



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



MINISTERO
DELL'INTERNO



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) – Piani Urbani Integrati - M5C2 – Intervento 2.2b



COMUNE DI PALERMO

AREA DEL PATRIMONIO, DELLE POLITICHE AMBIENTALI
E TRANSIZIONE ECOLOGICA
SETTORE POLITICHE AMBIENTALI E TRANSIZIONE ECOLOGICA
SERVIZIO PROGETTAZIONE MARE, COSTE, PARCHI E RISERVE



Riqualificazione del Porto Bandita e delle aree portuali

CUP D79J22000650006

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

STUDI IDRAULICO MARITTIMI E DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE FORANEE

AII.A - Studio Idraulico Marittimo - Considerazioni: sulla dinamica litoranea locale -
sull'agibilità dell'imboccatura portuale - sulla qualità delle acque interne

Palermo: 03.08.2023

Il RUP:

Arch. Giovanni Sarta

Redatto da:



SIGMA INGEGNERIA s.r.l.
Via della Libertà, 201/A
90143 PALERMO
Tel. +39 091/6254742 - Fax 091/307909
e-mail: sigmaingsrl@gmail.com
Pec: sigmaingegneriasrl@pec.it

Sommario

Indice delle Figure	2
1 Introduzione.....	6
2 Stima degli eventi estremi a largo	11
3 Analisi di propagazione verso riva del moto ondoso	18
3.1 Generalità	18
3.2 Il codice SWAN.....	18
4 Stima dell'altezza massima presente al piede dell'opera in progetto (limitata dal fondale) e stima delle forzanti del moto ondoso.....	33
5 Penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio acqueo portuale nella configurazione di progetto e nella configurazione esistente – dragato di confronto....	37
6 Considerazioni sul regime della dinamica costiera	57
• Rilievo Multibeam.....	64
• Rilievo Side Scan Sonar	66
• Rilievo Sub Bottom Profiler	68
• Rilievo Sedimentologico.....	70
6.1 Rilievo Sedimentologico.....	77
7 Considerazioni sulla qualità delle acque interne portuali con l'individuazione degli eventuali provvedimenti mitigatori.....	86
8 Considerazioni sull'agibilità dell'imboccatura portuale e degli specchi acquei interni ai fini della navigazione	87

Indice delle Figure

Figura 1 - Posizione del Porto della Bandita, all'interno del Golfo di Palermo nella Costa Tirrenica della Sicilia Occidentale	6
Figura 2 – Dettaglio della posizione del Porto Bandita all'interno del Golfo di Palermo	7
Figura 3 - Ortofoto di dettaglio dell'area del porticciolo della Bandita - da rilievo con Drone eseguito dalla Sigma Ingegneria s.r.l.	7
Figura 4 – Foto area stato di fatto dell'area	8
Figura 5 - Sezione tipo prolungamento opera foranea sopraflutto.....	8
Figura 6 - Sezione tipo opera di sponda "parco a mare" della bandita	9
Figura 7 - Stralcio planimetrico opere in progetto.....	9
Figura 8 - Esempio della griglia del modello "Mediterranean Sea Wave Hindcast" forniti dal sistema Copernicus, con risoluzione spaziale della griglia di circa 4.5 km; altezze in metri	12
Figura 9 - Punto di estrazione dei dati ondometrici modello CMEMS - Copernicus	12
Figura 10 - Elaborazione dati CMEMS - massimi annuali per ogni classe di direzione	13
Figura 11 - Risultati elaborazione statistica secondo la distribuzione di Gumbel, la distribuzione Lognormale e la distribuzione Normale	14
Figura 12 - Adattamento delle distribuzioni ai dati.....	15
Figura 13 Adattamento delle distribuzioni ai dati in scala logaritmica.....	16
Figura 14 - Risultati delle elaborazioni statistiche per i due periodi di ritorno considerati ai fini progettuali nel punto di estrazione del moto ondoso a largo	17
Figura 15 - Modello di calcolo e batimetrie (fondali inseriti come positivi) del modello numerico implementato.....	20
Figura 16 - Particolare mesh con indicazione del punto di estrazione dal modello	21
Figura 17 - Risultati analisi di propagazione del moto ondoso.....	21
Figura 18 – Propagazione moto ondoso - Tr = 10 anni - direzione di provenienza 0° N	23
Figura 19 Propagazione moto ondoso - Tr = 10 anni - direzione di provenienza 22.5° N	24
Figura 20 - Propagazione moto ondoso - Tr =10 anni - direzione di provenienza 45° N	25
Figura 21 - Propagazione moto ondoso - Tr = 10 anni - direzione di provenienza 315° N	26

Figura 22 - Propagazione moto ondoso - Tr =10 anni - direzione di provenienza 337.5° N	27
Figura 23 - Propagazione moto ondoso - Tr = 100 anni - direzione di provenienza 0° N	28
Figura 24 - Propagazione moto ondoso - Tr = 100 anni - direzione di provenienza 22.5° N	29
Figura 25 - Propagazione moto ondoso - Tr = 100 anni - direzione di provenienza 45° N	30
Figura 26 - Propagazione moto ondoso - Tr = 100 anni - direzione di provenienza 315° N	31
<i>Figura 27 - Propagazione moto ondoso - Tr = 100 anni - direzione di provenienza 337.5° N</i>	<i>32</i>
Figura 28 - Stima dell'altezza d'onda in frangimento in funzione del fondale - breaker index per onde con una wave - stepness a largo pari a 0.03 - The Rock Manual, 2012	35
Figura 29 - Schema 1° configurazione modellata – stato “di progetto”	38
Figura 30 - Schema 2° configurazione modellata – Stato “di fatto” del porto, con esecuzione solamente di un dragaggio manutentivo all’interno dello specchio acqueo esistente.....	38
<i>Figura 31 - Schema dominio CGWAVE.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 32 - Tabella riassuntiva stato di agitazione portuale nella configurazione attuale del Porticciolo della bandita, considerando l’esecuzione di un solo dragaggio manutentivo dei fondali a -3.00 m s.l.m. per permettere l’accessibilità al porto ma senza interventi sulle opere foranee</i>	<i>45</i>
<i>Figura 33 - Tabella riassuntiva stato di agitazione portuale nella configurazione prevista dal Progetto, con il prolungamento delle opere foranee per la messa in sicurezza</i>	<i>45</i>
Figura 34 – Tabella riassuntiva della riduzione dell’agitazione interna o all’imboccatura del porto, tra il caso progetto rispetto al caso di esempio di mantenimento delle opere foranee esistenti.....	45
Figura 35 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 0° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	47
Figura 36 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 22.5° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	48

Figura 37 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 45° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	49
Figura 38- Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 315° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	50
Figura 39 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 337.5° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	51
Figura 40 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 0° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	52
Figura 41 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 22.50° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	53
Figura 42 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 45° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	54
Figura 43 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 315° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	55
Figura 44 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 337.50° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	56
Figura 45 - Estratto Carta Nautica del Golfo di Palermo	57
Figura 46 - Foto aerea Golfo di Palermo estratta da Google Earth	57
Figura 47 - Localizzazione del Porto della Bandita nella costa sud del comune di Palermo	58
Figura 48 – Evoluzione morfodinamica della linea di riva.....	58
Figura 49 - Foto aerea Porto della Bandita	59
Figura 50 - Estratto Cartografico PAI - Tipologia costiera	61
Figura 51 - Estratto Cartografico PAI - Evoluzione Linea di Costa	61
Figura 52 - Estratto Cartografico PAI - Pericolosità e/rischio tratto di litorale	61
Figura 53 - Fotografie dello stato attuale del Porto della Bandita	62
Figura 54 - Tracce delle rotte navigate con il Multibeam.....	65
Figura 55 - Immagini delle del rilievo Multibeam. A sx PDS a dx Norbit GUI.	65

Figura 56 - Modulo di editing Teledyne PDS. Ambiente principale dove viene processata la nuvola di punti e le varie operazioni descritte nel diagramma precedente (nell'immagine zona della Bandita).	66
Figura 57 - Modello digitale del fondale risultato della elaborazione	66
Figura 58 - Tracce delle rotte navigate con il Side Scan Sonar	67
Figura 59 - Immagine del rilievo SSS.....	67
Figura 60 - Mosaico acustico Side Scan Sonar	68
Figura 61 - Interpretazione delle litofacies acustiche del Side Scan Sonar	68
Figura 62 - Rotte d'indagine SBP e MAG (Bandita)	69
Figura 63 - Profilo trasversale nel settore della Bandita	69
Figura 64 - Profilo trasversale nel settore della Bandita	69
<i>Figura 65 - DEM Terra Mare</i>	72
Figura 66 - SSS a disposizione della Stazione Appaltante.....	73
Figura 67 particolari rilievo SSS	73
Figura 68 - particolari rilievo SSS a levante della struttura portuale	74
Figura 69 - particolari rilievo SSS - macro litter individuati	74
Figura 70 - Individuazione dei macro litter sul fondale.....	75
Figura 71 - Punti di rilevamento video subacquei a mezzo di R.O.V.	76
Figura 72 - estratto rilievo R.O.V. Punto 8.....	76
Figura 73 - estratto rilievo R.O.V. Punto 11.	77
Figura 74 - Carta della Tessitura dei fondali	78
Figura 75 - Fotografie dello stato attuale durante evento meteomarinico di non notevole entità.....	80
Figura 76 - Planimetria generale delle opere in progetto	81
Figura 77 - Canale di escavo dell'imboccatura portuale realizzato all'inizio degli anni '80	83
Figura 78 - Sezione tipo diga foranea	83
Figura 79 - Planimetria costruttiva opere in progetto	84
Figura 80 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 22.5° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra).....	85
Figura 81 - Sezione tipo prolungamento diga foranea.....	86
Figura 82 - Cerchi di manovra all'interno del bacino portuale per imbarcazioni di progetto Lmax=10,00m.....	87

1 Introduzione

Il presente studio idraulico marittimo è stato realizzato dalla Sigma Ingegneria s.r.l., nel rispetto del disciplinare di incarico ottenuto, nell'ambito del Progetto "Riqualficazione del Porto Bandita e delle aree portuali", sviluppato dal Comune di Palermo – Area della Pianificazione Urbanistica.

Nello specifico, il progetto fa parte di una serie di altri interventi in corso di sviluppo da parte del Comune di Palermo per riqualficare la piuttosto estesa "Costa Sud" del Comune, come già avvenuto nell'ambito del territorio di competenza dell'A.d.S.P. del mare di Sicilia Occidentale ovvero sino ad il porticciolo di Sant'Erasmus, un tempo uno dei principali punti balneari e di svago del Comune di Palermo che adesso versa in una condizione molto degradata, per cui il Comune sta sviluppando la progettazione di diversi interventi, tra cui quello in esame relativo al "Riqualficazione del Porto Bandita e delle aree Portuali", che risulta essere il principale.

Di seguito si riportano alcuni dettagli sulla posizione dell'area di intervento.



Figura 1 - Posizione del Porto della Bandita, all'interno del Golfo di Palermo nella Costa Tirrenica della Sicilia Occidentale



Figura 2 – Dettaglio della posizione del Porto Bandita all'interno del Golfo di Palermo

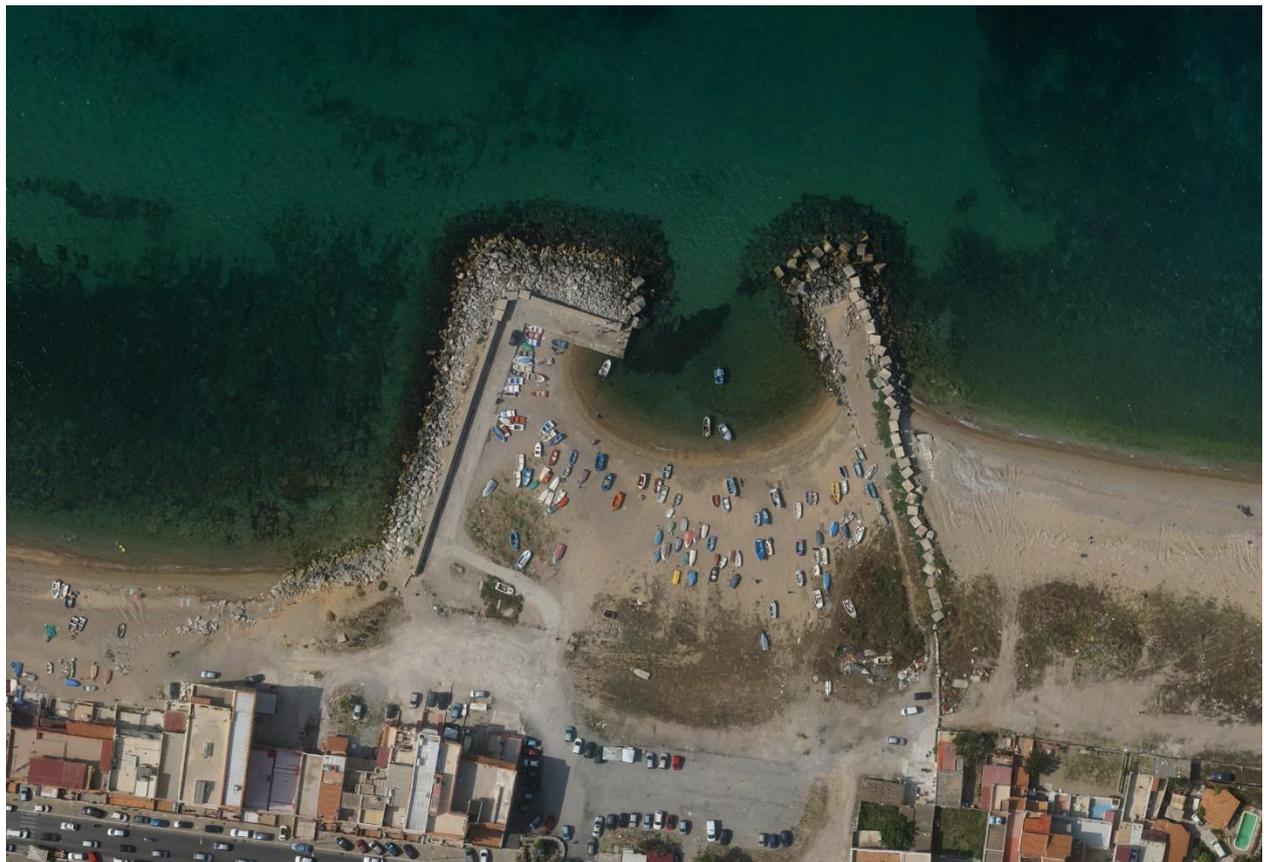


Figura 3 - Ortofoto di dettaglio dell'area del porticciolo della Bandita - da rilievo con Drone eseguito dalla Sigma Ingegneria s.r.l.

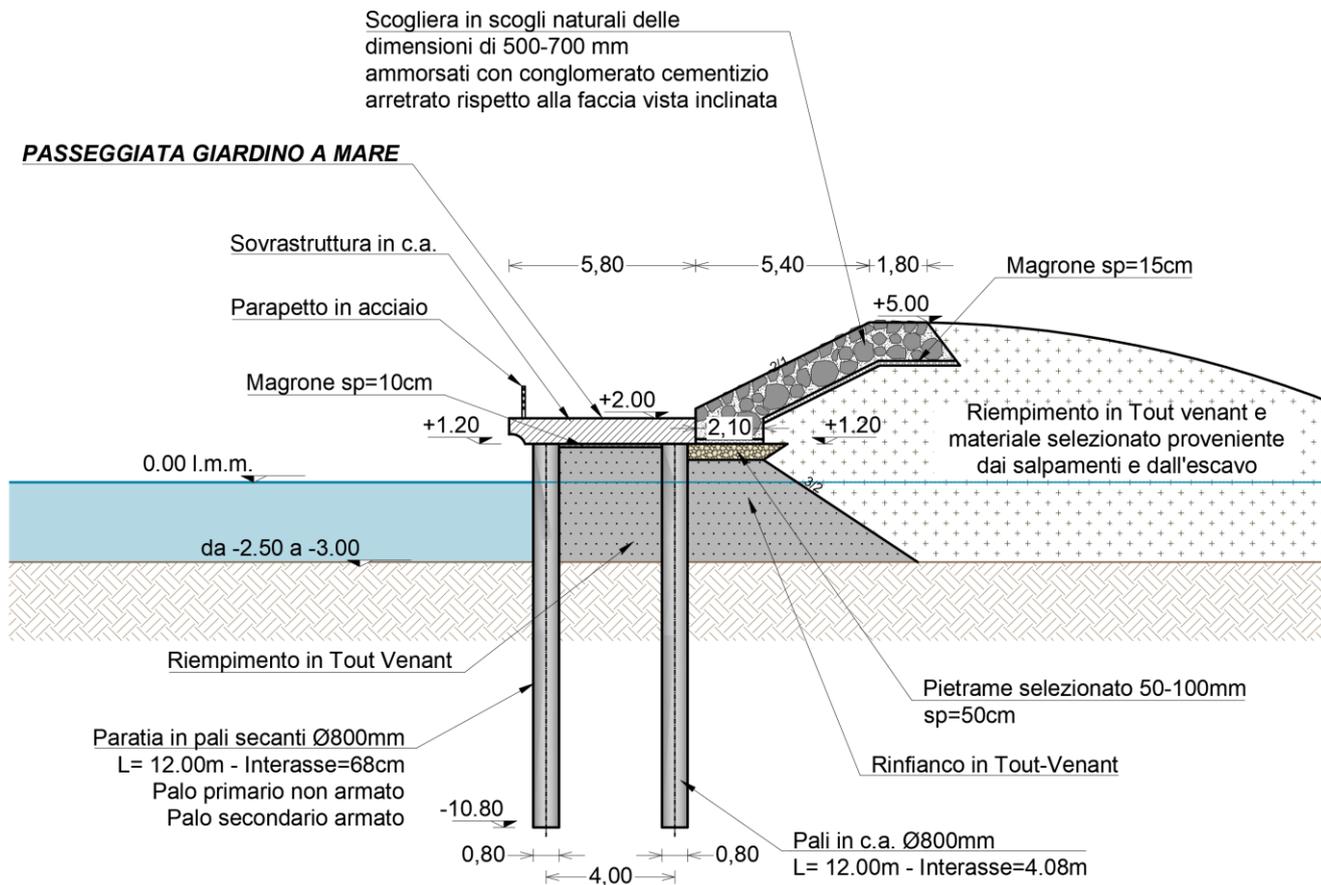


Figura 6 - Sezione tipo opera di sponda "parco a mare" della bandita

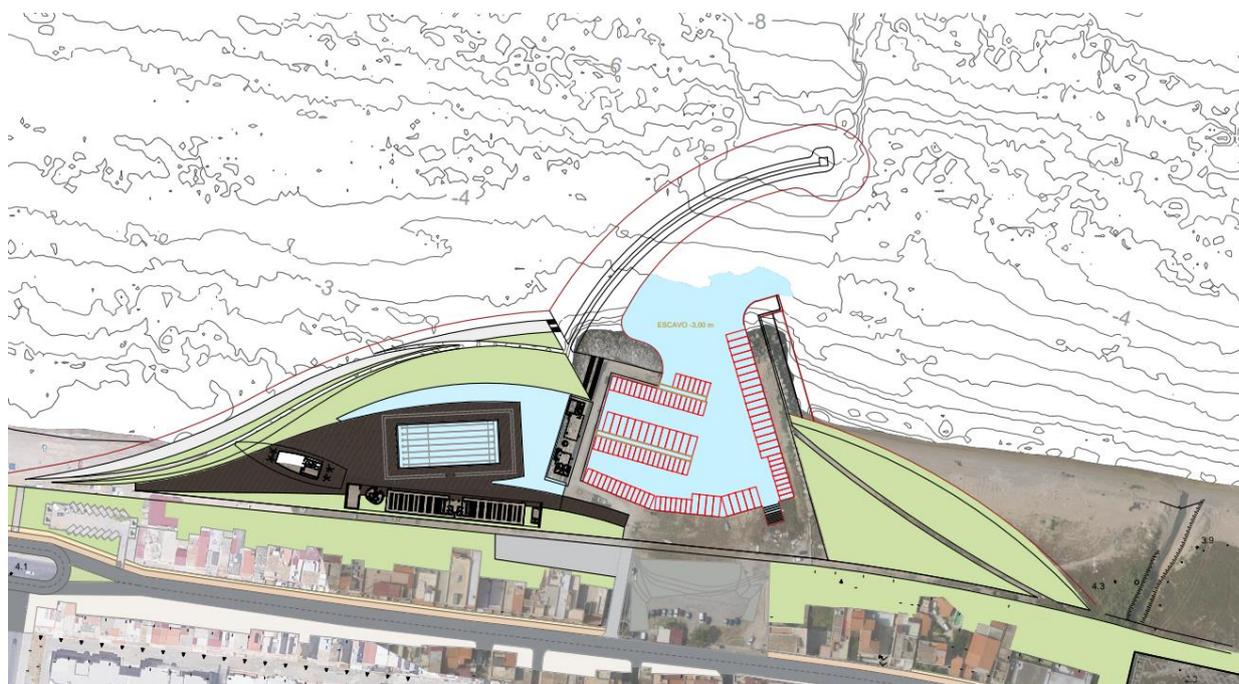


Figura 7 - Stralcio planimetrico opere in progetto

Il presente studio idraulico marittimo, a partire dalla stima degli eventi estremi a largo, contiene i risultati delle simulazioni di propagazione del moto ondoso sotto costa al piede dell'area interessata dalle opere in progetto, al fine di eseguire le verifiche di stabilità delle nuove opere foranee, ed, infine, le verifiche di penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio acqueo portuale.

Nello specifico, i dati di partenza per quanto riguarda di clima ondoso a largo sono stati i dati forniti dal sistema satellitare Copernicus – Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) dell'Unione Europea. A partire da questi dati di onda è stato possibile effettuare un'analisi statistica per definire, in termini di altezza d'onda, l'onda caratteristica di un certo periodo di ritorno T_r per ogni direzione di interesse.

Successivamente, si è andati a simulare numericamente la propagazione del moto ondoso dalla condizione “di largo” al piede dell'opere e della falesia in progetto tramite il software Delft3D Flexible Mesh, che implementa al suo interno il codice di calcolo ad elementi finiti SWAN, sviluppato da Deltares e dalla TU Delft, che rappresenta lo stato dell'arte per tale categoria di simulazioni, e le verifiche di penetrazione del moto ondoso con il Software CGWAVE. Successivamente, si è stimata l'altezza d'onda presente al piede dell'opera in oggetto, limitata dal frangimento grazie al basso fondale presente al piede dell'opera, e dell'azione della stessa d'impatto sulla struttura di sponda.

2 Stima degli eventi estremi a largo

La stima degli eventi estremi agenti su un paraggio deve necessariamente partire da una fonte di dati storici meteomarini collezionati su un punto quanto più prossimo al reale luogo di interesse. Nello specifico, il database deve essere ritenuto affidabile nel senso di precisione dei dati in esso contenuti e deve possedere una serie storica di dati abbastanza lunga da permettere una stima degli eventi estremi significativa da un punto di vista statistico.

Ad oggi il database che meglio risponde alle sopracitate condizioni è quello fornito dal sistema Copernicus - CMEMS (Copernicus Maritime Copernicus - Marine Environment Monitoring Service), finanziato dall'Unione Europea. In particolare, sul sistema Copernicus – CMEMS (<http://marine.copernicus.eu/>) sono disponibili diversi modelli riguardanti aspetti meteo marini. In particolare, per il caso in esame, è andato ad utilizzare il seguente database:

- Il database [MEDSEA HINDCAST WAV 006 012](#) (*Mediterranean Sea Waves Hindcast*), da cui è possibile estrarre i dati ondometrici orari (altezza d'onda significativa, periodo di picco, direzione di provenienza etc.) da Gennaio 1993 a Gennaio 2021 (n. 28 anni) su tutto il bacino del mediterraneo, discretizzato su una griglia con maglia spaziale di $1/24^\circ$ di grado (interesse ≈ 4.5 Km)

Da questi database, di cui si riporta in Figura 8 un esempio nel bacino di mediterraneo, è dunque possibile estrarre le serie storiche di dati ondometrici per i punti di interesse per tutto il time-frame indicato.

Nello specifico, per il caso in esame, sono stati acquisiti i dati storici relativi al punto aventi approssimativamente le seguenti coordinate:

- Punto CMEMS: Latitudine 38.15°N – Longitudine 13.42°E

I dati estratti, contenenti l'altezza d'onda significativa, il periodo e la direzione di provenienza orari per tutto il periodo sono stati elaborati successivamente tramite un software in house che permette di individuare i massimi annuali per ogni direzione di provenienza significativa.

Nel caso in esame sono state considerate la 315 , 337.5 , $360/0$, 22.5 , 45 e 67.50°N in base all'esposizione del paraggio, protetto ad east dal promontorio dell'Addaura ed a ovest dal promontorio di Capo Zafferano.

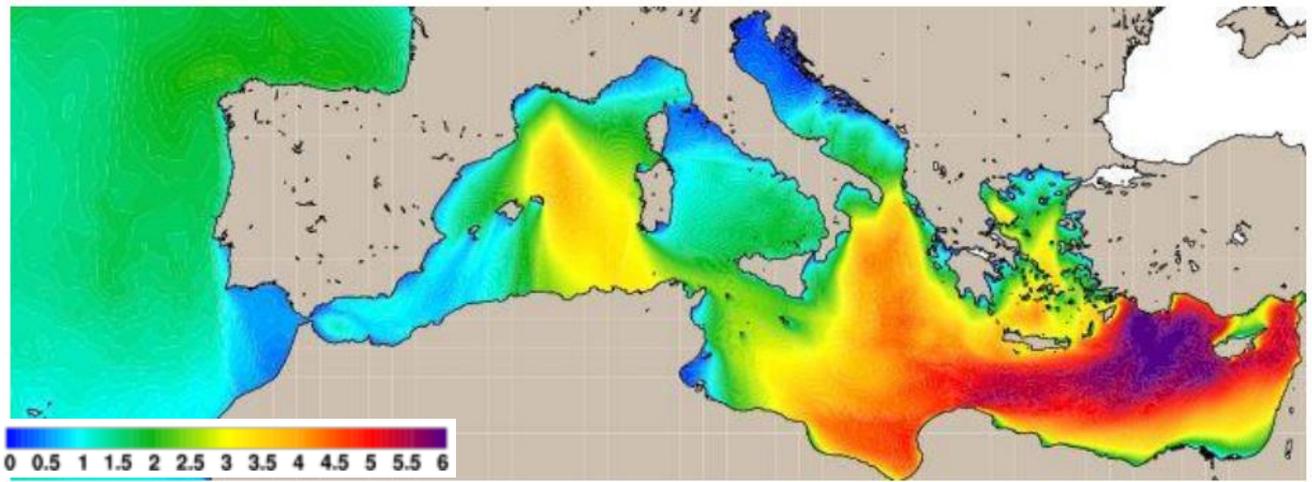


Figura 8 - Esempio della griglia del modello "Mediterranean Sea Wave Hindcast" forniti dal sistema Copernicus, con risoluzione spaziale della griglia di circa 4.5 km; altezze in metri



Figura 9 - Punto di estrazione dei dati ondametrici modello CMEMS - Copernicus

In particolare, a seguito di una riorganizzazione dei dati ondametrici estratti in classi di direzione di provenienza (come da consuetudine di ampiezza pari a 22.5 °) in Figura 10.

ANNO	Hs [m] massima annuale per classe di direzione [°N]					
	0	22.5	45	67.5	315	337.5
1993	3.40	1.64	2.75	1.16	2.32	3.63
1994	3.14	1.98	1.70	1.36	3.18	4.18
1995	3.33	2.90	2.43	0.90	2.40	3.65
1996	3.54	3.49	2.83	2.57	2.07	4.75
1997	3.18	3.07	1.76	0.80	2.38	3.64
1998	3.31	3.34	1.28	0.91	2.27	2.57
1999	2.90	1.61	1.61	1.13	2.86	3.56
2000	3.93	2.28	1.15	0.86	2.16	2.88
2001	3.27	4.18	1.05	0.85	1.93	3.41
2002	2.26	2.99	2.29	0.91	1.58	2.45
2003	3.29	4.00	2.73	1.09	2.50	3.23
2004	2.00	2.70	1.52	1.18	2.73	3.95
2005	2.85	2.36	3.40	0.64	2.19	2.26
2006	2.31	2.86	2.32	2.06	1.60	3.32
2007	3.08	2.04	1.64	1.27	2.26	3.24
2008	2.42	3.15	1.11	1.27	2.59	2.69
2009	3.05	1.58	2.30	1.64	2.04	3.25
2010	1.85	2.42	2.82	1.04	1.88	2.24
2011	3.44	3.64	1.89	0.96	2.10	2.55
2012	3.44	2.83	3.82	0.55	2.65	4.28
2013	1.97	1.93	1.33	0.97	2.31	2.29
2014	3.08	2.32	1.82	1.19	1.92	2.85
2015	3.96	3.67	3.03	2.31	2.12	3.02
2016	2.22	3.06	2.06	1.18	1.92	3.28
2017	3.28	2.34	1.67	1.34	2.66	4.05
2018	2.38	2.31	1.49	0.96	2.22	3.12
2019	3.53	3.92	3.12	1.16	2.49	4.32
2020	2.70	3.13	2.53	1.02	2.62	4.57

Figura 10 - Elaborazione dati CMEMS - massimi annuali per ogni classe di direzione

A partire dai massimi annuali è possibile andare a fittare delle distribuzioni di probabilità, per completare lo studio statistico sugli eventi estremi.

In particolare, nel caso in esame, sono state utilizzate la distribuzione di Gumbel, la distribuzione Normale e la distribuzione Lognormale i cui parametri sono stati stimati tramite il metodo dei momenti (calcolo media e deviazione standard dei dati del campione).

A partire dalle distribuzioni di probabilità, è possibile invertire le stesse per ottenere i quantili tipici dei diversi periodi di ritorno d'interesse (e dunque probabilità di superamento F). In particolare, come noto, è possibile connettere la probabilità di superamento F con il tempo di ritorno Tr tramite la seguente relazione: $F = 1 - \frac{1}{Tr}$

Nelle seguenti tabelle sono riportate dunque, per le tre diverse distribuzioni di probabilità utilizzate, le altezze d'onda significative H_s [m] per i vari tempi di ritorno e direzioni di provenienza di interesse a largo.

GUMBEL FIT - H_s [m] per ogni classe di direzione in funzione del tempo di ritorno Tr						
TR	0	22.5	45	67.5	315	337.5
5	3.39	3.31	2.66	1.52	2.55	3.84
10	3.73	3.74	3.09	1.79	2.76	4.26
30	4.25	4.40	3.74	2.20	3.09	4.90
50	4.49	4.69	4.04	2.38	3.24	5.19
100	4.80	5.10	4.45	2.64	3.44	5.58

LOGNORMAL FIT - H_s [m] per ogni classe di direzione in funzione del tempo di ritorno Tr						
TR	0	22.5	45	67.5	315	337.5
5	3.47	3.38	2.70	1.49	2.59	3.91
10	3.81	3.83	3.16	1.73	2.78	4.30
30	4.29	4.46	3.84	2.09	3.04	4.85
50	4.49	4.74	4.15	2.25	3.15	5.09
100	4.76	5.12	4.58	2.47	3.30	5.40

NORMAL FIT - H_s [m] per ogni classe di direzione in funzione del tempo di ritorno Tr						
TR	0	22.5	45	67.5	315	337.5
5	3.46	3.40	2.75	1.58	2.59	3.93
10	3.72	3.72	3.07	1.78	2.75	4.25
30	4.04	4.13	3.48	2.03	2.96	4.64
50	4.17	4.30	3.64	2.14	3.04	4.80
100	4.33	4.50	3.85	2.26	3.14	4.99

Figura 11 - Risultati elaborazione statistica secondo la distribuzione di Gumbel, la distribuzione Lognormale e la distribuzione Normale

Come è possibile osservare, in tutte le tabelle considerate, si osserva come previsto data l'esposizione del paraggio, che le direzioni di provenienza in cui sono presenti le areggiate più significative sono tra la 337.50°N e la 22.50°N (NNW e NNE). Per completezza, nel successivo modello di calcolo, sono state incluse anche le direzioni 315°N e 45°N (NW e NE) in cui sono presenti mareggiate, anche se di ampiezza inferiore, comunque significative. Mentre non sono presenti mareggiate significative provenienti dalla direzione 67.50°N che dunque sono state escluse dalle successive analisi numeriche, non essendo di interesse per il dimensionamento.

Per verificare l'adattamento della distribuzione ai dati meteomarini osservati si è andati a rappresentare in un grafico le altezze d'onda previste per i diversi periodi di ritorno dalle tre distribuzioni di probabilità utilizzate con il periodo di ritorno apparente dei dati

osservati:
$$Tr_{\text{apparente } H_s} = \frac{n \text{ anni osservazioni} + 1}{n \text{ anni} \geq H_s}$$

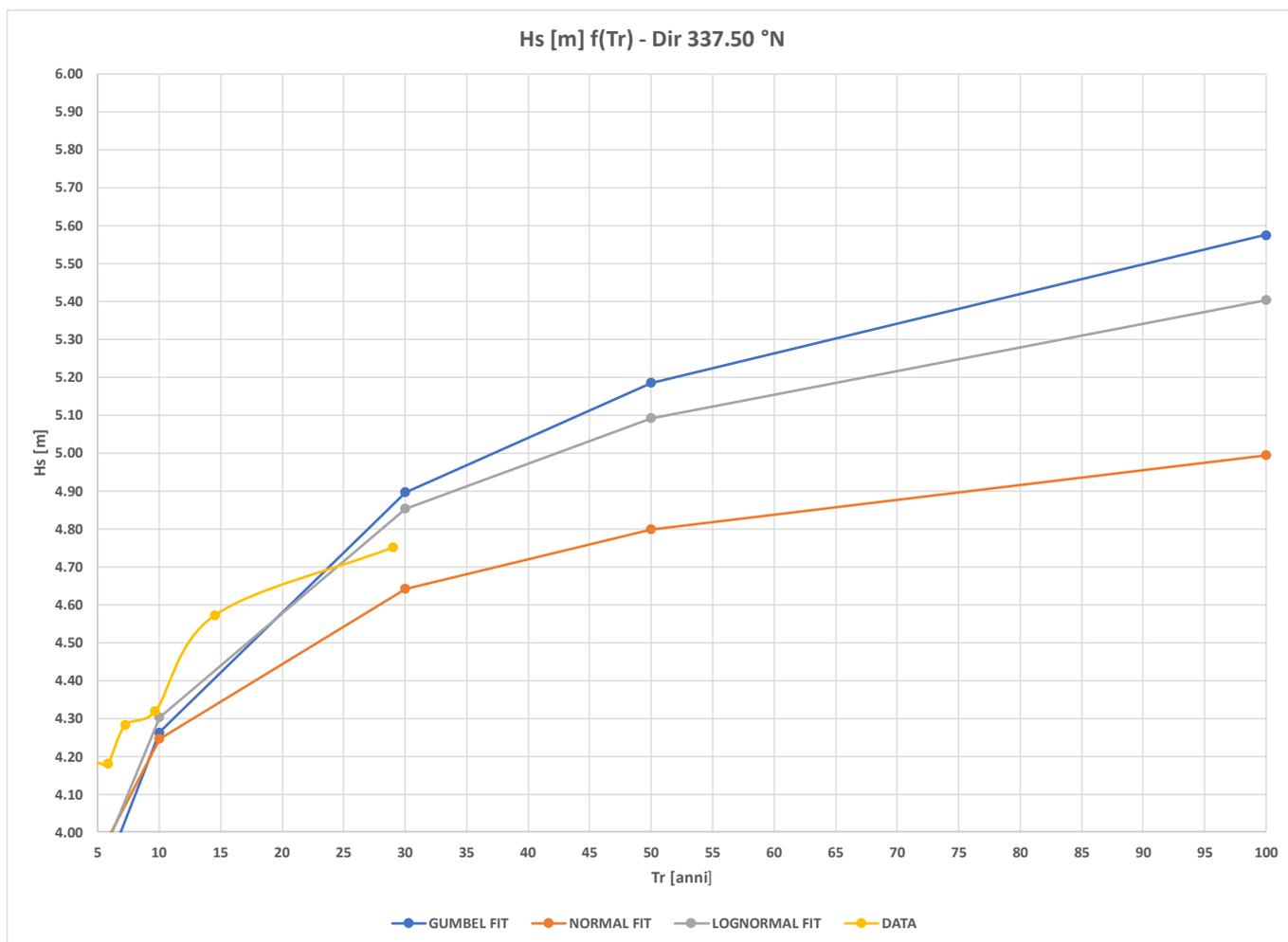


Figura 12 - Adattamento delle distribuzioni ai dati

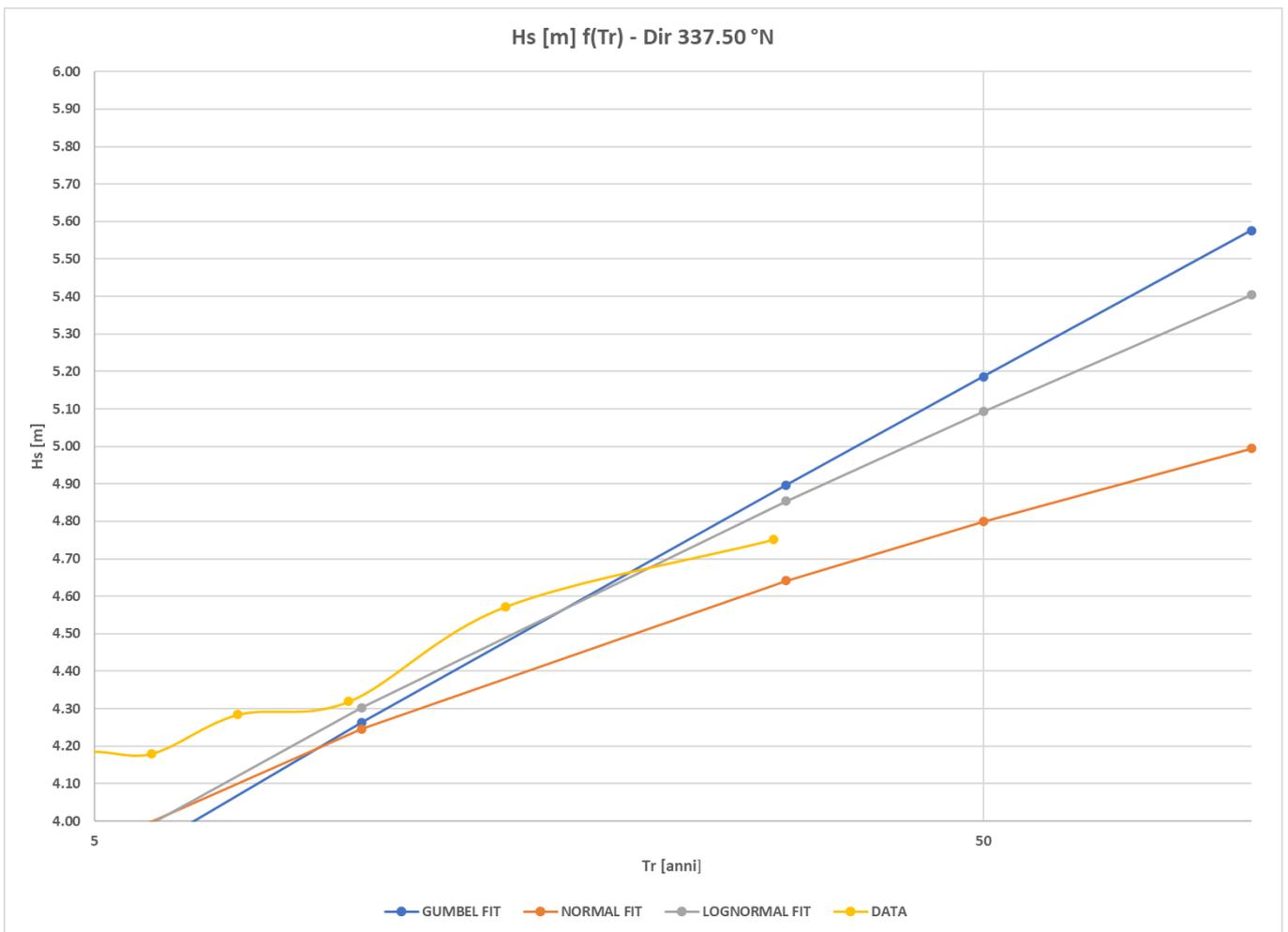


Figura 13 Adattamento delle distribuzioni ai dati in scala logaritmica

Il confronto è stato eseguito per la direzione da cui si osservano mediamente le mareggiate più significative (337.50°N). Dal confronto eseguito risulta evidente come la funzione di probabilità che meglio si adatta ai dati eseguiti è la Gumbel. Difatti, mentre la distribuzione normale non risulta completamente adatta a descrivere il fenomeno fisico, la distribuzione di Log-normale tende a sottostimare l'altezza d'onda per lunghi periodi di ritorno ed a sovrastimarla significativamente per periodi di ritorno maggiori, per cui la Gumbel è stata quella selezionata in definitiva, a favore di sicurezza.

Il periodo di picco, per le diverse mareggiate estreme con i vari tempi di ritorno, è stato stimato con la formula di Botticotti (1997):

$$T_p = 8.5\pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}}$$

Di seguito si riportano dunque i risultati delle condizioni estreme considerate per il successivo modello numerico ad elementi finiti:

Tr 10 ANNI	DIR LARGO [°N]	0	22.5	45	67,5	315	337.5
	Hs deep water [m]	3,73	3,74	3,09	1,79	2,76	4,26
	Tp [s]	8,23	8,25	7,49	5,70	7,09	8,80
Tr 100 ANNI	DIR LARGO [°N]	0	22.5	45	67,5	315	337.5
	Hs deep water [m]	4,8	5,1	4,45	2,64	3,44	5,58
	Tp [s]	9,34	9,62	8,99	6,92	7,90	10,07

Figura 14 - Risultati delle elaborazioni statistiche per i due periodi di ritorno considerati ai fini progettuali nel punto di estrazione del moto ondoso a largo

Nello specifico, si sono andati a considerare due diversi periodi di ritorno, pari a 10 anni e 100 anni in ragione del fatto che il primo è rappresentativo di condizioni meteomarine, per quanto estreme, con maggiore frequenza che dunque costituiscono uno Stato Limite di Esercizio (ai sensi delle NTC 2018), che il secondo, rappresentativo di una condizione estrema di progetto per il dimensionamento dell'opera di sponda, al fine di dimostrarne la stabilità.

3 Analisi di propagazione verso riva del moto ondoso

Come indicato nell'introduzione per l'esecuzione delle simulazioni di propagazione verso riva degli eventi estremi di moto ondoso stabiliti nel precedente capitolo si è andati ad utilizzare il software specialistico e di ultima generazione Delft3D Flexible mesh (versione 03.2021) di cui la Sigma Ingegneria dispone con regolare licenza.

Nello specifico, il software Delft 3D Flexible mesh dispone di un gestore completo del pacchetto (deltashell) che permette di utilizzare i sottoprogrammi relativi per la creazione della Mesh ad elementi finiti di calcolo (RGFGRID), per l'adattamento dei dati batimetrici alla stessa (QUICKIN) e, successivamente per l'esecuzione delle analisi di propagazione del moto ondoso (SWAN).

Nello specifico, per il progetto in esame, le informazioni batimetriche necessarie sul dominio di calcolo sono state acquisite dal database dell'EMODnet (European Marine Observation and Data network - <https://www.emodnet-bathymetry.eu/>) disponibili su tutto il bacino del mediterraneo in formato .grid e la cui ultima versione ad oggi disponibile è aggiornata al 12/2020. Tali dati sono stati verificati localmente tramite carte nautiche vigenti.

Per il raffittimento dei dati batimetrici locali nell'area di progetto e near-shore si è fatto affidamento ai dati batimetrici disponibili sul portale Navionics (<https://www.navionics.com/usa/>). Nell'area sottocosta sono stati utilizzati i rilievi batimetrici con sistema multibeam forniti.

3.1 Generalità

La ricostruzione del moto ondoso sottocosta è stata effettuata mediante l'impiego del modello numerico SWAN, che permette di simulare la propagazione del moto ondoso da largo verso la costa attraverso un approccio spettrale.

Nei successivi paragrafi si riporta una descrizione del modello numerico e delle caratteristiche della griglia di calcolo.

3.2 Il codice SWAN

Il modello numerico SWAN (Booij *et al.*, 1999), acronimo di *Simulating WAve Nearshore*, è stato sviluppato presso la *Delft University of Technology* ed è un'estensione alle acque a bassa profondità dei modelli di terza generazione impiegati a profondità infinita (WAM). Il modello, che può essere impiegato a varie scale rilevanti per le onde gravitazionali generate dal vento, consente di ottenere stime dei parametri delle onde

in zone costiere, laghi ed estuari, generate dal vento e influenzate dai fondali o dalle correnti. Il modello è di tipo spettrale, con evidenti vantaggi dal punto di vista computazionale per l'analisi di stati di mare. Infatti, le onde generate dal vento sono caratterizzate da altezze e periodi irregolari, a causa dalla natura irregolare del vento. Quest'ultima determina appunto che l'elevazione della superficie del mare varia continuamente, cosa che produce enormi difficoltà nell'utilizzo di un approccio di tipo deterministico. Inoltre, una descrizione statistica degli stati di mare mediante l'altezza d'onda media, periodo medio e direzione media è caratterizzata da piccole variazioni nel tempo e nello spazio se confrontate con il periodo e la lunghezza d'onda.

Tutte le informazioni sulla superficie del mare possono essere espresse mediante lo spettro di energia delle onde $E(\sigma, \theta)$, funzione della frequenza dell'onda σ e della direzione di provenienza θ . Nei modelli numerici è più utile fare riferimento alla densità di azione N , definita come il rapporto E/σ . Il vantaggio dell'impiego di tale parametro è dato dal fatto che esso si conserva durante il processo di propagazione in presenza di correnti, al contrario di E (Whithman, 1974).

Come è noto, l'evoluzione di N è regolata dalla seguente espressione:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Il primo membro è la parte cinematica. In esso troviamo i seguenti elementi: il primo termine indica la variazione della densità d'azione rispetto al tempo, il secondo termine indica la propagazione dell'onda nelle due dimensioni geografiche nello spazio \vec{x} , dove \vec{c}_g è la velocità di gruppo delle onde e \vec{U} è il vettore corrente; il terzo termine rappresenta gli effetti del cambiamento di frequenza a causa della profondità e delle correnti medie (con la velocità di propagazione c_{σ} riferita allo spazio delle frequenze σ); il quarto rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalle correnti (con la velocità di propagazione c_{θ} riferita allo spazio delle direzioni d'onda θ). Tali velocità di propagazione sono definite dalla teoria dell'onda lineare di Stokes al 1° ordine.

Il secondo membro racchiude le grandezze che immettono energia nel sistema, le grandezze che causano la dissipazione di energia e le interazioni non lineari onda-onda.

Per maggiori dettagli si rimanda al manuale del modello (*SWAN User Manual*).

Di seguito si riporta un estratto del modello di calcolo definito per il caso in esame:

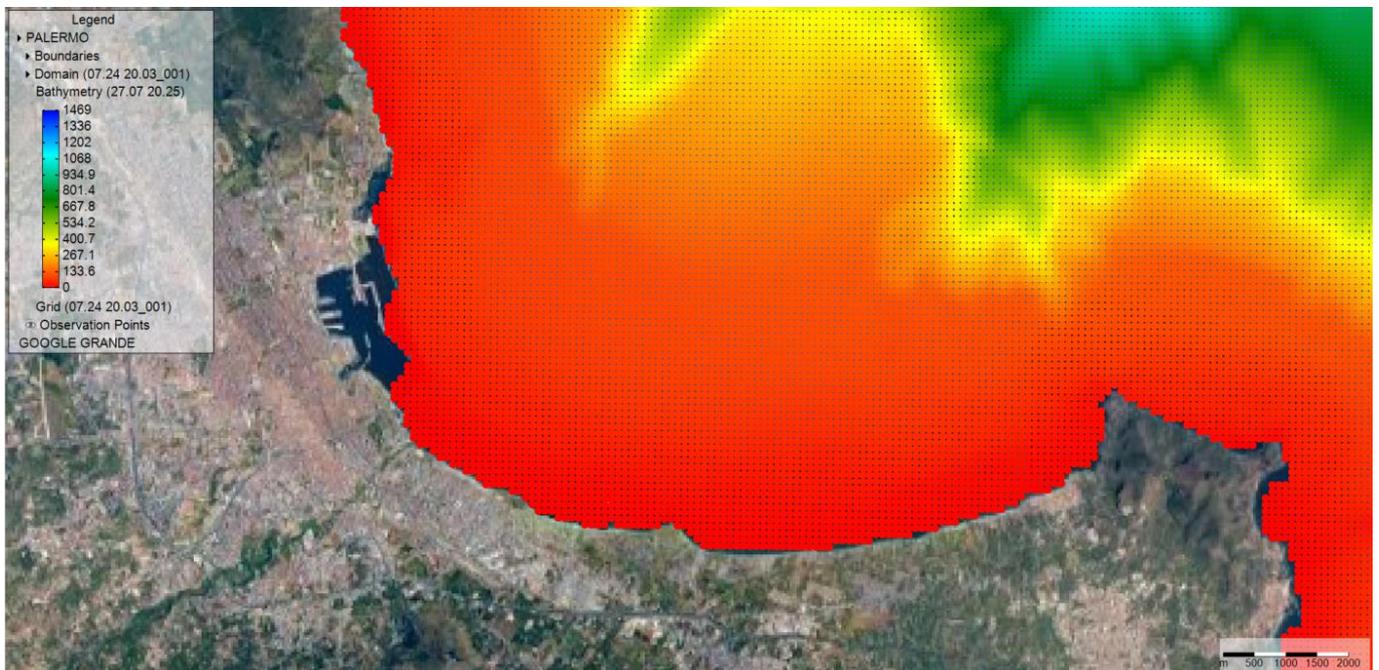
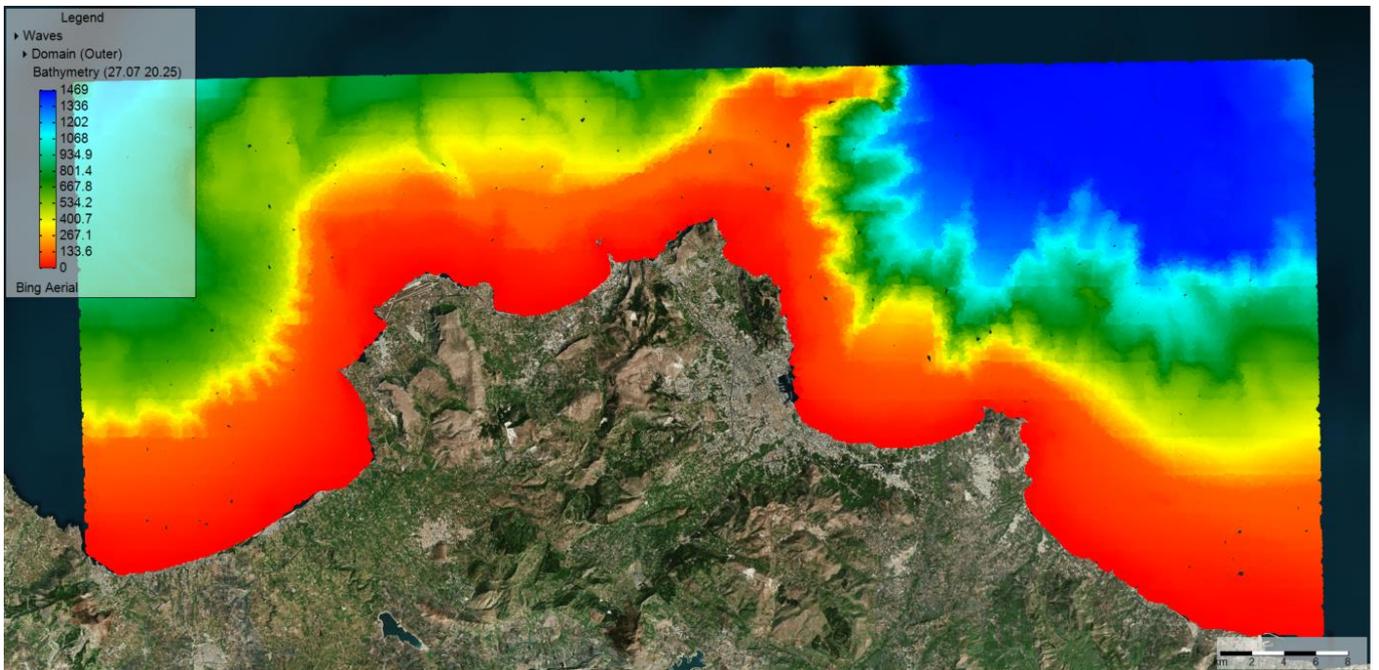


Figura 15 - Modello di calcolo e batimetrie (fondali inseriti come positivi) del modello numerico implementato

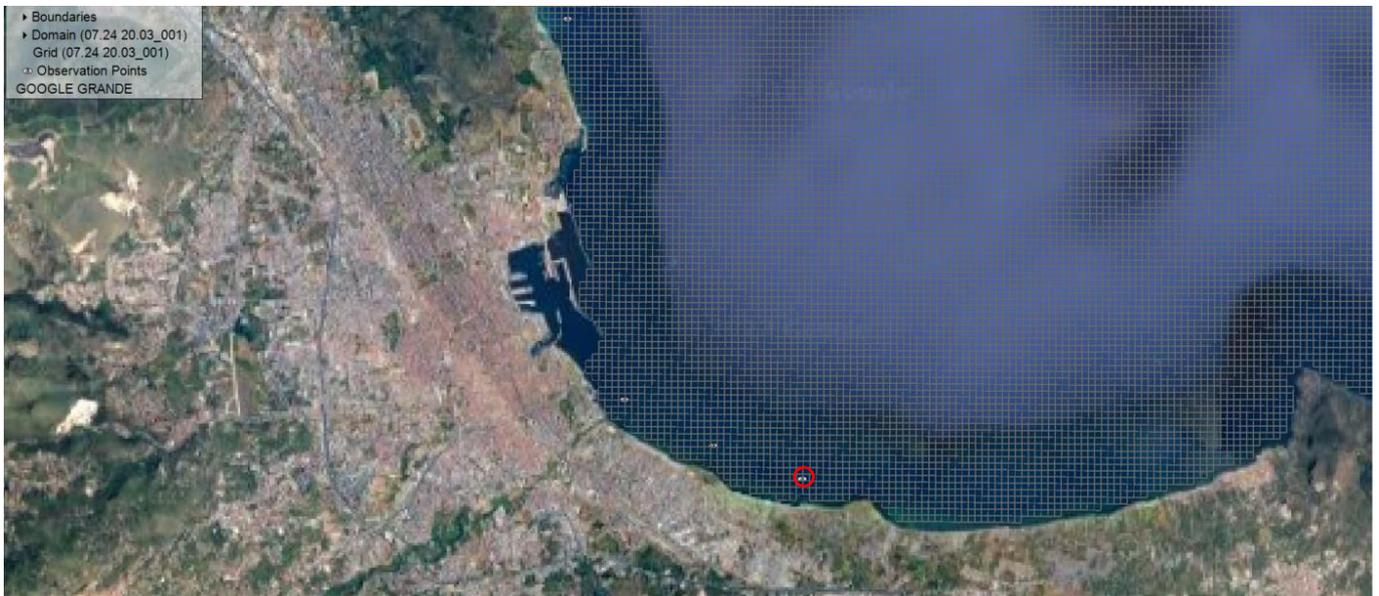


Figura 16 - Particolare mesh con indicazione del punto di estrazione dal modello

RISULTATI MODELLO

Come dati di input si sono considerate le caratteristiche delle mareggiate indicate al capitolo precedente con tempi di ritorno di 10 e 100 per le direzioni soprari-chiamate. Complessivamente, sono state eseguite 10 simulazioni di propagazione del moto ondoso.

I risultati sono riportati nelle seguenti tabelle. In particolare nelle tabelle viene riportato: la classe di provenienza a largo dell'onda [°N]; l'altezza d'onda significativa utilizzata come condizione al contorno Hs deep water [m]; il periodo di picco Tp [s]; l'altezza media d'onda significativa al piede della falesia Hs sottocosta [m], e la direzione apparente di provenienza Dir sottocosta [°N] derivanti dalle simulazioni eseguite.

Il punto di estrazione del moto ondoso utilizzato è stato riportato in Figura 16, presente su un fondale pari a circa -12.00 m s.l.m. Da i risultati qui ottenuti è stato possibile verificare che, al piede delle opere, il moto ondoso risulta limitato dal fondale, che essendo particolarmente limitato, porta le onde al frangimento.

RISULTATI ANALISI MODELLO SWAN						
Tr 10 ANNI	DIR LARGO [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs deep water [m]	3.73	3.74	3.09	2.76	4.26
	Tp [s]	8.23	8.25	7.49	7.09	8.80
	Hs sottocosta (profondità -12) [m]	2.95	3.20	2.54	1.20	2.82
	dir sottocosta [m]	10.76	20.21	31.49	355.56	3.49
Tr 100 ANNI	DIR LARGO [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs deep water [m]	4.80	5.10	4.45	3.44	5.58
	Tp [s]	9.34	9.63	8.99	7.91	10.07
	Hs sottocosta (profondità -12) [m]	3.90	4.46	3.77	1.52	3.75
	dir sottocosta [m]	10.94	19.41	29.02	356.66	4.29

Figura 17 - Risultati analisi di propagazione del moto ondoso

Dai dati riportati nelle tabelle si nota come, le mareggiate più significative risultano di fronte all'opera risultano essere provenienti dalla direzione 337.50°N a 45.00°N , con massimo dalla direzione 22.50°N . Dai risultati ottenuti si può anche perfettamente osservare come il fenomeno della diffrazione del moto ondoso vada, dato l'andamento più o meno regolare dei fondali nell'area prospiciente a quella di intervento, tenda ad allineare fortemente la direzione di provenienza del moto ondoso con l'ortogonale alla linea di costa.

Per quanto riguarda l'altezza del moto ondoso, si osserva come l'altezza massima presente risulti pari ad $H_s = 4.46$ m per la direzione 22.50°N e 100 anni di tempo di ritorno ed $H_s = 3.20$ m per il tempo di ritorno di 10 anni.

Di seguito si riportano i grafici risultati da tutte le simulazioni. In particolare, nei grafici si riporta graficamente i valori d'altezza d'onda significativa [m] presenti (dominio completo e successivo dettaglio).

Vengono successivamente riportate i grafici con la direzione di propagazione del moto ondoso.

Nello specifico, per ogni simulazione eseguita, si riportano nell'ordine i seguenti grafici:

- Altezza d'onda significativa H_s [m] in tutto il dominio di calcolo
- Direzione di propagazione ed altezza del moto ondoso Dir [$^\circ\text{N}$] nel dettaglio

Il punto di estrazione del moto ondoso viene cerchiato in viola.

Si rappresenta come, sia per il tempo di ritorno di 10 che di 100 anni, l'altezza d'onda significativa presente a tergo dell'opera (su fondale di circa 12 m) risulti superiore a quella massima che può essere presente al piede dell'opera dove, essendo presente un fondale estremamente limitato < 6.00 m, si andrà ad osservare sicuramente prima il frangimento delle onde indicenti ovvero la dissipazione dell'energia eccedente del moto ondoso, per cui l'opera di sponda del parco deve essere dimensionata tenendo in considerazione una condizione di onda limitata dal fondale. La stima della massima onda presente e delle azioni è svolta nel successivo capitolo.



Figura 18 – Propagazione moto ondoso - $T_r = 10$ anni - direzione di provenienza 0° N

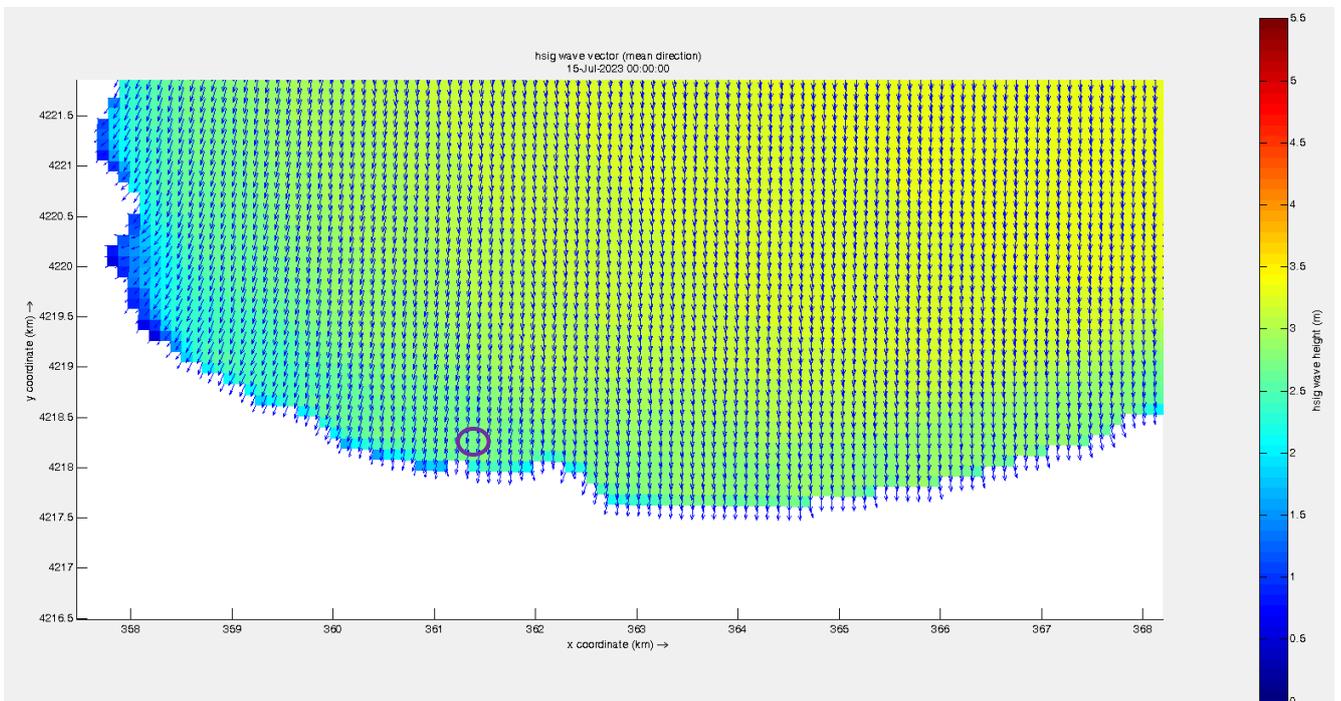




Figura 19 Propagazione moto ondoso - $T_r = 10$ anni - direzione di provenienza $22.5^\circ N$

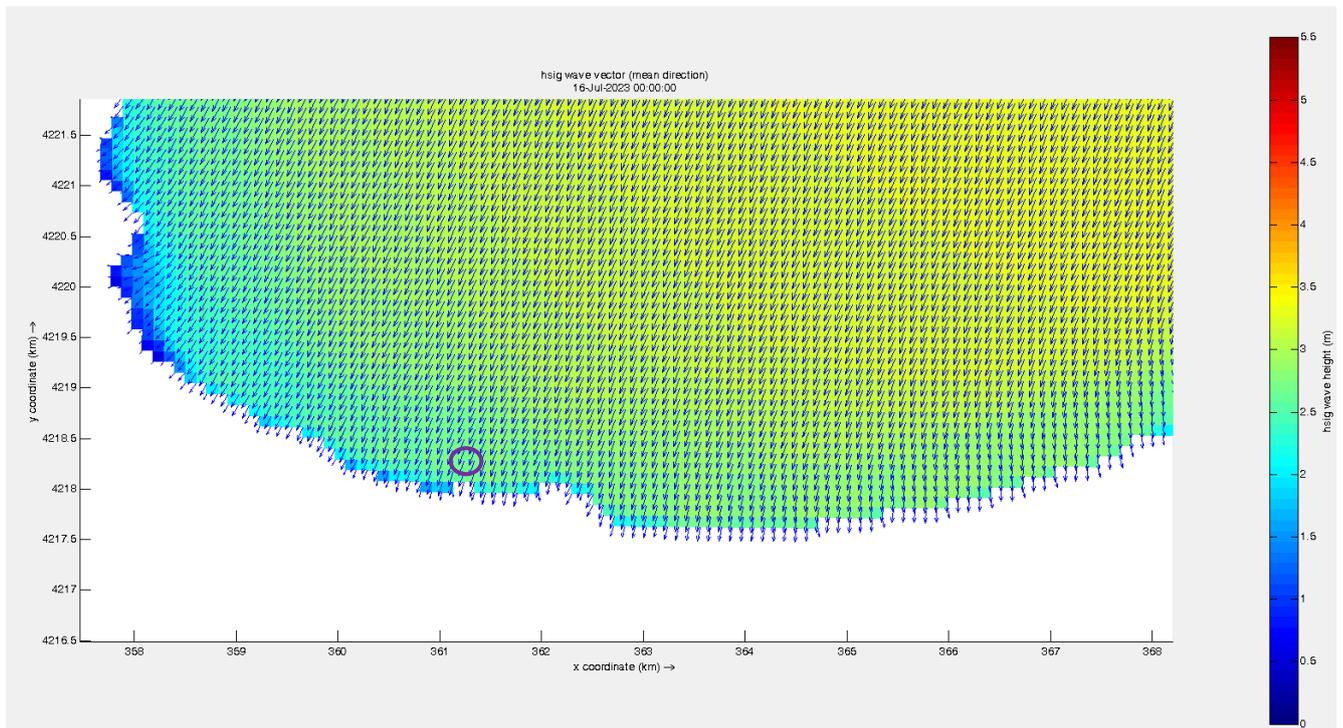
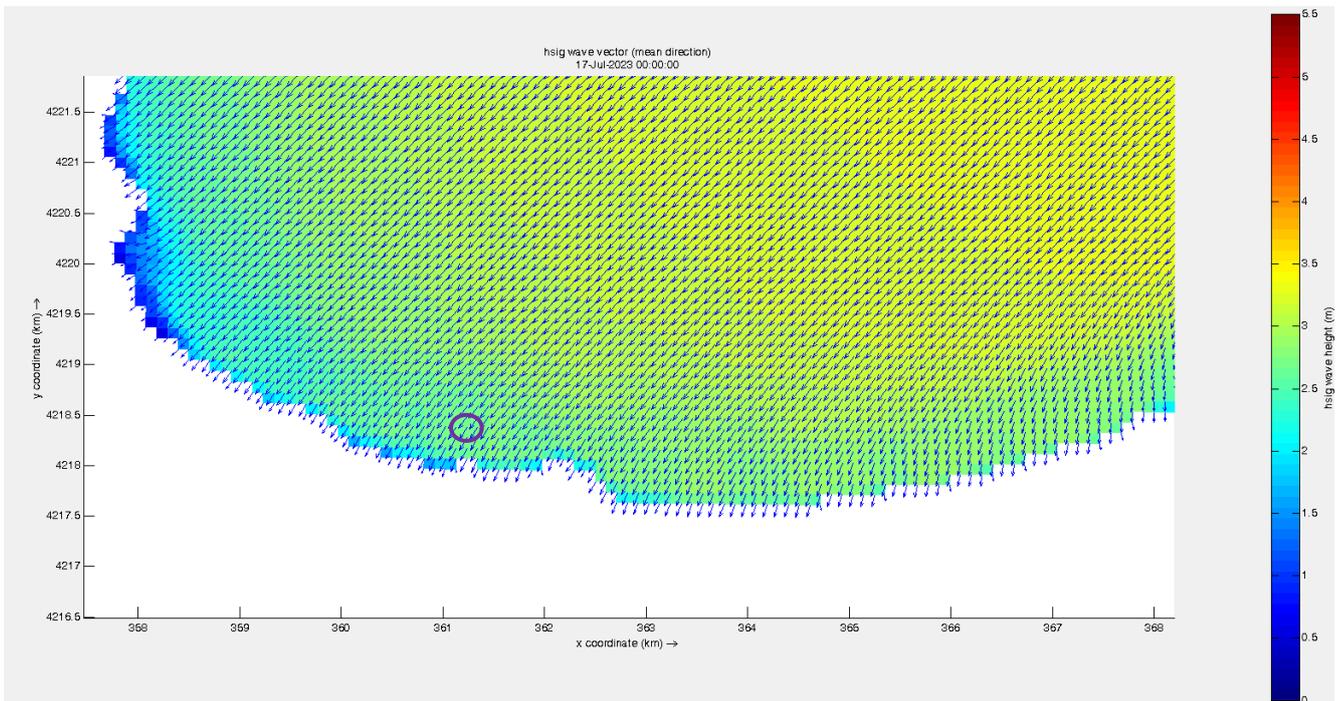




Figura 20 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 10$ anni - direzione di provenienza $45^\circ N$



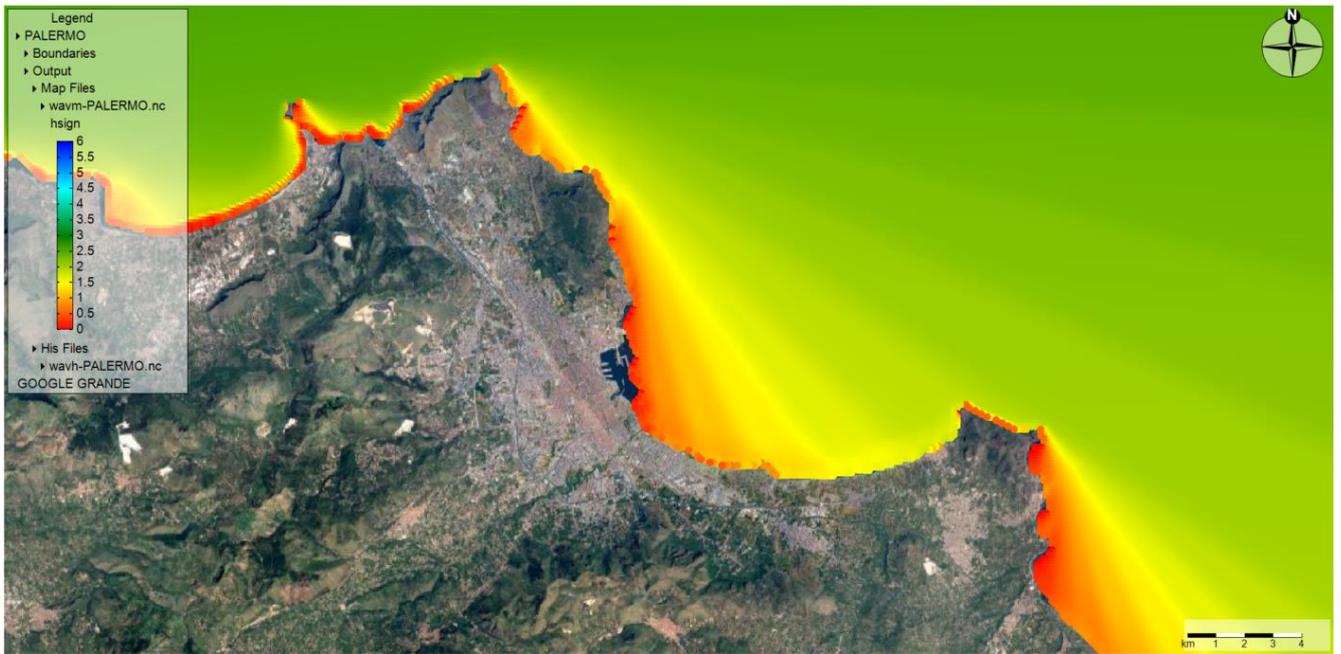


Figura 21 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 10$ anni - direzione di provenienza 315° N

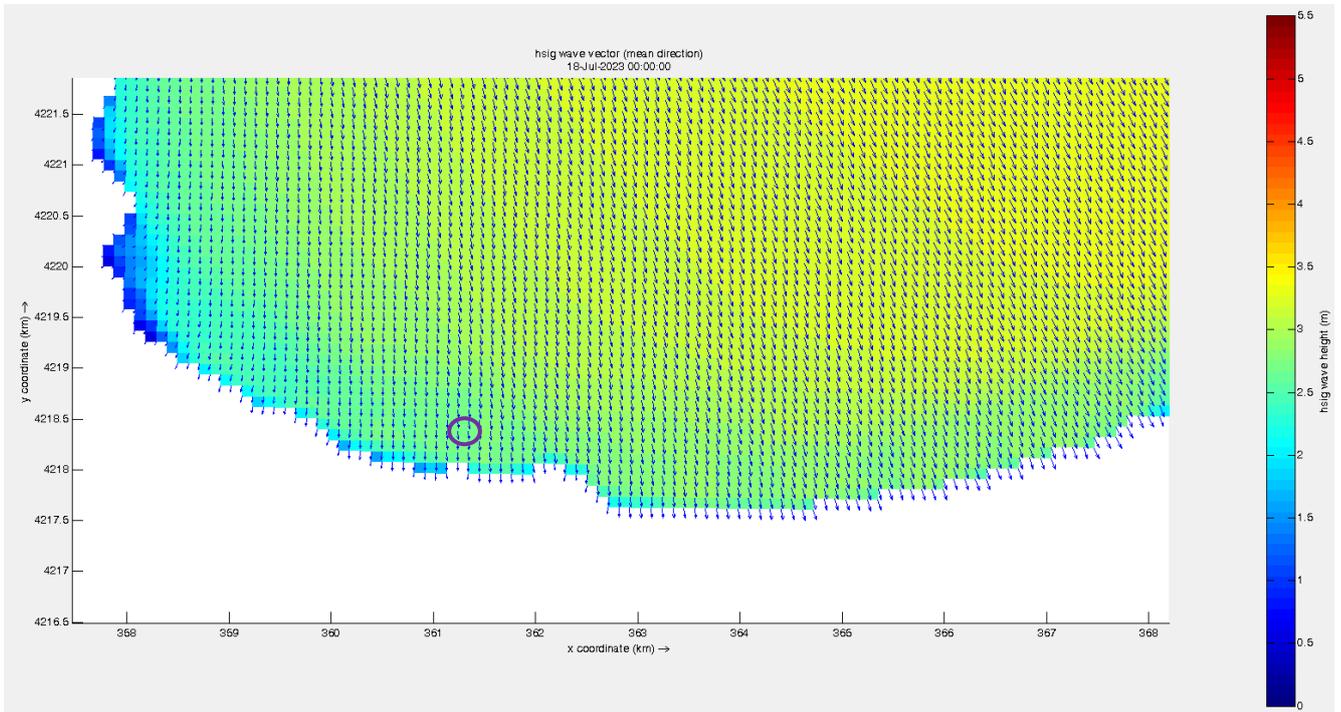




Figura 22 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 10$ anni - direzione di provenienza $337.5^\circ N$

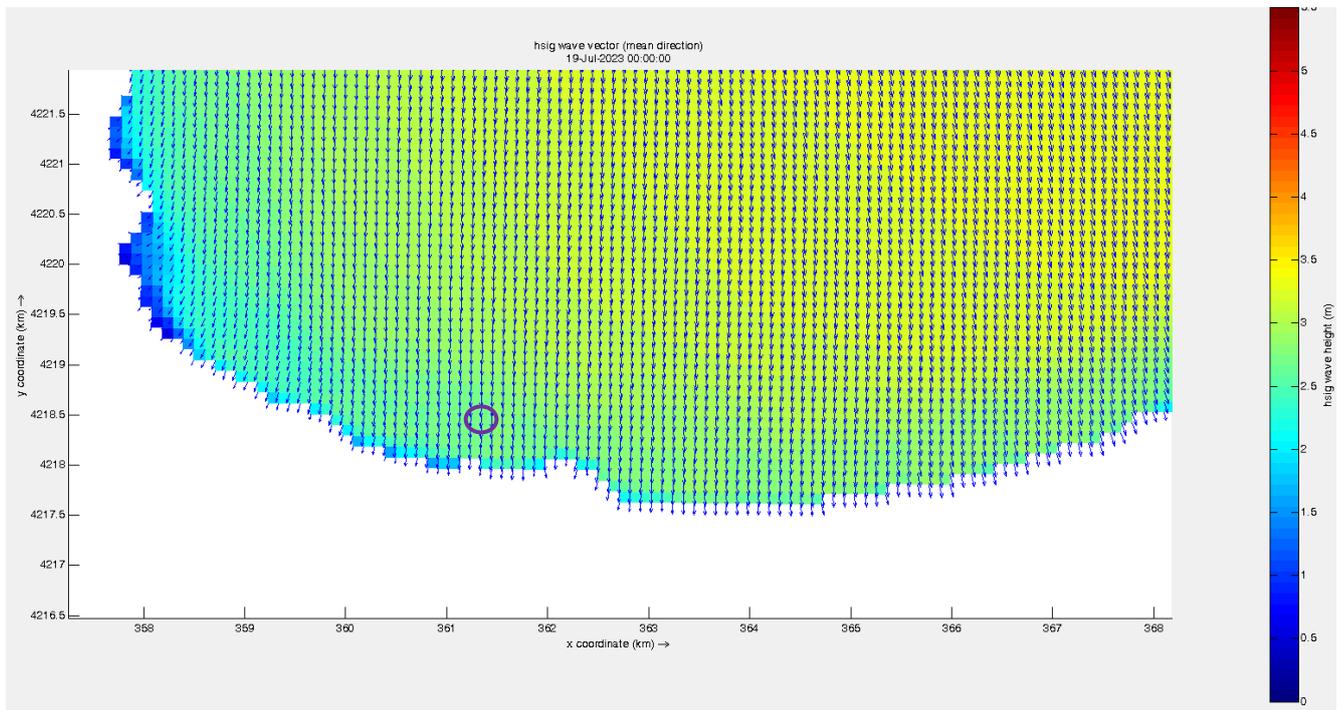




Figura 23 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 100$ anni - direzione di provenienza 0° N

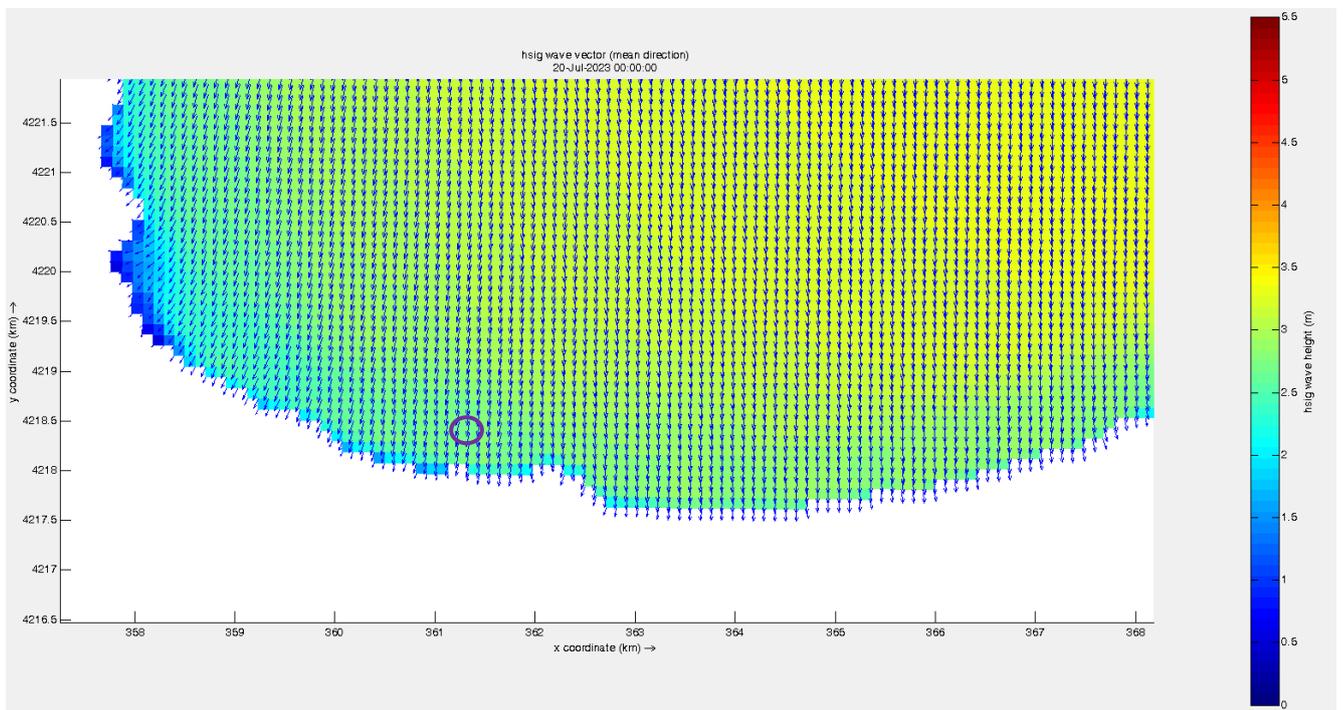




Figura 24 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 100$ anni - direzione di provenienza $22.5^\circ N$

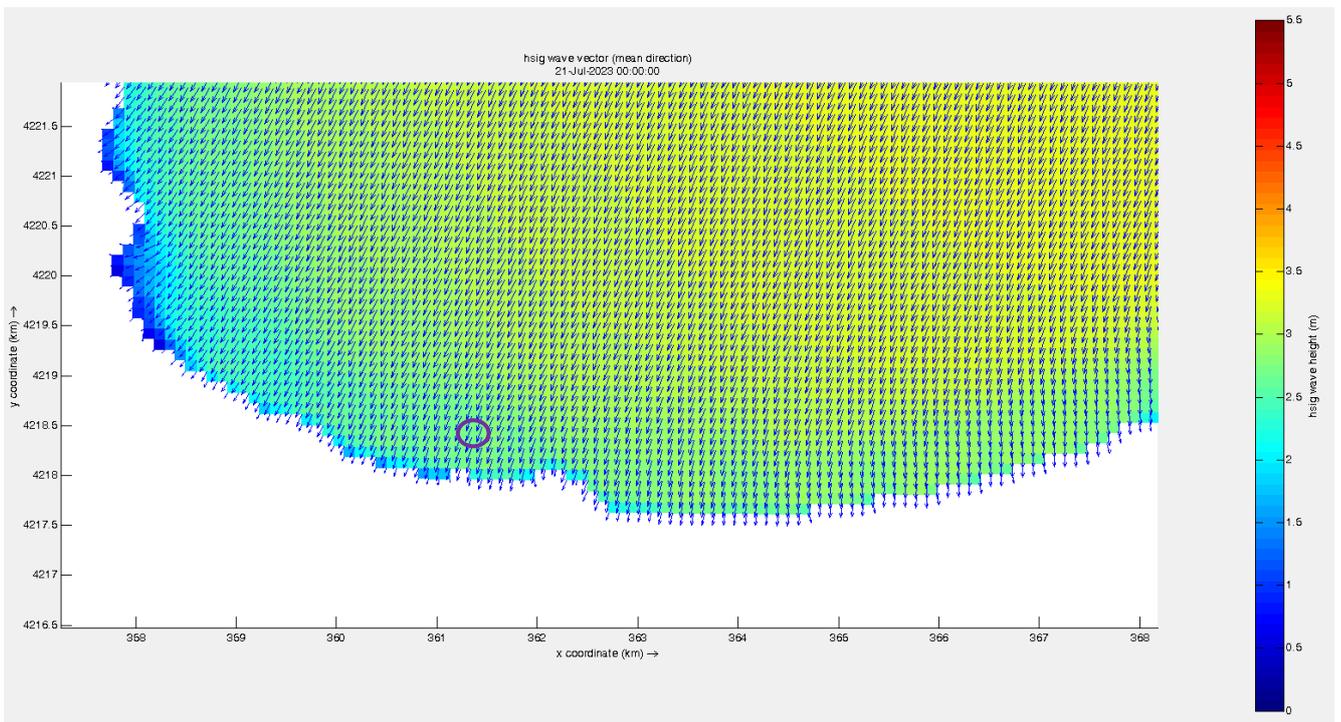
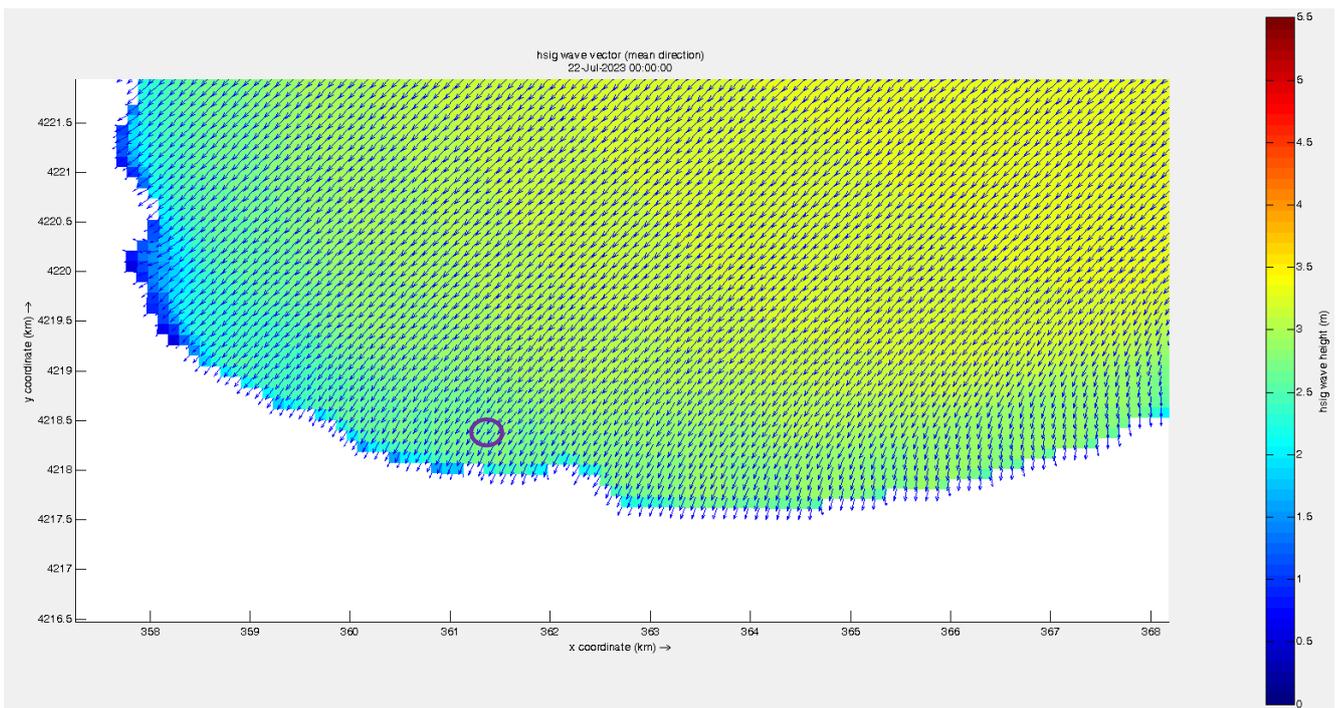




Figura 25 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 100$ anni - direzione di provenienza 45° N



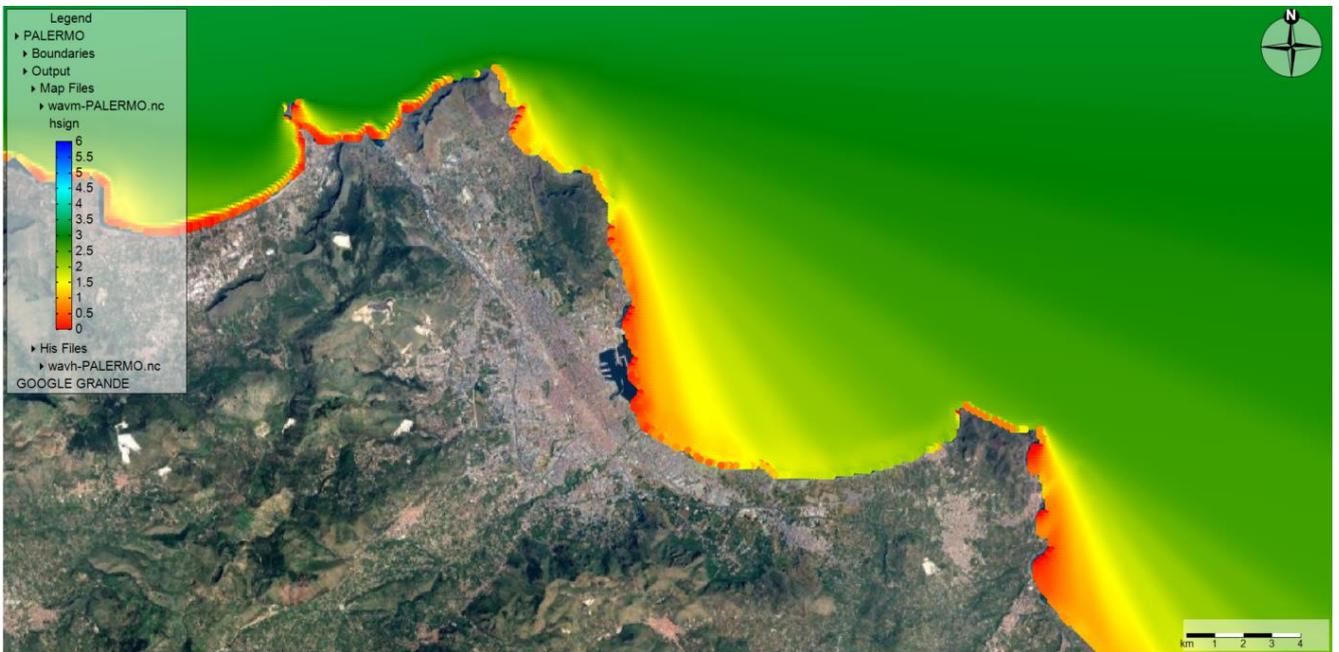


Figura 26 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 100$ anni - direzione di provenienza 315° N

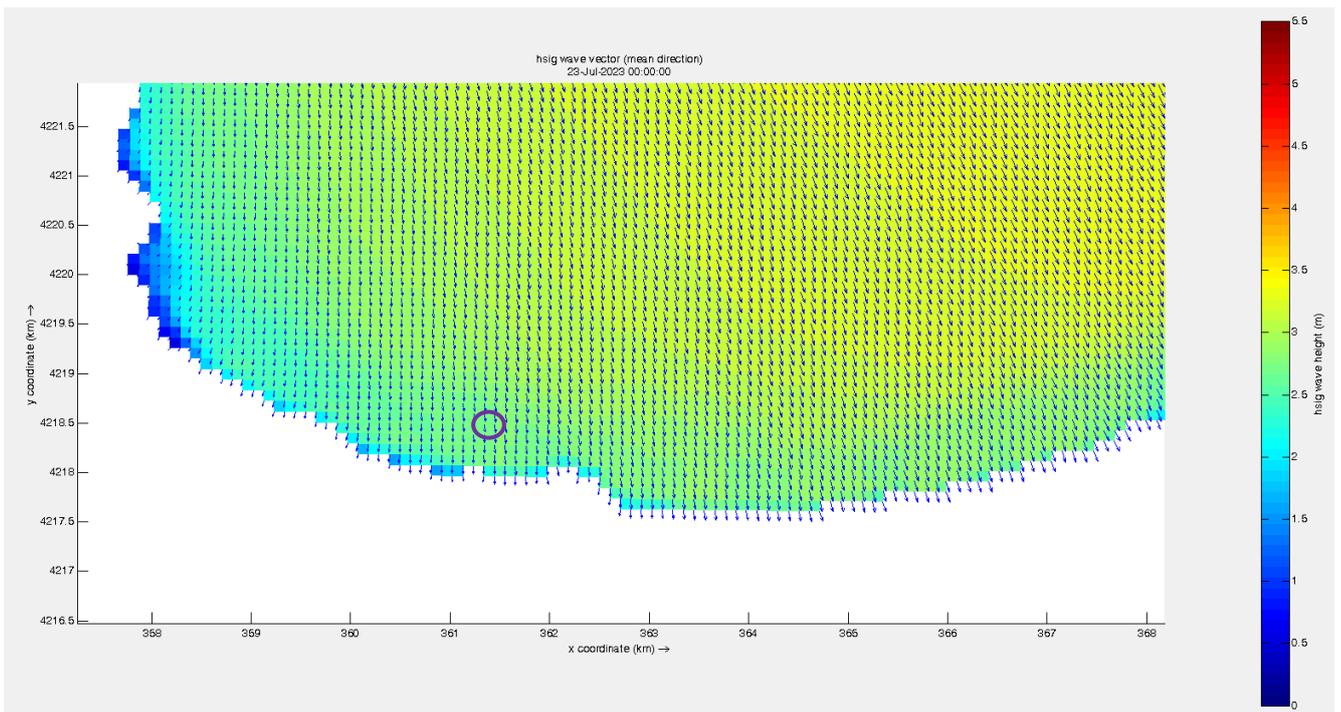
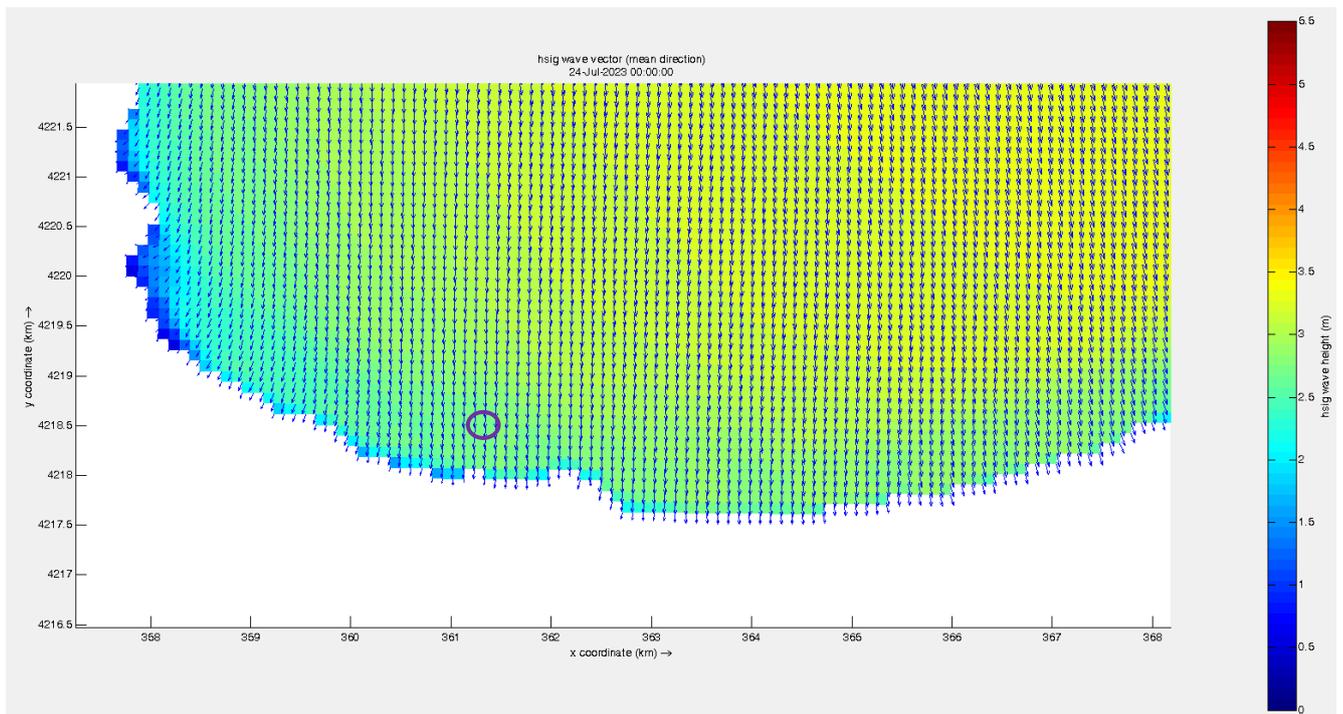




Figura 27 - Propagazione moto ondoso - $T_r = 100$ anni - direzione di provenienza $337.5^\circ N$



4 Stima dell'altezza massima presente al piede dell'opera in progetto (limitata dal fondale) e stima delle forzanti del moto ondoso

Per quanto espresso nel precedente capitolo la condizione più critica dell'altezza d'onda immediatamente a largo dell'opera in esame (ad una profondità di 12.00 m) ha le seguenti caratteristiche:

- **Altezza d'onda significativa $H_s = 4.46$ m**
- **Direzione di propagazione $Dir = 20.21^\circ N$**
- **Periodo di Picco $T_p = 9,63$ s**

A partire dalla citata condizione "di acque profonde" le onde della mareggiata di progetto, nel propagarsi verso la riva ovvero verso la posizione in cui è prevista la realizzazione della scogliera, saranno interessate da diversi fenomeni (rifrazione, shoaling, diffrazione, riflessione). Tuttavia, come evidenziato precedentemente, essendo l'opera prevista in progetto posizionate sulla spiaggia sommersa a fondali limitati le onde in propagazione da largo verso riva saranno caratterizzate dal raggiungimento del frangimento, per cui l'altezza d'onda incidente sulle scogliere sarà limitata.

Nello specifico, per quanto di interesse del presente studio, si sono considerate 3 sezioni:

- **Caso 1** - Sezione più svantaggiosa della diga frangiflutti con mantellata in massi naturali di IV cat, caratterizzata da un fondale al piede massimo di -5.50 m s.l.m.
- **Caso 2** - Sezione più svantaggiosa del tratto di sponda della passeggiata a mare del "Parco della Bandita" costituito da una paratia in pali secanti di lunghezza sino a -10.80 m s.l.m., caratterizzato da un fondale massimo al piede - 3.00 m s.l.m.
- **Caso 3** - Sezione più svantaggiosa del tratto di sponda della passeggiata a mare del "Parco della Bandita" costituito da una paratia in pali secanti di lunghezza sino a -8.80 m s.l.m., caratterizzato da un fondale massimo al piede - 2.50 m s.l.m.

Il frangimento delle onde marine è un fenomeno dovuto all'interazione tra le onde in arrivo e il fondale marino, che porta alla dissoluzione dell'energia delle onde e alla loro rottura sulla costa. In sintesi, questo processo coinvolge la riduzione della celerità delle onde, la diminuzione della lunghezza d'onda e l'aumento dell'altezza delle stesse (shoaling), che al termine causano l'instabilità e il successivo frangimento delle onde stesse.



Il rapporto tra il fondale e l'altezza d'onda al frangimento in quel punto può essere definito indice di frangimento Y (breaker index) ed è pari a $Y = H_b / d$; dove H_b è l'altezza d'onda al frangimento e d è la profondità nel punto. Il valore del breaker index è stimabile, per il caso di onde marine reali irregolari con il metodo indicato dal Rock Manual – CIRIA 2012 in maniera grafica ricavata dall'adimensionalizzazione di diversi risultati su modelli fisici e di osservazioni reali.

Nello specifico, sono riportati diversi grafici in funzione della wave-stepness a largo, nel caso in esame essendo pari a $Sop = 0.034$ si è andati ad utilizzare il grafico per $Sop = 0.03$, con leggera approssimazione nei risultati, a favore di sicurezza.

Nello specifico, la stima del valore di Sop , uguale per tutti e 3 i casi di interesse essendo funzione solamente dell'onda presente a largo, è stato eseguito utilizzando le definizioni:

- Lunghezza d'onda in acque profonde $L = gT_p^2/2\pi = 144.8$ m
- Altezza d'onda significativa a largo $H_s = 5.10$ m
- Wave stepness = $Sop = H_s/L = 0.034$

Al fine di poter utilizzare il grafico è necessario conoscere il rapporto tra la profondità sul punto d (indicata nella figura estratta dal rock manual con la lettera h) e la lunghezza d'onda in acque profonde L [m], e la pendenza del fondale verso largo m, ricavabile dalle batimetriche. A favore di sicurezza si sono considerate le profondità presenti ad una distanza di circa 3 l'altezza d'onda dal piede dei tratti di opera interessati.

Nello specifico in esame si ha quanto segue:

- Caso 1 - (diga foranea) Profondità di calcolo -6.50 m s.l.m., $m = 0.03$ (blu)
- Caso 2 - (sponda parco) Profondità di calcolo -3.00 m s.l.m., $m = 0.02$ (viola)
- Caso 3 - (sponda parco) Profondità di calcolo -2.50 m s.l.m., $m = 0.02$ (giallo)

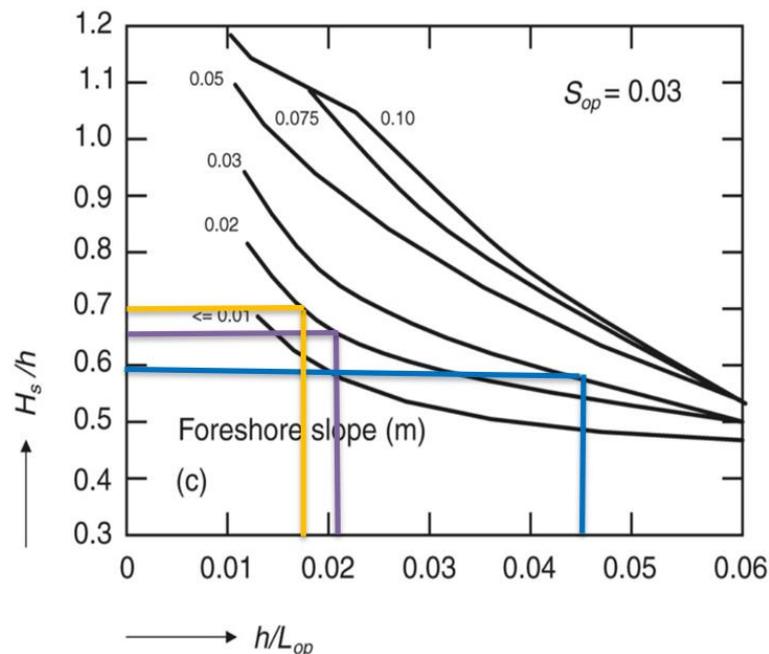


Figura 28 - Stima dell'altezza d'onda in frangimento in funzione del fondale - breaker index per onde con una wave - stepness a largo pari a 0.03 - The Rock Manual, 2012

Dal grafico nella precedente figura è ricavabile Y (**breaker index**), per tutti i tre casi in esame di seguito riportati:

- **Caso 1 - (Diga Foranea)** - $Y \approx 0.60$ per cui è possibile ricavare $H_b = 3.90$ m
- **Caso 2 - (Sponda parco d = -3.00 m)** $Y \approx 0.65$ per cui è possibile ricavare $H_b = 1.95$ m
- **Caso 3 - (Sponda parco d = -2.50 m)** $Y \approx 0.70$ per cui è possibile ricavare $H_b = 1.75$ m

Tali valori di altezza d'onda sono stati utilizzati sia per le verifiche di stabilità dell'opera foranea nel tratto di prolungamento della diga di sopraflutto che nel tratto in cui è presente l'opera per la realizzazione della sponda del "Parco a mare". Tali verifiche sono state riportate nell'elaborato "Verifiche di stabilità idraulica e stima forzanti esercitate dal moto ondoso".

5 Penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio acqueo portuale nella configurazione di progetto e nella configurazione esistente – dragato di confronto

Il presente studio di agitazione interna, condotto per lo stato di agitazione all'interno del bacino portuale del Porto della Bandita ovvero stimarne le condizioni di sicurezza rispetto alle linee guida internazionali disponibili, è stato sviluppato, come evidente dagli allegati grafici, su due diverse configurazioni:

- Configurazione “di progetto” del porto, così come presentato negli elaborati grafici del presente progetto;
- Configurazione di “non realizzazione degli interventi risolutivi”, ovvero in cui il porto (attualmente parzialmente insabbiato) non venisse completato con ulteriori opere foranee, volte a garantire la sicurezza degli utilizzatori del Porto stesso ovvero le imbarcazioni ivi ormeggiate, ma solamente agendo con un intervento manutentivo di dragaggio dei fondali. Tale configurazione è stata sviluppata al fine di dimostrare la necessità di estendere le opere foranee a protezione del porto rispetto alla condizione attuale;

Nelle figure riportate di seguito si rappresentano gli schemi dei modelli implementati per le due configurazioni analizzate, secondo quanto verrà meglio descritto di seguito, con il modello CGWAVE, implementato nel software SMS della AQUAVEO.

Nello specifico, per quanto riguarda i fondali, come fatto anche per le analisi a larga scala con Delft 3D FM, si rappresenta che si è fatto riferimento ai rilievi batimetrici forniti dal Comune di Palermo, oltre che alla cartografia nautica vigente ed alle informazioni disponibili sul portale di NAVIONICS – CHART VIEWER (garmin group).

All'interno dello specchio acqueo portuale, come da previsioni progettuali, si è andati ad alterare le profondità della mesh prodotta al fine di simulare il dragaggio a -3.00 m s.l.m previsto per tutto il bacino interno.

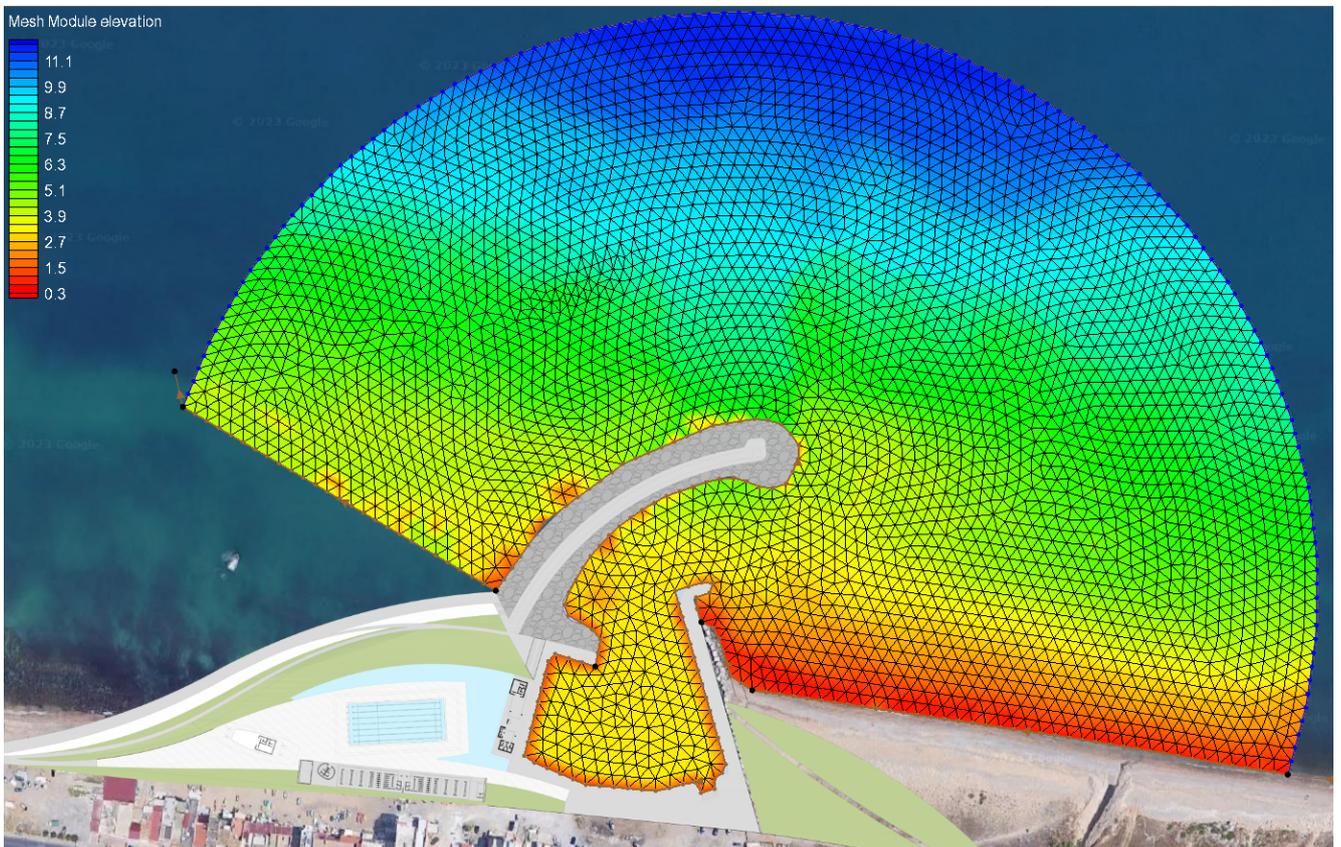


Figura 29 - Schema 1° configurazione modellata – stato “di progetto”

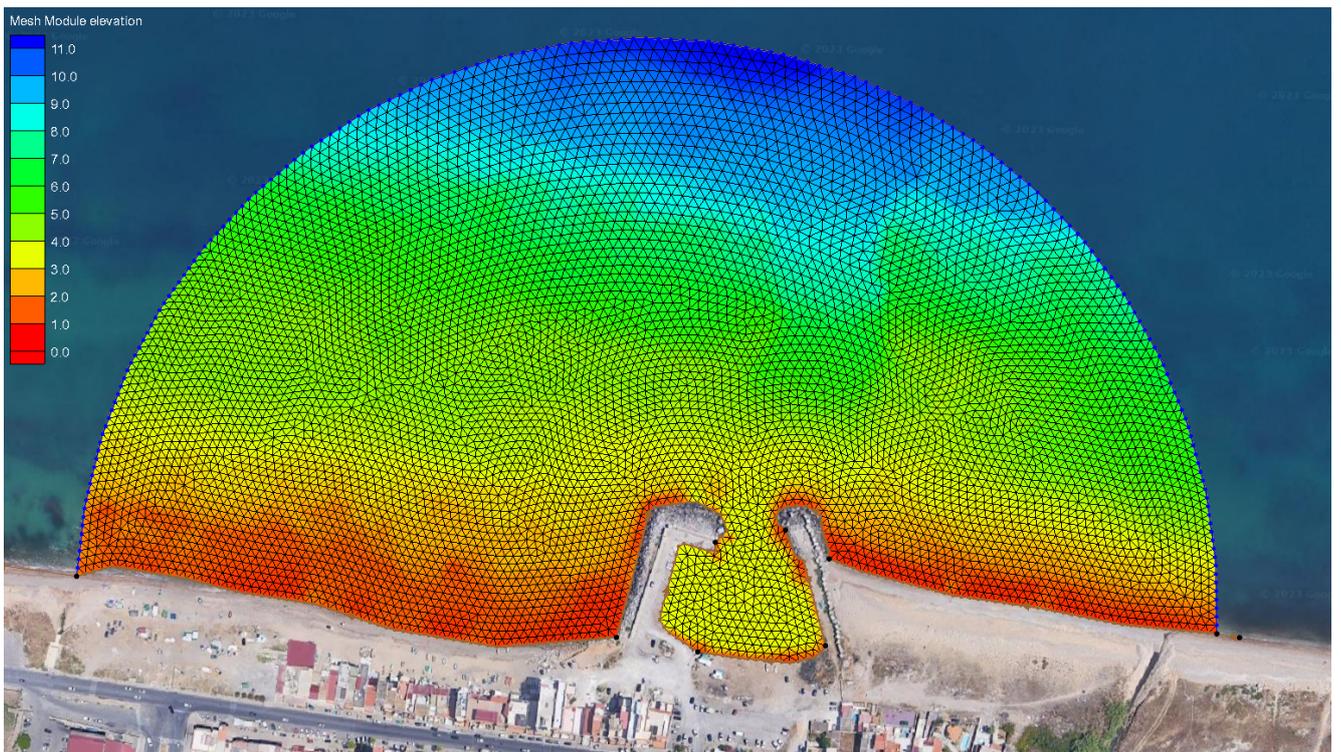


Figura 30 - Schema 2° configurazione modellata – Stato “di fatto” del porto, con esecuzione solamente di un dragaggio manutentivo all’interno dello specchio acqueo esistente

Per fare le suddette analisi di agitazione interna è stato utilizzato il modello CGWAVE, sviluppato dall'United States Army Corps of Engineers.

I dati di input del modello sono quelli derivanti dalla propagazione delle onde tramite SWAN di cui si tratta nel precedente capitolo. In questa sede si riporta la tabella seguente che sintetizza l'analisi dei risultati dell'analisi degli eventi estremi condotta su un punto prossimo esattamente prospiciente al Porto della Bandita, con fondale di circa -12.00 m s.l.m. In particolare, per ogni periodo di ritorno e per ogni direzione del moto ondoso al largo si riporta: l'altezza significativa, il periodo di picco e la direzione di propagazione.

RISULTATI ANALISI MODELLO SWAN						
Tr 10 ANNI	DIR LARGO [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs deep water [m]	3.73	3.74	3.09	2.76	4.26
	Tp [s]	8.23	8.25	7.49	7.09	8.80
	Hs sottocosta (profondità -12) [m]	2.95	3.20	2.54	1.20	2.82
	dir sottocosta [m]	10.76	20.21	31.49	355.56	3.49
<hr/>						
Tr 100 ANNI	DIR LARGO [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs deep water [m]	4.80	5.10	4.45	3.44	5.58
	Tp [s]	9.34	9.63	8.99	7.91	10.07
	Hs sottocosta (profondità -12) [m]	3.90	4.46	3.77	1.52	3.75
	dir sottocosta [m]	10.94	19.41	29.02	356.66	4.29

DESCRIZIONE MODELLO CGWAVE

Lo studio della diffrazione consiste in quell'insieme fenomenologico conseguente alla propagazione delle onde in base a leggi che non seguono quelle della propagazione rettilinea nei mezzi omogenei, secondo i dettami dell'ottica geometrica.

Occorre precisare che il fenomeno della diffrazione si manifesta in modo sensibilmente apprezzabile solo se le onde incontrano un ostacolo capace di limitare l'estensione utile dei fronti a dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda.

L'esame teorico della diffrazione del moto ondoso viene, com'è noto, condotto con gli stessi metodi elaborati per lo studio degli analoghi fenomeni nell'ottica e nell'acustica.

Il fenomeno della diffrazione può essere, infatti, spiegato con il seguente principio di Huygens-Fresnel.

"Sia S una sorgente puntiforme ed s una superficie chiusa che la contiene in cui ogni elemento dA diviene a sua volta sorgente di onde elementari che, con opportune intensità e fase, si propagano in tutte le direzioni".

Ciò, ovviamente, comporta che in un punto posto al di fuori della superficie s, l'intensità della perturbazione che vi giunge è la risultante dell'interferenza di tutte le onde

elementari emesse da ciascun elemento di s ; allorquando, in particolare, la superficie sia una superficie d'onda, le diverse onde elementari risultano in fase.

Ove, per ricondurre subito il discorso al problema della diffrazione, vi sia un ostacolo che taglia la superficie s , in un punto al di fuori di essa perverranno solo le onde elementari emesse dalla porzione di s non intercettata dall'ostacolo.

Ogni punto del fronte che avanza deve, pertanto, essere considerato come il centro di una perturbazione secondaria che si dirama in tutte le direzioni.

La successiva configurazione assunta dai fronti d'onda, dopo un intervallo finito di tempo, nasce dall'involuppo delle suddette perturbazioni secondarie.

Allorquando un treno d'onde supera un'opera foranea, accade che un'aliquota di energia posseduta dal treno d'onde incidente si propaga a tergo dell'ostacolo. Ove ciò non fosse, infatti, nella zona di ombra si avrebbe la calma assoluta.

L'aliquota dell'energia riflessa dall'opera dipende, invece, dalla geometria della stessa e, mentre per opere con parete verticale può assumersi un coefficiente di riflessione compreso tra 0,90 e 1, per strutture del tipo a gettata è sufficientemente realistico assumere per il coefficiente di riflessione il valore di $0,30 \div 0,50$, valore che è ancora minore 0,20 – 0,30 per le spiagge naturali.

Lo studio della diffrazione, nel senso più generale del termine, affronta la valutazione delle caratteristiche del moto ondoso sia nella zona di riflessione dello stesso, sia nella zona protetta a tergo dell'ostacolo.

La conoscenza dell'agibilità e dell'affidabilità del dispositivo portuale implica quindi un approfondimento dello studio del fenomeno di che trattasi, la cui soluzione è stata posta sotto forma di grafici e tabelle dal Wiegel nel caso di ostacolo rettilineo semidefinito e perfettamente riflettente che si erge su profondità costante.

Il modello numerico utilizzato nel nostro caso è un modello agli elementi finiti all'avanguardia per calcolare le altezze d'onda all'interno dell'area in esame per tutte le condizioni di moto ondoso incidente.

Note le altezze d'onda, è possibile stimare, con un'unica simulazione, l'agitazione ondosa in diversi punti, per particolari condizioni di moto ondoso incidente. Il modello numerico utilizzato è CGWAVE (Coastal and Hydraulics Laboratory -United States Army Corps of Engineering) che utilizza come interfaccia grafica il modello SMS (Surface modeling system).

CGWAVE include: la diffrazione delle onde provocata dalle strutture emergenti e quella dovuta alle caratteristiche del fondale marino; la rifrazione e gli effetti di shoaling derivati dalle variazioni di profondità; la riflessione parziale o totale causata dalle strutture costiere e portuali; gli effetti d'attrito di fondo e frangimento delle onde.

Il problema è risolto sulla base dell'equazione per i fondali a debole pendenza (Mild Slope Equation) o di quella di Berkhoff, cioè:

$$\nabla \left[C C_g \cdot \nabla \phi \right] + \omega^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0$$

Dove C e C_g sono, rispettivamente, le velocità di fase e di gruppo, definiti da:

$$C = \frac{\omega}{k} \quad e \quad C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \cdot C$$

dove ω è la frequenza angolare, h è la profondità medio mare, e k è il numero d'onda definito da $2\pi/L$, con L (=CT) lunghezza d'onda.

La discretizzazione agli elementi finiti dell'equazione per fondali a debole pendenza comporta il problema di specificare le condizioni al contorno lungo tutto il confine del dominio di calcolo come illustrato nella figura sottostante.

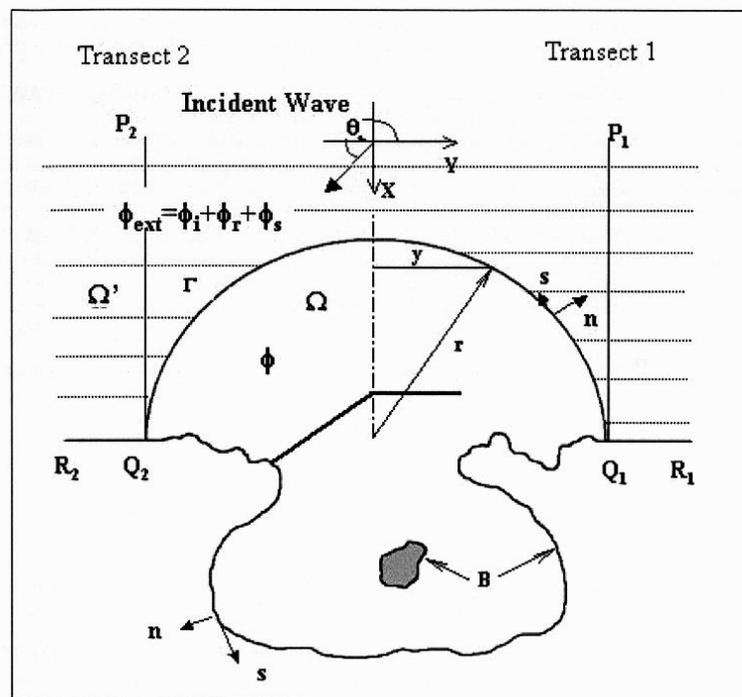


Figura 31 - Schema dominio CGWAVE

In CGWAVE vi sono molte condizioni al contorno che possono essere selezionate. Per esempio, condizioni al contorno relative alle onde incidenti (anche quelle riflesse), definite dall'altezza d'onda, il periodo e la direzione; condizioni sui contorni assorbenti, specificate in termini di una direzione d'onda; condizioni ai contorni parzialmente o completamente riflettenti, definite da un coefficiente di riflessione, il cambio di fase e la direzione d'onda. La definizione dei coefficienti di riflessione lungo i contorni parzialmente riflettenti permette di esaminare diversi tipi di strutture, per esempio frangiflutti a parametro verticale o inclinato.

I calcoli sono eseguiti su una maglia d'elementi finiti triangolari. Per ottenere dei risultati accurati, è importante rappresentare con una certa precisione le lunghezze d'onda alle diverse profondità.

Il vantaggio di usare una maglia d'elementi finiti triangolari è che la risoluzione di tale reticolo può essere personalizzata in base al periodo dell'onda ed alla profondità, in modo da minimizzare la quantità di calcoli necessari che, ricordiamo, dipende dal numero di nodi.

CGWAVE può essere usato in modalità mono-frequenza o random, e inoltre come modello mono-direzionale o multi-direzionale. In modalità "mono-frequenza" il modello considera una sola componente di periodo e direzione. In alcune situazioni, questo tipo d'applicazione fornisce una descrizione ragionevolmente precisa dello stato di mare. A causa dell'interferenza costruttiva e distruttiva dovuta all'interazione delle onde caratterizzate dallo stesso periodo, qualche volta, è possibile avere una descrizione più esauriente del campo di moto ondoso usando onde incidenti di tipo random. In questo caso possono essere simulate e combinate automaticamente nel modello molte componenti di periodo e direzione, in funzione dello spettro delle onde incidenti.

Il modello CGWAVE rilascia, come risultato di una simulazione, le altezze d'onda sotto forma, normalmente, di grafici a colori ottenuti con l'applicazione del pacchetto software SMS.

SMS è un modello con capacità di pre-processing e post-processing per tutti i modelli numerici CHL (Coastal and Hydraulics Laboratory -United States Army Corps of Engineering), inclusi ADCIRC, TABS (RMA2, RMA4, SED2D), ADH, HiVEL, M2D, STWAVE, BOUSS2D e CGWAVE.

SMS è diviso in moduli: Scatter, Map and Mesh. Il modulo Scatter utilizza dati anche disomogenei, per esempio dati batimetrici, e interpola questi dati in maglie e reticoli del modello. Il Modulo Map é usato per creare e manipolare modelli concettuali. L'utente può creare e definire attributi per oggetti caratteristici, come punti, archi e poligoni, che definiscono il sistema modellato. Immagini, come raster o fotografie possono essere utilizzate in questo processo e possono anche rendere l'output più facile da interpretare. Il Modulo Mesh e altri moduli sono usati per creare e implementare modelli numerici. Questi moduli consentono:

- (a) interazione grafica con editing delle maglie e della rete, condizioni al contorno, parametri del modello e materiali,
- (b) visualizzazione della configurazione del modello numerico e dei dati di output.

Ognuno dei moduli utilizzati per creare e gestire modelli numerici, può avere differenti collegamenti alle cosiddette "coverages" (utilities). Per esempio, il Modulo Mesh ha tante coverages, una per ognuno dei modelli supportati.

I risultati del modello numerico CGWAVE sono presentati di solito sotto forma di grafici contenenti le altezze d'onda in specifici punti d'analisi, interni all'area d'interesse. Il modello CGWAVE può rilasciare anche altri parametri fisici e, nel caso di simulazioni con singolo periodo e direzione, può calcolare la quota di pelo libero e la fase dell'onda, oltre a molte altre grandezze. Usando l'altezza e la fase dell'onda si può calcolare, in un secondo momento, la quota di pelo libero a step temporali in cui è stato suddiviso un singolo periodo dell'onda.

Il modello può essere usato, per esempio, per esaminare gli effetti del cambiamento di lunghezza od orientamento di un frangiflutti sulla sua azione schermante nei confronti degli ormeggi in progetto.

Grafici dell'altezza d'onda in funzione del periodo dell'onda in diversi punti interni allo specchio acqueo ridossato. Questi diagrammi possono essere usati per identificare i periodi d'onda a cui lo specchio acqueo ridossato è particolarmente sensibile. Con il modello CGWAVE possono essere esaminate le diverse alternative planimetriche, per selezionare lo schema planimetrico ottimale per lo stato di ridosso dello specchio acqueo protetto.

Nel caso in esame la maglia ad elementi finiti è stata generata in modo che il modello CGWAVE fosse rappresentativo della batimetria e delle strutture proposte, ed inoltre simulasse in modo corretto le onde che si propagano a tergo dell'opera.

Le proprietà riflettenti al contorno delle opere foranee in progetto sono state rappresentate nel modello CGWAVE assegnando appropriati coefficienti di riflessione (k_r) per ogni tipologia di struttura.

Un coefficiente di riflessione 1.0 indica che tutta l'energia dell'onda incidente viene riflessa, mentre un valore inferiore indica che parte dell'energia sarà dissipata.

In questo studio, per ogni tipologia di struttura, si sono assegnati i seguenti coefficienti di riflessioni inseriti nel modello CGWAVE:

- Spiaggia naturale coefficiente di riflessione pari a 0.25;
- Scarpate in scogli naturali 0.40;
- Banchine a parete verticale 0.99 (riflessione completa);

Si fa osservare che l'opera è sempre stata inserita nella modellazione del fondale a livello di batimetria. Per ogni simulazione eseguita con il modello CGWAVE sono necessarie le condizioni di moto ondoso al largo.

Il limite al largo del modello CGWAVE è stato ubicato in acque relativamente profonde, quindi ogni condizione d'onda incidente poteva essere assunta approssimativamente costante lungo il confine del modello. Utilizzando il modello matematico esposto, si è studiato lo stato di agitazione nello specchio liquido a tergo dell'opera, secondo le previsioni di progetto.

RISULTATI MODELLO

Come dati di input si sono considerate le caratteristiche ondose con tempi di ritorno di 10 e 100 anni per le direzioni soprarichiamate. Complessivamente, sono state condotte 20 simulazioni di agitazione interna (2 periodi di ritorno, 2 configurazioni portuali e 5 direzioni significative di provenienza).

I risultati di tutte le simulazioni sono elencati nella seguente tabella e nelle foto allegate a seguire.

Nello specifico, si sono andati a sintetizzare i risultati andando ad analizzare la condizione di agitazione presente all'imboccatura portuale (definita dall'unione delle due opere foranee di sopraflutto e sottoflutto), nel bacino interno del porto (quello corrispondente al bacino portuale esistente) e, per il solo caso di progetto, per il bacino esterno, compreso tra la nuova opera foranea di sopraflutto ed il sottoflutto.

MANTENIMENTO OPERE FORANEE ATTUALI CON DRAGAGGIO						
Tr 10 anni	Dir largo [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs sottocosta [m]	2.95	3.20	2.54	1.20	2.82
	Tp [s]	8.23	8.25	7.49	7.09	8.80
	H imboccatura [m]	2.12	2.23	1.71	1.09	1.99
	H bacino interno [m]	1.24	1.18	0.94	0.69	1.21
Tr = 100 anni	Dir largo [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs sottocosta [m]	3.90	4.46	3.77	1.52	3.75
	Tp [s]	9.34	9.63	8.99	7.91	10.07
	H imboccatura [m]	2.44	2.38	1.91	1.34	2.36
	H bacino interno [m]	1.35	1.46	1.19	0.83	1.38

Figura 32 - Tabella riassuntiva stato di agitazione portuale nella configurazione attuale del Porticciolo della bandita, considerando l'esecuzione di un solo dragaggio manutentivo dei fondali a -3.00 m s.l.m. per permettere l'accessibilità al porto ma senza interventi sulle opere foranee

STATO DI PROGETTO						
Tr 10 anni	Dir largo [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs sottocosta [m]	2.95	3.20	2.54	1.20	2.82
	Tp [s]	8.23	8.25	7.49	7.09	8.80
	H imboccatura [m]	1.11	1.26	1.3	0.5	0.75
	H bacino esterno [m]	0.39	0.46	0.48	0.15	0.38
Tr = 100 anni	Dir largo [°N]	0	22.5	45	315	337.5
	Hs sottocosta [m]	3.90	4.46	3.77	1.52	3.75
	Tp [s]	9.34	9.63	8.99	7.91	10.07
	H imboccatura [m]	1.22	1.72	1.58	0.59	0.91
	H bacino esterno [m]	0.49	0.57	0.64	0.33	0.52
	H bacino interno [m]	0.37	0.39	0.45	0.14	0.36

Figura 33 - Tabella riassuntiva stato di agitazione portuale nella configurazione prevista dal Progetto, con il prolungamento delle opere foranee per la messa in sicurezza

MIGLIORAMENTO DELLE CONDIZIONI DI SICUREZZA - RIDUZIONE DELL'AGITAZIONE ALL'IMBOCCATURA E NEL BACINO INTERNO						
Tr 10 anni	Dir largo [°N]	0.00	22.50	45.00	315.00	337.50
	Hs sottocosta [m]	2.95	3.20	2.54	1.20	2.82
	Tp [s]	8.23	8.25	7.49	7.09	8.80
	H imboccatura [m]	-48%	-43%	-24%	-54%	-62%
	H bacino interno [m]	-81%	-77%	-65%	-84%	-81%
Tr = 100 anni	Dir largo [°N]	0.00	22.50	45.00	315.00	337.50
	Hs sottocosta [m]	3.90	4.46	3.77	1.52	3.75
	Tp [s]	9.34	9.63	8.99	7.91	10.07
	H imboccatura [m]	-50%	-28%	-17%	-56%	-61%
	H bacino interno [m]	-73%	-73%	-62%	-83%	-74%

Figura 34 – Tabella riassuntiva della riduzione dell'agitazione interna o all'imboccatura del porto, tra il caso progetto rispetto al caso di esempio di mantenimento delle opere foranee esistenti

Quello che è possibile osservare è come nel caso di mantenimento delle opere foranee esistenti il porto non ha praticamente alcuna protezione dello specchio acqueo interno, né all'imboccatura portuale, dove si registrano anche con un tempo di ritorno di soli 10 anni dei valori di agitazione che potrebbero compromettere ogni condizione di sicurezza, causando inevitabilmente ingenti danni ambientali dovuti al grave danneggiamento ed al possibile sversamento di oli o carburanti da parte delle imbarcazioni che fossero ormeggiate nello specchio acqueo portuale.

Difatti, diverse pubblicazioni internazionali, tra cui le “Guidelines for Marina Design – 2016” del PIANC o “Planning and desing guidelines for Small Craft Harbors – 2020” dell’American Society of Civil Engineer stabiliscono, rispettivamente, un valore massimo di agitazione di $H_s = 0.50$ m ed $H_s = 2$ piedi (circa 60 cm) nell’ambito di un porto frequentato da imbarcazioni di piccola dimensione, come nel caso in esame.

Nello specifico, con la realizzazione delle opere in progetto è possibile ottenere importanti vantaggi rispetto al caso – esempio in cui si è considerato un solo dragaggio dello specchio acqueo portuale, senza ovvero provvedere alla messa in sicurezza del porto con il prolungamento delle esistenti opere foranee.

In particolare si può notare come, per le mareggiate con tempo di ritorno pari a 10 anni, **con lo stato attuale della struttura portuale è possibile osservare un agitazione interna sino ad $H_s = 1.24$ m** (direzione di provenienza a largo $0^\circ N$), ed addirittura $H_s = 1.46$ m per $Tr = 100$ anni, **mentre nello stato di progetto nella condizione peggiore si osserva $H_s = 0.33$ m** nell’equivalente bacino interno (direzione di provenienza a largo $45^\circ N$), ovvero un massimo di $H_s = 0.45$ m per $Tr = 100$ anni, **per cui mediamente si osservano riduzioni anche superiori all’ 80%. Si evidenzia che anche per $Tr = 100$ anni la configurazione di progetto riesce a garantire il rispetto delle condizioni indicate dalle linee guida internazionali già citate.**

Stesso discorso è sviluppabile nell’agitazione all’imboccatura portuale, di fondamentale importanza per eventuali natanti che dovessero provare a cercare rifugio entrando nella struttura portuale in caso di una mareggiata. Nello stato di fatto del porto questa è completamente esposta (H_s sino ad 2.28 m per $Tr = 10$ anni e $H_s = 2.38$ per $Tr = 100$ anni), condizione che mette ad estremo rischio qualsiasi mezzo che provi ad ormeggiare al porto, in cui saranno presenti onde frangenti anche per mareggiate quasi “ordinarie” ovvero che avvengono anche più volte annualmente. Anche in questo caso la soluzione di progetto riesce a garantire prestazioni molto superiori in quanto, oltre a garantire la presenza di adeguati bacini di evoluzione e spazi di manovra in acque ridossate, la massima agitazione all’imboccatura portuale risulta mediamente pari ad $H_s = 1.30$ m per $Tr = 10$ anni ed $H_s = 1.72$ m per $Tr = 100$ anni.

Complessivamente, si è dimostrato come la previsione di un allungamento ed adeguamento delle opere foranee esistenti sia necessario per garantire il rispetto di standard di sicurezza accettabili in caso di eventi meteomarini, a vantaggio della salvaguardia della vita e della salute degli utilizzatori del porto oltre che dell’ambiente, impedendo danneggiamenti significativi alle barche presenti presso lo specchio acqueo.

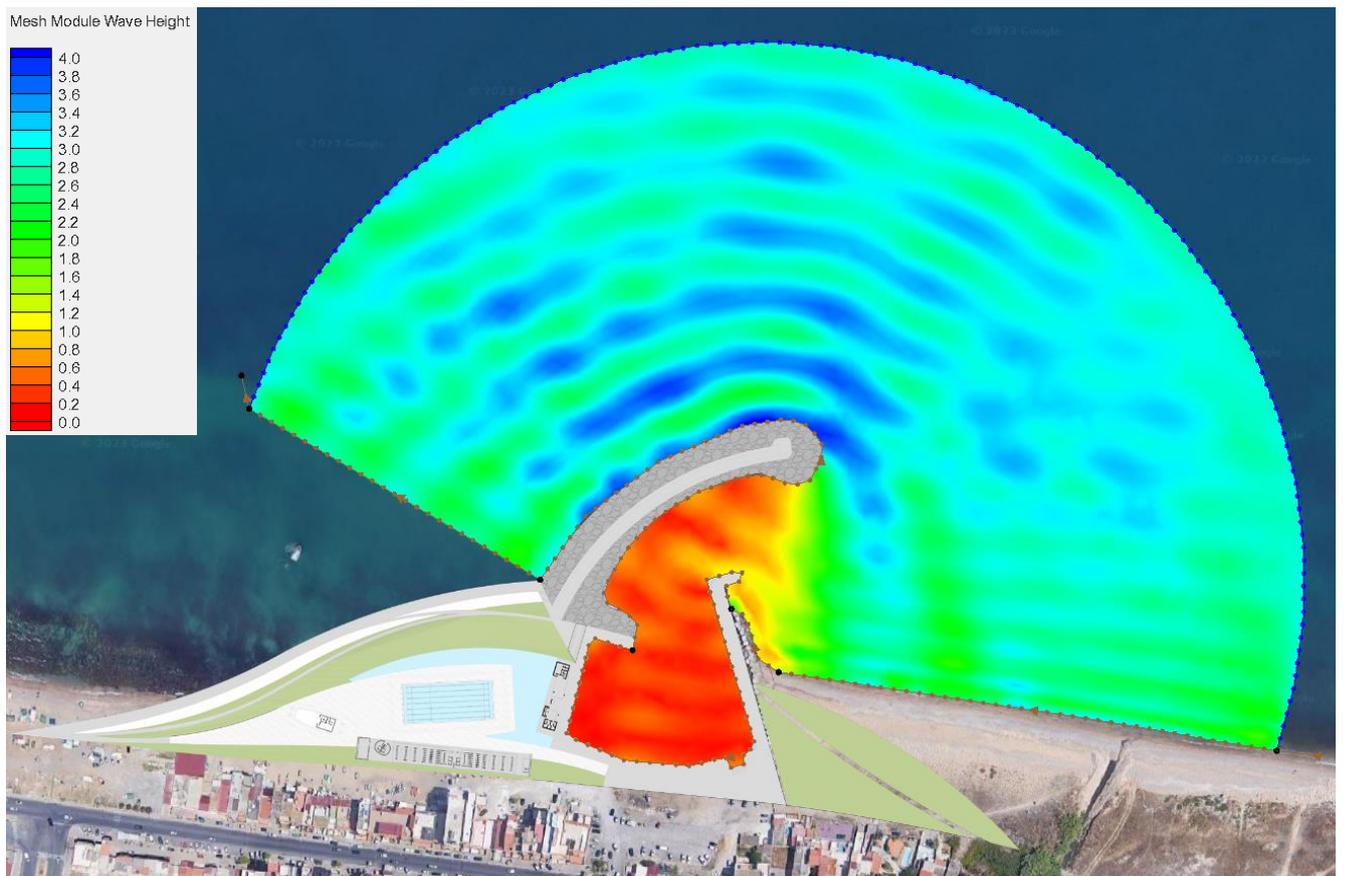
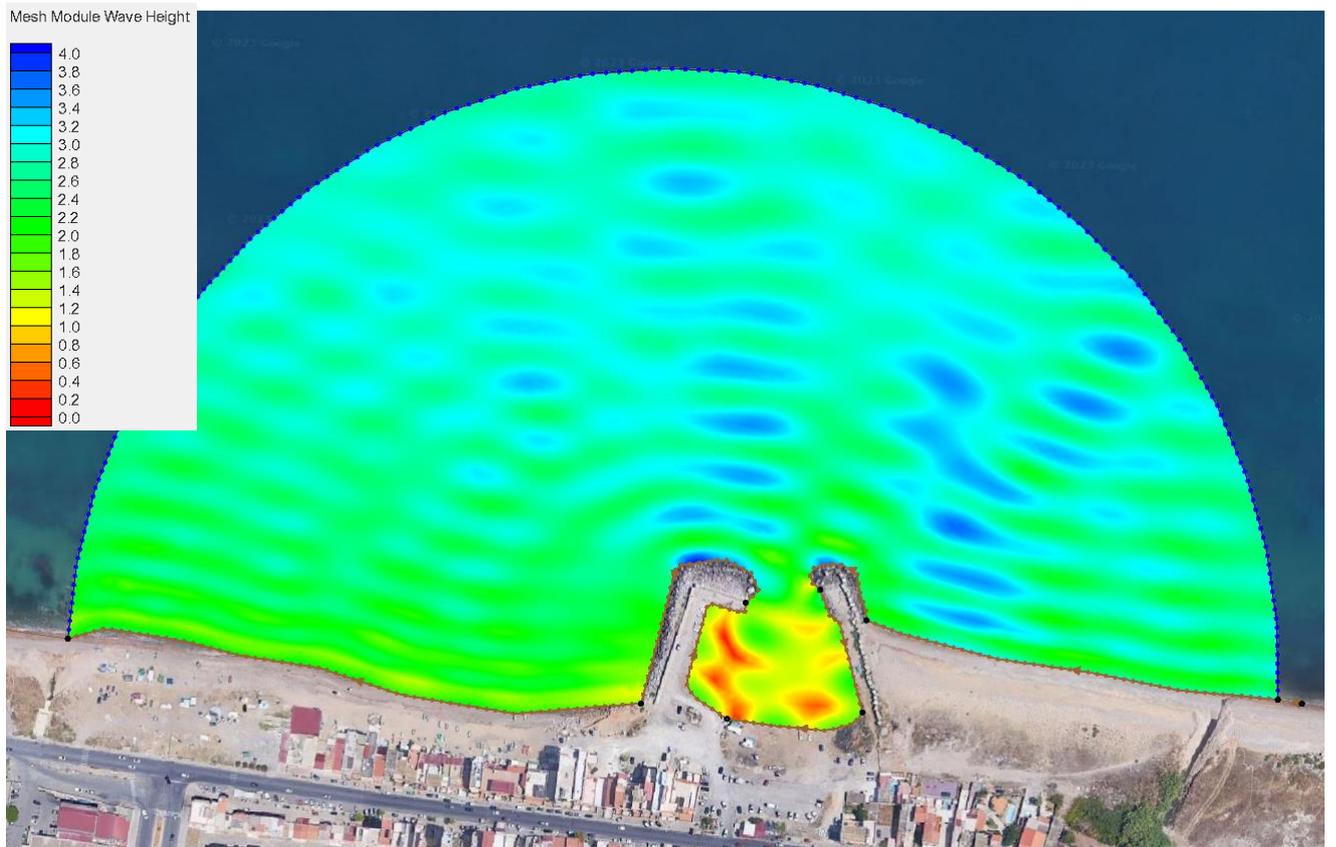


Figura 35 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 0° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

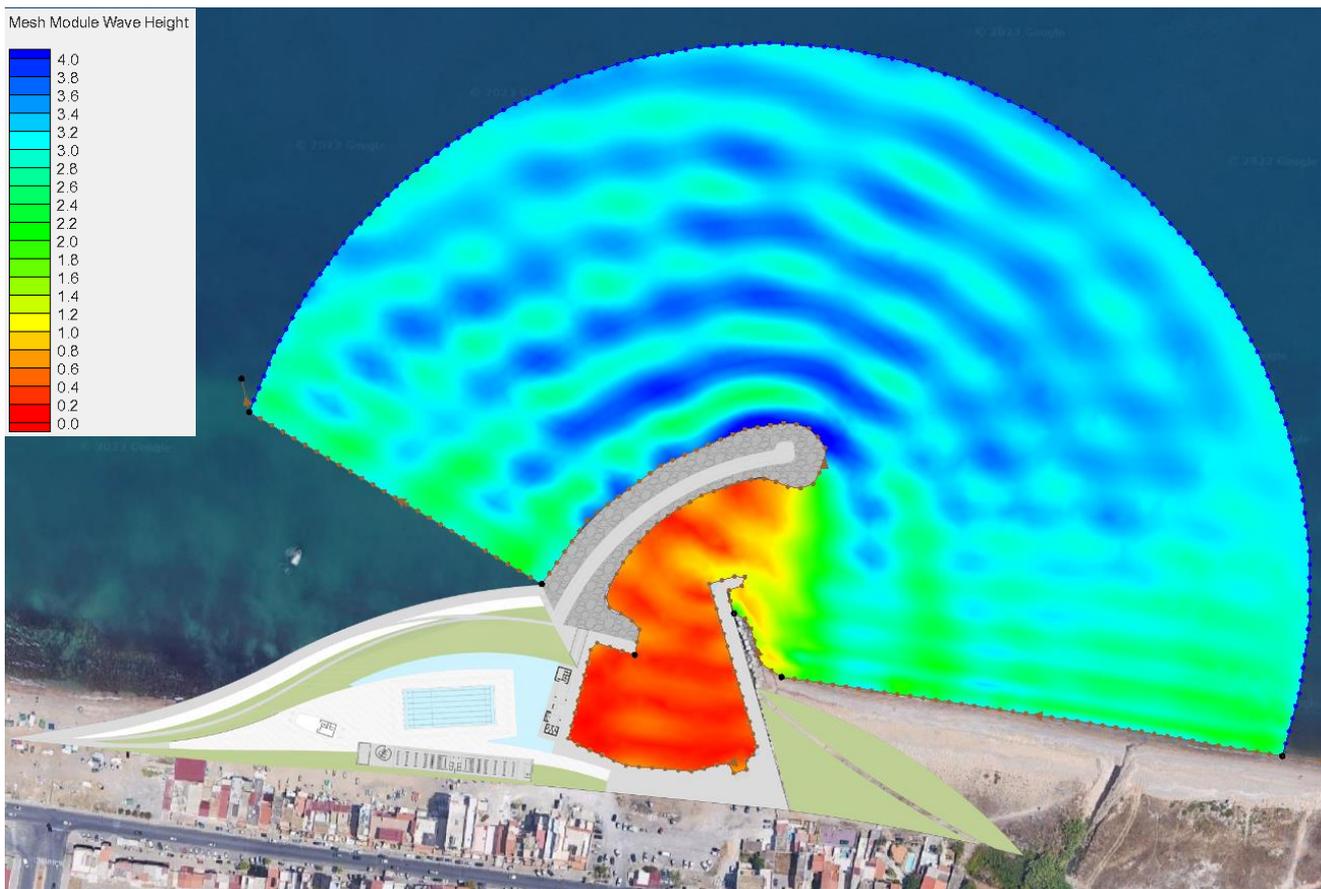
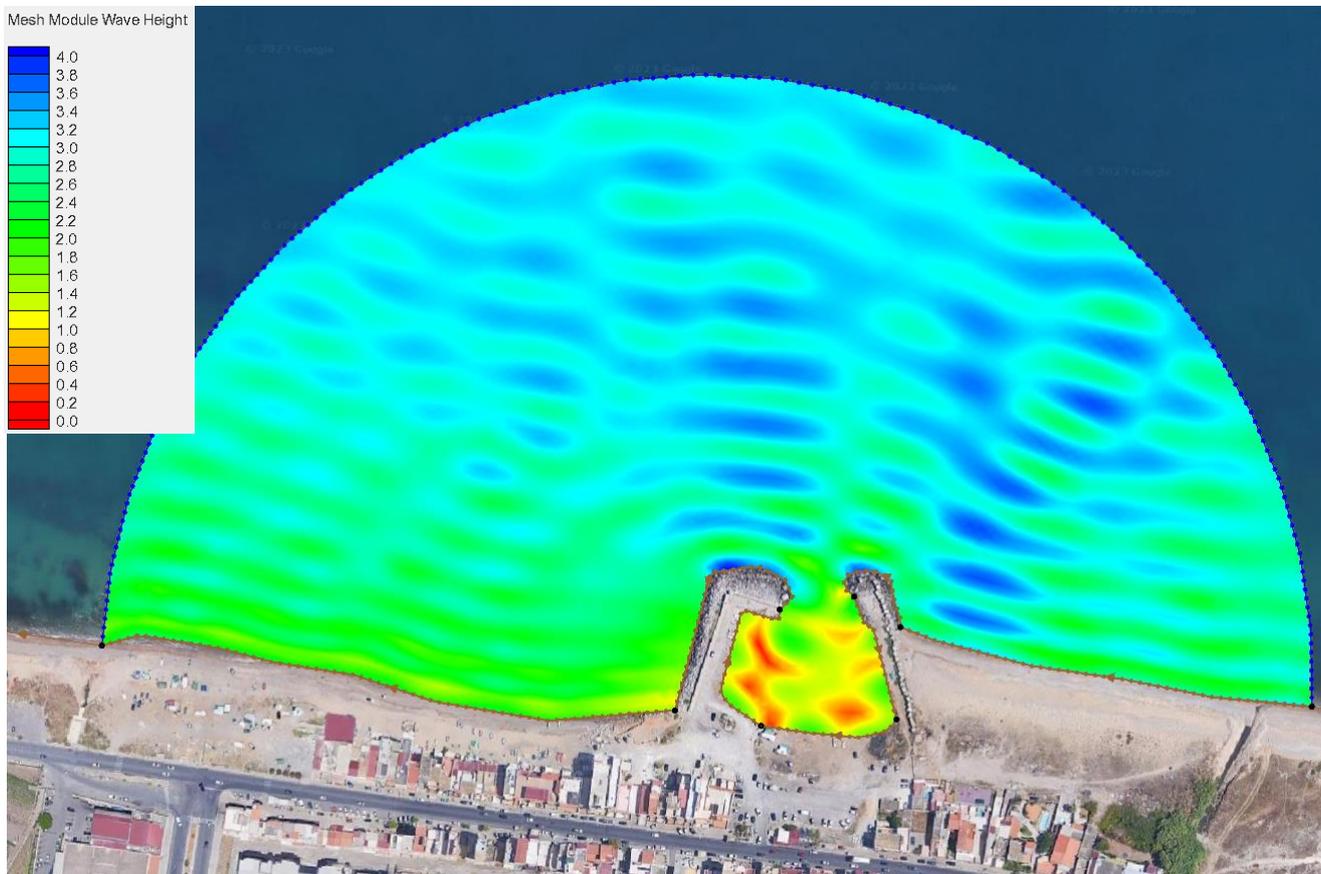


Figura 36 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 22.5° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

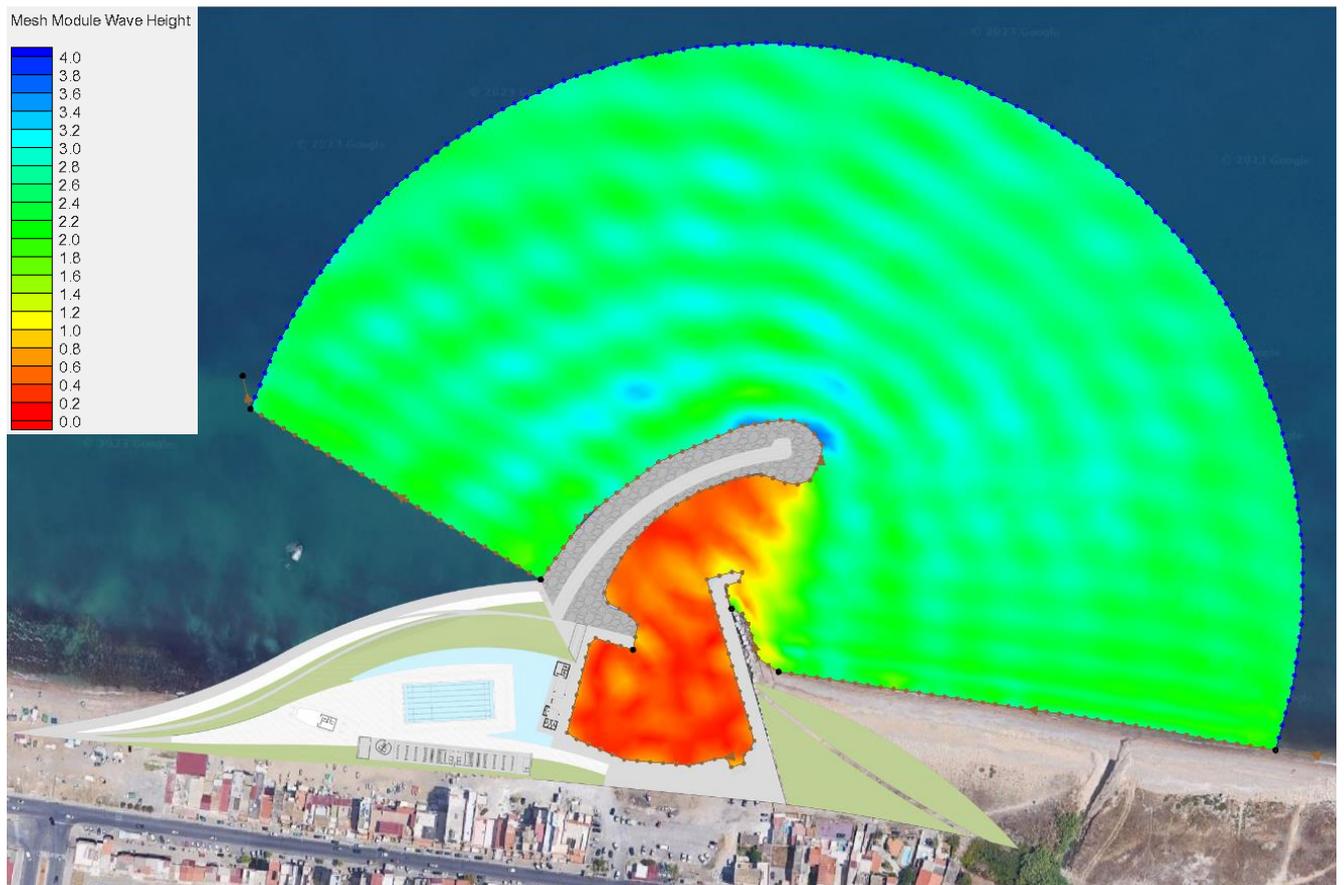
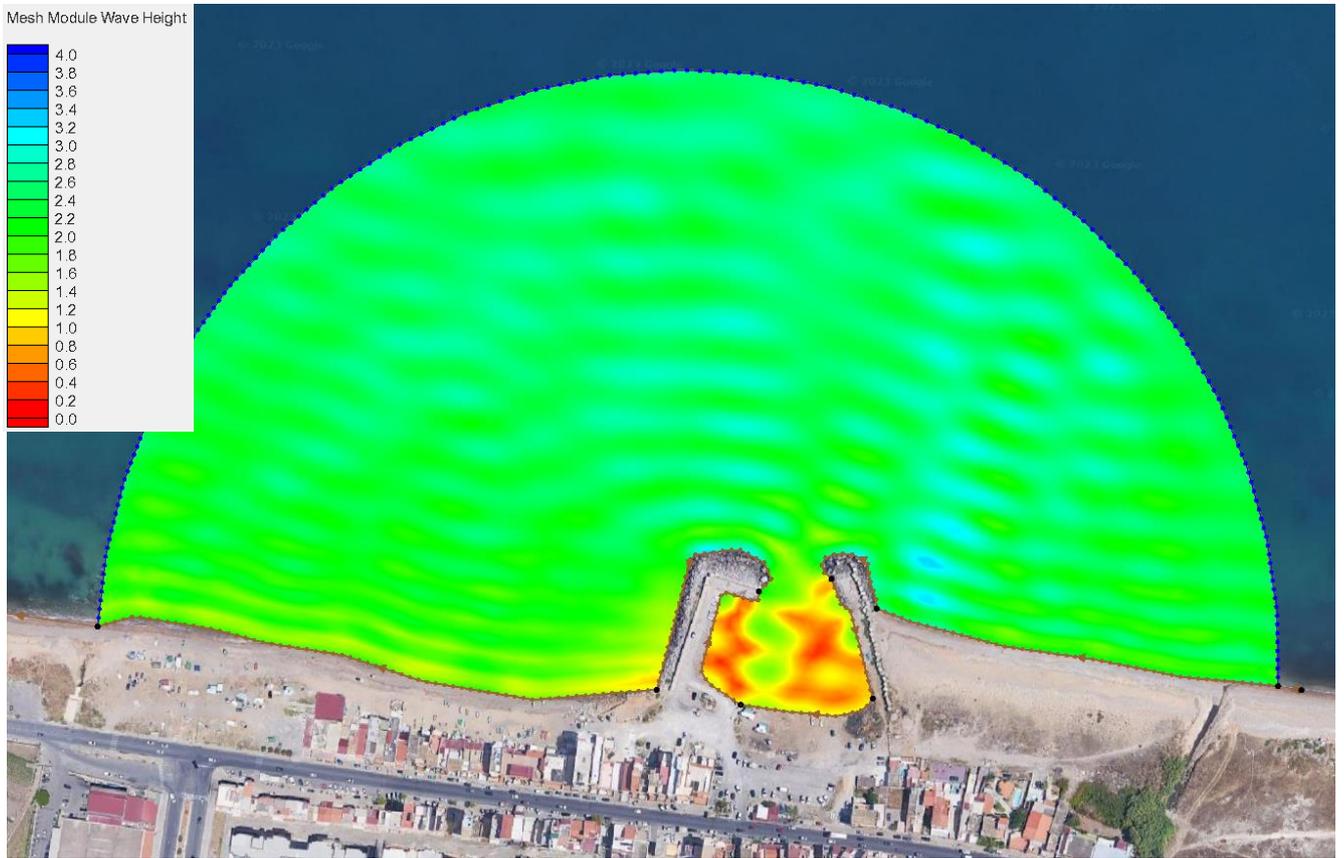


Figura 37 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 45° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

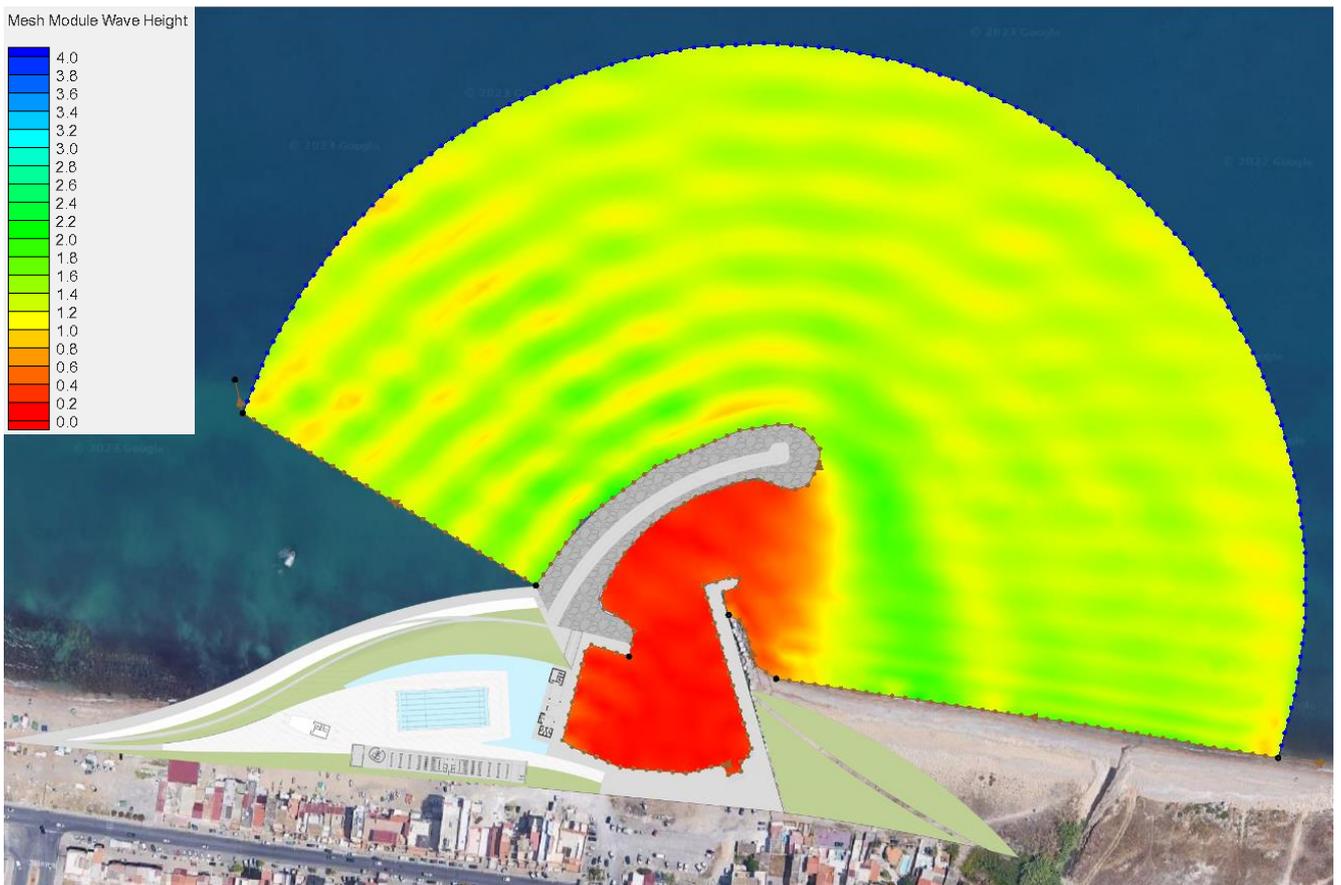
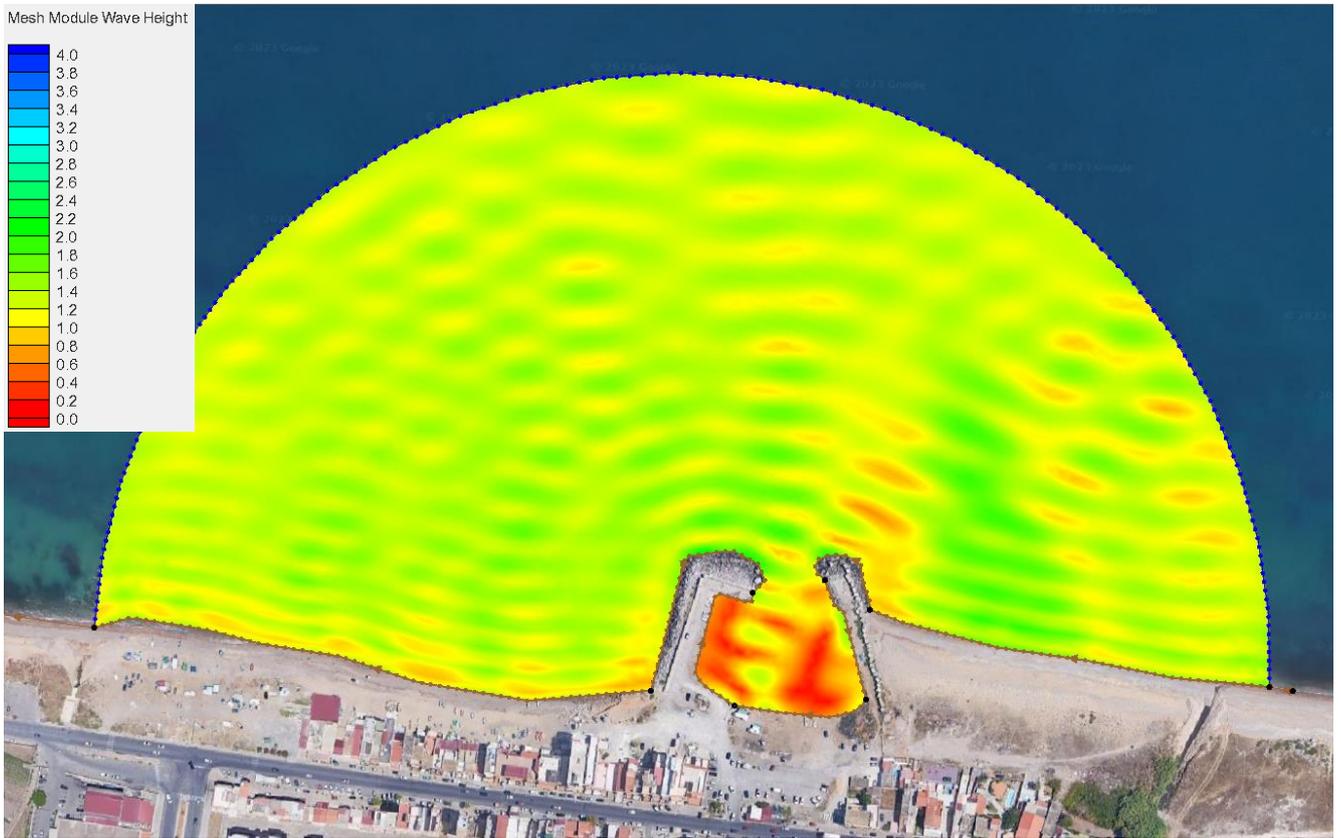


Figura 38- Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 315° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

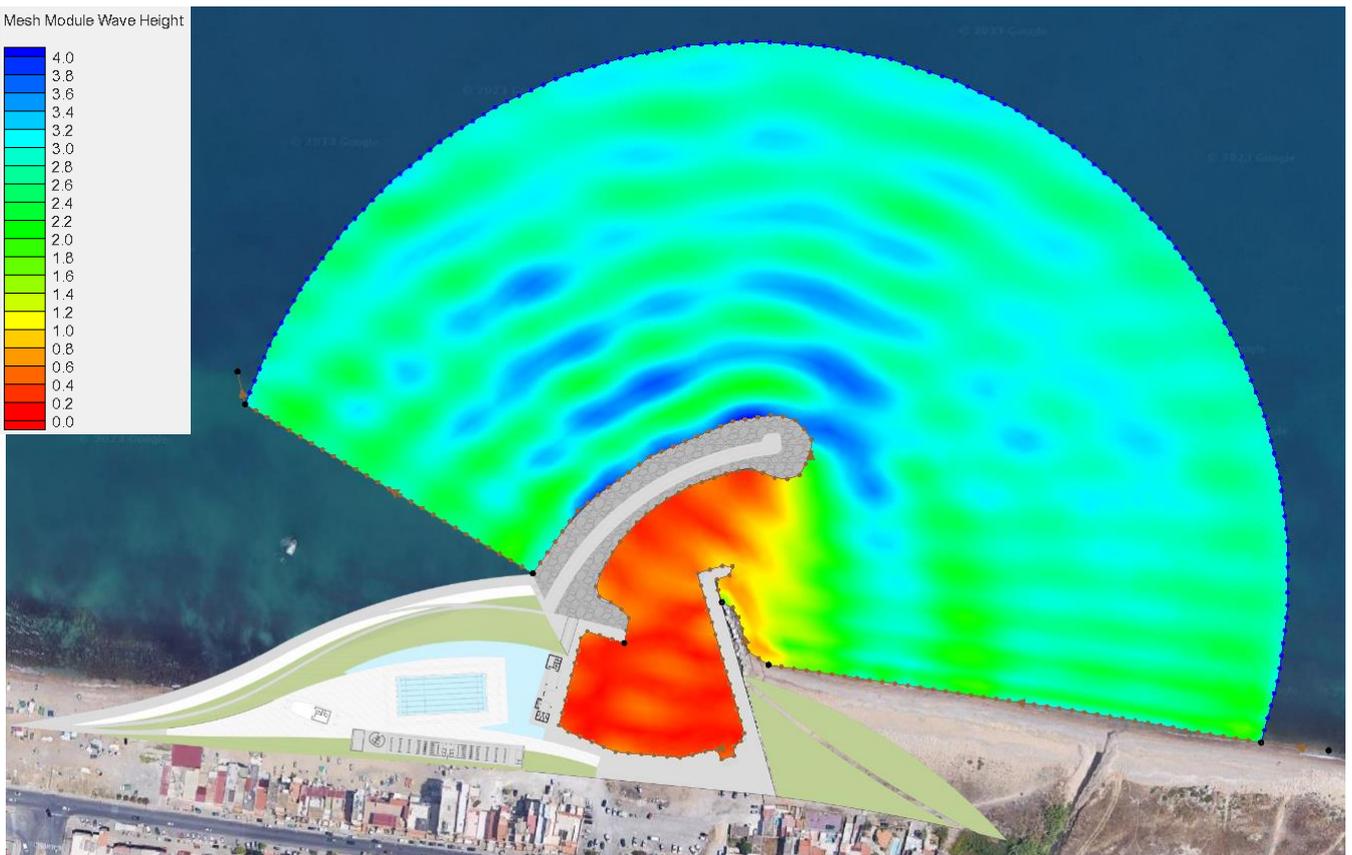
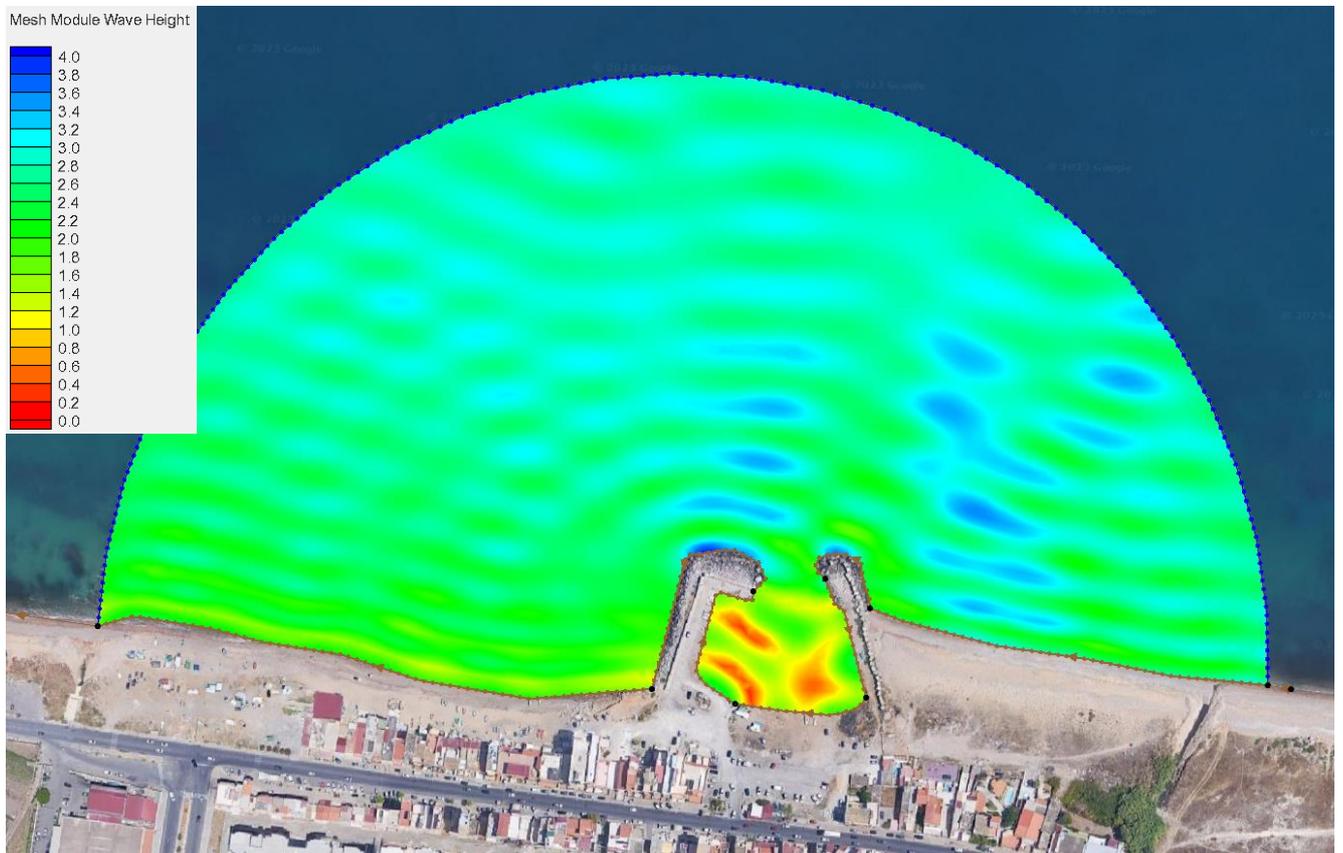


Figura 39 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 337.5° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

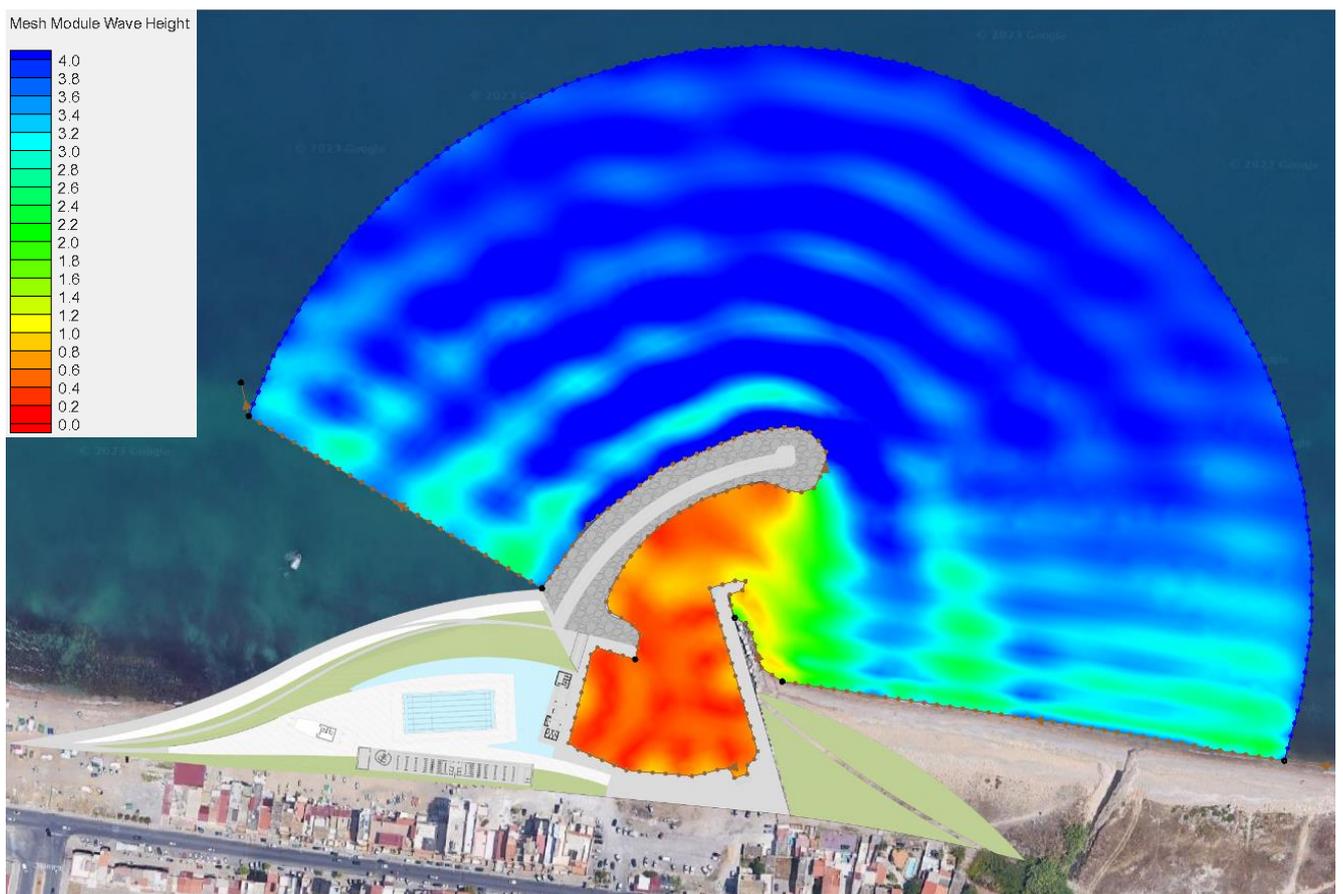
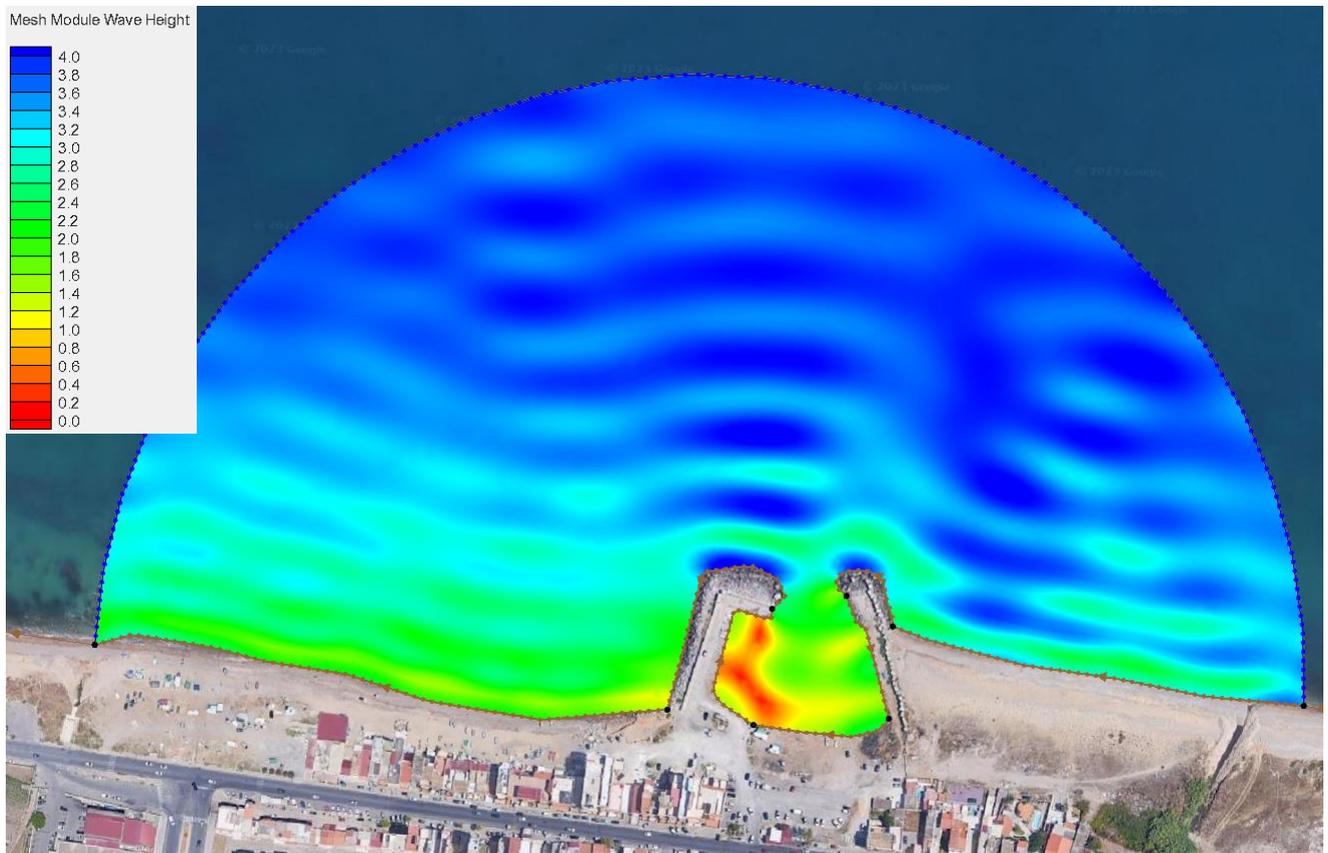


Figura 40 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 0° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

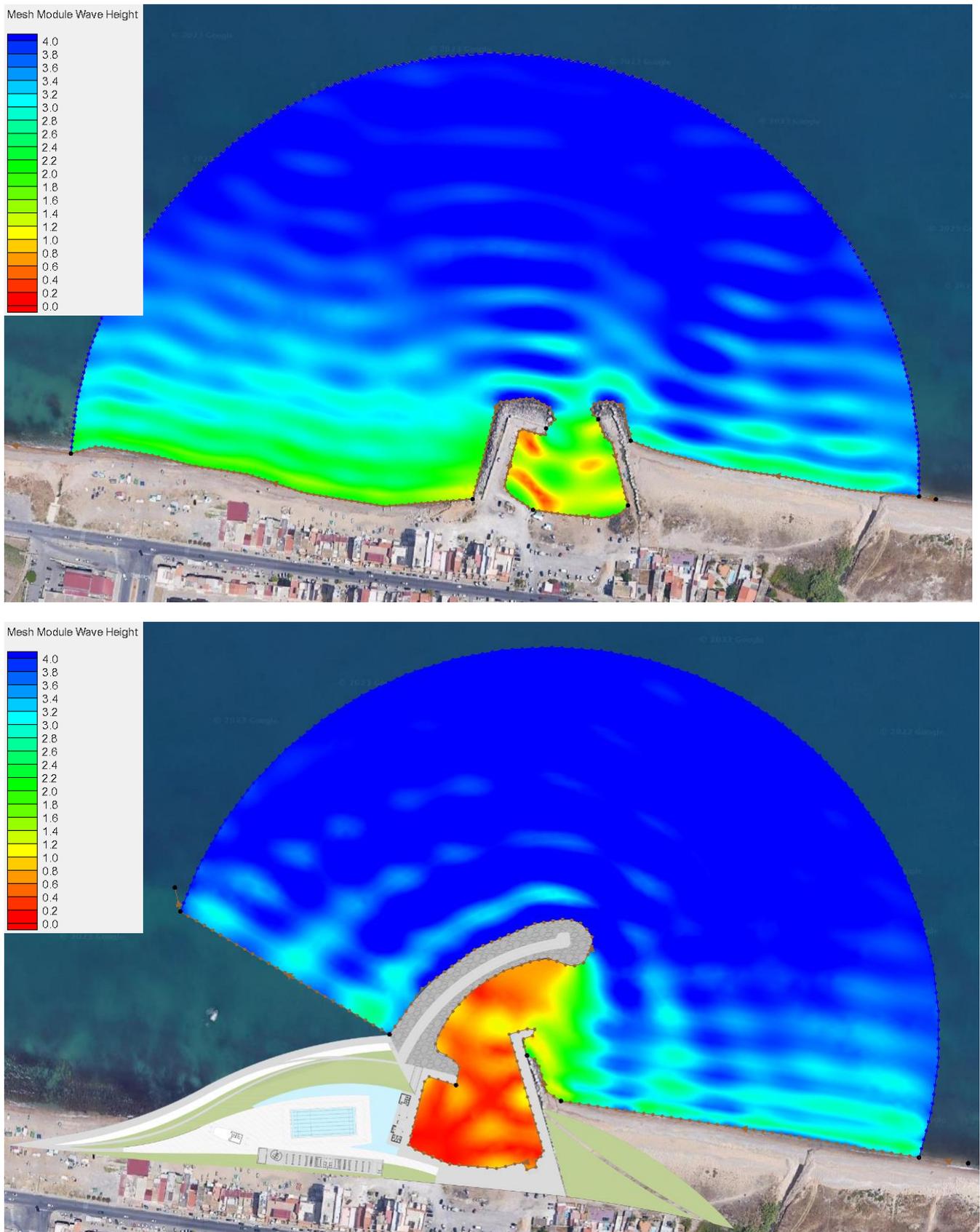


Figura 41 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 22.50° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

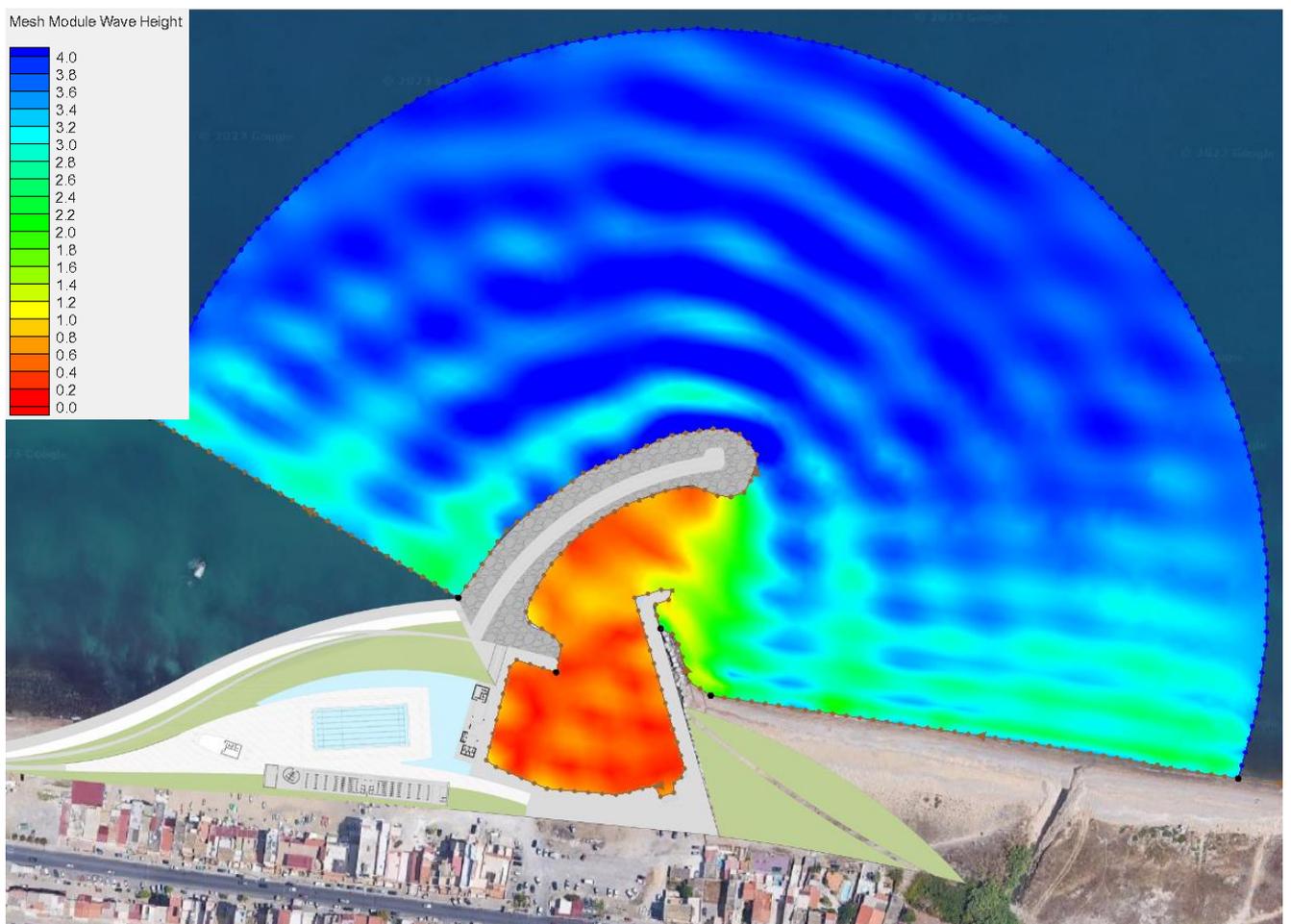
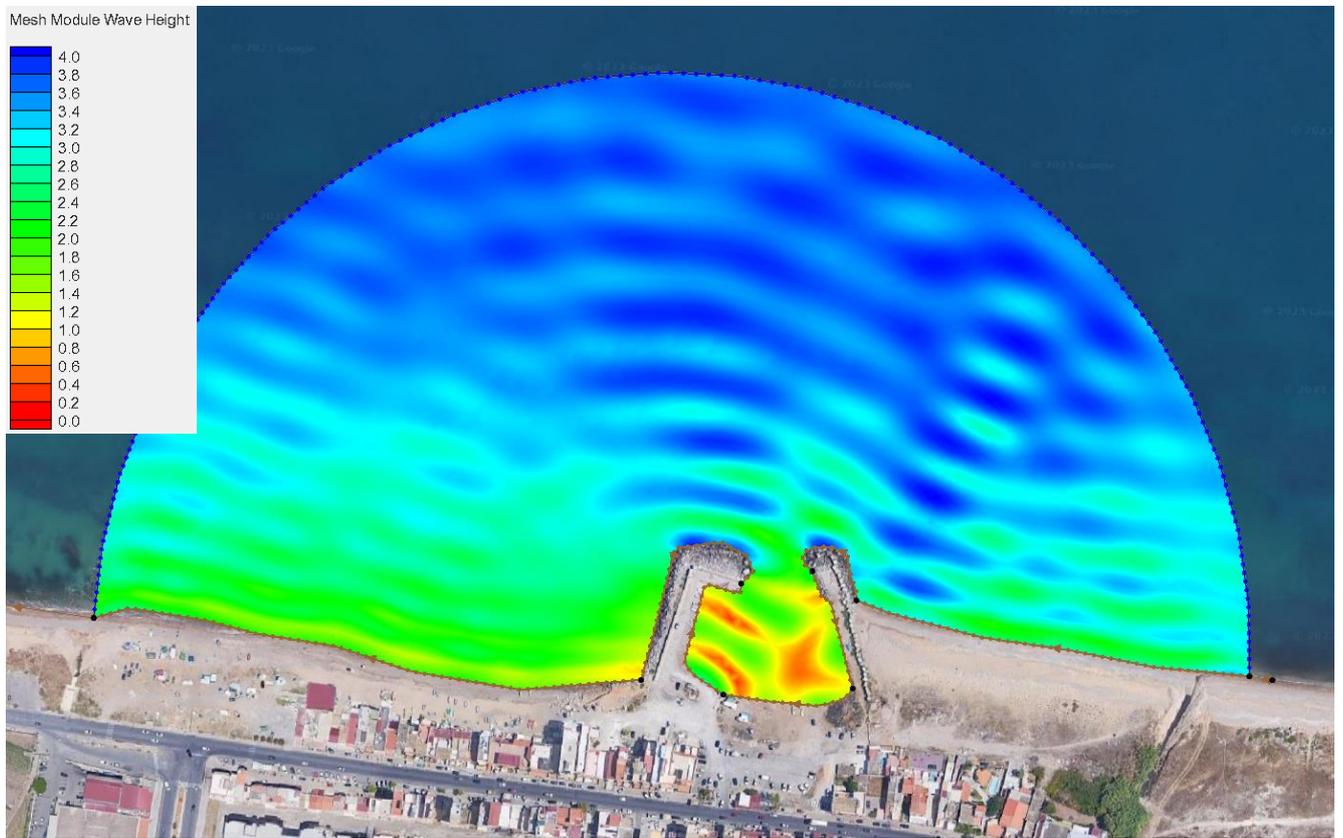


Figura 42 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 45° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

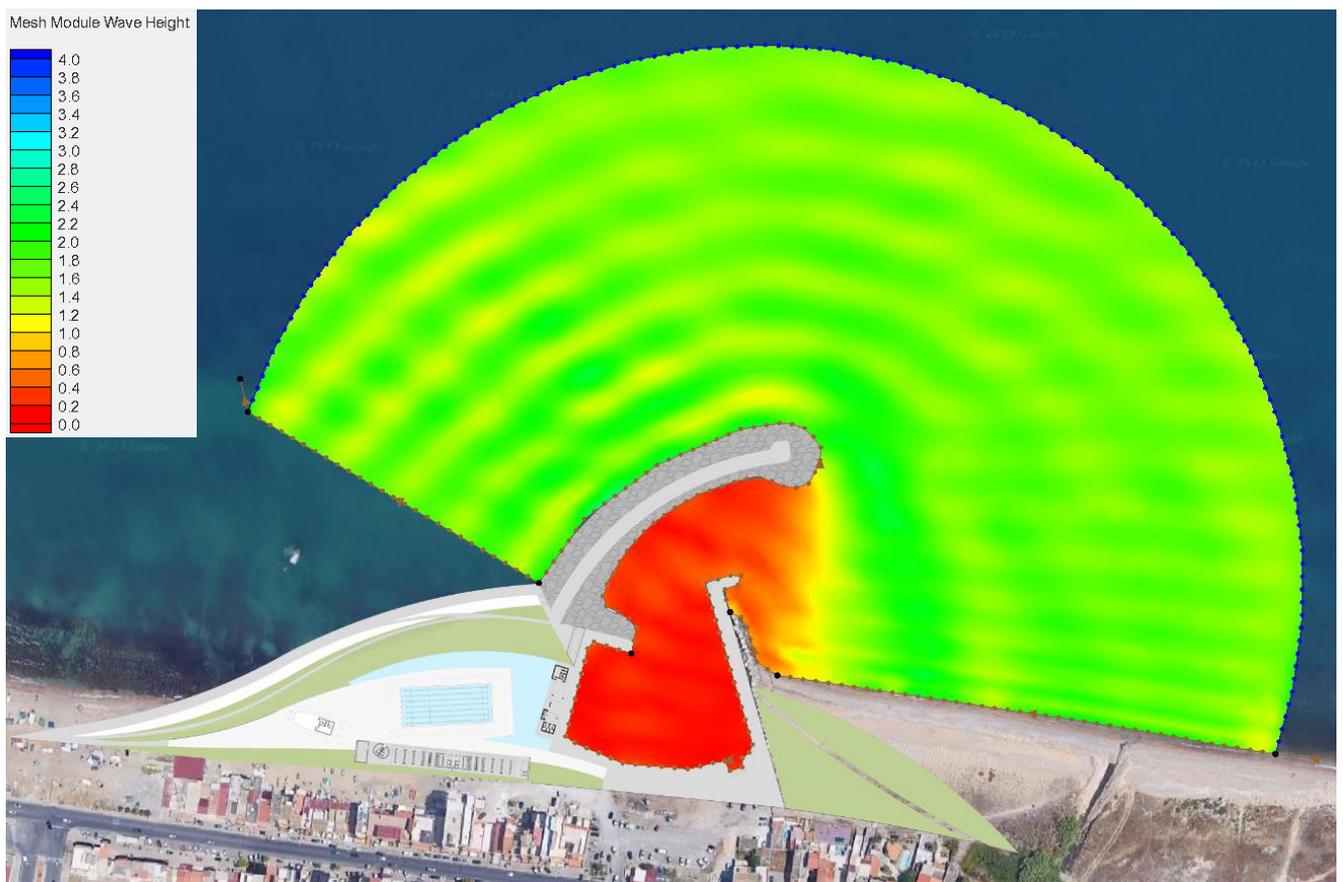
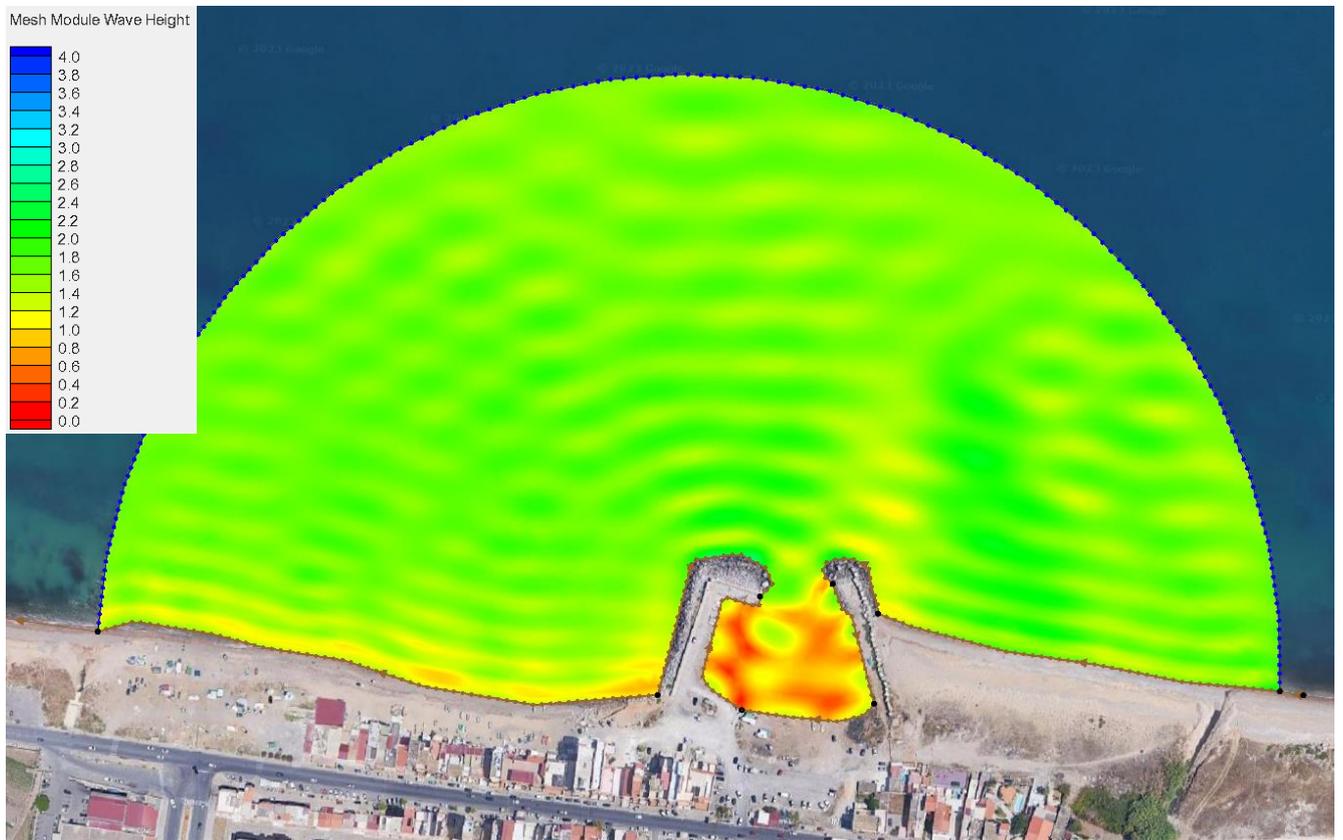


Figura 43 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 315° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

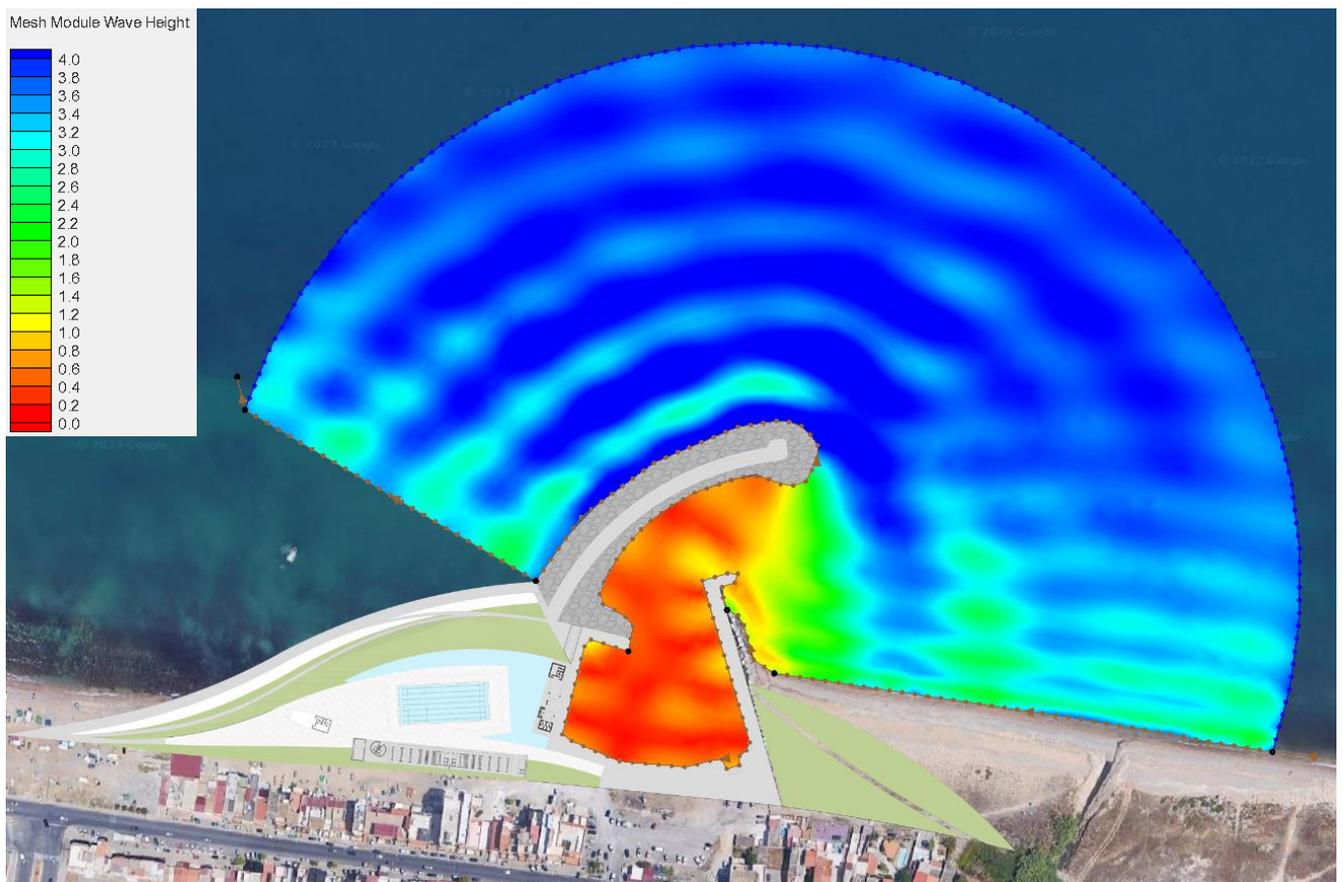
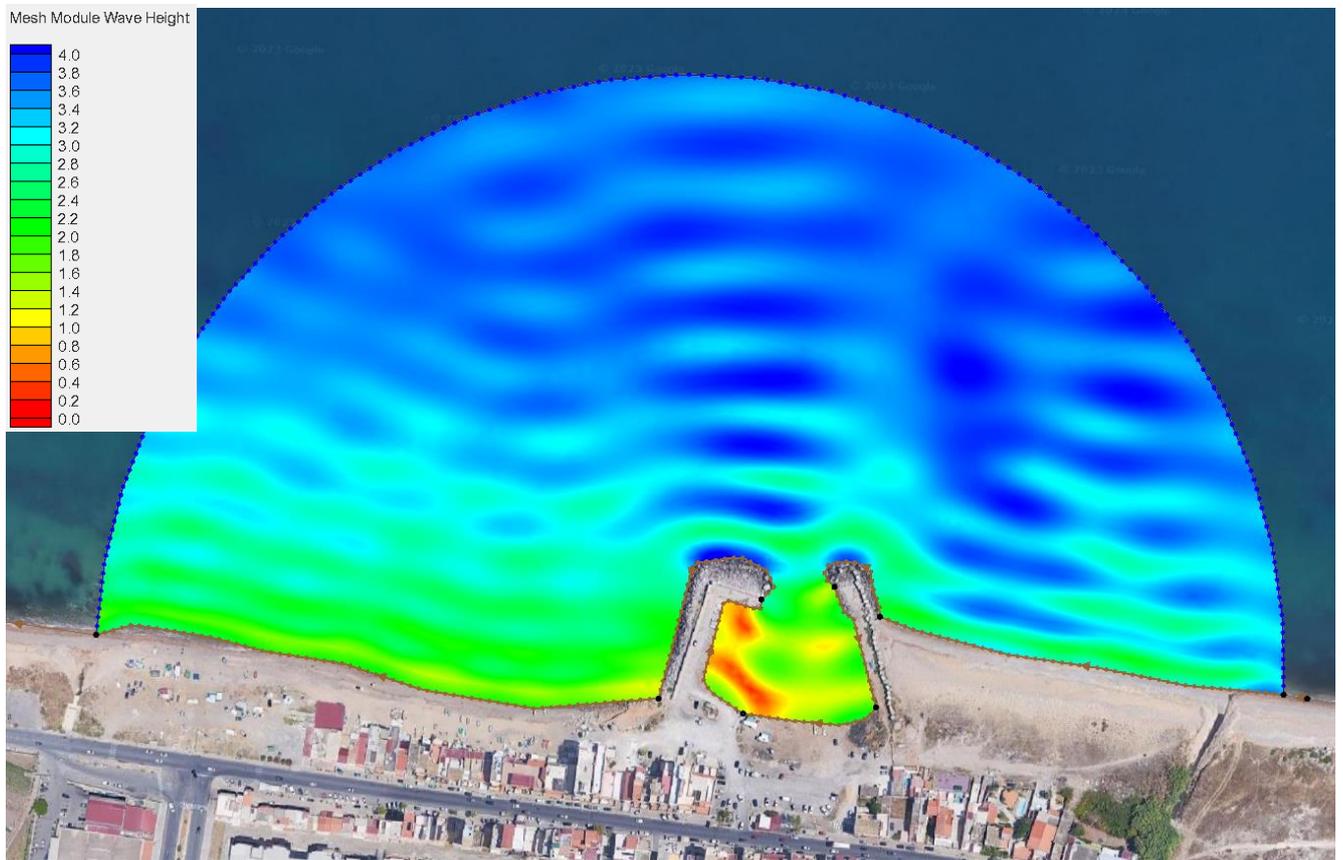


Figura 44 - Tr 100 anni – Direzione di provenienza a largo 337.50° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

6 Considerazioni sul regime della dinamica costiera

Il Porto della bandita è ubicato nella costa sud del Comune di Palermo e ricade nel tratto di litorale compreso tra due promontori denominati “Sperone” e “Acqua dei Corsari”, formati negli anni '60-'70 da riporti antropici

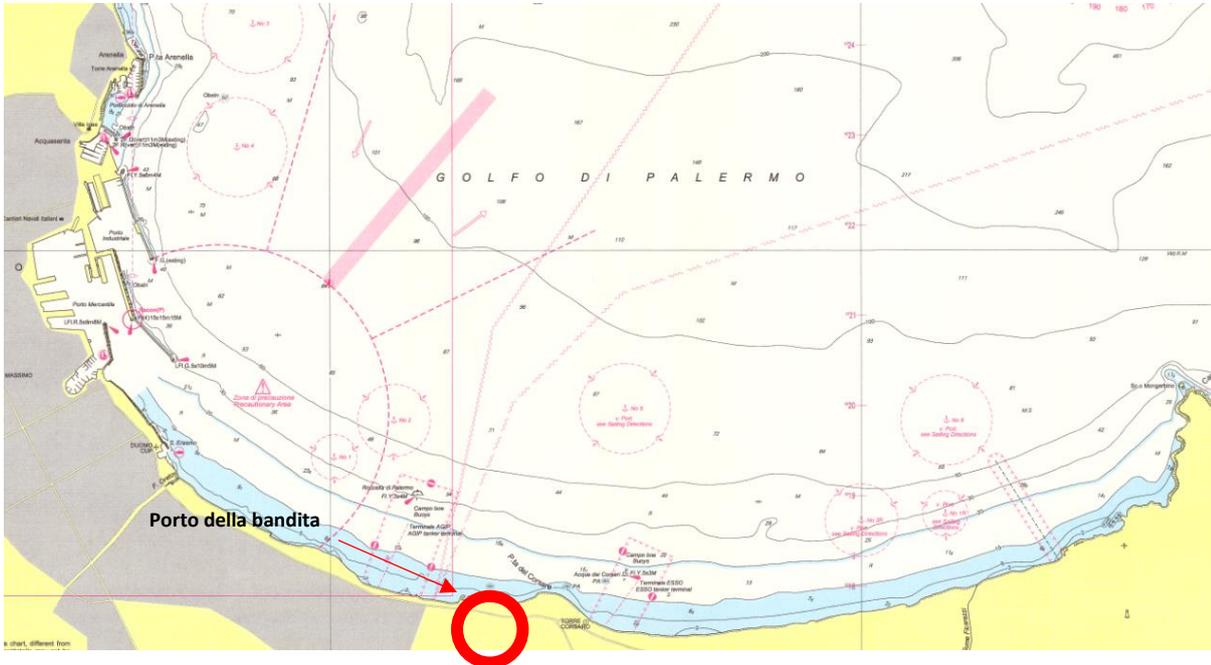


Figura 45 - Estratto Carta Nautica del Golfo di Palermo



Figura 46 - Foto aerea Golfo di Palermo estratta da Google Earth



Figura 47 - Localizzazione del Porto della Bandita nella costa sud del comune di Palermo

Tale tratto di litorale ha subito, nel tempo, delle evoluzioni della linea di riva dovute al rimodellamento idrodinamico dei due promontori che hanno alimentato il trasporto solido nella fascia costiera compresa da Sant'Erasmus a Capo Mongerbino.

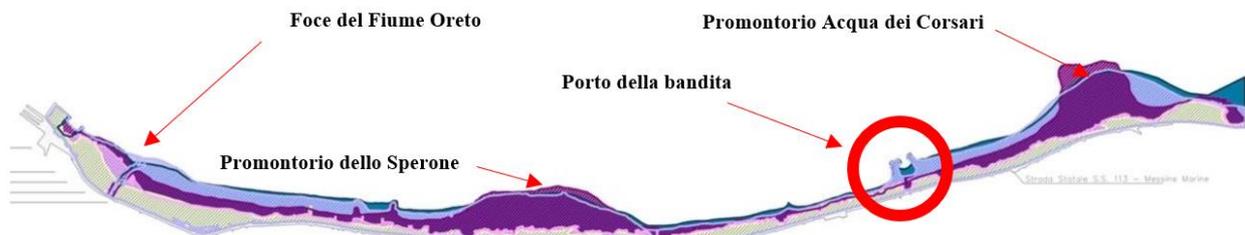


Figura 48 – Evoluzione morfodinamica della linea di riva

La struttura portuale ricade al centro del golfo di Palermo ed è esposta alle mareggiate provenienti da settore compreso da N-NW (Punta Priola) e NE-E (Capo Mongerbino).

L'attuale configurazione del porto è formata da due moli convergenti, di cui quello di ponente è suddiviso in due tronchi, il primo in direzione N per uno sviluppo di circa 75m e il secondo ortogonale al primo per uno sviluppo di circa 30m, mentre il molo di levante è costituito da una scogliera che estende in direzione N-NW per circa 80,00m.

Lo specchio acqueo portuale è esposto alle mareggiate provenienti dal settore di traversia. (Figura 49) in conseguenza alla configurazione dell'imboccatura del porto, della larghezza di circa 30,00m insistente attualmente su fondali di -2,00m s.l.m.m., che è completamente aperta verso il settore di traversia.

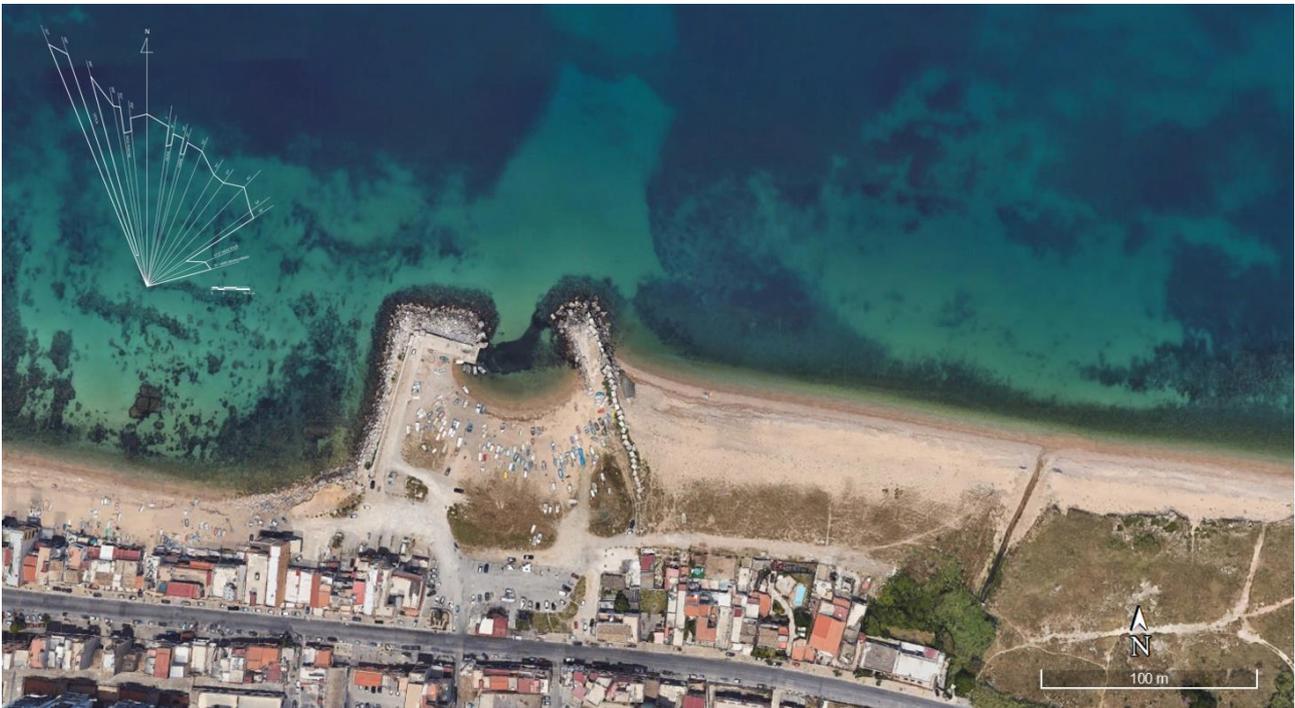


Figura 49 - Foto aerea Porto della Bandita

Il Litorale è inserito in un contesto geomorfologico costiero, fortemente influenzato dalle manipolazioni antropiche intervenute nel corso del tempo.

In particolare, a sud del Porto di Sant'Erasmus e a ponente del promontorio dello Sperone è presente la Foce del Fiume Oreto che sottende un bacino di 127,52 km² come riportato nella relazione Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) e che ha influenzato la dinamica costiera di tutta l'unità fisiografica.

Le modifiche antropiche del litorale del Golfo sinteticamente consistono, a Nord nelle opere marittime del Porto di Palermo e del Porticciolo di Sant'Erasmus, nelle opere idrauliche dell'Oreto e nelle discariche di detriti di riporto, che ingombrano la fascia costiera della foce e si estendono per lunghi tratti verso sud, costituendo spiagge e scarpate di terrapieni, con spessori di oltre 10 m. Tutto il litorale del golfo, escludendo brevi tratti a scogliera in corrispondenza dei promontori montuosi estremi del golfo, è completamente antropizzato; in particolare il tratto di litorale sud del Golfo di Palermo, in vari tratti, è ricoperto da vaste e potenti plaghe di riporto postbellici, che celano completamente la sua costituzione naturale originaria (Promontorio dello Sperone e Promontorio di Acqua dei Corsari).

In definitiva gli elementi che interferiscono con la dinamica costiera del golfo di Palermo, sono costituiti dalle opere portuali, dallo sbocco del F. Oreto e dai promontori costituiti da inerti lungo il litorale e sull'apparato di foce.

Nel tratto di costa dal Porto di Sant'Erasmus a Capo Mongerbino, la dinamica sedimentaria è alimentata dagli apporti del F. Oreto e il F. Ficarazzi e la distribuzione naturale dei sedimenti avviene verso il largo per le frazioni più fini, e prevalentemente verso sud per quelle medie e grossolane, dove vengono distribuite e spiaggiate dalle dinamiche marine sottocosta lungo il litorale, commiste all'erosioni dei promontori di "Sperone" e "Acqua dei Corsari".



In particolare, il litorale del Golfo Sud presenta un aspetto caotico per i numerosi corpi a discarica abbandonati in sequenza continua fino a ben oltre la foce dell'Oreto, lungo tutto il litorale comunale per circa 7 km, fino ai sistemi dunari sabbiosi nel territorio di Ficarazzi, dove il sistema costiero riacquista relitti di naturalità.

La fascia costiera interposta è ricoperta dai detriti di riporto che si ritrovano a ricoprire gli affioramenti naturali, celando il passaggio fra le alluvioni di foce del F. Oreto, i sedimenti naturali di spiaggiamento, laddove originariamente presenti, e gli affioramenti del substrato, costituito dalle formazioni pelitiche e calcarenitiche pleistoceniche.

Negli ultimi anni interventi parziali di bonifica hanno restituito l'andamento morfologico di spiaggia ad alcuni tratti del litorale, con sedimenti misti di sabbie grossolane, ciottoli e brecce di riporto, rielaborati dalle dinamiche costiere degli ultimi decenni. È difficilmente distinguibile, sia a livello sedimentario che morfologico, l'elemento naturale da quello antropico.

Il Porto della Bandita ricade nell'Unità fisiografica del P.A.I. n.16-17 Tav.11 del 2006, il litorale compreso tra i promontori dello "Sperone" e di "Acqua dei Corsari", si presenta con una costa bassa e ciottolosa. Nel P.A.I. non sono riportati eventi di arretramento o avanzamento della linea di riva ovvero aree in stato di Pericolosità e/o Rischio così come si evince dagli stralci cartografici estratti del PAI Tav. n.11 per: **i)** tipologia costiera (Figura 50); **ii)** Evoluzione della linea di costa (Figura 51); **iii)** Pericolosità e/o rischio (Figura 52).

Golfo Sud di Palermo, ed in particolare dal Porto di Sant'Erasmus al tratto di litorale antistante a Ficarazzi.

Dall'evoluzione della linea di riva è possibile evincere che nel passato una notevole mobilitazione iniziale dei riporti antropici dei due promontori "Sperone" e "Acqua dei Corsari" e la conseguente esposizione della struttura portuale a fenomeni di insabbiamento.

Lo specchio acqueo, nel corso degli anni è stato sottoposto a diversi interventi manutentivi di escavazione dei fondali che hanno consentito l'uso del bacino portuale fino all'inizio degli anni 2000.

Successivamente lo specchio acqueo non è stato più soggetto a lavori di manutenzione e allo stato attuale è insabbiato per circa il 90% come si evince dalle fotografie riportate in Figura 53.



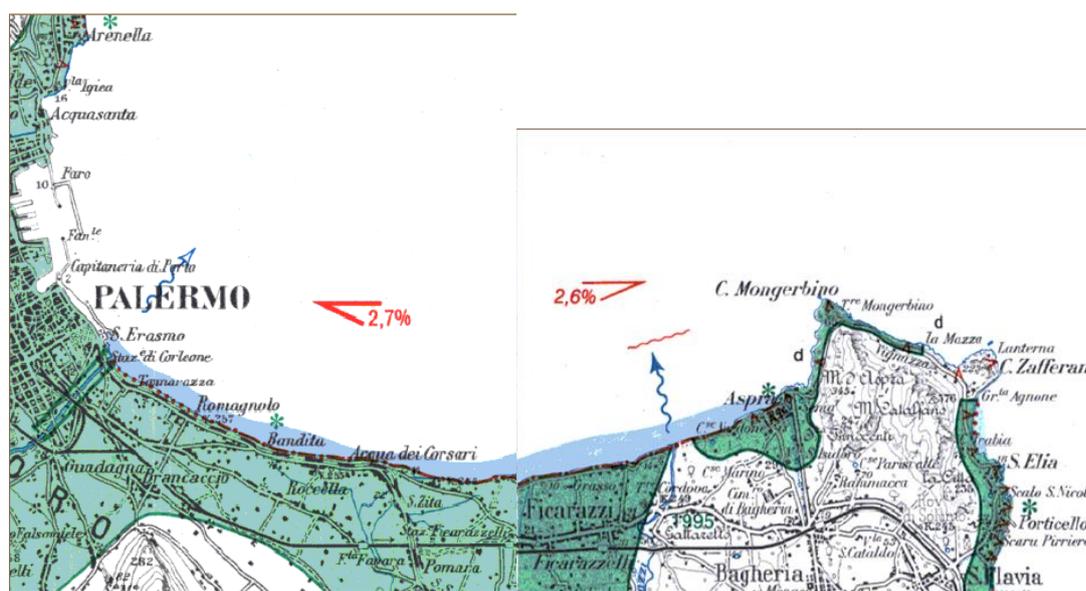
Figura 53 - Fotografie dello stato attuale del Porto della Bandita

Dall'analisi diacronica dell'evoluzione delle linee di riva estratte dalle aerofoto disponibili, si evince che il litorale si è stabilizzato anche grazie alla realizzazione delle scogliere a protezione del promontorio Acqua dei Corsari con la conseguente diminuzione degli apporti sedimentari dovuti all'erosione al tratto di litorale in esame rendendo di fatto limitate le modificazioni della "Sotto Unità Fisiografica" racchiusa dai promontori di Sperone e Acqua dei Corsari.

Conseguentemente l'insabbiamento del bacino portuale recentemente è significativamente dovuto all'azione del moto ondoso in relazione alla tessitura dei fondali.



Per la caratterizzazione sedimentologica dei fondali del paraggio della bandita è stato estratto, dal Foglio 249 – Palermo dell'Atlante delle Spiagge Italiane, il tratto di litorale interessato dalle opere che per la spiaggia sommersa indica granulometria compresa tra 0,063mm e 2mm, mentre la spiaggia emersa si presenta sabbiosa – ciottolosa.



Dal punto di vista geomorfologico, le pendenze dei terreni costieri a ridosso del tratto di litorale in esame sono, in generale, molto modeste e il piano campagna mostra un andamento sub-pianeggiante con la quota media è generalmente compresa tra 0 e 9 metri circa s.l.m.

Così come si rileva dalla Relazione Geologica, nel paraggio interessato dal Porto della Bandita sono presenti prevalentemente depositi marini calcareniticosabbiosi appartenenti ai sistemi pleistocenici di Barcarello e Marsala, sovrastanti le cosiddette "Argille di Ficarazzi" (argille, argille siltose, silt argillosi grigio-azzurri o grigiobluastri, sabbie fini con, a luoghi, intercalazioni di livelli bioclastici e/o arenitici con bioclasti,

depositi di tempesta), anch'esse appartenenti al sistema di Marsala. Tali depositi sono diffusamente ricoperti da terreni di riporto di potenza anche plurimetrica.

Per quanto riguarda la geologia di dettaglio dei fondali interessati dalle opere in progetto sono state condotte delle indagini geognostiche dirette che hanno evidenziato la presenza di depositi calcarenitico – sabbiosi a grana medio-fine più o meno cementate dello spessore dell'ordine di decine di metri.

Per approfondire le caratteristiche geofisiche e geomorfologiche dei fondali la Stazione Appaltante ha commissionato alcune indagini in situ, in particolare:

- Rilievo Multi-Beam;
- Rilievo Side Scan Sonar;
- Rilievo Sub Bottom Profiler;
- Rilievo Magnetometrico
- Rilievo sedimentologico eseguito lungo transetti ortogonali alla linea di riva ad interasse di 250,00m sulle batimetriche -0,50m, -2,00m, -5,00m e -10,00m s.l.m.m.

Tali indagini sono state affidate dall'Amministrazione Comunale all'R.T.I. ICPA S.r.l. - AmbienteLAB S.r.l.. ed espletate anche con la collaborazione della ditta Arena Sub S.r.l. e nella Relazione Tecnica – Illustrativa dei rilievi strumentali viene riportato in particolare:

- **Rilievo Multibeam**

L'esecuzione del rilievo MBES è avvenuta in modo da coprire l'intera area d'indagine, secondo linee parallele la costa (Figura 54), tenendo conto che l'area ha il lato a terra caratterizzato da basso fondale e con presenza di affioramenti. Il trasduttore ha una apertura angolare elevata (fino a 210°) ed ha permesso di raggiungere anche porzioni di fondo non navigabili. La sovrapposizione tra le strisciate adiacenti è stata tra il 20% e il 50%.

Durante l'acquisizione dei dati batimetrici sono stati applicati pochissimi filtri (quality filter e flying objects filter) per eliminare singoli dati spuri o che non raggiungono la soglia di qualità della risposta acustica attribuita dal sistema.



Figura 54 - Tracce delle rotte navigate con il Multibeam

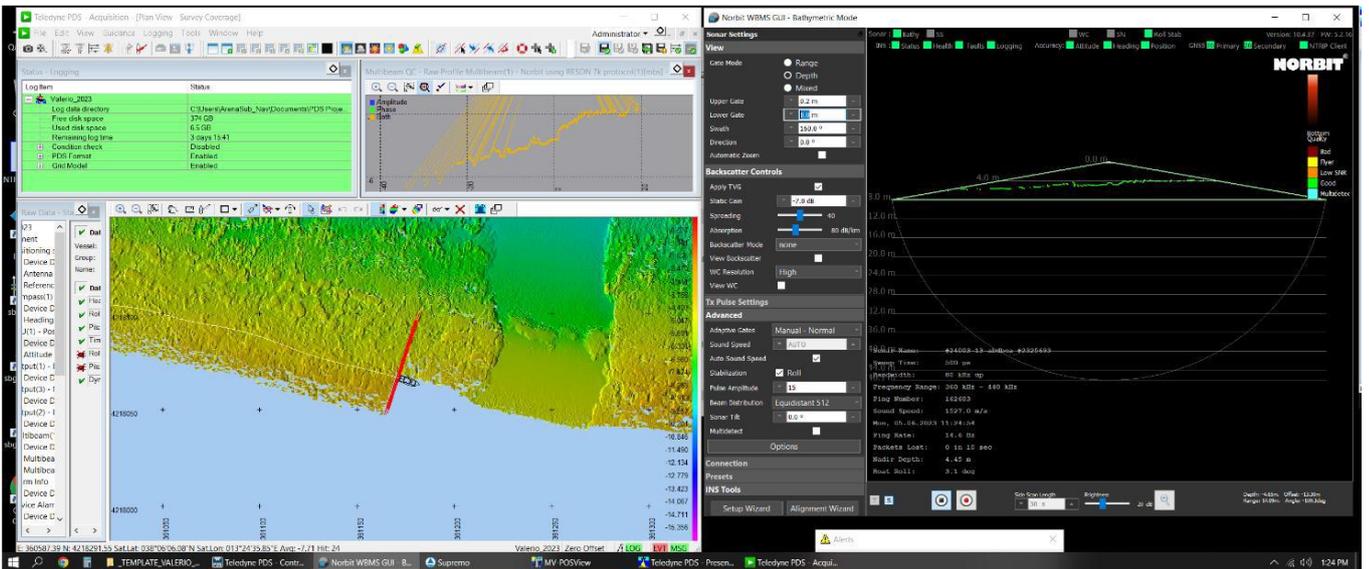


Figura 55 - Immagini delle del rilievo Multibeam. A sx PDS a dx Norbit GUI.

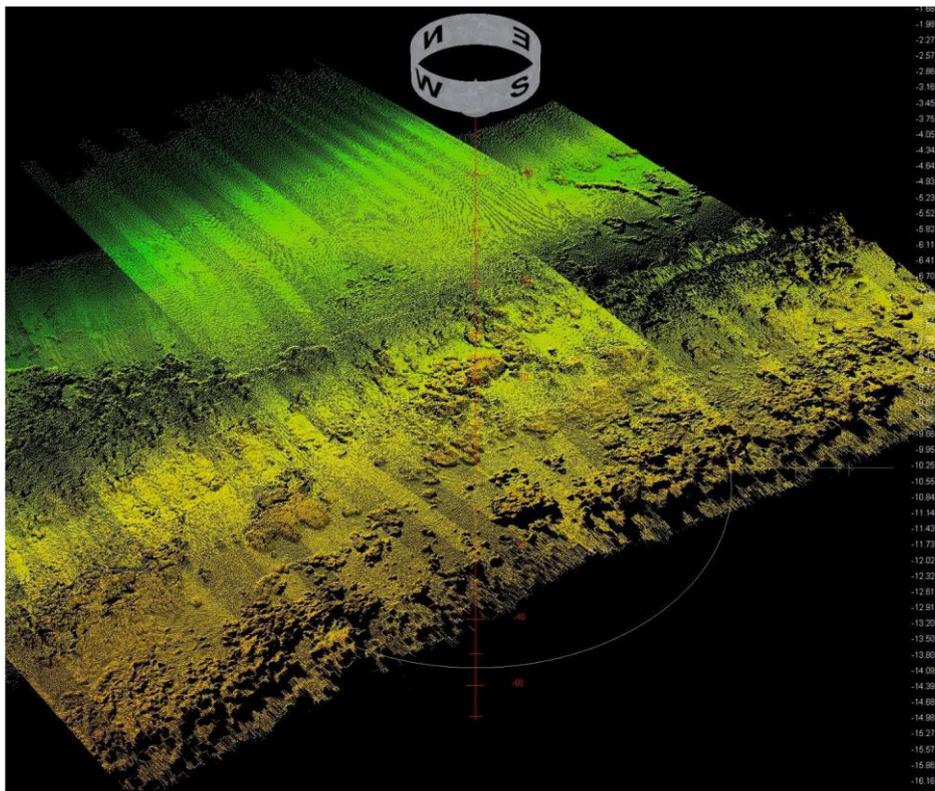


Figura 56 - Modulo di editing Teledyne PDS. Ambiente principale dove viene processata la nuvola di punti e le varie operazioni descritte nel diagramma precedente (nell'immagine zona della Bandita).

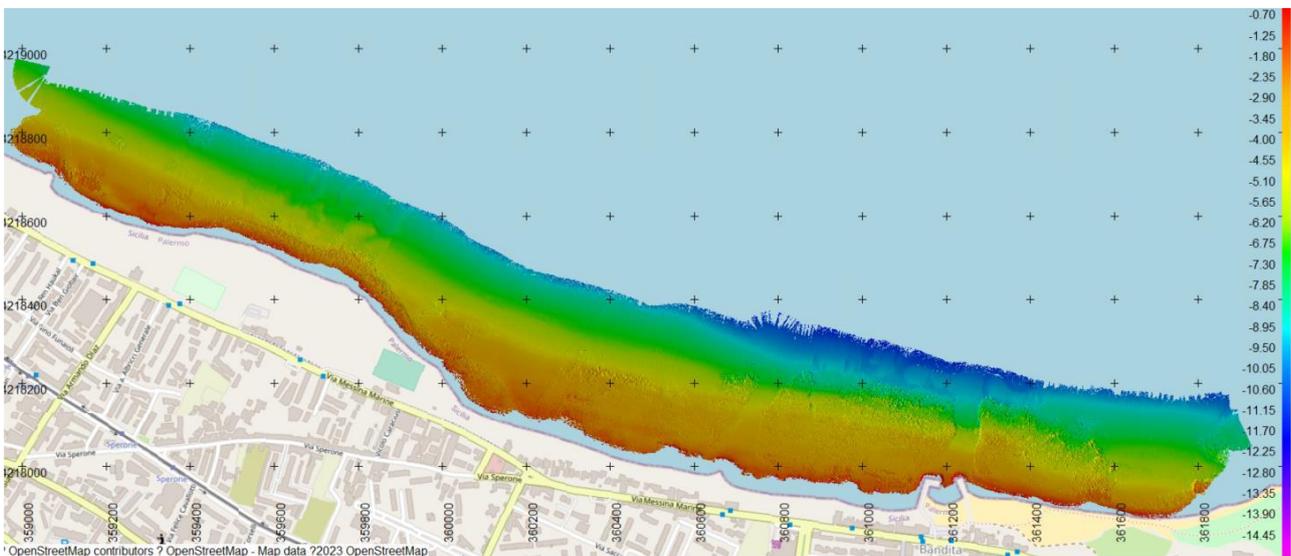


Figura 57 - Modello digitale del fondale risultato della elaborazione

- **Rilievo Side Scan Sonar**

La mappatura acustica con Side Scan Soar è stata effettuata secondo un piano di linee parallele ad assecondare il profilo della costa .Figura 58 e (Figura 59). I dati sonar sono stati registrate utilizzando entrambe le frequenze (400 e 900 kHz) con un range laterale di 60m.

Considerata la profondità molto ridotta dei fondali, il posizionamento del tow-fish è stato effettuato attraverso il metodo del layback. La lunghezza di cavo è stata mantenuta costante durante ogni singola linea.



Figura 58 - Tracce delle rotte navigate con il Side Scan Sonar

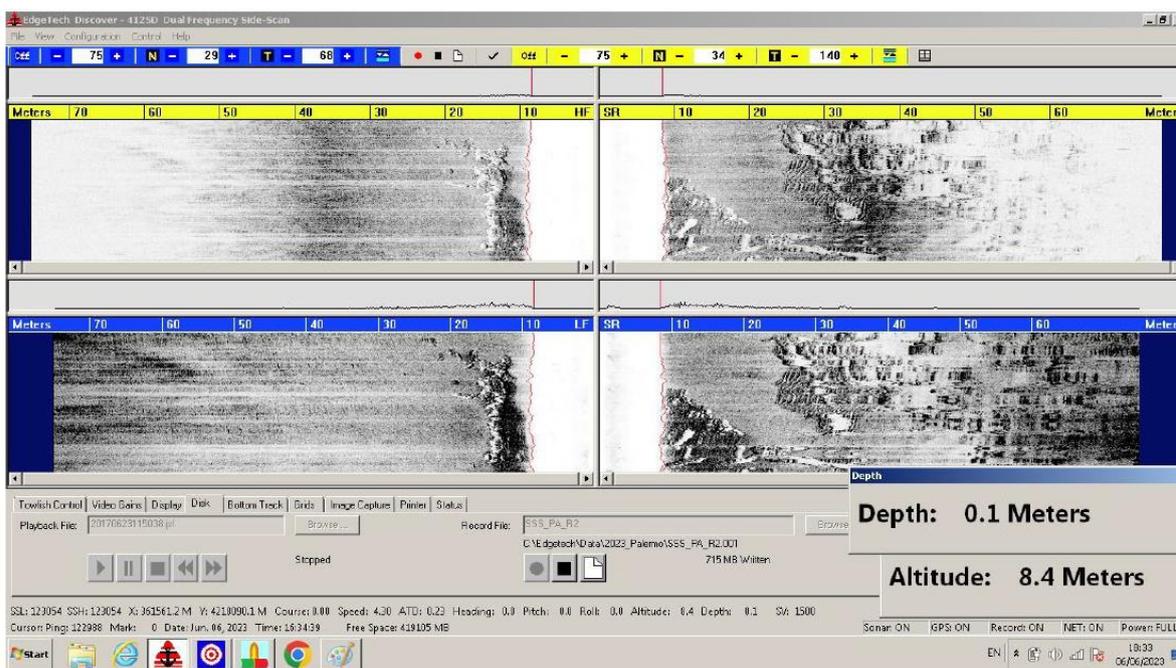


Figura 59 - Immagine del rilievo SSS



Figura 60 - Mosaico acustico Side Scan Sonar

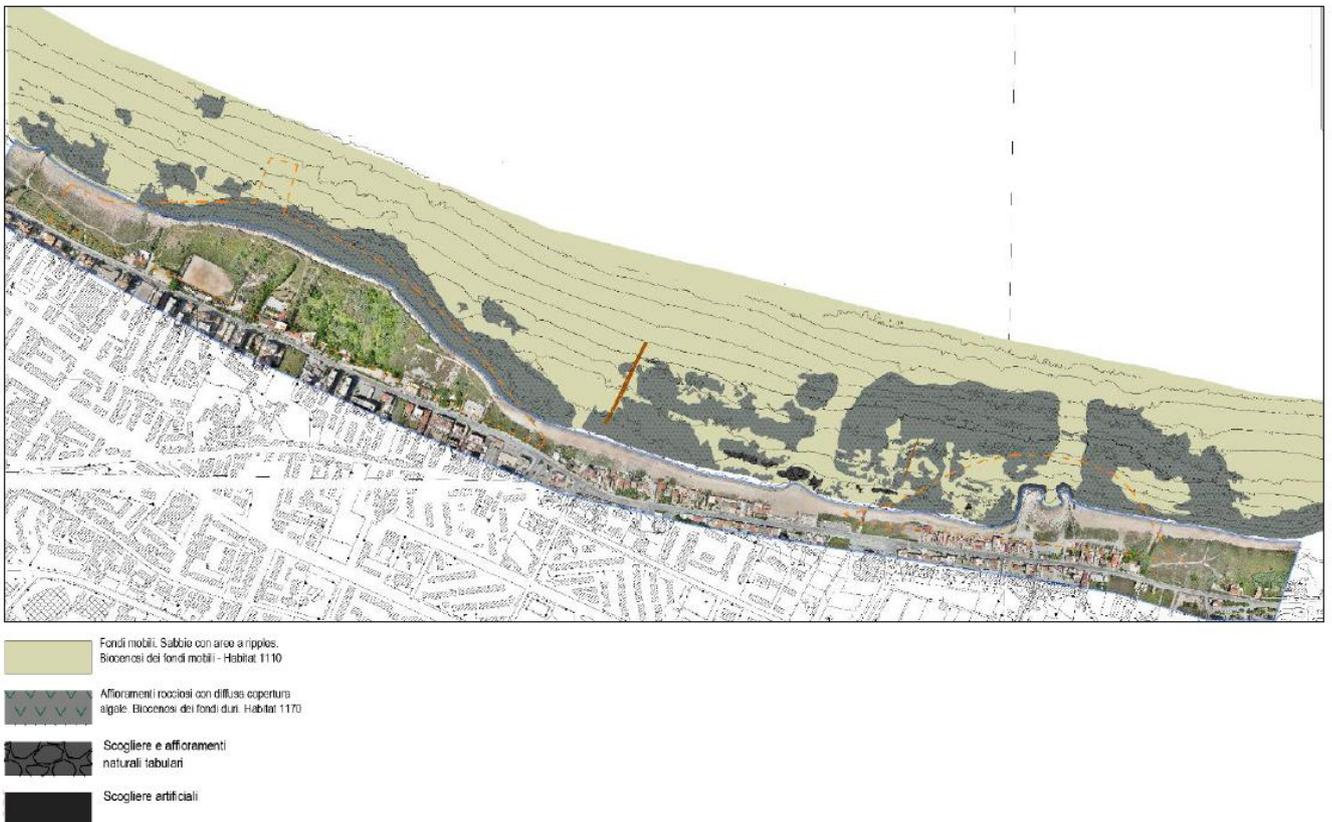


Figura 61 - Interpretazione delle litofacies acustiche del Side Scan Sonar

- Rilievo Sub Bottom Profiler

Le indagini geofisiche e stratigrafiche sono state condotte sui fondali interessati dall'intervento e hanno messo in luce una Il settore di interesse ai fini del progetto

(impronte), ha evidenziato, a conferma del dato morfologico, la presenza di diffusi affioramenti rocciosi acusticamente impenetrabili. I settori più al largo (sia Bandita che Sperone), che hanno una maggiore presenza di substrati mobili ha restituito un certo grado di penetrazione (fino a 1m).



Figura 62 - Rotte d'indagine SBP e MAG (Bandita)

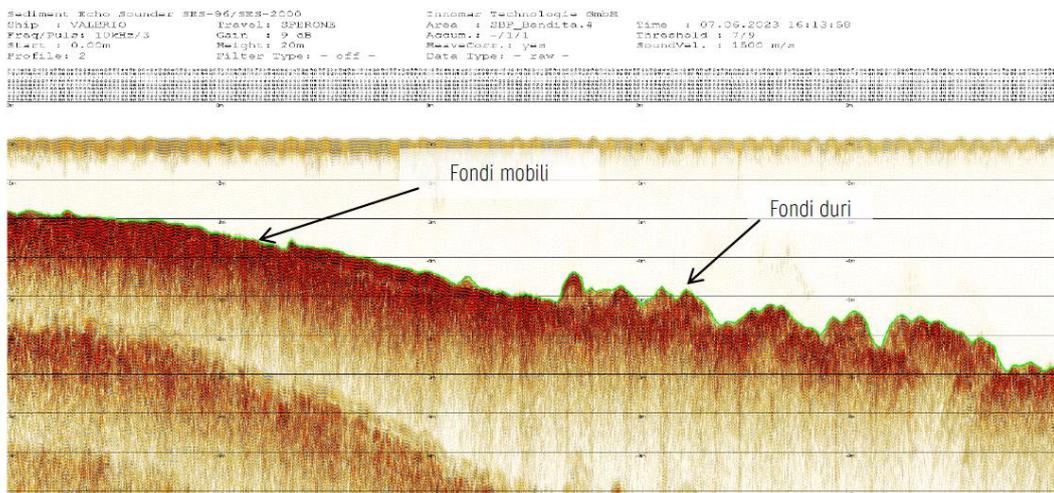


Figura 63 - Profilo trasversale nel settore della Bandita

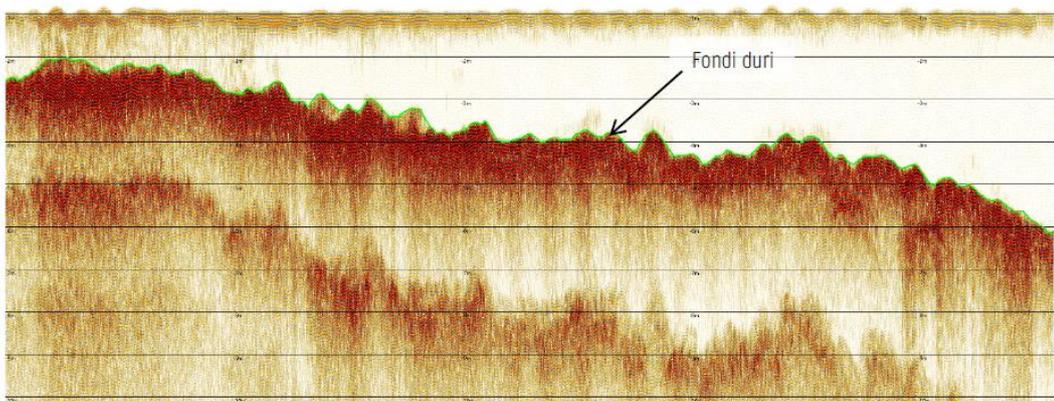


Figura 64 - Profilo trasversale nel settore della Bandita

- **Rilievo Sedimentologico**

Al fine di approfondire la dinamica costiera è stato espletato un rilievo sedimentologico dei fondali interessati dal porto di Bandita, eseguito lungo transetti in direzione Nord dalla linea di riva ad interasse di 250,00m con prelievo di campioni superficiali a profondità -0,50m, -2,00m, -5,00m e -10,00m s.l.m.m. I campioni sono stati prelevati con una bennetta Van Veen con l'ausilio di un mezzo marittimo. In totale sono stati eseguiti n.12 transetti con prelievo di n.4 campioni per un totale di 48 campioni; mentre le analisi sono state condotte con l'utilizzo di setacci e granulometro laser Malvern Mastersizer 3000 che permette di effettuare analisi per granulometrie fino a 2mm, pertanto, qualora la curva granulometrica manifesti quote oltre i 2mm è necessario integrare l'analisi con un ricalcolo a 100 della frazione in esubero trattenuta al setaccio 2000 um.



Nella Relazione Tecnica – Illustrativa dei dati strumentali viene precisato in conclusione quanto segue.

I dati geofisici superficiali acquisiti hanno restituito ottime risoluzioni spaziali, per cui sono idonei ad una valutazione in termini di possibile presenza di reperti di interesse storico-archeologico.

L'osservazione comparata dei dati acquisiti permette di fare le seguenti considerazioni:

- *l'area più prospiciente la costa, ed interessata dal progetto, è caratterizzata dalla presenza di fondi duri naturali che non hanno evidenziato anomalie acustiche superficiali di possibile interesse.*

- *l'indagine magnetometrica ha restituito numerose anomalie, distribuite molto a ridosso la costa e verosimilmente legate all'attività umana recente vista la distribuzione molto regolare parallela alla riva (Sperone) o a ridosso l'imboccatura del Porto (Bandita).*
- *dal punto di vista stratigrafico le caratteristiche geologiche rendono il substrato generalmente poco penetrabile all'indagine con Sub Bottom Profiler.*
- *l'ambiente deposizionale appare caratterizzato da una certa dinamica infrannuale con fasi di ricoprimento e scopertura dei banchi tabulari a ridosso la riva.*

Le indagini geofisiche e geomorfologiche espletate sui fondali interessati dalle opere in progetto, ha consentito di approfondire il livello di conoscenza della spiaggia sommersa compresa tra il promontorio dello Sperone e il promontorio di Acqua dei Corsari ed in particolare il rilievo Multibeam ha interessato una fascia costiera avente uno sviluppo di circa 2,90 km di cui 2,35 km a ponente della struttura portuale e circa 0,55 km a levante della stessa per una larghezza media di 300m fino alla batimetrica -9,00m s.l.m.m. In totale lo specchio acqueo interessato dal rilievo è pari a circa 97 ha. Il rilievo Multi Beam ha messo in evidenza una pendenza media del fondale variabile dal 2,80% al 3,00%.

Dal rilievo è stato estrapolato un particolare dell'area interessata dal porto e dalle opere in progetto riportato in *Figura 65* dal quale si evince che all'imboccatura è presente un canale di escavo artificiale eseguito agli inizi degli anni '80 ancora visibile dal DEM.

L'imboccatura portuale, allo stato attuale, insiste su un fondale di circa -2,00m come si evince dall'estratto del D.E.M. .

Mentre all'interno dello specchio acqueo si è formata un arenile con una pendenza dell'11% e un insabbiamento emerso di circa 50,00m fino a quota +1,50m s.l.m.m. che congiunto all'arenile naturalmente presente nell'area porta la linea di riva a circa 100 m dalla Via Messina Marine (S.S.113)

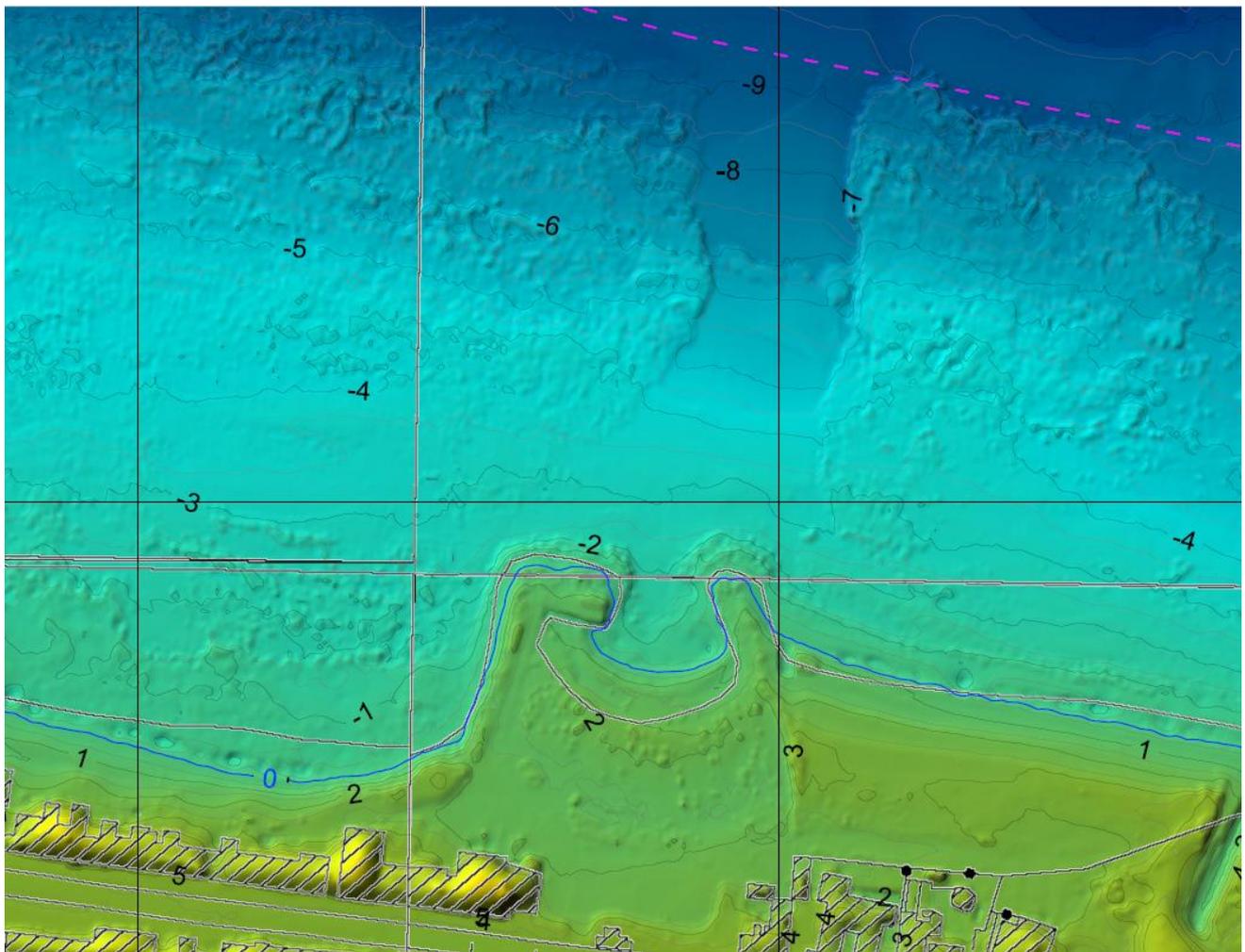


Figura 65 - DEM Terra Mare

Dal rilievo si evince inoltre la presenza diffusa di affioramenti e l'insabbiamento del canale scavato.

Per quanto riguarda il rilievo geofisico eseguito con Side Scan Sonar oltre a quanto sopra riportato con riferimento ai rilievi espletati dall'R.T.I. incaricato dall'Amministrazione Comunale, per un maggiore approfondimento si è tenuto conto anche di un rilievo SSS, eseguito da BioSurvey S.r.l. e riportato in Figura 66 per un intervento precedente, dove sono evidenziati gli affioramenti presenti nei fondali a levante e a ponente del canale antistante l'imboccatura portuale scavato agli inizi degli anni '80. Inoltre, quest'ultimo rilievo SSS ha permesso l'individuazione di Macro litter (pneumatici) depositati sui fondali interessati dalle opere in progetto.

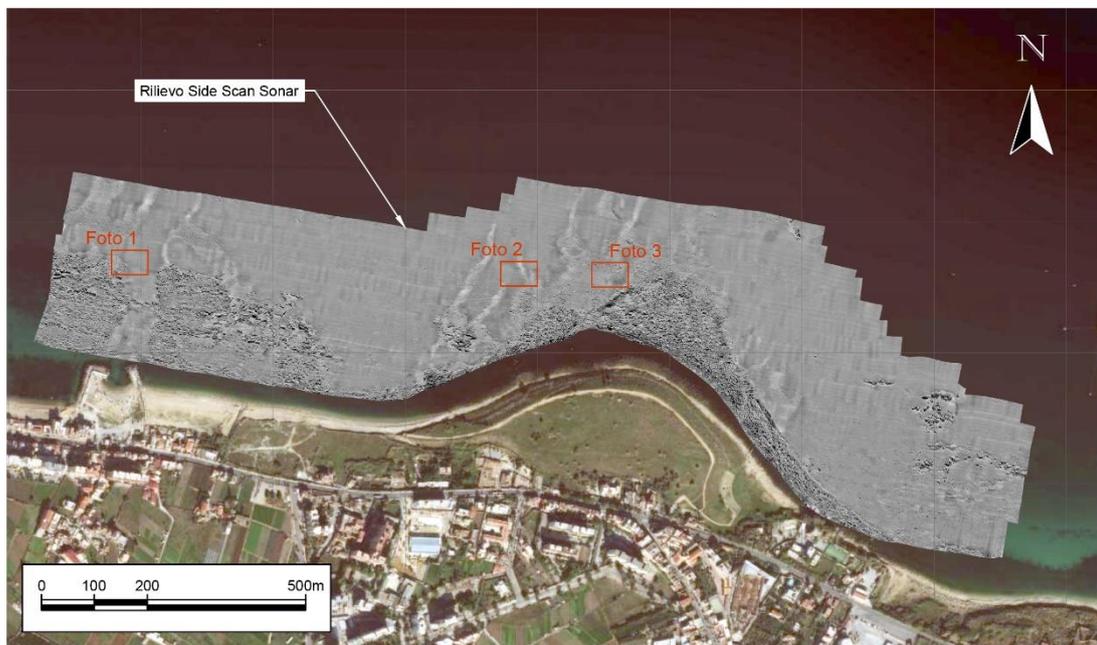


Figura 66 - SSS a disposizione della Stazione Appaltante

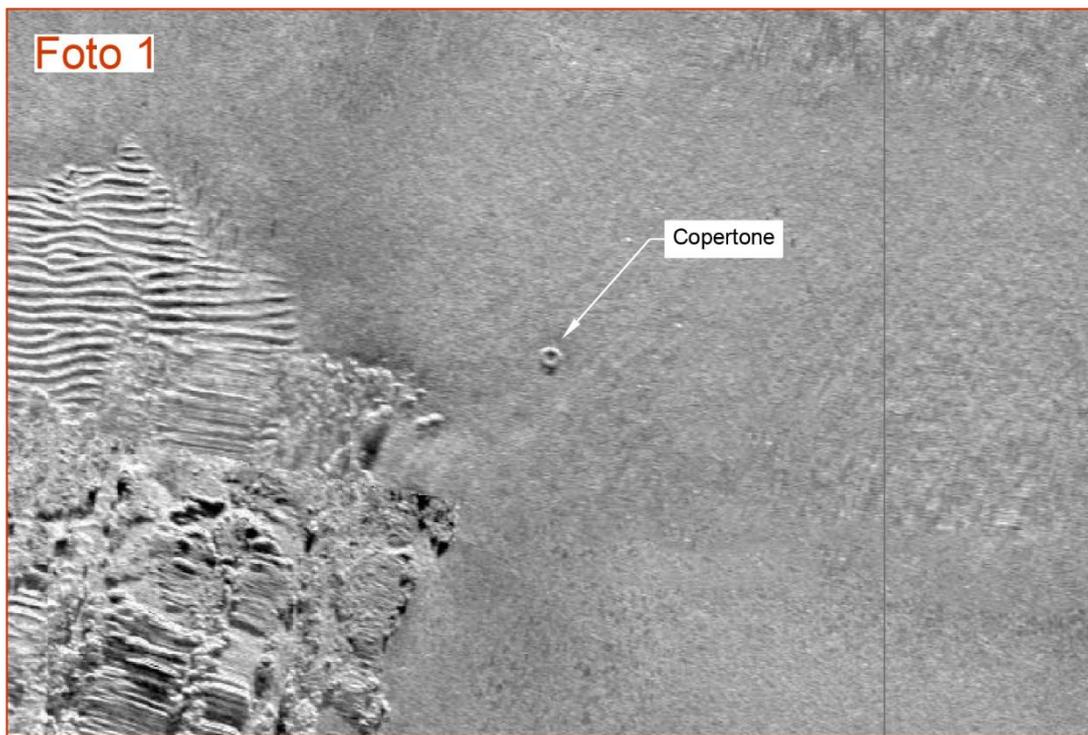


Figura 67 particolari rilievo SSS

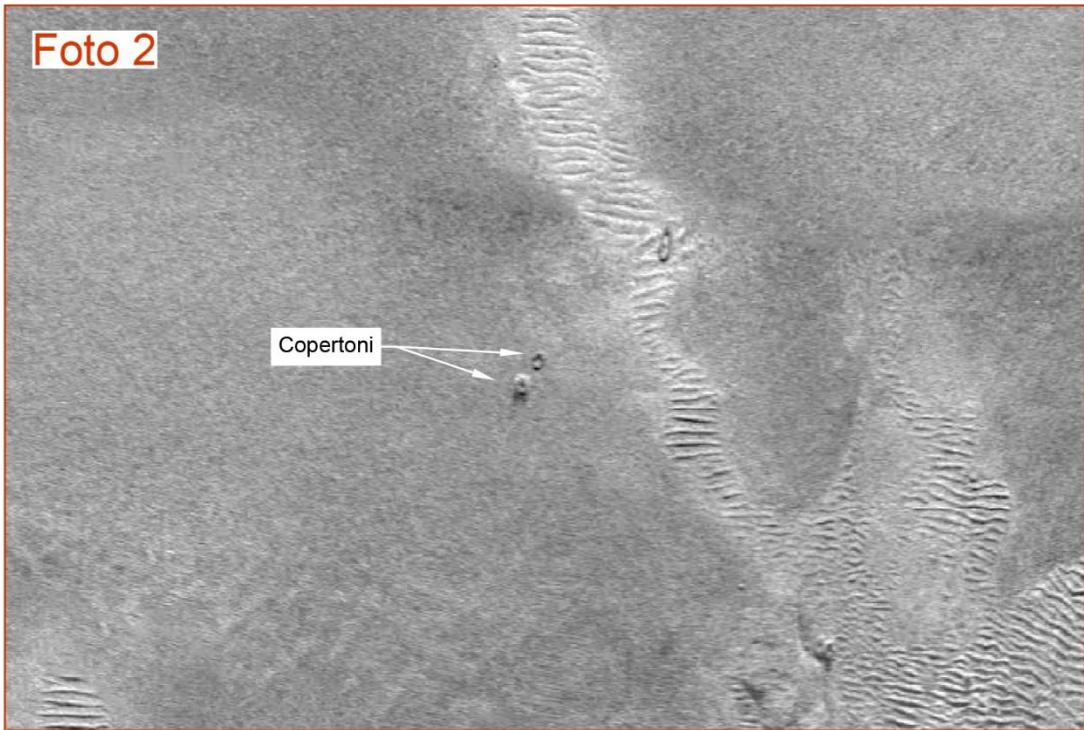


Figura 68 - particolari rilievo SSS a levante della struttura portuale

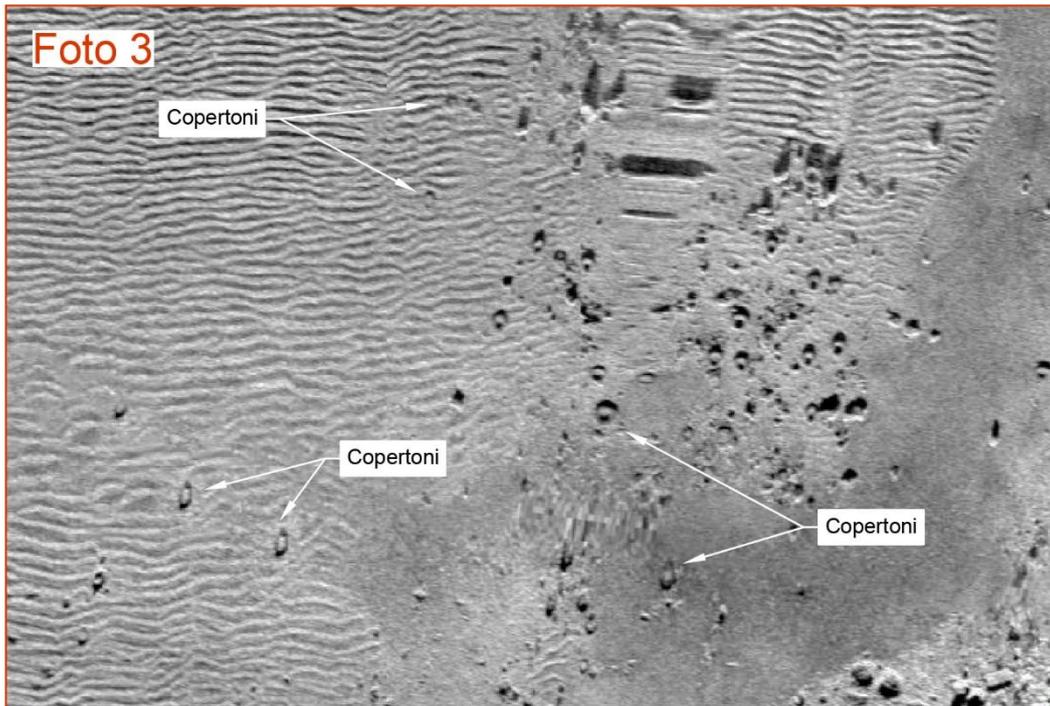


Figura 69 - particolari rilievo SSS - macro litter individuati

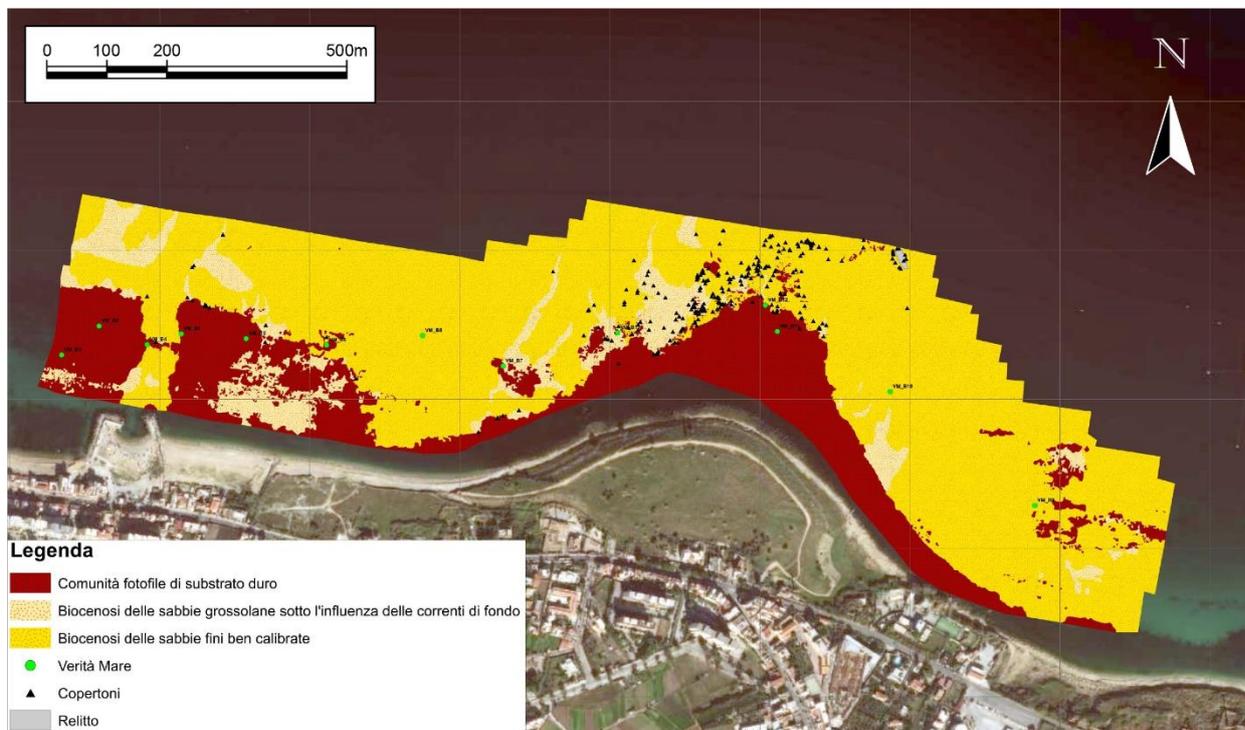


Figura 70 - Individuazione dei macro litter sul fondale

A seguito delle attività di analisi e valutazione della documentazione tecnica allegata all'istanza dell'Amministrazione Comunale di Verifica di Assoggettabilità a VIA ai sensi dell'art.19 del D.Lgs 152/006 ss.mm.ii., il MASE con nota prot. 5510 del 12.05.2023 ha richiesto, per la tematica biodiversità, di *"effettuare un censimento video ad alta risoluzione georeferenziati di tutta l'area con evidenza delle biocenosi di potenziale interesse e dei macro-rifiuti (marine litter) nell'area dei lavori e in un perimetro di 300 m dalla stessa."*

Conseguentemente, l'Amministrazione Comunale ha incaricato la Sigma Ingegneria S.r.l. di espletare un rilievo a mezzo di ROV munito di sistema di posizionamento GPS superficiale per le riprese video ad alta risoluzione (4k) di tutti i fondali compresi in un perimetro di 300 m dall'opera in progetto nelle aree raffigurate in Figura 71.



Figura 71 - Punti di rilevamento video subacquei a mezzo di R.O.V.

Il servizio di video ispezioni subacquee dello specchio acqueo antistante le opere previste dal progetto è stato espletato in data 28.07.2023 e ha permesso di fornire un accurato stato ante operam dei fondali antistanti le opere previste dal progetto.

Complessivamente, sono state acquisite tramite il R.O.V. BLUROV 2 circa 2 ore di filmati video, che sono stati successivamente elaborati e restituiti anche a mezzo di fotogrammi estratti dai video di cui un esempio è riportato nelle seguenti Figura 72e Figura 73.



Figura 72 - estratto rilievo R.O.V. Punto 8



Figura 73 - estratto rilievo R.O.V. Punto 11.

Dal rilievo ha confermato che i fondali si presentano sabbiosi con diffusi affioramenti rocciosi.

6.1 Rilievo Sedimentologico

Le risultanze di tali indagini hanno permesso la restituzione della cartografia di tessitura dei fondali riportata in Figura 74, nella quale sono riportati i valori del $D_n(50)$ determinato con le prove granulometriche.

In particolare, dall'analisi delle risultanze del rilievo si evince che nei fondali a ponente della struttura portuale i sedimenti superficiali hanno $D(50)$ pari a circa 0.50mm mentre in corrispondenza dell'imboccatura e a ponente del molo di sottoflutto pari a circa 0.20mm.

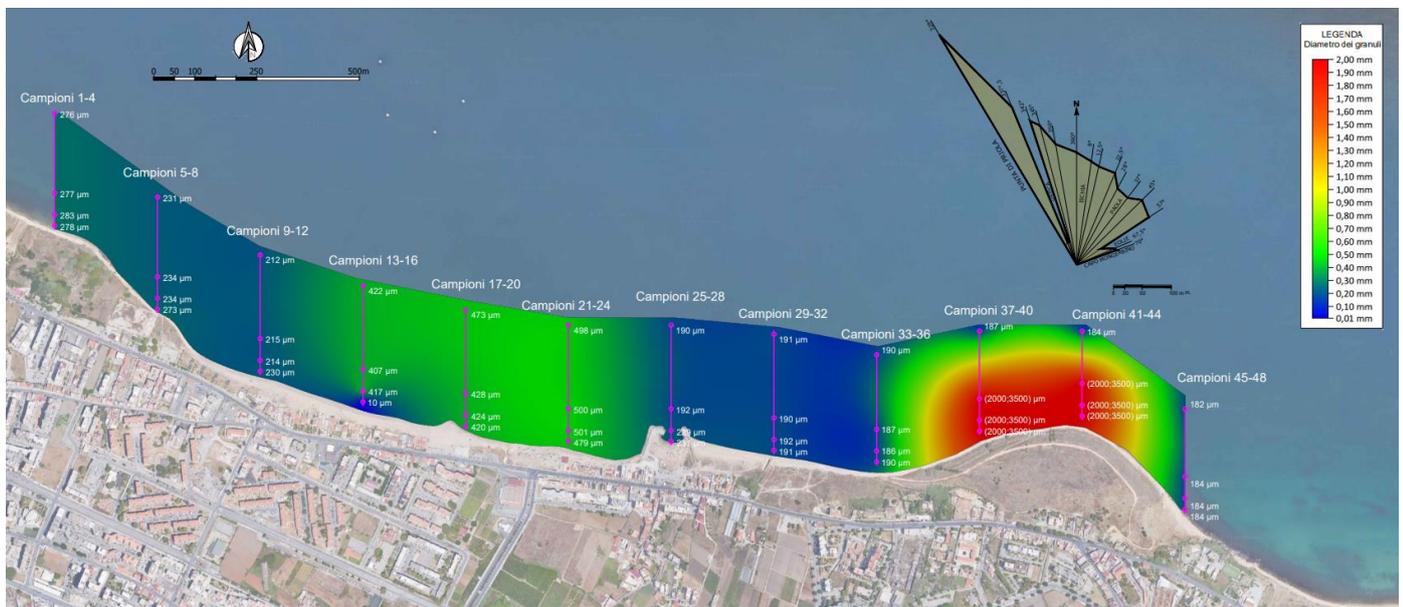
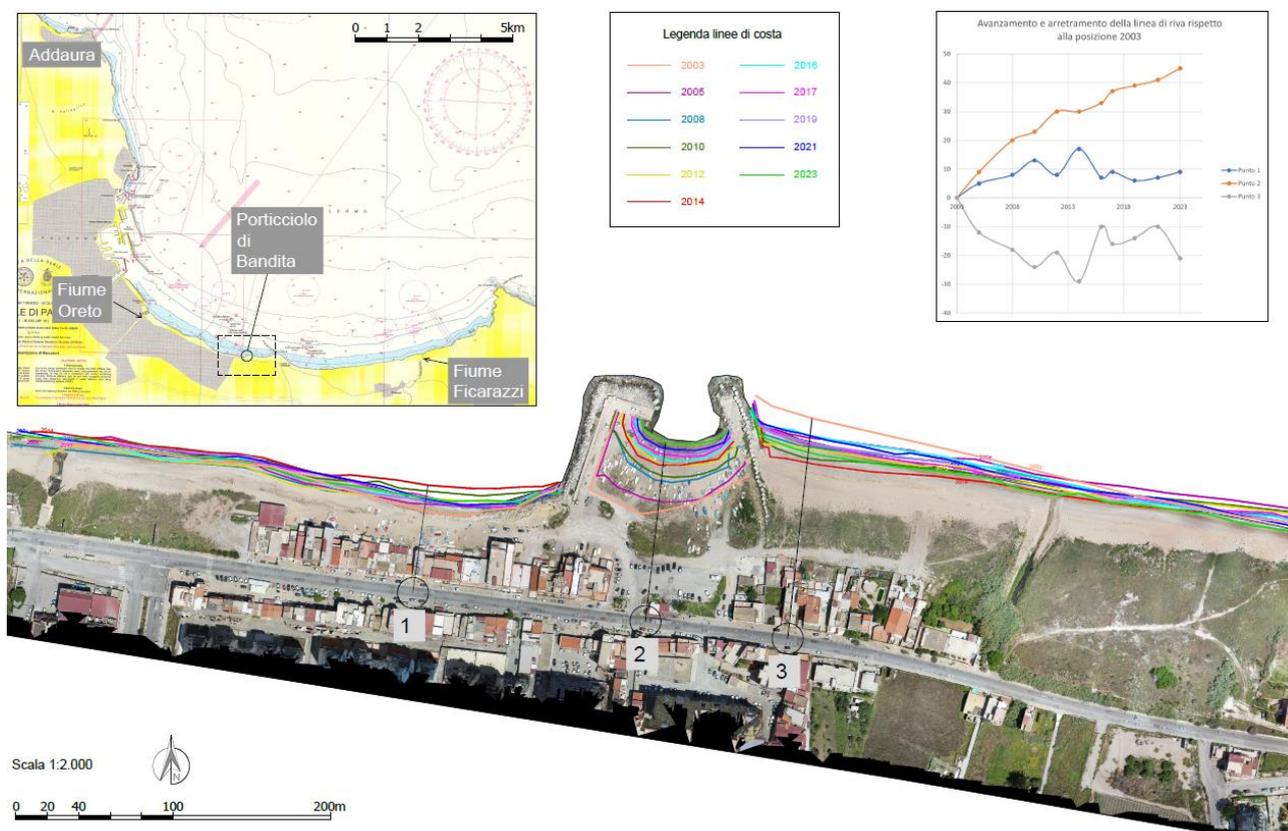


Figura 74 - Carta della Tessitura dei fondali

Come sopra riportato, dalle analisi diacronica dell'evoluzione della linea di riva si evince che il litorale, nel ventennio 2003-2023, si è stabilizzato con limitati arretramenti a ponente del molo di sopraflutto dell'ordine di 5,00m – 10,00m, mentre a levante del molo di sottoflutto si distinguono arretramenti della linea di riva dell'ordine di 20,00m dal 2003.

All'interno dello specchio acqueo protetto, invece, è avvenuto, nello stesso periodo, un progressivo spostamento verso mare della linea di riva di circa 2,5m/anno fino al quasi totale e attuale interrimento dell'intero specchio acqueo portuale.



Le indagini espletate consentono di affermare che l'interrimento dello specchio acqueo del porto attuale è dovuto alla particolare configurazione dell'imboccatura portuale esposta alle mareggiate provenienti da NW a NE.

Allo stato attuale si assiste alla sospensione di una notevole quantità di sedimenti sottocosta causata dalle agitazioni ondose negli specchi acquei antistanti e interni alla struttura portuale.

In particolare a causa di eventi ondosi e del conseguente frangimento delle onde dovuto alle basse profondità nello specchio acqueo antistante l'imboccatura, il bacino del porto è soggetto a continui depositi dei sedimenti mobilitati dalla penetrazione ondosa.

Tale fenomeno si può osservare dall'esame fotografie aeree dello stato attuale scattate durante un recente evento meteomarine di non notevole intensità, con $H_s=1,20m$ e direzione NWN e dalle relative mappe a saturazione di colore riportate in Figura 75.

Tale rappresentazione permette di evidenziare il fenomeno di mobilitazione dei sedimenti all'interno dello specchio acqueo portuale durante il fenomeno meteomarine.

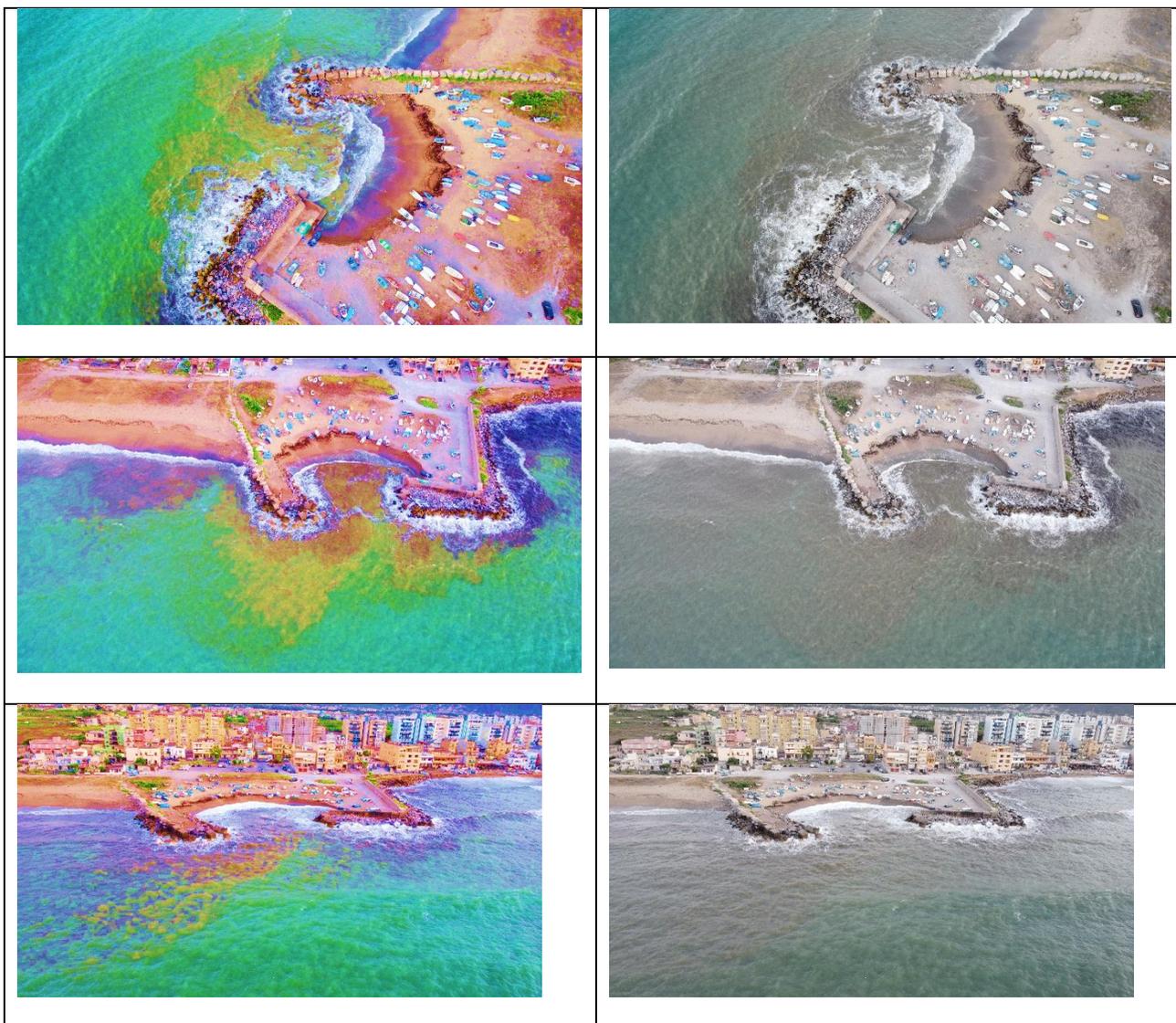


Figura 75 - Fotografie dello stato attuale durante evento meteomarinico di non notevole entità

Per risolvere tali problematiche che affliggono la struttura portuale ormai da decenni, e riqualificare l'area portuale che versa in condizioni di grave degrado sia dal punto paesaggistico che dal punto di vista ambientale, l'Amministrazione Comunale ha determinato d'intervenire per la messa in sicurezza del porto e per riqualificare le aree limitrofe alla struttura portuale.

In particolare, per garantire un'agibilità allo specchio acqueo del bacino portuale è necessario proteggere l'imboccatura con l'adeguamento delle opere foranee al fine di attenuare il moto ondoso proveniente dal settore di traversia all'interno del bacino portuale.

L'intervento progettuale a tal fine prevede il prolungamento della diga di ponente con la realizzazione di un'opera a gettata ad andamento curvilineo in direzione SW-NE oltre al prolungamento del molo di sottoflutto in modo da garantire un'imboccatura su

fondali di maggiore profondità e lavori di banchinamento all'interno dello specchio acqueo portuale.

A ponente e a levante del porto il progetto prevede di due aree a verde di cui quella di ponente sarà attrezzata con piscina, edifici a supporto dei servizi delle aree a verde e della struttura portuale.

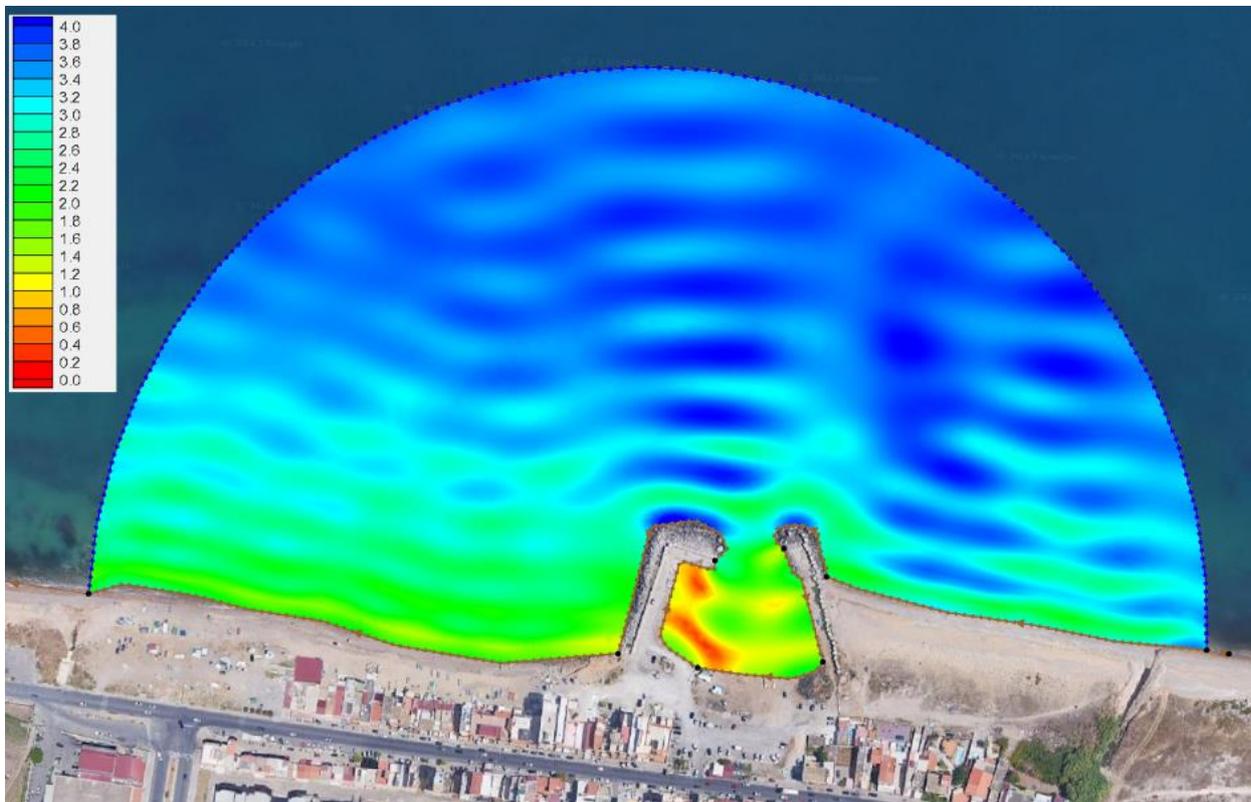


Figura 76 - Planimetria generale delle opere in progetto

In particolare, le opere marittime previste per la riqualifica del porto sono di seguito elencato:

1. Opere di presidio della nuova passeggiata a mare
2. Prolungamento della diga foranea di sopraflutto
3. Prolungamento e riqualifica del molo di sottoflutto
4. Nuove opere di banchinamento specchio acqueo interno
5. Escavo dello specchio acqueo portuale
6. Opere di arredo portuale

Al fine di avere contezza delle sollecitazioni ondose che nel tempo si sono rese responsabili delle disfunzionalità del porto della bandita, sono state condotte delle analisi di penetrazione del moto ondoso utilizzando la geometria delle banchine e dello specchio acqueo portuale a seguito dell'intervento di escavazione realizzato ad inizio degli anni 2000.



Lo studio di penetrazione ha evidenziato come all'interno dello specchio acqueo, in occasione di mareggiate con T_R pari a soli 10 anni e direzione $22,5^\circ N$, l'altezza d'onda residua potrebbe aver raggiunto valori anche di 2,20m.

Lo specchio acqueo interno e l'imboccatura, in assenza di opere di difesa, sono rimaste esposte ad un'elevata penetrazione ondosa, dovuta anche a frequenti mareggiate di non notevole intensità, si è resa fondamentale responsabile, nel tempo, del deposito del materiale in sospensione trasportato dal moto ondoso penetrante all'interno dello specchio acqueo parzialmente ridossato.

In aggiunta il canale antistante l'imboccatura realizzato all'inizio degli anni '80 ed ancora oggi esistente, come riportato in Figura 77, a causa dell'erosione dei promontori ha assolto alla funzione di deposito di sedimenti che durante gli attacchi ondosi di più grossa intensità si sono via via mobilitati verso l'attuale imboccatura del porto, causando l'attuale interrimento di tutto il bacino portuale.

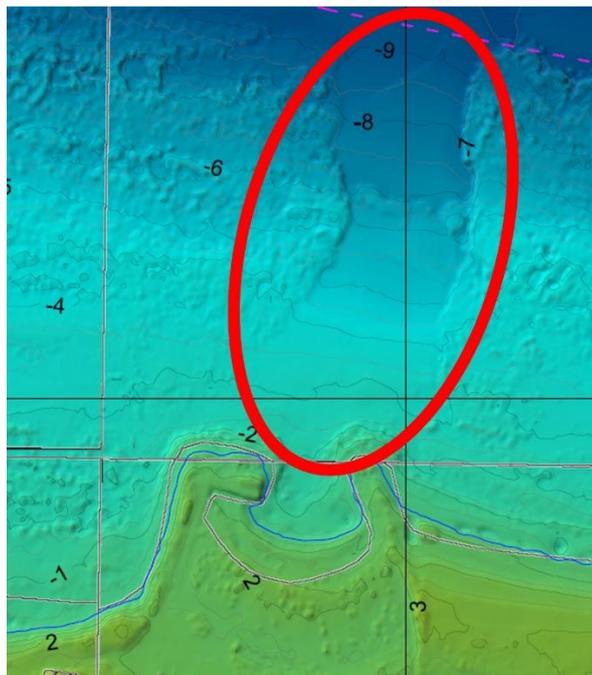


Figura 77 - Canale di escavo dell'imboccatura portuale realizzato all'inizio degli anni '80

Al fine di mettere in sicurezza la struttura portuale il progetto prevede la realizzazione della diga foranea che si sviluppa per circa 170,00m in direzione SW-NE. La diga foranea a protezione del bacino portuale sarà realizzata con un'opera a gettata in massi naturali imbasata su fondali variabili compresi tra -3,00m s.l.m.m. a -6,00m s.l.m.m. così come raffigurato in Figura 78.

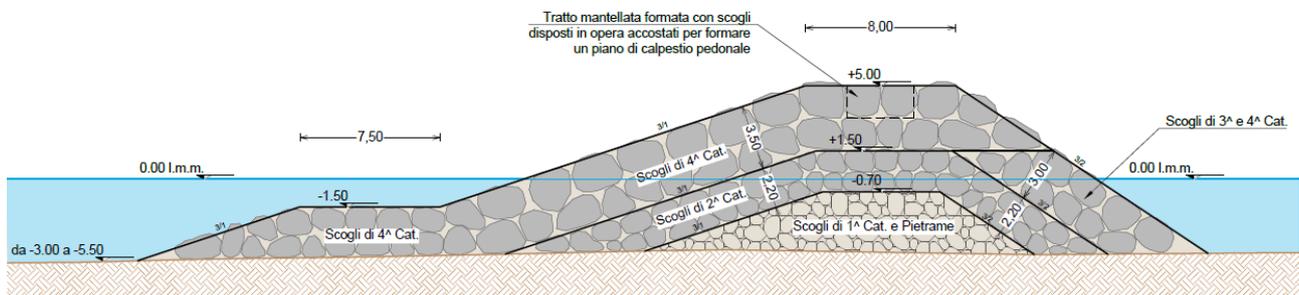


Figura 78 - Sezione tipo diga foranea

Inoltre, ad ulteriore protezione dello specchio acqueo portuale il progetto prevede il prolungamento del molo di sottoflutto per circa 33,00m in direzione SSE-NNW, congiuntamente all'escavazione dello specchio acqueo portuale fino alla quota -3,00m s.l.m.m..

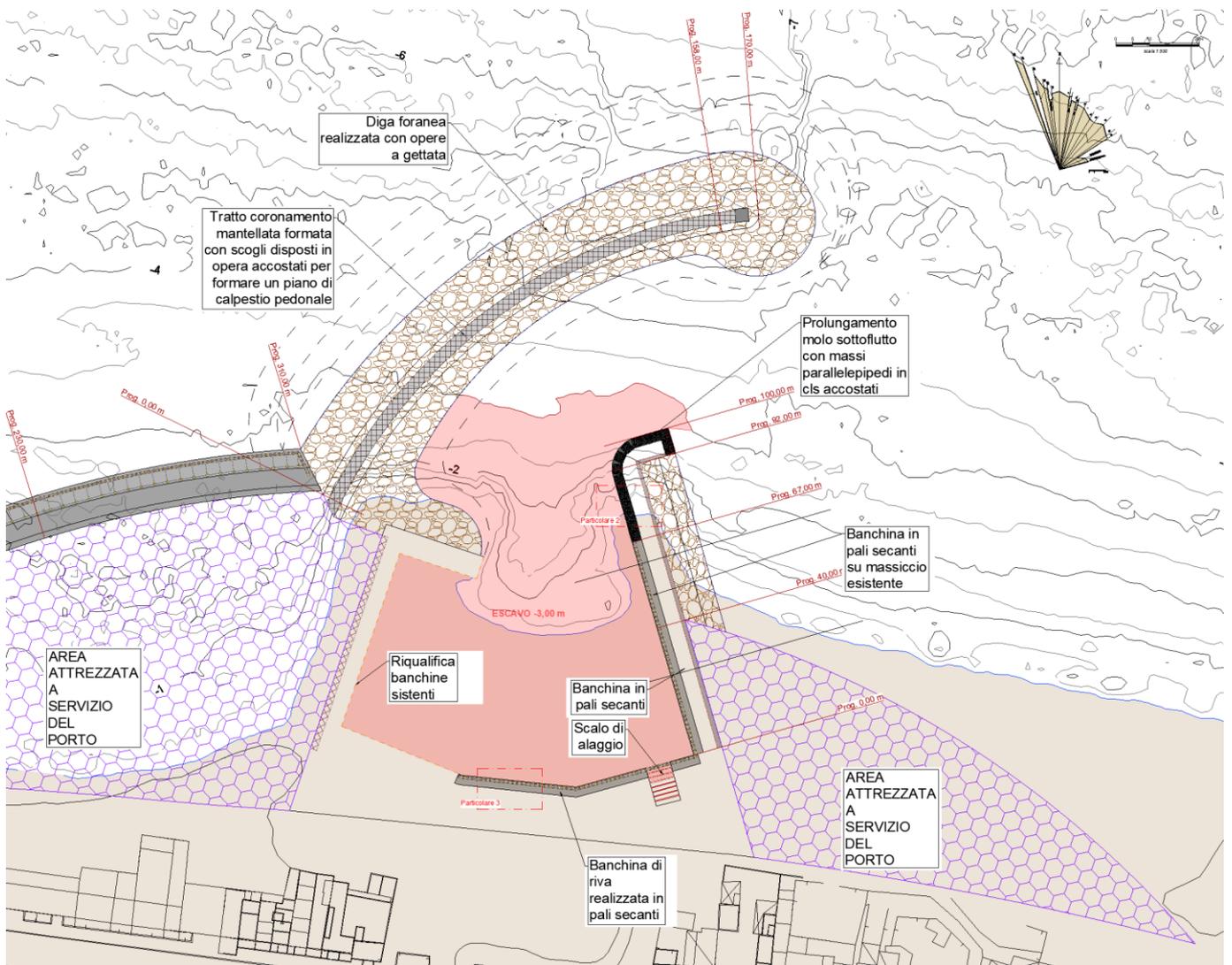


Figura 79 - Planimetria costruttiva opere in progetto

Sulla nuova configurazione portuale sono state condotte le simulazioni su modello numerico della penetrazione del moto ondoso che, come è possibile evincere dalla mappa delle altezze d'onda in scala di colori riportata in Figura 80 per un $T_R=10$ anni e Direzione di provenienza $22,50^\circ N$ attestano **una riduzione dell'altezza d'onda all'interno dello specchio acqueo ridossato pari a circa l'80%**.

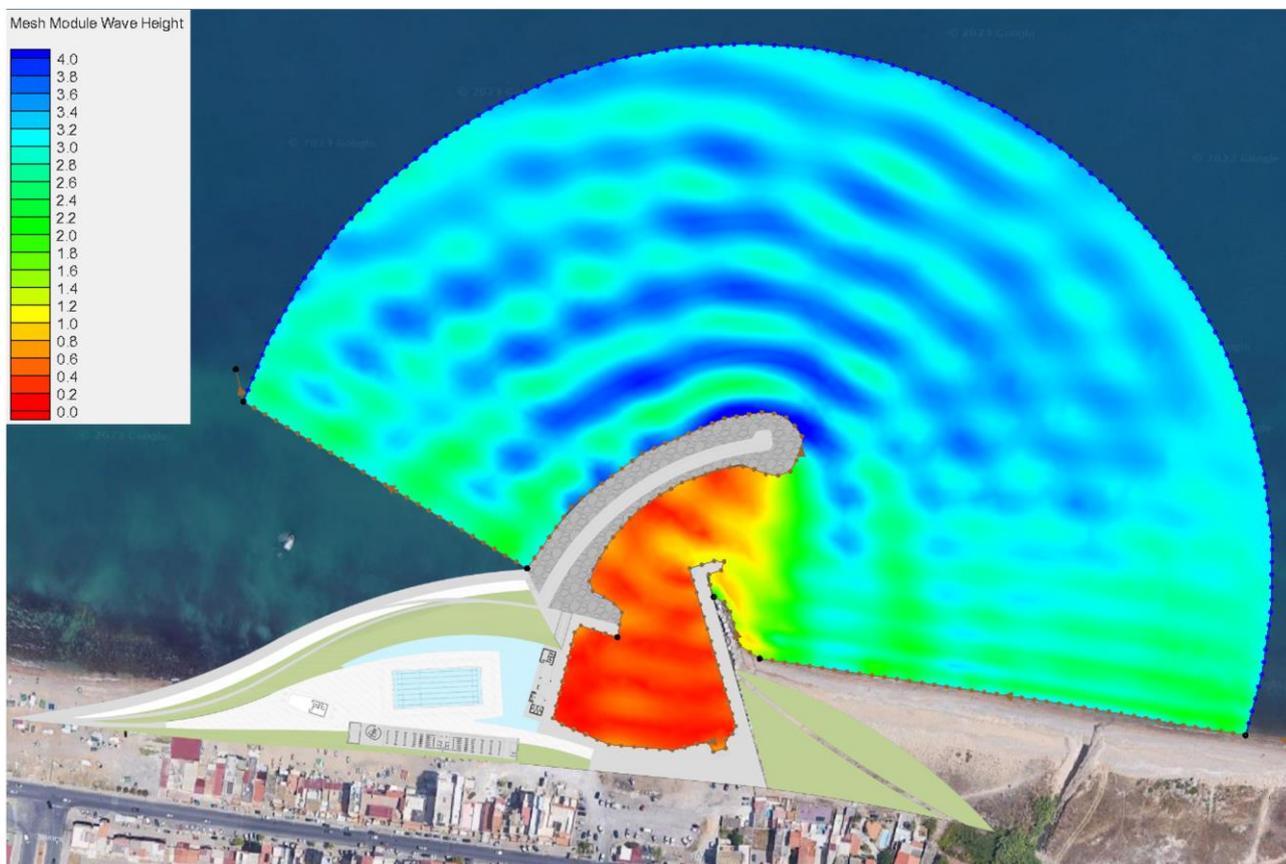


Figura 80 - Tr 10 anni – Direzione di provenienza a largo 22.5° N – confronto stato di progetto (sotto) con condizione attuale delle opere foranee con dragaggio (sopra)

La testata della nuova diga foranea, inoltre, imbasata sul canale antistante l'attuale imboccatura portuale formato agli inizi degli anni '80, costituirà uno sbarramento al trasporto solido cross-shore riconducibile alla sospensione di sedimenti durante mareggiate anche di non notevole intensità.

La diga foranea, con riccio di testata imbasato tra le batimetriche -6,00m s.l.m.m. e -4,50m s.l.m.m. attenuerà notevolmente il trasporto solido cross-shore, garantendo inoltre un minore stato di agitazione nello specchio acqueo protetto con conseguente riduzione del deposito dei sedimenti in sospensione che penetrano all'interno dello specchio acqueo protetto.

Recentemente, come precedentemente evidenziato, la linea di riva si è attestata in arretramento sia a ponente che a levante del porto, conseguentemente, il trasporto solido long-shore E-W, che in passato ha giocato un ruolo fondamentale nella morfodinamica del fondale antistante l'imboccatura portuale a causa dell'apporto di sedimenti da parte dei promontori di "Sperone" e "Acqua dei Corsari", sarà limitato. Inoltre, il prolungamento del molo di sottoflutto permette di fornire ulteriore limitazione al deposito di sedimenti nello specchio acqueo ridossato.

8 Considerazioni sull'agibilità dell'imboccatura portuale e degli specchi acquei interni ai fini della navigazione

Il metodo utilizzato per verificare la manovrabilità delle imbarcazioni nell'area portuale di che trattasi, considera, come da raccomandazioni di seguito illustrato, il tracciamento dei cerchi di manovra, di diametro D , rappresentante una superficie acqua libera da ingombri (opere fisse, imbarcazioni attraccate o altre concessioni limitrofe), per garantire le manovre di ormeggio per tutte le categorie di imbarcazioni previste per il bacino portuale (7,00x2,50m e 10,00x3,50m).

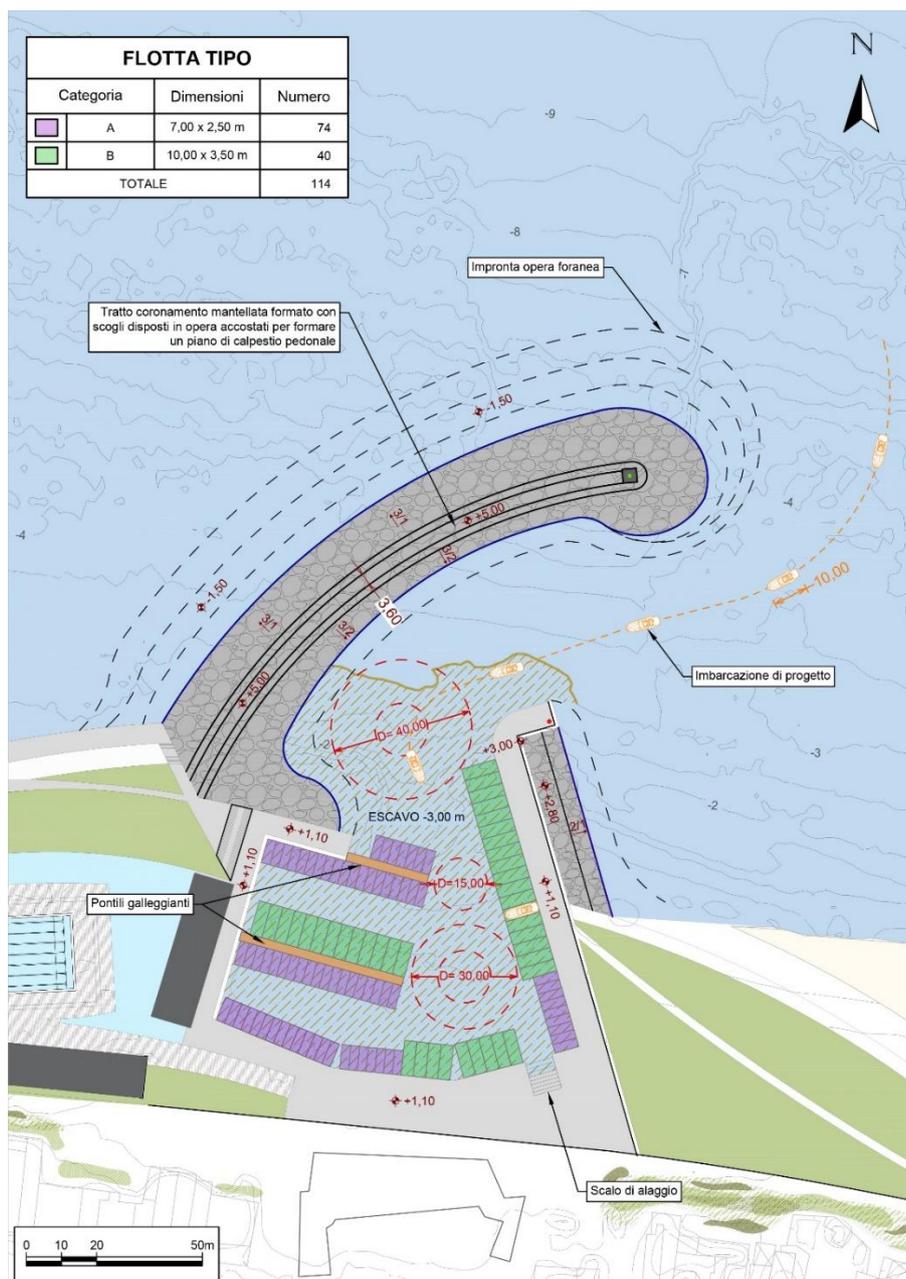


Figura 82 - Cerchi di manovra all'interno del bacino portuale per imbarcazioni di progetto $L_{max}=10,00m$

Nelle “Raccomandazioni tecniche per la progettazione di porti turistici”, redatta dall'Associazione Internazionale di Navigazione (AIPCN 2002 - PIANC), viene indicato al paragrafo “A7. Cerchio di evoluzione” quanto segue:

- *“...Diametro raccomandato: almeno 1.5 volte la lunghezza della più grande imbarcazione ospite del porto...”*

Stante quanto riportato sopra, si è scelto di verificare l'imbarcazione di dimensioni massime con lunghezza pari a 10,00m.

Alla luce di quanto esposto e come documentato dagli schemi grafici dall'Allegato 2, per effettuare la verifica con maggiore sicurezza, si è scelto di moltiplicare i valori di L per un coefficiente di sicurezza pari a 4 volte la lunghezza della più grande imbarcazione ospite del porto all'imboccatura portuale, fino a 3 volte all'interno del bacino portuale antistante la banchina di riva e pari a 1,5 volte nel punto in testata del secondo pontile galleggiante più esterno.

In conclusione, la configurazione del porto non presenta particolari criticità sull'agibilità delle imbarcazioni previste dalla flotta tipo di progetto.