

# COMUNE DI TERTENIA

## Provincia di Nuoro



SERVIZIO DI ADEGUAMENTO DEL PROGETTO PRELIMINARE A PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA, PROGETTAZIONE DEFINITIVA-ESECUTIVA DEL I LOTTO FUNZIONALE, DIREZIONE LAVORI, MISURA E CONTABILITÀ E COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE DEL PORTO TURISTICO DI SARRALA, PRESSO LA MARINA DI TERTENIA. CIG 8188366562 - CUP: H91H10000030002

### PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA

ELABORATO <b>R2</b>		STUDIO METEOMARINO			SCALA
		Doc.: 9446			DATA Gennaio 2021
Rev. n°	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO DA	APPROVATO	
00	Emissione	Gen. 21	ing. M. Pittori	ing. M. Pittori	

#### Raggruppamento Temporaneo di Progettisti

##### Capogruppo

**INTERPROGETTI**

INTERPROGETTI S.r.l.  
Via Luigi Lilio, 62 00142 ROMA  
Tel. 0686200297 fax: 0686200298  
E-mail: INFO@INTERPROGETTI.NET

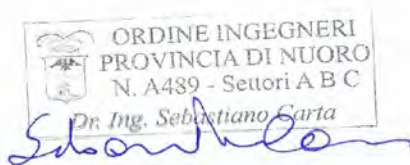
dott. ing. Marco Pittori



##### Collaboratori:

Ing. Silvia Potena  
Arch. Francesca Romana Monass  
Ing. Giulia Zanza  
Arch. Simone Peticarini  
Arch. Raffaele Vaccarello  
Ing. Federico Ratini  
Ing. Lorenzo Spaziani

Ing. Sebastiano Carta



Dott.ssa Archeol. Giuseppa Lopez

ARCHEOLOGA  
**LOPEZ GIUSEPPA**  
Elenco MiBACT  
N. 983



Ing. Riccardo Morelli



Ing. Geol. Marco Valerio Pilia



P.I. Salvatore Sanna



*Comune di Tertenia*



SERVIZIO DI ADEGUAMENTO DEL PROGETTO PRELIMINARE A PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA, PROGETTAZIONE DEFINITIVA-ESECUTIVA DEL I LOTTO FUNZIONALE, DIREZIONE LAVORI, MISURA E CONTABILITÀ E COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE DEL PORTO TURISTICO DI SARRALA, PRESSO LA MARINA DI TERTENIA. CIG 8188366562 - CUP: H91H10000030002

## STUDIO METEOMARINO

---

**PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA**

## INDICE

1.	PREMESSA.....	4
2.	INQUADRAMENTO.....	5
3.	REGIME DEL VENTO E DATI ANEMOMETRICI .....	7
3.1	Analisi dei dati di vento incidenti il paraggio.....	7
4.	DATI ONDAMETRICI .....	9
5.	VARIAZIONE DEL LIVELLO MARINO .....	14
6.	SIMULAZIONI NUMERICHE SUL MOTO ONDOSO DA LARGO VERSO RIVA.....	16
6.1	Introduzione .....	16
6.2	Batimetria.....	16
6.3	Wave Model SWAN .....	17
6.3.1	Impostazioni modello SWAN .....	19
6.3.2	Dati di ingresso ai modelli PHAROS e BREAKWAT.....	21
6.3.3	Dati di ingresso al modello UNIBEST .....	22
6.3.4	Risultati simulazioni.....	22
7.	AGITAZIONE INTERNA.....	29
7.1	Impostazione modello .....	29
7.1.1	Caratteristiche di riflessione.....	29
7.1.2	Condizioni a contorno.....	29
7.2	Risultati simulazioni.....	30
8.	STUDIO IDRAULICO E MORFODINAMICO .....	34
8.1	Premessa .....	34
8.2	Il modello matematico .....	34
8.2.1	Modulo Idrodinamico .....	35
8.3	Ricambi Idrici .....	38
8.3.1	Considerazioni preliminari.....	38
8.3.2	Metodologia .....	39
8.3.3	Simulazioni e considerazioni finali.....	39
8.4	Studio idromorfodinamico .....	41
8.4.1	Considerazioni preliminari.....	41
8.4.2	Impostazioni modello .....	41
8.4.3	Risultati dei modelli idrodinamici .....	42

8.4.4	Risultati dei modelli morfodinamici .....	45
9	ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DELLA SPIAGGIA.....	48
9.1	Analisi morfologica .....	48
9.2	Evoluzione del profilo longitudinale della spiaggia a seguito della realizzazione delle opere .....	49
9.2.1	Il Modello UNIBEST .....	49
9.2.2	Formula di trasporto.....	52
9.2.3	Analisi preliminare dell'evoluzione delle linee di riva e calibrazione del modello UNIBEST ...	54
9.2.4	Evoluzione della linea di riva a seguito della realizzazione delle opere .....	55

La presente relazione riprende, lasciandola invariata in molte parti, lo studio meteomarinario sviluppato in sede di progetto preliminare e modifica solo gli aspetti che, in sede di adeguamento a progetto di fattibilità tecnica ed economica, hanno richiesto degli approfondimenti e/o integrazioni.

Nel dettaglio, restano invariati i §§ da 1 a 6, il § 9 (7 nell'attuale versione), §§ 10.1, 10.2 e 10.4 (ora rispettivamente 8.1, 8.2 e 8.4) e § 11 (§ 9 nell'attuale versione). Il solo paragrafo 10.3, relativo all'analisi del campo idrodinamico del corpo idrico e alla sua capacità di rigenerarsi mantenendo un adeguato livello di ossigenazione, è stato integrato da ulteriori studi e considerazioni, pur confermando le conclusioni cui si è giunti in sede di progetto preliminare.

I soli paragrafi 7 e 8, stralciati dalla versione attuale, sono stati interamente rivisti allo scopo di ottimizzare le caratteristiche geometriche e costruttive dell'opera e sono confluiti nell'elaborato **R05 Relazione tecnica di calcolo**.

## 1. PREMESSA

La presente relazione illustra lo studio meteo marino effettuato nell'ambito del progetto preliminare relativo alla realizzazione del Porto Turistico in località "Sarrala", nel Comune di Tertenia. Il sito previsto per la realizzazione dell'opera marittima è ubicato nella *Marina di Tertenia* immediatamente a ridosso di *Punta Is Ebbas* che costituisce, oltre che il limite dell'unità fisiografica, anche un parziale riparo dalla traversia di grecale.

Lo studio è volto alla definizione delle caratteristiche di moto ondoso nel paraggio di studio, alla determinazione delle condizioni di penetrazione di moto ondoso all'interno del porto, alla valutazione della portata di tracimazione nel molo sopraflutto e sottoflutto, alla verifica delle condizioni di stabilità della mantellata superficiale, alla realizzazione degli studi idraulici e morfodinamici delle opere foranee previste.

Lo studio è articolato in diverse fasi. Nella prima fase, sono stati considerati i dati degli studi meteo marini a disposizione, al fine di determinare l'onda al largo della zona di interesse con tempo di ritorno biennale, quinquennale e cinquantennale. Tali dati sono stati poi utilizzati per la realizzazione delle simulazioni numeriche atte a trasportare l'onda a largo verso riva utilizzando il software SWAN. I risultati di queste simulazioni sono stati considerati per la determinazione dei dati di ingresso al modello matematico PHAROS, al fine di ottenere l'agitazione ondosa all'interno del porto e per la valutazione della portata di tracimazione e delle condizioni di stabilità della struttura, calcolati con l'uso del software Breakwat.

Nella scelta della modellistica numerica da utilizzare al fine di individuare il migliore posizionamento per la struttura portuale, si è tenuto conto dello Studio di fattibilità sul completamento della Rete Portuale Turistica Isolana<sup>1</sup>, che indica come necessari la realizzazione di studi di dettaglio di dinamica sedimentario, possibilmente bidimensionale, da realizzarsi al fine di identificare il sito più adeguato per il posizionamento della struttura. Pertanto sono stati applicati il modello UNIBEST per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva

---

<sup>1</sup> "Studio di fattibilità sul completamento della rete portuale turistica isolana con riferimento ai quadranti Nord-Occidentale, Nord-Orientale, Sud-Occidentale e Sud-Orientale" predisposto nel 2010 dalla Regione Autonoma della Sardegna - Assessorato dei Lavori Pubblici - Servizio Opere di Competenza Regionale degli Enti

a lungo termine a seguito dell'inserimento delle nuove opere e il modello D3D per lo studio idrodinamico, morfologico e la valutazione degli scambi idrici.

## 2. INQUADRAMENTO

L'area nella quale si prevede di realizzare l'intervento è ubicata in località Sarrala, nel comune di Tertenia sulla costa sud-orientale della Sardegna (vedi Figura 2). È ubicata immediatamente a ridosso di *Punta Is Ebbas* che costituisce, oltre che il limite dell'unità fisiografica, anche un parziale riparo dalla traversia di grecale.

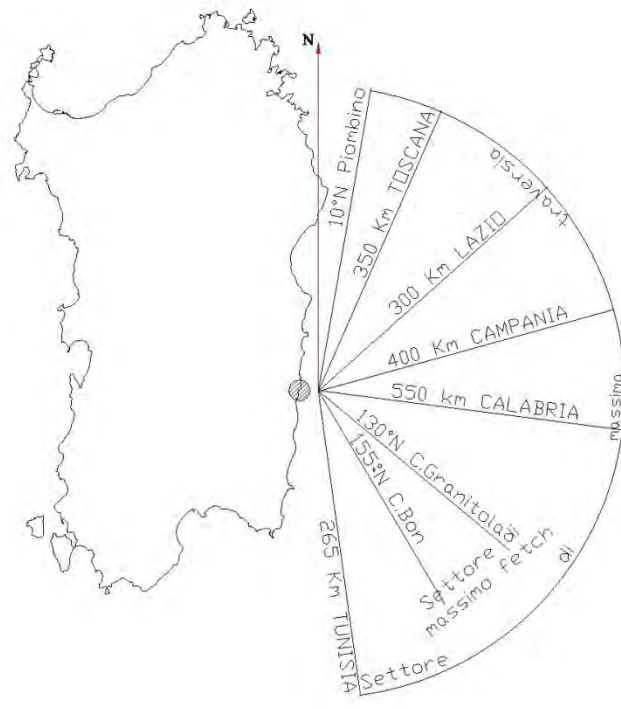


Figura 1: Inquadramento dell'area di intervento

Ponendoci a largo dell'area di intervento, si individua un settore di traversia massima di circa 180°. Il settore di massimo fetch<sup>2</sup> geografico è compreso tra i 130°N e 155°N, estendendosi per oltre 700 miglia marine, fino al Golfo della Sirte.

<sup>2</sup> Il fetch (o area di generazione), è la lunghezza della regione dove il vento mantiene caratteristiche quasi costanti, ossia, convenzionalmente, con variazioni di velocità <5 nodi (~2.5 m/s) e di direzione <45° rispetto alla direzione media. Esso, per le caratteristiche bariche del mediterraneo, come nel nostro caso, pur potendo essere geograficamente (fetch geografico) superiore è limitato a 500-600 Km.





**Figura 2: Localizzazione area di progetto.**

### 3. REGIME DEL VENTO E DATI ANEMOMETRICI

#### 3.1 Analisi dei dati di vento incidenti il paraggio

L'analisi dei dati di vento incidente il paraggio viene eseguito per tener conto dell'azione che il vento ha sulla superficie del mare ricaricandone l'azione generatrice e per fornire utili informazioni.

Il moto ondoso che investe il litorale oggetto di studio proviene esclusivamente dal primo quadrante e dal secondo quadrante. Il vento che genera e ricarica tale clima è, in buona approssimazione, proveniente dallo stesso quadrante. Appare quindi logico, oltre che assodato da una lunga pratica progettuale per studi simili effettuati in paraggi prossimi a quello di interesse, prendere come fonte dei dati anemometrici la stazione che meglio riproduce le condizioni di vento che generano il moto ondoso e che ne ricaricano l'azione. La stazione di rilevamento considerata è a 5 Km ad Est dal paese di Tortolì ed è situata nel Capo Bellavista (32°56'00"N 09°43'00"E - UTM 32, E 567001m N 3644179m), nella costa Orientale della Sardegna, e l'anemometro è situato a 12 m s.l.m. I dati di vento sono stati registrati con cadenza trioraria e rilevati alle ore sinottiche, (ovvero alle:0,3,6,9,12,15,18,21 UTC ossia alle 1,4,7,11,13,16,19,22 ora locale).

La Tabella 1 e la Figura 3 mettono in evidenza un regime anemometrico caratterizzato dalla prevalenza dei venti di Mezzogiorno e di Ponente. In particolare i venti più frequenti sono quelli provenienti dal settore 330°N ÷ 30°N e dalla direzione di 270°N. Per le direzioni di nostro interesse (0-50° e 130-150°), si hanno valori registrati superiori ai 17 m/s. Verosimilmente, per gli eventi con tempo di ritorno cinquantennale la velocità del vento potrebbe essere ben superiore a questa. Al fine di avere un'indicazione delle velocità massima ottenibile nei primo e nel secondo quadrante, sono stati considerati i dati relativi alla stazione di Guardiavvecchia de La Maddalena, mostrati in Tabella 2. Da questa, si può desumere una velocità di vento massima compresa tra 48 e 63 nodi (25-32 m/s) nel primo quadrante e di 34-47 nodi (17-24 m/s) nel secondo.

Settore [°N]	Frequenza [%]	Intensità del vento [m/s]													
		<1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15	17	>17
0	5.7	287	85	84	83	68	46	50	46	38	59	51	44	32	27
30	7.8	210	106	98	112	72	54	53	48	40	74	48	30	29	26
60	6.4	306	139	146	117	82	44	46	38	18	29	20	6	6	5
90	6.6	315	225	184	117	58	32	19	9	4	16	12	3	4	5
120	8.2	238	174	182	170	79	41	36	24	15	19	12	5	2	1
150	7.7	271	177	139	127	72	54	41	37	20	33	13	10	3	1
180	8.8	225	156	133	121	88	67	59	50	29	38	21	8	5	0
210	7.5	244	138	145	149	91	59	49	34	27	37	16	6	2	0
240	5.3	324	118	133	117	63	52	44	39	26	50	23	8	3	2
270	11.6	171	120	151	157	99	62	47	37	21	49	29	23	16	19
300	17.1	124	99	151	169	119	79	61	45	28	48	34	20	10	12
330	7.2	247	92	101	112	89	73	48	44	30	55	33	32	19	27
<b>totale</b>	<b>100%</b>	<b>228</b>	<b>133</b>	<b>140</b>	<b>136</b>	<b>87</b>	<b>58</b>	<b>48</b>	<b>38</b>	<b>25</b>	<b>43</b>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>11</b>	<b>11</b>

Tabella 1: Dati di vento rilevati dalla stazione di Capo Bellavista. I dati riportati nell'area bianca della tabella sono in per mille ordinati per righe. (Fonte: European Wind Atlas, 1989).



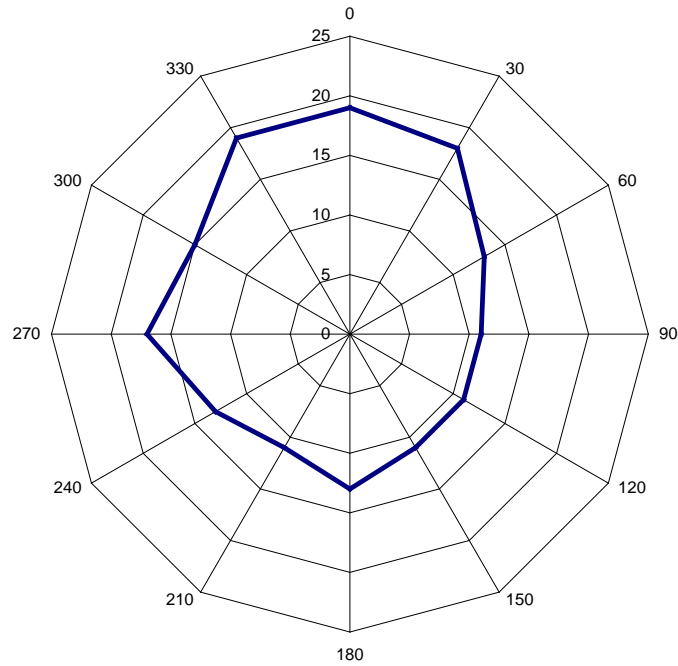


Figura 3: Elaborazione della Rosa dei venti della stazione di Capo Bellavista

direzione di provenienza [°N]	Intensità del vento [nodi]						TOTALI
	2 - 6	7 - 21	22 - 33	34 - 47	48 - 63	>63	
0 - 30°	749	2618	840	179	15		4401
30 - 60°	1127	4585	1051	154	8		6925
60 - 90°	2259	6222	590	47	2		9120
90 - 120°	2230	7150	872	37	3		10292
120 - 150°	1156	2210	237	9	3		3615
150 - 180°	576	590	29	1			1196
180 - 210°	388	514	44	12			958
210 - 240°	926	3013	1096	176	11		5222
240 - 270°	3321	20500	7300	1535	109	1	32766
270 - 300°	1743	10589	3500	970	89	1	16892
300 - 330°	1236	2787	203	68	6		4300
330 - 360°	780	1257	361	79	2		2479
Variable	46	19					65
<b>TOTALI</b>	<b>16537</b>	<b>62054</b>	<b>16123</b>	<b>3267</b>	<b>248</b>	<b>2</b>	<b>98231</b>
							<b>12449</b>
							<b>110680</b>

Tabella 2: Dati di vento rilevati dalla stazione Guardiavecchia (La Maddalena) –  
Periodo di rilevazione: 1/01/1951 al 27/12/1997

#### 4. DATI ONDAMETRICI

Al fine di determinare l'onda al largo della zona di interesse, è stata effettuata un'analisi statistica sulla base dei dati ondometrici rilevati dalla boa di Capo Comino<sup>3</sup>. Per confermare la bontà di tale analisi, sono stati considerati i dati di osservazione dello stato del mare delle stazioni semaforiche dell'Istituto Idrografico della Marina di Capo Bellavista e Capo Figari<sup>4</sup> e gli studi relativi all'area di interesse effettuati dallo Studio Volta e da HR WALLINGFORD.

Le fonti dati dei due studi considerati sono diverse, in particolare lo Studio Volta cita:

- Posto semaforico MM Capo Bellavista
- Posto semaforico Capo Figari
- Campo isobarico al suolo e vento di gradiente rilevato dalle "carte del tempo" della A.M. nel Tirreno centrale;
- KNMI<sup>5</sup> frequency tables of waves (39°-40°N\_ 10°-10.9°E)
- STONE statistica delle onde estreme.

HR WALLINGFORD fa riferimento a registrazioni d'onda effettuate sulla scorta di osservazioni da navi effettuate dal 1960 al 1980 verosimilmente tratte dall'UKMO<sup>6</sup>.

Tutti i dati presi in considerazione risultano omogenei e coerenti tra loro sia in termini di caratteristiche d'onda che di distribuzione direzionale. Il clima meteo-marino risulta caratterizzato dalla presenza di correnti provenienti da N-NE e da S-SE.

Lo studio climatologico effettuato dal dott. Cicala (Studio Volta) ed i dati ondometrici raccolti, indicano gli eventi provenienti da S-SE come regnanti (ovvero più frequenti) e quelli provenienti da N-NE come prevalenti (ovvero più intensi).

I dati strumentali della boa di Capo Comino, confortati dalle osservazioni delle due stazioni IIM, mostrano inequivocabilmente un clima dominato da Grecale e Scirocco (vedi Figura 4). Le mareggiate più significative sono state registrate per il settore settentrionale. Tali dati sono inoltre in accordo con lo "Studio di fattibilità sul completamento della rete portuale turistica isolana con riferimento ai quadranti Nord-Occidentale, Nord-Orientale, Sud-Occidentale e Sud-Orientale" predisposto nel 2010 dalla Regione Autonoma della Sardegna - Assessorato dei Lavori Pubblici - Servizio Opere di Competenza Regionale degli Enti.

Al fine di determinare i valori d'onda estremi con tempo di ritorno cinquantennale, quinquennale e biennale (utilizzati poi come parametro di ingresso del modello numerico), sono stati considerati i dati rilevati dalla boa onda metrica di Capo Comino. La valutazione dell'onda al largo è stata effettuata utilizzando sia la distribuzione probabilistica di Gumbel che quella di Weibull.

<sup>3</sup> Rete Ondametrica Nazionale, ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

<sup>4</sup> Fonte "Lo stato del vento e del mare lungo le coste italiane e dell'adriatico", Istituto Idrografico della Marina. Per Capo Bellavista, dati relativi al periodo 1934-42, 1944-52m per Capo Figari 1930-38,1939-42,1944,1946-57

<sup>5</sup> Ufficio Meteorologico Olandese

<sup>6</sup> Ufficio Meteorologico Britannico.

Tempo di Ritorni [anni]	0-50°		130-150°	
	Weibull H <sub>s</sub> [m]	Gumbel H <sub>s</sub> [m]	Weibull H <sub>s</sub> [m]	Gumbel H <sub>s</sub> [m]
2	4.68	4.64	3.05	3.04
5	5.56	5.48	3.40	3.36
50	7.03	7.22	3.97	4.05

**Tabella 3: condizioni d'onde estreme ricavata dai dati di Capo Comino**

I calcoli effettuati con le due distribuzioni sono mostrati in Tabella 3. Per ciò che riguarda i dati relativi al settore di grecale, i risultati ottenuti sono in accordo con quelli osservati nelle stazioni semaforiche di Capo Figari e Capo Bellavista (vedi Figura 6 e Figura 7). Considerando invece le altezze d'onda relative al settore NW ottenute dall'analisi statistica, le altezze d'onda sembrano essere sottostimate, probabilmente a cause della mancanza di una estesa serie storica di dati. Tale assunzione è confortata sia dall'analisi statistica effettuata dallo Studio Volta per tale settore di provenienza. (vedi Tabella 4 e Tabella 5) che dai dati osservati nelle due stazioni IIM.

Si è quindi deciso, a favore di sicurezza, di sovrastimare del 10% i valori ottenuti dall'analisi statistica, rendendoli così omogenei a quelli ottenuti negli studi precedenti.

Condizioni estreme HR			Condizioni Estreme dello studio Volta		
Settore di direzione (°N)	Tempo di ritorno centennale		Settore di direzione (°N)	Tempo di ritorno centennale	
	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]		H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]
55-75	5.16	8.27	40-100	5.19	8.60
115-135	6.26	9.98	100-140	6.35	9.21
155-175	5.13	9.81	140-180	5.33	8.75

**Tabella 4: confronto delle condizioni d'onda estreme tra gli studi HR Wallingford e Studio Volta**

Periodo di Ritorni [anni]	65°N		125°N		165°N	
	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m</sub> [s]
1	1.51	6.1	1.80	6.4	2.19	6.8
10	3.26	7.6	3.74	7.9	3.69	7.9
50	4.58	8.4	5.45	8.8	4.70	8.4

**Tabella 5: condizioni d'onde estreme immesse nel modello HR WALLINGFORD**

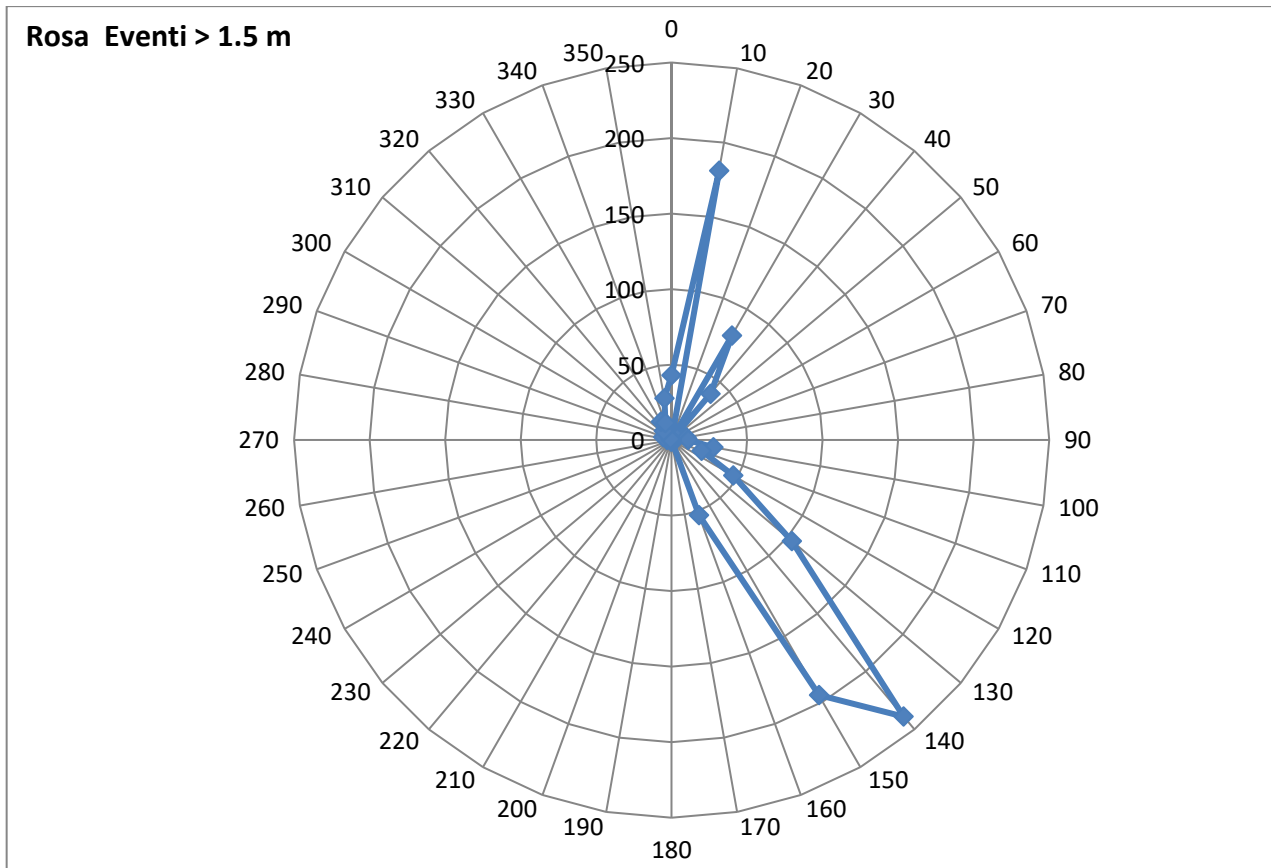


Figura 4: Distribuzione degli eventi con altezza d'onda superiore a 1.5 m rilevati dalla boa di Capo Comino dal 01/01/2004 al 12/09/2005 – fonte dati: ISPRA-IDROMARE

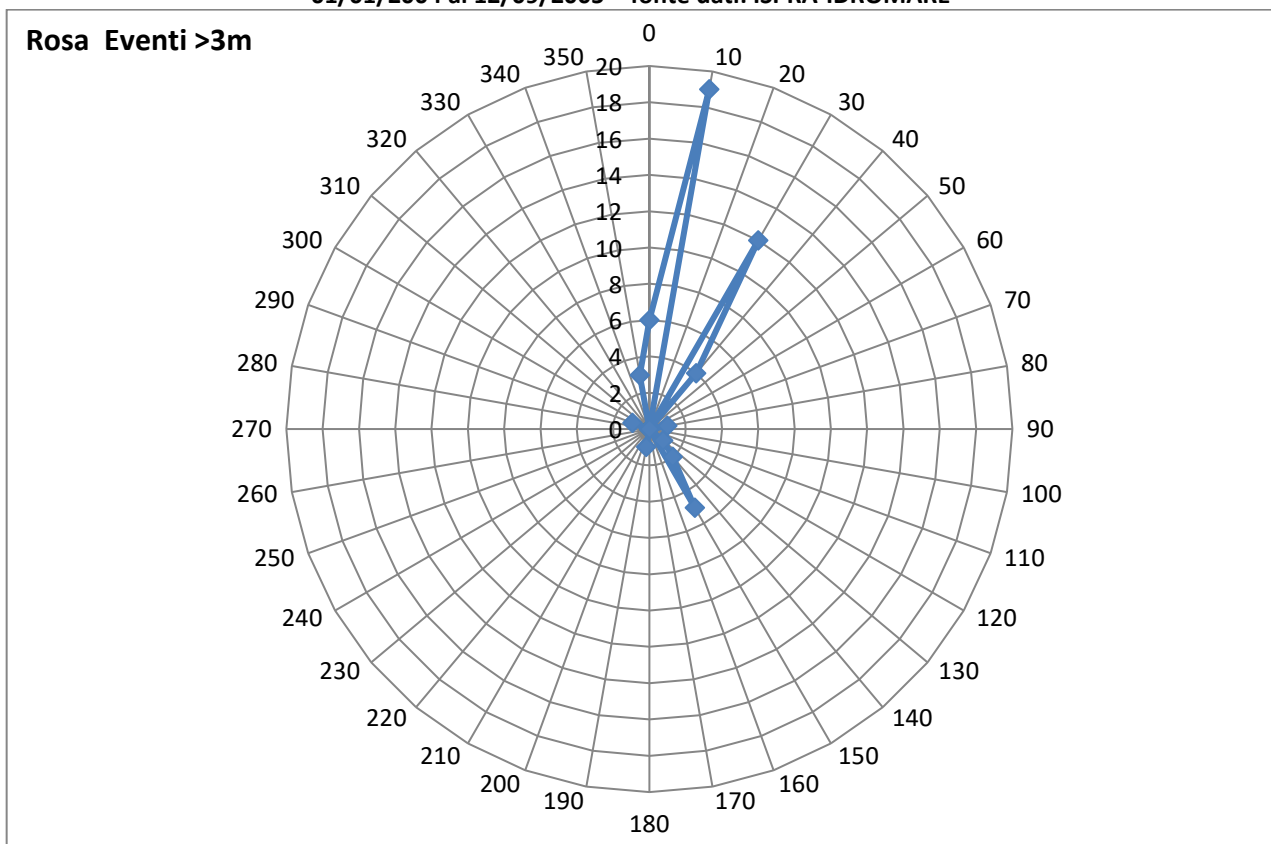
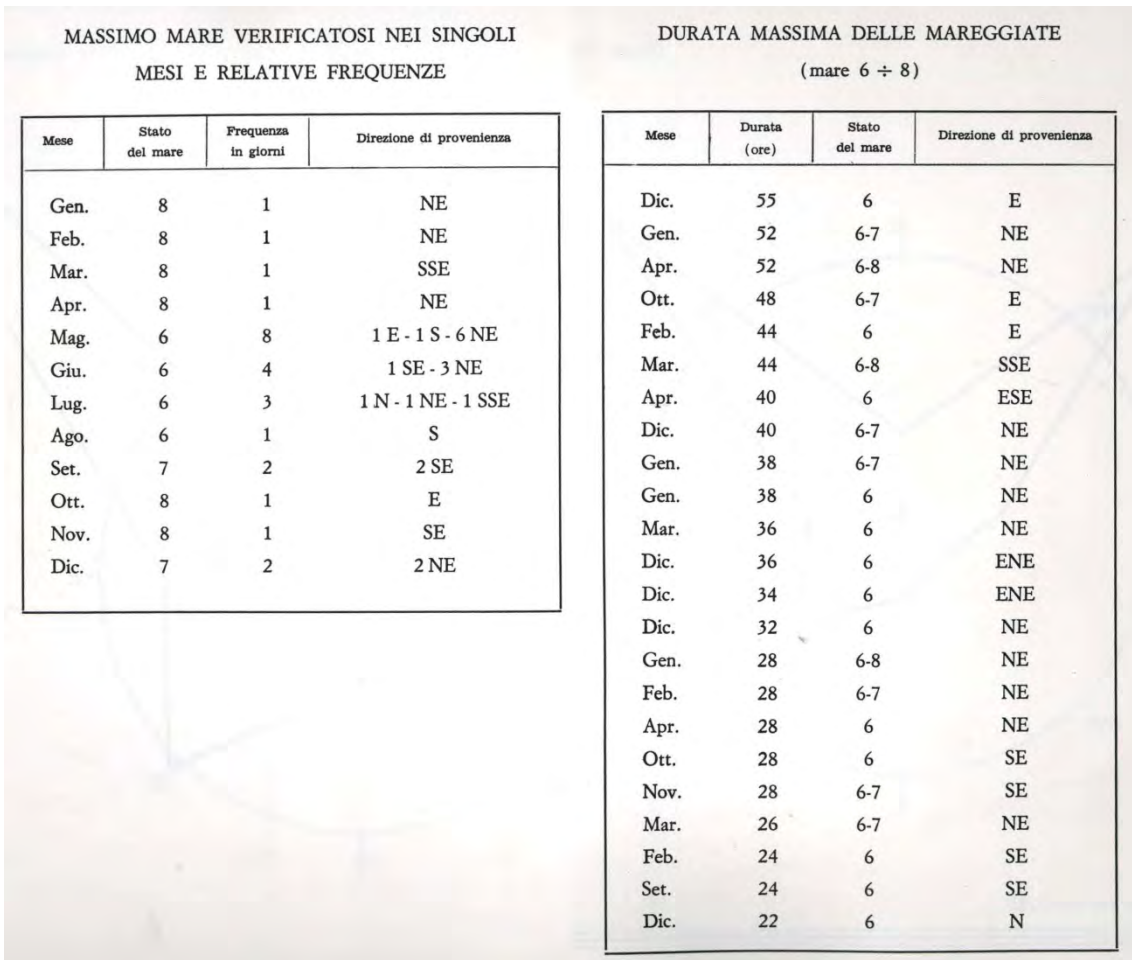
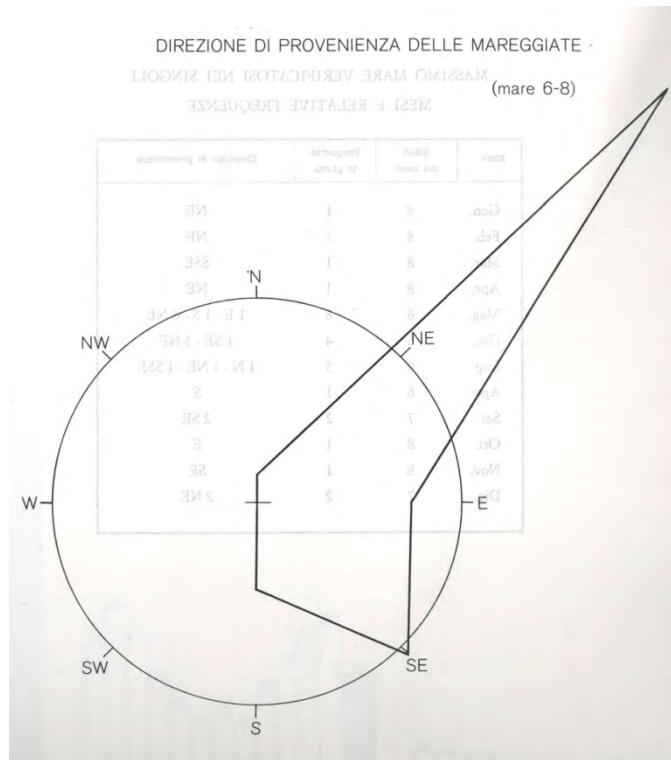


Figura 5: Distribuzione degli eventi con altezza d'onda superiore a 3 m rilevati dalla boa di Capo Comino dal 01/01/2004 al 12/09/2005 – fonte dati: ISPRA-IDROMARE

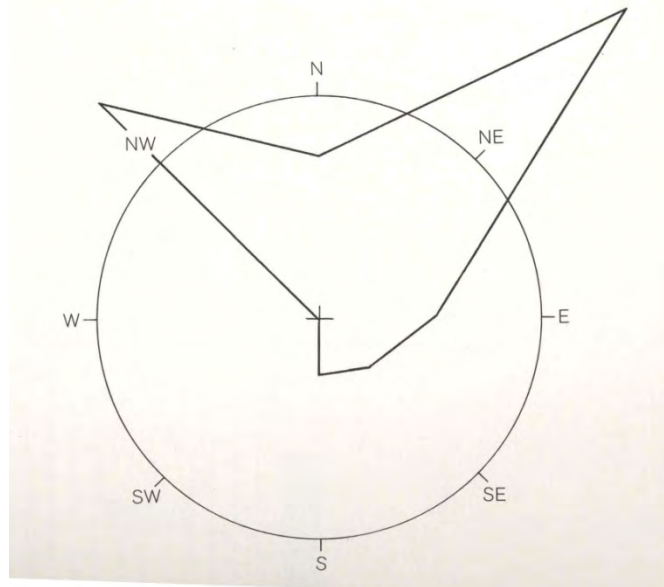


**Figura 6: Osservazioni relative allo stato del mare rilevate nella Stazione Semaforica di Capo Bellavista – Fonte: Istituto Idrografico della Marina**



DIREZIONE DI PROVENIENZA DELLE MAREGGIATE

(mare 6-8)



MASSIMO MARE VERIFICATOSI NEI SINGOLI MESI E RELATIVE FREQUENZE

Mese	Stato del mare	Frequenza in giorni	Direzione di provenienza
Gen.	8	3	3 N
Feb.	8	1	E
Mar.	8	1	NW
Apr.	8	1	NE
Mag.	7	1	NE
Giu.	6	3	3 NW
Lug.	7	1	NW
Ago.	7	1	SE
Set.	7	3	1 N - 1 NE - 1 NW
Ott.	7	2	2 N
Nov.	8	4	1 N - 3 NE
Dic.	8	2	2 E

DURATA MASSIMA DELLE MAREGGIATE

(mare 6 ÷ 8)

Mese	Durata (ore)	Stato del mare	Direzione di provenienza
Dic.	62	6-7	NE
Nov.-Dic.	56	6-7	N
Ott.	54	6-7	N
Ott.	54	6-7	NE
Apr.	52	6-7	NE
Dic.	50	6-7	NE
Feb.	48	6-7	S
Mar.	48	6-7	E
Feb.	40	6-8	E
Nov.	40	6-8	NE
Gen.	38	6-8	N
Gen.	38	6-7	NE
Feb.	38	6-7	E
Nov.	38	6-8	N
Nov.-Dic.	38	6-7	NE
Dic.	38	6-8	E
Gen.	36	6-7	NE
Feb.	36	6-7	NE
Dic.	36	6-7	NE
Dic.	36	6	NW
Gen.	34	6	NE
Mar.	32	6-7	SE
Mar.	32	6	S
Nov.	32	6-8	NE
Dic.	32	6	E

**Figura 7: Osservazioni relative allo stato del mare rilevate nella Stazione Semaforica di Capo Figari – Fonte: Istituto Idrografico della Marina**



## 5. VARIAZIONE DEL LIVELLO MARINO

Il massimo sovrizzo, così come il minimo livello riscontrabile, deriva dalla concomitanza di più fenomeni che possono avere sia carattere periodico che carattere occasionale.

I fenomeni di carattere periodico sono la marea astronomica, le variazioni stagionali di densità dell'acqua e la pressione atmosferica; i fenomeni di carattere occasionale sono quelli legati a tempeste e variazioni locali della pressione atmosferica.

Per la determinazione della componente mareale nel paraggio della banchina, si è fatto uso delle "tavole di Marea" edite dall'Istituto Idrografico della Marina Militare facendo riferimento al Porto di La Maddalena: i valori ottenuti per tale località, data la vicinanza col paraggio in esame, considerando le lunghezze d'onda delle onde di marea sono applicabili anche al paraggio in esame. Il porto di La Maddalena è classificato come "porto secondario": è passibile, in base alle procedure proposte dalle Tavole di Marea, determinare le altezze d'Alta Marea e Bassa Marea a partire dalle caratteristiche calcolate per uno dei cosiddetti "Porti Principali". Il porto campione utilizzato è stato quello di Gibilterra. Il porto di La Maddalena presenta un livello medio pari a  $Z_0 = 0.18 \text{ m}$ .

La massima escursione di marea, calcolata col metodo del rapporto è di A.M. =  $+0.28 \text{ m}$ ; B.M. =  $+0.02 \text{ m}$ . L'escursione massimo di marea astronomica è dunque di  $\sim 26 \text{ cm}$ .

Il calcolo del sovrizzo di tempesta (in letteratura indicato con storm surge), è stato compiuto facendo riferimento ad una formula implicita<sup>7</sup> che tiene conto dei fenomeni che concorrono alla formazione di tale sovrizzo, ossia la velocità del vento ( $U_{10}$ ) e l'estensione della piattaforma continentale (convenzionalmente si fa coincidere tale limite con la batimetrica a  $-200 \text{ m}$ ).

Tale calcolo ha fornito il valore di  $\sim 15 \text{ cm}$ . Un valore più rilevante può essere fornito dai gradienti barici verificabili. Da dati riferiti ad alcune violente burrasche verificatesi al largo della costa riportati dalle carte bariche si sono desunti i valori di minimo barico di  $975 \text{ mb}$  ed un massimo di  $1045 \text{ mb}$ . Poiché come noto il valore normale di pressione atmosferica è di  $1013 \text{ mb}$ , si deduce che i massimi livelli di sovrizzo dovuti a gradienti barici si attesta intorno ai  $40 \text{ cm}$  ed una massima depressione di circa  $30 \text{ cm}$ <sup>8</sup>.

Per tenere in conto delle variazioni attribuibili a variazioni stagionali di densità dell'acqua e della distribuzione locale della pressione atmosferica si sono assunti i valori medi mensili di escursione di livello medio marino in tabella 10<sup>9</sup>. Essi sono stati adottati a causa della assenza di osservazioni mareografiche riferite al paraggio interno.

Intervallo di tempo d'attribuzione	Variazioni del livello medio marino [cm]
<b>Gennaio - Febbraio</b>	-1
<b>Marzo - Maggio</b>	-3
<b>Giugno - Settembre</b>	-1
<b>Ottobre - Novembre</b>	+5

**Tabella 6. Valori di variazione attribuiti per il paraggio**

<sup>7</sup> formula del Manuale dell'Ingegnere Civile Nuovo Colombo 83° ed. vol. II sez. H.

<sup>8</sup> il gradiente barico unitario, come riportato in tutti i manuali, comporta una differenza di livello di  $\sim 1 \text{ cm}$ .

<sup>9</sup> Tali valori sono stati assunti in base ad osservazioni compiute nell'ambito dello studio Modimar per Edilnord

Le variazioni del livello medio marino nel lungo periodo possono essere dovute a due fenomeni principali: eustatismo e subsidenza. Questi due fenomeni sono indipendenti dalle dinamiche marine: l'eustatismo, ossia il progressivo aumento del livello del mare, è dovuto a varie concause, non ultima lo scioglimento dei ghiacciai; la subsidenza, ossia l'innalzamento o l'abbassamento delle terre emerse è attribuibile a processi geologici ancora in atto.

La fenomenologia della subsidenza è del tutto trascurabile per quanto concerne la nostra isola, diverso discorso, ovviamente, riguarda l'eustatismo. Esso è riferibile a tutto il globo acqueo ed è calcolabile esclusivamente in base a tendenze registrate fino ad oggi. L'innalzamento procede da alcuni decenni al ritmo di  $\sim 1.6 \text{ mm}$  annui, si deduce quindi un valore d'innalzamento per i prossimi 50 anni (vita utile calcolata per il futuro porto turistico), di  $\sim 8 \text{ cm}$ .

Sommando tutti i contributi dovuti ai sovralzi si ottiene un sollevamento complessivo di  $\sim 95 \text{ cm}$  che tuttavia difficilmente si verificherà a causa della improbabile concomitanza di tutti questi eventi. Si è proceduto ad una decurtazione di tale valore al 60% della base iniziale ottenendo come risultato finale **55 cm**. Ripetendo il ragionamento per la massima depressione del livello medio marino si è ottenuto un risultato di **28 cm** al netto della decurtazione.

## 6. SIMULAZIONI NUMERICHE SUL MOTO ONDOSONO DA LARGO VERSO RIVA

### 6.1 Introduzione

In questo capitolo sono esposti i risultati dello studio di modellizzazione numerica, effettuato utilizzando il Wave Model SWAN sviluppato dalla Technical University di Delft (Olanda), al fine di trasportare l'onda al largo (ottenuta come precedentemente esposto) verso riva tenendo in considerazione gli effetti di shoaling, rifrazione e riflessione a cui è soggetta l'onda durante l'avvicinamento alla costa. Tali risultati saranno poi utilizzati per la valutazione della stabilità della mantellata, per calcolare la portata di tracimazione e per ottenere i dati di ingresso (caratteristiche d'onda) al modello numerico PHAROS, utilizzato per simulare i fenomeni di penetrazione di moto ondoso all'interno dei porti e in prossimità di strutture costiere. Il modello è stato utilizzato inoltre per effettuare delle simulazioni che permettano la ricostruzione del clima ondoso annuo necessarie per determinare l'influenza della struttura portuale sul trasporto longitudinale di sedimenti con il modello UNIBEST.

### 6.2 Batimetria

La batimetria dell'area di studio, mostrata in Figura 8, è stata ottenuta sulla base delle carte a disposizione. Inoltre, per uno studio a larga scala nella zona di maggiore interesse, tali dati sono stati integrati con quelli provenienti da un rilievo batimetrico appositamente effettuato nel mese di dicembre 2013 (Figura 9).

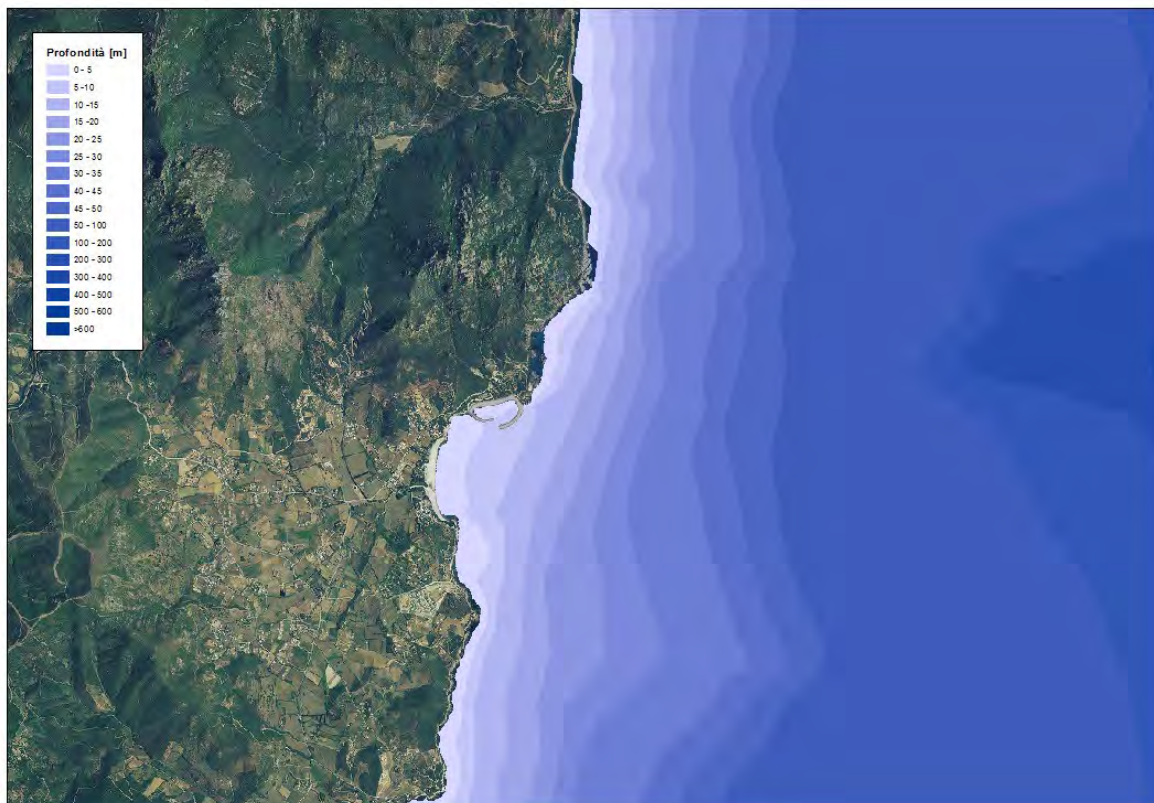


Figura 8: Batimetria a largo dell'area di studio

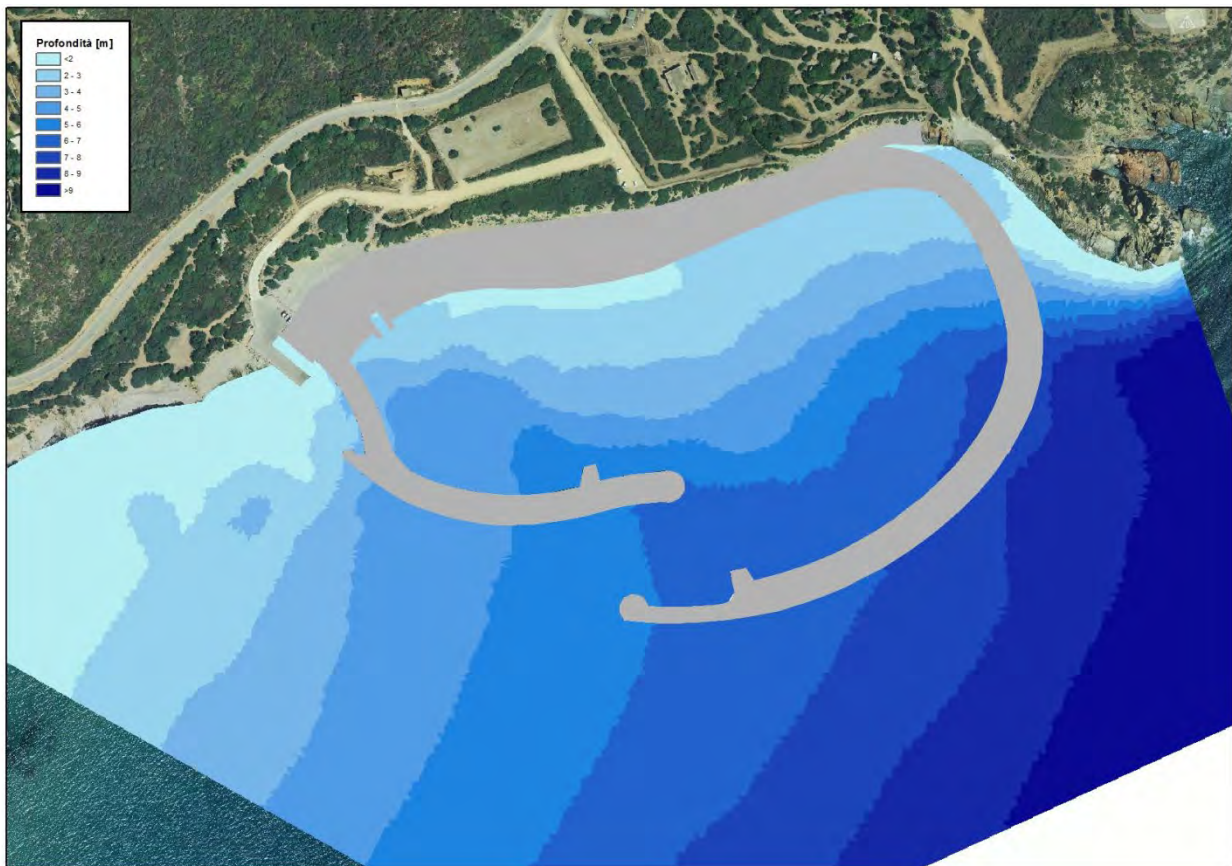


Figura 9: Particolare della batimetria in prossimità dell'area di realizzazione della struttura

### 6.3 Wave Model SWAN

Per il trasporto dell'onda a largo verso riva è stato utilizzato il Wave Model SWAN.

Il Modello SWAN, denominato con l'acronimo di **Simulation WAVes Nearshore**, è un modello spettrale di terza generazione<sup>10</sup> sviluppato dalla Università Tecnologica di Delft (Olanda). Esso ha il grande vantaggio, rispetto ai suoi predecessori, che i fenomeni fisici sono rappresentati esplicitamente grazie a formulazioni di stato dell'arte e che il modello risulta molto più stabile (schemi completamente impliciti). Un altro suo grande vantaggio è che le simulazioni possono avvenire anche su griglie curvilinee (che si accoppiano meglio con i moduli idrodinamici di Delft3D), e può, per esempio, generare risultati sotto forma di spettri mono e bidimensionali. Per maggior completezza, le forze delle onde sono calcolate dal modello sulla base del gradiente del tensore di "radiation stress" (invece che del tasso di dissipazione come nei precedenti modelli); questo può essere utilizzato come forzante per il calcolo delle correnti indotte dalle onde ed il *set-up* nel modello idrodinamico.

Il modello SWAN è basato su una discretizzazione dell'equazione di equilibrio dinamico che per le coordinate cartesiane assume la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

<sup>10</sup> Vedi Holthuijsen ed al. 1993; Ris, 1997.



Dove  $N(\sigma, \theta)$  è lo spettro di densità dinamica piuttosto che lo spettro di densità di energia  $E(\sigma, \theta)$  dal momento che la presenza di correnti, la densità di moto è conservata mentre la densità d'energia non lo è.

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa  $\sigma$  (come osservata in un istante da un osservatore in moto con la velocità di moto di propagazione) e la direzione d'onda  $\theta$  (la direzione normale alla cresta dell'onda di ogni singola componente spettrale). La densità di moto (*action density*) è uguale alla densità d'energia divisa per la relativa frequenza:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Il primo termine dell'equazione rappresenta il tasso di variazione locale nel tempo, il secondo ed il terzo rappresentano la propagazione del moto nello spazio geografico (con i termini di velocità di propagazione  $c_x$  e  $c_y$ ). Il quarto termine rappresenta l'avanzamento della frequenza relativa dovuta alle variazioni di fondale e di correnti (con la velocità di propagazione  $c^\sigma$  nello spazio  $\sigma$ ). Il quinto termine rappresenta la rifrazione indotta da variazione di fondale e di corrente indotta (con velocità di propagazione  $c^\theta$  nello spazio  $\theta$ ). Le espressioni per queste velocità di propagazione sono state prese dalla teoria lineare delle onde<sup>11</sup>. I termini  $S$  ( $= S(\sigma, \theta)$ ) alla destra dell'equazione di bilancio del moto è il termine sorgente in termini di densità di energia rappresentante gli effetti di generazione, dissipazione e interazione onda-onda.

L'equazione è completamente spettrale (in tutte le direzioni e frequenze). Questa ultima caratteristica implica che possono essere calcolati i campi d'onda delle onde di vento propagatisi simultaneamente da differenti direzioni.

Il modello SWAN consente di calcolare l'evoluzione e la trasformazione delle onde di vento (*short crested random waves*) in regioni costiere ed in acque profonde, di transizione e basse ed in aree soggette a correnti.

Il modello SWAN tiene in considerazione l'effetto di rifrazione e rappresenta i fenomeni rigenerativi del vento, la dissipazione di potenza d'onda dovuta al cappucciamento, all'attrito sul fondo ed al frangimento delle onde, nonché dell'interazione onda-onda.

Per evitare eccessivi tempi computazionali ed ottenere un modello robusto per applicazioni pratiche sono state utilizzati schemi completamente impliciti.

Il modello SWAN è stato validato con successo e verificato in parecchi casi di laboratorio ed in complessi campi.

Il modello SWAN tiene conto solo parzialmente dell'effetto diffrattivo.

Le aree di applicazione del modello, comprese tra i 4 ed i 2500 Km<sup>2</sup>, sono molto varie e vanno dal supporto alla progettazione di marine, porti ed installazioni offshore.

<sup>11</sup> Whitman, 1974; Mei, 1983; Dingemans, 1997.

### 6.3.1 Impostazioni modello SWAN

La prima indispensabile impostazione precipua a qualsiasi altra azione è stata quella di definire delle griglie rettangolari adattate alla batimetria ed alla linea di costa entro la quale il modello ha compiuto i calcoli.

Sono state create tre griglie con diversa orientazione e dimensione delle maglie.

Per eseguire le simulazioni si è utilizzata una procedura chiamata “nesting”. Tale procedura consiste nello svolgere i calcoli al largo su una griglia che copre una vasta area e con una spaziatura tra le maglie larga, e di utilizzare poi i risultati ottenuti con tale simulazione come condizioni al contorno su una griglia di dimensioni minori e con una spaziatura tra celle inferiore, in modo da ottenere dei risultati più accurati nell’area in esame. Il nesting è stato eseguito utilizzando tre diverse griglie, una molto estesa a largo dell’area di progetto (fino alla batimetria dei 500 m), una comprendente l’area al largo fino alla batimetria dei 30 m ed una di dettaglio in prossimità dell’area di progetto. Le caratteristiche delle griglie utilizzate (rappresentate in Figura 10 e Figura 11) sono riportate in Tabella 7.

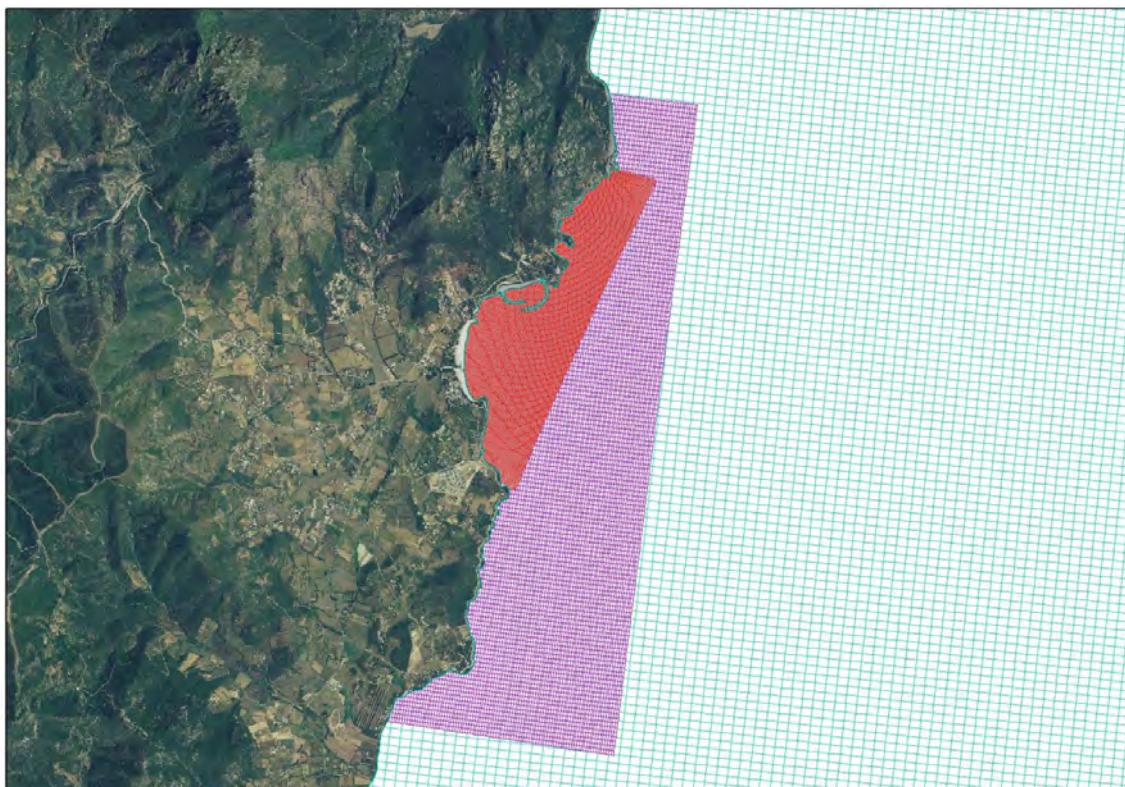


Figura 10: Griglie di calcolo utilizzate per il Wave model SWAN





Figura 11: Particolare della griglia di dettaglio

Griglia	Zona coperta	Area	Dimensioni celle	Numero celle
Maglia larga	Fino a 6.5 km a largo	~ 400 Km <sup>2</sup>	~150m	47385
Maglia media	Fino a 1.5 km a largo	~ 20 Km <sup>2</sup>	~40 m	18600
Maglia fine	Area di progetto	~ 3 Km <sup>2</sup>	~12 m	16420

Tabella 7: griglie di calcolo

### 6.3.1.1 Parametri fisici e numerici

I parametri fisici e numerici assegnati di input al modello sono mostrati in Tabella 8. Per la determinazione di tali valori è stata fondamentale la fase di calibrazione e validazione del modello numerico, effettuata sulla scorta dei dati appositamente reperiti a tale scopo.

Parametri	Valori
Gravity	9.81 m/s <sup>2</sup>
Water density	1025 kg/m <sup>3</sup>
Generation of formulations	Third generation
Bottom friction	Jonswap formulation, coefficient 0.067
Depth-induced breaking	B&J model, $\alpha=1$ , $\gamma=0.73$
Non-linear triad interactions	LTA, $\alpha=0.1$ , $\beta=2.2$
Bottom friction	JONSWAP, coeff=0.067
Diffraction	Coef. 0.2 – steps=5
Wind growth	Activated
White-capping	Activated
Quadruplets	Activated
Refraction	Activated
Frequency shift	Activated
Directional space	0.5
Frequency space	0.5

Tabella 8: Parametri fisici e numerici considerati nelle simulazioni con il modello SWAN

### 6.3.1.2 Scelta dei dati delle forzanti d'onda

Numerose simulazioni sono state effettuate considerando i risultati dell'analisi statistica fatta precedentemente. Le condizioni inserite nel modello in termini d'altezze, periodi e direzioni d'onda, e diverse intensità del vento sono mostrati in Tabella 9. Per le considerazioni fatte prima, nelle simulazioni relative gli eventi provenienti dal secondo quadrante, le altezze d'onda ottenute dall'analisi statistica sono state incrementate del 10% in modo da porsi in condizioni di sicurezza. Per quelle relative agli eventi provenienti da NE, non si è invece ritenuto necessario tale incremento.

Tempo di ritorno	Direzione	Hs	Tp	Vento	
50	Scirocco	130	4.5	9.55	17
2	Scirocco	130	3.35	8.24	12.8
5	Scirocco	130	3.74	8.70	14
50	Grecale	50	7	11	22
2	Grecale	50	4.68	9	15.5
5	Grecale	50	5.56	9.8	19

**Tabella 9: Caratteristiche di onda e di vento per le simulazioni effettuate**

In tutte le simulazioni eseguite, le condizioni di marea sono state considerate trascurabili. Come è noto, il mare Mediterraneo presenta infatti delle escursioni di marea di circa 30 cm, con degli effetti trascurabili sul moto ondoso.

### 6.3.2 Dati di ingresso ai modelli PHAROS e BREAKWAT

I risultati delle simulazioni SWAN realizzate con i dati ingresso indicati in Tabella 9 sono stati registrati in dieci punti di monitoraggio (visualizzati in Figura 12), le cui coordinate sono indicati in Tabella 10. Di questi, i punti 9 e 10 sono stati utilizzati per ottenere i dati di ingresso per il modello numerico PHAROS. I punti 1-8 sono stati presi invece in prossimità del piede della struttura, come richiesto dalle formule utilizzate dal software Breakwat, al fine di ottenere i dati di direzione, altezza e periodo d'onda necessari per la valutazione della portata di tracimazione e per le verifiche di stabilità della struttura.

Punto	Coordinate WGS84	
	N	E
1	557365	4394735
2	557366	4394696
3	557359	4394655
4	557347	4394610
5	557294	4394560
6	557236	4394530
7	557016	4394570
8	556950	4394590
9	557508	4394600
10.	557451	4394440

**Tabella 10: Coordinate dei punti di monitoraggio**



Figura 12: Visualizzazione punti di monitoraggio

### 6.3.3 Dati di ingresso al modello UNIBEST

Il modello SWAN è stato utilizzato anche al fine di ottenere i dati di ingresso al modello numerico UNIBEST, finalizzato a valutare le modifiche dell'evoluzione della linea di riva della spiaggia di Foxi Manna a seguito della realizzazione della struttura portuale. A partire dai dati delle statistiche della boa di Capo Comino, sono state impostate 80 simulazioni che hanno permesso di ricostruire il clima ondoso dell'anno medio in prossimità della spiaggia. Tali simulazioni hanno permesso di ottenere l'evoluzione della linea di riva nelle condizioni attuali e a seguito della realizzazione della struttura portuale (per un totale di 160 simulazioni). Attraverso il modulo LT del software UNIBEST sono state estratte le condizioni di moto ondoso per utilizzarli come parametri di ingresso al modello e determinare il trasporto lungocosta. Per ulteriori dettagli si rimanda al paragrafo 9 relativo al modello UNIBEST.

### 6.3.4 Risultati simulazioni

Nelle pagine seguenti vengono riportate alcune restituzioni grafiche delle simulazioni SWAN.

L'evento peggiore che si può avere in prossimità del porto è, come è lecito aspettarsi, quello da grecale. Con tempo di ritorno di 50 anni si ha in prossimità della struttura un'onda con altezza significativa di circa 4 m.

Nel caso di eventi estremi da scirocco si ha invece un'onda significativa di 3.5 m.

Gli eventi più frequenti, quali quelli con tempo di ritorno biennale mostrano invece un'altezza d'onda di circa 3 m e di 2.5 m rispettivamente nel caso di grecale e scirocco.





Figura 13: Restituzione simulazione di trasformazione del moto ondoso al largo e particolare in prossimità dell'area di intervento.  $Tr=2$  anni,  $Dir=130^\circ$ ,  $H_s=3.35$  m,  $T_p=8.24$  s; velocità vento 12.8 m/s.

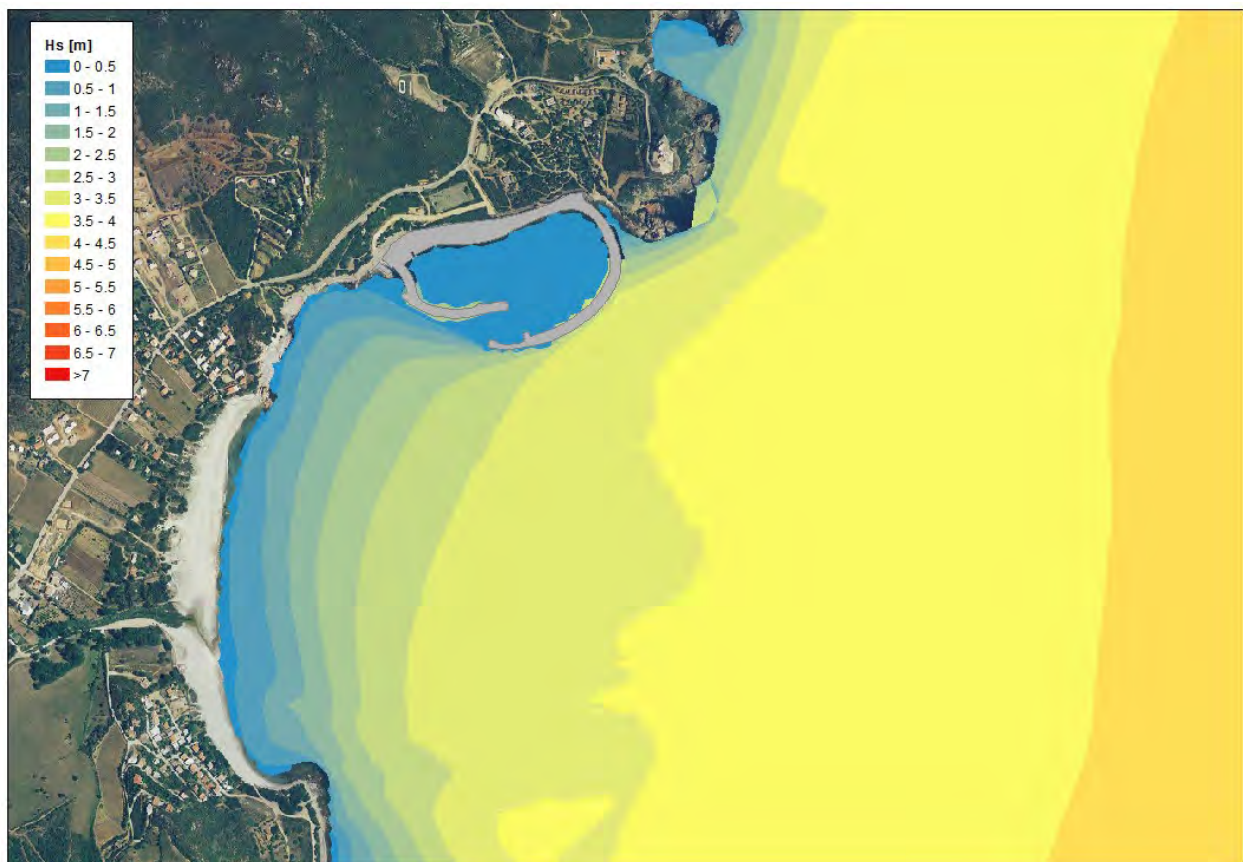
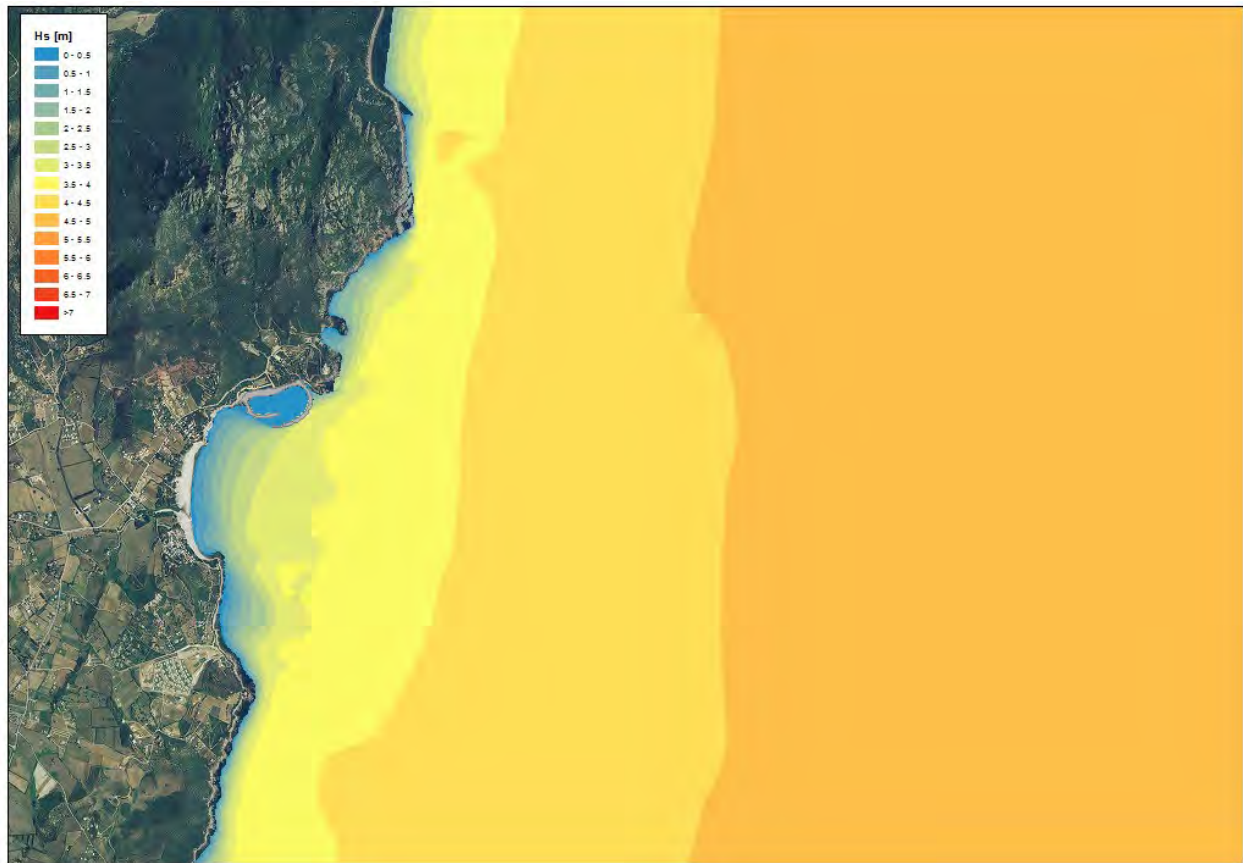


Figura 14: Restituzione simulazione di trasformazione del moto ondoso al largo e particolare in prossimità dell'area di intervento.  $T_r=2$  anni,  $Dir=50^\circ$ ,  $H_s=4.68$  m,  $T_p=9.00$  s; velocità vento 15.5 m/s.



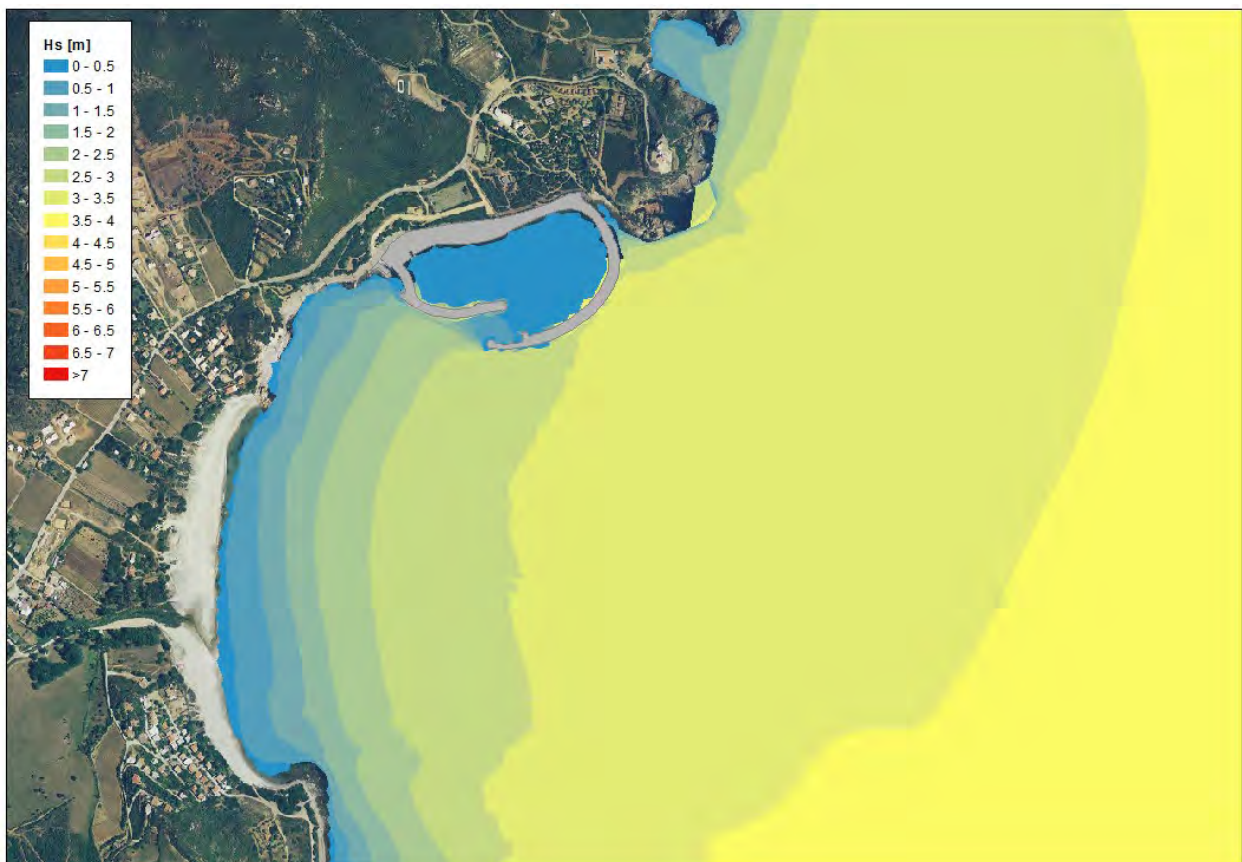


Figura 15: Restituzione simulazione di trasformazione del moto ondoso al largo e particolare in prossimità dell'area di intervento.  $T_r=5$  anni,  $Dir=130^\circ$ ,  $H_s=3.74$  m,  $T_p=8.70$  s; velocità vento 14 m/s.



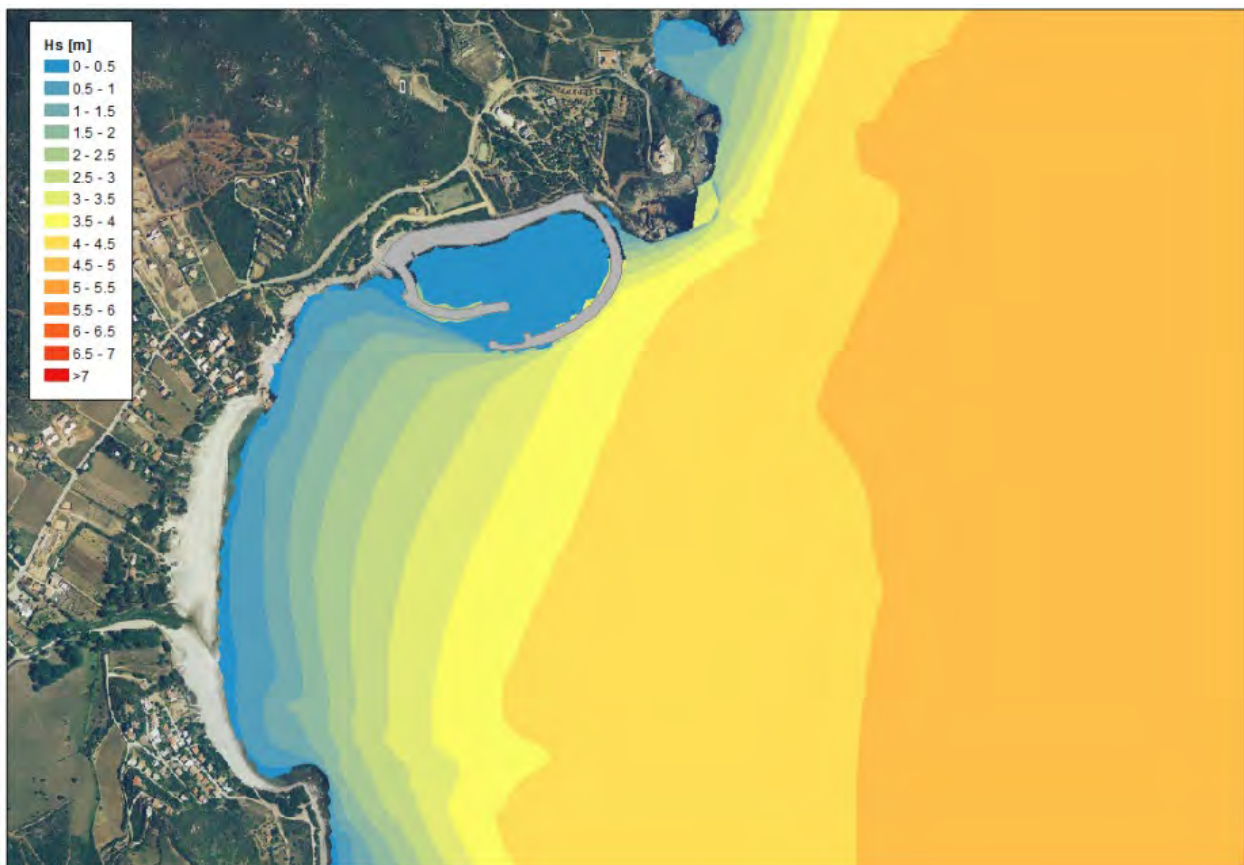
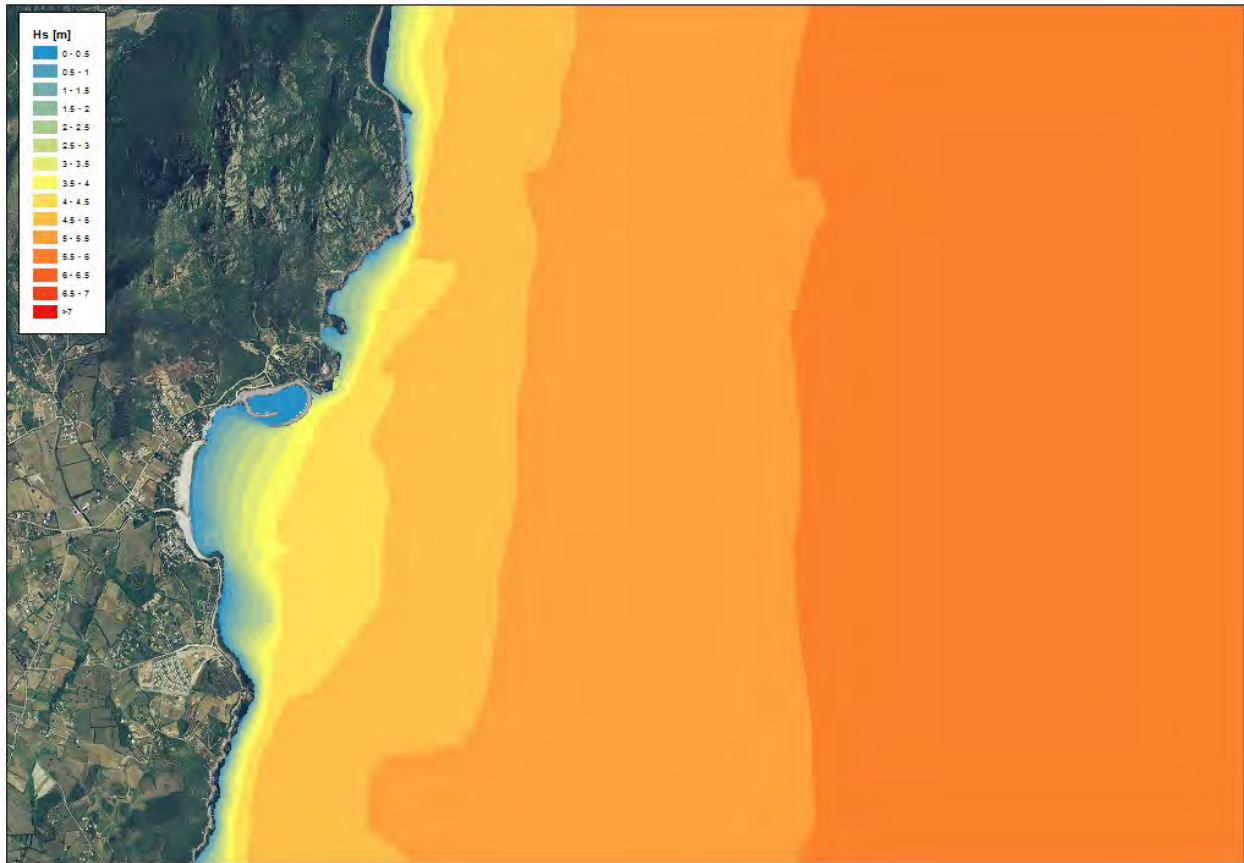


Figura 16: Restituzione simulazione di trasformazione del moto ondoso al largo e particolare in prossimità dell'area di intervento. Tr=5 anni, Dir=50°, Hs=5.56 m, Tp=9.80 s; velocità vento 19 m/s

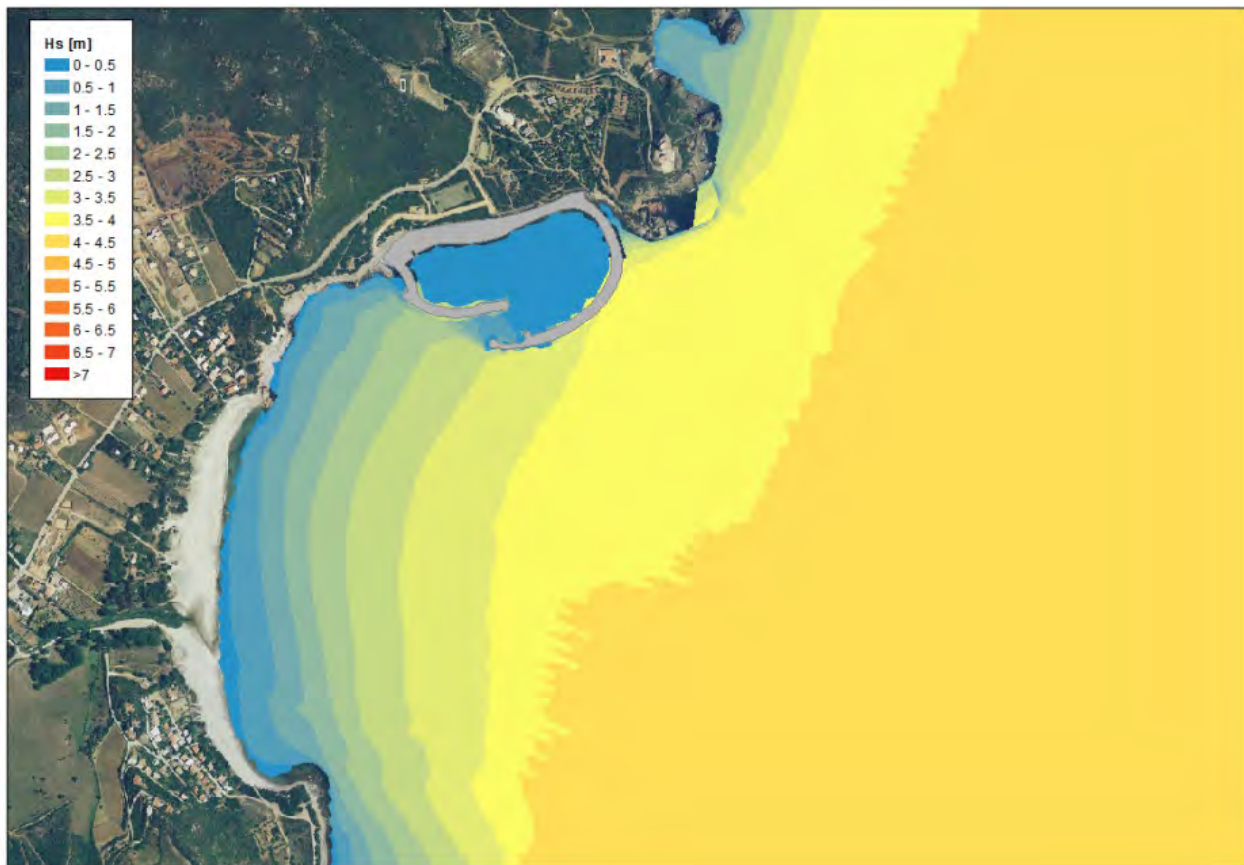
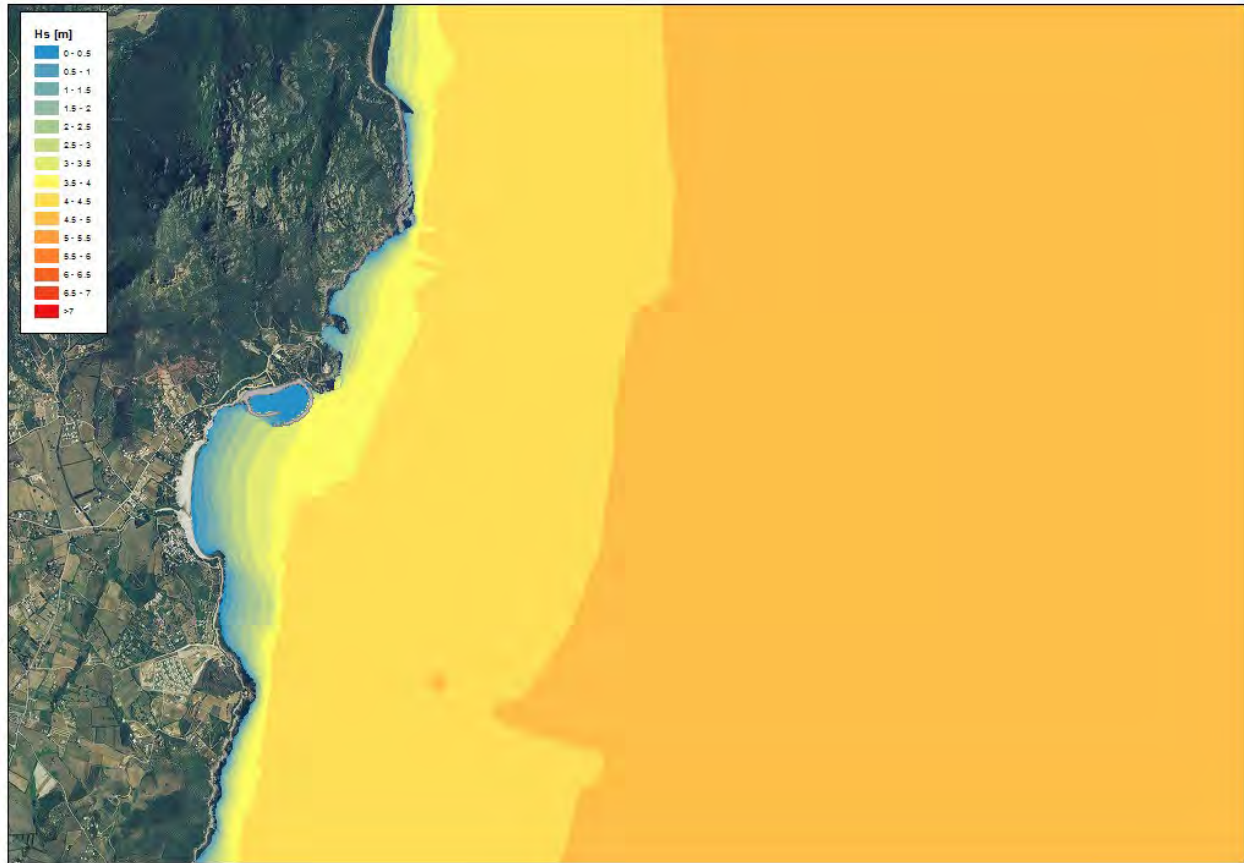


Figura 17: Restituzione simulazione di trasformazione del moto ondoso al largo e particolare in prossimità dell'area di intervento.  $T_r=50$  anni,  $Dir=130^\circ$ ,  $H_s=4.50$  m,  $T_p=9.55$  s; velocità vento 17 m/s.



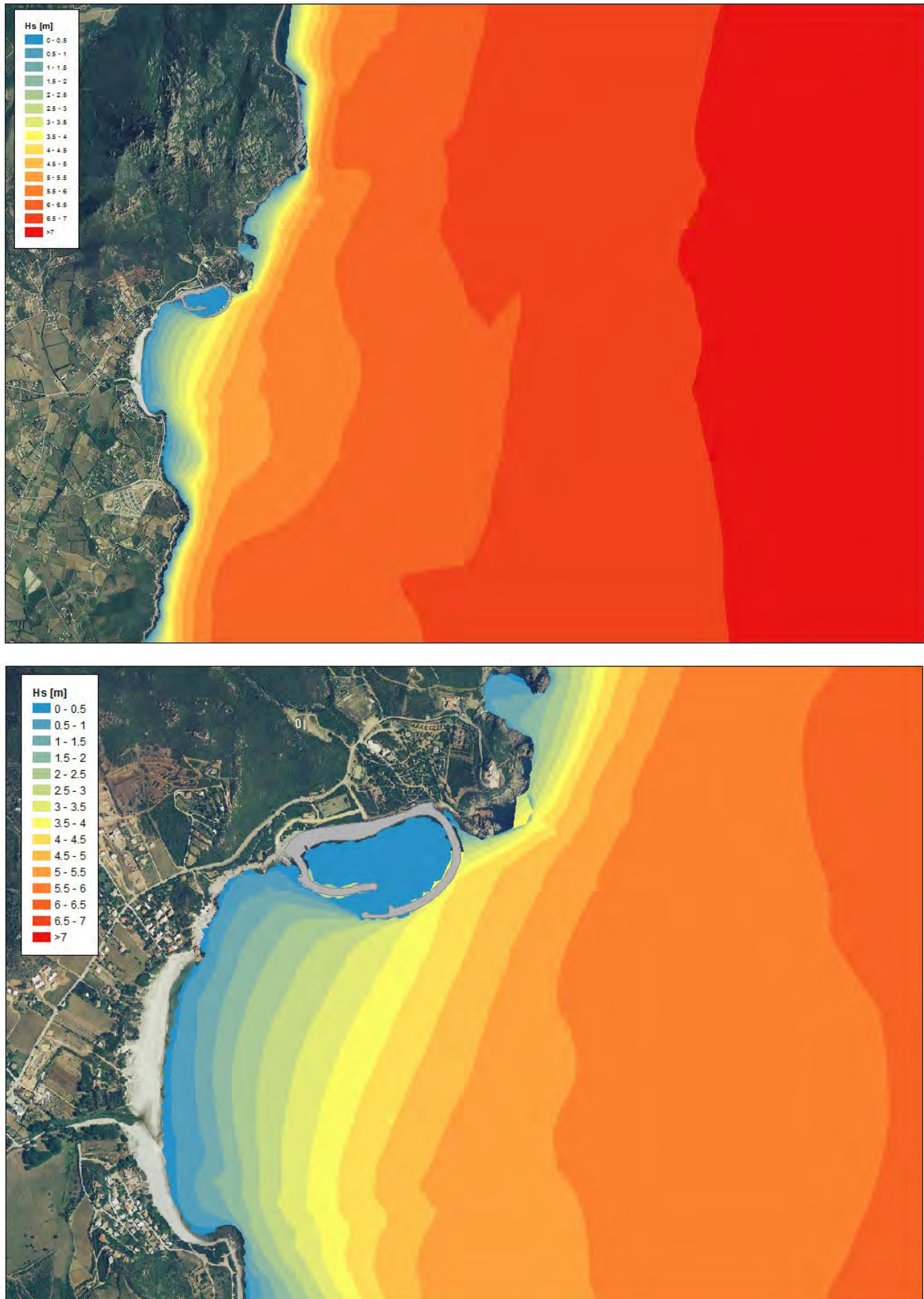


Figura 18: Restituzione simulazione di trasformazione del moto ondoso al largo e particolare in prossimità dell'area di intervento.  $T_r=50$  anni,  $Dir=50^\circ$ ,  $H_s=7.00$  m,  $T_p=11.00$  s; velocità vento 19 m/s

## 7. AGITAZIONE INTERNA

Per la valutazione dell'agitazione residua interna è stato utilizzato il software PHAROS, sistema integrato per la modellazione della propagazione delle onde all'interno dei porti e nell'intorno delle strutture costiere. Il programma utilizza delle griglie agli elementi finiti per computare gli effetti combinati di rifrazione e diffrazione in funzione dei layout di progettazione delle strutture portuali e della variabilità dei fondali in termini batimetrici.

Il programma risolve in modo completo l'equazione temporale armonica per lievi pendenze, localmente estesa con termini per rifrazione e dissipazione indotti dal frangimento del moto ondoso. Le condizioni al contorno tengono conto di molteplici fattori, come la parziale riflessione e gli effetti combinati di riflessione e diffrazione.

### 7.1 Impostazione modello

Il modello è stato applicato in prossimità del porto, realizzando una griglia computazionale agli elementi finiti con risoluzione di circa 8 celle per lunghezza d'onda, realizzata in funzione del periodo d'onda (valutato attraverso il modello SWAN).

#### 7.1.1 Caratteristiche di riflessione

La riflessione del moto ondoso è determinata dalle caratteristiche dell'onda e dalla presenza di strutture. I coefficienti di riflessione dei contorni del dominio sono stati ricavati sulla base delle strutture presenti e della tipologia di litorale. In Figura 19 sono mostrate i coefficienti di riflessione nel caso della soluzione progettuale scelta.

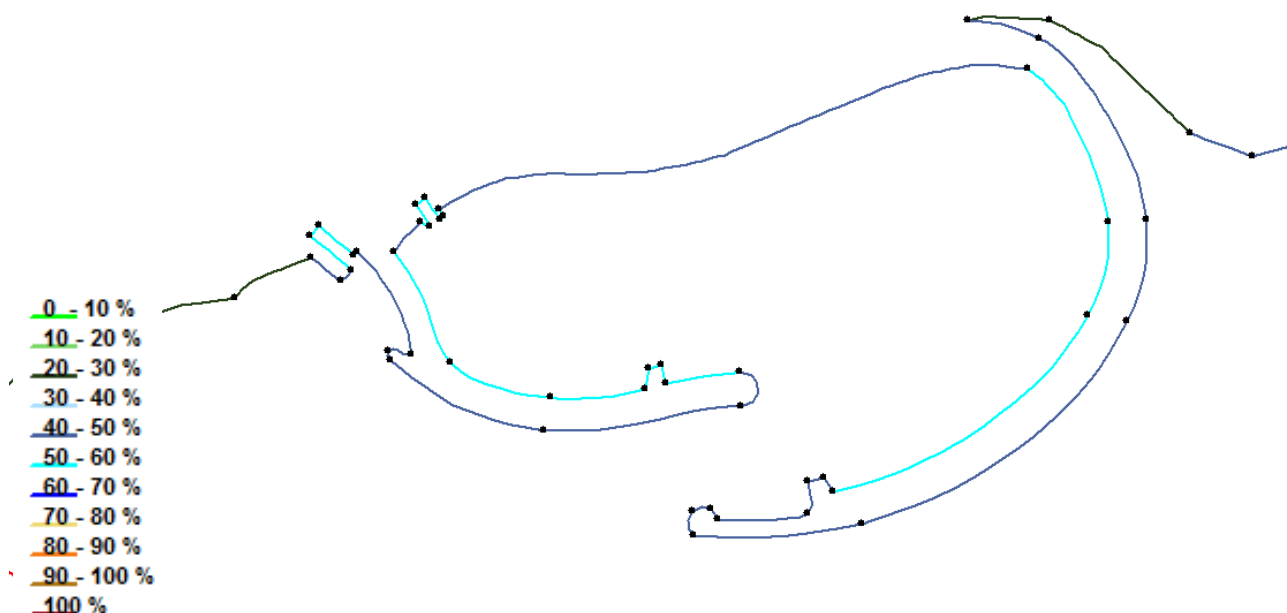


Figura 19: Coefficienti di riflessione immessi nel modello.

#### 7.1.2 Condizioni a contorno

Le condizioni di moto ondoso in ingresso a PHAROS sono state definite sulla base dei risultati ottenuti attraverso il modello SWAN, considerando le condizioni più critiche ottenute per i tempi di ritorno 2, 5 e 50 anni. I parametri di ingresso sono indicati in Tabella 11.

Tr	Direzione	Hs	Tp	Dir	Dir math
50	Grecale	4.84	10.71	83.1	186.9
50	Scirocco	3.78	9.46	122.0	148.0
5	Grecale	4.23	9.46	80.7	189.3
5	Scirocco	3.06	8.35	123.2	146.8
2	Grecale	3.46	9.46	79.4	190.6
2	Scirocco	2.73	8.35	123.0	147.0

Tabella 11: Condizioni al contorno per il modello PHAROS

## 7.2 Risultati simulazioni

Le simulazioni eseguite con PHAROS hanno permesso di valutare l'agitazione ondosa in prossimità del molo ed al suo interno, considerando eventi con un tempo di ritorno di 2, 5 e 50 anni.

I valori di riferimento di altezza dell'onda significativa all'interno del porto raccomandati dall'AIPCN-PIANC<sup>12</sup> sono riportati di seguito:

- *Condizioni di "comfort"*  
Hs=0.15 m      Massima frequenza complessiva non superiore a 5 giorni/anno;
- *Condizioni di "sicurezza"*  
Hs=0.30 m      Eventi con tempo di ritorno non inferiore a 5 anni;
- *Condizioni "limite"*  
Hs=0.50 m      Eventi con periodo di ritorno non inferiore a 50 anni.

I risultati delle simulazioni mostrano che per eventi biennali sia da scirocco (Figura 20) che da grecale (Figura 23), l'altezza d'onda massima osservata all'interno del bacino è di circa 0.15 m, pertanto adeguata a garantire le condizioni di comfort. Nel caso di eventi con tempo di ritorno di 5 anni le massime altezze d'onda all'interno del bacino sono di 0.16 m nel caso di eventi da grecale (Figura 24), e inferiori a 0.15 per eventi da scirocco (Figura 21). Pertanto, non solo sono rispettate le condizioni di sicurezza come previsto dalle linee guida PIANC, ma nella quasi totalità del bacino portuale sono garantite le condizioni di comfort anche per eventi quinquennali.

Nel caso di eventi estremi, le massime altezze d'onda osservabili sono al di sotto delle condizioni limite. Per eventi da scirocco anche in questo caso quasi tutto lo specchio acqueo interno presenta valori di altezza d'onda che garantiscono le condizioni di comfort (Figura 22). L'altezza d'onda massima osservabile è in questo caso pari a 0.16 m. L'agitazione residua maggiore è osservabile, come è lecito aspettarsi, nel caso di eventi estremi da grecale. La massima altezza d'onda osservabile è di 0.37 m, leggermente superiore al limite delle "Condizioni di sicurezza", ma comunque ampiamente inferiore alle "Condizioni limite" indicate per eventi estremi quale quelli considerati. Si fa inoltre notare che il lato più interno del porto, anche con eventi estremi, garantisce condizioni di comfort, con altezze d'onda massime di 0.16 m (Figura 25).

<sup>12</sup> AIPCN – PIANC Associazione Internazionale di Navigazione *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*, Febbraio 2002.



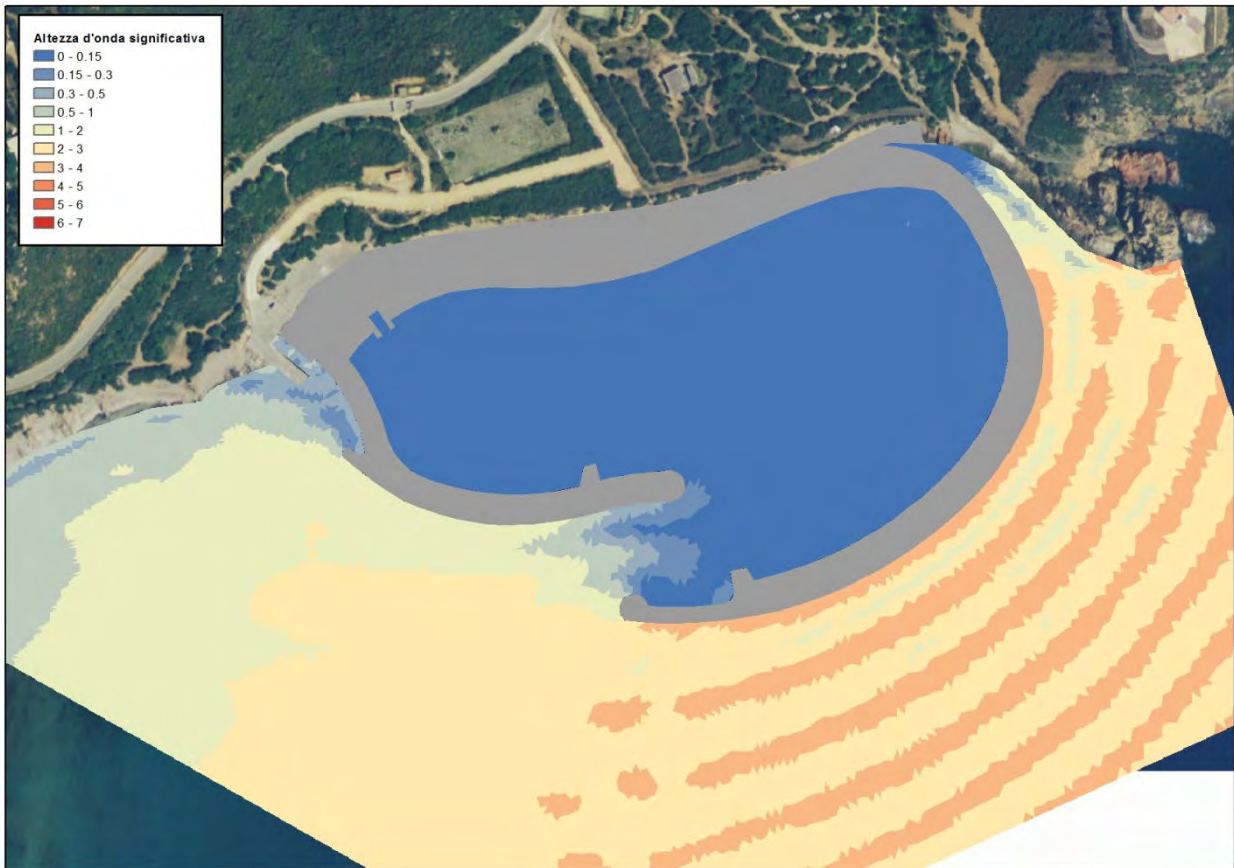


Figura 20: Restituzione simulazione penetrazione del moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa espressa in metri. Direzione scirocco, Tr=2 anni

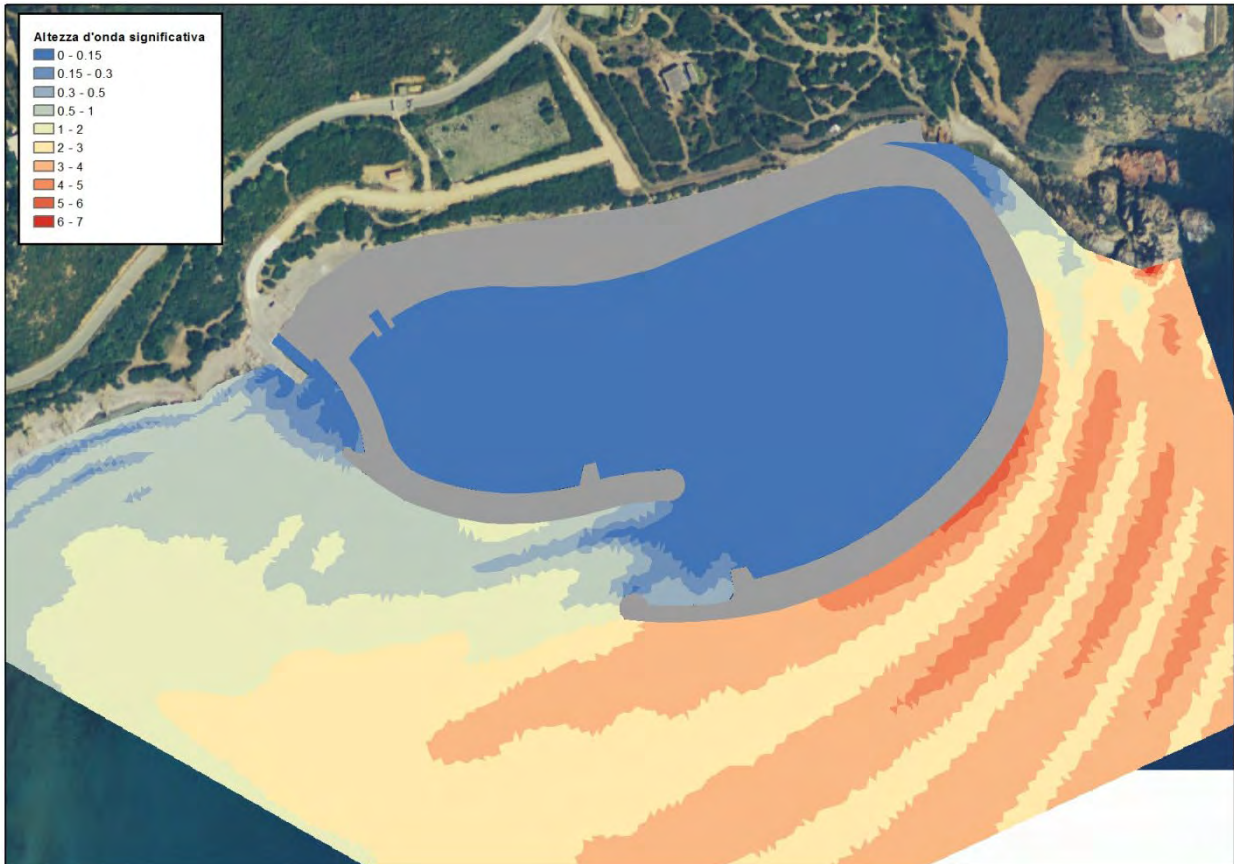
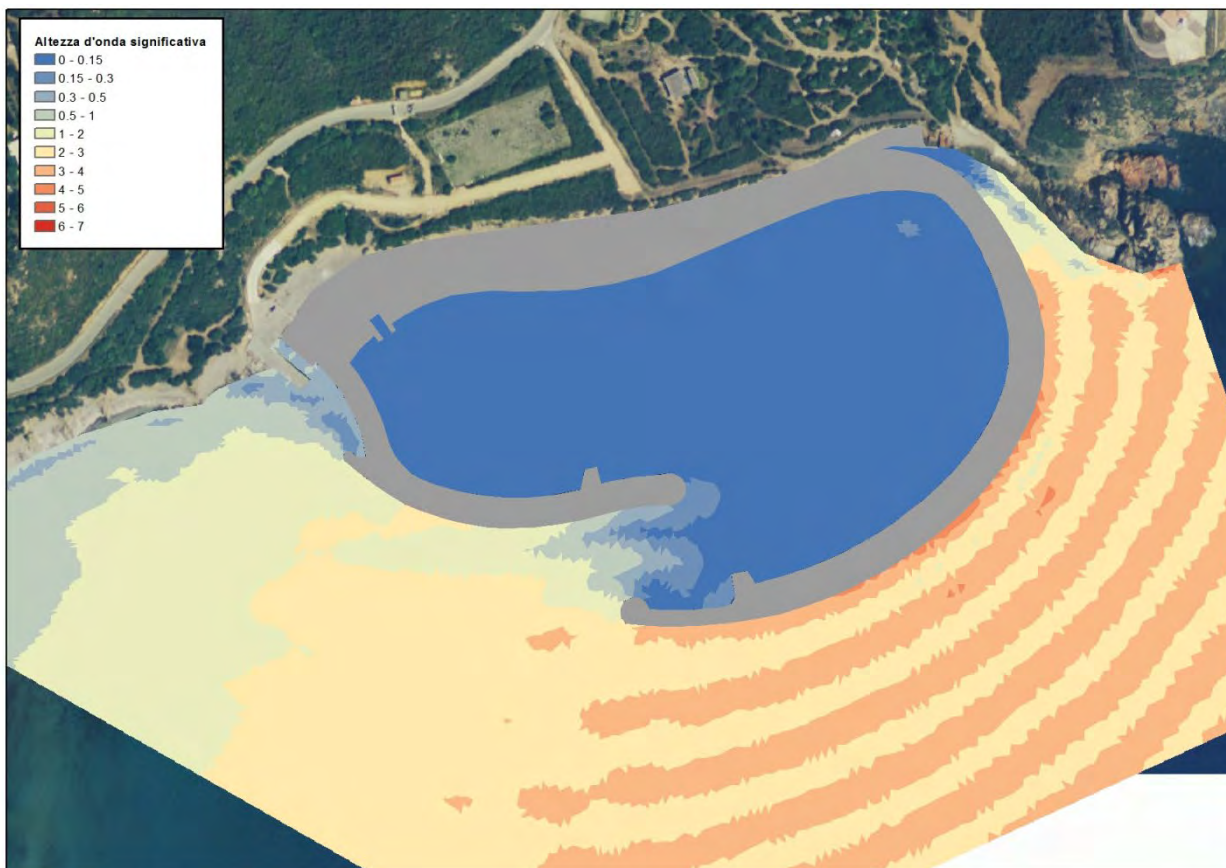
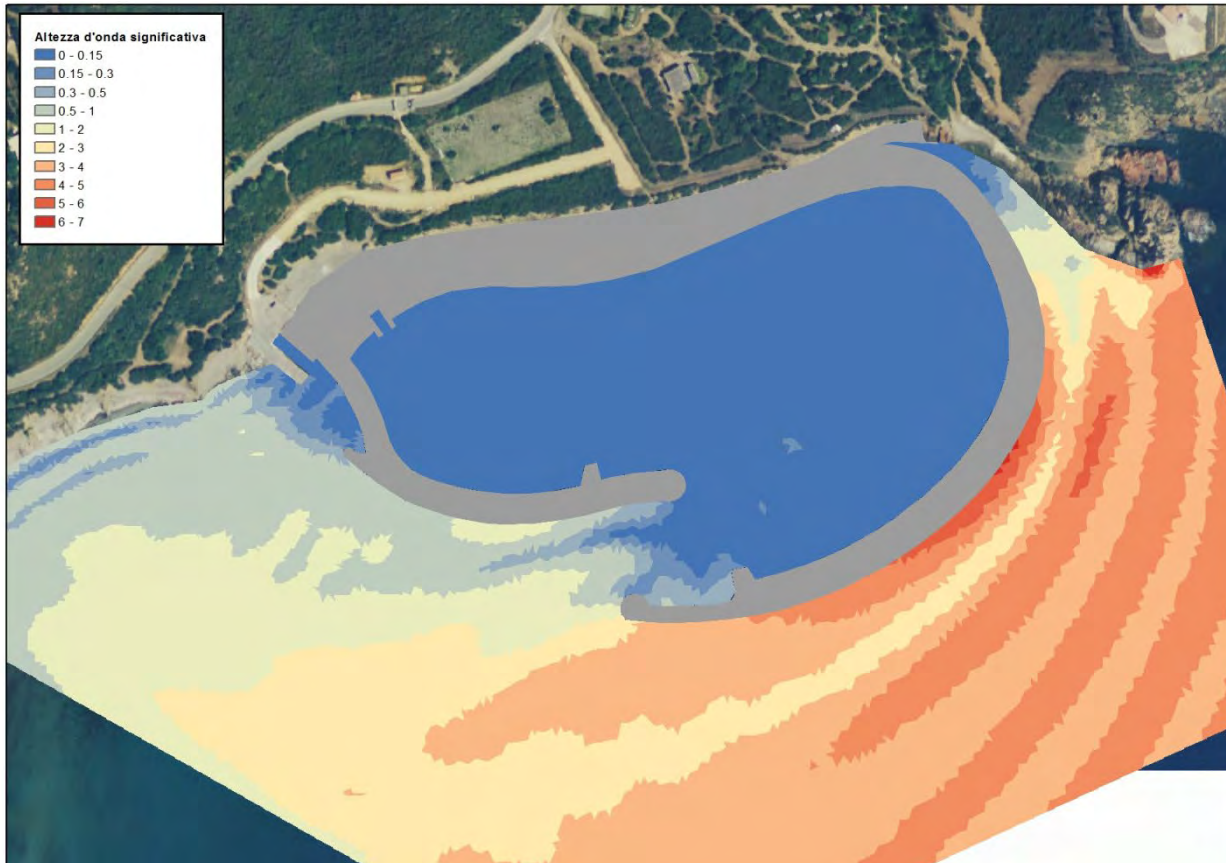


Figura 21: Restituzione simulazione penetrazione del moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa espressa in metri. Direzione scirocco, Tr=5 anni





**Figura 22: Restituzione simulazione penetrazione del moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa espressa in metri. Direzione scirocco,  $Tr=50$  anni,**



**Figura 23: Restituzione simulazione penetrazione del moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa espressa in metri. Direzione grecale,  $Tr=2$  anni**



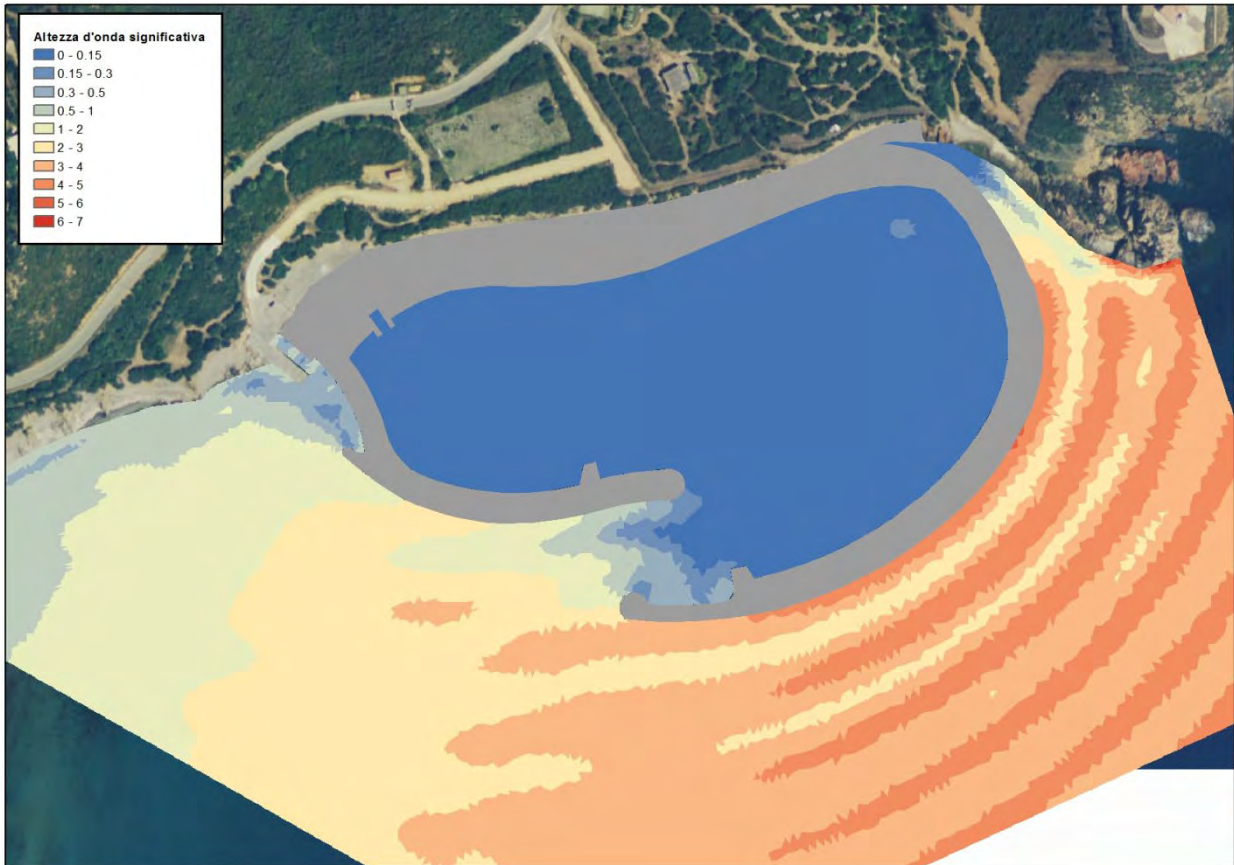


Figura 24: Restituzione simulazione penetrazione del moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa espressa in metri. Direzione grecale,  $Tr=5$  anni

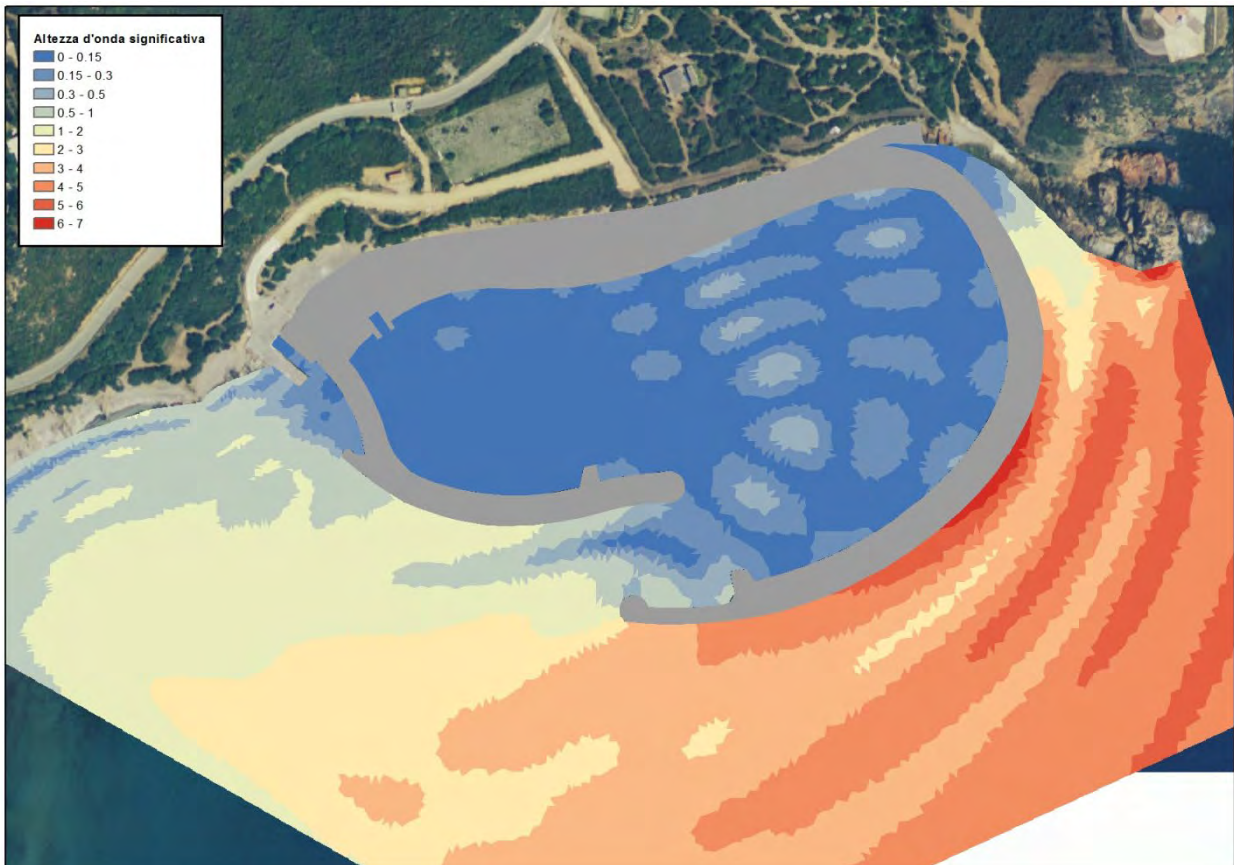


Figura 25: Restituzione simulazione penetrazione del moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa espressa in metri. Direzione grecale,  $Tr=50$  anni

*Nell'attuale livello di progettazione di fattibilità tecnica ed economica non si è ritenuto necessario effettuare nuove simulazioni rispetto a quelle sviluppate nel progetto preliminare dal momento che le modifiche apportate al progetto, in particolare alla disposizione planimetrica, alla radice del molo di sottoflutto, alla lieve diversità tra le sezioni dei moli di sopraflutto e sottoflutto, non influenzano in alcun modo i risultati ottenuti. I fattori e le caratteristiche geometriche che influirebbero sui risultati dei modelli, come l'apertura dell'imboccatura portuale, sono rimasti invariati in sede di adeguamento progettuale.*

## **8. STUDIO IDRAULICO E MORFODINAMICO**

Rispetto alla configurazione di progetto preliminare, la parziale modifica alla radice del molo di sottoflutto e la piscina naturale tra la radice del sopraflutto e il promontorio Is Ebbas introdotti in questa fase di adeguamento a progetto di fattibilità tecnica ed economica non hanno alcuna influenza sullo studio morfodinamico e sulle analisi condotte, che rimangono pertanto invariati. Al contrario, è opportuno fare qualche considerazione aggiuntiva in merito al modello idrodinamico (che pure mantiene la sua validità), soprattutto per quanto attiene alla piscina naturale e ai ricambi idrici che devono esserle garantiti.

### **8.1 Premessa**

Lo studio idraulico e morfodinamico relativo opera in oggetto è stato effettuato con apposita modellistica numerica che nel paragrafo seguente verrà descritta nel dettaglio. In particolare si sono determinate le condizioni di ricambio idrico che si verificano all'interno del bacino portuale ed il regime morfodinamico innescato da due eventi meteo-marini rappresentativi dei regimi più frequenti ovvero quelli di grecale e scirocco.

### **8.2 Il modello matematico**

Il modello numerico D3D utilizzato è un sistema multi modulare capace di simulare varie fenomenologie tra cui:

- I. Flussi dovuti a marea, correnti di densità e vento;
- II. Propagazione d'onde irregolari direzionalmente orientate su batimetrie irregolari;
- III. Onde che variano dinamicamente;
- IV. Variazioni della morfologia;
- V. Qualità dell'acqua;
- VI. Trasporto di sedimenti.

Esso comprende i seguenti moduli:

- a) *Creazione griglia di calcolo*
- b) *Definizione della batimetria*
- c) *Calcoli idro-dinamici*
- d) *Trasformazione di moto ondoso*
- e) *Morfologia del fondale*
- f) *Diffusione di traccianti*
- g) *Qualità delle acque.*

Ognuno di questi moduli ha a che fare con un particolare aspetto dello studio che si vuole affrontare. Alcuni moduli sono indispensabili per qualsiasi particolare aspetto si voglia studiare, essi, infatti, definiscono la griglia di calcolo e la batimetria entro cui i fenomeni devono essere studiati o la morfologia del fondo; altri, invece, si usano a seconda delle esigenze di studio.

### 8.2.1 Modulo Idrodinamico

Il modulo idrodinamico è un programma multi dimensionale idrodinamico che calcola flussi non stazionari e fenomeni di trasporto risultanti da forzanti di marea e meteorologiche su una griglia curvilinea e ben modellata. Nelle simulazioni 3D, il modulo idrodinamico applica le cosiddette trasformazioni di coordinate sigma lungo la verticale, che si risolve in una rappresentazione arrotondata della topografia. Questo approccio ha come risultato un'elevata efficienza di calcolo dovuto ad un costante numero di layer sull'intero dominio.

Il modello è basato sulle equazioni complete di Navier-Stokes con l'approssimazione per acque basse. Le equazioni sono risolte con una procedura altamente accurata incondizionatamente stabile. Le caratteristiche supportate sono:

- Tre sistemi di coordinate: rettilineo, curvilineo e sferico nelle direzioni orizzontali e una trasformazione in coordinate sigma sulla verticale.
- Simulazione di piani intertidali attraverso il "flooding" ed il "drying" (contorno variabile)
- Forza di Coriolis e forzanti mareali.
- Gradienti di densità dovuti alla non uniforme temperatura e distribuzione di concentrazione salina.
- Inclusione di termini di gradienti di densità (pressione) nell'equazione dei momenti (densità indotta da flussi)
- Modello di turbolenza per tenere in conto la viscosità di turbolenza verticale e della diffusività basata sul concetto di "Eddy viscosity".
- Sforzi tangenziali esercitati sul fondo da turbolenze di flusso basate sulla formula quadratica di Chézy o di Manning.
- Sforzi del vento sulla superficie modellati sulla formula di frizione quadratica.
- Simulazione dello scambio termico di effluenti termali, scarichi fognari o di impianti di raffreddamento nel campo computazionali (modulo di avvezione-diffusione).
- Conversione automatica di coefficienti bidimensionali in tridimensionali.
- Gli effetti di flussi caldi attraverso la superficie libera.
- Possibilità di rilascio di corpi spia dei quali si può osservare la traiettoria a simulazione ultimata.
- Influenza del movimento vorticoso nei flussi idrodinamici (per esempio nelle anse dei fiumi).

I campi d'applicazione del modello sono vari e vanno dalla modellazione dell'intrusione salina negli estuari dei fiumi, all'immissione d'acqua fresca nelle baie, alla stratificazione termale nel mare e nei laghi. Nello



studio in questione, si utilizzeranno soprattutto le possibilità del modello di modellare i flussi idrodinamici dovuti ad onde e di calcolare e modellare il trasporto di sedimenti.

Il modulo si basa sulle equazioni di Navier-Stokes per un fluido incompressibile, sotto le assunzioni di Boussinesq per le acque basse. Nell'equazione di momenti in direzione verticale non si tiene conto dell'accelerazione verticale il che porta all'equazione della pressione idrostatica.

Le equazioni su cui si basa il modello sono:

### Equazione di continuità

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) U \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q$$

dove:

$\zeta$  è il pelo libero dell'acqua al di sopra del piano di riferimento (a  $z = 0$ )

$d$  è la profondità dell'acqua al di sotto del piano di riferimento

$\xi, \eta$  sono le direzioni locali di riferimento della griglia;

H altezza totale è data dalla somma di  $\zeta + d$ .

Q nell'equazione rappresenta i contributi per unità d'area delle immissioni o prelievi di acqua, evaporazioni o precipitazioni:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E$$

dove  $q_{in}$  e  $q_{out}$  sono le fonti locali di prelievo ed immissione per unità di volume e P e E gli apporti globali dovuti ad evaporazione e precipitazioni.

$\sigma$  è la coordinata definita lungo la verticale definita come:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

L'equazioni del momento della quantità di moto nelle direzioni orizzontali sono così definite

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv = \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \xi} - fu = \\ & = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned}$$

Le variazioni di densità non sono tenute in conto fatta eccezione per i termini di pressione baroclina,  $P_\xi$  e  $P_\eta$  rappresentano i gradienti di pressione. Le forze  $F_\xi$  e  $F_\eta$  rappresentano lo sbilanciamento degli sforzi orizzontali di Reynolds nell'equazione dei momenti.

$M_\xi$  e  $M_\eta$  rappresentano i contributi dovuti a sorgenti e attingimenti del momento dovuto a forze esterne (forze dovute a strutture idrauliche, scarichi o attingimenti di acqua, sforzi dovute alle onde ecc.).

la velocità verticale  $\omega$  nel sistema di coordinate di adattamento sigma è calcolato grazie all'equazione di continuità:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out})$$

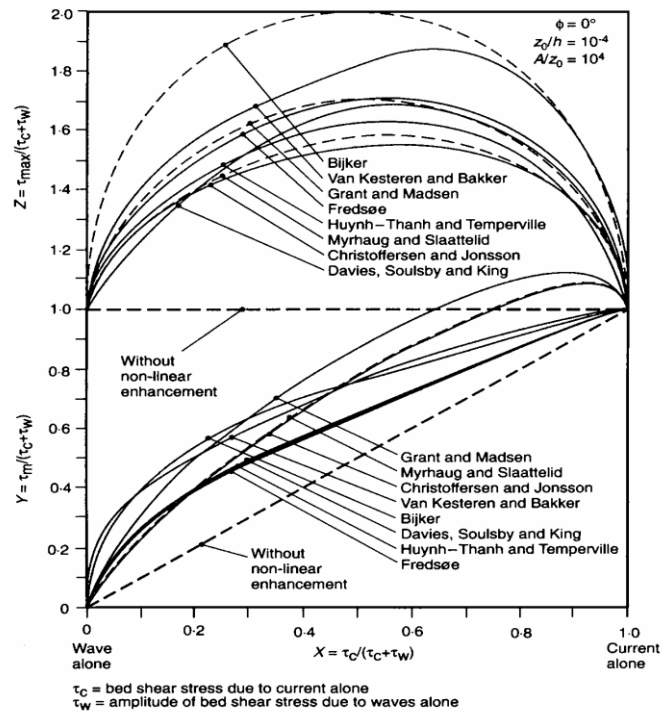
**L'equazione del trasporto** è formulata in una forma conservativa nelle coordinate ortogonali curvilinee nella direzione orizzontale e nella coordinata sigma lungo la verticale:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial [\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} = \\ & + \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right\} + \\ & + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] - \lambda_d (d+\zeta)c + S, \end{aligned}$$

con  $\lambda_d$  che rappresenta il processo di decadimento di primo ordine ed S i termini di prelievo ed immissione. Per l'interazione tra moto ondoso e movimento di sedimenti generato dallo stesso si utilizza la parametrizzazione di Soulsby et al. (1993) che sviluppa e crea da 8 modelli d'interazione tra moto ondoso e sforzi sul fondo.

Dal punto di vista numerico, il modello discretizza l'intera area in celle-griglia sul piano orizzontale. L'insieme delle equazioni differenziali è così trasformato nello spazio discretizzato. Ogni cella contiene, quindi, un valore di battente idrico, di batimetria, un valore di velocità nella direzione x della griglia, ed uno nella direzione y.

Tutti questi valori sono allocati in uno schema denominato "griglia sfalsata", poiché ogni valore definito in punti diversi della stessa cella della griglia. L'insieme delle equazioni differenziali parziali è risolto utilizzando un metodo alle differenze finite. Il modulo utilizza il cosiddetto metodo ADI, **A**lternating **D**irection **I**mplicit.



### 8.3 Ricambi Idrici

#### 8.3.1 Considerazioni preliminari

Generalmente, lo stato di relativa quiete in cui si trova l'acqua all'interno di un bacino portuale favorisce i processi di sedimentazione di sostanze organiche con accumuli di fango che, diventando più leggero per effetto delle fermentazioni anaerobiche, viene trascinato in superficie con conseguenze ovviamente negative. Anche la presenza di sostanze oleose e/o schiumose in sospensione, oltre a dare un aspetto antiestetico allo specchio liquido, ne limita fortemente gli scambi di ossigeno con l'atmosfera. L'insieme di questi fattori può comportare condizioni estreme: risultando alterato il naturale equilibrio biologico e chimico-fisico dell'acqua, si possono manifestare inconvenienti non trascurabili per i fruitori del marina, oltre ovviamente a impatti negativi sull'ambiente.

L'obiettivo di garantire un accettabile stato di salute del corpo d'acqua si persegue da un lato contenendo la concentrazione di sostanze inquinanti entro valori di sicurezza, dall'altro assicurando elevate quantità di ossigeno. In linea di massima gli accorgimenti che possono essere messi in atto sono sostanzialmente tre:

- minimizzare l'immissione di sostanze inquinanti;
- operare periodici interventi per rigenerare il corpo idrico riducendo la concentrazione di elementi inquinanti (asportazione dei fanghi dal fondale, eliminazione manuale di schiume ed oli in superficie, ...);
- valutare, e se necessario incrementare, la capacità naturale del bacino di rigenerare le acque invase.

I primi due obiettivi vengono perseguiti nella fase di gestione del porto attraverso l'attuazione del Regolamento Portuale che vieta gli scarichi delle imbarcazioni in porto, il mantenimento dei motori accesi, il recupero delle acque di carena e degli olii esausti, oltre ad una attenta pianificazione di interventi manutentivi dei fondali. Il terzo invece richiede un'accurata progettazione idraulica della conformazione

dello specchio acqueo portuale ed una altrettanto delicata valutazione delle condizioni di ricircolo naturale dello stesso. In sostanza, si tratta di definire il campo idrodinamico del corpo liquido all'interno del bacino e valutarne di conseguenza il rendimento depurativo naturale, cioè la sua capacità di rigenerarsi mantenendo livelli adeguati di ossigeno disciolto.

Come anticipato, la configurazione portuale del progetto di fattibilità tecnica ed economica è sostanzialmente uguale a quella del progetto preliminare di cui costituisce adeguamento: il bacino avrà fondali variabili tra i -1.50 e i -7.00 m l.m.m., comportando il confinamento di un volume d'acqua all'interno del bacino portuale pari a circa 280.000 m<sup>3</sup> su una superficie di circa 75.000 m<sup>2</sup>.

Nell'area compresa tra la radice del molo di sopraflutto ed il promontorio Is Ebbas verrà realizzata una piscina naturale chiusa lato mare da una deviazione della massicciata della diga foranea realizzata con massi 5-8 ton. Poiché tale piscina è completamente chiusa, la rigenerazione del corpo liquido al suo interno dovrà necessariamente essere garantita da aperture all'interno del corpo diga opportunamente posizionate e dimensionate.

### **8.3.2 Metodologia**

Come anticipato, per verificare il rendimento depurativo naturale del bacino portuale è stato dapprima analizzato il campo idrodinamico al suo interno. In via cautelativa le simulazioni sono state condotte in condizione limite, ovvero nelle condizioni peggiori in cui il bacino si può trovare a funzionare: in assenza totale di vento utilizzando come unica forzante idrodinamica le oscillazioni di livello dovute alla sola marea astronomica. Sulla base del campo idrodinamico, viene conseguentemente valutata la capacità di ricambio idrico con riferimento al decadimento dell'ossigeno disciolto.

Le simulazioni sono state condotte con il sistema di modellazione SMS (Surface water Modeling System), sviluppato dalla United States Army Engineering Waterways, attraverso i moduli RMA2 e RMA4, in grado di simulare le correnti in funzioni delle oscillazioni di marea per valutare i tempi di ricambio delle acque all'interno di un bacino.

### **8.3.3 Simulazioni e considerazioni finali**

Come accennato in precedenza, in favore di sicurezza, in tutte le simulazioni effettuate non si è tenuto conto né della presenza di correnti litoranee né dell'effetto del vento, forzanti che comunque contribuiscono alla movimentazione delle acque superficiali favorendo la vivificazione naturale all'interno del bacino, imponendo quindi come condizione al contorno le sole variazioni di marea dovute agli eventi astronomici. Preliminarmente deve essere discretizzato lo specchio acqueo, costruendo una griglia agli elementi finiti che descriva la batimetria (geometria della superficie del fondo) del corpo d'acqua all'interno del bacino e all'interno della piscina naturale, come previsti nella configurazione di progetto.

Una volta discretizzato il sistema idrico, sono state definite le condizioni al contorno in termini di livelli idrici lungo una linea di contorno posta al largo e che rappresenta le condizioni di mare aperto.





**Figura 26. Discretizzazione dei corpi idrici interni al bacino e alla piscina naturale per le simulazioni idrodinamiche**

L'analisi condotta ha fatto registrare un tempo per il ricambio totale dei volumi idrici del tutto accettabile e anzi ampiamente sufficiente a garantire buoni livelli di ossigenazione all'interno del bacino. Tale conclusione è inoltre supportata dal fatto che le simulazioni sono state condotte in favore di sicurezza, ma nella realtà è del tutto improbabile che si verifichi una situazione tanto sfavorevole come quella simulata: la brezza innescata dai gradienti termici che si verificano ogni giorno è infatti sufficiente per accelerare i processi di ricambio idrico che di conseguenza saranno nella realtà più celeri rispetto a quelli simulati.

Relativamente al bacino portuale, tali conclusioni sono in linea con quelle cui si è addivenuti nell'ambito del progetto preliminare, circostanza peraltro prevedibile visto che il layout del porto e soprattutto l'imboccatura non hanno subito modifiche sostanziali.

Per quanto attiene alla piscina naturale, è risultato necessario introdurre "varchi artificiali" attraverso i quali si favorisce un ampio ricambio del corpo idrico connettendo la "piscina" tanto al bacino portuale quanto verso il mare aperto.

In particolare, nel tratto di chiusura tra il molo sopraflutto e il promontorio, all'interno del corpo diga, verranno inserite 5 condotte sottomarine  $\varnothing 1000$ . Un varco con sezione liquida di minimo  $3 \text{ m}^2$  sarà invece inserito nel corpo della parte radicale del molo sopraflutto in prossimità della banchina di riva, attuabile o con un breve tratto di impalcato a giorno o con condotte di adeguato diametro.

Tali accorgimenti sono tali da garantire un'ampia circolazione delle acque (dunque livelli di ossigeno compatibili con il suo utilizzo) creando un sistema unico in cui i corpi idrici del bacino e della piscina sono messi continuamente in comunicazione, dunque in movimento, tra loro e con il mare aperto.

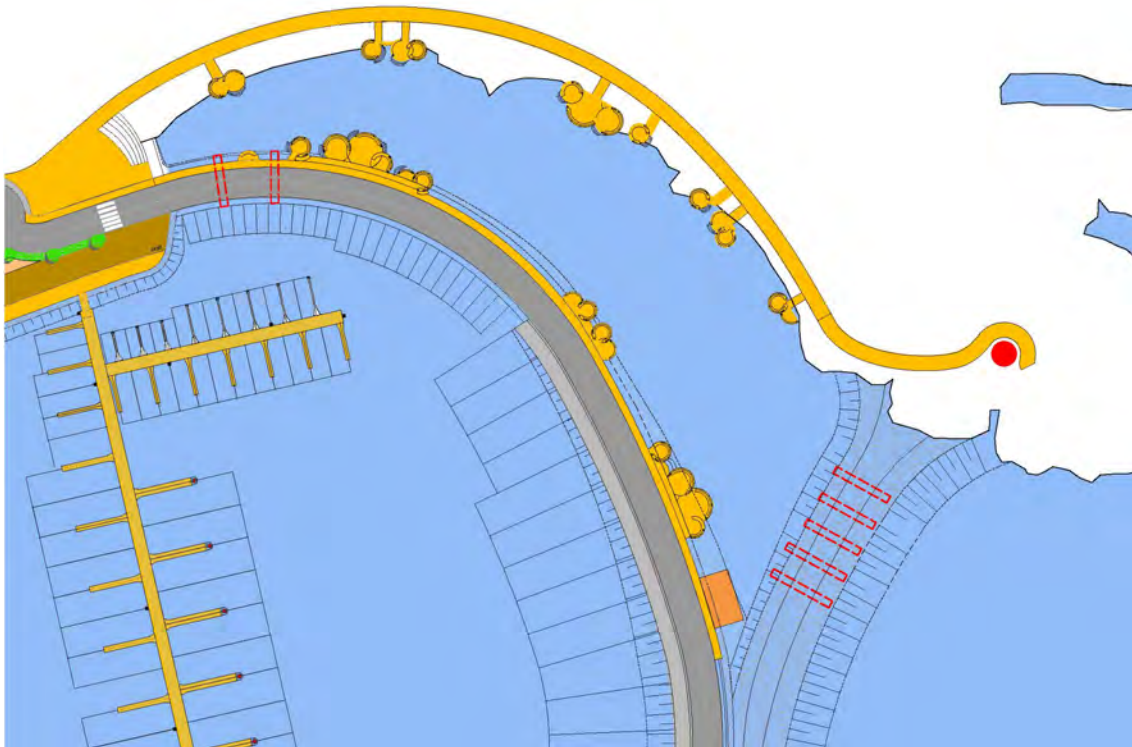


Figura 27. Localizzazione delle condotte sottomarine per mettere in comunicazione l'acqua all'interno della piscina con il mare aperto e con il bacino portuale

## 8.4 Studio idromorfodinamico

### 8.4.1 Considerazioni preliminari

Lo studio morfodinamico è stato realizzato utilizzando il modello D3D. Tale modello ha permesso di valutare la modifica delle correnti a seguito della costruzione della struttura portuale e di determinare il possibile insabbiamento a seguito della realizzazione delle opere, considerando in particolare i due eventi meteorologici rappresentativi dei regimi più frequenti ovvero quelli di grecale e scirocco. Tale modello permette, in accordo con quanto previsto dallo "Studio di fattibilità sul completamento della Rete Portuale Turistica Isolana", di realizzare uno studio di dettaglio di dinamica sedimentaria bidimensionale.

### 8.4.2 Impostazioni modello

Configurazione	Hs	Tp	Dir
Attuale	4	10.8	50
Attuale	4	10.8	130
Di progetto	4	10.8	50
Di progetto	4	10.8	130

Tabella 12: Condizioni al contorno per il modello D3D

Le simulazioni effettuate hanno preso in considerazione d'onda provenienti da scirocco e grecale, rappresentati mareggiate della durata di 6 ore ciascuna. La scelta delle forzanti d'onda (riportate in Tabella 12) è stata fatta considerando due eventi estremi dalle direzioni principali (grecale e scirocco).



### 8.4.3 Risultati dei modelli idrodinamici

I risultati dei modelli idrodinamici nella situazione attuale mostrano sia nel caso di grecale che in quella di scirocco una corrente lungoriva diretta verso il centro della spiaggia, e una corrente trasversale diretta dalla spiaggia verso largo. I risultati delle simulazioni sono in accordo con i dati delle analisi granulometriche. Queste mostrano delle granulometrie maggiori nei tratti caratterizzati da correnti maggiori, e granulometrie inferiori nelle aree dove le correnti hanno velocità ridotta.

La realizzazione della struttura portuale non causerà delle modifiche sostanziali alle correnti se non in prossimità della struttura stessa.



Figura 28: simulazione idrodinamica generata da un evento di grecale con riportate le analisi granulometriche del sito. Situazione attuale





Figura 29: simulazione idrodinamica generata da un evento di grecale. Situazione di progetto

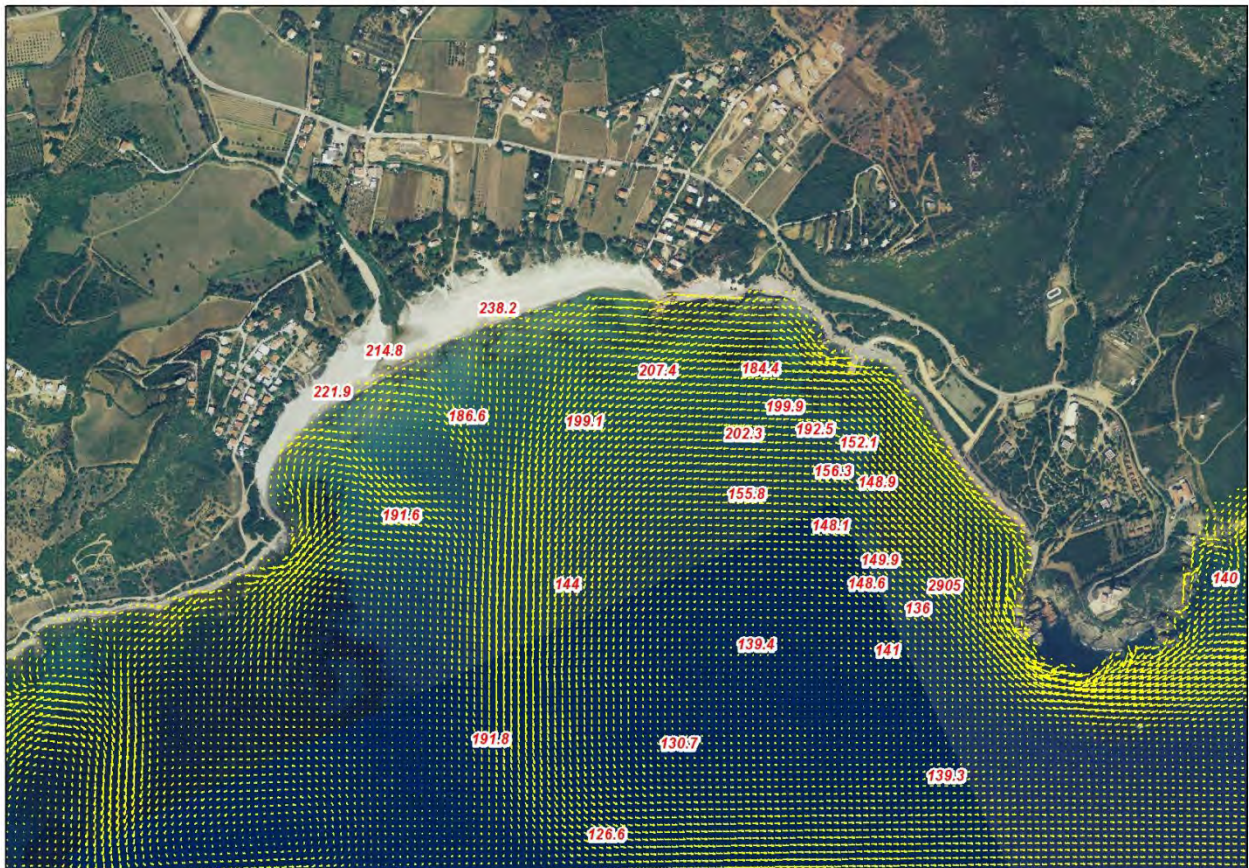


Figura 30: simulazione idrodinamica generata da un evento di scirocco. Situazione attuale





Figura 31: simulazione idrodinamica generata da un evento di scirocco. Situazione di progetto

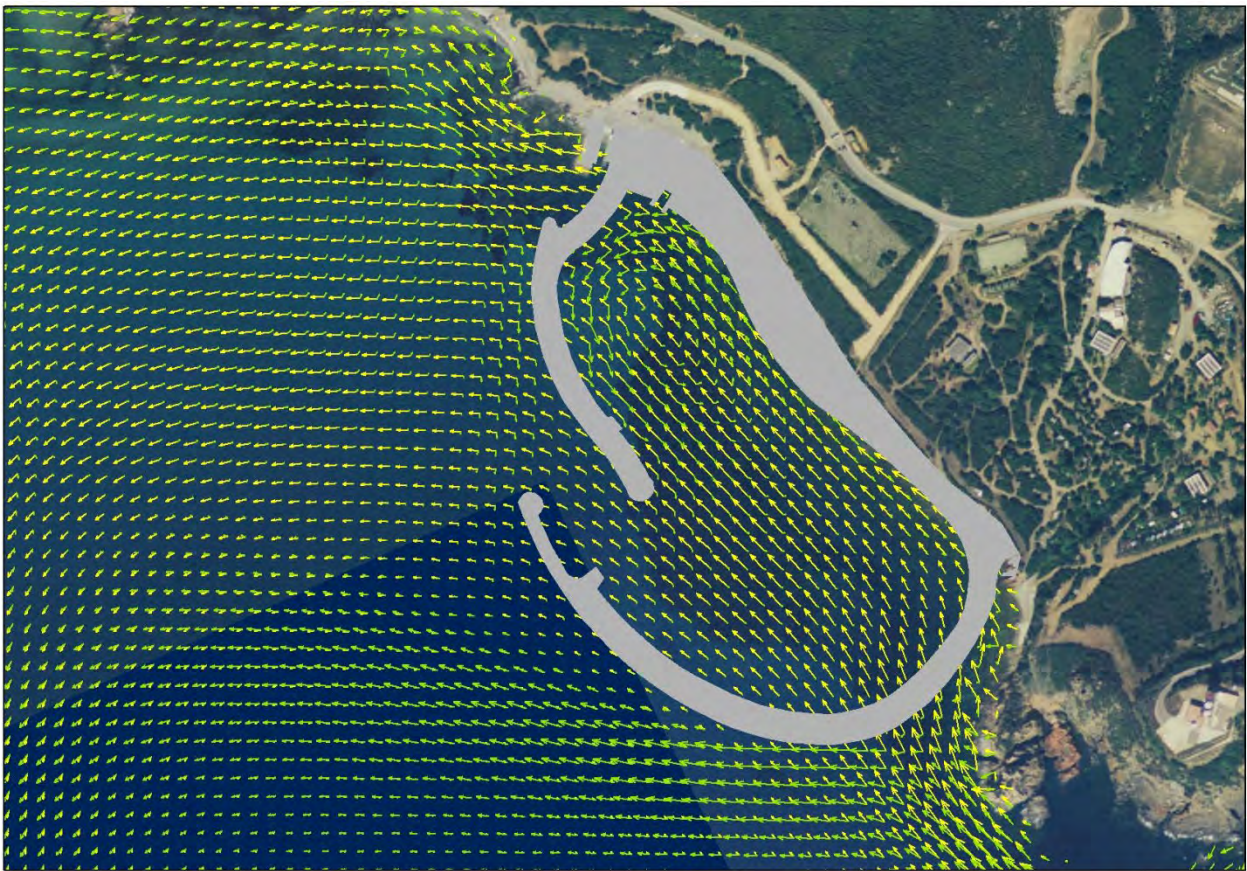


Figura 32: simulazione idrodinamica: confronto sulla variazione delle correnti in prossimità del bacino portuale generate da un evento di grecale. In giallo le correnti nella situazione attuale. In verde la situazione di progetto



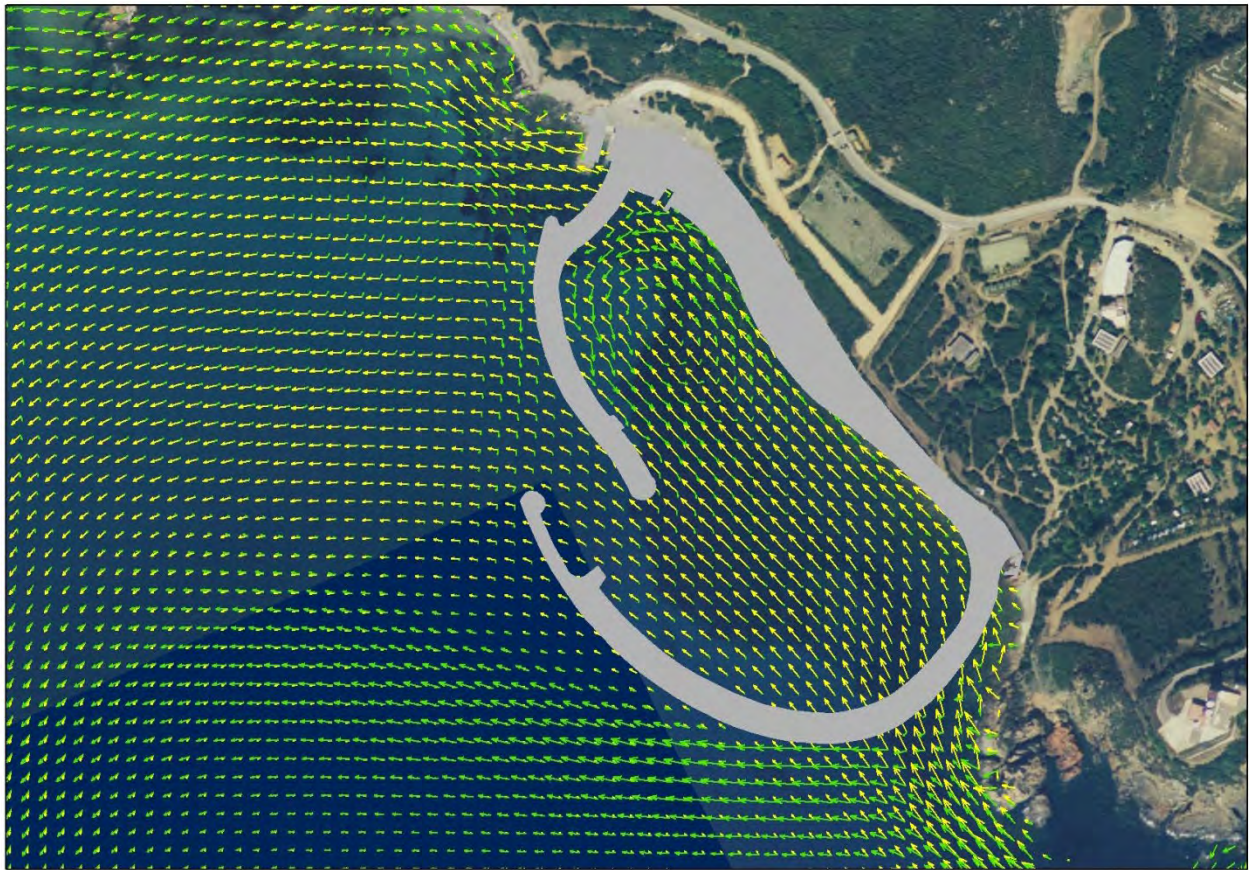


Figura 33: simulazione idrodinamica: confronto sulla variazione delle correnti in prossimità del bacino portuale generate da un evento di scirocco. In giallo le correnti nella situazione attuale. In verde la situazione di progetto

#### 8.4.4 Risultati dei modelli morfodinamici

Le simulazioni effettuate mostrano, nella situazione attuale, erosione nell'area in prossimità di Punta is Ebbas sia nel caso di eventi estremi da scirocco che nel caso di eventi estremi da grecale. Una leggera erosione è evidente anche nell'area nella quale è prevista la realizzazione della struttura portuale, in particolare in caso di eventi da scirocco. Sempre con eventi provenienti dal secondo quadrante, è inoltre evidente erosione nel tratto a sud della spiaggia. Per quanto concerne la spiaggia, questa non pare subire erosione nella situazione attuale. Tale risultato è in accordo con l'analisi della linea di riva effettuata e riportata nei seguenti paragrafi e con i dati della analisi sedimentologiche.

A seguito della realizzazione del porto, il modello evidenzia come il bacino portuale non vada a influire sul trasporto sedimentario. Oltre le variazioni nell'area occupata dal bacino portuale stesso, non sono evidenti modifiche alle aree di accumulo ed erosione, che restano sostanzialmente invariate sia in termini qualitativi che quantitativi rispetto alla situazione attuale.

Il modello evidenzia inoltre come la struttura portuale non andrà a modificare l'apporto sedimentario alla spiaggia di Foxi Manna.



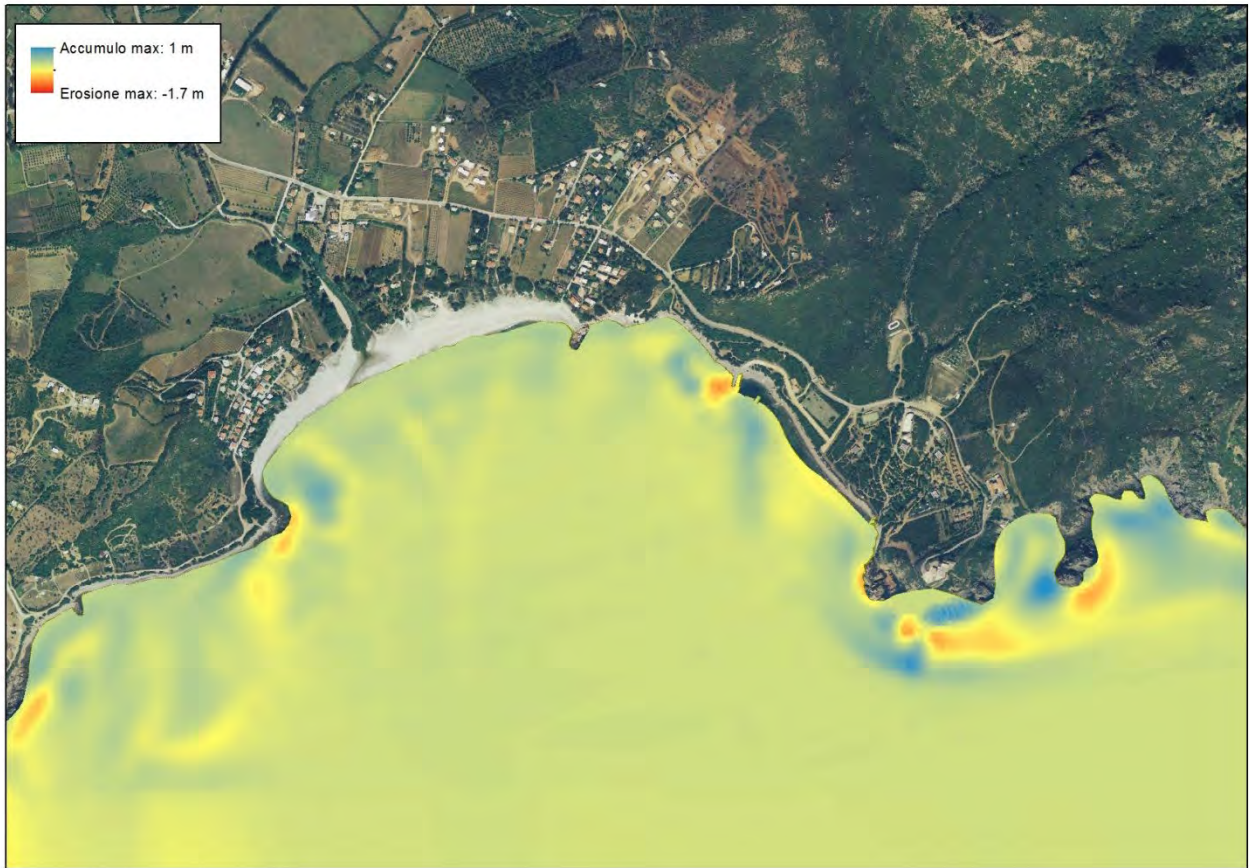


Figura 34: simulazione idrodinamica generata da un evento di grecale. Situazione attuale espressa in termini di isolinee di sedimento. Valori negativi: erosioni, valori positivi: accumuli

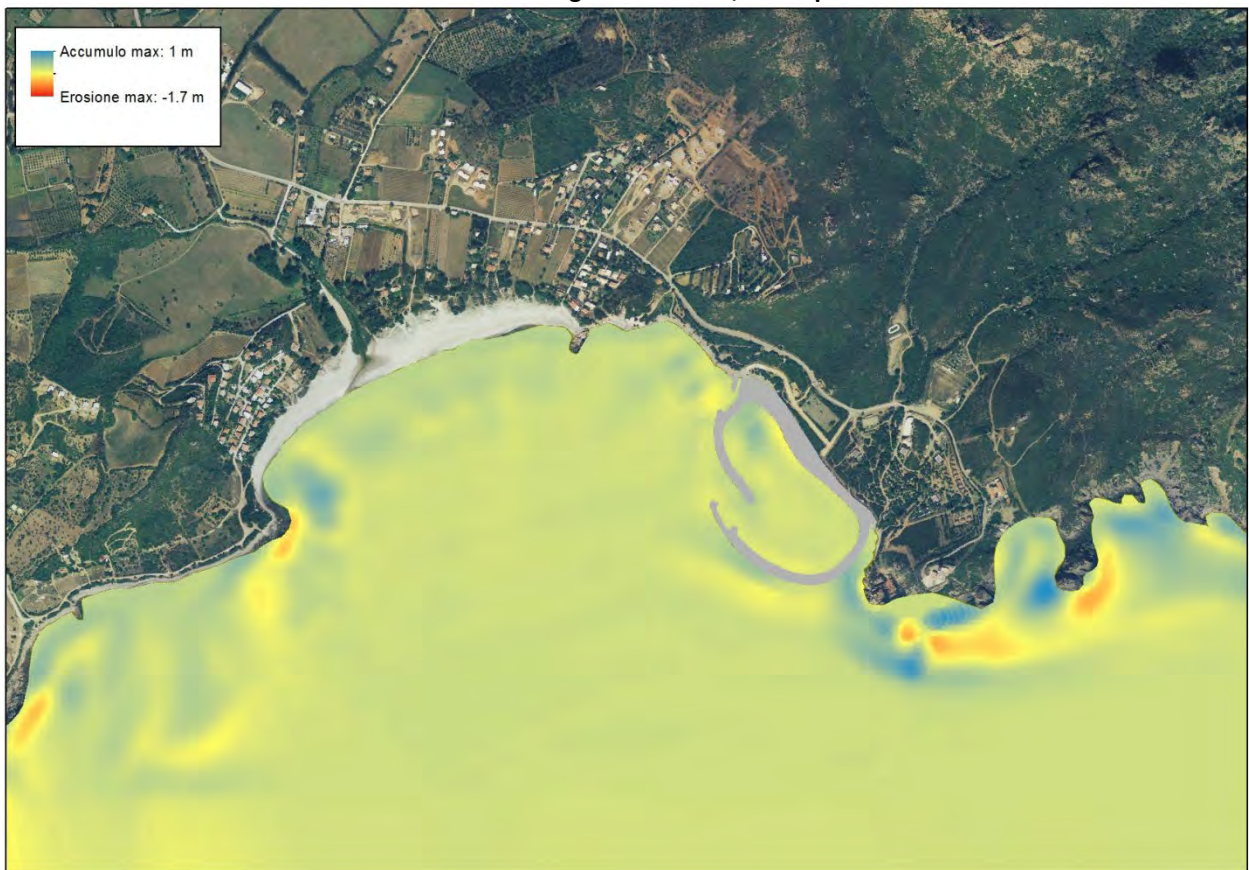


Figura 35: simulazione idrodinamica generata da un evento di grecale. Situazione di progetto espressa in termini di isolinee di sedimento. Valori negativi: erosioni, valori positivi: accumuli



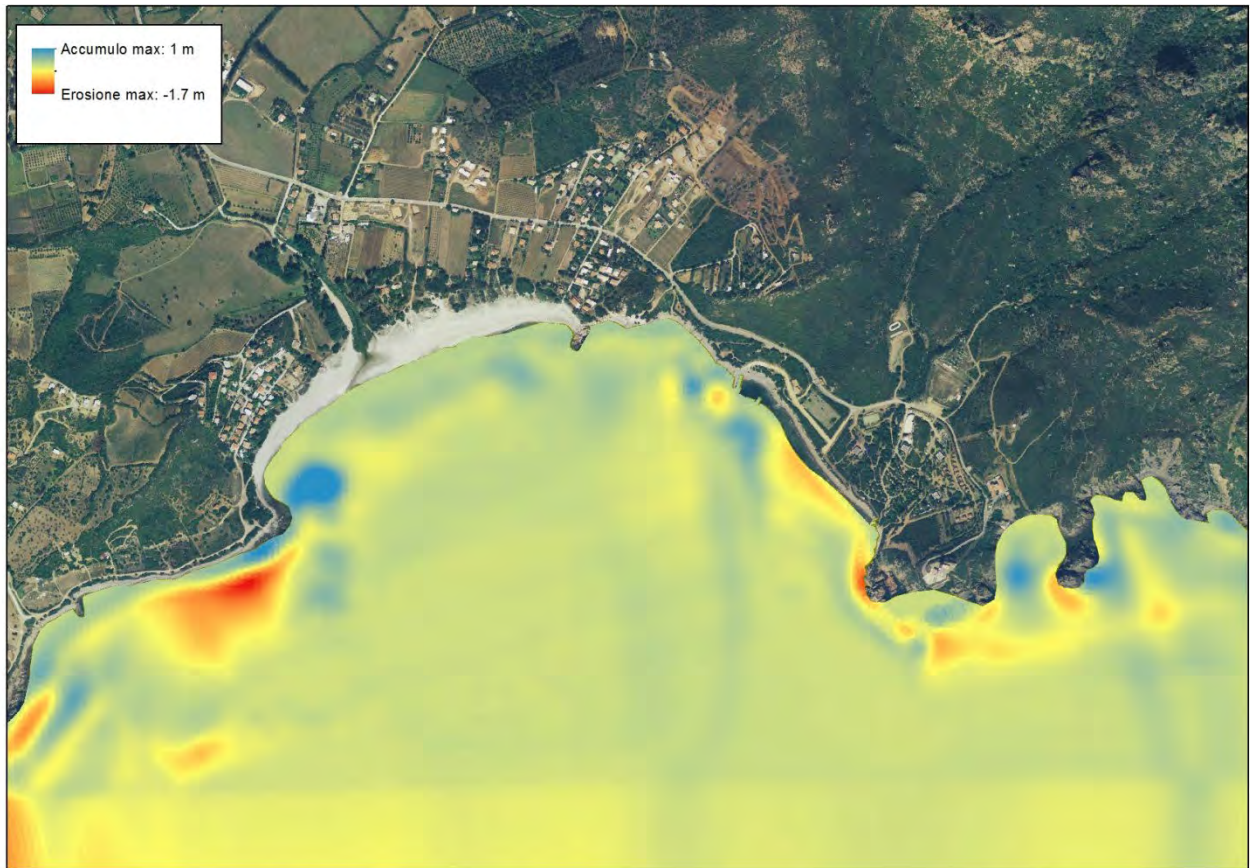


Figura 36: simulazione idrodinamica generata da un evento di scirocco. Situazione attuale espressa in termini di isolinee di sedimento. Valori negativi: erosioni, valori positivi: accumuli

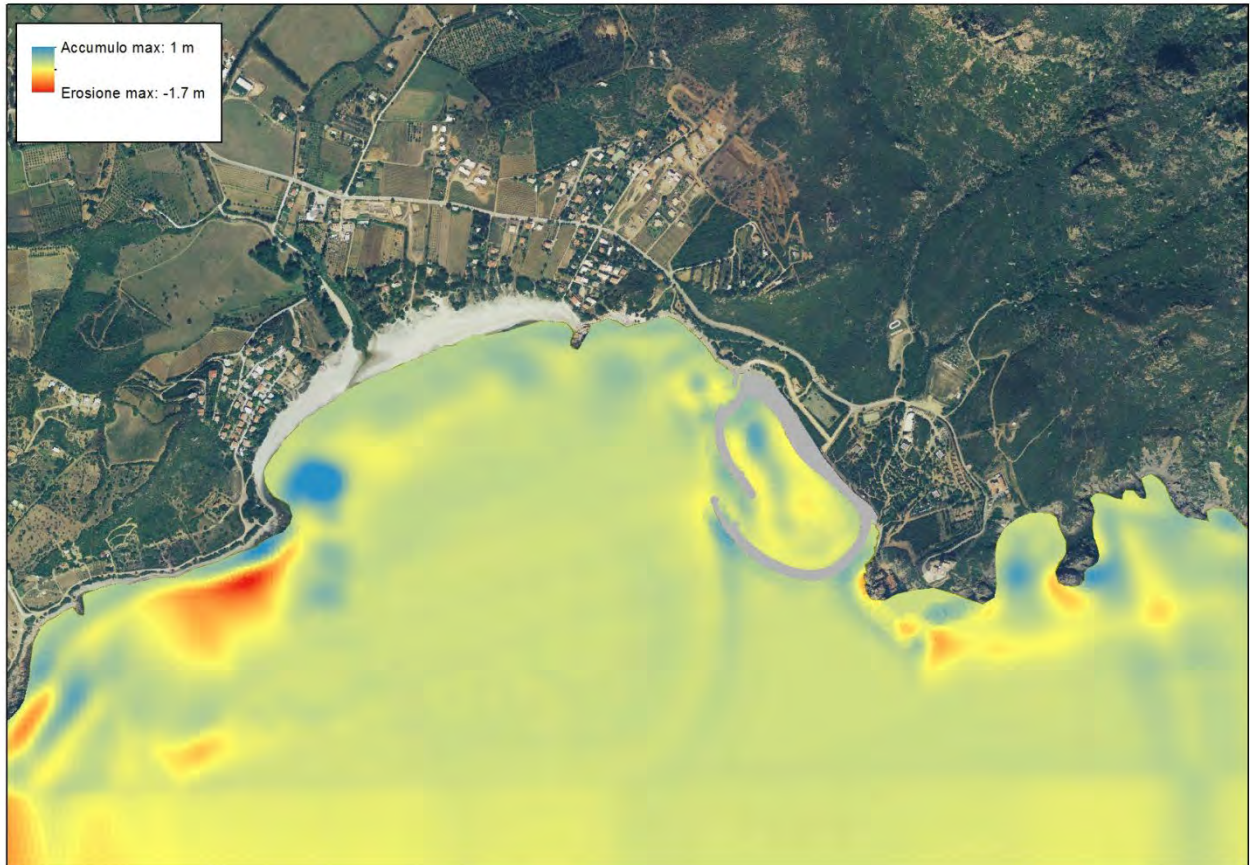


Figura 37: simulazione idrodinamica generata da un evento di scirocco. Situazione di progetto espressa in termini di isolinee di sedimento. Valori negativi: erosioni, valori positivi: accumuli



## 9 ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DELLA SPIAGGIA

### 9.1 Analisi morfologica

Al fine interpretare i fenomeni in atto nel litorale prossimo all'area di intervento, è stata eseguita un'analisi diacronica delle linee di riva ricavate dalle ortofoto disponibili. Particolare attenzione è stata posta all'evoluzione della linea di riva della spiaggia di Foxi Manna.

Sono state considerate nella presente analisi le linee di riva dal 1954 al 2013 che hanno permesso un confronto dell'evoluzione negli ultimi 59 anni. In particolare sono state considerate le linee degli anni 2013, 2008, 2006, 2004, 2000, 1995, 1977, 1968 e 1954



**Figura 38: Evoluzione della linea di riva dal 1954 al 2013. Linee di riva ottenute dalle ortofoto a disposizione**

L'analisi effettuata mostra come dagli anni '50 ad oggi non mostra nessun significativo arretramento. Le differenze delle linee di riva dal 1954 ad oggi sono infatti riconducibili alla normale movimentazione di sedimenti che interessa una spiaggia in condizioni di equilibrio.

La presenza del rio Sa Brecca non pare influenzare significativamente il bilancio sedimentario del litorale. L'assenza di significativi fenomeni in alveo fa supporre che il fiume sia caratterizzato da un trasporto solido trascurabile. Inoltre, considerando che l'ultimo tronco del torrente è a pendenza assai lieve e normalmente occluso dalla barra di sabbia, è possibile ipotizzare che la deposizione di materiale avvenga prima dello sbocco a mare.



## 9.2 Evoluzione del profilo longitudinale della spiaggia a seguito della realizzazione delle opere

### 9.2.1 Il Modello UNIBEST

Per valutare l'evoluzione della linea riva si è fatto uso del modello UNIBEST della Deltares.

UNIBEST, acronimo di **UNI**form **B**each **S**ediment **T**ransport ossia trasporto di sedimento uniforme lungo spiaggia, è un software sviluppato dalla DELTARES per poter simulare i processi di trasporto e le morfodinamiche connesse.

UNIBEST è una suite composta da due sub-moduli integrati:

- UNIBEST-CL: per la modellazione delle dinamiche costiere
- UNIBEST-LT: per la determinazione del trasporto longitudinale.

Il modulo LT è dedicato al calcolo delle correnti longitudinali ed al trasporto della propagazione d'onda che trasforma gli inputs d'onda provenienti da largo tenendo conto dei principali processi di rifrazione lineare e di dissipazione non lineare dovuti alla frangenza ed alla dissipazione per attrito col fondale marino (Battjes and Stive, 1984). Il trasporto longitudinale e la distribuzione trasversale sono calcolati nel modulo LT in accordo con le formule:

- CERC (1984)
- Engelund,Hansen (1979)
- Bijker (1967,1971)
- Van Rijn (1992)
- Bailard (1981)
- Van de Meer-Pilarczyk (1992)

La procedura computazionale può tenere presente qualsiasi regime ondoso o di marea in modo da poter permettere la stima del trasporto totale longitudinale.

Il modulo CL è studiato per simulare i cambiamenti lungo costa creati dai gradienti di trasporto longitudinale lungo costa sulle basi della teoria ad una linea che fu per prima presentata da Pelnard Considère (1956). In questa teoria la costa è schematizzata da una linea singola ed il movimento di questa linea è descritto da una funzione legata al tempo ed alla posizione lungo riva. L'area attiva del profilo del fondo è assunto muoversi parallelo a se stesso senza cambiare aspetto sia in erosione che in accrescimento.

Possono essere introdotte varie condizioni al contorno in modo da poter rappresentare differenti scenari costieri. Lungo la costa possono essere definiti vari punti di prelievo o asporto di sedimento in maniera tale da poter simulare apporti fluviali, fenomeni di subsidenza prelievi di sabbia dovuti a cave marine, o perdite di sabbia per trasporto trasversale.

I dati di impostazione del modello CL sono quelli che provengono dal modulo LT. I due moduli sono interconnessi grazie ad un *link* di comunicazione dedicato che comunica attraverso un file di interscambio. I calcoli effettuati da UNIBEST –LT sono eseguiti per una serie di angoli di costa, ovvero si creano una serie di funzioni di trasporto legate a varie condizioni riscontrabili lungo la costa disomogenee tra loro per differente angolo di orientazione della costa, batimetria area o profilo attivo di spiaggia. Sono modellati anche i

cambiamenti dovuti a trasporto di tipo trasversale grazie all'utilizzo di zone di prelievo puntuali che siano in grado di simulare la perdita di sedimento.

La teoria di Pelnard-Considère fornisce le equazioni base per la descrizione di processo morfologici della evoluzione della linea di costa dovuto a gradienti nel trasporto solido longitudinale. Queste equazioni conducono alla ben nota equazione di diffusione per la cui risoluzione sono necessarie le condizioni iniziali ed al contorno.

Per la teoria ad una linea il profilo di costa è schematizzato secondo la Figura 39. L'asse x è scelto lungo la iniziale linea di riva. La normale alla linea di riva costituisce l'asse Y, che è scelto in una direzione ortogonale alla linea di riva originale.

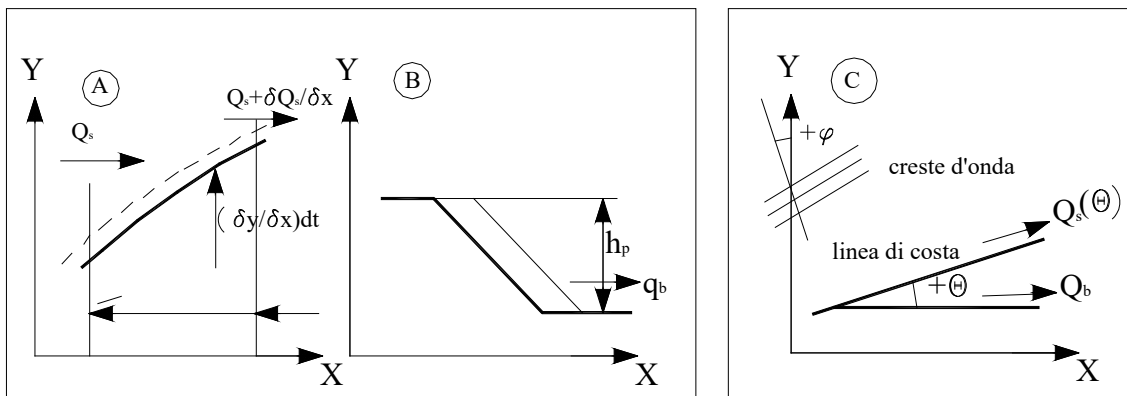


Figura 39: figure della schematizzazione utili alla comprensione della teoria ad una linea.

Il profilo batimetrico caratterizzante la spiaggia si suppone muoversi orizzontalmente lungo tutto il profilo attivo sia in caso di erosione che di avanzamento, pertanto la pendenza di spiaggia non subisce mutazioni. Il limite superiore del profilo di spiaggia è individuato alla cima del profilo attivo.

Per simulare i cambiamenti costieri si utilizzano l'equazione di continuità e di moto unitamente alle condizioni iniziali e di contorno.

$$h_p \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} + q_b = 0$$

Dove

$Q_s$  è il trasporto totale,

$y$ , la posizione della linea di costa

$h_p$  il profilo di costa attiva,

$q_b$  eventuali prelievi o perdite di sedimento

L'equazione della continuità:

$$\left( Q_s + \frac{\partial Q_s}{\partial x} dx \right) dt - Q_s dt = - \frac{\partial y}{\partial x} h_p dx \cdot dt + q_b \cdot h_p dx \cdot dt$$

L'equazione di moto nella forma (equazione di Pelnard-Considerere):

$$Q_s(\theta) = Q_{s0} - S_1 \cdot \frac{\partial y}{\partial x}$$

La cui combinazione porta all'equazione di diffusione:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{s_1}{h_p} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

La cui soluzione analitica può essere risolta.

In UNIBEST la variazione di capacità di trasporto dovuto alla diversa orientazione costiera è approssimata dal calcolo del trasporto  $Q_s$  sulle basi del regime ondoso per un determinato numero di angoli della costa.

Questo fa sì che l'angolo  $s_1$  non abbia un singolo valore ma sia riprodotto da una funzione che dipende dall'effettiva orientazione della linea di costa. Questa funzione approssimativamente di tipo esponenziale della forma:

$$Q_s = c_1 \theta_r e^{(c_2 \theta_r)^2}$$

Dove

$$\theta_r = \theta - \theta_e$$

È l'angolo di costa relativo e  $\theta_e$  è l'angolo di equilibrio.

I coefficienti  $c_1$  e  $c_2$  sono determinati da un algoritmo iterativo del programma in base al metodo dei minimi quadrati.

Le funzioni di trasporto sono calcolate attraverso il modulo LT per zone omogenee di spiaggia (profilo trasversale del fondo, orientamento della linea di costa, profondità di chiusura ecc). sulla base della batimetria, condizioni di moto ondoso, caratteristiche del sedimento ed orientazione della linea di costa su cui esse insistono.

Nel corso del presente studio, sono state calcolate 7 funzioni di trasporto, sulla base delle condizioni locali di batimetria e orientamento della linea di riva, per ognuna delle quali è stato necessario definire:

- Regime ondoso
- Profilo trasversale del fondo
- Parametri d'onda
- Parametri di trasporto

Il regime ondoso è calcolato non in base ad un parametro sintetico ma sulla base degli eventi effettivamente registrati dalla boa di Capo Comino, che sono poi mediati dal programma in base alla percentuale annua di occorrenza, in modo da poter dedurre le funzioni di trasporto medio.

Si sono considerate tutte le onde registrate con  $H_s > 0.5m$ , ovvero tutti gli eventi di moto ondoso del paraggio (per un totale di 80 diverse condizioni ondometriche) in grado di fornire un significativo apporto al trasporto



litoraneo. Le condizioni di moto ondoso immesse nel modello per il calcolo sono quelle estratte nei punti più prossimi alla profondità di chiusura.

Il calcolo necessario alla determinazione delle condizioni d'onda locali è stato effettuato attraverso il modello SWAN come spiegato nel paragrafo 6.3.3.

Il profilo trasversale è stato desunto dai dati del rilievo batimetrico effettuato in occasione del progetto in essere.

La formula di trasporto utilizzata per il calcolo è la formula di Bijker.

Una volta ottenute le curve di trasporto il programma immagazzina le informazioni utili alla determinazione del trasporto nei così detti RAY-files. Questi ultimi sono definiti in diversi punti della costa omogenei per condizioni senza dover definire gli stessi in ciascun punto della griglia di calcolo grazie ad una automatica interpolazione compiuta dal programma.

L'asse x della griglia di calcolo è costituita da una linea curva e l'asse Y dalle normali perpendicolari ad essa. Questo sistema "curvo" viene immesso in coordinate reali, ovvero nel sistema di coordinate locali in cui si sta lavorando. Gli angoli di attacco d'onda sono definiti secondo la convenzione "°N".

### 9.2.2 Formula di trasporto

Il trasporto di sedimento lungo può essere calcolato usando una delle formule per il trasporto di sedimento disponibili tra cui: CERC, Engelund-Hansen, Bijker, v. Rijn e Bailard per le sabbie e la formula di Van der Merr-Pilarczyk per i ciottoli.

Nel nostro caso si è fatto uso della formula Bijker che è quella che maggiormente testata in situazioni analoghe<sup>13</sup>.

$$S = S_b + S_s \quad (\text{m}^3/\text{m}/\text{s})$$

Dove:

$S_b$ = trasporto di sedimento sul fondale

$S_s$ = trasporto del sedimento in sospensione

La formulazione di  $S_b$  è:

$$S_b = bD_{50} \frac{v}{C} \sqrt{g} e^{\left[ \frac{-27 \Delta D_{90} C^2}{\mu v^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{u_b}{v} \right)^2 \right\}} \right]}$$

In cui la velocità media di corrente è rappresentata da  $v$  e l'effetto delle onde da  $u_b$ .

<sup>13</sup> WL|Delft Hydraulics (1992). UNIBEST, A software suite for simulation of sediment transport processes and related morphodynamics of beach profiles and coastline evolution. Model description and validation. delft hydraulics Report H454.14, 1992

Le caratteristiche del sedimento di cui la formulazione tiene conto sono:

$D_{50}$ = diametro mediano della curva cumulata granulometrica (m)

$D_{90}$ = diametro 90% della curva cumulata granulometrica (m)

$\Delta$ = densità relativa

$r_c$ = rugosità del fondale (m)

$r_s$ = densità del sedimento

$w$ = velocità di sedimentazione del sedimento (m/s)

$u_b$ = velocità orbitale vicino il fondale (m/s)

$w$ = frequenza d'onda (rad/s)

da questi parametri sono derivati i seguenti parametri:

$C$  = coefficiente di Chezy =  $18 \log (12 d/r_c)$

$C_{90}$ =  $18 \log (12 d/D_{90})$

$\mu = (C/C_{90})^{3/2}$

$$f_w = e^{\left[ -5.977 + 5.223 \left( \frac{u_b}{\omega r_c} \right)^{-0.194} \right]}$$

$$\xi = C \cdot \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (11)$$

Il coefficiente  $b$  varia tra 1 e 5.

La formulazione di  $S_s$  ( $m^3/m/s$ ) è:

$$S_s = 1.83 S_b \left\{ I_1 \ln \left( \frac{33d}{r_c} \right) + I_2 \right\}$$

Con

$$I_1 = R \int_{\frac{r_c}{d}}^1 \left[ \frac{(1-y)}{y} \right]^{z^*} dy$$

$$I_2 = R \int_{\frac{r_c}{d}}^1 \ln y \left[ \frac{(1-y)}{y} \right]^{z^*} dy$$

$$R = \frac{.216 \left( \frac{r_c}{d} \right)^{z^*-1}}{\left( 1 - \frac{r_c}{d} \right)^{z^*}}$$

$$z_* = \frac{w}{k v_*} (k = 0.4)$$

$$v_* = \sqrt{g} \frac{v}{c} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \xi \frac{u_b}{v} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

Le caratteristiche sedimentologiche richieste dal modello sono state ottenute dall'analisi dei campioni effettuata appositamente nell'ambito del presente progetto (si veda la Relazione Geologia e Geotecnica per ulteriori dettagli).

### 9.2.3 *Analisi preliminare dell'evoluzione delle linee di riva e calibrazione del modello UNIBEST*

Come accennato nel paragrafo precedente il modello numerico UNIBEST necessita di una fase di calibrazione consistente nella riproduzione dell'evoluzione della linea di riva tra due o più momenti in cui siano note le rive. Nel caso in esame, nonostante siano presenti svariate linee di riva dal 1954 ad oggi, si è deciso di usare per la calibrazione le linee di riva del 2004 e del 2006, periodo al quale risalgono anche le rilevazioni della boa di Capo Comino. Tale scelta permette quindi di avere, in fase di calibrazione, la maggiore attinenza alla situazione reale.

Attraverso l'impostazione delle condizioni al contorno e la determinazione delle curve di trasporto del sedimento che generano poi le modificazioni della linea di riva si ha, secondo la tecnica *back-analysis*, una verifica reale dell'attendibilità dei risultati raggiunti.

Una volta così determinate le condizioni al contorno, si possono prevedere nuovi scenari che potrebbero scaturire a seguito da apporti di sedimento, di inserimento di pennelli, di rivestimenti, e/o di barriere.





Figura 40: Linee di riva utilizzate per la calibrazione del modello UNIBEST.

#### 9.2.4 Evoluzione della linea di riva a seguito della realizzazione delle opere

Una volta calibrato il modello, è stata eseguita la simulazione sull'evoluzione della linea di riva della spiaggia di Foxi Manna. L'arco temporale preso in considerazione è stato due anni successivi alla realizzazione dell'opera.

I risultati, riportati sinteticamente nella Figura 41 mostra come la linea di riva nel caso della realizzazione della struttura portuale non si discosti da quella in assenza del porto. Questo indica una sostanziale invarianza delle dinamiche litoranee, a conferma dei risultati dello studio morfodinamico dei paragrafi precedenti.



**Figura 41: Risultati del modello UNIBEST. Evoluzione della linea di riva in presenza ed in assenza della struttura portuale**