# Città di Rapallo

## RIQUALIFICAZIONE DEL GOLFO DI RAPALLO
## con ripristino delle vie d'acqua di accesso
## al Molo dei Primeri ed al Molo Duca degli Abruzzi

**CUP J63H19000210002 - LOTTO 1**

**PROGETTO DEFINITIVO - ESECUTIVO**

| ELABORATO: | |
|---|---|
| ALL. 2.5 | RELAZIONE SULLA GESTIONE DELLE MATERIE |

RIF: 18-050

| REVISIONI | DATA | OGGETTO |
|---|---|---|
| 00 | 09/2020 | |
| 01 | 11/2020 | VCT-161-20 RC 01 del 31/10/20 |
| 02 | | |
| 03 | | |

RED.: AF VER.: AR APPR.: GR


CAPOGRUPPO:

Dott. Geo. Debellis Giovanni

Geol. GIOVANNI DEBELLIS
Via Antica Romana Occidentale 3/4
16039 - Sestri Levante (GE)
T: +39 338-6079760 F: 0187-816486
gvdebellis@gmail.com
g.debellis@epap.sicurezzapostale.it

MANDANTI:

MarTech
Marine Technical Systems
Viale Trieste, 65/i - 09123 Cagliari - Italy
Tel. +39 070 6848202 - Fax +39 070 6404743
www.martech.it e-mail: info@martech.it

SarLand Srls
ingegneria e architettura


COMMITTENTE:

Il R.u.p.

Geom. Marco GROSSO


Il presente progetto, o parte di esso, non può essere riprodotto in alcuna forma, in alcun modo e per nessuno scopo, senza autorizzazione.

# Indice


1 PREMESSA ..... 3
2 CARATTERIZZAZIONE DEL PARAGGIO ..... 4
2.1 Definizione del contesto di riferimento ..... 4
2.2 Unità fisiografica e paraggio ..... 4
2.3 Settore di traversia ..... 5
2.4 Regime dei venti ..... 7
2.5 Regime ondametrico ..... 9
2.6 Variazione del livello medio ..... 12
3 Modello per la trasformazione del moto ondoso ..... 14
3.1 Impostazione modello e forzanti d'onda ..... 15
3.1.1 Dati batimetrici ..... 16
3.1.2 Scelta delle forzanti d'onda ..... 18
3.2 Risultati ..... 18
4 Modello idrodinamico ..... 31
4.1 Risultati ..... 33
4.1.1 Idrodinamica del Golfo ..... 33
4.1.2 Simulazioni Idrodinamiche per la determinazione dei ricambi idrici all'interno del golfo nelle varie configurazioni ..... 40
5 Valutazione dell'agitazione residua interna ..... 43
5.1 Sistema di modellazione PHAROS ..... 43
5.2 Impostazione modello ..... 43
5.2.1 Caratteristiche di riflessione e trasmissione ..... 43
5.2.2 Condizioni a contorno ..... 43
5.3 Risultati ..... 43
6 Il modello XBeach ..... 51
6.1 Valutazione del run-up ..... 52
6.2 Studio morfologico - risposta della spiaggia alle mareggiate ..... 60
7 Portata di tracimazione ..... 62
7.1 Il software Breakwat ..... 62
7.2 Calcolo della portata di tracimazione ..... 62
7.2.1 Molo Sud Est – Diga Ampoixi ..... 64
7.2.2 Lungomare Vittorio Veneto ..... 68
8 Verifiche di stabilità ..... 73

# 1 PREMESSA

La mareggiata del 29 e 30 ottobre 2018 ha portato, come noto, notevoli danni lungo tutta la costa ligure con particolare riferimento al l litorale di Rapallo ove si sono registrati ingenti danni. Il presente studio affronta la tematica relativa alla progettazione di una serie di interventi volti alla messa in sicurezza del lungomare di Rapallo.

Nello studio sono state esaminate varie alternative progettuali al fine di poter valutare, in termini economici e tecnici ed in più ampio contesto valutativo in termini paesaggistici, quale sia l'alternativa da preferire.

L'intervento nel suo complesso è costituito da una serie di opere che sono di carattere prioritario ossia destinate alla difesa del lungomare dall'ingressione marina durante le mareggiate che in termini tecnici si misura con il valore della tracimazione del moto ondoso (overtopping) espresso in litri/secondo/metro.

A tal fine si prevede pertanto di realizzare un rifiorimento della scogliera del lungomare ed un ripascimento della spiaggia dei cavallini. Nello studio sono state valutate alcune alternative con particolare riferimento al rifiorimento della scogliera del Lungomare Vittorio Veneto che può assumere diverse configurazioni in funzione della presenza o meno di moli foranei.

L'intervento prevede anche il rifiorimento del Molo a Sud Est del Golfo di Rapallo (diga Ampoixi) ed il suo prolungamento di circa 10 metri per ospitare un segnalamento marittimo richiesto dalla Capitaneria di Porto.

# 2 CARATTERIZZAZIONE DEL PARAGGIO

## 2.1 Definizione del contesto di riferimento

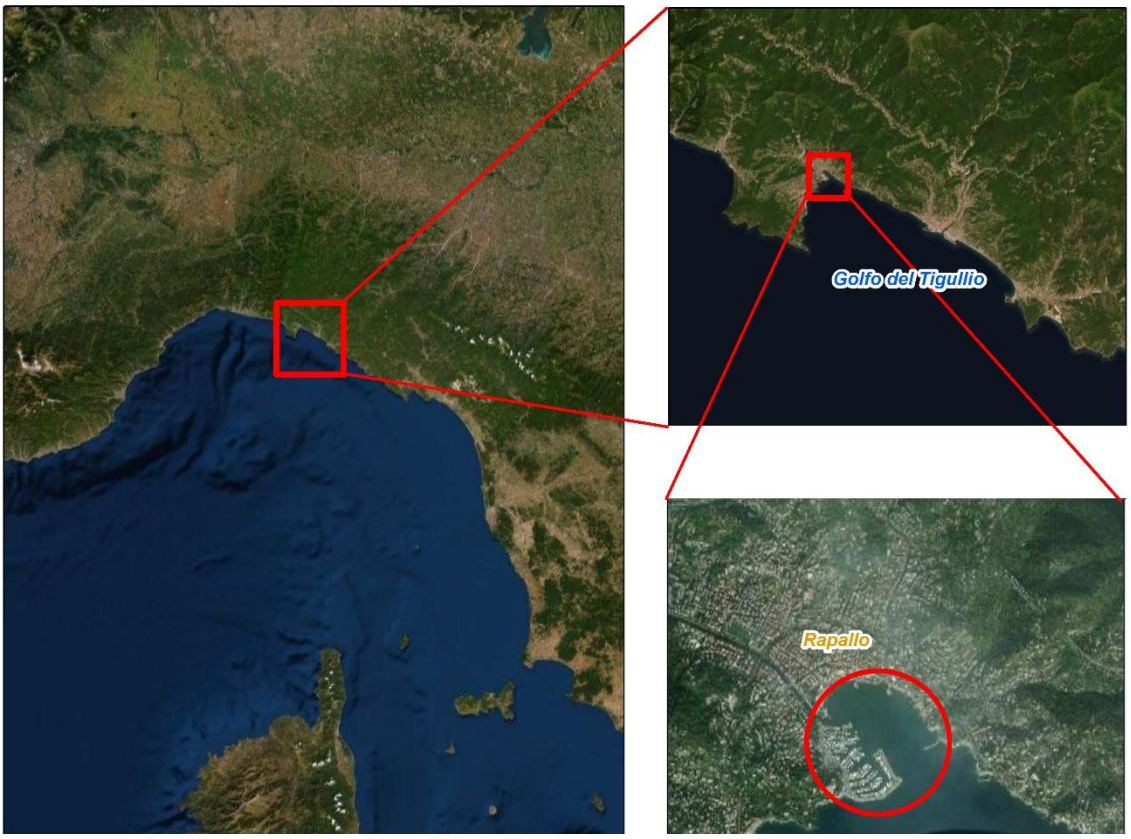



**Figura 1: Zona di intervento**

L'area di interesse è localizzata nel Comune di Rapallo, appartenente alla Città Metropolitana di Genova, sulla costa ligure. L'ambito oggetto di intervento è il porto di Rapallo. localizzato nel Golfo del Tigullio.

Nella cartografia ufficiale nazionale il territorio interessato alla realizzazione delle opere, ricade nelle tavolette in scala 1:25.000 del Foglio I.G.M. n. 231-I.

## 2.2 Unità fisiografica e paraggio

Il Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria indica che l'area di interesse è ricompresa nell'Ambito costiero n. 15, comprendente le unità fisiografiche del Golfo del Tigullio, della Baia del Silenzio e di Riva Trigoso, ed è delimitato nel suo complesso dalla Punta di Portofino a nord-ovest e da Punta Baffe a sud-est per uno sviluppo totale di 41.6 km. (Figura 2). Rapallo è localizzata all'interno dell'Unità Fisiografica "Golfo del Tigullio", costituita da un lungo settore costiero di forma pressappoco rettangolare delimitato a nordovest dalla punta di Portofino ed a sudest dal promontorio di Sestri Levante.

Il paraggio di interesse è il numero 7 "Rapallo che si estende per circa 2.5 km da Punta Longon a Castello dei Sogni (Figura 3).




**Figura 2: Unità Fisiografica Golfo del Tigullio e suoi paraggi. Fonte: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**




**Figura 3: Paraggio n. 7 "Rapallo". Fonte: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**

## 2.3 Settore di traversia

Ponendoci a largo dell'area di intervento, si individua un settore di traversia massima di circa 100°. Il settore di massimo fetch[1] geografico è compreso tra i 200°N e 240°N e si estende per oltre 1000 km, fino alle coste nordafricane.

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

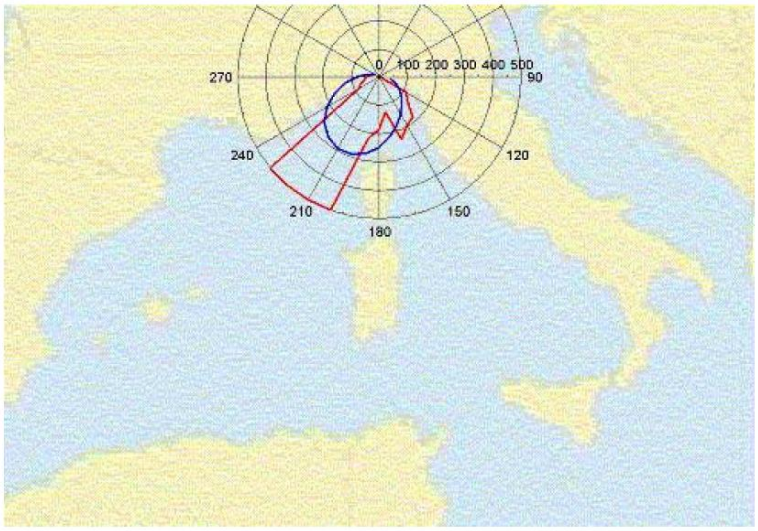



**Figura 4: Rappresentazione del fetch geografico e di quello efficace al largo del Golfo del Tigullio. Fonte: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**

## 2.4 Regime dei venti

Per la definizione del regime dei venti si è fatto riferimento al sito www.mareografico .it, che riporta i dati disponibili per la stazione mareografica di Genova.
La stazione di Genova è situata presso l'acquario,
Le stazioni mareografiche sono dotate di caposaldi altimetrici. Ogni caposaldo è riferito al livello medio del mare misurato a Genova dall'antico mareografo Thompson. I caposaldi sono contrassegni metallici che determinano la quota altimetrica mediante livellazione di alta precisione condotta a partire dalle linee principali stabilite dall'IGM.
Recentemente (16/12/09 per Genova e 30/06/2010 per La Spezia) il valore che compare con la denominazione "livello idrometrico" viene misurato con un nuovo sensore radar denominato SIAP+MICROS TLR con precisione millimetrica. ISPRA garantisce l'uniformità della misura con la serie di dati precedenti a tale data prodotti con il sensore SIAP+MICROS ID0710 basato su un trasduttore ad ultrasuoni avendone verificato il preciso allineamento.
Entrambe le stazioni mostrano un vento prevalente e dominante proveniente dal primo quadrante, ovvero un vento di terra. Secondariamente, si osserva un clima anemometrico caratterizzato dagli eventi del terzo quadrante nella stazione di Genova (210°N) e del secondo quadrante a La Spezia (125°N).

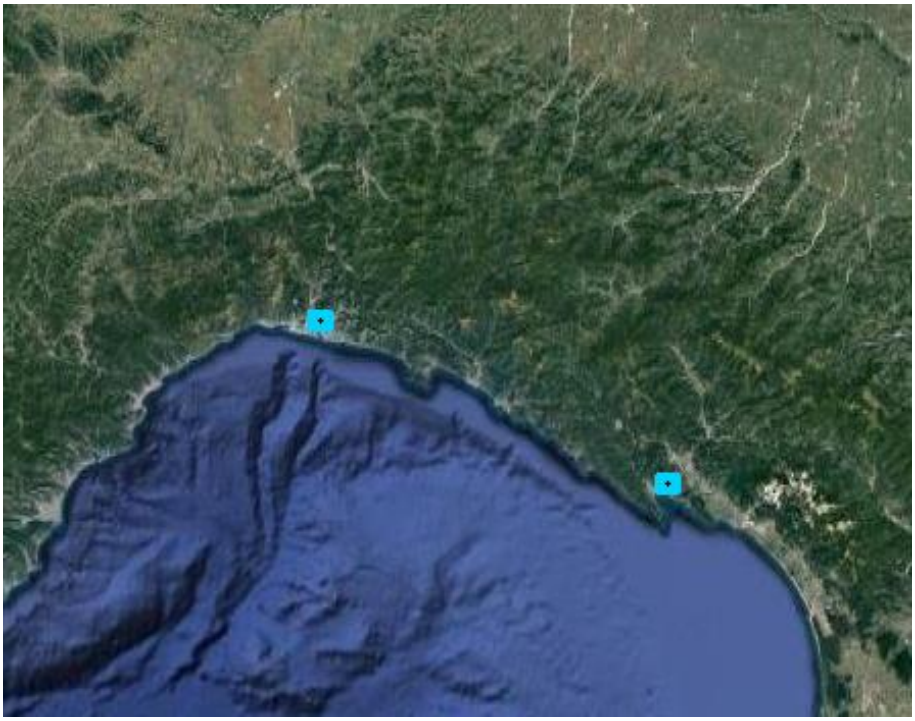


**Figura 5: Posizione delle stazioni mareografiche di Genova e di La Spezia. Fonte: www.mareografico.it**

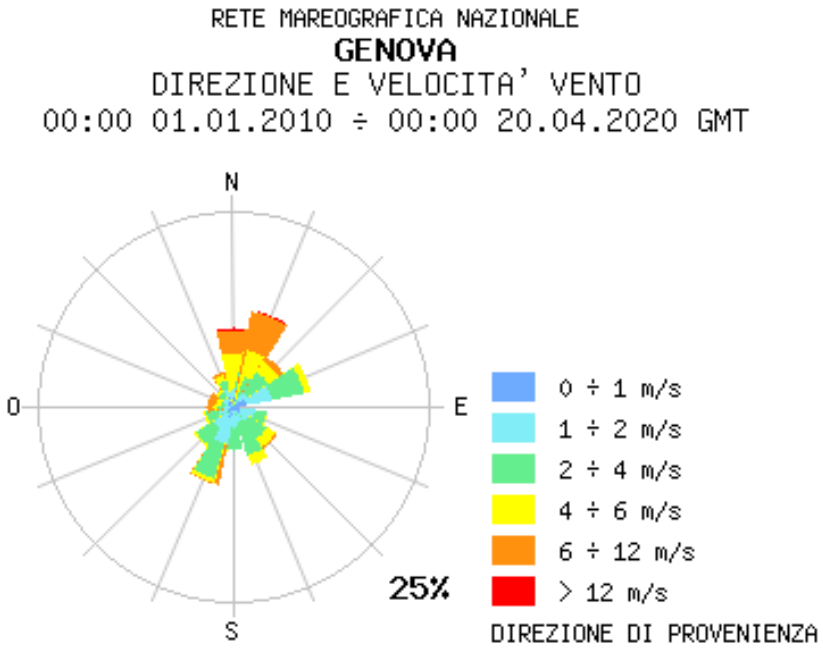



**Figura 6: Intensità e frequenza del vento nella stazione mareografica di Genova. Fonte: www.mareografico.it**

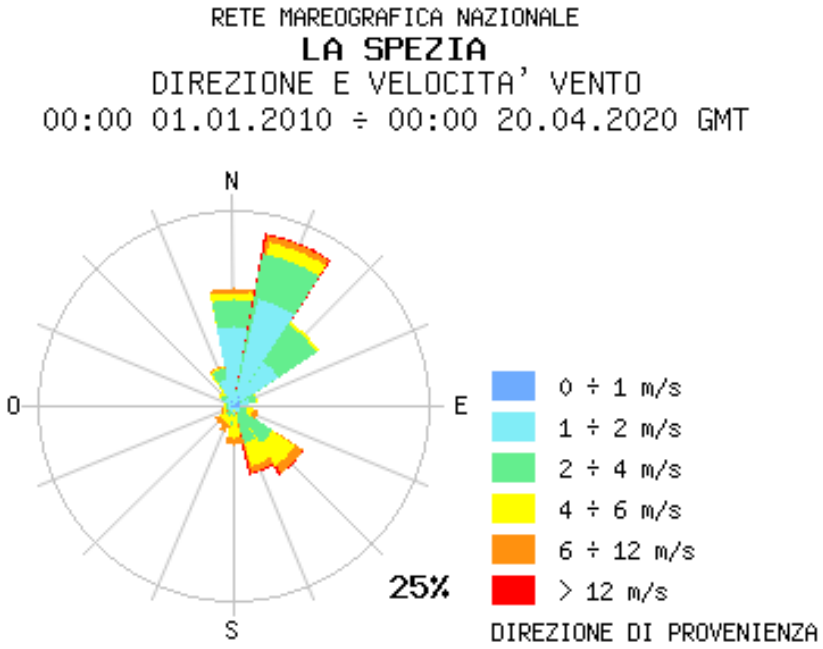



**Figura 7: Intensità e frequenza del vento nella stazione mareografica di La Spezia. Fonte: www.mareografico.it**

## 2.5 Regime ondametrico

Per la definizione del clima ondametrico dell'area di intervento si è fatto riferimento al Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria, a cui si rimanda per approfondimenti.

Il clima del moto ondoso al largo del Golfo del Tigullio è stato definito sulla base delle misurazioni eseguite all'ondametro della Rete Ondametrica Nazionale (R.O.N.) di La Spezia.

La Rete Ondametrica Nazionale è attiva dal luglio 1989. Ogni boa, ancorata su fondali dell'ordine di 100 metri, segue il movimento della superficie dell'acqua e permette di determinare l'altezza e la direzione delle onde. Gli strumenti sono dotati di un sistema di localizzazione che utilizza il satellite ARGOS per il controllo continuo della posizione.

Le stazioni sono completate da un centro di ricezione ed elaborazione a terra dei dati inviati via radio dalla boa. La boa Datawell-Wavec segue il movimento della superficie del mare e mediante il sensore Hippy 120 ne misura l'elevazione e le inclinazioni riferite ad una piattaforma inerziale, contenuta all'interno del sensore, che individua il piano di riferimento orizzontale. L'elevazione è ottenuta dalla doppia integrazione dell'accelerazione verticale misurata da un accelerometro montato sulla piattaforma. Le inclinazioni sono ottenute dalla misura del seno degli angoli formati tra gli assi x e y del sistema di riferimento solidale con la boa ed il piano di riferimento orizzontale. Un sistema di bussole misura le componenti del campo magnetico lungo gli assi del sistema di riferimento solidale con la boa: Hx, Hy, Hz. Da tali componenti del campo magnetico e dalle suddette inclinazioni si ricavano: il valore assoluto e l'inclinazione del campo magnetico terrestre, l'orientamento della boa e le due pendenze locali della superficie dell'acqua nelle due direzioni nord-sud ed est-ovest, che consentono di definire la direzione di propagazione delle onde. I dati vengono acquisiti normalmente per periodi di 30 minuti ogni tre ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate significativamente. Dalle tre serie temporali di elevazione, pendenza nord-sud e pendenza est-ovest vengono ottenuti:

Le serie storiche RON sono costituite dall'altezza d'onda significativa spettrale, Hm0, la direzione media di provenienza delle onde, qw, il periodo di picco, Tp, ed il periodo medio, Tm, riferiti ad un singolo stato di mare di durata compresa fra 20 minuti e 26 minuti, in funzione dei diversi strumenti di misura adottati nel corso degli anni. Dal 01/07/1989 al 15/06/2002 i dati sono memorizzati con cadenza trioraria per altezze d'onda inferiori alla soglia di 5 m e con cadenza semioraria quando le altezze d'onda sono maggiori o uguali a 5 m. Dal 15/06/2002 tutti i dati sono memorizzati con cadenza semioraria. Le serie ricostruite ERA e NOAA contengono Hm0, qw e Tp, con cadenza esaoraria e trioraria rispettivamente.

La boa ondametrica situata al largo della Spezia (posizione 43°55',7 N – 9°49',6 E) è attiva dal 1989. Le osservazioni forniscono altezza spettrale (Hm0), periodo di picco (Tp), periodo medio (Tm) e direzione media totale di propagazione (DTM) ogni tre ore e, nel caso di superamento della soglia di Hm0 pari a 4.50 m, ogni 30 minuti.

L'area di ubicazione della boa di La Spezia è completamente aperta al settore 210°-240° (fetch praticamente illimitato), settore da cui provengono le mareggiate più intense. La boa è ancorata a circa 56 km in direzione sud-est dal punto al largo del golfo del Tigullio individuato. Tale boa è significativa anche per il clima ondametrico nel Golfo del Tigullio, che ha la stessa esposizione ai mari prevalenti e dominanti e ai mari caratterizzati da fetch molto corti

Il numero di dati rilevati (pari a 97114) e l'intervallo temporale di osservazione (luglio 1989 – settembre 2006, 17 anni; di cui dal luglio 2002 misurati in continuo) consentono di effettuare un'analisi statistica avente buona attendibilità, basata su dati più precisi ed attendibili di quelli desumibili dai metodi indiretti o dalle osservazioni dirette visive.

Al fine di determinare correttamente le misure del moto ondoso al largo del Golfo del Tigullio, il Piano utilizza il metodo di trasposizione geografica proposto da Contini e De Girolamo (1998).

Dall'analisi effettuata dal PTAMC emerge che al largo del Golfo del Tigullio gli stati di mare più frequenti e caratterizzati dalle onde più elevate provengono, come logico aspettarsi, dal terzo quadrante (210° - 240°N) che quindi può essere

assunto quale settore di traversia principale. La traversia secondaria per il paraggio è rappresentata dal settore sud-sud-est (compreso tra 150°-180°N).

Inoltre, il Piano riporta le seguenti considerazioni relativamente alla caratterizzazione del moto ondoso:

- la percentuale degli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 0.5 m è pari a circa il 46%.
- la percentuale degli eventi caratterizzati da altezze d'onda superiori a 0.5 m provengono per il 60% dal settore di traversia principale, per il 20% dal settore secondario e per il rimanente da altre direzioni (sempre comprese nel range di interesse 90°-300°);
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0.5 m e provenienti dal settore di traversia principale hanno per il 77% altezza d'onda inferiore a 2 m;
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0.5 m e provenienti dalle altre direzioni hanno per l'82% circa altezze d'onda inferiori a 2 m.
- la maggior parte degli eventi (circa il 97%) sono caratterizzati da un valore del periodo di picco TP compreso tra 2 e 10 secondi.

| DIR (°N) | 0m - 0,25 m | 0,25 m - 0,5m | 0,5m - 1m | 1m - 1,5m | 1,5m - 2m | 2m - 2,5m | 2,5m - 3m | 3m - 3,5m | 3,5m - 4m | 4m - 4,5m | 4,5m - 5m | 5m - 5,5m | 5,5m - 6m | 6m - 6,5m | 6,5m - 7m | 7m - 7,5m | 7,5m - 8m | TOT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 90 | | 3 | 7 | 6 | 1 | | | | | | | | | | | | | 17 |
| 100 | | 8 | 19 | 4 | 1 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | 35 |
| 110 | | 12 | 18 | 11 | 2 | | | | | 1 | | | | | | | | 44 |
| 120 | 1 | 7 | 27 | 8 | 3 | 3 | | | | 1 | | | | | | | | 50 |
| 130 | | 20 | 23 | 15 | 7 | 5 | 1 | | 1 | | | | | | | | | 72 |
| 140 | | 28 | 41 | 17 | 8 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 102 |
| 150 | 1 | 18 | 48 | 23 | 7 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | 106 |
| 160 | 2 | 38 | 65 | 34 | 21 | 6 | 2 | 3 | | | | | | | | | | 171 |
| 170 | 7 | 57 | 98 | 44 | 14 | 5 | 1 | 3 | 2 | 1 | | | | | | | | 232 |
| 180 | 7 | 55 | 87 | 25 | 12 | 5 | 2 | | | | 1 | | | | | | | 194 |
| 190 | 15 | 65 | 50 | 17 | 7 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 156 |
| 200 | 15 | 72 | 45 | 30 | 8 | 4 | | | 1 | 1 | | | | | | | | 176 |
| 210 | 35 | 84 | 94 | 40 | 9 | 6 | 4 | 1 | | | | | | | | | | 273 |
| 220 | 34 | 142 | 161 | 102 | 79 | 33 | 10 | 9 | | | 1 | | | | | | | 571 |
| 230 | 44 | 238 | 260 | 108 | 57 | 36 | 9 | 5 | 5 | 3 | 1 | 1 | | | | | | 767 |
| 240 | 88 | 206 | 148 | 48 | 16 | 4 | 4 | 1 | 5 | | 1 | | | | | | | 521 |
| 250 | 107 | 93 | 61 | 14 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | 280 |
| 260 | 90 | 57 | 22 | 1 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | 173 |
| 270 | 71 | 47 | 11 | 5 | | | | | | | | | | | | | | 134 |
| 280 | 69 | 29 | 8 | 1 | | | | | | | | | | | | | | 107 |
| 290 | 51 | 20 | 7 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | 80 |
| 300 | 26 | 11 | 3 | | 2 | | | | | | | | | | | | | 42 |
| 310 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 320 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 330 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 340 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 350 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 360 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **TOT** | **663** | **1310** | **1303** | **554** | **259** | **116** | **39** | **26** | **17** | **9** | **6** | **1** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **4303** |

**Tabella 1: Distribuzione della frequenza di accadimento congiunta altezza d'onda e direzione di provenienza rappresentativa del regime ondoso medio annuale del sito al largo del Golfo del Tigullio. Fonte dati: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**

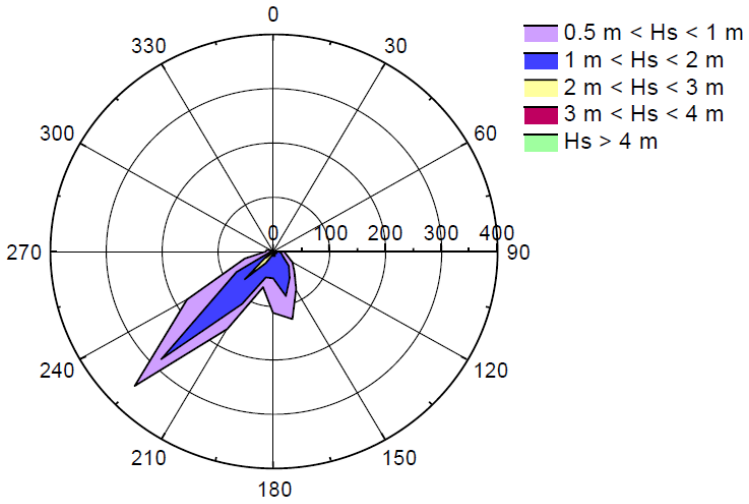



**Figura 8: Diagramma polare delle frequenze delle onde mediata su durata annuale a largo del Golfo del Tigullio. Fonte dati: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**

| | Tp [s] <2 | 2- 4 | 4 -6 | 6 -8 | 8 -10 | 10 - 12 | >12 | tot |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Hs [m]** | | | | | | | | |
| **0m - 0,25m** | 75 | 274 | 231 | 8 | 68 | 1 | 0 | 657 |
| **0,25m - 0,5m** | 3 | 376 | 552 | 52 | 312 | 12 | 2 | 1309 |
| **0,5m - 1m** | 0 | 113 | 655 | 173 | 397 | 11 | 1 | 1350 |
| **1m - 1,5m** | 0 | 2 | 186 | 216 | 269 | 16 | 2 | 691 |
| **1,5m - 2m** | 0 | 0 | 21 | 244 | 190 | 13 | 1 | 469 |
| **2m - 2,5m** | 0 | 0 | 2 | 151 | 79 | 5 | 0 | 237 |
| **2,5m - 3m** | 0 | 0 | 1 | 62 | 20 | 0 | 0 | 83 |
| **3m - 3,5m** | 0 | 0 | 0 | 16 | 3 | 3 | 1 | 23 |
| **3,5m - 4m** | 0 | 0 | 0 | 6 | 2 | 4 | 0 | 12 |
| **4m - 4,5m** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| **4,5m - 5m** | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 5 |
| **5m - 5,5m** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| **5,5m - 6m** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **6m - 6,5m** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **6,5m - 7m** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **TOT** | 78 | 765 | 1648 | 929 | 1340 | 73 | 8 | 4841 |

**Tabella 2: Classificazione delle altezze d'onda in relazione al periodo di picco. Fonte dati: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**

| | Tp [s] <2 | 2- 4 | 4 -6 | 6 -8 | 8 -10 | 10 - 12 | >12 | tot |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Hs [m]** | | | | | | | | |
| **0m - 0,25m** | 1.55 | 5.66 | 4.77 | 0.17 | 1.40 | 0.02 | | 13.57 |
| **0,25m - 0,5m** | 0.06 | 7.77 | 11.40 | 1.07 | 6.44 | 0.25 | 0.04 | 27.04 |
| **0,5m - 1m** | | 2.33 | 13.53 | 3.57 | 8.20 | 0.23 | 0.02 | 27.89 |
| **1m - 1,5m** | | 0.04 | 3.84 | 4.46 | 5.56 | 0.33 | 0.04 | 14.27 |
| **1,5m - 2m** | | | 0.43 | 5.04 | 3.92 | 0.27 | 0.02 | 9.69 |
| **2m - 2,5m** | | | 0.04 | 3.12 | 1.63 | 0.10 | | 4.90 |
| **2,5m - 3m** | | | 0.02 | 1.28 | 0.41 | | | 1.71 |
| **3m - 3,5m** | | | | 0.33 | 0.06 | 0.06 | 0.02 | 0.48 |
| **3,5m - 4m** | | | | 0.12 | 0.04 | 0.08 | | 0.25 |
| **4m - 4,5m** | | | | | | 0.08 | | 0.08 |
| **4,5m - 5m** | | | | 0.02 | | 0.06 | 0.02 | 0.10 |
| **5m - 5,5m** | | | | | | 0.02 | | 0.02 |
| **5,5m - 6m** | | | | | | | | 0.00 |
| **6m - 6,5m** | | | | | | | | 0.00 |
| **6,5m - 7m** | | | | | | | | 0.00 |
| **TOT** | 1.61 | 15.80 | 34.04 | 19.19 | 27.68 | 1.51 | 0.17 | 100.00 |

**Tabella 3: Classificazione delle altezze d'onda in relazione al periodo di picco. Fonte dati: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**

Il Piano effettua un'analisi statistica dei dati utilizzando la distribuzione probabilistica di Gumbel e determinando così le altezze d'onda significative e il periodo di picco per le direzioni di provenienza del moto ondoso e per svariati tempi di ritorno tra 1 e 100 anni. I risultati di tale analisi sono riportati in Tabella 4.

| Periodo di ritorno | dir 160° | | dir 180° | | dir 220° | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $H_{m0T}$ | $T_P$ | $H_{m0T}$ | $T_P$ | $H_{m0T}$ | $T_P$ |
| [anni] | [m] | [s] | [m] | [s] | [m] | [s] |
| 1 | 3.1 | 8.0 | 2.7 | 7.4 | 4.7 | 9.7 |
| 2 | 3.9 | 8.9 | 3.3 | 8.2 | 5.1 | 10.2 |
| 5 | 4.8 | 9.9 | 4.0 | 9.1 | 5.7 | 10.8 |
| 10 | 5.4 | 10.5 | 4.5 | 9.6 | 6.2 | 11.2 |
| 20 | 6.1 | 11.1 | 5.0 | 10.1 | 6.7 | 11.7 |
| 30 | 6.5 | 11.5 | 5.3 | 10.4 | 6.9 | 11.9 |
| 50 | 6.9 | 11.9 | 5.7 | 10.8 | 7.3 | 12.2 |
| 100 | 7.6 | 12.4 | 6.2 | 11.2 | 7.7 | 12.6 |

**Tabella 4: Valori di altezza d'onda e periodo di picco associati ai periodi di ritorno significativi per le direzioni di propagazione scelte in corrispondenza del sito al largo del Golfo del Tigullio. Fonte dati: Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria**

## 2.6 Variazione del livello medio

Ai fini della valutazione della variazione del livello medio e delle maree si sono considerati i dati della stazione della rete mareografica localizzata all'interno del porto di Genova.

La Rete Mareografica Nazionale è composta di 26 nuove stazioni di misura uniformemente distribuite sul territorio nazionale ed ubicate prevalentemente all'interno delle strutture portuali. Questa rete sostituisce integralmente il sistema di rilevazione mareografico preesistente: in tali stazioni hanno funzionato per molti anni mareografi meccanici a registrazione cartacea gestiti dalle sezioni periferiche del Genio Civile Opere Marittime. Nel 1986 sono stati installati dei mareografi elettronici a galleggiante con registrazione locale in memoria EPROM. Le nuove stazioni che compongono la RMN, sostituite tra il 1998 ed l 1999, sono composte da due strumenti di misura della marea: uno (principale) ad ultrasuoni

con guida tubolare del fascio e compensazione di temperatura, ed uno (secondario) a galleggiante e registrazione cartacea per la verifica puntuale delle misure, l'analisi di eventi o fenomeni particolari ed il recupero dei dati nei casi di mancato funzionamento dello strumento principale. I mareografi sono riferiti ad un caposaldo quotato con livellazione di alta precisione, opportunamente verificato, sulla base del più vicino caposaldo IGM. Le stazioni sono dotate anche di un sensore anemometrico (velocità e direzione del vento a 10 metri dal suolo), di un sensore barometrico, di un sensore di temperatura dell'aria e di un sensore di temperatura dell'acqua. Tutte le stazioni sono dotate di un sistema locale di gestione e memorizzazione dei dati e di un apparato di trasmissione in tempo reale alla sede centrale dell'APAT a Roma. Da quando la nuova Rete Mareografica Nazionale è pienamente operativa, l'APAT mette a disposizione degli utenti informazioni aggiornate relative a serie storiche, osservazioni in tempo reale, previsione dei dati di marea astronomica, analisi dei dati a fini progettuali e scientifici. I dati mareografici e le costanti di marea locali aggiornate verranno pubblicati su un bollettino annuale. l'APAT ha inoltre provveduto ad effettuare un'operazione di recupero e riorganizzazione dei dati storici della rete preesistente, sia in forma cartacea sia in forma digitale, in modo da poter affiancare alle osservazioni storiche quelle rilevate dalla nuova rete nazionale.

Il PGRA partendo dalla serie di dati della Stazione di Cagliari procede all'analisi armonica delle componenti di marea, arrivando ad individuare la componente astronomica separandola da quella metereologica. Lo studio arriva a stimare, per tutta la Sardegna un livello di marea astronomica pari a 15 cm, ovvero un'escursione massima pari a circa 30 cm (Figura 9).

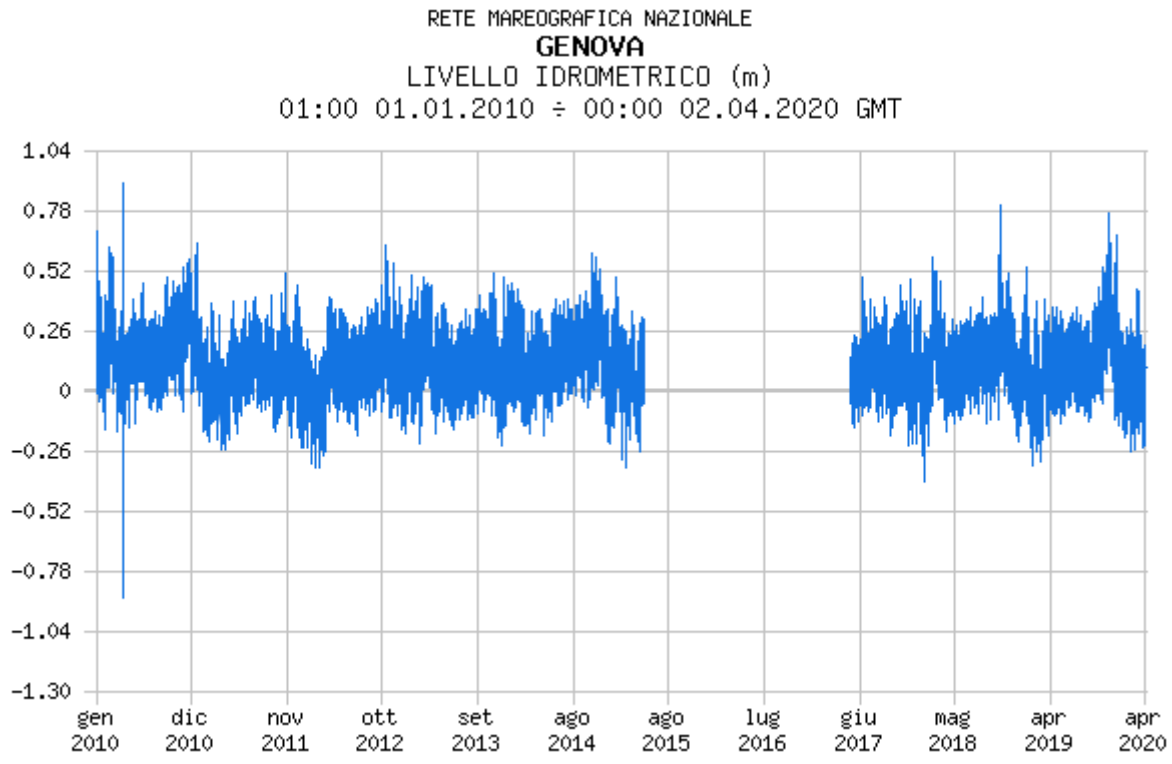


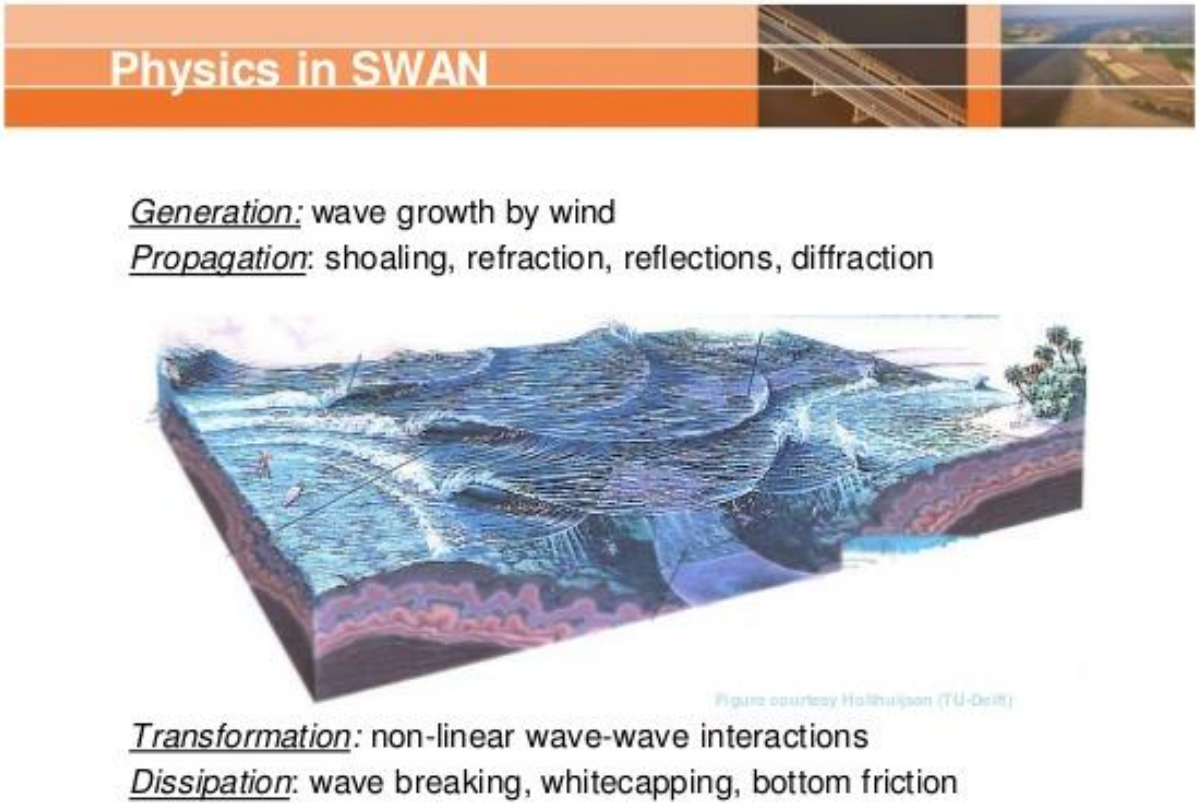

**Figura 9: Serie storica mareografica misurata alla stazione RMN di Genova. Fonte: www.mareografico .it**

# 3 Modello per la trasformazione del moto ondoso

Per la determinazione delle condizioni di moto ondoso in corrispondenza dell'area di interesse è stato utilizzato il modulo WAVE, della suite Delf3D, basato sul modello SWAN. Il modello SWAN, (acronimo di Simulation WAves Nearshore), è un modello spettrale di terza generazione sviluppato dalla Università Tecnologica di Delft (Olanda) ed utilizzato per la simulazione dell'evoluzione di onde generate dal vento in corrispondenza di aree costiere. Tale modello è il successore del modello stazionario di seconda generazione HISWA, rispetto al quale ha dei grandi vantaggi e supera le limitazioni ai quali era soggetto.

In particolare:

- in SWAN i fenomeni fisici sono rappresentati esplicitamente grazie a formulazioni allo stato dell'arte;
- il modello è completamente spettrale sia in frequenza che in direzione (0°-360°);
- il modello è incondizionatamente stabile grazie all'implementazione di schemi completamente impliciti;
- le griglie di calcolo non devono essere orientate nella direzione media del moto ondoso, per cui possono essere utilizzate con onde provenienti da tutte le direzioni.




Inoltre, le simulazioni possono avvenire su griglie curvilinee, (che si accoppiano meglio con i moduli idrodinamici di Delft3D) e può, per esempio, generare risultati sotto forma di spettri mono e bidimensionali. Per maggior completezza, le forze delle onde sono calcolate dal modello sulla base del gradiente del tensore di "radiation stress" (invece che del tasso di dissipazione come nei precedenti modelli); questo può essere utilizzato come forzante per il calcolo delle correnti indotte dalle onde ed il set-up nel modello idrodinamico.

In SWAN le onde sono descritte attraverso lo spettro di densità di azione delle onde bidimensionali, anche nel caso in cui a dominare siano i fenomeni non lineari (come ad esempio nella zona di surf). Utilizzando lo spettro anche in condizioni fortemente non lineari è possibile prevedere con ragionevole precisione la distribuzione spettrale del momento di secondo ordine delle onde. SWAN considera lo spettro di densità dinamica N ($\sigma$; $\theta$) piuttosto che lo spettro di densità di energia E ($\sigma$; $\theta$) poiché in presenza di correnti, la densità dinamica viene conservata, a differenza della densità di energia (Whitham,

1974). Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa $\sigma$ e la direzione d'onda $\theta$ (direzione normale alla cresta dell'onda di ciascun componente spettrale). La densità dinamica è uguale alla densità di energia divisa per la frequenza relativa N ($\sigma$; $\theta$)= E ($\sigma$; $\theta$)/$\sigma$. In SWAN questo spettro può variare nel tempo e nello spazio.

Nel modello SWAN l'evoluzione dello spettro d'onda è basato su una discretizzazione dell'equazione di equilibrio dinamico che in coordinate cartesiane assume la forma:

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

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

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

L'equazione è completamente spettrale (in tutte le direzioni e frequenze). Questa ultima caratteristica implica che possono essere calcolati i campi d'onda delle onde di vento propagatisi simultaneamente da differenti direzioni. Il modello consente di calcolare l'evoluzione e la trasformazione delle onde di vento (short crested random waves) in regioni costiere ed in acque profonde, di transizione e basse ed in aree soggette a correnti. Il modello tiene in considerazione l'effetto di rifrazione e rappresenta i fenomeni rigenerativi del vento, la dissipazione di potenza d'onda dovuta al cappucciamento, all'attrito sul fondo ed al frangivento delle onde, nonché dell'interazione onda-onda. Il modello tiene conto solo parzialmente dell'effetto diffrattivo.

Il modello SWAN è stato validato con successo e verificato in parecchi casi di laboratorio ed in complessi campi. Le aree di applicazione del modello, comprese tra i 4 ed i 2500 $Km^2$, sono molto varie e vanno dal supporto alla progettazione di marine, porti ed installazioni offshore.

## 3.1 Impostazione modello e forzanti d'onda

Per l'esecuzione dei calcoli del modello, sono state realizzate tre griglie di calcolo differenti, secondo una procedura chiamata "nesting". Tale procedura consiste nello svolgere i calcoli al largo su una griglia che copre una vasta area con una spaziatura tra le maglie larga, e di utilizzare poi i risultati ottenuti con tale simulazione come condizioni al contorno su una griglia di dimensioni minori e con una spaziatura tra celle inferiore, in modo da ottenere dei risultati più accurati nell'area in esame. Si è quinti utilizzata una griglia a maglie larghe che si estende per un'area sufficientemente vasta rispetto all'area di interesse, una griglia media estesa al largo e una griglia di dettaglio che includa l'area di progetto (Figura 10).

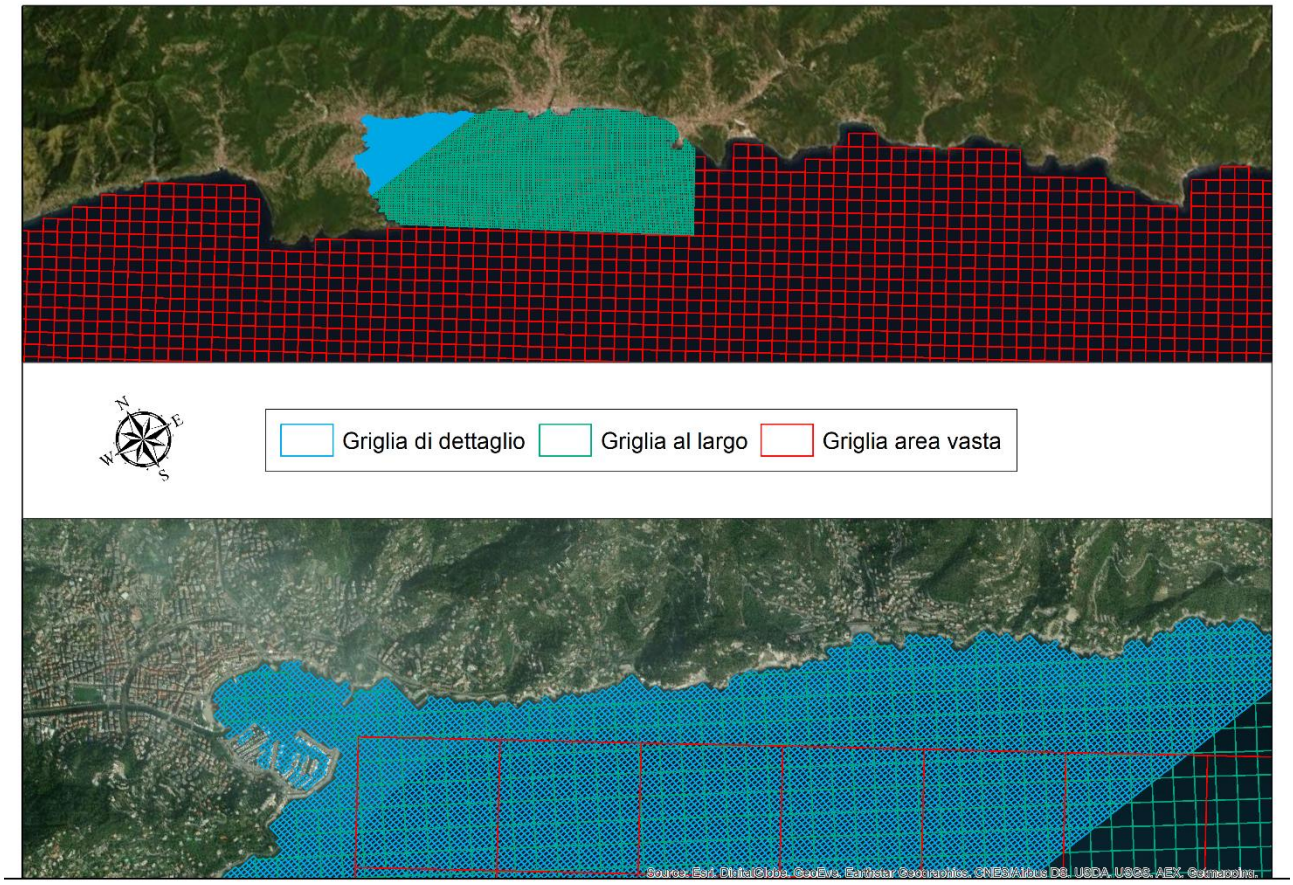



**Figura 10: Griglie di calcolo per lo studio**

### *3.1.1 Dati batimetrici*

La corretta valutazione dei processi di rifrazione, riflessione e diffrazione dell'onda in prossimità della costa è legata morfologia del fondale. A tal proposito sono necessari, quali dati di ingresso al modello numerico, dei dati batimetrici che permettano di rappresentare al meglio i processi in atto (Figura 12). Per tale motivo, lo studio meteo-marino ha necessitato di rilievi batimetrici appositamente realizzati nell'area di interesse (vedi Figura 11), integrati al largo con i dati reperiti dalle carte batimetriche a disposizione.

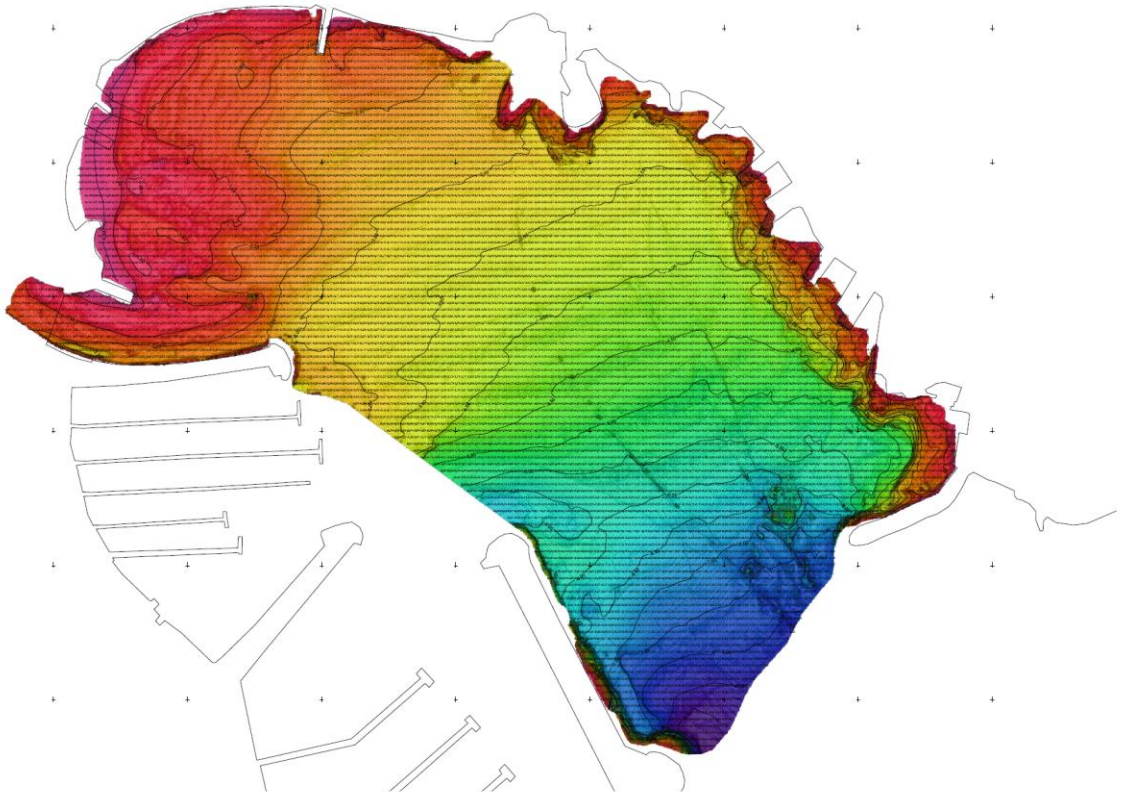


**Figura 11: Batimetrie di rilievo in corrispondenza dell'area portuale**

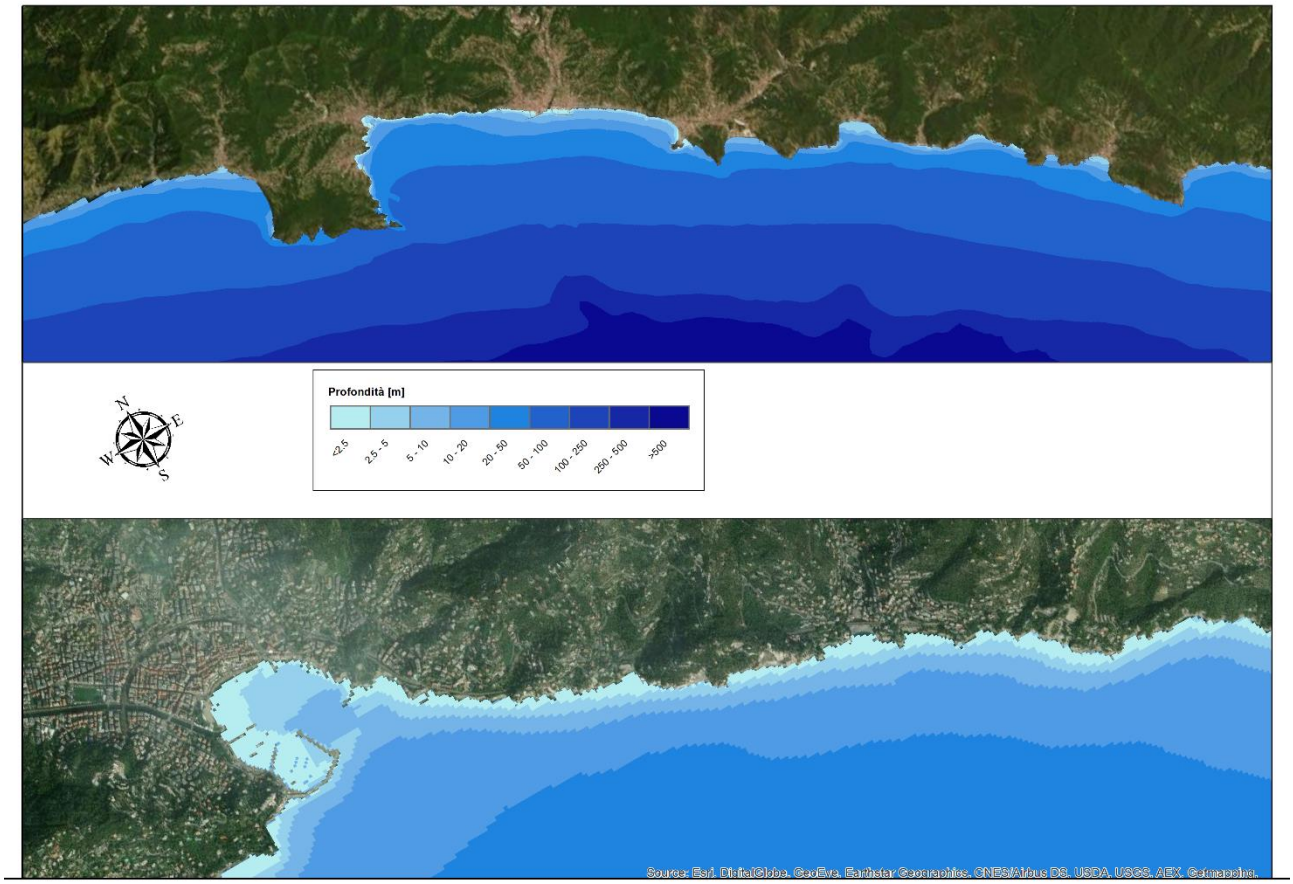



**Figura 12: Batimetrie di input al modello**

### *3.1.2 Scelta delle forzanti d'onda*

Sulla base dell'analisi statistica del Piano di Tutela dell'Ambiente Marino e Costiero della Regione Liguria, son state scelte le forzanti d'onda di ingresso al modello che sono riportate in

| Run | Tr | Onde | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Dir | Hs | Tp |
| 001_160_ | 1 anni | 160 | 3.1 | 8.00 |
| 001_180 | 1 anni | 180 | 2.7 | 7.40 |
| 001_220 | 1 anni | 220 | 4.7 | 9.70 |
| 010_160 | 10 anni | 160 | 5.4 | 10.50 |
| 010_180 | 10 anni | 180 | 4.5 | 9.60 |
| 010_220 | 10 anni | 220 | 6.2 | 11.20 |
| 050_160 | 50 anni | 160 | 6.9 | 11.90 |
| 050_180 | 50 anni | 180 | 5.7 | 10.80 |
| 050_220 | 50 anni | 220 | 7.3 | 12.20 |
| 100_160 | 100 anni | 160 | 7.6 | 12.40 |
| 100_180 | 100 anni | 180 | 6.2 | 11.20 |
| 100_220 | 100 anni | 220 | 7.7 | 12.60 |

**Tabella 5: forzanti d'onda in ingresso al modello**

## 3.2 Risultati

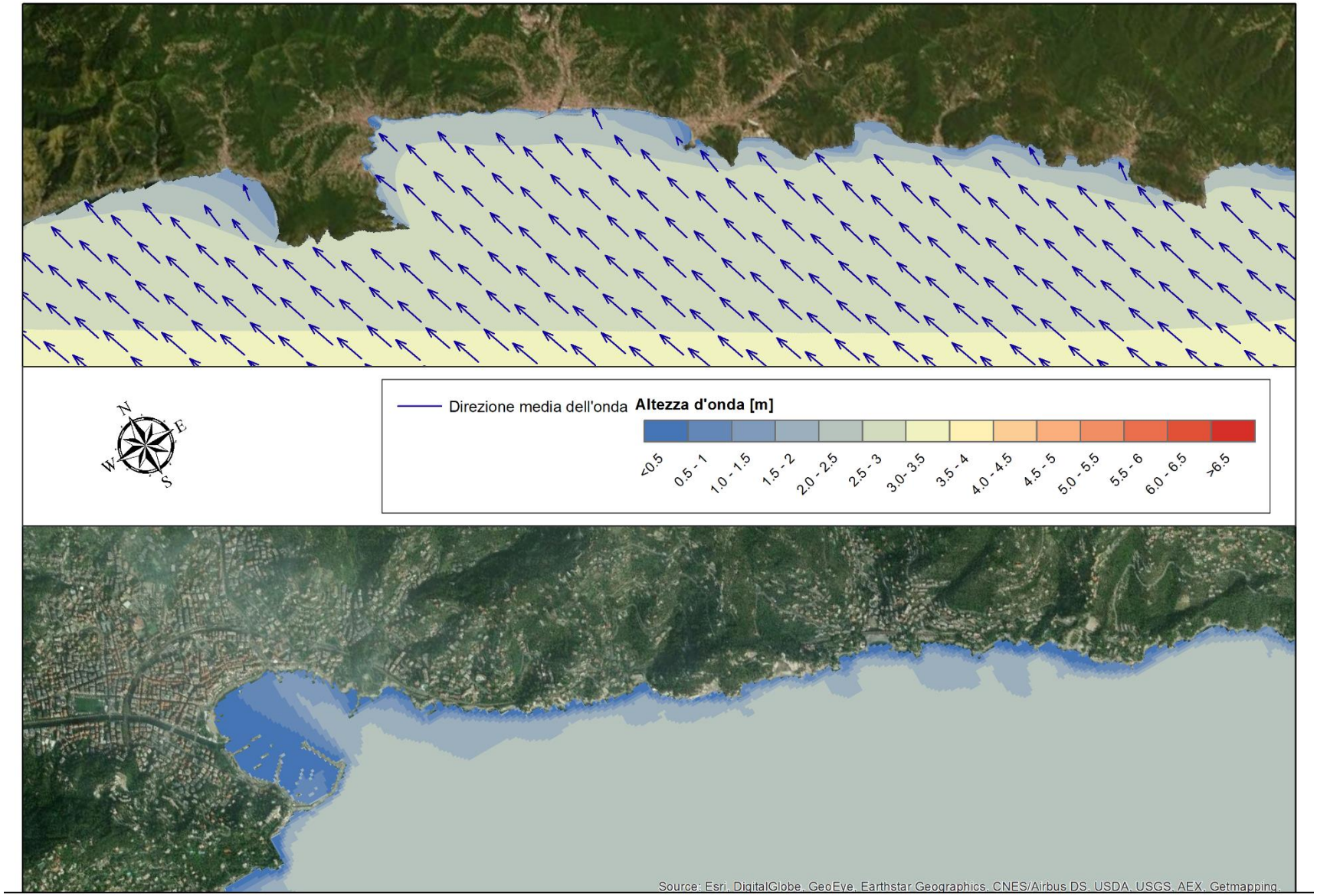



**Figura 13: Tempo di ritorno 1 anno – Simulazione 160°N; Hs=3.1 m; Tp=8.0 s**

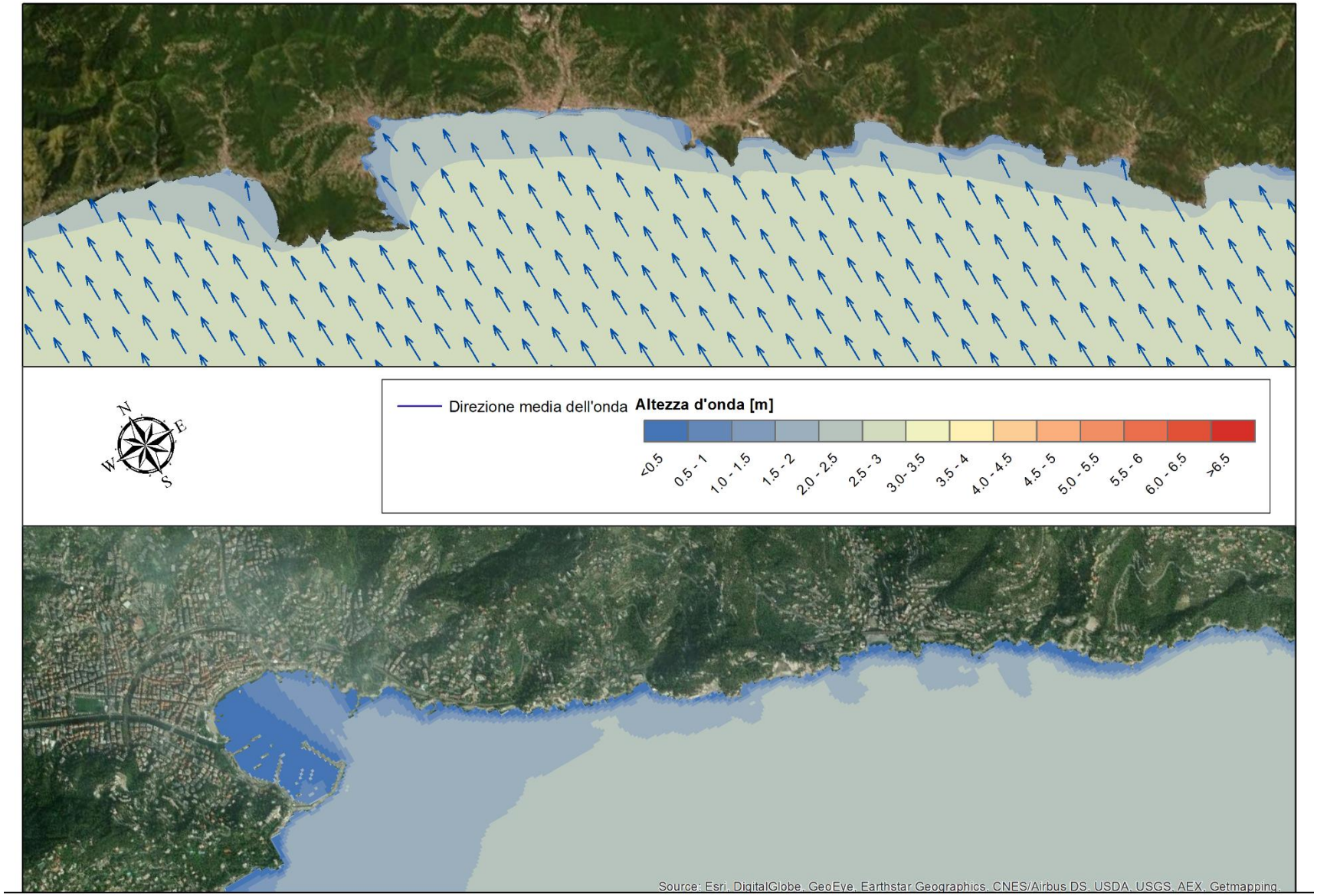



**Figura 14: Tempo di ritorno 1 anno – Simulazione 180°N; Hs=2.7 m; Tp=7.4 s**

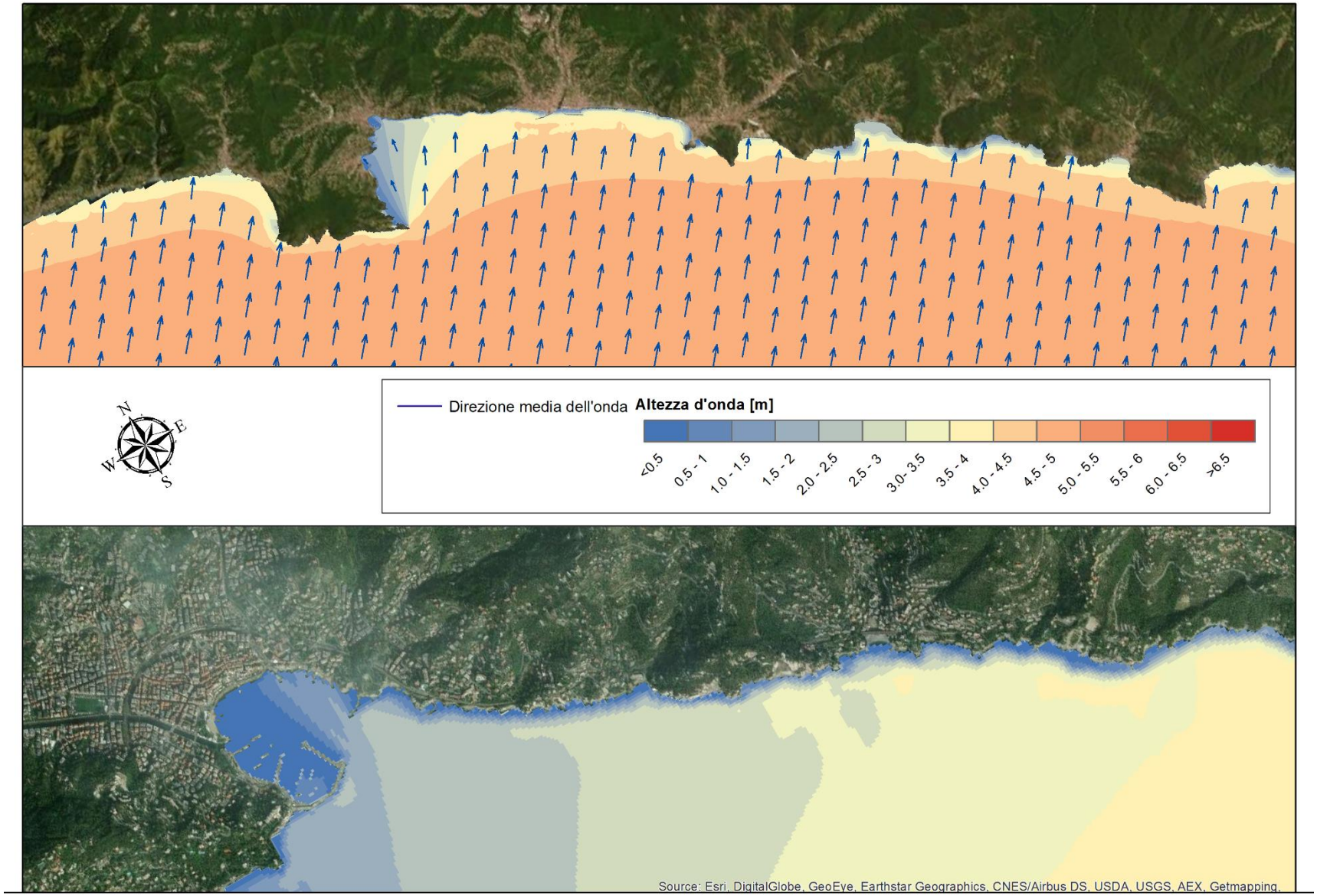



**Figura 15: Tempo di ritorno 1 anno – Simulazione 220°N; Hs=4.7 m; Tp=9.7 s**

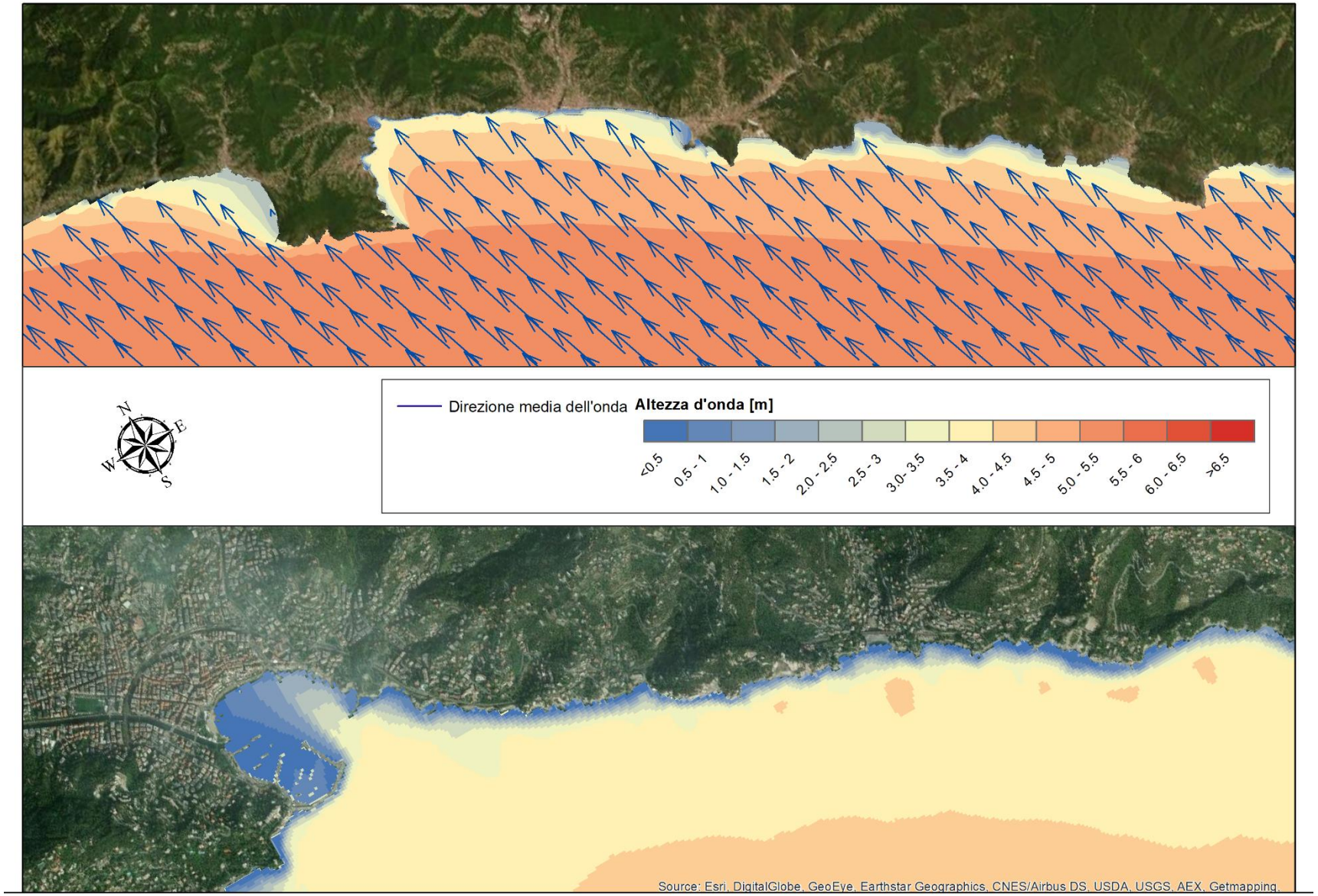



**Figura 16: Tempo di ritorno 10 anni – Simulazione 160°N; Hs=5.4 m; Tp=10.5 s**

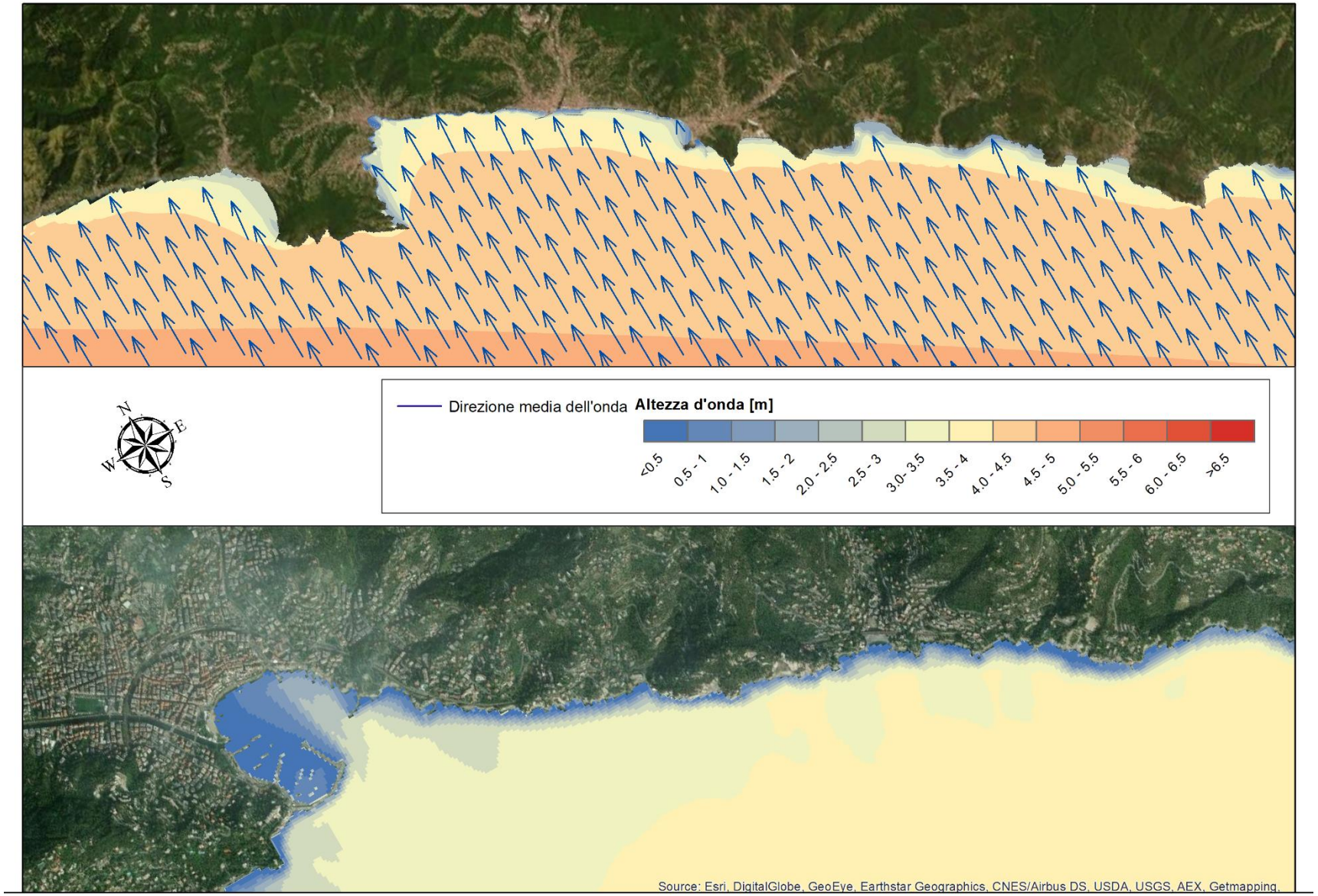



**Figura 17: Tempo di ritorno 10 anni – Simulazione 180°N; Hs=4.5 m; Tp=9.6 s**

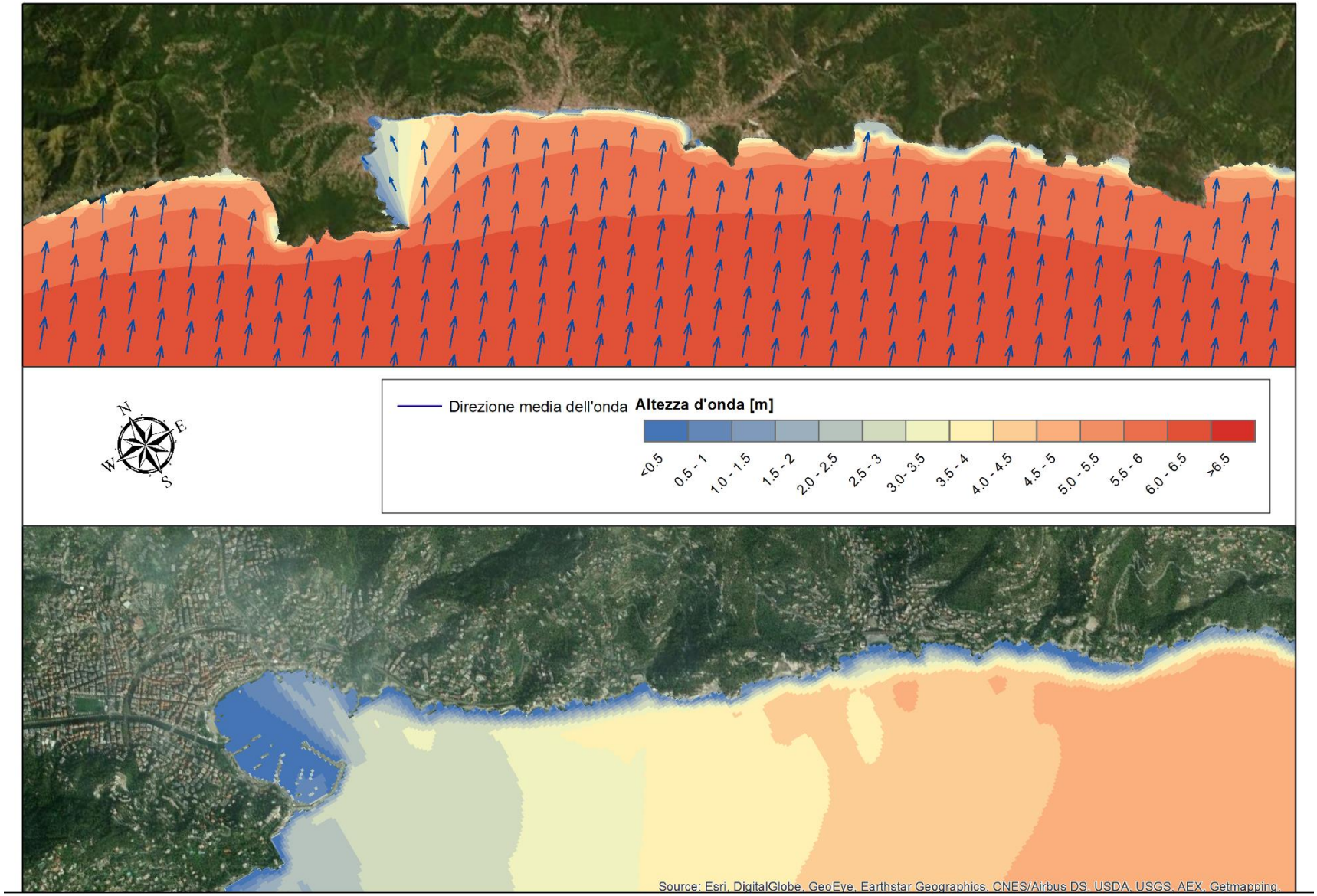



**Figura 18: Tempo di ritorno 10 anni – Simulazione 220°N; Hs=6.2 m; Tp=11.2 s**

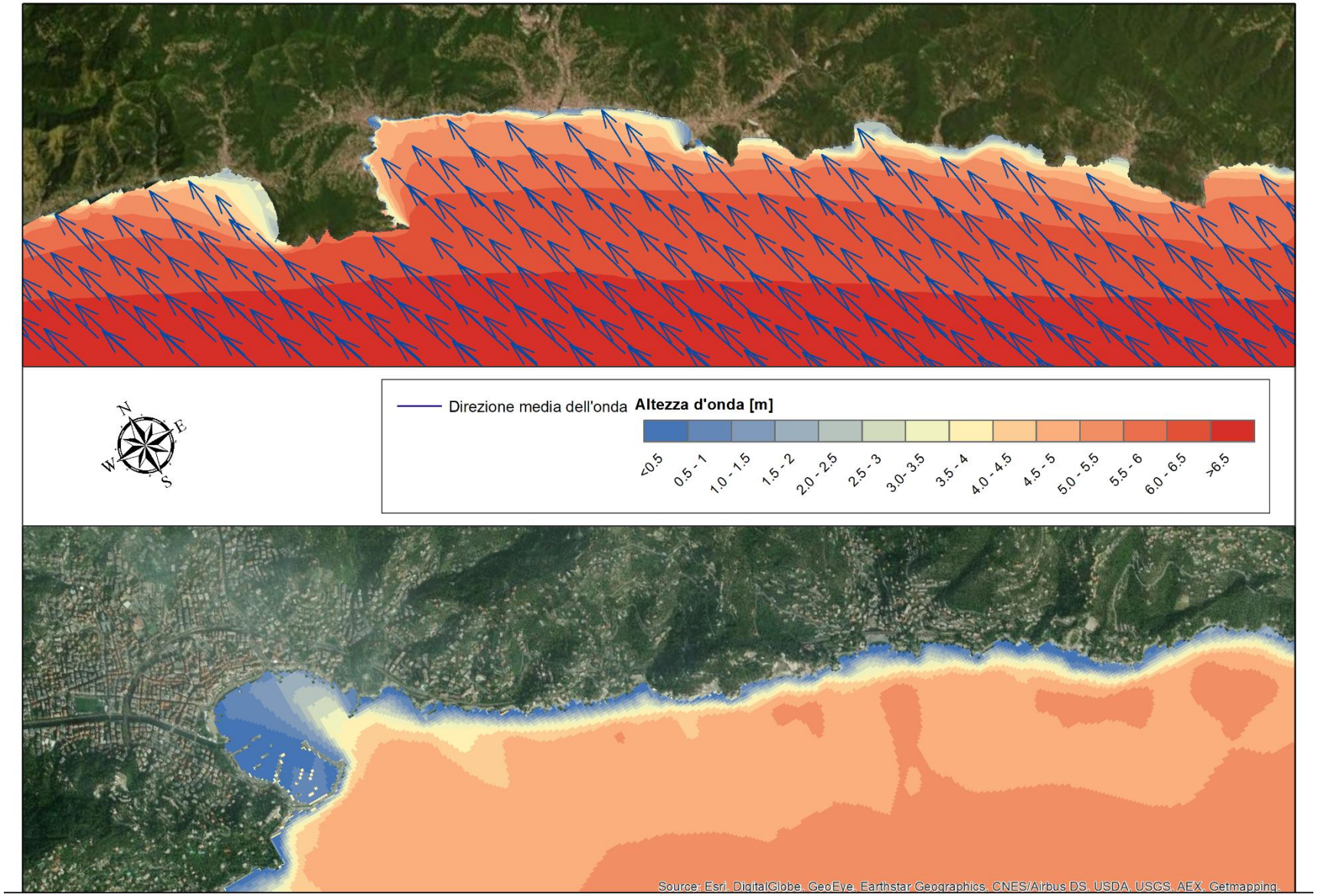



**Figura 19: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 160°N; Hs=6.9 m; Tp=11.9 s**

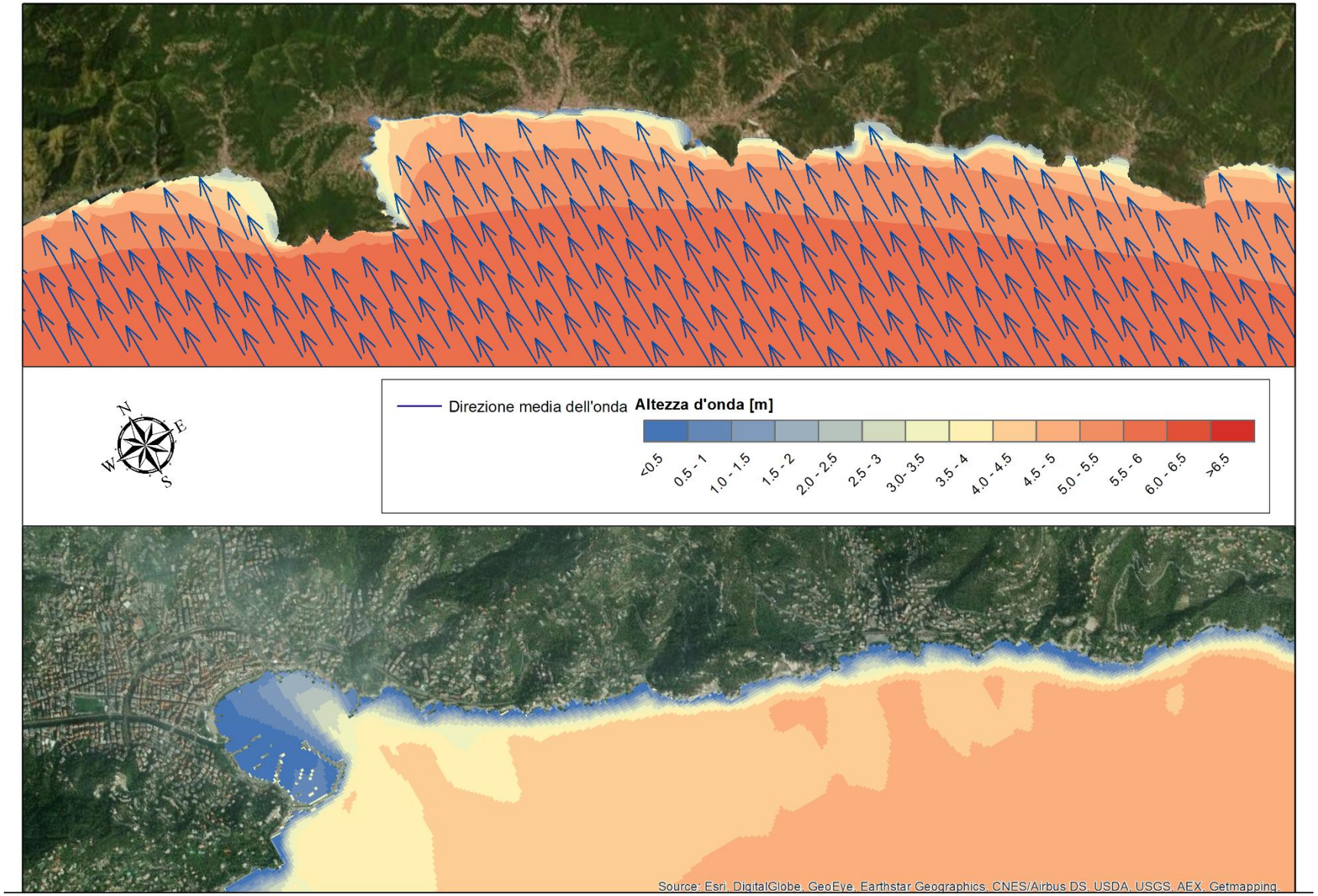



**Figura 20: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 180°N; Hs=5.7 m; Tp=10.8 s**

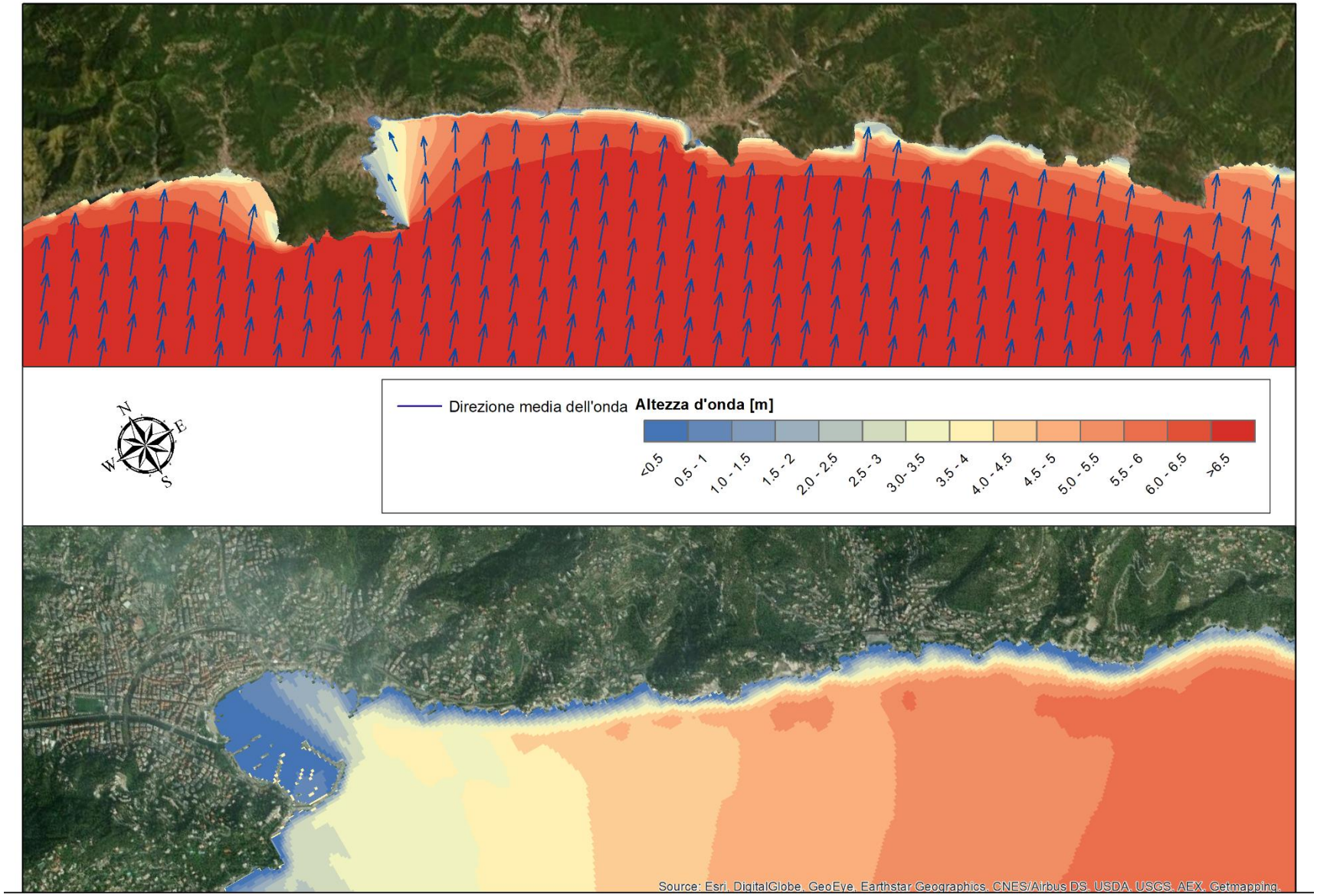



**Figura 21: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 220°N; Hs=7.3 m; Tp=12.2 s**

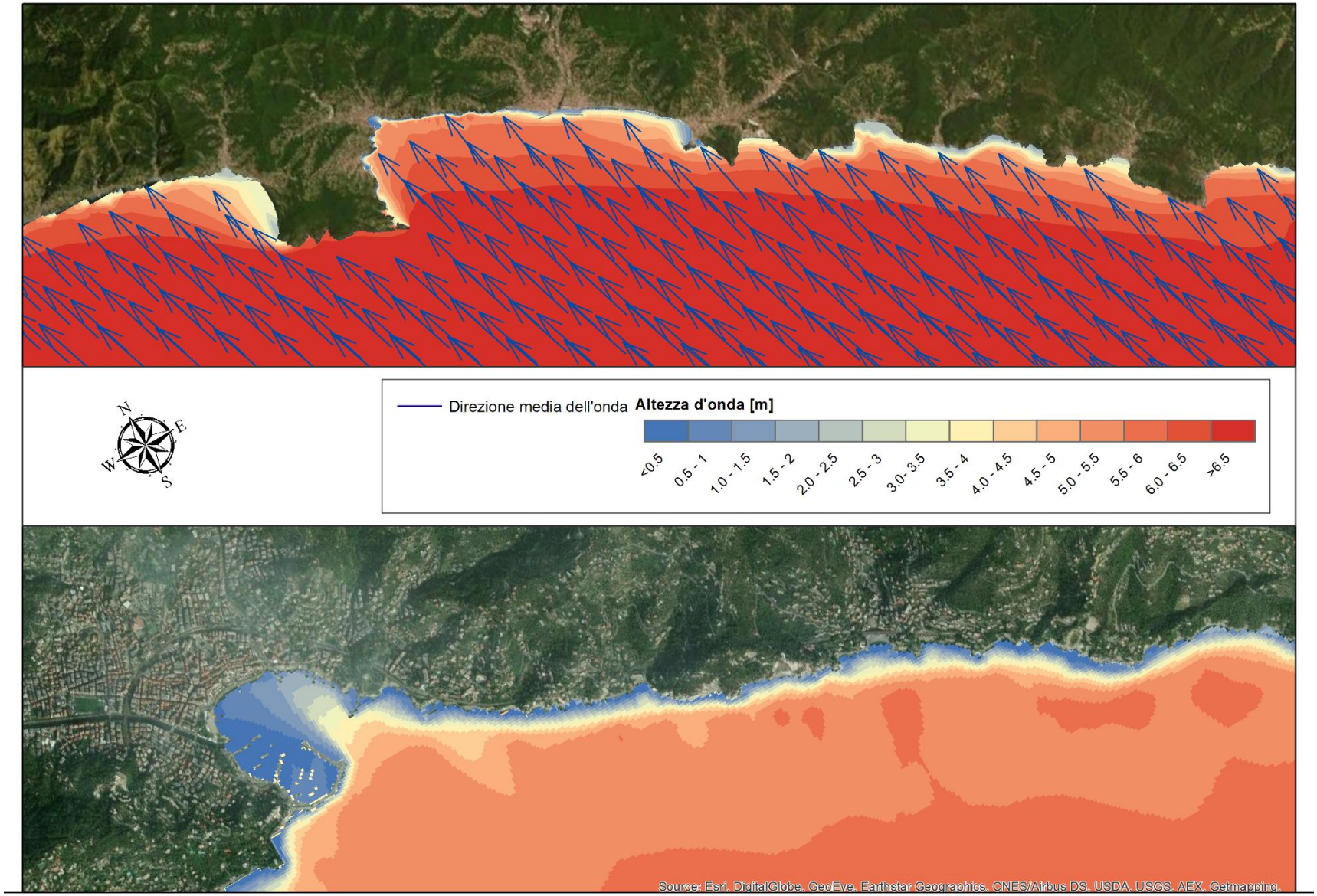



**Figura 22: Tempo di ritorno 100 anni – Simulazione 160°N; Hs=7.6 m; Tp=12.4 s**

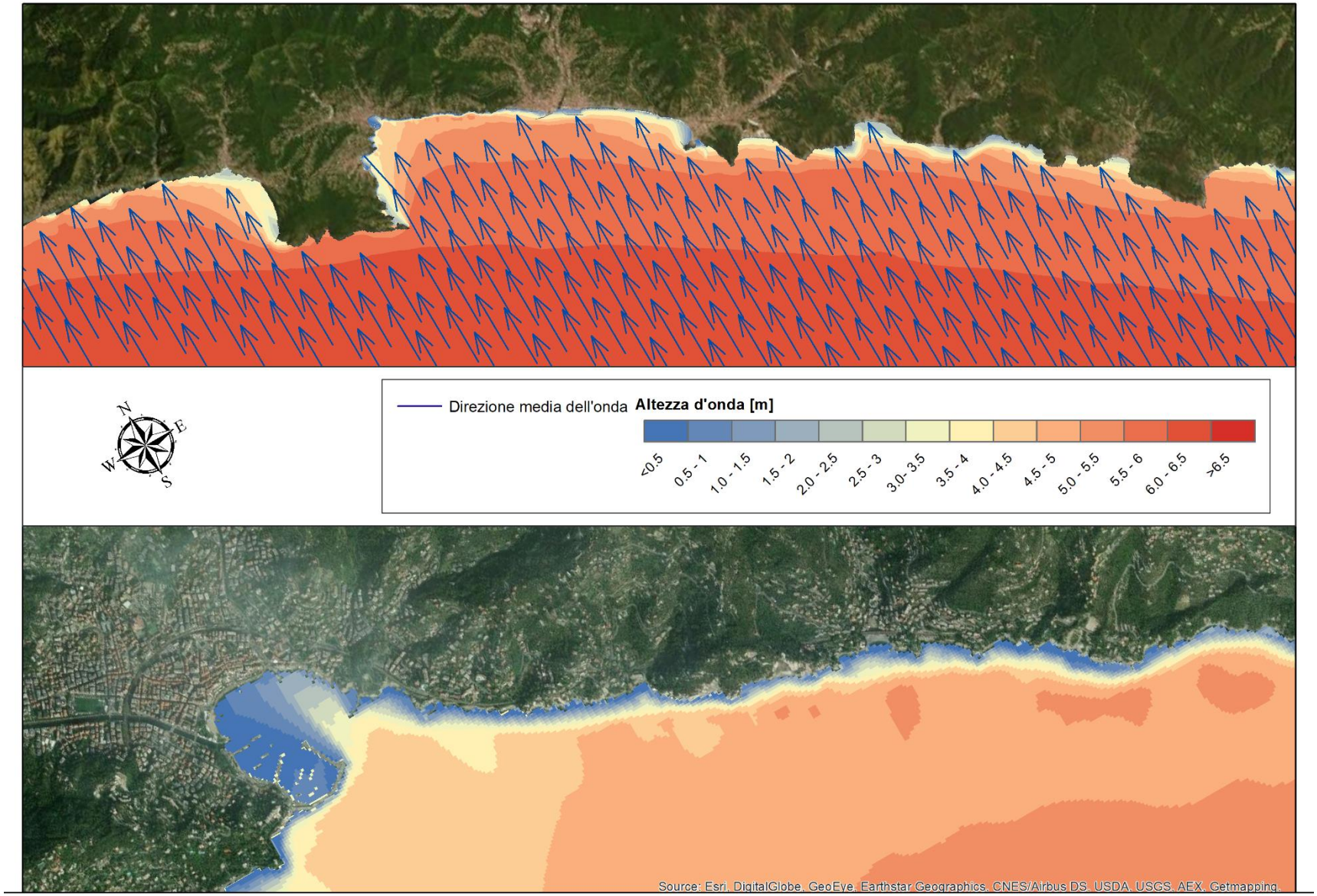



**Figura 23: Tempo di ritorno 100 anni – Simulazione 180°N; Hs=6.2 m; Tp=11.2 s**

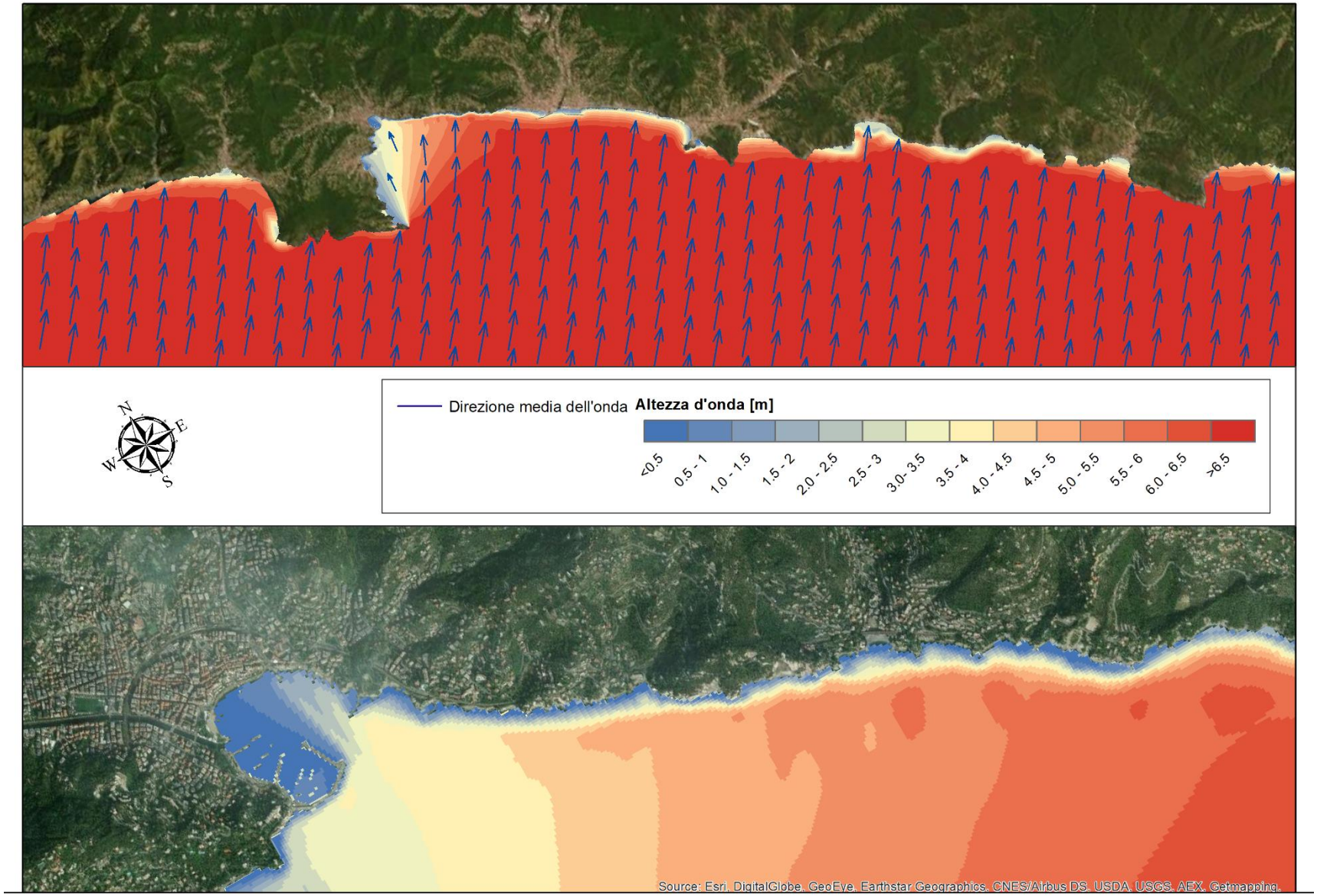



**Figura 24: Tempo di ritorno 100 anni – Simulazione 220°N; Hs=7.7 m; Tp=12.6 s**

# 4 Modello idrodinamico

Il modulo idrodinamico è un programma multi dimensionale idrodinamico che calcola flussi non stazionari e fenomeni di trasporto risultanti da forzanti di marea e metereologiche su una griglia curvilinea e ben modellata. Nelle simulazioni 3D, il modulo idrodinamico applica le cosiddette trasformazioni di coordinate sigma lungo la verticale, che si risolve in una rappresentazione arrotondata della topografia. Questo approccio ha come risultato un'elevata efficienza di calcolo dovuto ad un costante numero di layer sull'intiero dominio.
Il modello è basato sulle equazioni complete di Navier-Stokes con l'approssimazione per acque basse. Le equazioni sono risolte con una procedura altamente accurata incondizionatamente stabile. Le caratteristiche supportate sono:

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

I campi d'applicazione del modello sono vari e vanno dalla modellizzazione dell'intrusione salina negli estuari dei fiumi, all'immissione d'acqua fresca nelle baie, alla stratificazione termale nel mare e nei laghi. Nello studio in questione, si utilizzeranno soprattutto le possibilità del modello di modellare i flussi idrodinamici dovuti ad onde e di calcolare e modellare il trasporto di sedimenti.
Il modulo si basa sulle equazioni di Navier-Stokes per un fluido incompressibile, sotto le assunzioni di Boussinnesq per le acque basse. Nell'equazione di momenti in direzione verticale non si tiene conto dell'accelerazione verticale il che porta all'equazione della pressione idrostatica.

Le equazioni su cui si basa il modello sono:
***Equazione di continuità***

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

dove:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

***Le equazioni del momento della quantità di moto*** nelle direzioni orizzontali sono così definite

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial \eta}+\frac{\omega}{d+\varsigma}\frac{\partial u}{\partial \sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta}-\frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi}-fv=$$

$$=-\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}}P_\xi+F_\xi+\frac{1}{(d+\varsigma)^2}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\nu_V\frac{\partial u}{\partial\sigma}\right)+M_\xi$$

e

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial \eta}+\frac{\omega}{d+\varsigma}\frac{\partial u}{\partial \sigma}+\frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta}-\frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \xi}-fu=$$

$$=-\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}}P_\eta+F_\eta+\frac{1}{(d+\varsigma)^2}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\nu_V\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right)+M_\eta$$

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

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

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

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

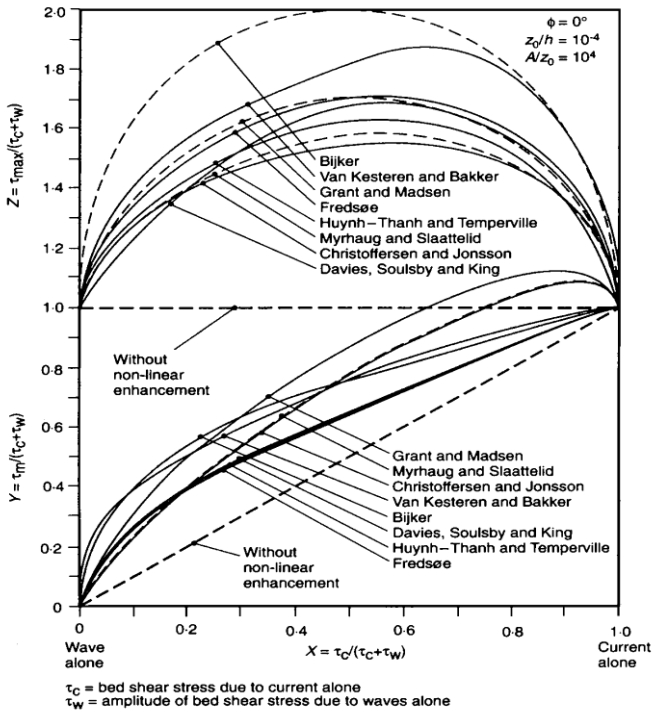
***L'equazione del trasporto*** è formulata in una forma conservativa nelle coordinate ortogonali curvilinee nella direzione orizzontale e nella coordinata sigma lungo la verticale:

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t}+\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc\right]}{\partial\xi}+\frac{\partial\left[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc\right]}{\partial\eta}\right\}+\frac{\partial\omega c}{\partial\sigma}=$$

$$+\frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\left\{\frac{\partial}{\partial\xi}\left[D_H\frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial c}{\partial\xi}\right]+\frac{\partial}{\partial\eta}\left[D_H\frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial c}{\partial\eta}\right]\right\}+$$

$$+\frac{1}{d+\zeta}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left[D_V\frac{\partial c}{\partial\sigma}\right]-\lambda_d(d+\zeta)c+S,$$

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




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

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

## 4.1 Risultati

### *4.1.1 Idrodinamica del Golfo*

#### *4.1.1.1 Situazione attuale*



**Figura 25: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 160°N; Hs=6.9 m; Tp=11.9 s**



**Figura 26: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 160°N; Hs=6.9 m; Tp=11.9 s**

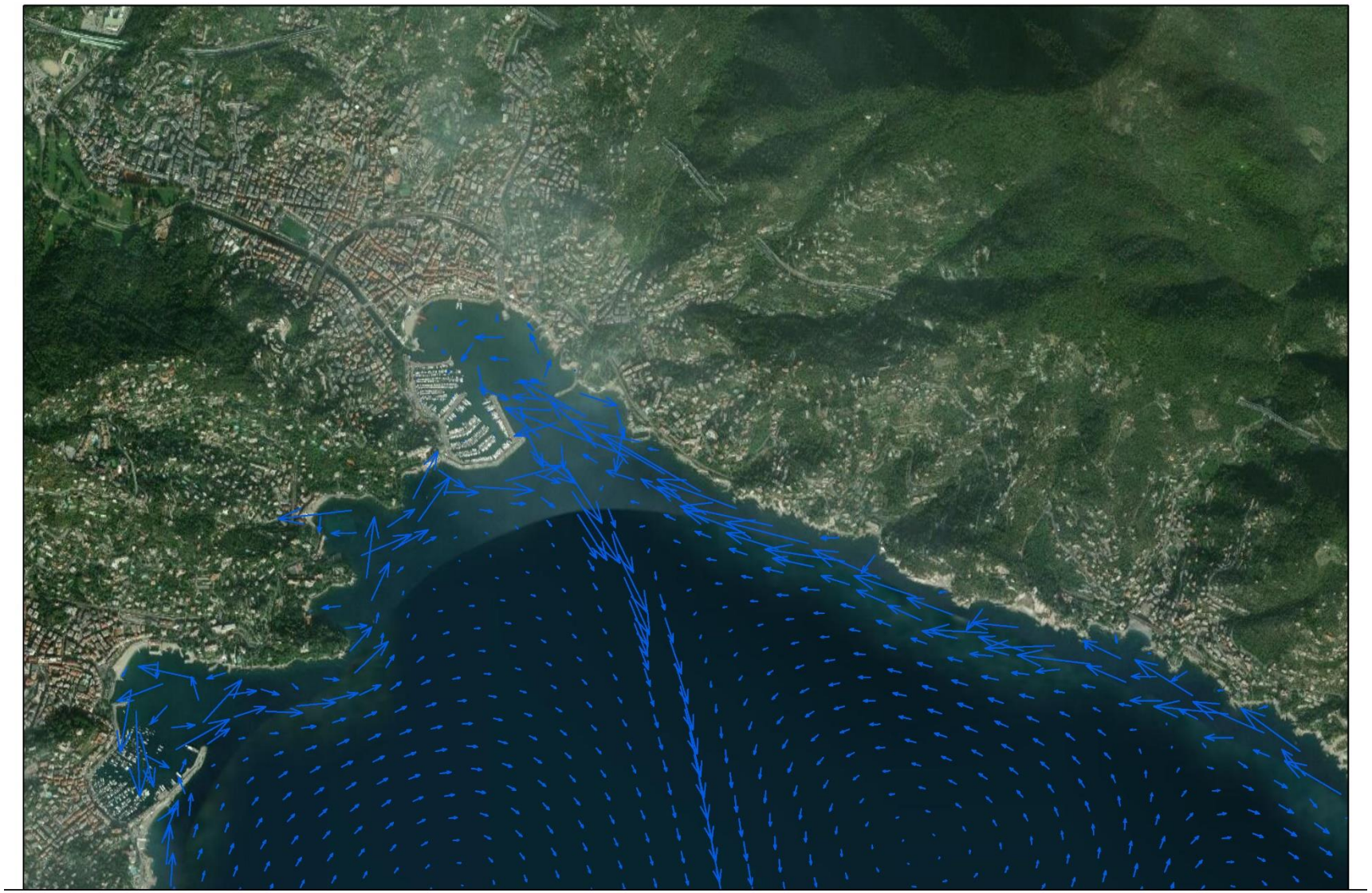


**Figura 27: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 180°N; Hs=5.7 m; Tp=10.8 s**



**Figura 28: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 180°N; Hs=5.7 m; Tp=10.8 s**

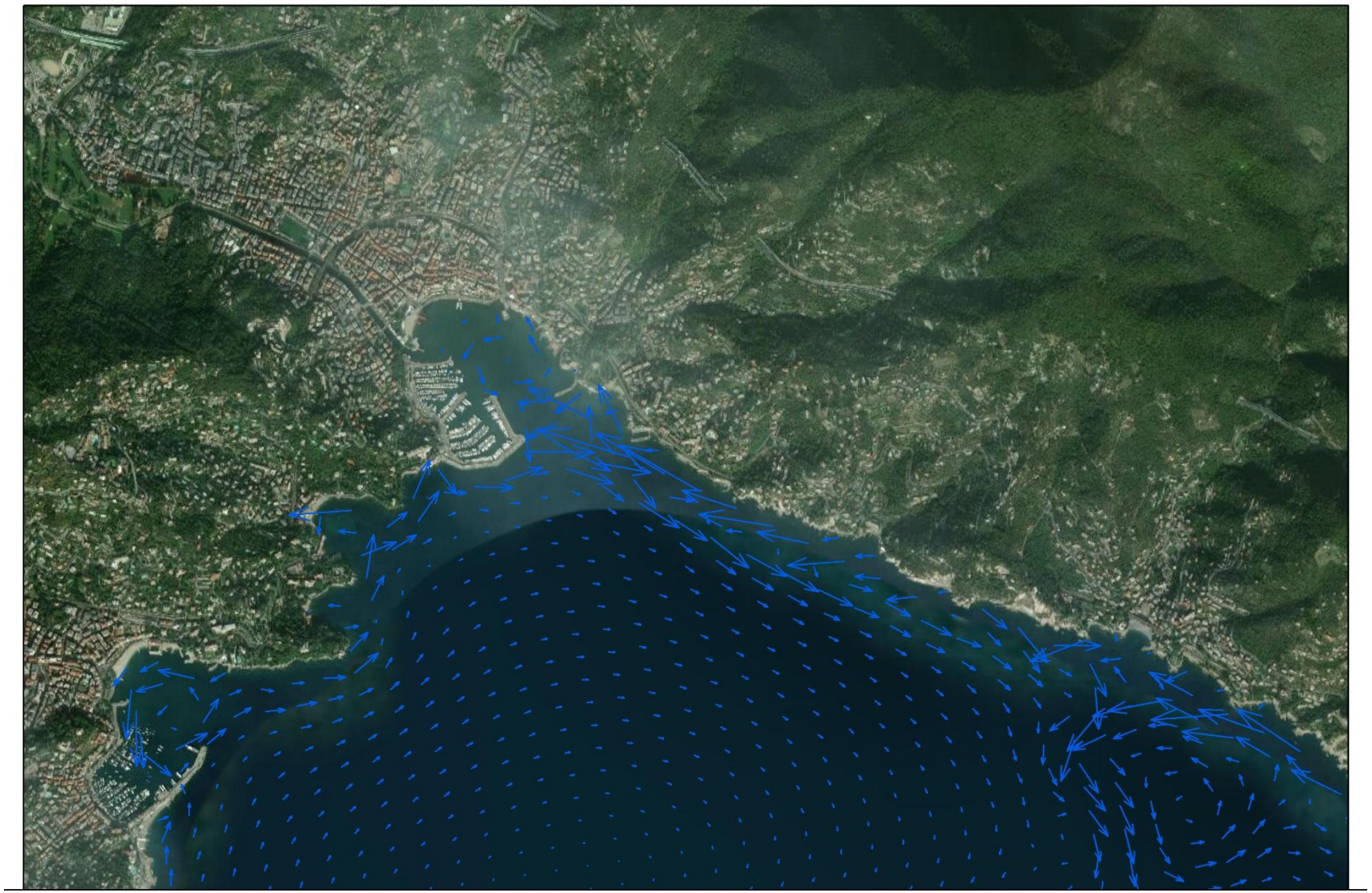


**Figura 29: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 220°N; Hs=7.3 m; Tp=12.2 s**

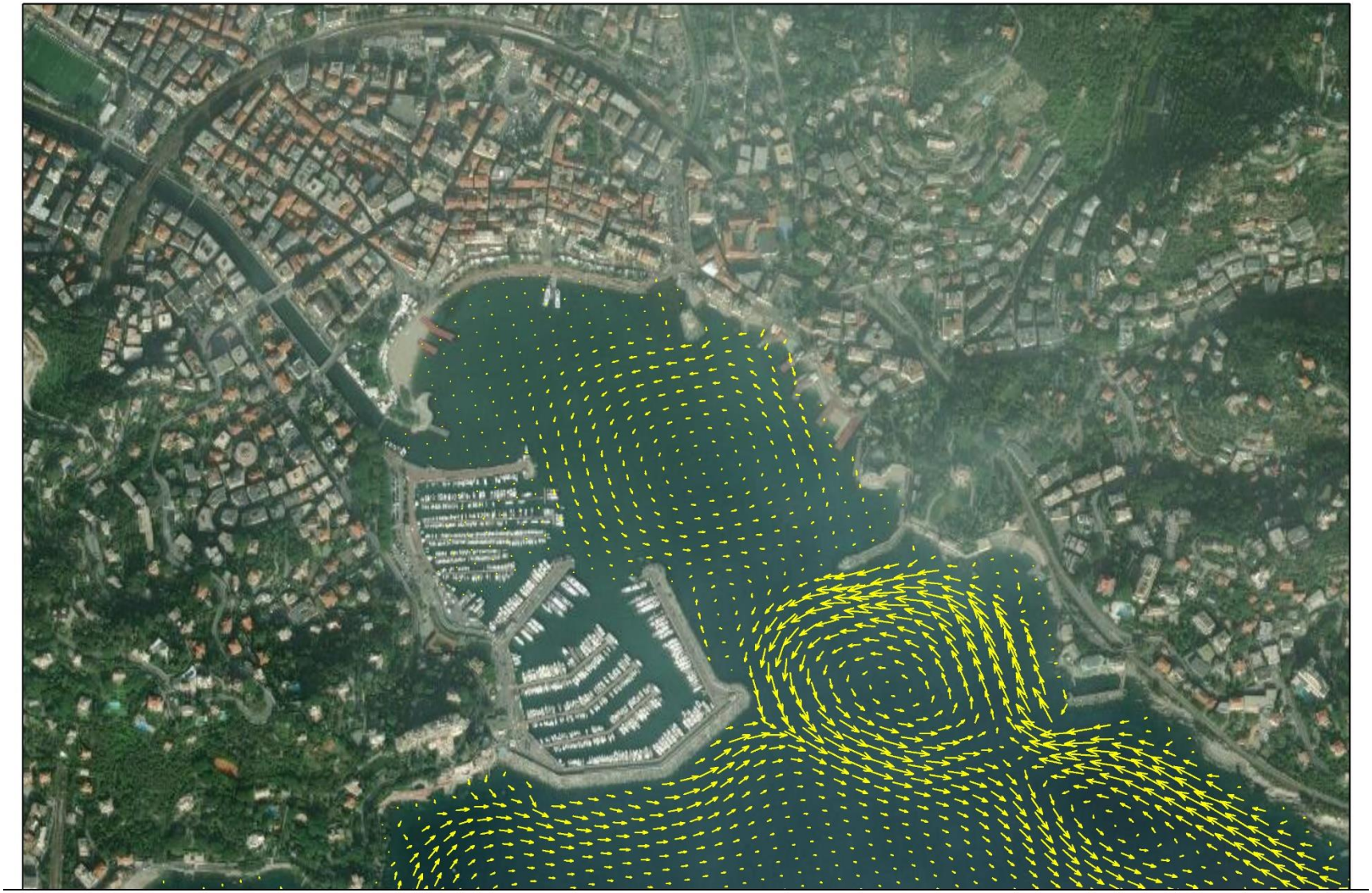


**Figura 30: Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 220°N; Hs=7.3 m; Tp=12.2 s**

### 4.1.2 Simulazioni Idrodinamiche per la determinazione dei ricambi idrici all'interno del golfo nelle varie configurazioni

Tale verifica è stata eseguita per valutare la variazione dei ricambi idrici, ai quali è strettamente correlata la qualità delle acque del Golfo, ipotizzando l'intervento di prolungamento della Diga Ampoixi di 10 e 50 metri.

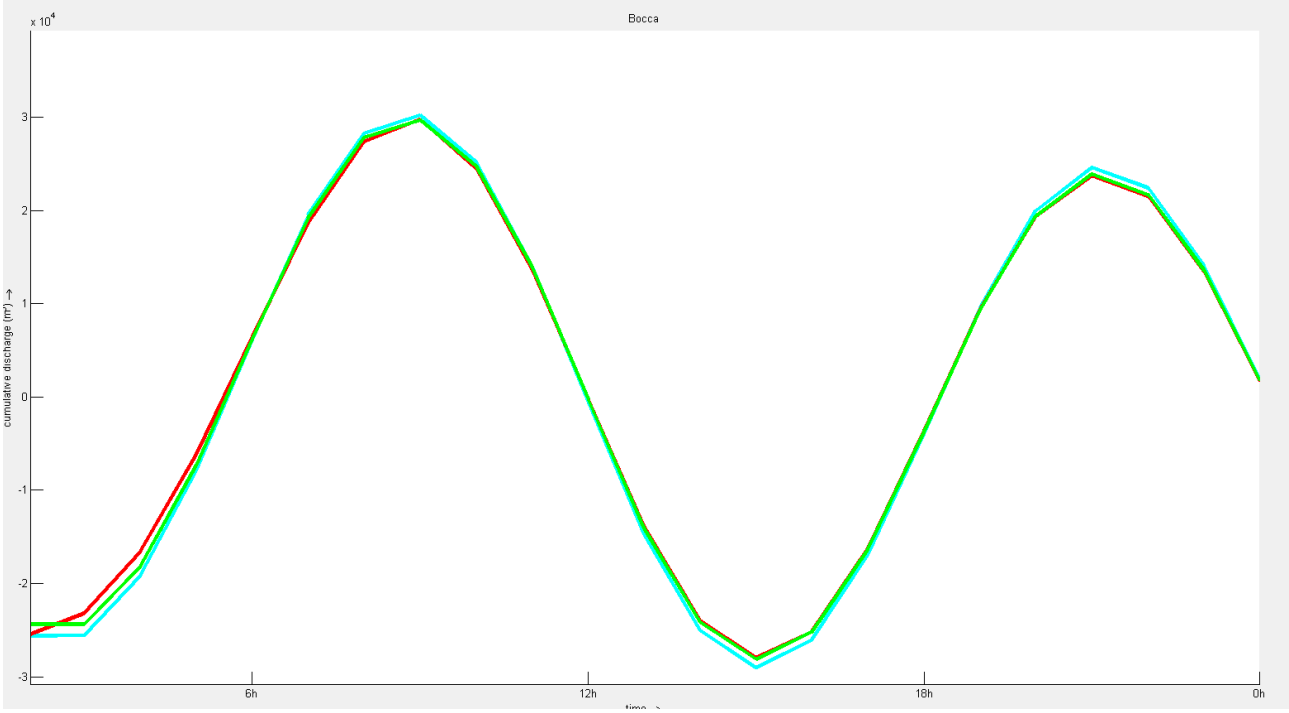



**Figura 31: curva cumulata dei deflussi in corrispondenza dell'imboccatura dei golfo / Molo Sud-Est (Diga Ampoixi). Le curve mostrano una sostanziale coincidenza in condizioni di sola forzante di moto ondoso. In Ciano: situazione attuale; In Rosso prolungamento Molo 50 m; in Verde, prolungamento molo 10 m,**

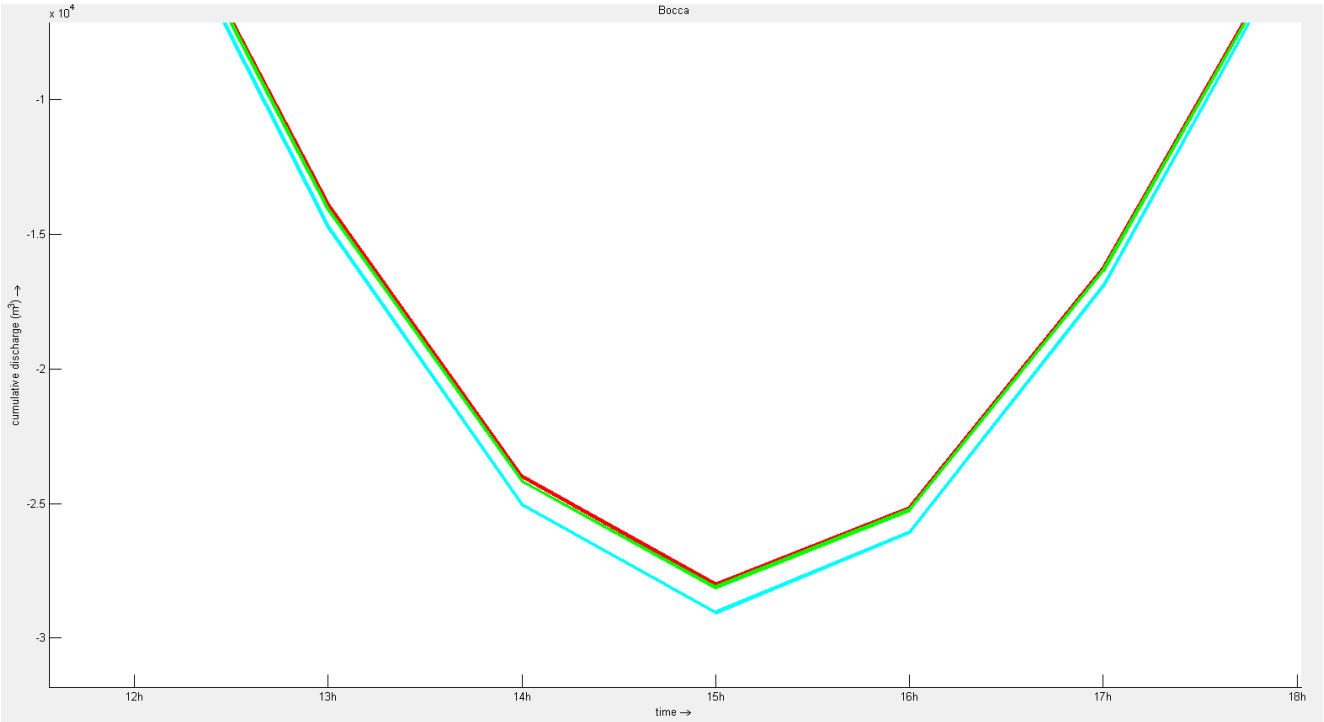



**Figura 32: Dettaglio curva cumulata dei deflussi in corrispondenza dell'imboccatura dei golfo / Molo Sud-Est (Diga Ampoixi). Le curve mostrano una sostanziale coincidenza in condizioni di sola forzante di moto ondoso. In Ciano: situazione attuale; In Rosso prolungamento Molo 50 m; in Verde, prolungamento molo 10 m. A fronte di uno scambio di 56.000 mc si hanno differenze quantificabili in circa 1000mc ogni 6 ore ovvero il 2%.**

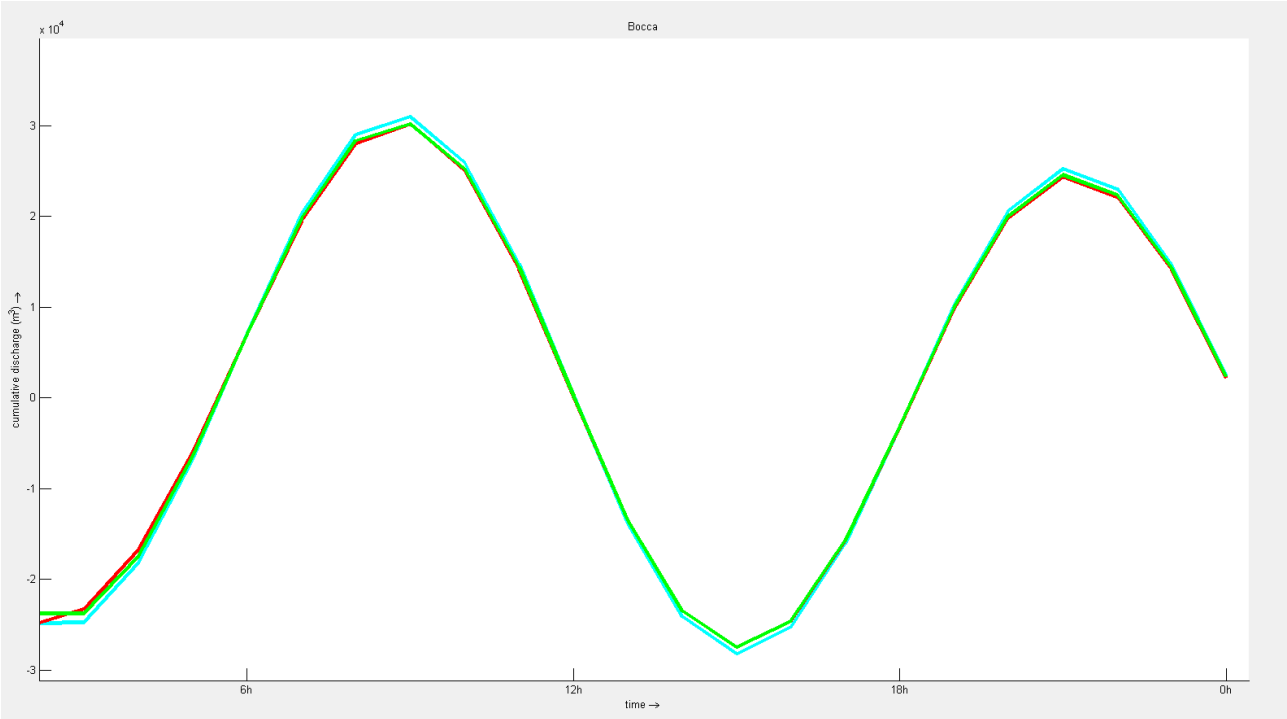



**Figura 33: curva cumulata dei deflussi in corrispondenza dell'imboccatura dei golfo / Molo Sud-Est (Diga Ampoixi). Le curve mostrano una sostanziale coincidenza in condizioni di forzante di moto ondoso e onda annuale proveniente da 180°N. In Ciano: situazione attuale; In Rosso prolungamento Molo 50 m; in Verde, prolungamento molo 10 m.**

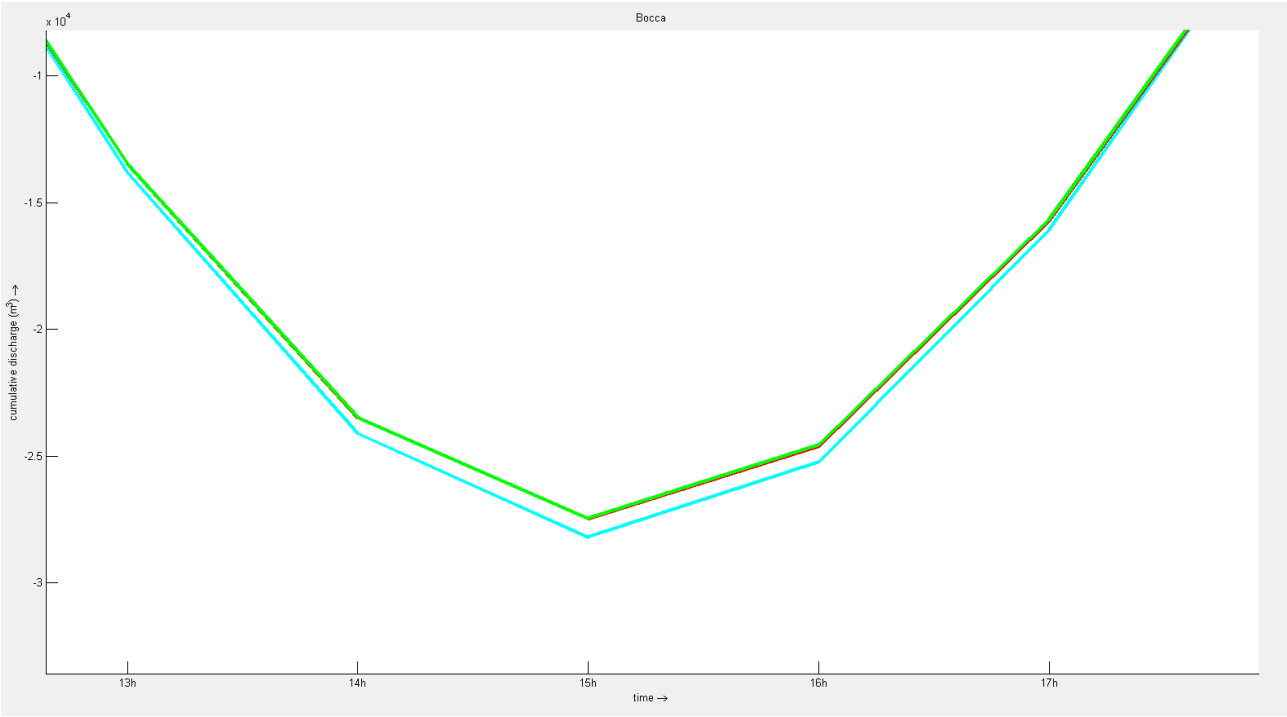



**Figura 34: Dettaglio curva cumulata dei deflussi in corrispondenza dell'imboccatura dei golfo / Molo Sud-Est (Diga Ampoixi).**

**Le curve mostrano una sostanziale coincidenza in condizioni di forzante di moto ondoso e onda annuale proveniente da 180°N. In Ciano: situazione attuale; In Rosso prolungamento Molo 50 m; in Verde, prolungamento molo 10 m. A fronte di uno scambio di 56.000 mc si hanno differenze quantificabili in circa 1000mc ogni 6 ore ovvero il 2%.**

# 5 Valutazione dell'agitazione residua interna

## 5.1 Sistema di modellazione PHAROS

PHAROS è un sistema integrato per la modellazione della propagazione delle onde all'interno dei porti e nell'intorno delle strutture costiere. Il programma utilizza delle griglie agli elementi finiti per computare gli effetti combinati di rifrazione e diffrazione in funzione dei layout di progettazione delle strutture portuali e della variabilità dei fondali in termini batimetrici. Il programma risolve in modo completo l'equazione temporale armonica per lievi pendenze, localmente estesa con termini per rifrazione e dissipazione indotti dal frangimento del moto ondoso. Le condizioni al contorno tengono conto di molteplici fattori, come la parziale riflessione e gli effetti combinati di riflessione e diffrazione.

## 5.2 Impostazione modello

Il modello è stato applicato in prossimità del porto, realizzando una griglia computazionale agli elementi finiti con risoluzione di circa 8 celle per lunghezza d'onda, realizzata in funzione del periodo d'onda.
La soluzione analizzata di seguito è quella del progetto definitivo, che viene confermata in questa fase di progettazione.

### *5.2.1 Caratteristiche di riflessione e trasmissione*

La riflessione del moto ondoso è determinata dalle caratteristiche dell'onda e dalla presenza di strutture. I coefficienti di riflessione dei contorni del dominio sono stati ricavati sulla base della tipologia di litorale e delle strutture presenti e da realizzare.

### *5.2.2 Condizioni a contorno*

Le condizioni a contorno sono state definite sulla base dei risultati della trasformazione del moto ondoso da largo verso riva riportata nel Paragrafo 3. I parametri di ingresso al modello sono indicati in Tabella 6.

| Evento | Layout | Dato di ingresso la modello PHAROS | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Hs [m] | Tp [s] | Dir [°N] | Dir math [°N] |
| Tr= 1 anno – Scirocco/Mezzogiorno | attuale | 1.8 | 7.4 | 170 | 100 |
| Tr= 1 anno – Scirocco/Mezzogiorno | progetto | 1.8 | 7.4 | 170 | 100 |
| Tr= 10 anno – Scirocco/Mezzogiorno | attuale | 3.2 | 9.5 | 170 | 100 |
| Tr= 10 anno – Scirocco/Mezzogiorno | progetto | 3.2 | 9.5 | 170 | 100 |
| Tr= 50 anno – Scirocco/Mezzogiorno | attuale | 4.6 | 12.1 | 170 | 100 |
| Tr= 50 anno – Scirocco/Mezzogiorno | progetto | 4.6 | 12.1 | 170 | 100 |

**Tabella 6: Simulazioni effettuate per la valutazione dell'agitazione interna.**

## 5.3 Risultati

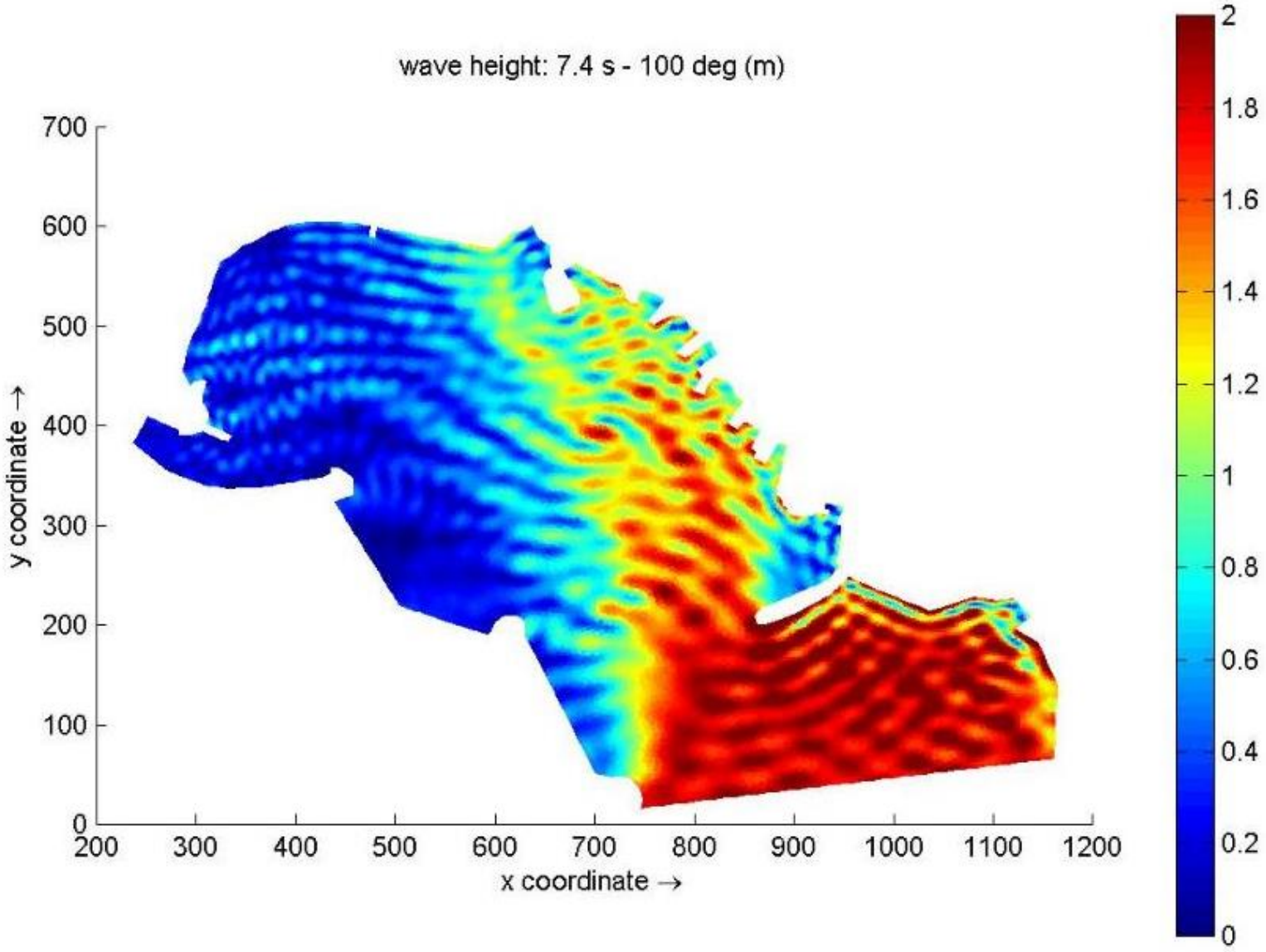



**Figura 35: Stato attuale - Tempo di ritorno 1 anno – Simulazione 170°N; Hs=1.8 m**

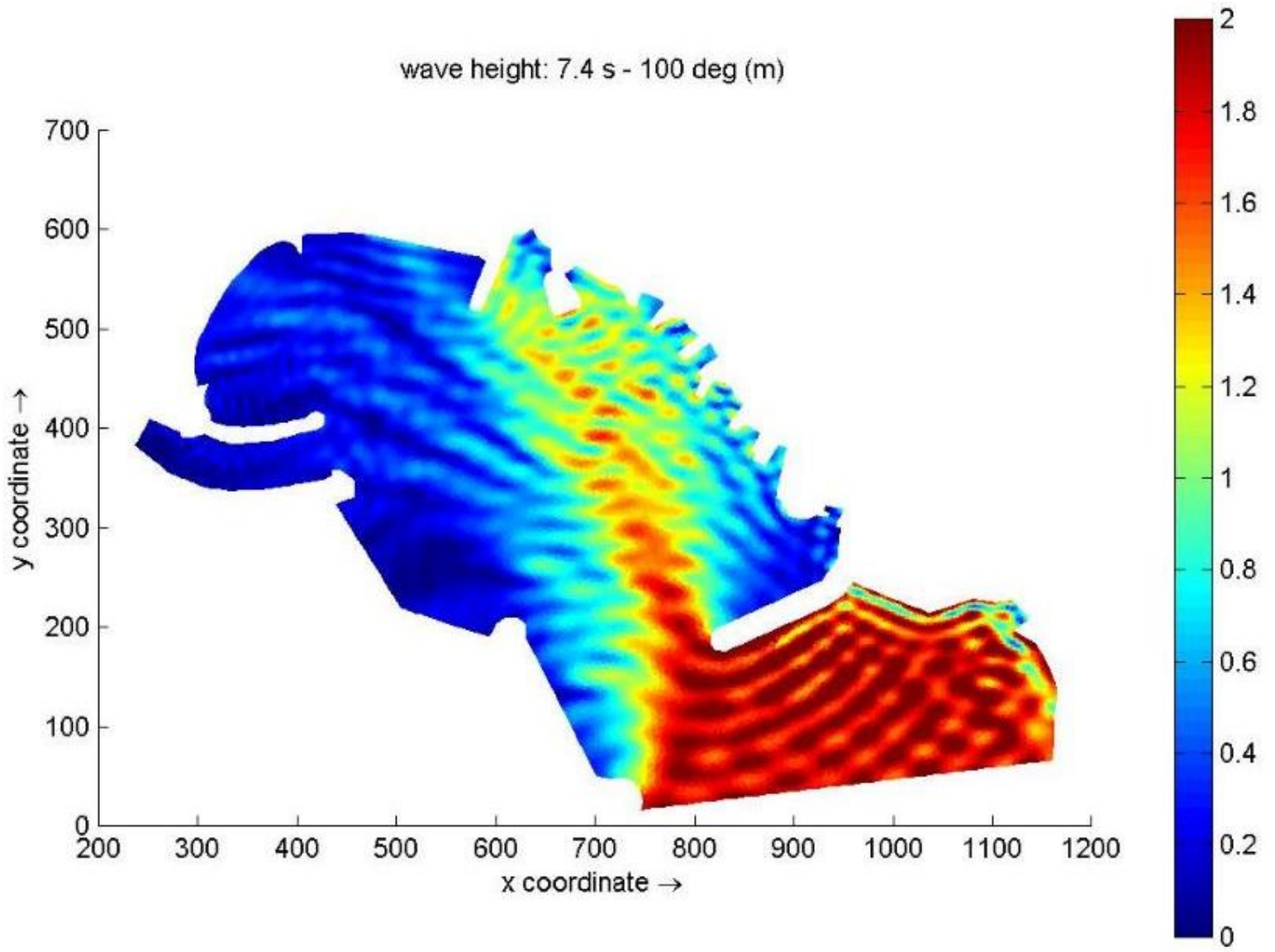



**Figura 36: Stato di progetto Molo su Torrente S Francesco e prolungamento diga Ampoixi- Tempo di ritorno 1 anno – Simulazione 170°N; Hs=1.8 m**

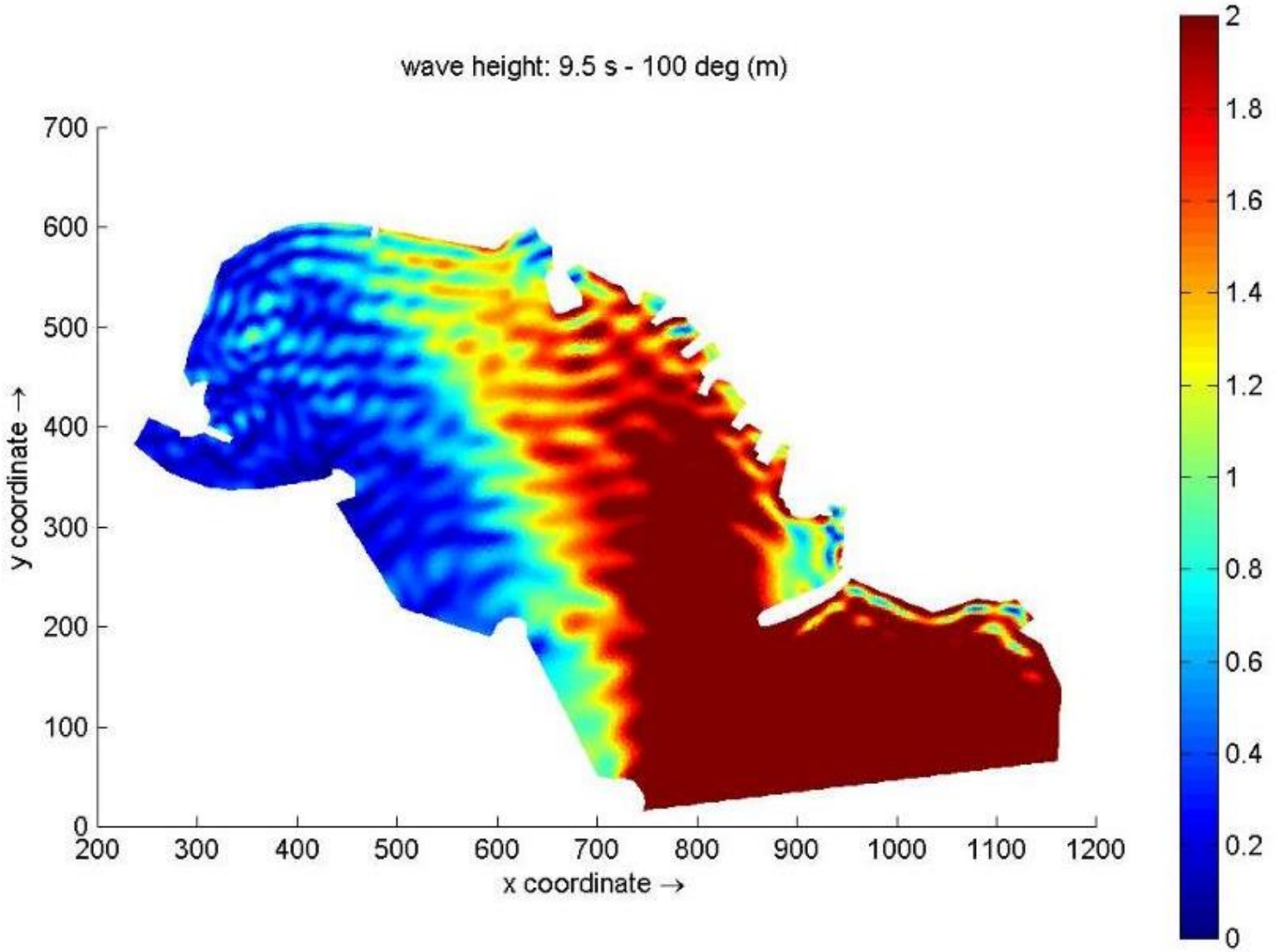



**Figura 37: Stato attuale - Tempo di ritorno 10 anni – Simulazione 170°N; Hs=3.2 m**

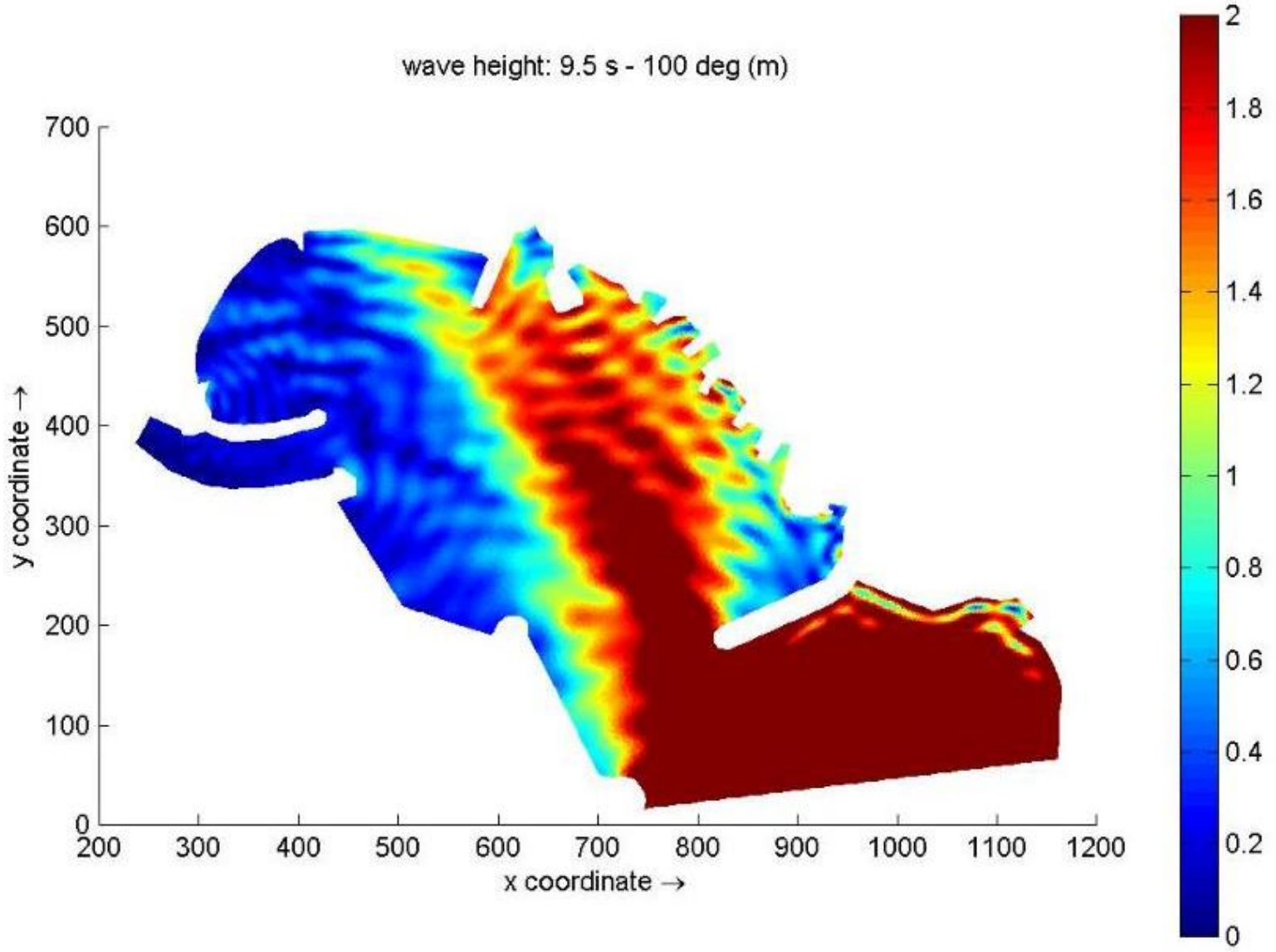



**Figura 38: Stato di progetto Molo su Torrente S Francesco e prolungamento diga Ampoixi - Tempo di ritorno 10 anni – Simulazione 170°N; Hs=3.2 m**

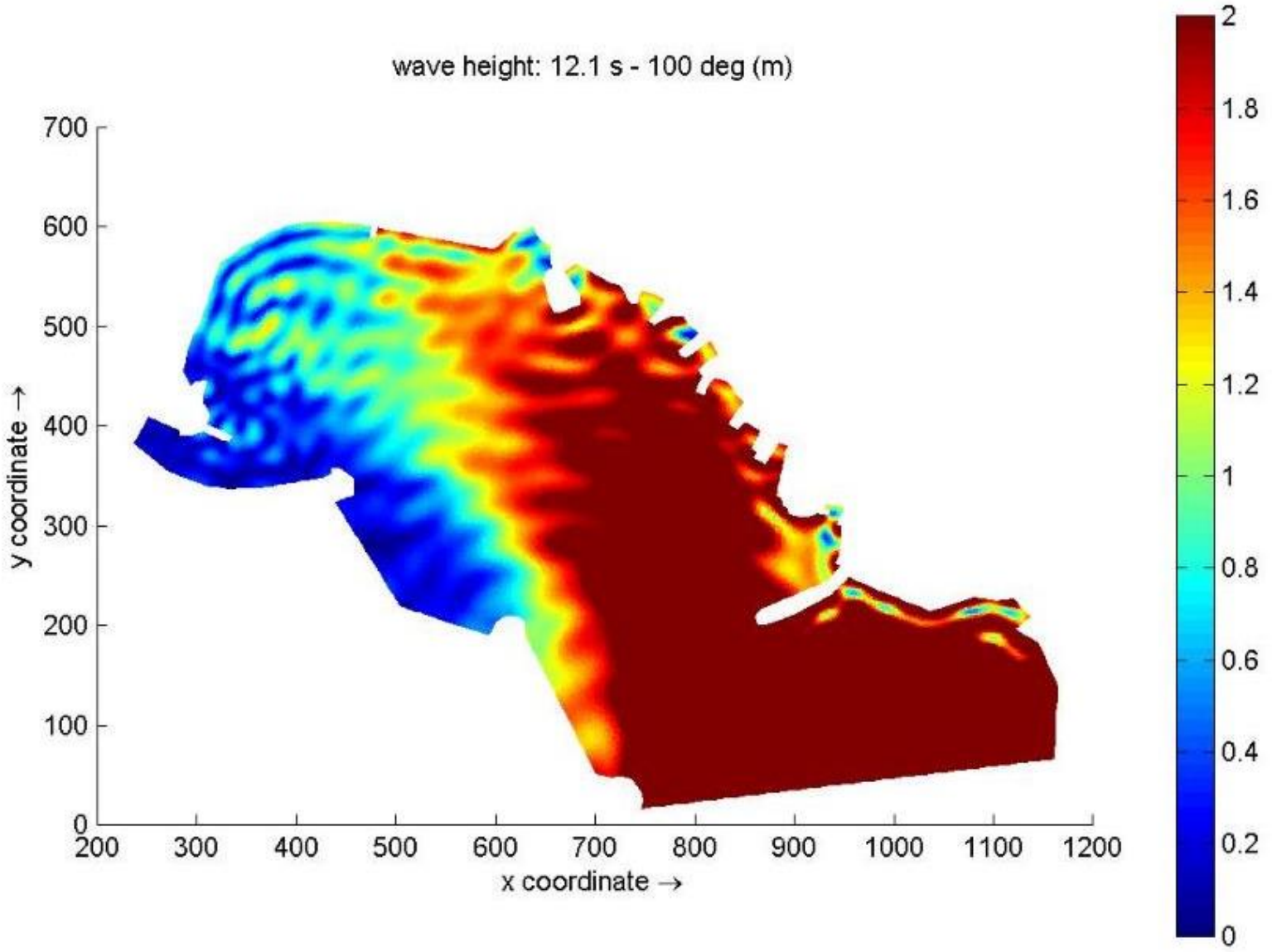



**Figura 39: Stato attuale - Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 170°N; Hs=4.8 m**

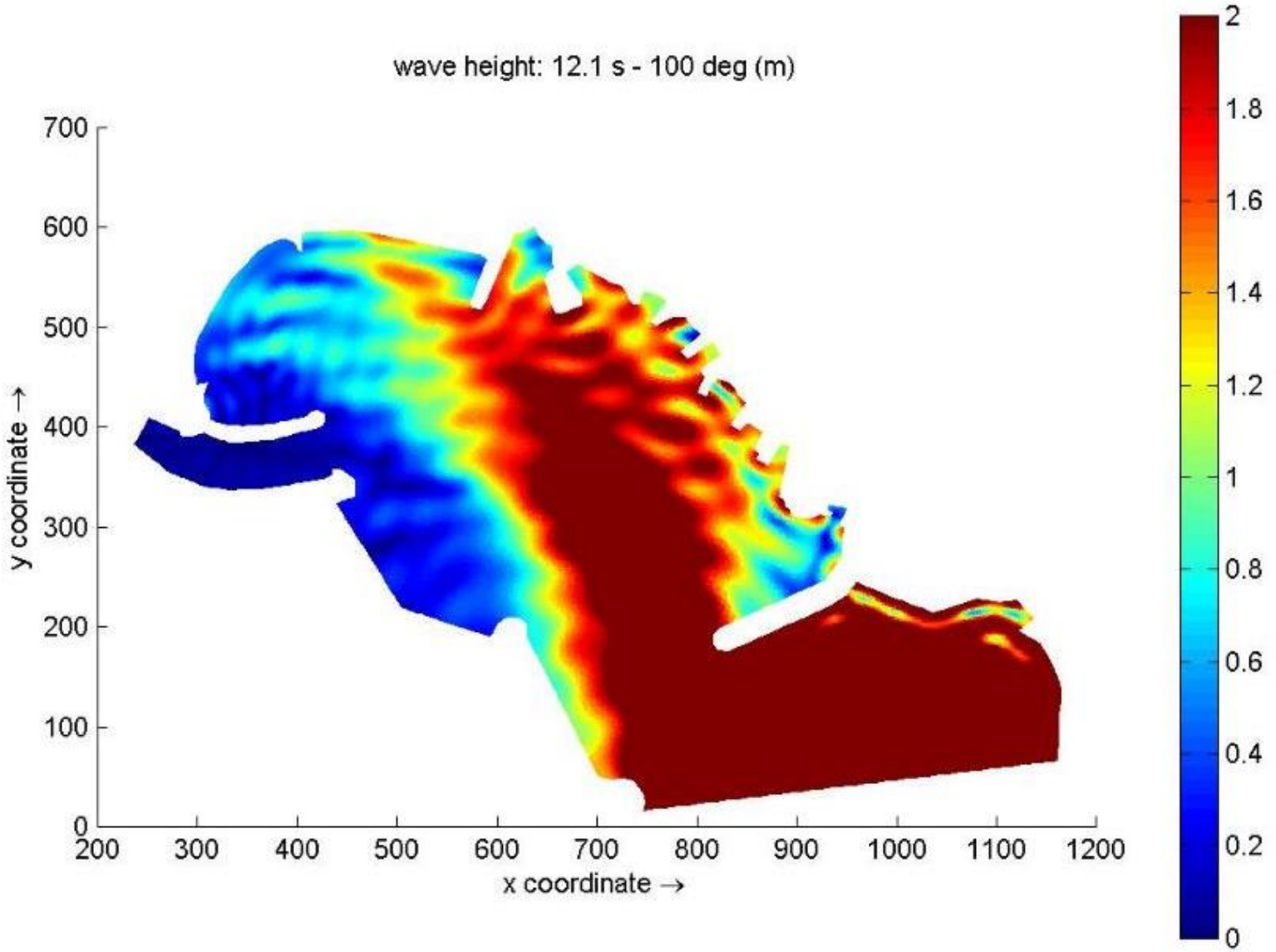
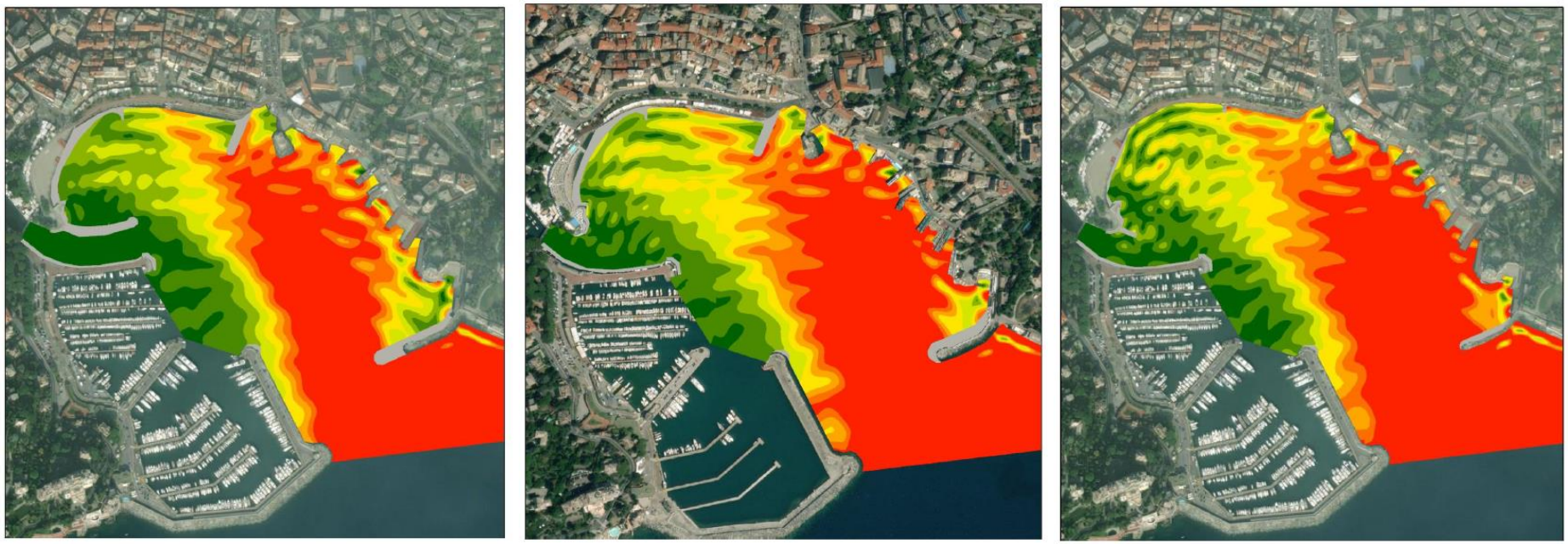



**Figura 40: Stato di progetto - Molo su Torrente S Francesco e prolungamento diga Ampoixi Tempo di ritorno 50 anni – Simulazione 170°N; Hs=4.8 m**


Altezza d'onda Hs [m]
0 - 0.25
0.25 - 0.5
0.5 - 0.75
0.75 - 1
1. - 1.25
1. - 1.5
1.5 - 1.75
1.75- 2

Le due simulazioni di cui sopra mostrano le alternative progettuali esaminate per determinare l'altezza dell'onda incidente sul lungomare ed il relativo dimensionamento della scogliera. A sx è rappresentata l'agitazione ondosa residua con la presenza sia del molo alla foce del torrente S Francesco che il prolungamento della diga Ampoixi, al centro l'alternativa con il solo Molo sul S Francesco e a dx la situazione attuale.

I risultati hanno mostrato come la presenza del Molo sul S Francesco , sia con o senza la diga Ampixi prolungata, consente di ridurre il moto ondoso incidente sulla scogliera del lungomare da 1,7 ad 1,4 metri.
Considerata la modesta modifica dell' altezza dell' onda si ritiene che non sia necessario effettuare delle opere integrative di protezione ma agire esclusivamente sul rifiorimento della scogliera.

# 6 Il modello XBeach

Il modello è stato utilizzato per la verifica dell'ingressione marina nel lungomare urbano a seguito del ripascimento.
XBeach è un modello numerico sviluppato originariamente per simulare i processi idrodinamici e morfodinamici e gli impatti sulle coste sabbiose con un dominio dell'ordine di grandezza dei chilometri e con una scala temporale tipica della durata degli eventi di tempesta.
Il modello include processi idrodinamici come le trasformazioni delle onde corte (rifrazione, shoaling, frangimento), onde lunghe (onde di infragravità), trasformazione (generazione, propagazione e dissipazione), sovralzo di tempesta indotto dal moto ondoso (wave-setup), correnti, overwash e inondazione.
I processi morfodinamici includono il trasporto dei sedimenti sul fondo e in sospensione, erosione e crollo della duna, ricarica di sedimenti, formazione di brecce. Il modello è inoltre in grado di rappresentare la presenza di strutture rigide.
Il modello risolve equazione bidimensionali di propagazione delle onde, correnti medie, trasporto di sedimenti variazioni morfodinamiche nelle aree near-shore, sulle spiagge e in corrispondenza delle dune durante gli eventi di tempesta e permette di scegliere il tra tre modalità per descrivere l'idrodinamica (Figura 41):

- Modello Surfbeat
- Modello stazionario
- Modello non idrostatico

Il modello Surfbeat è quello con cui è stato concepito inizialmente XBeach mentre il quelli stazionario e non-idrostatico sono stati implementati in seguito per soddisfare esigenze diverse da quelle per cui era nato il modello. Il modello Surfbeat è un modello non stazionario che rappresenta l'inviluppo delle onde.
Il modello stazionario è un modello di tipo wave-averaged ed è stato implementato per descrivere processi su scala temporale di medio-lungo periodo per condizioni di mare moderate.
Il modello non idrostatico è un modello wave resolving e quello più avanzato dal punto di vista fisico. Richiede un'altissima risoluzione per la maglia di calcolo e time-step ridotti quindi costi computazionali elevati. Tale modello è stato implementato per estendere l'applicabilità di XBeach a coste rocciose.
Tra i tre modelli quello Surfbeat rappresenta il miglior compromesso tra tempi di calcolo e precisione della soluzione ed è quello consigliato per studiare il comportamento di spiagge sabbiose perché è stato validato con test su numerose spiagge localizzate in tutto il globo. Se si è interessati a studiare il run-up diventa però indispensabile l'utilizzo del modello wave-resolving.
Il modello consente di lavorare sia su griglie monodimensionali (transetti) che su griglie bidimensionali. L'utilizzo della modalità 1D consente un risparmio computazionale ma semplifica i processi che avvengono nella direzione longitudinale.

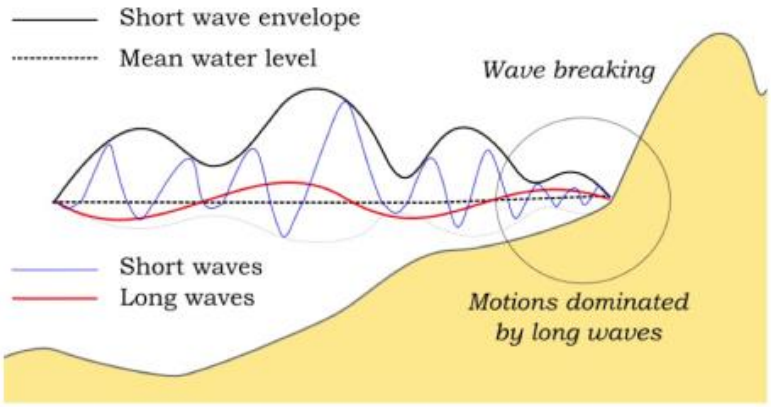



**Figura 41: schema delle diverse modalità idrodinamiche disponibili**

## 6.1 Valutazione del run-up

Le simulazioni sono state condotte in modalità monodimensionale lungo i due transetti indicati in Figura 42. L'idrodinamica è stata rappresentata con la modalità wave-resolving non idrostatica.
Le simulazioni sono state effettuate per i tempi di ritorno pari a:

- 1 anno
- 10 anni
- 50 anni

Per questi tempi di ritorno si ha un'altezza d'onda pari a 60 cm. 80 cm e 1.50 m.
Le simulazioni, intrinsecamente non stazionarie per la natura del modello, sono state fatte durare 40 minuti ciascuna. Questa durata è stata scelta considerando due aspetti:

- il modello necessita di un tempo di avviamento in quanto parte da condizioni iniziali di mare piatto. Si ritiene che 10 minuti siano sufficienti per far sì che il modello vada a regime.
- Le condizioni al contorno vengono generate tramite una generazione pseudo-casuale pertanto, per avere dei risultati significativi, è necessario che la simulazione sia sufficientemente estesa nel tempo. Convenzionalmente si ritiene che 30 minuti siano un tempo abbastanza lungo da avere un campione statisticamente significativo ma anche abbastanza breve da consentire di considerare lo stato di mare come stazionario.

Nei risultati che seguono sono mostrati i risultati ottenuti nelle varie simulazioni su ciascun transetto. In particolare, per ciascun transetto sono mostrati la batimetria e il livello idrico massimo raggiunto, punto per punto, durante la simulazione (inviluppo). Si fa notare per chiarezza che il run-up massimo è da intendersi come il primo punto di intersezione tra profilo batimetrico e il profilo idrico che si trova guardando la figura da sinistra verso destra (quindi in direzione riva).




**Figura 42: Posizione transetti**

***Evento annuale (Hs=0.6 m)***

**Transetto n.1**

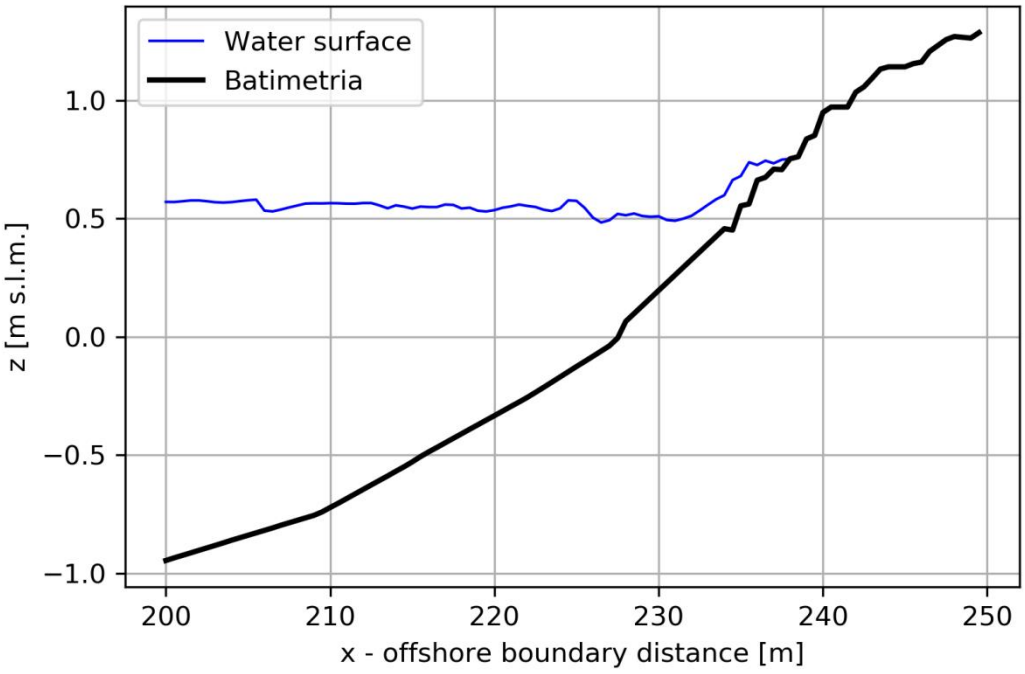



**Figura 43: Stato attuale - transetto n.1**

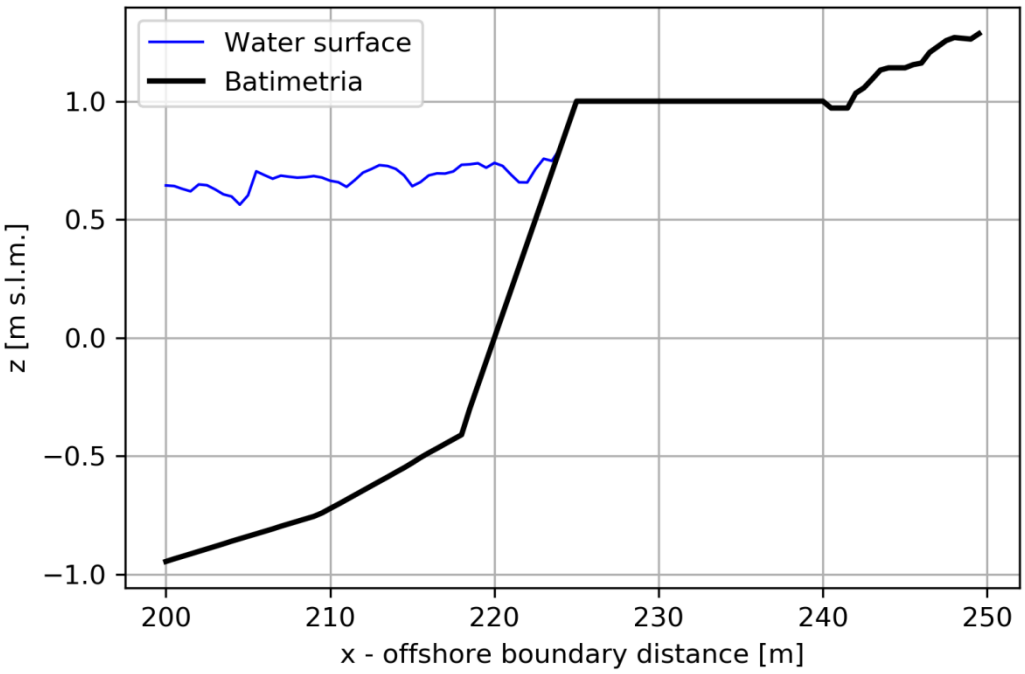



**Figura 44: Stato progetto - transetto n.1**

**Transetto n.2**

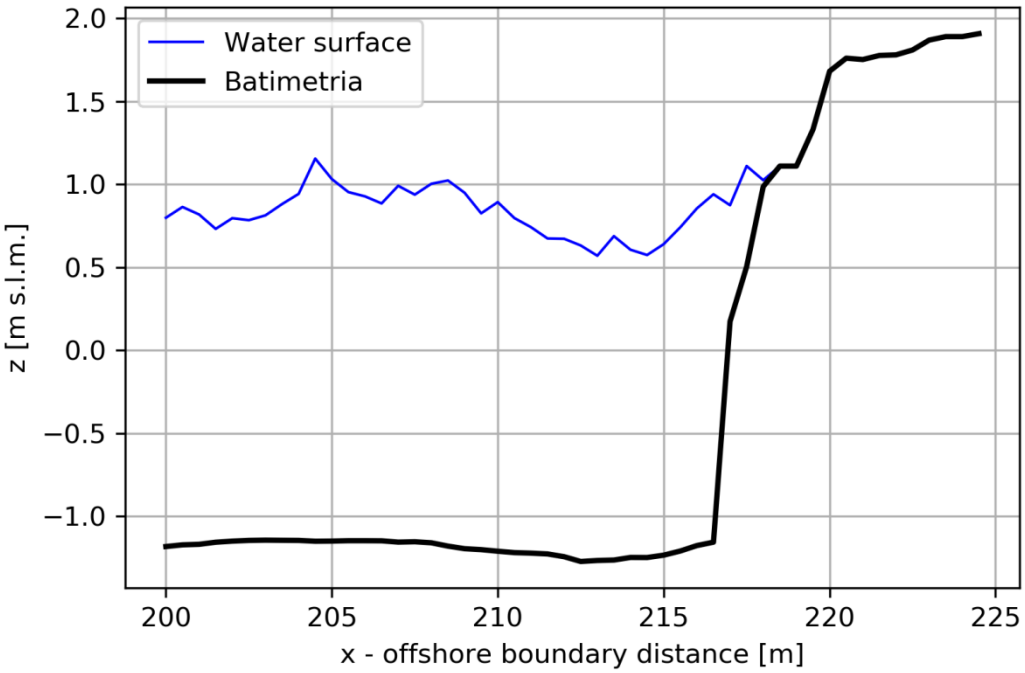



**Figura 45: Stato attuale - transetto n.2**

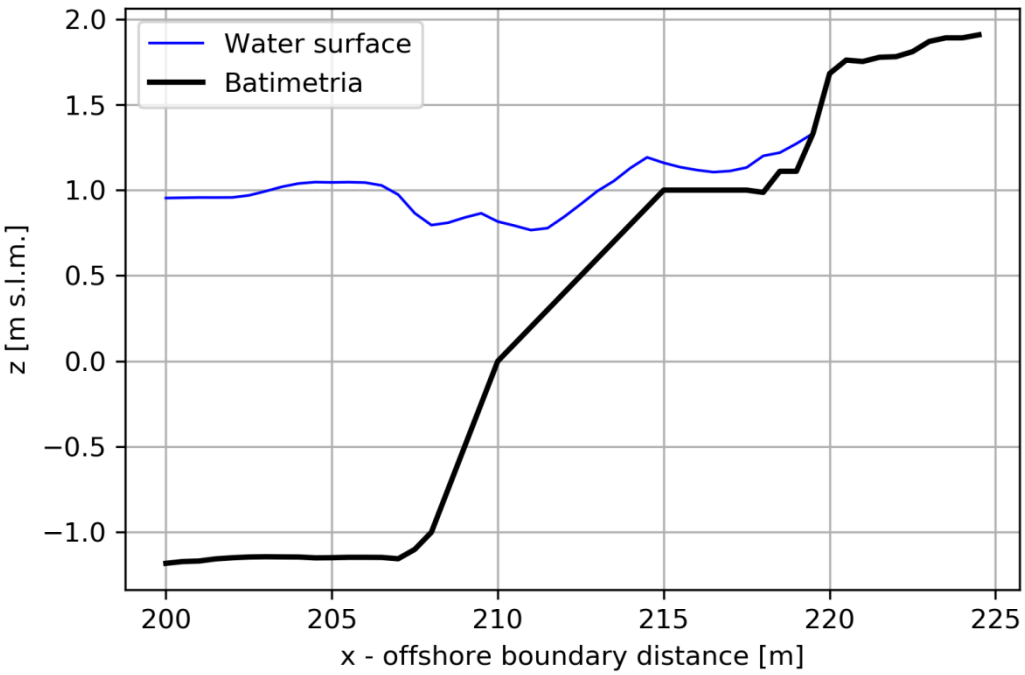



**Figura 46: Stato progetto - transetto n.2**

***Evento decennale (Hs=0.8 m)***

**Transetto n.1**

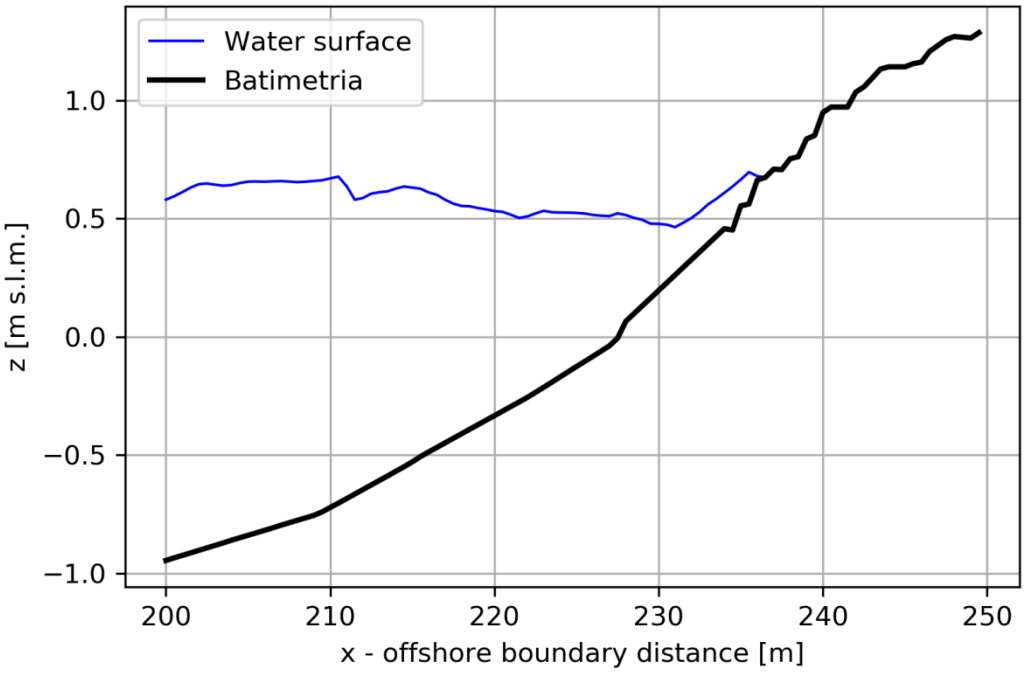



**Figura 47: Stato attuale - transetto n.1**

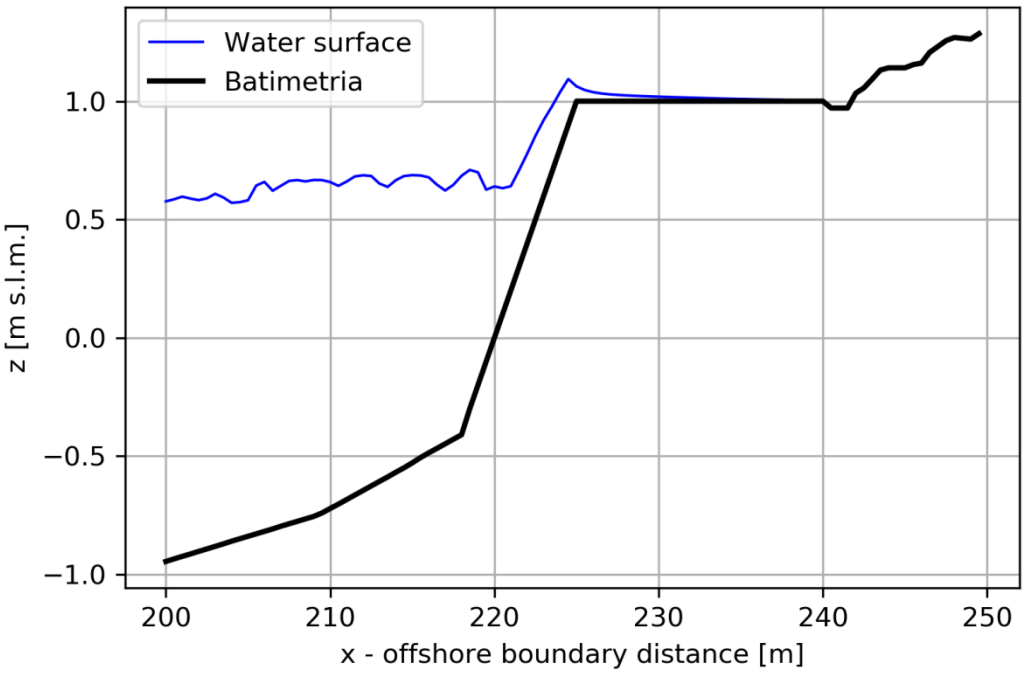



**Figura 48: Stato progetto - transetto n.1**

**Transetto n.2**

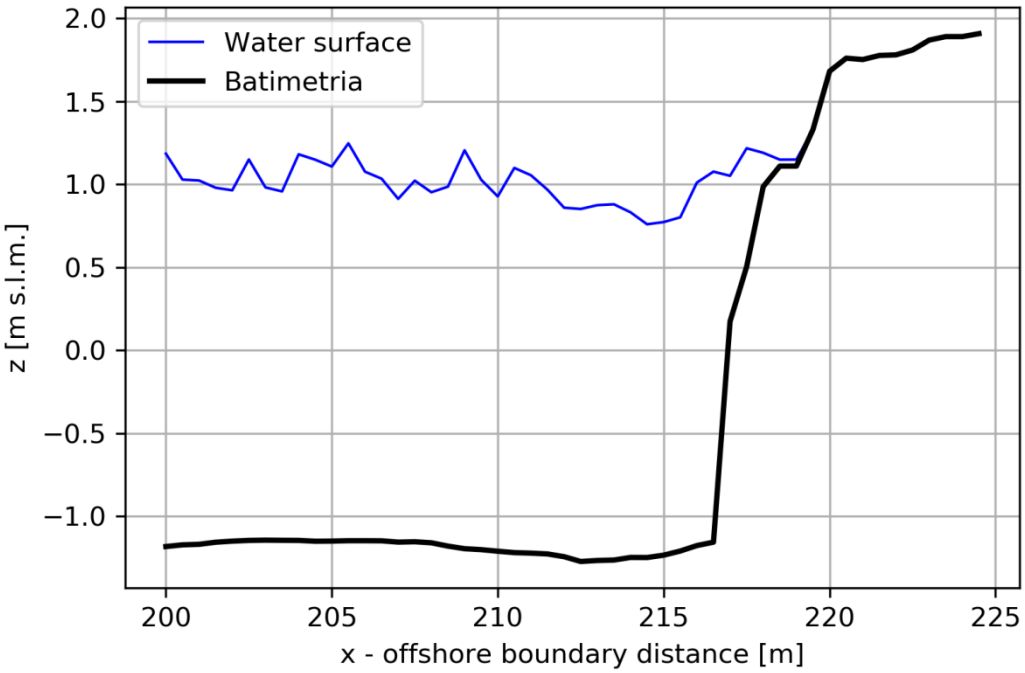



**Figura 49: Stato attuale - transetto n.2**

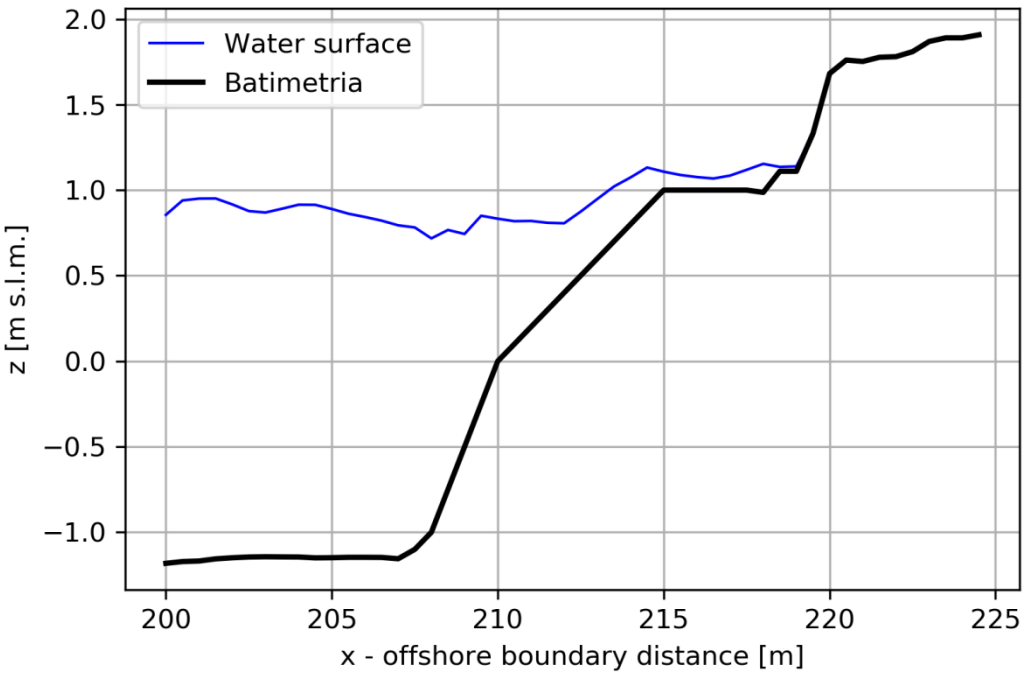



**Figura 50: Stato progetto - transetto n.2**

***Evento cinquantennale (Hs=1.5 m)***

**Transetto n.1**

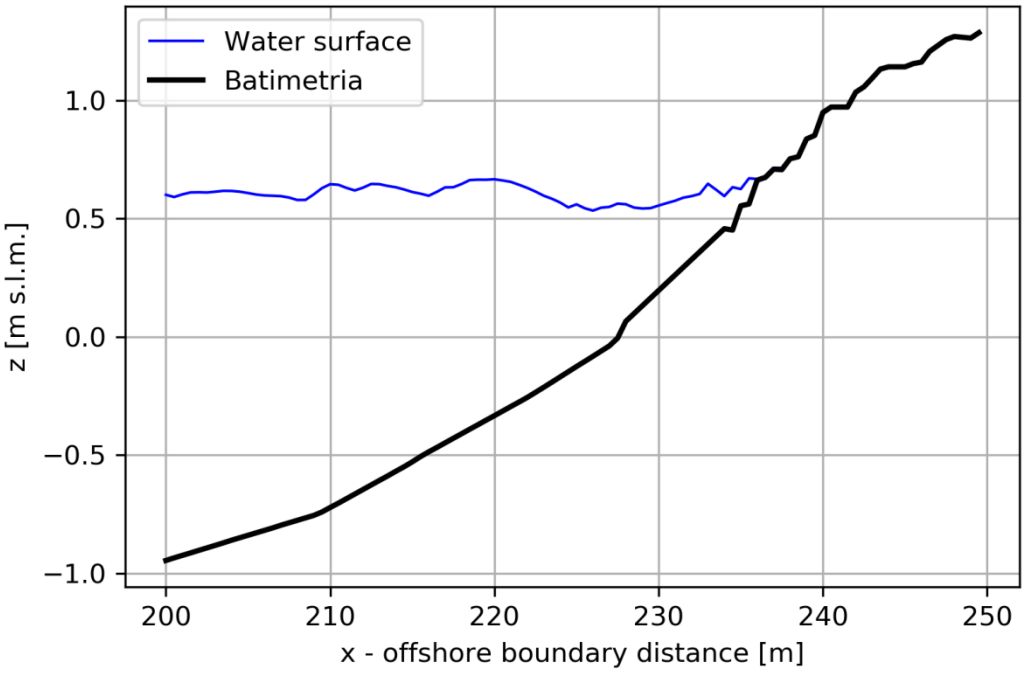



**Figura 51: Stato attuale - transetto n.1**

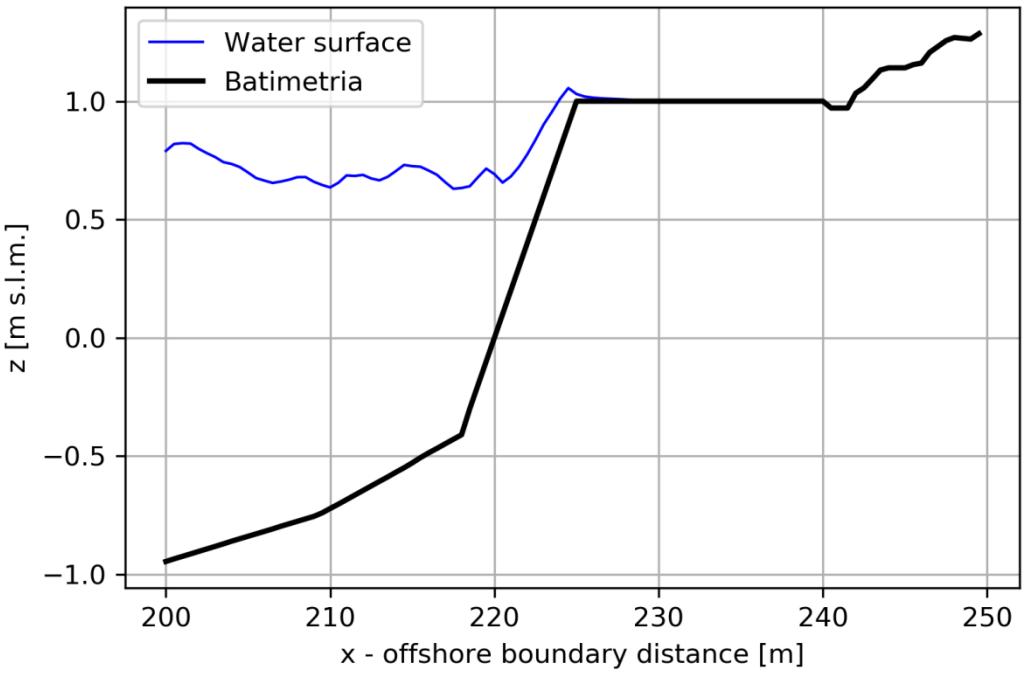



**Figura 52: Stato progetto - transetto n.1**

**Transetto n.2**

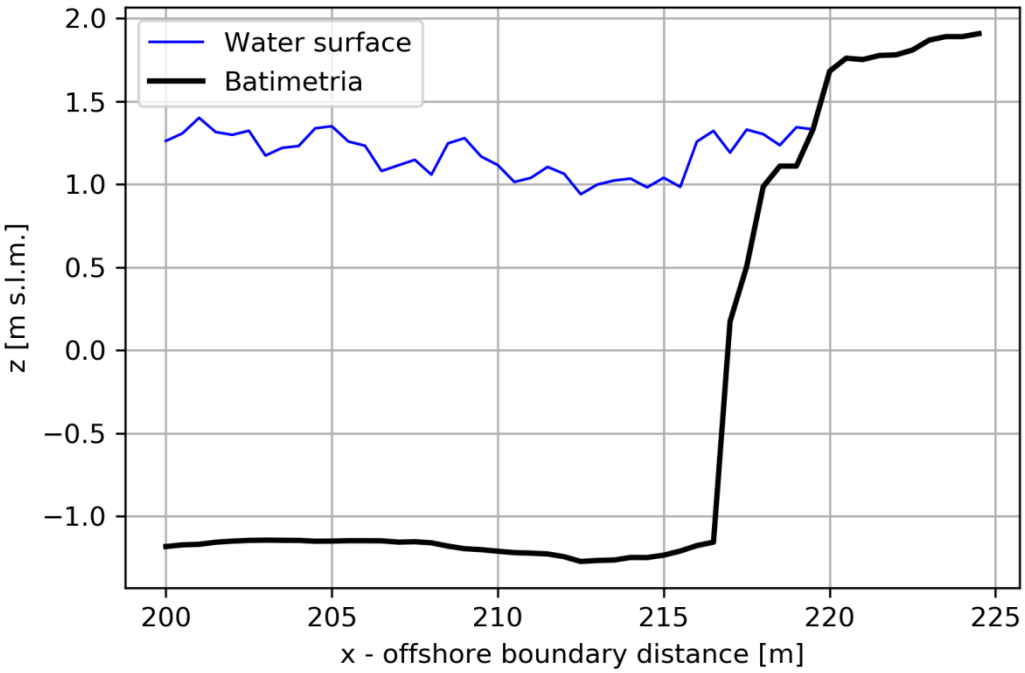



**Figura 53: Stato attuale - transetto n.2**

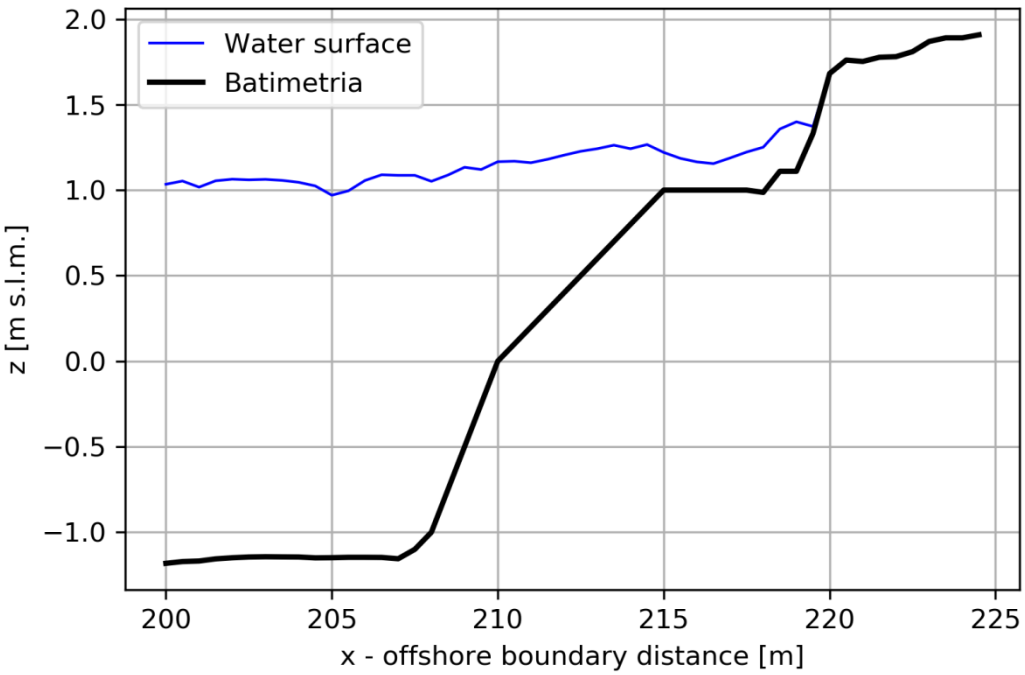



**Figura 54: Stato progetto - transetto n.2**

## 6.2 Studio morfologico - risposta della spiaggia alle mareggiate

Per valutare la risposta della spiaggia alle mareggiate, si è simulato l'effetto di una mareggiata con tempo di ritorno pari a 1 anno.

Per valutare gli effetti della mareggiata in termini di morfodinamici è necessario che la durata della simulazione sia sufficientemente estesa. Si è considerata una mareggiata con durata pari a 24 h, registrando la risposta del litorale ogni 12 ore. Si è fatto utilizzato uno schema monodimensionale, studiando gli effetti sui transetti mostrati in Figura 42 e valutando la riposta morfodinamica a seguito del ripascimento con sabbia di diametro confrontabile a quello già presente ($d_{50}$=0.11 mm )

In Figura 55 e Figura 56 sono mostrati i risultati delle simulazioni nei transetti n.1 e n.2, confrontando l'evoluzione del profilo con quello allo stato attuale.

Come si può vedere, in corrispondenza del transetto n.1, localizzato in posizione più riparata, la linea di riva di progetto subisce degli arretramenti limitate sia dopo 12 che dopo 24 h di mareggiata.

In corrispondenza del transetto n.2 si ha un notevole arretramento della linea di riva già con una mareggiata di 12 ore; dopo 24 h si ha una ridistribuzione dei sedimenti nella spiaggia sommersa, mentre il profilo della spiaggia emersa è simile a quello attuale.

Le simulazioni mostrano quindi che il litorale oggetto di ripascimento deve essere oggetto di manutenzioni periodiche per le quali si possono stimare, in assenza di mareggiate eccezionali, delle manutenzioni annuali.

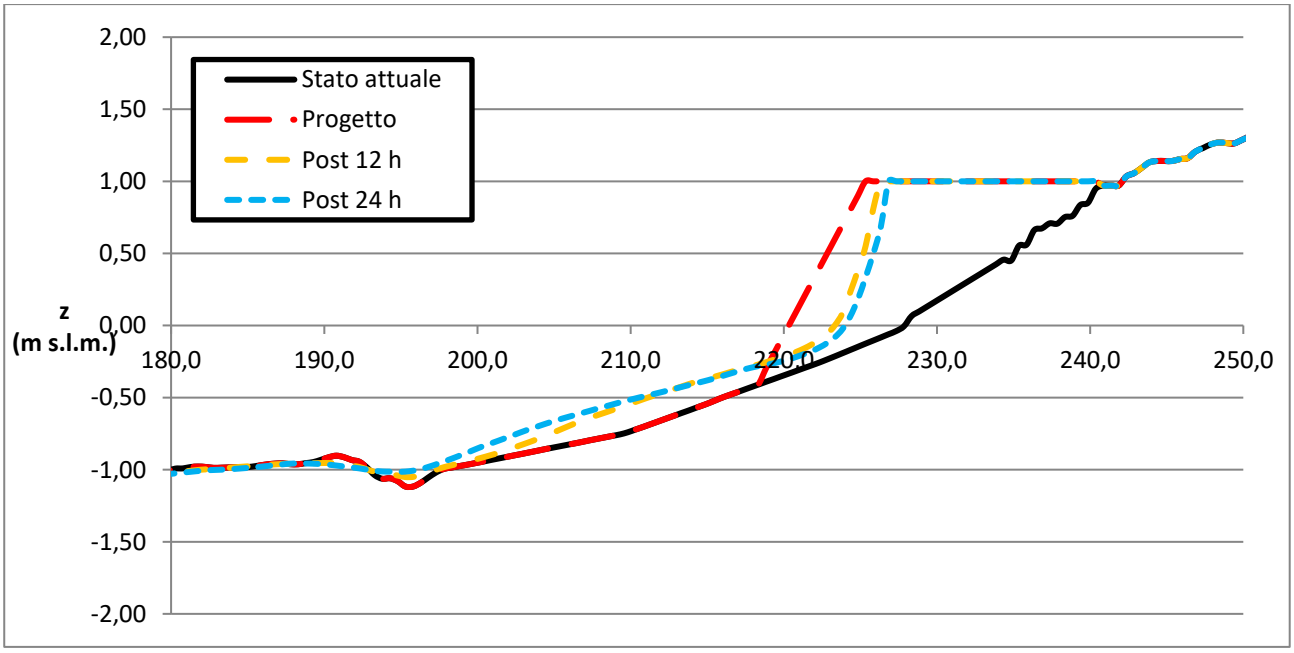



**Figura 55: Simulazione dell'evoluzione del profilo di spiaggia durante la mareggiata – Transetto n.1**

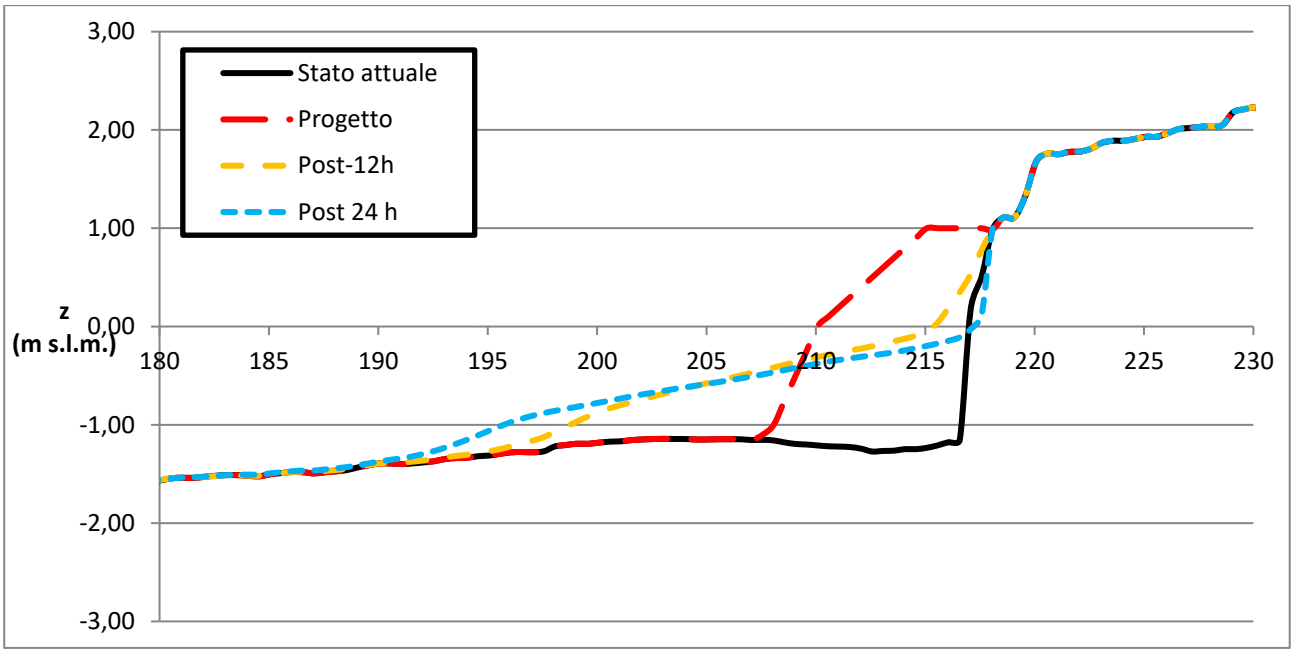



**Figura 56: Simulazione dell'evoluzione del profilo di spiaggia durante la mareggiata – Transetto n.2**

# 7 Portata di tracimazione

Al fine di determinare la sezione delle scogliere in progetto è necessario innanzitutto determinare la portate di tracimazione nelle varie configurazioni progettuali.
Lo studio è stato condotto con l'ausilio del software breakwat le cui specifiche sono indicate nel successivo paragrafo.

## 7.1 Il software Breakwat

Il software Breakwat è utilizzato come uno strumento utile nella progettazione delle strutture marittime soggette all'azione del moto ondoso, quali opere a gettata con massi naturali o artificiali con o senza berma, frangiflutti sommersi o frangiflutti a parete verticale.
La prima versione di Breakwat fu elaborata negli anni ottanta. Da allora il software è stato utilizzato da numerosi utenti in tutto il mondo compresi istituti di ricerca, università e liberi professionisti.
Il software nella sua versione attuale utilizza moderne formule per il calcolo dei seguenti parametri idraulici:

- Run-up;
- Overtopping;
- Trasmissione;

e dei seguenti parametri strutturali:

- Stabilità delle mantellate in materiale lapideo;
- Stabilità delle mantellate con massi artificiali;
- Stabilità del piede delle scogliere.

## 7.2 Calcolo della portata di tracimazione

Il calcolo della portata di tracimazione viene effettuato utilizzando un modello basato sulla tecnica delle reti neutrali. Questo modello è stato ottenuto considerando 8372 combinazioni di input-output ottenute da misurazioni effettuate su modelli idraulici in scala effettuati in numerosi laboratori ed istituti di idraulica sparsi in tutto il mondo.
Per la valutazione della portata, devono essere immessi nel modello 15 diversi parametri relativi alle caratteristiche geometriche della struttura ed alle condizioni d'onda incidente (vedi Tabella 7 e Figura 57).

| | | |
|---|---|---|
| Hm0 | Altezza significativa dell'onda (spettrale) al piede della struttura | (m) |
| Tm-1,0 | Periodo medio (spettrale) al piede della struttura = Tp/1,1 | (s) |
| β | Direzione di incidenza principale rispetto alla normale della struttura | (° ) |
| h | Tirante idrico a largo della struttura | (m) |
| ht | Tirante idrico al piede della struttura | (m) |
| Bt | Largheazza della berma al piede | (m) |
| γf | Rugosità/porosità della struttura | (-) |
| cot(αd) | Pendenza della mantellata a largo della berma | (-) |
| cot(αu) | Pendenza della mantellata oltre la berma | (-) |
| B | Larghezza della berma | (m) |
| hb | Tirante idrico in corrispondenza della berma | (m) |
| tan αB | Pendenza della berma | (-) |
| Rc | Sommità del coronamento | (m) |

| | | |
|---|---|---|
| Ac | Quota di coronamento | (m) |
| Gc | Larghezza del coronamento | (m) |

**Tabella 7: Parametri di ingresso per la valutazione della portata di tracimazione utilizzando la rete neurale**

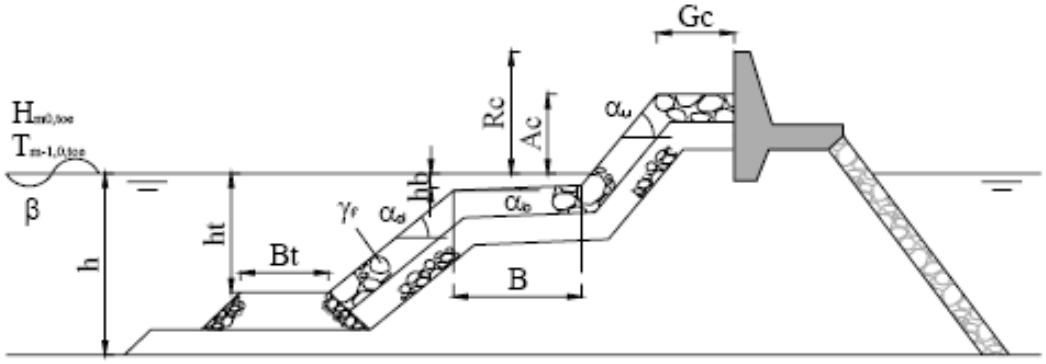



**Figura 57: Schema grafico dei parametri di ingresso per la valutazione della portata di tracimazione utilizzando la rete neurale**

L'altezza significativa dell'onda e il periodo medio spettrale al piede della struttura sono stati ottenuti dalle simulazioni numeriche di trasporto dell'onda da largo verso riva (vedi paragrafo 3) considerando gli eventi estremi con tempo di ritorno di 50 anni nelle condizioni peggiori. La direzione di incidenza dell'onda β è stata considerata sempre pari a 0, cioè con onda incidente perpendicolare alla struttura, in una condizione cautelativa rispetto a quella reale.

I risultati ottenuti tramite modello numerico sono stati confrontati con i limiti indicati da vari autori[2] e riportati in Figura 58 che indicano che affinché le banchine siano transitabili la portata di tracimazione massima ammissibile è pari a 0.3 l/s/m.

La valutazione della portata di tracimazione è stata fatta considerando le seguenti condizioni:

Pennello sud-est

- Situazione attuale
- Situazione di progetto

Lungomare

- Situazione attuale
- Situazione di progetto con scogliera
- Situazione di progettto con muro di 80 cm

Le simulazioni mostrano come la realizzazione dell'intervento andrà, in ogni caso, a ridurre la portata di tracimazione, garantendo così una maggiore sicurezza. Come riferimento per i valori di tracimazione si utilizza la tabella riportata nella successiva figura.

[2] Franco L., de Gerloni M., van der Meer J.W. (1994), *Wave overtopping on vertical and composite breakwaters*,. Proc. 24th ICCE, Kobe, ASCE, New York;

Reeve D., Chadwick A., Fleming C., *Coastal Engineering – Processes, theory and design practice*, Spon Press, 2004;

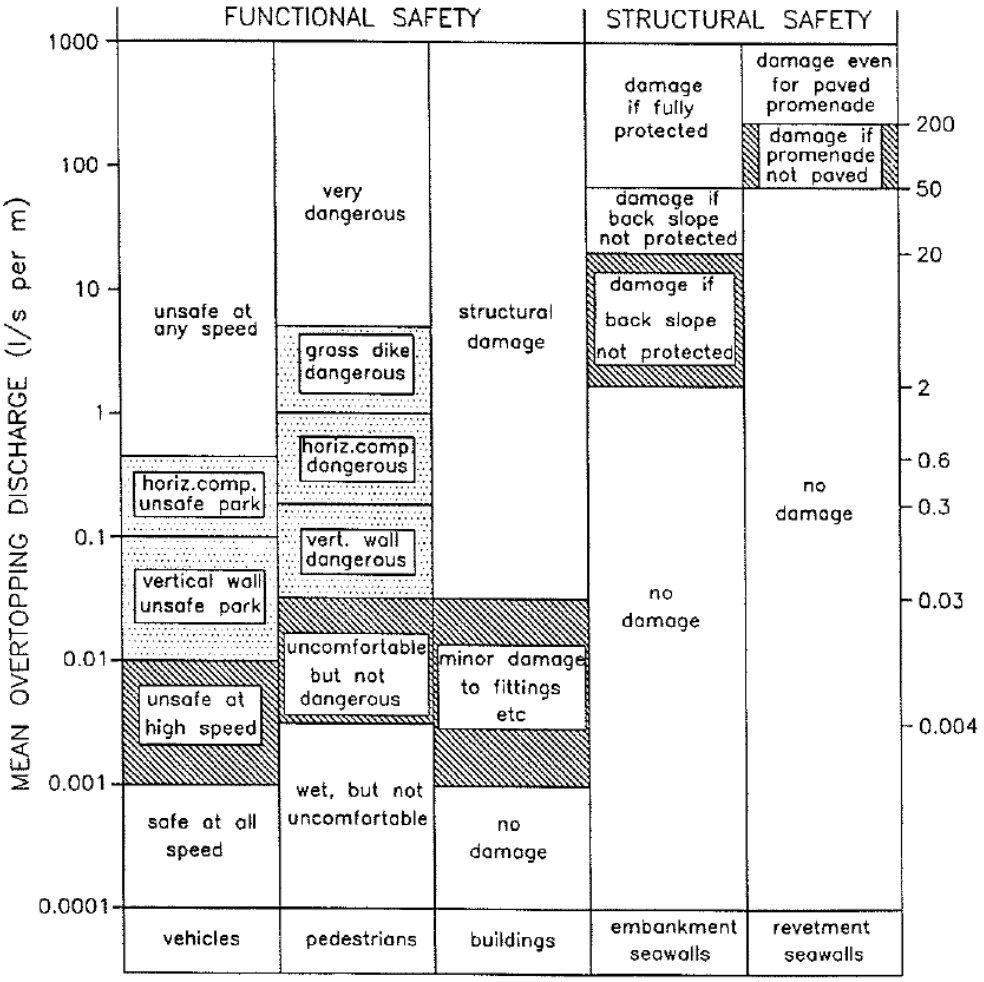



**Figura 58: Linee guida sulla portata di tracimazione – Fonte: Franco et al. (1994)**

## *7.2.1 Molo Sud Est – Diga Ampoixi*

La verifica della tracimazione è stata effettuata nel punto 4 dell'immagine di cui sotto che presenta le caratteristiche più gravose per l'opera in oggetto.

| | Tr | Dir | | Depth [m] | Hsig [m] | Dir [degr] | RTpeak [sec] | Tm01 [sec] | Hm0 | Tm1,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 050_160 | 50 | 160 | 2 | 2,9 | 2,6 | 169,4 | 12,1 | 7,76 | 2,62 | 11,04 |
| 050_160 | 50 | 160 | 3 | 2,6 | 2,5 | 177,1 | 12,1 | 8,01 | 2,48 | 11,04 |
| 050_160 | 50 | 160 | 4 | 3,8 | 2,9 | 183,8 | 12,1 | 8,18 | 2,92 | 11,04 |
| 050_160 | 50 | 160 | 5 | 6,3 | 3,4 | 180,3 | 12,1 | 8,25 | 3,39 | 11,04 |
| 050_160 | 50 | 160 | 6 | 7,7 | 3,8 | 172,2 | 12,1 | 8,32 | 3,84 | 11,04 |
| 050_160 | 50 | 160 | 7 | 7,0 | 3,4 | 174,9 | 12,1 | 8,17 | 3,42 | 11,04 |
| 050_180 | 50 | 180 | 2 | 2,9 | 2,7 | 170,9 | 12,1 | 7,81 | 2,67 | 11,04 |
| 050_180 | 50 | 180 | 3 | 2,6 | 2,5 | 179,7 | 12,1 | 8,01 | 2,53 | 11,04 |
| 050_180 | 50 | 180 | 4 | 3,8 | 3,0 | 186,4 | 12,1 | 8,18 | 2,98 | 11,04 |
| 050_180 | 50 | 180 | 5 | 6,3 | 3,5 | 182,3 | 12,1 | 8,21 | 3,48 | 11,04 |
| 050_180 | 50 | 180 | 6 | 7,7 | 4,0 | 174,3 | 12,1 | 8,25 | 3,95 | 11,04 |
| 050_180 | 50 | 180 | 7 | 7,0 | 3,5 | 176,5 | 12,1 | 8,11 | 3,53 | 11,04 |
| 050_220 | 50 | 220 | 2 | 2,9 | 2,4 | 172,1 | 12,1 | 7,97 | 2,41 | 11,04 |
| 050_220 | 50 | 220 | 3 | 2,6 | 2,3 | 183,4 | 12,1 | 8,19 | 2,30 | 11,04 |
| 050_220 | 50 | 220 | 4 | 3,8 | 2,6 | 193,2 | 12,1 | 8,37 | 2,58 | 11,04 |
| 050_220 | 50 | 220 | 5 | 6,3 | 2,9 | 186,7 | 12,1 | 8,43 | 2,88 | 11,04 |
| 050_220 | 50 | 220 | 6 | 7,7 | 3,0 | 177,7 | 12,1 | 8,53 | 3,04 | 11,04 |
| 050_220 | 50 | 220 | 7 | 7,0 | 2,8 | 179,4 | 12,1 | 8,37 | 2,83 | 11,04 |
| 100_160 | 100 | 160 | 2 | 2,9 | 2,7 | 169,7 | 12,1 | 7,98 | 2,69 | 11,04 |
| 100_160 | 100 | 160 | 3 | 2,6 | 2,6 | 177,8 | 12,1 | 8,21 | 2,57 | 11,04 |
| 100_160 | 100 | 160 | 4 | 3,8 | 3,0 | 184,5 | 12,1 | 8,40 | 3,02 | 11,04 |
| 100_160 | 100 | 160 | 5 | 6,3 | 3,5 | 180,8 | 12,1 | 8,45 | 3,53 | 11,04 |
| 100_160 | 100 | 160 | 6 | 7,7 | 4,0 | 172,8 | 12,1 | 8,49 | 4,02 | 11,04 |
| 100_160 | 100 | 160 | 7 | 7,0 | 3,6 | 175,3 | 12,1 | 8,36 | 3,57 | 11,04 |
| 100_180 | 100 | 180 | 2 | 2,9 | 2,6 | 171,3 | 10,7 | 7,31 | 2,59 | 9,74 |
| 100_180 | 100 | 180 | 3 | 2,6 | 2,4 | 178,7 | 10,7 | 7,55 | 2,44 | 9,74 |
| 100_180 | 100 | 180 | 4 | 3,8 | 2,9 | 185,3 | 10,7 | 7,79 | 2,86 | 9,74 |
| 100_180 | 100 | 180 | 5 | 6,3 | 3,3 | 181,9 | 10,7 | 7,85 | 3,28 | 9,74 |
| 100_180 | 100 | 180 | 6 | 7,7 | 3,7 | 173,6 | 10,7 | 7,95 | 3,68 | 9,74 |
| 100_180 | 100 | 180 | 7 | 7,0 | 3,3 | 176,1 | 10,7 | 7,77 | 3,31 | 9,74 |
| 100_220 | 100 | 220 | 2 | 2,9 | 2,5 | 172,1 | 12,1 | 8,30 | 2,51 | 11,04 |
| 100_220 | 100 | 220 | 3 | 2,6 | 2,4 | 183,5 | 12,1 | 8,52 | 2,40 | 11,04 |
| 100_220 | 100 | 220 | 4 | 3,8 | 2,8 | 192,7 | 12,1 | 8,72 | 2,75 | 11,04 |
| 100_220 | 100 | 220 | 5 | 6,3 | 3,1 | 186,6 | 12,1 | 8,76 | 3,13 | 11,04 |
| 100_220 | 100 | 220 | 6 | 7,7 | 3,4 | 177,8 | 12,1 | 8,82 | 3,37 | 11,04 |
| 100_220 | 100 | 220 | 7 | 7,0 | 3,1 | 179,4 | 12,1 | 8,67 | 3,11 | 11,04 |



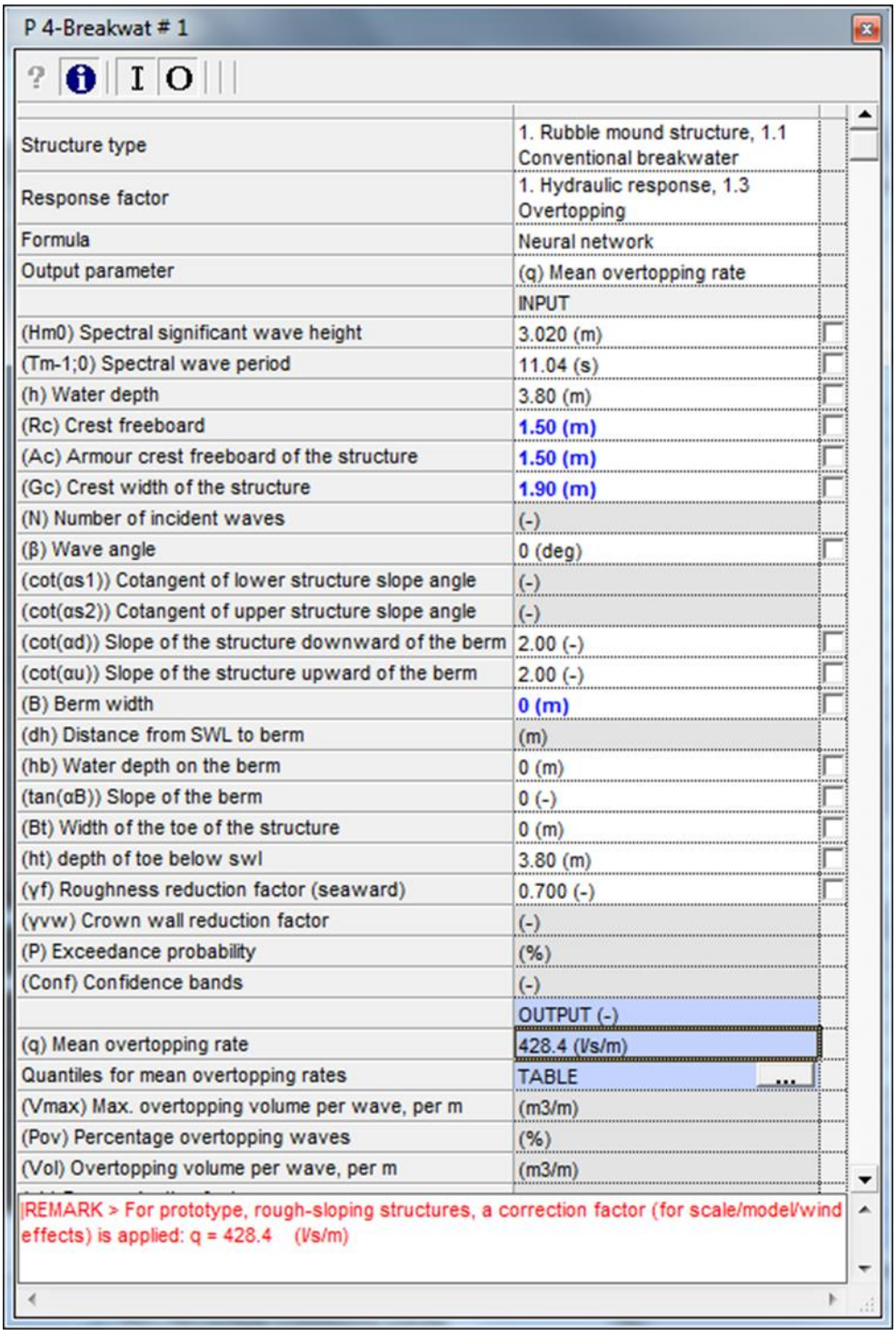



**Figura 59: Pennello sud-est: situazione attuale**

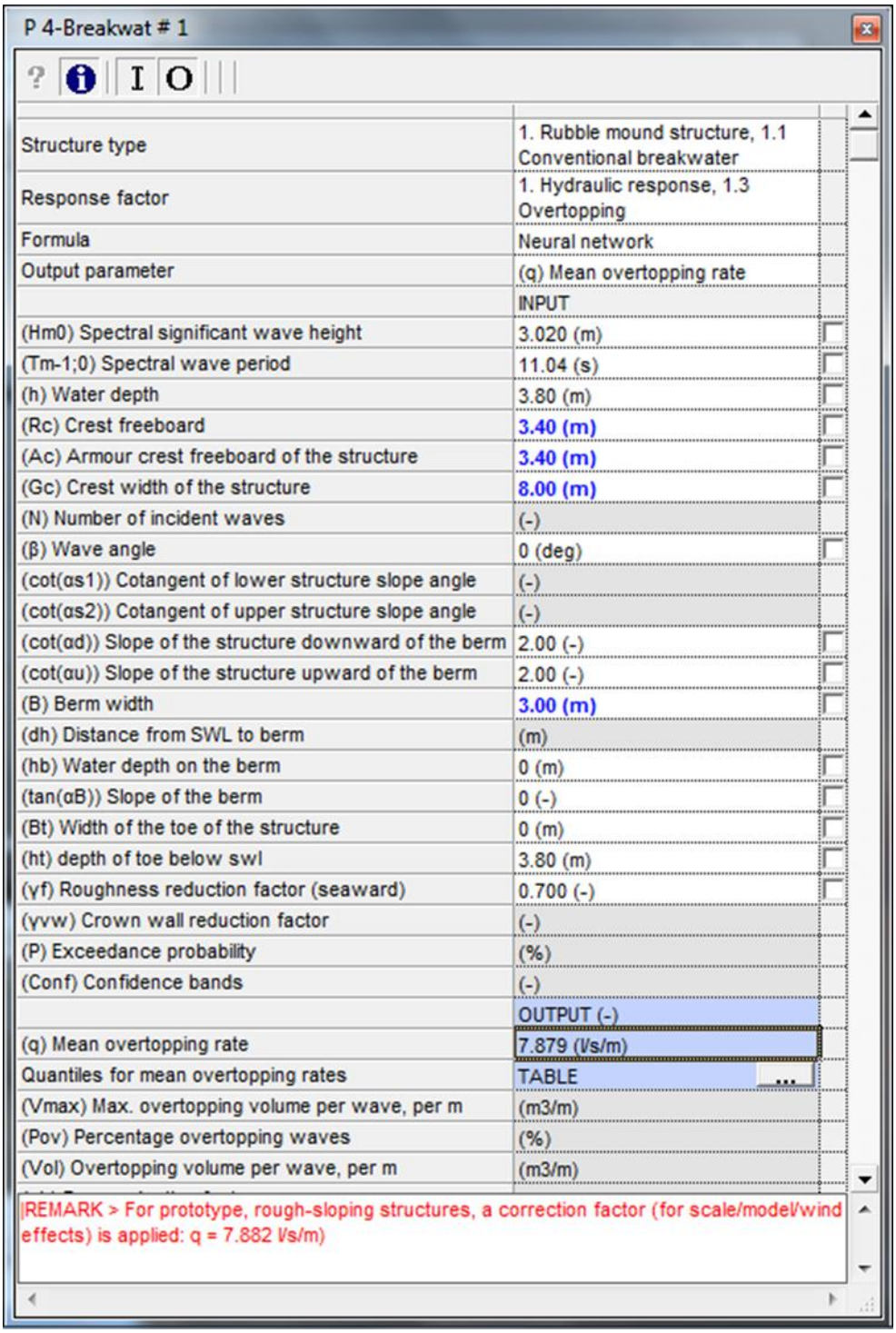



**Figura 60: Pennello sud-est: situazione di progetto**

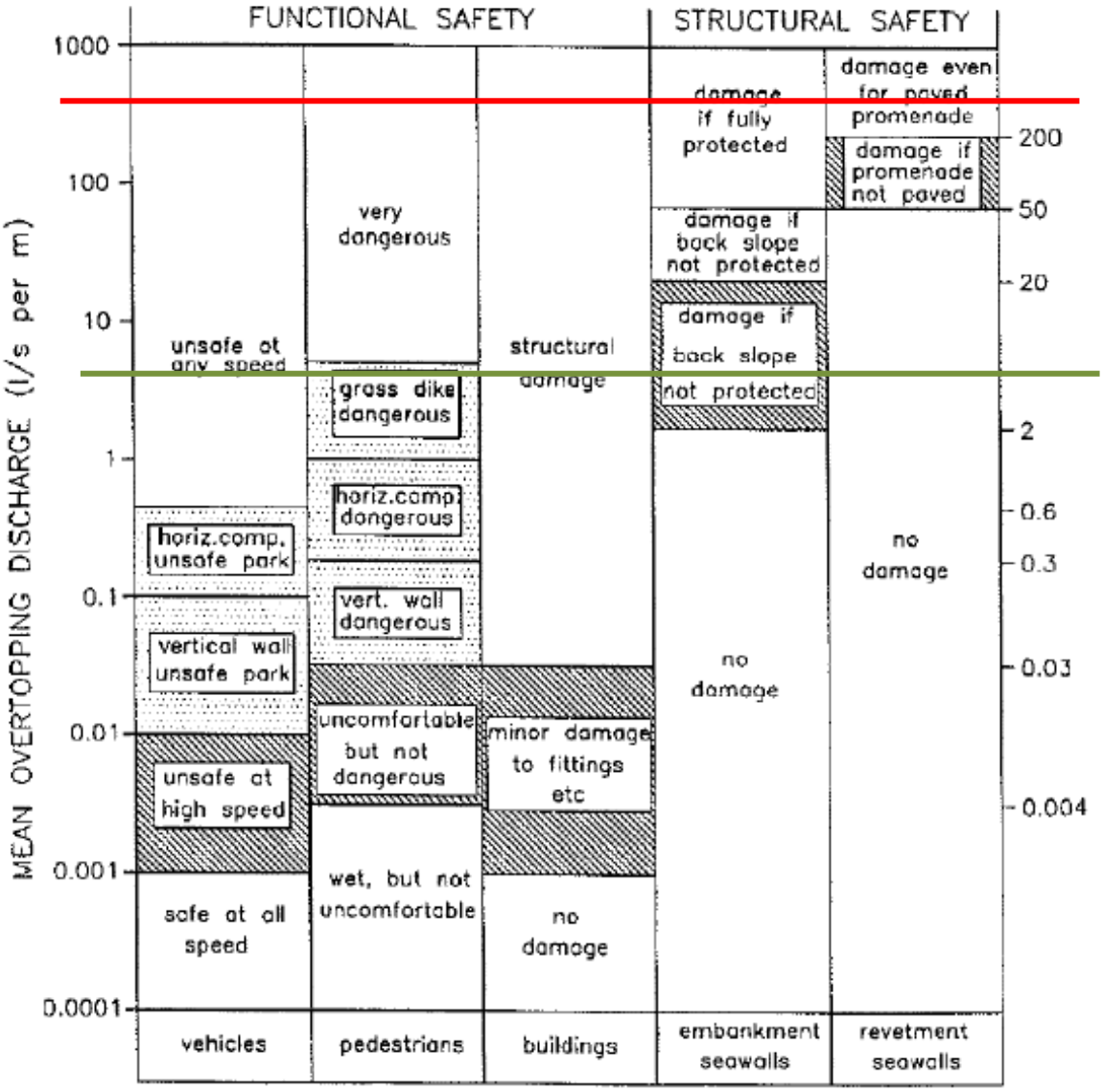



**Figura 61: Pennello sud-est: confronto tra stato attuale (rosso) e situazione di progetto (verde)**

L'intervento sul pennello consente di ridurre considerevolmente la tracimazione portandola ad un livello che consente di garantire l'integrità delle opere a tergo ed il passaggio pedonale anche se per quest'ultimo si suggerisce comunque, a causa della tracimazione residua, di impedire l'accesso con le mareggiate più gravose.

### 7.2.2 Lungomare Vittorio Veneto

La verifica della tracimazione è stata effettuata nel punto centrale dell'immagine di cui sotto che presenta le caratteristiche più gravose per l'opera in oggetto.




| | Configurazione | Hs | T ricostruito | T largo |
|---|---|---|---|---|
| Sinistra (1) | | 0,60 | 3,215 | 11,04 |
| Centro (2) | Molo piccolo 10 m con molo san francesco | 1,40 | 4,900 | 11,04 |
| Destra (3) | | 0,70 | 3,472 | 11,04 |
| Sinistra (1) | | 0,80 | 3,71 | 11,04 |
| Centro (2) | Attuale | 1,70 | 5,35 | 11,04 |
| Destra (3) | | 1,40 | 4,91 | 11,04 |
| Sinistra (1) | | 0,60 | 3,215 | 11,04 |
| Centro (2) | Molo 45 m | 1,35 | 4,732 | 11,04 |
| Destra (3) | | 0,70 | 3,472 | 11,04 |
| Sinistra (1) | | 0,61 | 3,24 | 11,04 |
| Centro (2) | Molo piccolo 10 m senza molo san francesco | 1,65 | 5,35 | 11,04 |
| Destra (3) | | 1,35 | 4,73 | 11,04 |

Dall'esame dei dati sopra riportati, come peraltro già evidenziato nel paragrafo 5, il molo alla foce del torrente S Francesco genera sul litorale una protezione dell'ordine di grandezza pari a quella del prolungamento della diga Ampoixi.

Tale riduzione peraltro è marginele il che suggerisce, anche per non interferire con la dinamica del Torrente S. Francesco, di realizzare il molo alla foce a giorno.

Sono state pertanto valutate due alternative equivalenti dal punto di vista dell'efficacia della riduzione della tracimazione, una sezione dotata di vasca di dissipazione e muro concavo, ed un'altra priva di detto accorgimento.

La scrivente ritiene più opportuno adottare la soluzione senza vasca di dissipazione in quanto a parità di efficacia ed un impatto sul paesaggio sostanzialmente equivalente, risulta essere di più facile realizzazione. Risulterebbe infatti complicato realizzare il muro concavo in fregio al muro esistente sia per ragioni tecniche che paesaggistiche. Le tre simulazioni sotto riportate sono relative alle alternative progettuali sotto schematizzate.

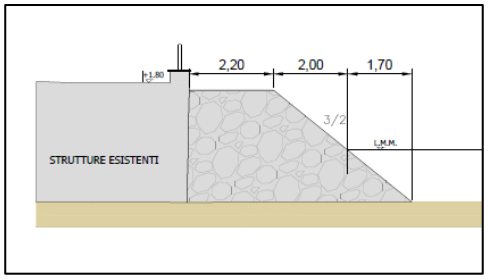



**Figura 62 Situazione attuale**

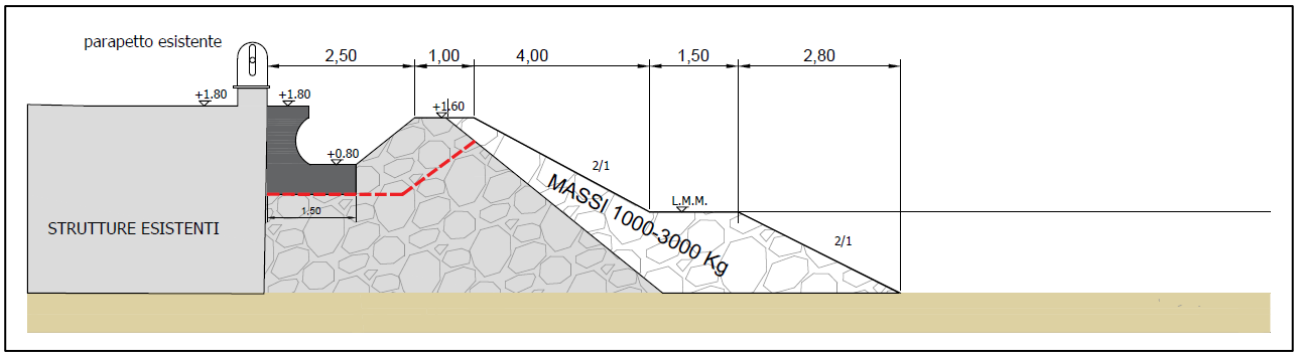



**Figura 63 Situazione di progetto con Molo S Francesco**

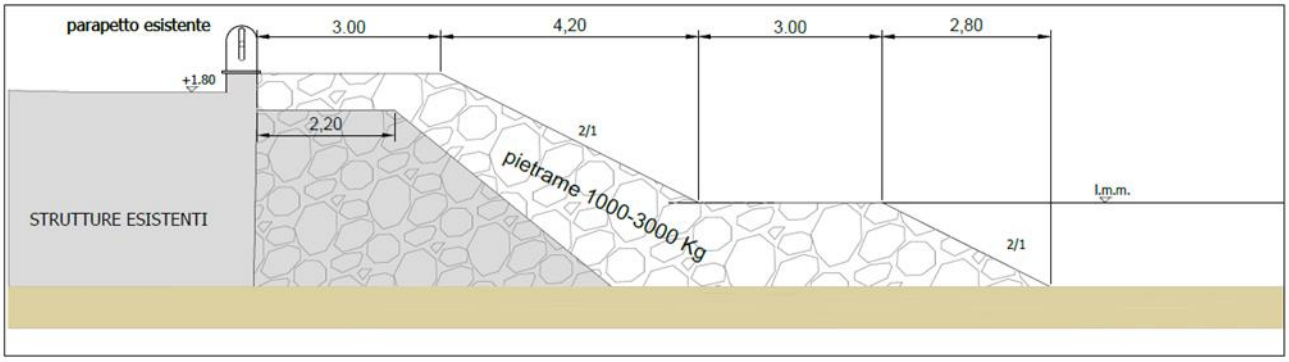



**Figura 64 Situazione di progetto senza Molo San Francesco**

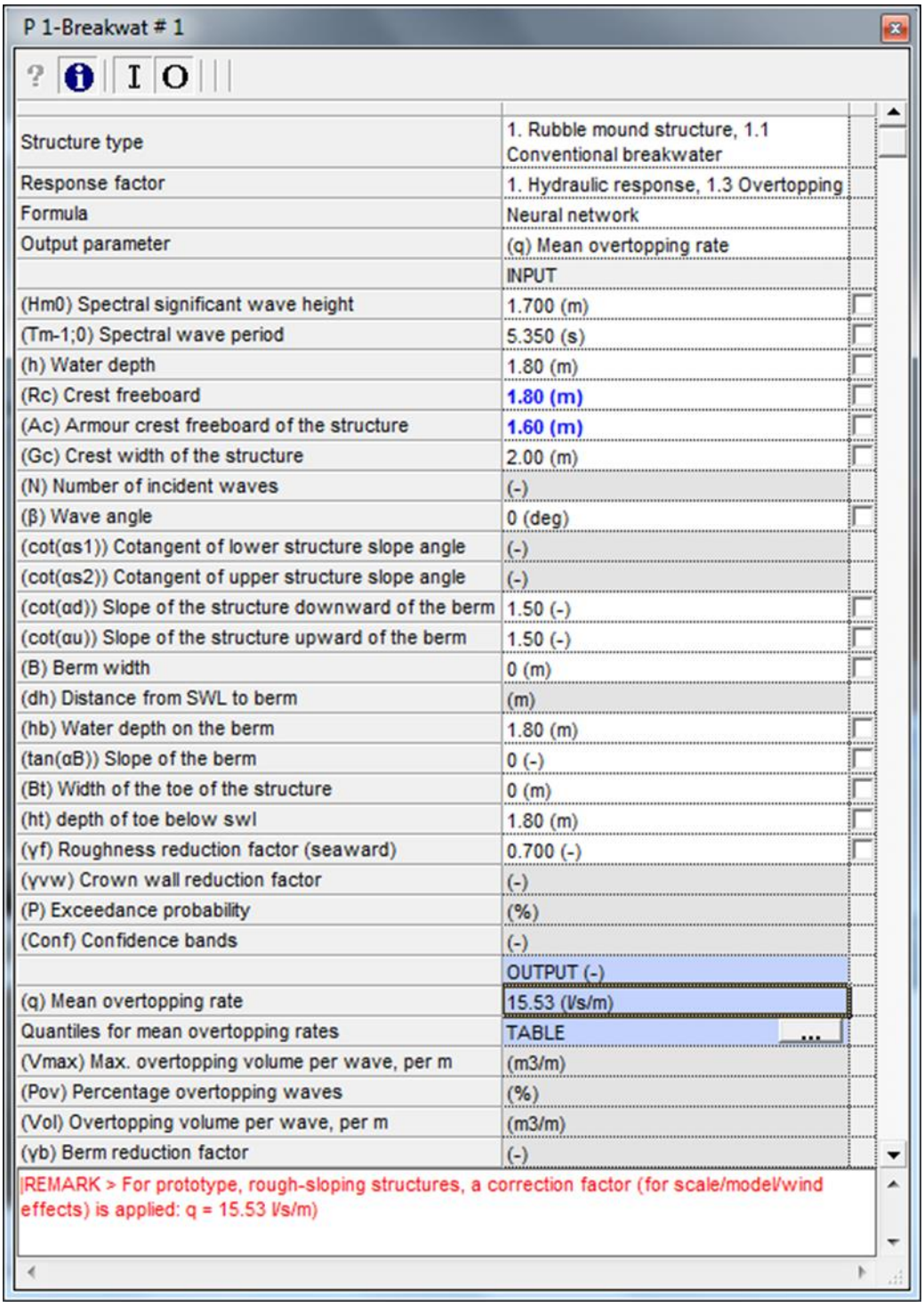



**Figura 65: Lungomare: situazione attuale**

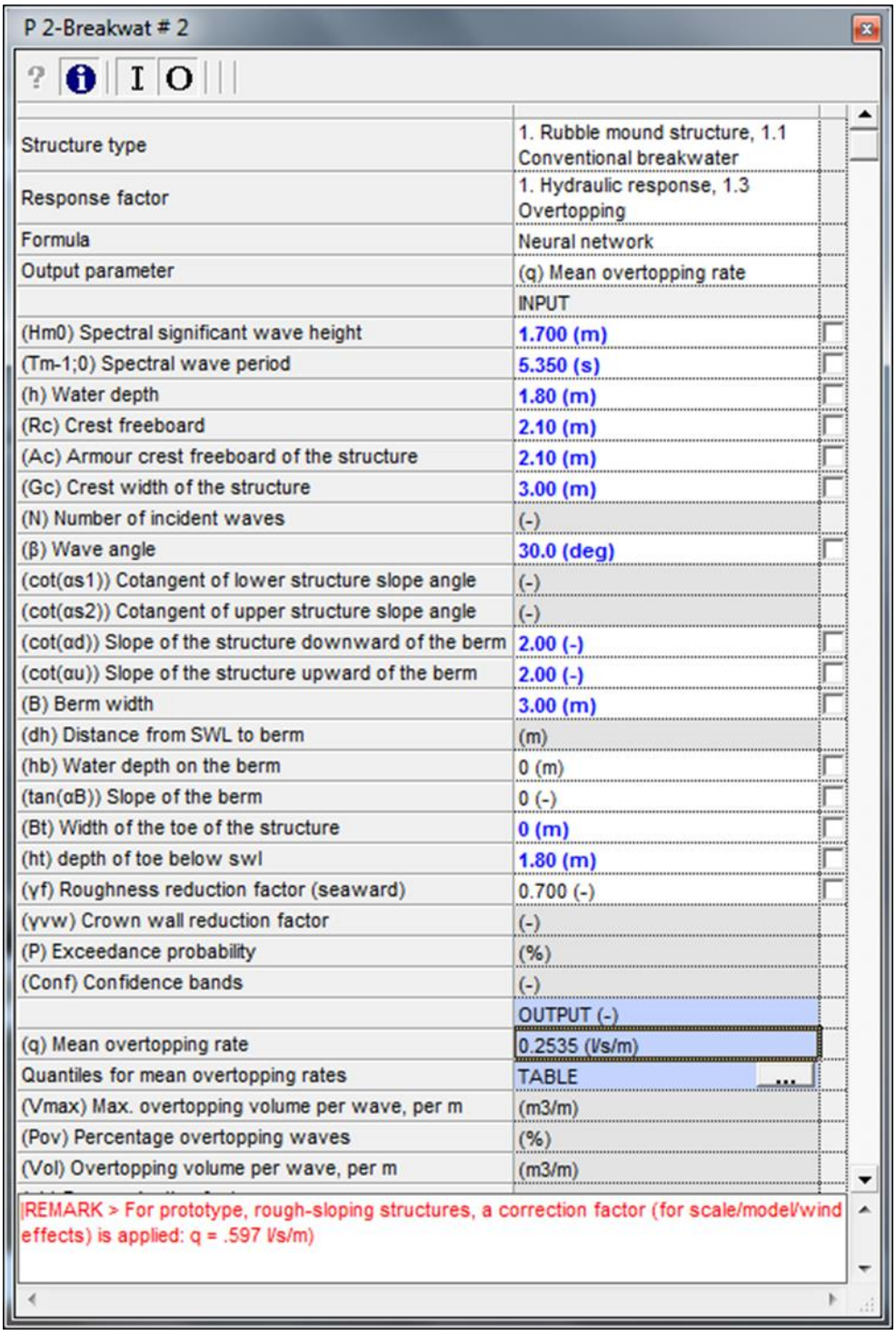



**Figura 66: Lungomare: situazione di progetto**

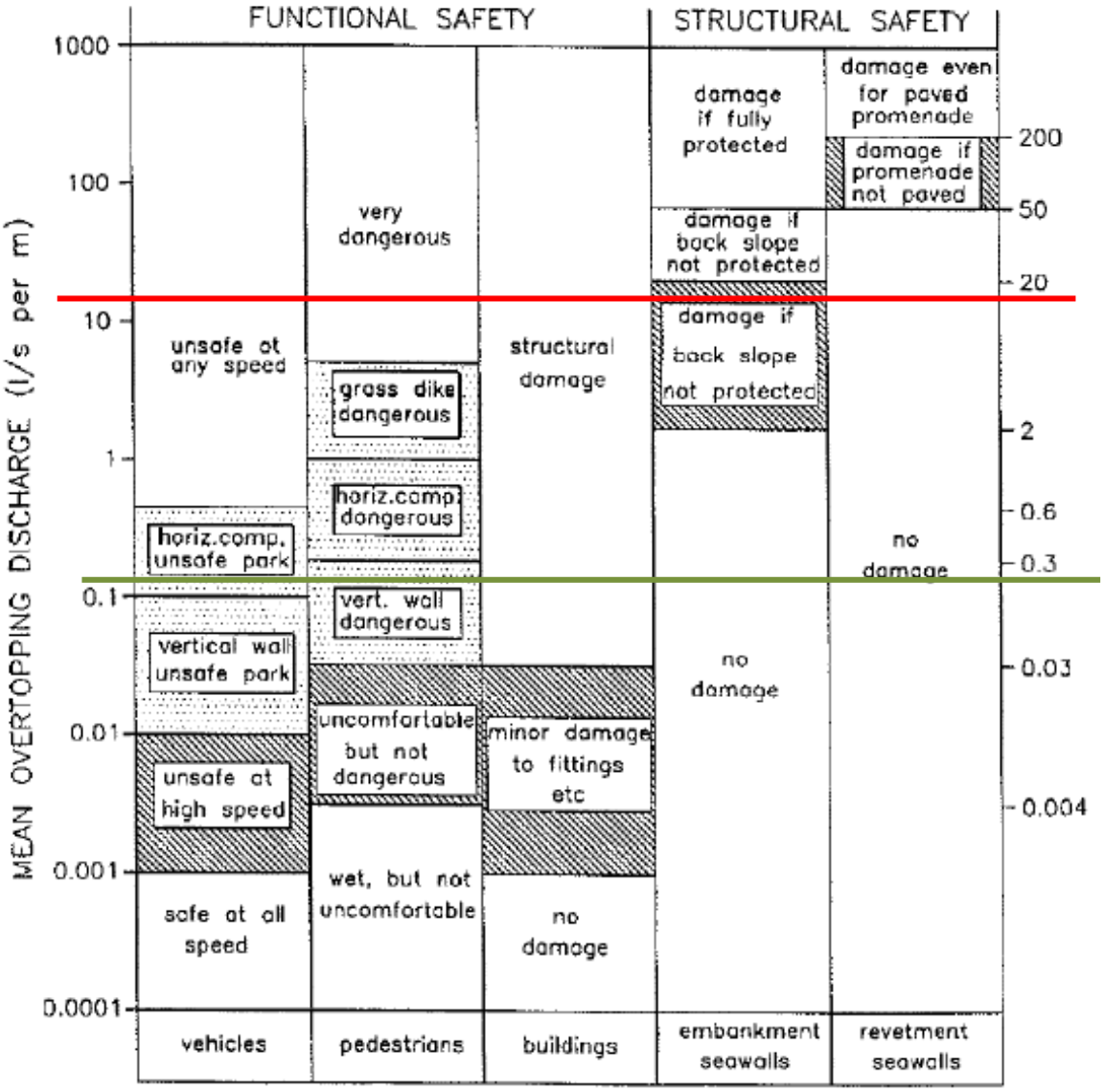



**Figura 67: Pennello sud-est: confronto tra stato attuale (rosso) e situazione di progetto con Molo sul San Francesco (verde)**

# 8 Verifiche di stabilità

La valutazione della stabilità del masso nel caso della soluzione con scogliera è stata effettuate utilizzando il software Breakwat sia per il molo sopraflutto, sia per quello sottoflutto attualmente presente.

A tale fine, è stata utilizzata la formula di Van der Meer (1988), che permette di valutare statisticamente le condizioni di stabilità della mantellata in condizioni di onde random.

Le condizioni di applicazione di tale formula sono:

- Scogliera con strato di copertura superficiale composto da roccia;
- Portata di tracimazione ridotta o assente (10-15% dell'onda);
- Pendenza della mantellata uniforme

Il danno che può essere causato alla struttura viene valutato in termini di livello di danneggiamento adimensionale S, considerando l'area di erosione in prossimità del livello di mare calmo. S è indipendente da altezza e angolo di inclinazione della struttura, e può essere considerato come il numero di rocce cubiche con lato pari a Dn50 che vengono erose in una striscia della struttura larga Dn50. Il numero di pietre erose all'interno di tale striscia può essere maggiore o minore di S, in funzione della porosità, della dimensione e dalla forma dei massi. In genere, il numero di rocce erose nella striscia delle dimensioni considerate è compresa pari a $0.7 \div 1 \cdot S$. I limiti di S dipendono principalmente dall'inclinazione della mantellata, e sono indicati in Tabella 10. In tale tabella, con il termine "Danno iniziale" si intende un danneggiamento della mantellata compreso tra 0 e 5%, mentre "Cedimento" indica l'esposizione dello strato filtrante.

**Tabella 8 Valori di S per una mantellata composta da uno mantellata con spessore pari a due diametri – Fonte: Breakwat Technical Manual**

| Inclinazione | Danno iniziale | Danno intermedio | Cedimento |
|---|---|---|---|
| 1:1.5 | 2 | 3-5 | 8 |
| 1:2 | 2 | 4-6 | 8 |
| 1:3 | 2 | 6-9 | 12 |
| 1:4 – 1:6 | 3 | 8-12 | 17 |

P 1-Breakwat # 1

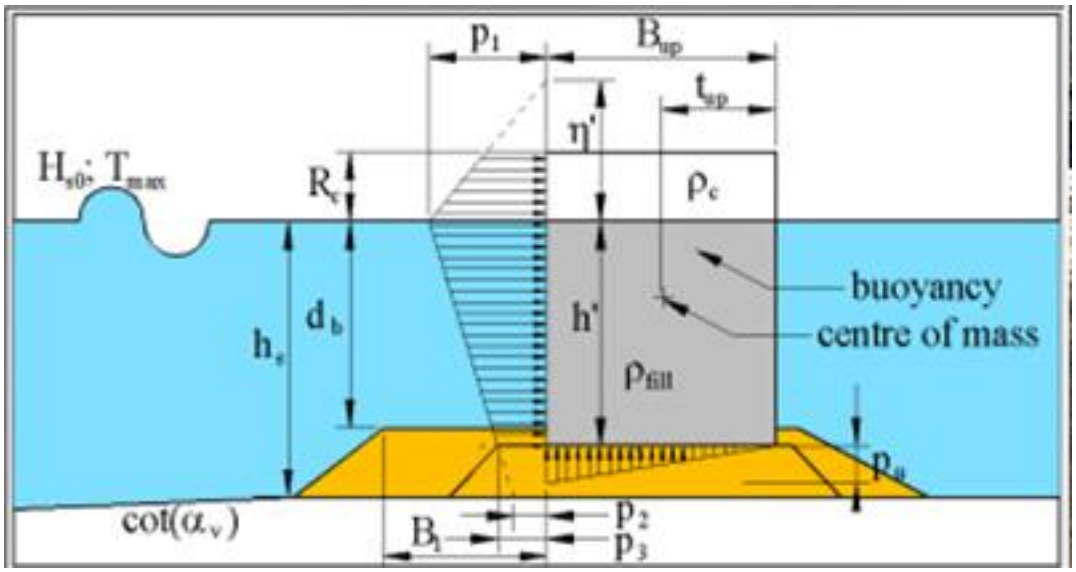
| | |
|---|---|
| Structure type | 1. Rubble mound structure, 1.1 Conventional breakwater |
| Response factor | 2. Structural response, 2.1 Rock armour |
| Formula | Van der Meer (1988) |
| Output parameter | (S) Damage level |
| | INPUT |
| (cot(α)) Slope angle | 2.00 (-) |
| (P) Notional Permeability factor | 0.400 (-) |
| (Dn50-core/Dn50) Ratio rock sizes | (-) |
| (ρa) Armour density | 2650 (kg/m3) |
| (ρw) Water density | 1025 (kg/m3) |
| (KD) Stability coefficient | (-) |
| (N) Number of incident waves | 3000 (-) |
| (Tm) Mean wave period | 4.90 (s) |
| (Tm-1;0) Spectral wave period | (s) |
| (H2%/Hs) Wave height ratio | 1.40 (-) |
| (αHs) Wave height factor | (-) |
| (Conf) Confidence bands | check to use (-) |
| (Prob.) Input table | (-) |
| (y) Number of years | (year) |
| (SEQ_STORMS) Cumulative damage input table | (-) |
| (Hs) Significant wave height | 1.40 (m) |
| (M50) Armour mass | 2000.0 (kg) |
| | OUTPUT (-) |
| (S) Damage level | 0.126 (-) |
| (δ) Relative buoyant density | 1.59 (-) |
| (Dn50) Nominal rock size | 0.910 (m) |
| (ξm) Breaker parameter | 2.587 (-) |
| (ξs;-1) (Spectral) breaker parameter | (-) |
| (sm) Wave steepness | 0.0373 (-) |
| (sm-1;0) (Spectral) wave steepness | (-) |
| (Hs/δDn50) Stability number | 0.9699 (-) |
| (Plunging) Output table for Plunging waves | (-) |
| (Surging) Output table for Surging waves | (-) |
| (Breaker) Output table for Breaker parameter | (-) |

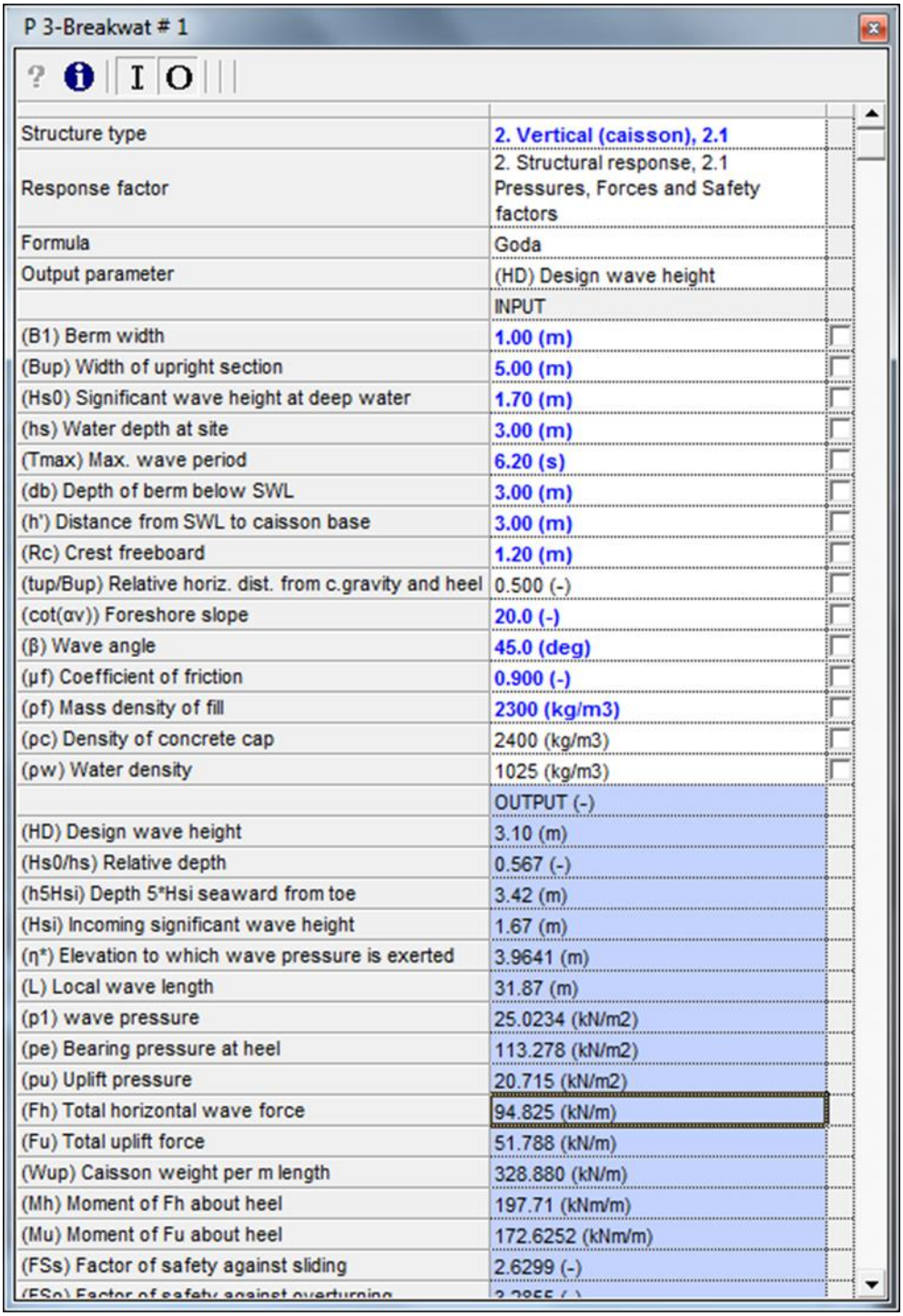
P 1-Breakwat # 1

| | |
|---|---|
| Structure type | 1. Rubble mound structure, 1.1 Conventional breakwater |
| Response factor | 2. Structural response, 2.1 Rock armour |
| Formula | Van der Meer (1988) |
| Output parameter | (S) Damage level |
| | INPUT |
| (cot(α)) Slope angle | 2.00 (-) |
| (P) Notional Permeability factor | 0.400 (-) |
| (Dn50-core/Dn50) Ratio rock sizes | (-) |
| (ρa) Armour density | 2650 (kg/m3) |
| (ρw) Water density | 1025 (kg/m3) |
| (KD) Stability coefficient | (-) |
| (N) Number of incident waves | 3000 (-) |
| (Tm) Mean wave period | 8.40 (s) |
| (Tm-1;0) Spectral wave period | (s) |
| (H2%/Hs) Wave height ratio | 1.40 (-) |
| (αHs) Wave height factor | (-) |
| (Conf) Confidence bands | check to use (-) |
| (Prob.) Input table | (-) |
| (y) Number of years | (year) |
| (SEQ_STORMS) Cumulative damage input table | (-) |
| (Hs) Significant wave height | 3.00 (m) |
| (M50) Armour mass | 6000.0 (kg) |
| | OUTPUT (-) |
| (S) Damage level | 1.35 (-) |
| (δ) Relative buoyant density | 1.59 (-) |
| (Dn50) Nominal rock size | 1.31 (m) |
| (ξm) Breaker parameter | 3.030 (-) |
| (ξs;-1) (Spectral) breaker parameter | (-) |
| (sm) Wave steepness | 0.0272 (-) |
| (sm-1;0) (Spectral) wave steepness | (-) |
| (Hs/δDn50) Stability number | 1.441 (-) |
| (Plunging) Output table for Plunging waves | (-) |
| (Surging) Output table for Surging waves | (-) |
| (Breaker) Output table for Breaker parameter | (-) |

**Figura 68 Dimensionamento scogliera lungomare sx e molo Ampoixi dx**

La determinazione delle sollecitazioni del moto ondoso sul Molo S Francesco è stata effettuata mediante la formula di Goda inserendo nel software i parametri richiesti.





P 3-Breakwat # 1

| | |
|---|---|
| Structure type | 2. Vertical (caisson), 2.1 |
| Response factor | 2. Structural response, 2.1 Pressures, Forces and Safety factors |
| Formula | Goda |
| Output parameter | (HD) Design wave height |
| | INPUT |
| (B1) Berm width | 1.00 (m) |
| (Bup) Width of upright section | 5.00 (m) |
| (Hs0) Significant wave height at deep water | 1.70 (m) |
| (hs) Water depth at site | 3.00 (m) |
| (Tmax) Max. wave period | 6.20 (s) |
| (db) Depth of berm below SWL | 3.00 (m) |
| (h') Distance from SWL to caisson base | 3.00 (m) |
| (Rc) Crest freeboard | 1.20 (m) |
| (tup/Bup) Relative horiz. dist. from c.gravity and heel | 0.500 (-) |
| (cot(αv)) Foreshore slope | 20.0 (-) |
| (β) Wave angle | 45.0 (deg) |
| (μf) Coefficient of friction | 0.900 (-) |
| (ρf) Mass density of fill | 2300 (kg/m3) |
| (ρc) Density of concrete cap | 2400 (kg/m3) |
| (ρw) Water density | 1025 (kg/m3) |
| | OUTPUT (-) |
| (HD) Design wave height | 3.10 (m) |
| (Hs0/hs) Relative depth | 0.567 (-) |
| (h5Hsi) Depth 5*Hsi seaward from toe | 3.42 (m) |
| (Hsi) Incoming significant wave height | 1.67 (m) |
| (η*) Elevation to which wave pressure is exerted | 3.9641 (m) |
| (L) Local wave length | 31.87 (m) |
| (p1) wave pressure | 25.0234 (kN/m2) |
| (pe) Bearing pressure at heel | 113.278 (kN/m2) |
| (pu) Uplift pressure | 20.715 (kN/m2) |
| (Fh) Total horizontal wave force | 94.825 (kN/m) |
| (Fu) Total uplift force | 51.788 (kN/m) |
| (Wup) Caisson weight per m length | 328.880 (kN/m) |
| (Mh) Moment of Fh about heel | 197.71 (kNm/m) |
| (Mu) Moment of Fu about heel | 172.6252 (kNm/m) |
| (FSs) Factor of safety against sliding | 2.6299 (-) |
| (FSo) Factor of safety against overturning | 3.2855 (-) |

Considerando che nella parte sommersa l'onda incide su una superficie cilindrica la forza totale esercitata dall'inda verrà assunta pari a 90 KN/m.