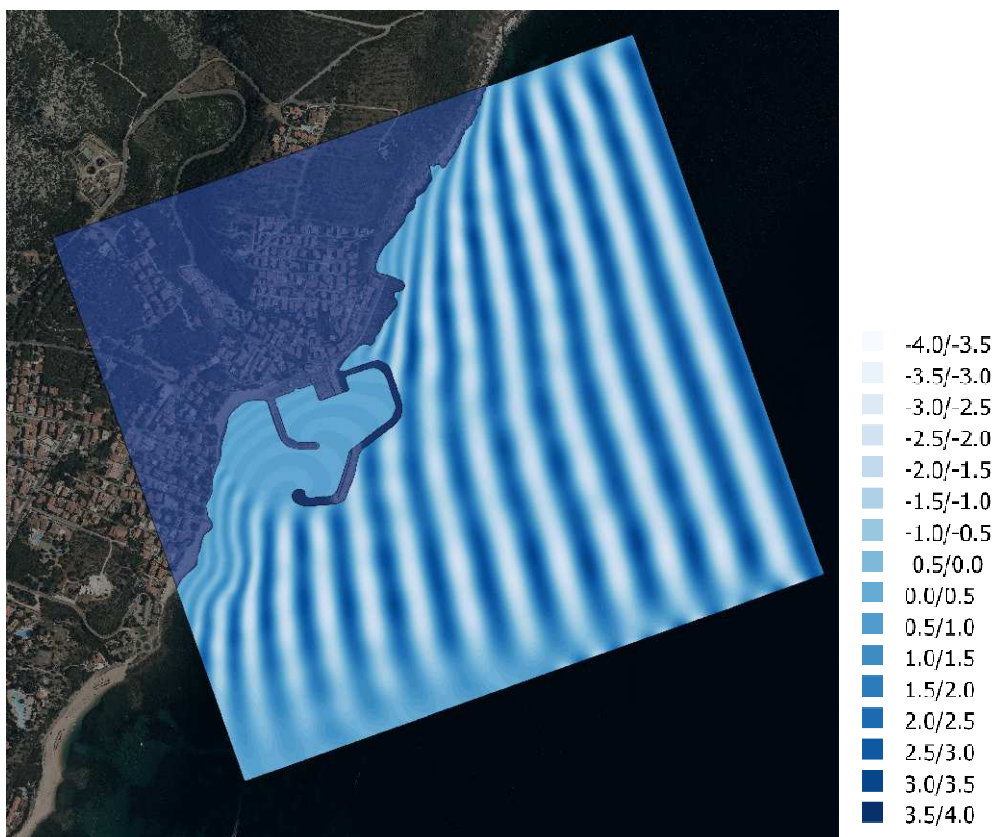


Figura 47. Superficie marina scenario 3A (70°N)

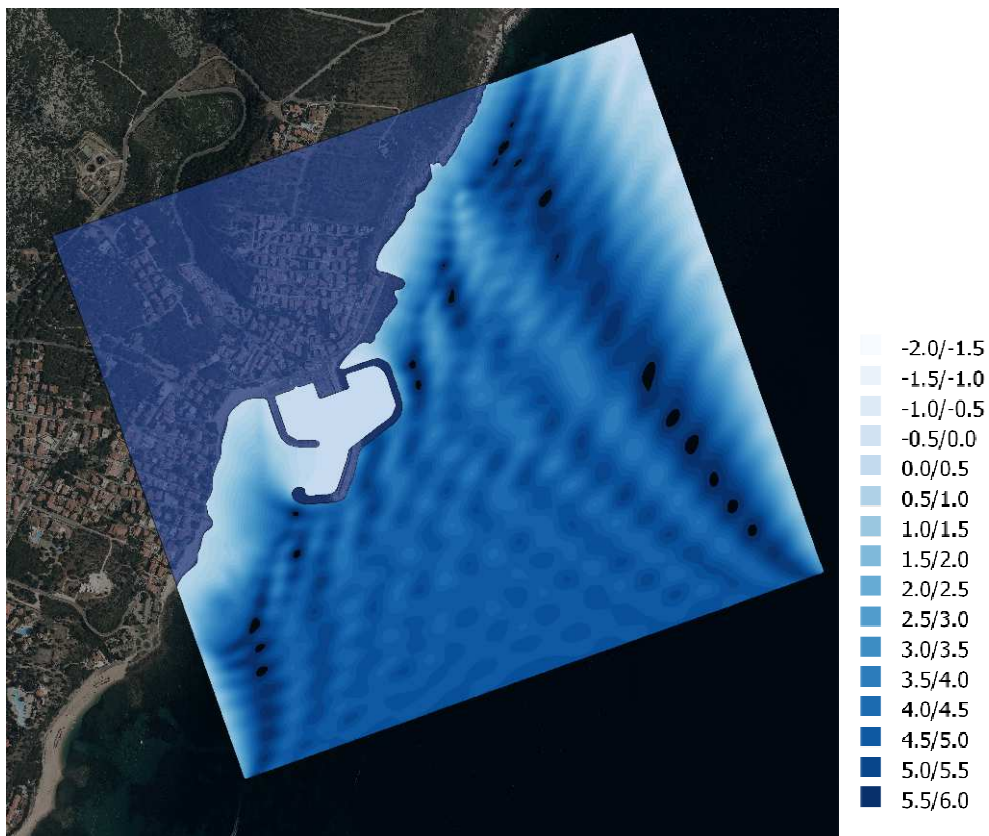


Figura 48. Altezza d'onda scenario 3A (160°N)

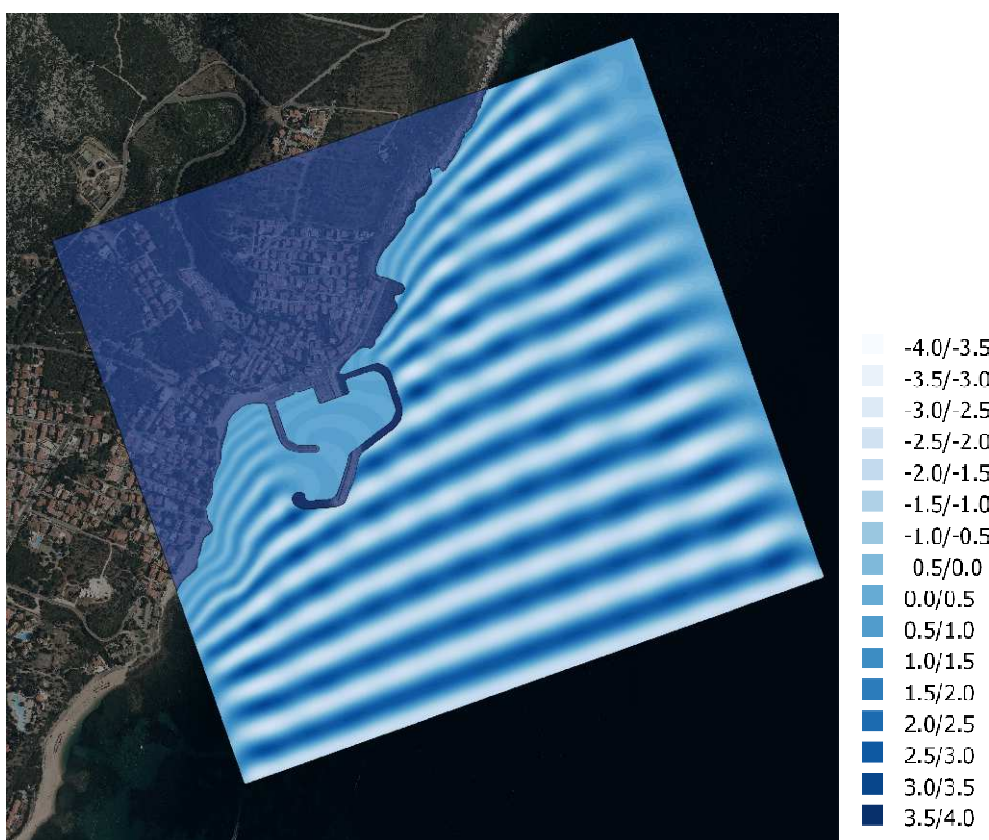


Figura 49. Superficie marina scenario 3A (160°N)

7.2.5 Simulazioni scenario 3B

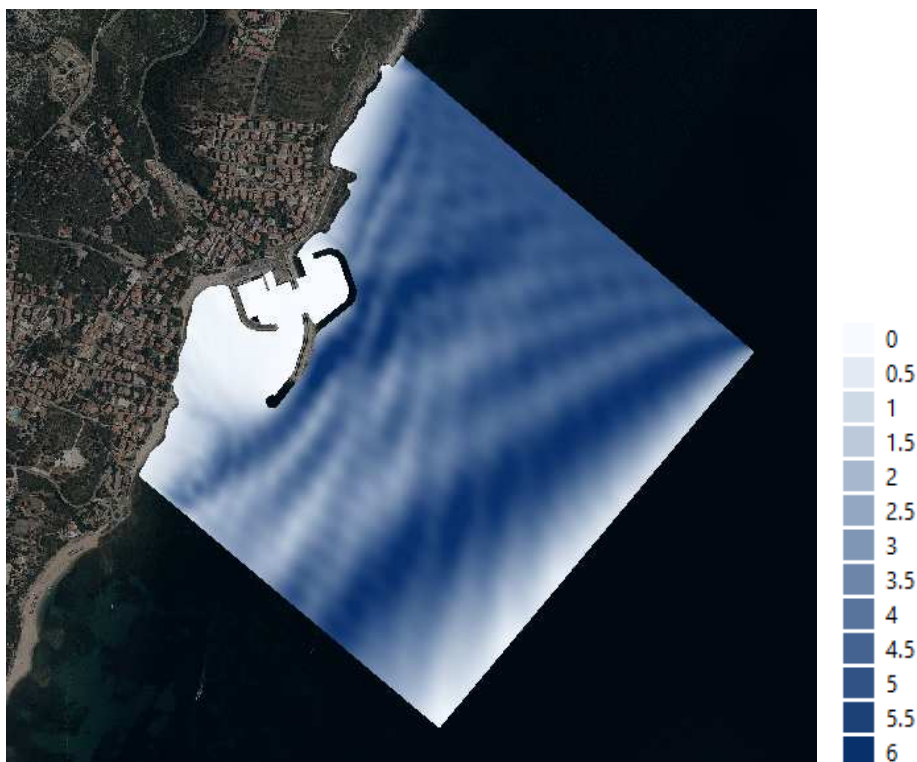


Figura 50. Altezza d'onda scenario 3B (40°N)

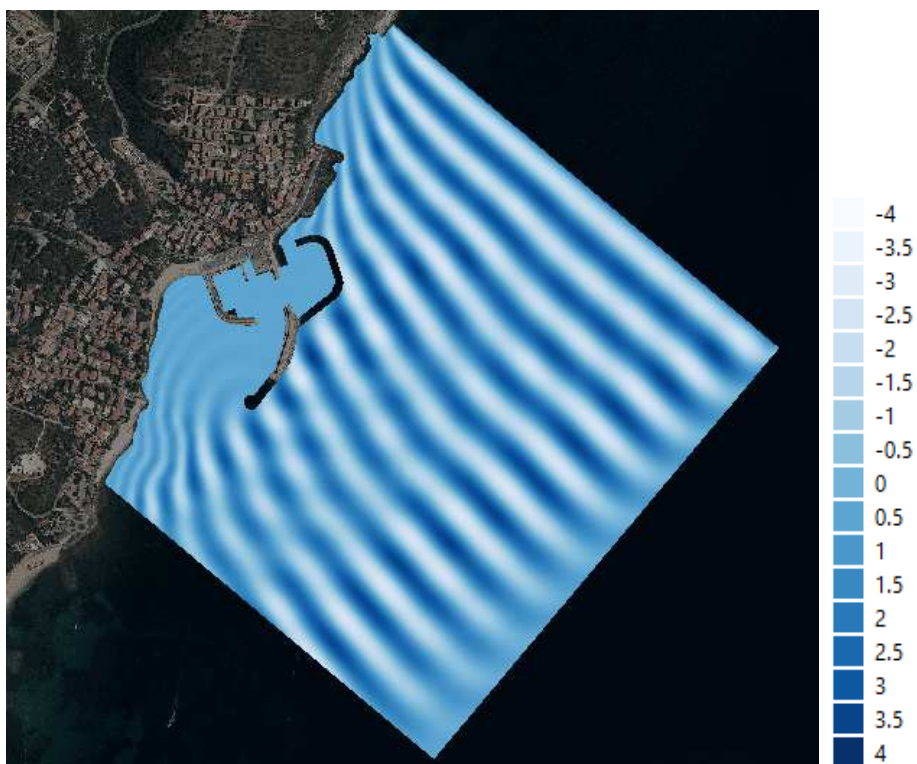


Figura 51. Superficie marina scenario 3B (40°N)

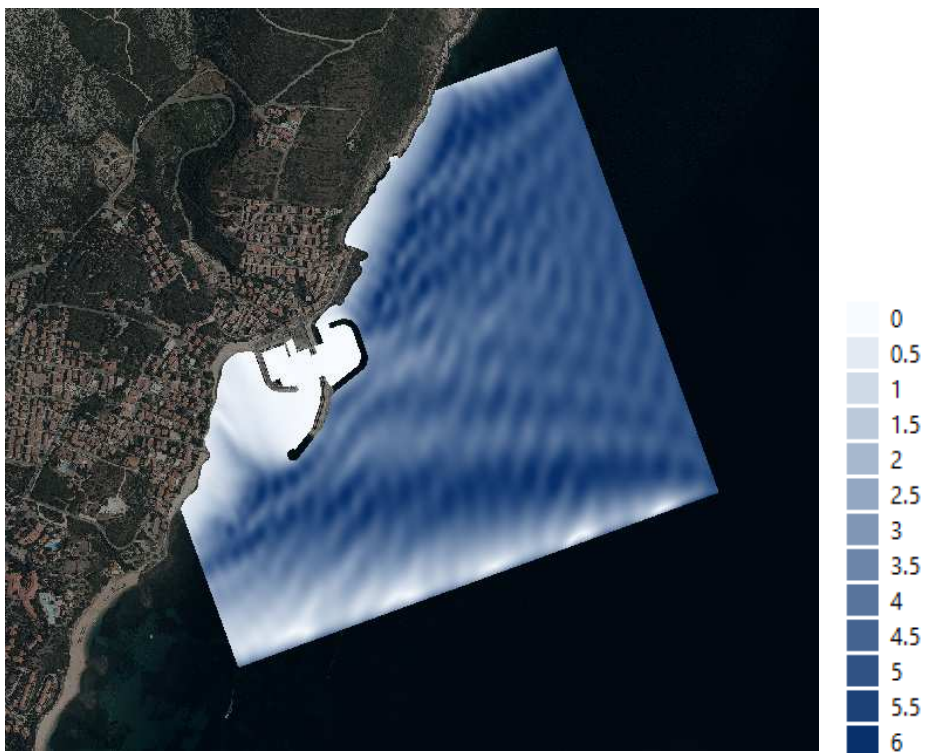


Figura 52. Altezza d'onda scenario 3B (70°N)

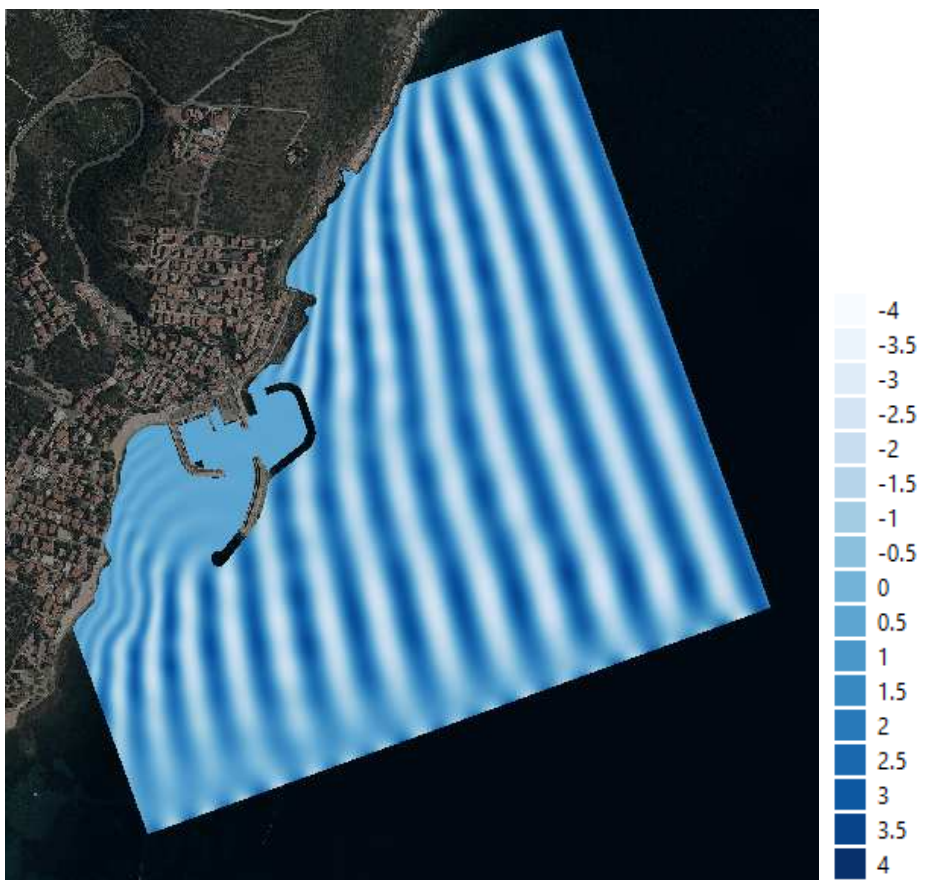


Figura 53. Superficie marina scenario 3B (70°N)

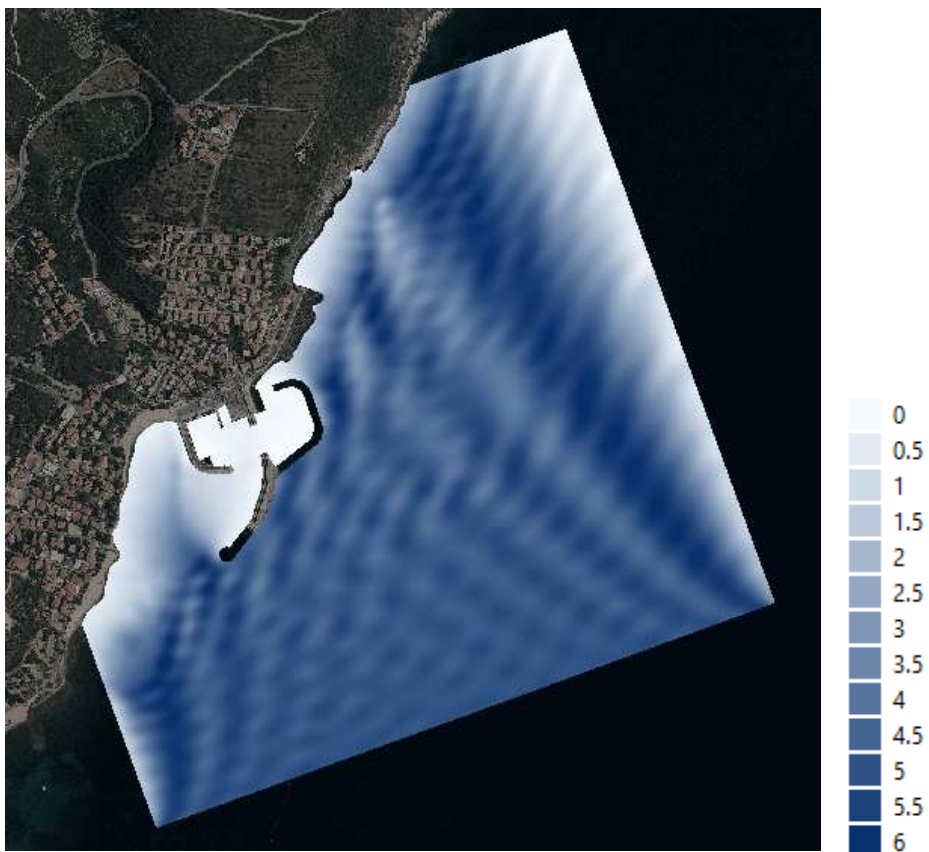


Figura 54. Altezza d'onda scenario 3B (160°N)

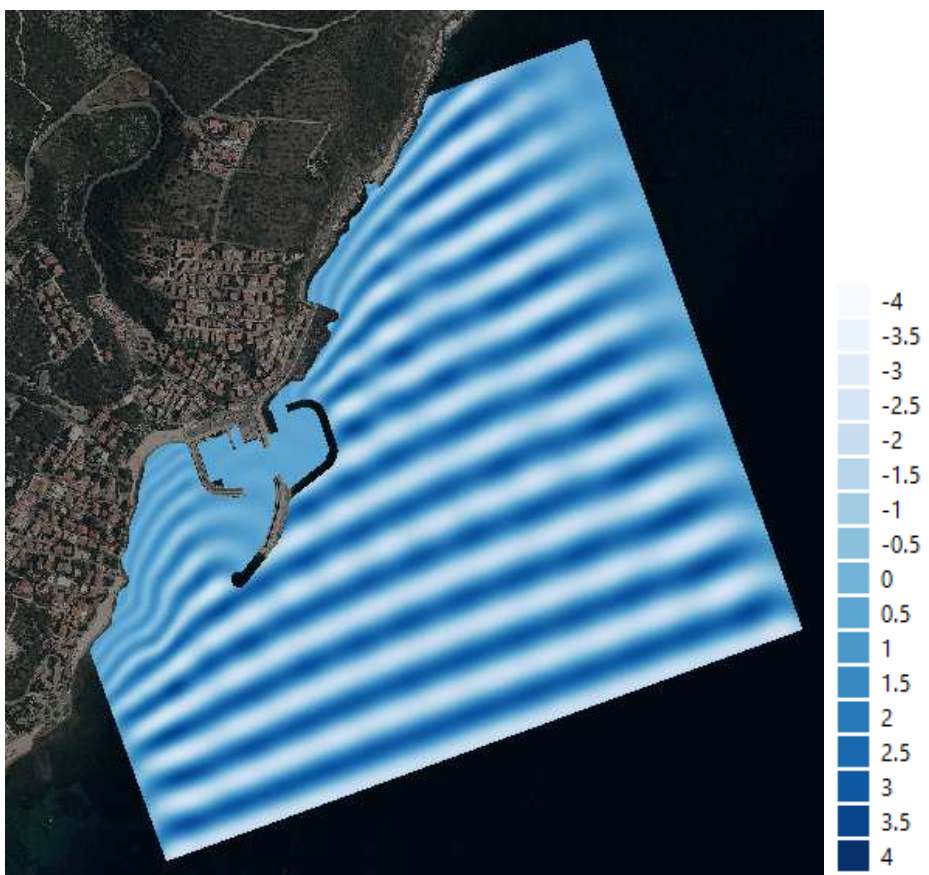


Figura 55. Superficie marina scenario 3B (160°N)

7.2.6 Verifica dei risultati

Per verificare i risultati è stato effettuato un confronto dei dati d'onda nei vari scenari investigati in corrispondenza dell'imboccatura del porto.

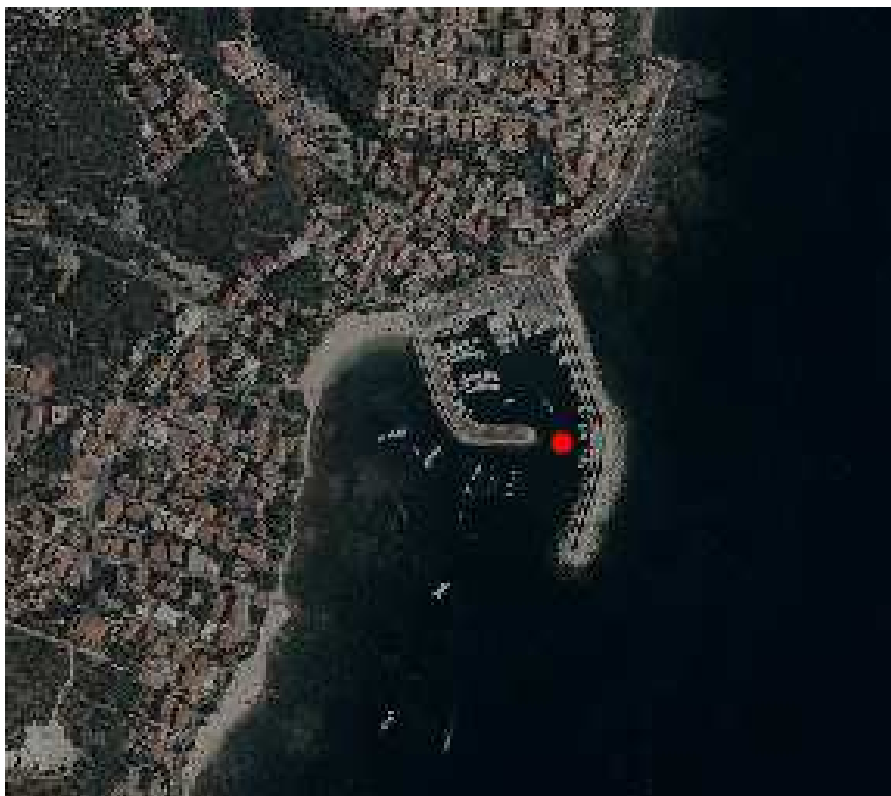


Figura 56. Punto di interesse

In tale punto si riscontrano le altezze d'onda riportate in Tabella 10 in base alla direzione di propagazione; per tutti gli scenari si riscontra una riduzione dell'altezza d'onda.

Tabella 10. Altezza d'onda all'imboccatura del porto nei vari scenari

Direzione vento	Altezza d'onda (m)				
	Attuale	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3A	Scenario 3B
40°	0.18	0.03	0.04 m	0.04 m	0.05 m
70°	0.09	0.04	0.02 m	0.04 m	0.08 m
160°	0.61	0.21	0.28 m	0.20 m	0.50 m

In genere si ottengono attenuazioni significative che consentono di impiegare gli specchi acquei interni in maniera più completa. Resta un'agitazione residua più elevata per mareggiate da scirocco nello scenario 3B, stante l'inclinazione del molo di sopraflutto che non si sovrappone in maniera rilevante al braccio di sottoflutto. Approfondimenti progettuali in termini batimetrici consentiranno comunque di ottimizzare questa configurazione che garantisce maggiore facilità di manovra all'ingresso (anche nei confronti dei possibili frangenti).

In maniera analoga è stata analizzato il valore dell'onda residua in corrispondenza dell'imboccatura nord dello scenario 2.

In questo caso i valori di altezza d'onda sono leggermente più elevati ma consentono comunque l'accessibilità al porto (Tabella 11). Tale configurazione risulta comunque quella più favorevole grazie alla doppia opzione di ingresso.



Figura 57. Punto di interesse imboccatura nord nello scenario 2

Tabella 11. Altezza d'onda all'imboccatura nord del porto nello scenario 2

Direzione vento	Altezza d'onda (m)
	Scenario 2
40°	0.61 m
70°	0.75 m
160°	0.24 m

8 CONCLUSIONI

A supporto del piano regolatore portuale di Cala Gonone è stata svolta un'analisi del clima meteo marino al fine di definire le condizioni di moto ondoso che insistono sul paraggio e che possono condizionare l'utilizzo e lo sviluppo dell'opera.

Il porto di Cala Gonone è esposto in maniera analoga a direzioni di mare provenienti da Grecale (40-70°N) e da Scirocco/Mezzogiorno (160°N). In entrambi i casi le altezze d'onda raggiungono facilmente valori di circa 5 m in prossimità delle opere foranee rendendo pertanto difficile una protezione completa a tutti gli stati di mare.

La configurazione attuale risulta protetta dalle direzioni di grecale mentre presenta criticità per il settore SE, che penetra con elevata onda residua all'interno del porto rendendo difficoltoso l'utilizzo della parte interna di tutto il molo di sopraflutto.

Al fine di incrementare la fruibilità degli specchi acquei interni sono state proposte 4 configurazioni alternative che consentono di attenuare l'agitazione interna e fornire maggiore protezione in particolare per le proveniente da Scirocco \ Mezzogiorno. Tra queste è stata valutata la possibilità di prevedere un ampliamento con una doppia imboccatura. Pur con questo vantaggio la soluzione è fortemente penalizzata dai fondali elevati su cui insistono le nuove opere.

Le altre ipotesi prevedono un prolungamento del molo di sopraflutto per garantire maggiore protezione dalle direzioni meridionali. L'entità del prolungamento svolge un ruolo preponderante sull'attenuazione del moto ondoso. In sede di progettazioni più avanzate e con dati batimetrici aggiornati sarà possibile definire in maniera ottimale la configurazione da assegnare al nuovo molo, coniugando esigenze di protezione e di manovrabilità all'imboccatura.