



# Realizzazione di un porticciolo turistico a Marina di Palma - 1° Stralcio Funzionale

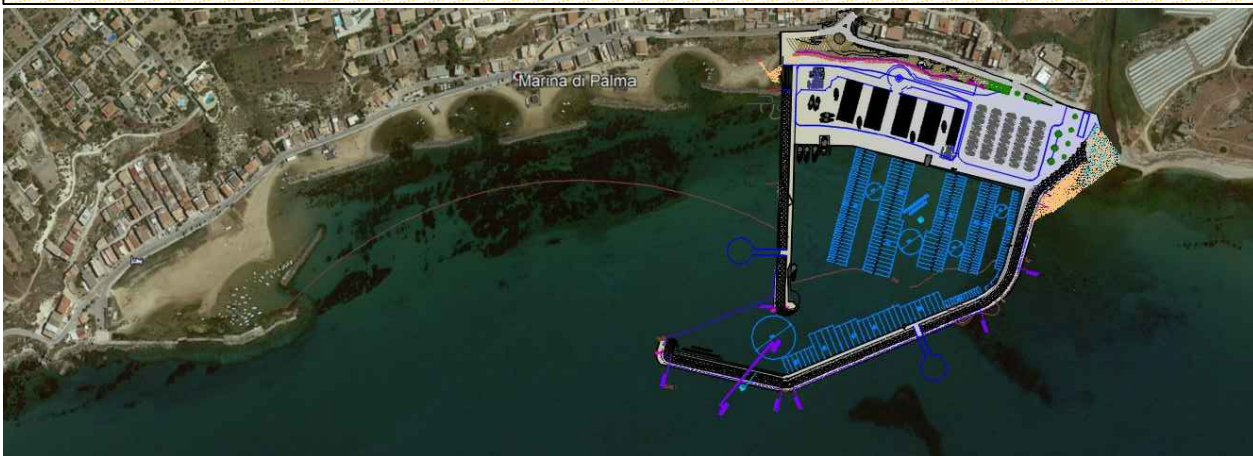
REGIONE SICILIANA - PROVINCIA DI AGRIGENTO

COMUNE DI PALMA DI MONTECHIARO

Comune di Palma di Montechiaro, via Fiorentino, 89, telefono: 0922 799001

email: [info@comune.palmadimontechiaro.ag.it](mailto:info@comune.palmadimontechiaro.ag.it) - p.e.c.: [protocollo@comune.palmadimontechiaro.legalmail.it](mailto:protocollo@comune.palmadimontechiaro.legalmail.it)

Livello di Prog.: PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA



## ELABORATI:

- A. RELAZIONE GENERALE E STUDI AMBIENTALI**
  - ☐ A.01 RELAZIONE TECNICO - ILLUSTRATIVA
  - ☐ A.02 STUDIO DI PREFATTIBILITÀ AMBIENTALE
- B. STUDI SPECIALISTICI**
  - ☐ B.01 STUDIO IDRAULICO MARITTIMO
  - ☐ B.02 STUDIO SEDIMENTOLOGICO
  - ☐ B.03 STUDIO IDROLOGICO
- C. ELABORATI GRAFICI STATO DI FATTO**
  - ☐ C.01 INQUADRAMENTO TERRITORIALE
  - ☐ C.02 STRALCI P.R.G. E PIANO DEL PORTO
  - ☐ C.03 RAPPORTO FOTOGRAFICO - RILIEVO BATIMETRICO
- D. ELABORATI GRAFICI DI PROGETTO**
  - ☐ D.01 PLANIMETRIA GENERALE DI PROGETTO
  - ☐ D.02 SEZIONI TIPOLOGICHE MOLO SOPRAFLUTTO
  - ☐ D.03 FOTORENDERING
- E. ELABORATI ECONOMICI**
  - ☐ E.01 CALCOLO SOMMARIO DELLA SPESA
  - ☐ E.02 CALCOLO COMPENSI E PARCELLE
  - ☐ E.03 QUADRO ECONOMICO DI PROGETTO
- F. SICUREZZA**
  - ☐ F.01 PRIME INDICAZIONI E DISPOSIZIONI PER LA STESURA DEI PIANI DI SICUREZZA

VISTI:

## I PROGETTISTI

Ing. Francesco Lazzaro

Geom. Felice Bonardi

## VALIDAZIONE DEL R.U.P.

IL R.U.P.  
Arch. Salvatore Di Vincenzo

DATA:

PALMA DI MONTECHIARO, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

SCALA:

REV.:



# COMUNE DI PALMA DI MONTECHIARO

## (Provincia di Agrigento)

### PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Realizzazione di un porticciolo turistico a Marina di Palma - I Stralcio Funzionale

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

---

## **PREMESSA**

L'elaborato B.01 "Studio Idraulico Marittimo" è stato redatto per l'adozione del Piano Regolatore del Porto di Marina di Palma, approvato con D.Dir. n. 1022 del 15/11/2007 pubblicato sulla GURS n. 59 del 21/12/2007 dalla Regione Siciliana – Assessorato Regionale Territorio ed Ambiente, Dipartimento Regionale Urbanistica.

Le tematiche affrontate in questo elaborato faranno riferimenti ai seguenti ambiti:

- clima meteomarinario e statistica degli eventi estremi al largo;
- propagazione sottocosta del clima meteomarinario e degli eventi estremi;
- studio dell'agitazione ondosa all'interno del costruendo porto.

Lo studio si pone l'obiettivo di fornire indicazioni riguardanti il clima meteomarinario del paraggio di Marina di Palma e di individuare le condizioni di agitazione ondosa all'interno del bacino portuale, assumendo quale configurazione planimetrica di riferimento quella sviluppata sulla base delle esigenze tecniche e funzionali del Piano Regolatore Portuale.

Nella fase di sviluppo del layout, le indicazioni preliminari fornite in fase di redazione dello studio, sono state anzi un ausilio fondamentale per l'individuazione di una soluzione funzionale dal punto di vista prettamente marittimo (sicurezza, navigabilità, operatività, ecc.).

La fase finale dello studio è stata finalizzata alla verifica dell'agitazione ondosa all'interno del porto ed al rispetto dei valori raccomandati di altezza d'onda significativa (cfr. "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici", AIPCN 2002). Sono infatti state prese in considerazione le condizioni di comfort e limite, corrispondenti ad eventi rispettivamente di frequenza media pari a 5



## COMUNE DI PALMA DI MONTECHIARO

### (Provincia di Agrigento)

#### PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Realizzazione di un porticciolo turistico a Marina di Palma - I Stralcio Funzionale

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

---

g/anno e tempo di ritorno di 50 anni.

### FENOMENI METEOROLOGICI E MARITTIMI

Una lista sintetica di quanto entra in gioco nelle analisi di questo tipo:

- configurazione del bacino di generazione dei moti ondosi;
- batimetrie dei fondali;
- orografia dei luoghi;
- tipologia geologica e pedologica dei litorali e dei fondali;
- presenza di estuari e di fiumi con regimi significativi;
- presenza e caratteristiche di interventi antropici costieri;
- frequenza ed intensità dei venti e delle tempeste;
- presenza significativa di moti di marea;
- presenza significativa di correnti marine;
- presenza significativa di fenomeni ondosi di lungo periodo (poco influenti nel Mediterraneo).

Le tematiche vanno rielaborate alla luce dei dati correnti ed attuali.



## COMUNE DI PALMA DI MONTECHIARO

### (Provincia di Agrigento)

#### PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Realizzazione di un porticciolo turistico a Marina di Palma - I Stralcio Funzionale

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

---

#### IDENTIFICAZIONE FISICO-CLIMATICA DEL SITO

occorre fare riferimento ad una analisi aggiornata dei seguenti fattori:

-Rilievo Batimetrico;

-Studio Sedimentologico;

-Studio Idrologico del Fiume Palma;

-Studio Idraulico-Marittimo

-Studio di Compatibilità Ambientale – Rapporto Ambientale

Altri parametri da aggiornare nel dettaglio:

Visibilità;

Nuvolosità;

Temperatura;

Precipitazioni;

Vento;

fattore da implementare con dati recenti, CLIMA ANEMOLOGICO LOCALE;



## COMUNE DI PALMA DI MONTECHIARO

### (Provincia di Agrigento)

#### PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Realizzazione di un porticciolo turistico a Marina di Palma - I Stralcio Funzionale

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

---

marea

correnti

le correnti di gradiente

le correnti di deriva

la direzione della corrente

circolazione generale

circolazione nel mediterraneo

caratterizzazione stagionale degli eventi ondosi

## LAYOUT PORTUALE

Nelle fasi successive del livello di progettazione, seppur utilizzando le relazioni tecniche esistenti occorrerà implementare i dati aggiornati relativamente ad alcuni dati tecnici relativi al layout portuale:

- le dimensioni del bacino da proteggere;
- la batimetria del paraggio;
- le caratteristiche geotecniche dei fondali interessati dalle opere;
- il clima ondoso sottocosta;



## **COMUNE DI PALMA DI MONTECHIARO**

### **(Provincia di Agrigento)**

#### **PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA**

**Realizzazione di un porticciolo turistico a Marina di Palma - I Stralcio Funzionale**

#### **STUDIO IDRAULICO MARITTIMO**

---

- il regime dei venti;
- le condizioni di navigazioni in sicurezza;
- la manutenzione del canale d'accesso e dell'imboccatura;
- l'impatto ambientale e, in particolare, paesaggistico;
- gli effetti sull'evoluzione della linea di riva;
- l'agitazione interna residua dello specchio acqueo protetto;

**Si allega di seguito Lo studio idraulico marittimo allegato al piano.**

COMMITTENTE:



MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI  
S.I.I.T. SICILIA - CALABRIA  
GENIO CIVILE OPERE MARITTIME PER LA SICILIA

TESTATA:

STUDI PROPEDEUTICI ALLA REDAZIONE DEL  
**PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI MARINA DI PALMA**  
- PALMA DI MONTECHIARO (AG) -

TITOLO:

**STUDIO IDRAULICO MARITTIMO**

**Relazione tecnica**

ELABORATO:

**SIM**

DATA:

Aprile 2005

NS.RIF.:

SIM.doc

REDATTORE.:

Ing. Giancarlo Inserra

CONTROLLO:

Ing. Guglielmo Migliorino

RIF.ARC. - N.A4:

PALAAG04 - 138

IL COMMITTENTE

IL TECNICO  
Ing. Elio Ciralli

ING. ELIO CIRALLI  
- STUDIO DI INGEGNERIA CIVILE E COSTIERA -  
Viale delle Magnolie, 36 - 90144 Palermo - tel.: ++39 0916851557 - 0916850224  
e-mail: elio.ciralli@cirallistudio.com







# INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>1</b>
1.1	GENERALITÀ .....	1
1.2	FINALITÀ DELLO STUDIO.....	1
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>4</b>
2.1	I FENOMENI METEOROLOGICI E MARITTIMI IN GIOCO .....	4
2.2	LA STAGIONALITÀ DEGLI EVENTI .....	4
2.3	DETERMINAZIONE DEI LIVELLI IDRICI.....	5
2.4	DETERMINAZIONE DEL CLIMA D'ONDA .....	5
2.5	DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI .....	6
2.6	CONCOMITANZA DI FENOMENI.....	6
<b>3</b>	<b>IDENTIFICAZIONE FISICO-CLIMATICA DEL SITO .....</b>	<b>7</b>
3.1	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO.....	7
3.2	CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE E PEDOLOGICHE .....	7
3.3	CONSIDERAZIONI IDROGEOLOGICHE.....	9
3.4	CONSIDERAZIONI CLIMATOLOGICHE .....	9
3.5	CONCLUSIONI.....	16
3.6	CLIMA ANEMOLOGICO LOCALE.....	16
3.7	MAREA .....	19
3.8	CORRENTI.....	19
3.8.1	LE CORRENTI DI GRADIENTE .....	20
3.8.2	LE CORRENTI DI DERIVA.....	20
3.8.3	LA DIREZIONE DELLA CORRENTE .....	21
3.8.4	CIRCOLAZIONE GENERALE .....	21
3.8.5	CIRCOLAZIONE NEL MEDITERRANEO .....	21
<b>4</b>	<b>FONTI DI DATI METEOMARINI A DISPOSIZIONE.....</b>	<b>24</b>
4.1	POSSIBILI DATI DA ELABORARE .....	24
4.2	LA RETE ONDAMETRICA NAZIONALE .....	25
4.2.1	LA BOA RON DI MAZARA DEL VALLO.....	26
<b>5</b>	<b>FETCH GEOGRAFICO ED EFFICACE .....</b>	<b>30</b>
5.1	DETERMINAZIONE DEL FETCH GEOGRAFICO.....	30
5.2	DETERMINAZIONE DEI FETCH EFFICACI.....	30
<b>6</b>	<b>CLIMA ONDOSO A LARGO DEL PARAGGIO .....</b>	<b>34</b>
6.1	CONFRONTO DEI CAMPI DI GENERAZIONE ONDOSA.....	34
6.2	TRASPOSIZIONE ED ADATTAMENTO DEI DATI DISPONIBILI .....	37
6.3	BASE DATI ONDAMETRICI .....	38
6.3.1	CARATTERIZZAZIONE STAGIONALE DEGLI EVENTI ONDOSI.....	39
6.4	ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI .....	41
6.4.1	CONCLUSIONI.....	42
<b>7</b>	<b>TRASFORMAZIONE DEL CLIMA D'ONDA VERSO RIVA .....</b>	<b>43</b>
7.1	LA RIFRAZIONE E LO SHOALING .....	43
7.2	MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO .....	44
7.2.1	GENERALITÀ SUL MODELLO.....	44
7.2.2	EQUAZIONE DI GOVERNO .....	44
7.3	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO .....	47
7.4	SIMULAZIONE NUMERICHE ESEGUITE .....	49

7.5	ANALISI DEI RISULTATI.....	50
<b>8</b>	<b>ANALISI DEI LIVELLI IDRICI.....</b>	<b>52</b>
8.1	MAREE.....	52
8.2	ELEVAZIONE PER VENTO .....	53
8.3	ELEVAZIONE PER GRADIENTI DI PRESSIONE ATMOSFERICA .....	54
8.4	ELEVAZIONE PER ONDE (WAVE SETUP) .....	55
8.5	CONCLUSIONI.....	56
<b>9</b>	<b>CONFIGURAZIONE DEL PORTO.....</b>	<b>58</b>
9.1	PROGETTO PRELIMINARE DEL LAYOUT PORTUALE.....	58
9.2	DIMENSIONE DELLO SPECCHIO ACQUEO PROTETTO .....	58
9.3	ORIENTAMENTO DELL'IMBOCCATURA .....	59
9.4	DIMENSIONAMENTO IMBOCCATURA PORTUALE .....	61
9.5	VERIFICA DI NAVIGABILITA' IN INGRESSO .....	61
<b>10</b>	<b>STUDIO DELL'AGITAZIONE INTERNA DELLO SPECCHIO ACQUEO.....</b>	<b>67</b>
10.1	DIFFRAZIONE ED EFFETTI COMBINATI.....	67
10.2	MODELLO NUMERICO UTILIZZATO .....	68
10.2.1	GENERALITÀ SUL MODELLO.....	68
10.2.2	FORMULAZIONE ANALITICA .....	69
10.3	DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO .....	72
10.4	SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE .....	73
10.4.1	LE CONFIGURAZIONI PORTUALI STUDIATE .....	73
10.4.2	L'OTTIMIZZAZIONE DELLA CONFIGURAZIONE.....	74
10.5	VERIFICA DEL LAYOUT DEFINITIVO .....	80
10.6	ANALISI DEI RISULTATI.....	80
<b>11</b>	<b>VERIFICA DEL RISPETTO DEGLI STANDARDS PIANC-AIPCN IN MERITO ALL'AGITAZIONE INTERNA .....</b>	<b>85</b>
<b>12</b>	<b>ALTEZZE D'ONDA DI PROGETTO.....</b>	<b>91</b>
12.1	DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI RITORNO.....	91
12.2	LIVELLO IDRICO DI PROGETTO.....	92
12.3	SIMULAZIONI ESEGUITE.....	92
12.4	CONDIZIONI ESTREME ALLE OPERE.....	93
12.5	DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELLE OPERE PREVISTE .....	93
12.6	TABELLE DI CALCOLO .....	93
<b>13</b>	<b>INDICAZIONI SULLE OPERE MARITTIME PREVISTE .....</b>	<b>96</b>
13.1.1	MOLO DI SOPRAFLUTTO.....	96
13.1.2	MOLO DI SOTTOFLUTTO.....	97
13.1.3	BANCHINA DI RIVA .....	98
<b>14</b>	<b>STUDIO SULL'EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA.....</b>	<b>104</b>
14.1	INTRODUZIONE.....	104
14.2	ELEMENTI FISIOGRAFICI E DI CLIMA MARITTIMO DEL SITO .....	104
14.3	STATO DELLA COSTA .....	107
14.3.1	STATO DEI LITORALI ITALIANI AL 1968 - COMMISSIONE DE MARCHI.....	108
14.3.2	STATO DEI LITORALI ITALIANI SECONDO L'ATLANTE DELLE SPIAGGE CNR	109
14.4	EVOLUZIONE STORICA DELLA LINEA DI RIVA .....	109
14.5	EVENTI ANTROPICI ED EFFETTI PRODOTTI SULLA RIVA .....	110
14.6	ALTRI STUDI ED INDAGINI AI FINI DELL'ANAMNESI.....	112
14.6.1	APPORTO SOLIDO DEL FIUME PALMA .....	112

14.6.2	DATI SEDIMENTOLOGICI.....	113
14.7	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SULLA SITUAZIONE IN ATTO ...	114
<b>15</b>	<b>MODELLAZIONE DEL REGIME DELLA DINAMICA DEL LITORALE .....</b>	<b>116</b>
15.1	PROCESSI DI TRASPORTO TRASVERSALE DI SEDIMENTI.....	116
15.1.1	CENNI SULLO SCHEMA TEORICO .....	116
15.1.2	CONSIDERAZIONI GENERALI .....	117
15.2	PROCESSI DI TRASPORTO LITORANEO DEI SEDIMENTI.....	118
15.2.1	CENNI SULLO SCHEMA TEORICO .....	118
15.2.2	MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO .....	118
15.2.3	SERIE STORICA DELLE MAREGGIATE .....	124
15.2.4	DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL FRANGIMENTO .....	124
15.2.5	LE FINESTRE DI ENERGIA D'ONDA .....	126
15.2.6	SCHEMA DELLA SOLUZIONE NUMERICA .....	126
15.2.7	APPLICAZIONE DEL MODELLO .....	126
15.2.8	LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO .....	128
15.2.9	ANALISI DELL'IPOTESI DI NON INTERVENTO.....	130
15.2.10	ANALISI DELL'IPOTESI PROGETTUALE .....	130
<b>16</b>	<b>PROVVEDIMENTI MITIGATORI DEGLI EFFETTI DEPOSIZIONALI</b>	<b>134</b>
16.1	PROGETTAZIONE DEL NUOVO ARENILE .....	134
16.2	MANUTENZIONE DELL'IMBOCCATURA E DEL BACINO PORTUALE	134

---

## **1   PREMESSA**

---

### **1.1   GENERALITÀ**

L'Amministrazione Comunale di Palma di Montechiaro (AG) a mezzo di apposite convenzioni ha incaricato il Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, S.I.I.T. Sicilia-Calabria, Genio Civile Opere Marittime per la Sicilia per la redazione del Piano Regolatore del Porto del proprio territorio comunale.

Ai fini della redazione del Piano sono stati ritenuti necessari e propedeutici una serie di studi specialistici.

L'Ufficio del Genio Civile Opere Marittime per la Sicilia di Palermo ha affidato al sottoscritto ing. Elio Ciralli, la redazione degli Studi Idraulici Marittimi propedeutici alla redazione del PRP di Palma di Montechiaro (AG) con Convenzione N.7472 DI Rep. del 28/01/2004.

Con Nota n. 4663/04 del 25/06/2004 lo stesso Genio Civile per le Opere Marittime per la Sicilia, sospendeva le attività di studio in oggetto in attesa di concordare con l'Amministrazione Comunale le linee guida e gli obiettivi del redigendo strumento di pianificazione.

In prosecuzione, con nota 1508/OMPA del 21/02/2005 il Genio Civile per le Opere Marittime per la Sicilia invitava il sottoscritto a riprendere le attività di consulenza avviate.

Per la redazione del presente studio, ci si è avvalsi del supporto e della collaborazione della Società di Ingegneria "Progetti e Opere s.r.l." di Palermo, che integra al suo interno tutte le capacità operative e le figure specialistiche occorrenti complementari e di supporto a quelle dell'ufficio incaricato.

### **1.2   FINALITA' DELLO STUDIO**

La redazione del Piano Regolatore del Porto di Marina di Palma è stata preceduta da una serie di studi propedeutici ritenuti necessari per la corretta identificazione fisico-climatica dei luoghi interessati dall'infrastrutturazione da programmare.

Il presente studio, con le finalità di seguito indicate, fa parte di questa serie. Esso affronta peculiarmente gli aspetti legati alla determinazione del clima d'onda del paraggio, sia al largo che sottocosta ed alla determinazione dei principali effetti dello stesso sia sullo stato morfologico attuale che sulle ipotesi di intervento per la realizzazione delle opere costiere, e quindi per l'ottimizzazione delle stesse.

Parte importante ed imprescindibile è quella che affronta gli aspetti dell'evoluzione della linea di riva, la definizione del bilancio sedimentario in gioco e la influenza reciproca con gli interventi antropici, attuali ed in programma.

Secondo le previsioni contrattuali lo "Studio Idraulico Marittimo" doveva rivolgersi almeno ai seguenti aspetti:

- inquadramento geografico del paraggio;
- individuazione del settore di traversia principale e di quello secondario, se esistente;
- fetches geografici ed efficaci;
- fonti di dati meteomarini a disposizione;
- regime anemologico;
- clima del moto ondoso al largo, con individuazione del vettore risultante associato al flusso di energia del moto ondoso;
- statistica degli eventi estremi al largo, per settori di provenienza del moto ondoso;
- rifrazione del moto ondoso, con l'ausilio di apposita aggiornata modellistica matematica;
- studio delle variazioni del livello medio mare, anche con dati rilevati da letteratura tecnica;
- determinazione del livello mare di progetto per il dimensionamento delle opere foranee; individuazione delle altezze d'onda di progetto in corrispondenza delle opere foranee e della imboccatura portuale (correlate a un determinato tempo di ritorno  $T$ );
- studio del regime della dinamica litoranea locale (trasversale e longitudinale) in assenza e in presenza della progettata opera, con l'ausilio di apposita modellistica matematica per la predizione dell'evoluzione temporale della costa interessata dall'opera;
- ricerca storica sull'evoluzione del litorale e sugli apporti solidi fluviali;
- studio sugli eventuali fenomeni di insabbiamento della imboccatura portuale, con modellistica matematica;
- individuazione degli eventuali provvedimenti mitigatori e loro dimensionamento;
- studio della agitazione interna portuale (propagazione delle onde corte e delle onde lunghe), con l'ausilio di appositi modelli matematici;
- verifica della sicurezza degli ormeggi;
- studio sulla agibilità dell'imboccatura portuale e degli specchi acquei interni ai fini della navigazione, con l'eventuale uso di modelli matematici.

L'impostazione metodologica che si è seguita per la redazione dello studio Idraulico Marittimo ha visto i seguenti passaggi fondamentali, in attinenza a quanto stipulato con la convenzione sopradetta:

- riconoscimento ed individuazione di tutte le finalità di interesse del Committente;
- individuazione delle basi dati disponibili e compatibili, raccolta, confronto, validazione ed elaborazione dei dati in funzione delle condizioni al contorno del problema;
- applicazioni numeriche di appositi modelli matematici con le distinte finalità occorrenti;
- analisi delle risultanze e postprocessione delle stesse;

- editing finale delle elaborazioni.

---

## 2 INTRODUZIONE

---

### 2.1 I FENOMENI METEOROLOGICI E MARITTIMI IN GIOCO

L'analisi del clima d'onda del paraggio comincia con l'individuazione più esatta possibile dello scenario fisico e meteorologico in cui ci si muove.

Una lista sintetica di quanto entra in gioco nelle analisi di questo tipo è qui riportata:

- configurazione del bacino di generazione dei moti ondosi;
- batimetrie dei fondali;
- orografia dei luoghi;
- tipologia geologica e pedologica dei litorali e dei fondali;
- presenza di estuari e di fiumi con regimi significativi;
- presenza e caratteristiche di interventi antropici costieri;
- frequenza ed intensità dei venti e delle tempeste;
- presenza significativa di moti di marea;
- presenza significativa di correnti marine;
- presenza significativa di fenomeni ondosi di lungo periodo (poco influenti nel Mediterraneo).

La raccolta e l'elaborazione di questi dati è attività cospicua e assai delicata. L'interpretazione delle risultanze è il momento topico in cui l'ingegnere marittimista individua i successivi passaggi ai fini dell'individuazione dei dati da utilizzare, delle ipotesi fisiche da effettuare e dei più corretti approcci matematici per gli scopi fissati.

Tale momento porta ad elaborazioni specifiche e diverse volta per volta, sito per sito e peculiari per le finalità dello studio.

In campo idraulico marittimo infatti non è possibile approcciare alle complesse e specifiche problematiche, sempre diverse, con un solo schema teorico ed un identico approccio modellistico.

### 2.2 LA STAGIONALITÀ DEGLI EVENTI

La meteorologia e la climatologia hanno un peso importante nelle analisi idrodinamiche. I fenomeni naturali studiati da queste scienze hanno una forte caratterizzazione stagionale.

Diviene quindi importante rivolgere l'attenzione su una possibile caratterizzazione stagionale degli eventi meteomarini, quando ciò possa essere rilevante.

In particolare in tutti quei casi di attrezzaggi leggeri, o di previsioni infrastrutturali connesse a scopi ludici e ricreativi e al diporto, in cui l'uso stagionale è quello prevalente, è il caso che l'analisi delle condizioni di funzionalità e di comfort tengano conto della stagionalità degli eventi.

### 2.3 DETERMINAZIONE DEI LIVELLI IDRICI

Un problema fondamentale per le analisi idrodinamiche facenti parte degli studi idraulici marittimi è la determinazione dei livelli idrici in gioco.

E' nozione diffusa quanto il livello delle acque marine possa essere variabile sia periodicamente, con il susseguirsi delle stagioni, sia in concomitanza con specifici fenomeni fisici e meteorologici: tale fenomeno, denominato *storm surge*, è maggiormente apprezzabile in corrispondenza delle zone litoranee. Un esempio è costituito dalle spiagge che d'inverno o durante una tempesta appaiono assottigliarsi proprio a causa dell'elevazione temporanea del livello idrico.

Ed è proprio nelle zone costiere e litoranee che l'evoluzione dei livelli idrici provoca i maggiori effetti sui fenomeni idrodinamici.

Valga pensare al fenomeno del frangimento dell'onda che progredisce verso riva. Il frangimento è fenomeno connesso alle caratteristiche delle onde e, in maniera determinante, alla profondità dell'acqua su cui l'onda progredisce. E' frequente il caso di valori sottostimati dell'onda frangente proprio perché è stato trascurato l'effettivo livello idrico in cui l'onda evolve. L'onda frangente è tenuta in considerazione per il dimensionamento delle opere costiere: un sottodimensionamento di quest'onda comporta sottodimensionamento delle opere e quindi eventi catastrofici (...purtroppo accaduti).

I livelli idrici di base vengono ripresi o da fonti cartografiche o, soprattutto sottocosta, da rilievi batimetrici opportunamente elaborati in funzione della finalità degli studi. La Carta Nautica riporta le profondità dei fondali in metri riferita al livello medio delle basse maree sizigiali. Sulla stessa carta viene riportato il valore di scostamento rispetto al livello medio del mare  $z_0$  (media delle medie delle basse ed alte maree misurate in un periodo di almeno 19 anni).

E' doveroso, quando la prevedibile influenza di tali fenomeni è determinante nelle considerazioni calcolistiche, rivolgersi ad un livello idrico opportunamente corretto con le dovute considerazioni fisico-matematiche.

### 2.4 DETERMINAZIONE DEL CLIMA D'ONDA

La finalità degli studi idraulici marittimi, come visto, può essere molteplice. In tutti quei casi in cui si voglia identificare lo stato del mare anche nel suo svolgersi quotidiano, e quindi rappresentare statisticamente le condizioni dello stesso, per ricostruire la frequenza di occorrenza di uno stato incompatibile con l'uso previsto (per esempio, la frequenza di una agitazione non compatibile con un buon livello di comfort degli ormeggi di un marina) occorre rivolgersi allo studio delle serie



storiche degli eventi e, con le tecniche della statistica, rappresentare lo specifico clima d'onda del sito.

## **2.5 DETERMINAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI**

Discorso diverso da quello appena fatto si rivolge al caso della necessità di individuare le più idonee dimensioni di un manufatto costiero, affinché possa resistere alle mareggiate. In questo caso, come anche in altri, è necessario individuare le condizioni estreme dello stato del mare che, associate ad una analisi dei rischi, consentano di ben dimensionare le opere. L'approccio teorico e numerico specifico per tale analisi è, come ovvio, completamente differente da quello del caso precedente.

## **2.6 CONCOMITANZA DI FENOMENI**

Altra considerazione da porre in attenzione si riferisce a quanto sia possibile che concorrano fenomeni che possano incrementare il livello calamitoso dello stato del mare: così livelli idrici superiori alla norma (per marea, per tempeste, o per altri fenomeni), fenomeni congiunti di mare vivo e di mare morto (intendendo in quest'ultimo caso quei fenomeni ondosi provenienti da tempeste occorse in altre zone geografiche), tempeste di vento locali che incrementino gli apporti di energia al mare, correnti, etc., possono se concomitanti portare a condizioni di mare notevolmente differenti da quelli stimati.

Ai fini della determinazione numerica e matematica di tali interferenze, soccorre l'elaborazione statistica che oggi, anche nel settore idraulico-marittimo, ha raggiunto un livello di approfondimento e di successiva verifica sul campo dei risultati ottenuti che può senz'altro giudicarsi soddisfacente per la maggior parte delle problematiche ingegneristiche.

---

### **3 IDENTIFICAZIONE FISICO-CLIMATICA DEL SITO**

---

La redazione del Piano Regolatore del Porto di Marina di Palma è preceduta da una serie di studi specialistici e rilievi che concorrono alla identificazione più corretta possibile delle realtà fisica del sito.

Si deve quindi fare riferimento, secondo le occorrenze, ai seguenti documenti, avendo volutamente omesso nel corso della presente trattazione, per motivi di agevole lettura, estese ripetizioni di quanto già presente in essi:

- Rilievo Batimetrico;
- Studio Sedimentologico;
- Studio Idrologico del Fiume Palma;
- Studio Idraulico-Marittimo
- Studio di Compatibilità Ambientale – Rapporto Ambientale

#### **3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO**

Il Comune di Palma è localizzato nella zona Sud della Sicilia in provincia di Agrigento. Il Comune è inquadrato nelle cartografie IGM scala 1:25.000 foglio 271 tavolette: 271-I-SO (Palma di Montechiaro), 271-II-NO (Castellazzo di Palma), 271-IV-SE (Monte Grande); nella C.T.R. sezioni 642010, 642020 e 642060 e nella C.N. n°19 (Da Sciacca a Licata) pubblicata dall'Istituto Idrografico della Marina, scala 1:100.000 del 1991. Marina di Palma, avente coordinate geografiche 37°09',80N 13°43',50E, sorge in prossimità della foce del fiume Palma e si estende per una fascia costiera compresa tra Torre S. Carlo e la spiaggia al Buco.

#### **3.2 CONSIDERAZIONI GEOMORFOLOGICHE E PEDOLOGICHE**

Per le considerazioni morfologiche dei litorali in attenzione si rimanda allo “Studio Sedimentologico”, che contiene un apposito capitolo.

Il litorale in esame è un tratto prevalentemente sabbio-ghiaioso di c.ca 2 km, inserito nel più ampio contesto dell'unità fisiografica identificabile tra Punta Bianca e Punta Tenna ed al cui interno si trova la foce del fiume Palma.



Figura 3.1 Carta dei Suoli della Sicilia, 1/250.000  
(Fonte: Regione Siciliana A.R.T.A. - 1988)

Risulta interessante per gli aspetti di nostra competenza, l'identificazione sotto il profilo pedologico, che si è ottenuta dalla "Carta dei Suoli della Sicilia" (cfr. Figura 3.1).

Relativamente all'area in studio si rileva la successione delle seguenti unità cartografiche<sup>1</sup>:

- 17: Suoli alluvionali (85-90%), fase: salina-pietrosa, inclusioni: vertisuoli, substrati: depositi alluvionali, spessori: molto elevato, tessitura: media-fine-grossolana;
- 12: Regosuoli (40%), suoli bruni (30%), suoli alluvionali (20%), fase: erosa, inclusioni: Roccia affiorante, . substrati: argille
- 11: Regosuoli (50%), litosuoli (20%), suoli bruni (20%). Fase: erosa, inclusioni: Roccia affiorante, . substrati: serie gessosa solifera

D'altro canto, relativamente all'uso del suolo, come si può evincere dall'apposita "Carta dell'Uso del Suolo" (cfr. Figura 3.2), si rileva:

- 111 – Territori modellati artificialmente – Zone urbanizzate - tessuto denso;

<sup>1</sup> I numeri fanno riferimento alle unità cartografiche riportate nella legenda della carta.

- 121 – Territori modellati artificialmente - Zone produttive ed infrastrutture – aree industriali;
- 226 – Territori agricoli – Legnose agrarie – Legnose agrarie miste;
- Saline;
- 112 – Territori modellati artificialmente – Zone urbanizzate – tessuto rado;
- 231 – Territori agricoli – Zone agricole eterogenee – sistemi colturali e particellari complessi;



*Figura 3.2 Carta dell'Uso del Suolo, 1/250.000  
(Fonte: Regione Siciliana A.R.T.A. - 1995)*

### **3.3 CONSIDERAZIONI IDROGEOLOGICHE**

Il territorio in questione è inciso dal F. Palma, la cui foce insiste direttamente nella sub-unità fisiografica interessata dall'abitato di Marina di Palma e dagli interventi cui si rivolge il PRP.

Si è quindi ritenuto importante dedicare particolare attenzione, seppur in fase pianificatoria, agli aspetti idrogeologici peculiari, le cui conclusioni sono riportate nello apposito "Studio Idrologico del F. Palma" a cui si rimanda per maggiore dettagli.

### **3.4 CONSIDERAZIONI CLIMATOLOGICHE**

I dati climatologici maggiormente affidabili per autorevolezza della fonte e per lunghezza della serie storica delle letture sono quelli dell'Aeronautica Militare, raccolti ed elaborati dal C.N.M.C.A..

Vengono di seguito riportate le tabelle sintetiche sulle osservazioni climatiche effettuate nel periodo indicato e delle rappresentazioni grafiche dei dati del vento.

Per il sito in esame sono stati presi in considerazione i dati della stazione di Gela.

Si ricorda che dal punto di vista climatologico le stagioni sono state suddivise come segue:

- inverno - dicembre, gennaio, febbraio
- primavera - marzo, aprile, maggio
- estate - giugno, luglio, agosto
- autunno - settembre, ottobre, novembre

Ai fini della rapida interpretazione dei dati valgono le seguenti considerazioni:

- Visibilità orizzontale - Le osservazioni utilizzate sono relative alle ore 04-07-13-19 T.M.E.C. La visibilità è stata suddivisa in quattro intervalli secondo i seguenti limiti:

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1) da 0 a meno di 200 m     | 2) da 200 a meno di 1000 m  |
| 3) da 1000 a meno di 2000 m | 4) da 2000 a meno di 4000 m |

- Nuvolosità - Le osservazioni utilizzate sono quelle delle ore 07 e le ore 16 T.M.E.C. Per cielo sereno, nuvoloso e coperto s'intendono rispettivamente nuvolosità comprese entro i seguenti limiti:

cielo sereno: da 0 a meno di 2/8 di copertura

cielo nuvoloso: da 2/8 a 6/8 di copertura

cielo coperto: più di 6/8 di copertura

Per i casi di cielo coperto viene indicata l'altezza sul suolo della base delle nubi comprese fra:

più di 600 m,                      da 600 a 300 m,                      meno di 300 m.

La somma dei giorni con cielo sereno, nuvoloso, coperto, invisibile è uguale al numero dei giorni del periodo.

- Osservazioni varie - Le precipitazioni sono espresse in mm. Il numero totale di giorni con precipitazione è suddiviso nei numeri di giorni con precipitazioni da 1 a 9,9 mm e con precipitazioni da 10 mm o più. Il suolo delle ore 07 è osservato considerandone lo stato: bagnato o melmoso; nevoso o ghiacciato.
- Per giorni con temperatura minore di 0° C sono intesi quei giorni la cui temperatura minima risulta inferiore a detto limite.

- Per l'umidità relativa viene riportato il numero medio di giorni rispettivamente con umidità relativa maggiore di 95% alle ore 07 e minore di 30% alle ore 13.
- Sono stati considerati solo i temporali con precipitazioni.
- Pressione ore 07 - La pressione è misurata in hPa e ridotta al 1.d.m. per le stazioni situate a quota inferiore a 500 m. Per le stazioni con quota maggiore ai 500 m, viene data la pressione effettiva al livello del pozzetto.
- Temperature - Sono riportate, in gradi Celsius, le medie mensili delle minime e delle massime giornaliere, nonché i valori estremi raggiunti da esse durante il mese.
- Vento - Le osservazioni utilizzate sono quelle delle ore 07 e 16 T.M.E.C. Le direzioni di provenienza considerate sono 16. I settori per le direzioni principali (N, E, S, O) sono di 30 gradi, mentre per le altre direzioni sono di 20 gradi. Ciò è dovuto alla cifratura eseguita approssimando alle decine di gradi. Così ad esempio sono considerati nel settore N i venti cifrati da 350, 360 e 10 gradi e in quello NNE i venti da 20 e 30 gradi. Per gli intervalli di intensità valgono i seguenti limiti:
  - Calme: da 0 a 5,9 Km/h;
  - 1°: da 6,0 a 35,9 Km/h;
  - 2° maggiore o uguale a 36,0 Km/h.
- Prescindendo dalla direzione le colonne 1°<sub>A</sub>, 1°<sub>B</sub>, 2°<sub>A</sub>, 2°<sub>B</sub> indicano i numeri di giorni con velocità comprese fra i limiti:
  - 1°A: da 6,0 a 17,9 Km/h;
  - 1°B: da 18,0 a 35,9 Km/h;
  - 2°A: da 36,0 a 54,9 Km/h;
  - 2°B: maggiore o uguale a 55,0 Km/h.
- La somma dei giorni con venti appartenenti alle classi calme, 1°<sub>A</sub>, 1°<sub>B</sub>, 2°<sub>A</sub>, 2°<sub>B</sub> è uguale al numero dei giorni del periodo.

## VISIBILITA' ORIZZONTALE - FREQUENZE IN GIORNI AL MESE

ORE 04				ORE 07				ORE 13				ORE 19			
1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°	1°	2°	3°	4°
			0.1												
		0.1	0.3		0.1		0.3								
0.1			0.3		0.1		0.2				0.2				0.2
		0.1	0.3				0.3				0.3				
			0.1		0.2		0.2								
0.2			0.4		0.3		0.2			0.1	0.1				
0.5	0.3	0.3	0.5	0.3	0.5	0.1	1.1		0.2	0.2	0.4				0.2
0.2	0.1		0.3	0.2	0.2		0.4				0.1				0.3
			0.1												
	0.1		0.1			0.2	0.1				0.2				
		0.1	0.2				0.3				0.1				0.1
			0.2				0.1				0.1				0.1

1° vis. &lt; 200 m; 2° da 200 m a &lt; 1000 m; 3° da 1000 m a &lt; 2000 m; 4° da 2000 m a &lt; 4000 m

## NUVOLOSITA' - FREQUENZE IN GIORNI AL MESE

ore 07						ore 11							
SERENO	NUVOLOSO	COPERTO CON BASE				INVISIBILE	SERENO	NUVOLOSO	COPERTO CON BASE				INVISIBILE
		< 500 METRI	< 500 METRI	> 500 METRI	> 300 METRI				< 500 METRI	< 500 METRI	> 500 METRI	> 300 METRI	
8,5	16,7	4,7	1,1				5,5	24,6	1,7	1,2			
7,0	15,4	4,4	1,2				2,9	22,8	1,2	1,4			
9,7	15,3	5,4	1,2				4,2	24,6	1,8	0,4			
9,4	15,8	4,3	0,5				5,5	22,8	1,1	0,6			
14,6	12,2	4,0	0,2				10,3	19,8	0,8	0,1			
18,2	9,5	2,0			0,3		13,9	15,4	0,7				
25,0	5,1	0,3			0,6		20,0	10,9	0,1				
22,6	7,4	0,6	0,1		0,3		18,2	12,8					
14,7	13,8	1,1	0,4				11,5	17,6	0,7	0,2			
10,7	17,6	2,0	0,7				5,5	24,5	0,8	0,2			
9,2	16,9	3,5	0,4				5,6	25,3	0,5	0,3			
7,5	17,7	5,0	0,8				4,4	24,8	1,4	0,4			

## OSSERVAZIONI VARIE

QUANTITA' IN MM	PRECIPITAZIONI			SOLCO IV	TEMP. UM. REL. %	NUMERO GIORNI AL MESE				
						TEMP. < 0°C	ORE 07 IN > 95	ORE 13 IN > 80	TEMPORALI CON PRECIP.	
	DA 1 A 9.9 mm	> 10 mm	DA 1 A FALCETO							NEVOSO O GRANDINE
38.7	5.5	1.5	8.1			0.1	0.8		1.5	
31.7	4.5	1.4	6.6			0.2	1.5	0.1	0.6	
31.8	5.3	1.5	5.5	0.1			1.5	0.3	1.2	
14.2	3.9	0.5	4.0				1.0	0.1	0.7	
7.7	1.9	0.5	2.2	0.1	0.1	0.5	0.1	1.7		
1.0	0.6	0.2	0.3	0.2		0.6	0.2	0.3		
0.7	0.4	0.1	0.3			0.4	0.1	0.2		
15.8	0.5	0.4	0.6			0.1	0.1	0.9		
14.3	1.8	0.6	2.2			0.3	0.1	1.7		
43.0	4.2	2.2	6.5		0.1	0.6		3.1		
29.9	4.4	1.5	6.8	0.1		0.6	0.1	1.6		
6.8	5.7	1.6	9.2	0.1		0.6	0.1	1.0		

## MEDIE ED ESTREME MENSILI

	TEMP. MINIMA		TEMP. MASSIMA		UMIDITA' RELAT.		PRESSIONE MEDIA in hPa		TEMP. MINIMA		TEMP. MASSIMA		UMIDITA' RELAT.	
	MEDIA	MINIMA	MEDIA	MASSIMA	MEDIA ORE 07	MEDIA ORE 13			MEDIA	MINIMA	MEDIA	MASSIMA	MEDIA ORE 07	MEDIA ORE 13
G	8.5	0.0	14.7	24.0	79	69	1015.3	1014.5	19.7	13.6	25.4	35.0	71	77
F	8.6	0.0	14.9	23.4	80	68	1014.6	1014.7	20.8	15.6	26.4	36.0	72	75
M	9.2	1.6	15.9	25.0	79	68	1014.7	1016.0	19.5	14.4	25.3	34.4	77	74
A	10.9	3.8	17.6	26.4	78	70	1012.9	1015.4	15.0	7.8	22.2	29.6	69	69
M	14.6	5.8	21.0	31.6	73	70	1014.5	1017.9	12.6	5.4	18.8	25.0	80	70
G	17.6	11.0	25.6	32.6	69	75	1014.7	1015.1	10.1	1.8	16.0	23.6	81	71

STAZIONE DI GELA

PERIODO 1965 - 1978

VISIBILITA' ORIZZONTALE - FREQUENZE IN GIORNI PER STAGIONE E PER ANNO

ORE 04					ORE 07					ORE 13					ORE 19				
1°	2°	3°	4°		1°	2°	3°	4°		1°	2°	3°	4°		1°	2°	3°	4°	
		0.1	0.6			0.1		0.4	I				0.1					0.1	
0.1		0.1	0.7			0.3		0.7	P				0.5					0.2	
0.9	0.1	0.3	1.2		0.5	1.0	0.1	1.7	E		0.2	0.3	0.6					0.5	
	0.1	0.1	0.4				0.2	0.4	A				0.3					0.1	
1.0	0.5	0.6	2.6		0.5	1.4	0.3	3.2	ANNO		0.2	0.3	1.5					0.9	

1° vis. &lt; 200 m; 2° DA 200 m A &lt; 1000 m; 3° DA 1000 m A &lt; 2000 m; 4° DA 2000 m A &lt; 4000 m

NEVULOSITA' ED OSSERVAZIONI VARIE - FREQUENZE IN GIORNI PER STAGIONI E PER ANNO

ORE 07					ORE 19					PRECIPITAZIONE									
SERENO	NUVOLOSO	CORRENTO CON BASE			SERENO	NUVOLOSO	CORRENTO CON BASE			QUANTITA' IN mm	NUMERO GIORNI								TEMP. °C
		> 1	< 600	< 300 METRI			> 500 METRI	< 600	< 300 METRI		DA 1 A 5.5 mm	> 10 mm	DAVNTO O MELVOSO	NEVOSO O GHIACCIAIO	ORE 07	ORE 13	ORE 19	TEMPORALI CON PRECIPIT.	
25.0	49.8	14.1	3.1		10.8	72.2	4.3	2.7		I	77.2	15.7	4.5	29.9	0.2	0.2	3.1	0.2	3.1
55.1	45.3	13.7	1.9		20.0	67.2	3.7	1.1		P	113.7	11.1	2.6	11.7	0.2	0.1	5.0	0.5	5.1
65.8	22.0	7.9	0.1	1.2	52.1	39.1	0.8			E	18.5	1.5	0.7	1.2	0.2		1.1	0.4	1.4
31.6	48.3	6.6	1.5		22.6	16.9	1.2	0.7		A	77.2	10.4	4.3	15.5	0.1	0.1	1.5	0.2	6.4
156.5	163.4	37.3	6.6	1.2	105.5	244.4	10.6	4.5		ANNO	286.6	38.7	12.1	52.3	0.6	0.4	8.7	1.3	14.0

MEDIE ED ESTREME STAGIONALI E ANNUALI

	PRESSIONE ORE 07	TEMP. MINIMA		TEMP. MASSIMA		UMIDITA' RELAT.	
		MEDIA	MINIMA	MEDIA	MASSIMA	MEDIA ORE 07	MEDIA ORE 13
I	1015.6	9.0	0.0	15.2	24.0	80	69
P	1014.0	11.5	5.8	18.1	31.6	77	71
E	1014.6	19.3	11.0	25.1	36.0	70	76
A	1016.7	16.0	5.4	22.1	34.4	79	71
ANNO	1015.2	13.9	0.0	20.1	36.0	76	72



## STAZIONE DI GELA

PERIODO 1965 - 1970

VENTO AL SUOLO CRE 07 - FREQUENZE IN GIORNI AL MESE

		N	NE	SE	E	ENE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NNW	NW	CALM	1A	1B	2A	2B	VEL KIAS	
G	1° Z	1.5	1.9	4.1	2.6	0.4	0.1		0.3	0.3	0.2		0.6	1.3	1.4	1.0	14.6	11.8	3.9	0.5	0.2	56	U
F	1° Z	1.7	1.0	3.6	3.5	0.7	0.1		0.1	0.3		0.3	0.3	1.2	1.8	0.7	12.2	12.0	3.4	0.4		48	F
H	1° Z	1.1	2.0	3.8	3.5	1.0							0.5	0.5	1.8	1.6	14.5	12.4	3.4	0.2	0.1	96	H
A	1° Z	0.3	1.9	3.2	4.1	0.3	0.2		0.1	0.2		0.2	0.9	1.3	0.7	0.9	15.6	10.4	3.5	0.4	0.1	74	A
M	1° Z	1.0	1.0	2.6	3.4	0.9	0.1					0.1	0.2	0.8	0.4	0.2	20.1	8.5	2.2	0.1	0.1	61	M
G	1° Z	0.4	0.2	1.3	2.4	0.8	0.1	0.1				0.5	0.5	0.6	0.4		22.6	6.1	1.2	0.1		37	G
L	1° Z	0.1	0.6	0.4	1.2	0.1	0.1					0.8	0.3		0.2		27.3	3.1	0.7			35	L
A	1° Z	0.7	0.5	1.3	1.5	0.3						0.2	0.2	0.1	0.2		26.0	4.6	0.4			48	A
B	1° Z	0.9	1.2	2.1	3.1	0.6						0.1	0.1	0.4	0.5	0.4	20.6	8.2	1.2			57	B
D	1° Z	1.5	2.1	3.4	4.7	0.5			0.1				0.5	0.5	0.3		17.0	11.5	2.1			41	D
H	1° Z	0.7	2.1	4.0	3.5	0.4	0.1	0.1	0.1		0.2	0.2	0.1	0.4	0.8	0.5	14.9	11.9	2.6	0.2	0.4	72	H
B	1° Z	1.4	2.0	3.2	3.3	1.1	0.2		0.1	0.5	0.5	0.2	0.4	0.8	1.4	1.0	14.1	12.1	4.0	0.7	0.1	67	B

VENTO AL SUDLO ORE 16 - FREQUENZE IN GIORNI AL MESE

[illegible]

INTERVALLI DI VELOCITA' IN km/h: 1° 6 + 35,9; 2° 36 + 17,9; 3° 18 + 35,9; 4° 36 + 54,9;  
5° 28 + 55. CALME DA 0 A + 6 km/h. LA VELOCITA' DEL VENTO TEND. E' IN km/h.

## VENTO AL SUOLO ORE 07 - FREQUENZE IN GIORNI PER STAGIONI E PER ANNO

	N	NNE	NE	NNE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALE	1A	1B	2A	2B	VEL MAX	
1° Inverno	4,6	4,9	10,9	9,4	2,2	0,3	0,1		0,5	1,1	0,7	0,5	1,3	3,3	1,7	2,7	40,9	35,9	11,3	1,6	0,3	67	I
2°										0,2		0,6	0,4	0,3	0,3	0,1							
1° Primav.	2,4	4,5	9,5	11,0	2,2	0,3			0,1	0,2		0,3	1,6	2,6	2,9	2,7	30,6	31,3	9,1	0,7	0,3	74	P
2°				0,4									0,4	0,2									
1° Estate	1,2	1,3	3,0	5,1	1,2	0,2		0,1					1,5	1,0	0,7	0,8	75,8	13,8	2,3	0,1		48	E
2°				0,1																			
1° Autunno	3,1	5,4	9,9	11,3	1,5	0,1	0,1	0,1		0,3	0,2	0,2	0,5	1,8	1,7	1,3	52,8	31,6	5,9	0,2	0,4	72	A
2°										0,1	0,1	0,2	0,2										
1° Anno	11,3	16,1	33,4	36,8	7,1	0,9	0,2	0,2	0,6	1,6	0,9	1,0	4,9	8,7	10,0	7,5	220,2	112,6	38,6	2,6	1,0	74	Anno
2°				0,5						0,3	0,2	0,8	1,0	0,5	0,3	0,1							

## VENTO AL SUOLO ORE 16 - FREQUENZE IN GIORNI PER STAGIONI E PER ANNO

	N	NNE	NE	NNE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALE	1A	1B	2A	2B	VEL MAX	
1° Inverno	3,0	0,9	2,4	2,6	1,4	1,1	2,5	3,2	3,4	3,2	4,0	8,1	13,0	3,0	2,0	3,5	22,4	28,0	29,3	8,5	1,8		I
2°	0,1	0,1		0,1						0,2	0,1	1,8	5,7	1,7	0,2	0,3							
1° Primav.	1,3	0,4	1,6	2,9	1,5	0,8	2,6	5,1	5,0	3,9	7,8	12,3	9,6	1,5	0,8	2,1	18,0	26,1	33,2	12,7	2,0	70	P
2°	0,3		0,1	0,2				0,1	0,1		0,5	4,2	8,1	0,9		0,2							
1° Estate	0,1	0,1		0,4		0,2	1,3	3,1	6,7	8,5	15,8	18,2	8,4	0,3		0,4	14,9	34,1	29,4	12,8	1,2	65	E
2°								0,1			0,6	5,2	8,1										
1° Autunno	1,2	0,2	1,4	2,4	0,8	0,2	2,5	5,5	5,4	5,4	10,2	14,8	10,9	1,3	0,9	1,6	17,3	37,4	29,0	6,3	1,0	74	A
2°								0,1		0,1	0,2	1,7	4,8	0,4									
1° Anno	5,6	1,7	5,4	8,3	3,8	2,4	8,9	16,9	20,5	22,0	37,8	53,4	41,9	6,1	3,7	7,5	72,2	125,6	120,9	40,3	6,0		Anno
2°	0,4	0,1	0,1	0,3				0,3	0,1	0,3	1,4	12,9	26,7	3,0	0,2	0,5							

## VENTO AL SUOLO - FREQUENZE IN GIORNI PER ANNO

(MEDIA FRA LE OSSERVAZIONI DELLE ORE 07 E 16)

	N	NNE	NE	NNE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALE	1A	1B	2A	2B	VEL MAX	
1° Anno	8,5	8,9	19,4	22,1	5,5	1,9	4,6	8,6	10,6	11,8	19,4	27,2	23,4	7,4	6,9	7,5	146,2	119,1	74,8	21,4	3,5		Anno
2°	0,2	0,1	0,1	0,4				0,2	0,1	0,3	0,8	6,9	13,9	1,8	0,3	0,3							

INTERVALLI DI VELOCITA' IN km/h: 1° 6 ÷ 35,9; 2° ≥ 36; 1A 6 ÷ 17,0; 1B 18 ÷ 35,9; 2A 36 ÷ 50,9; 2B ≥ 55. CALE DA 0 A = 6 km/h. LA VELOCITA' DEL VENTO ZERO E' IN km/h.

### 3.5 CONCLUSIONI

Dall'analisi dettagliata dei dati statistici tabellati si possono evincere le condizioni climatiche della stazione considerata. In particolare si nota quanto segue.

**Visibilità:** la visibilità orizzontale è ottima in tutti i periodi dell'anno, infatti la condizione peggiore, che accade mediamente 1,1 giorni al mese, comporta una visibilità che va da 2000 a 4000 m.

**Nuvolosità:** in tutte le stagioni tranne l'estate, è maggiormente frequente la presenza di copertura nuvolosa; in estate, ed in particolare luglio ed agosto è maggiormente frequente il sereno.

**Temperatura:** le temperature medie annue valgono:

- 13,9° per la minima,
- 20,1° per la massima.

Le temperature minime e massime registrate valgono rispettivamente:

- 0° con una umidità relativa dell' 80%,
- 36° con una umidità relativa del 71%.

**Precipitazioni:** il numero di giorni all'anno in cui si hanno fenomeni di precipitazioni è 14, la stagione più piovosa è l'autunno con 6,4 giorni, in particolare il mese più piovoso è ottobre.

**Vento:** si desume che per anno al mattino i venti più frequenti (venti regnanti) sono da Est Nord/Est seguiti dai venti da Nord/Est, inoltre si nota che i venti con intensità maggiore provengono più frequentemente da Ovest e Ovest Sud/Ovest. Invece le registrazioni del vento al suolo alle ore 16 evidenziano che i venti più frequenti per anno sono da Ovest Sud/Ovest seguiti dai venti di Ovest e Sud/Ovest, e che i venti con maggiore intensità provengono da Ovest seguiti dai venti provenienti da Ovest Sud/Ovest.

Le calme sono 146,2 gg/anno, con maggiore frequenza al mattino e in particolare in estate ed autunno.

### 3.6 CLIMA ANEMOLOGICO LOCALE

Per il sito di Marina di Palma non esistono rilievi di serie storiche di dati anemometrici sufficientemente lunghe ed affidabili.

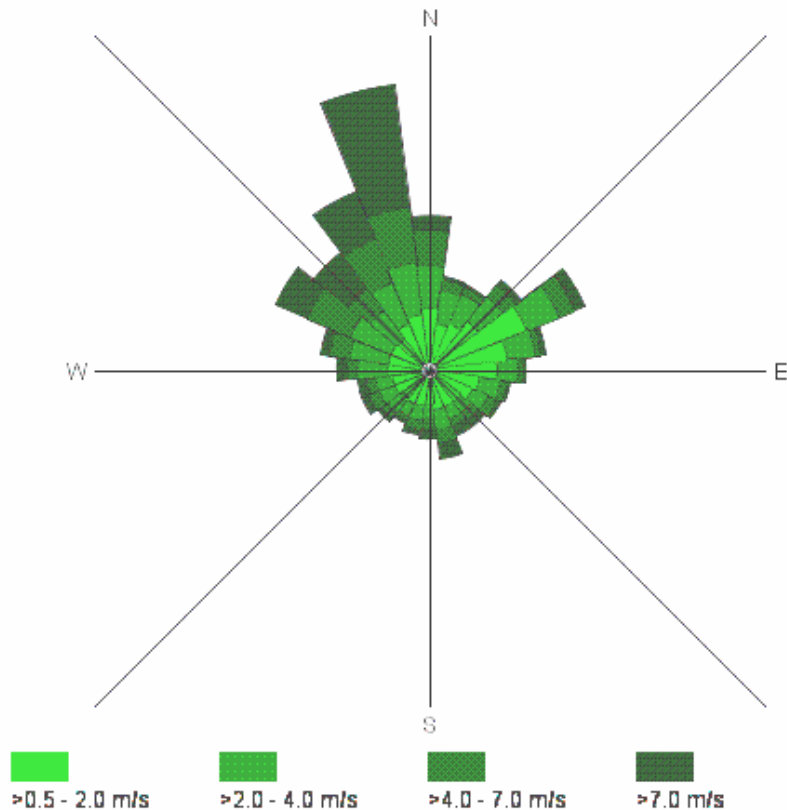
Si è preferito quindi confrontare e rivolgersi alle serie storiche del servizio mareografico dell'APAT, ed alle elaborazioni da questo effettuate per l'anemometro posizionato in corrispondenza della stazione mareografica di Porto Empedocle, da ritenersi per lo meno significativo per rilievi nel campo di venti interessanti il sito in oggetto. Nella Tabella 3.1 e nella Figura 3.3 sono schematizzati i risultati delle elaborazioni.

Stazione di Porto Empedocle, periodo dal 1973-01-01 09:00:00.0 al 2003-12-31 23:00:00.0  
Parametro DD-VV

m/s	RILEVAMENTI: attesi 271712 mancanti 226458 (= 83,34 % attesi); CALME: totali 3198 (= 7,6 % rilevamenti effettivi);																										Tot
>13,0	35	18	8	8	11	15	16	11	10	10	22	30	20	15	13	14	9	14	19	27	63	69	117	243	817		
12,0	7	3	1	1	8	9	4	5	3	9	7	13	5	2		3	3	9	8	13	21	30	50	91	305		
11,0	3	3	1	5	15	7	3	2	8	9	13	34	11	5	2	1	3	16	14	8	25	52	70	160	470		
10,0	13	10	3	9	19	10	7	8	12	15	23	35	27	12	5	7	10	12	20	25	27	121	101	294	825		
9,0	27	7	5	11	31	9	10	11	20	21	44	48	30	19	13	14	28	34	36	26	74	150	135	361	1164		
8,0	40	18	11	31	46	19	16	14	30	43	44	57	51	26	13	14	28	37	33	38	150	164	166	441	1530		
7,0	119	14	15	40	61	20	21	18	33	48	39	62	47	29	11	22	49	41	50	29	218	139	225	464	1814		
6,0	177	38	29	67	100	32	27	33	45	60	41	58	49	37	23	41	52	54	36	70	271	166	277	376	2159		
5,0	295	90	63	136	124	44	36	61	86	78	57	109	76	61	40	65	83	61	89	184	377	231	375	464	3285		
4,0	294	137	112	155	181	87	73	92	82	82	64	127	86	99	71	108	110	94	150	256	367	257	357	385	3826		
3,0	309	224	211	201	208	161	129	129	96	77	80	140	100	94	83	122	113	115	190	284	332	240	309	371	4318		
2,0	378	358	336	342	387	428	271	220	175	148	161	185	159	166	163	168	190	162	289	297	324	287	340	387	6321		
1,0	562	392	445	542	1089	727	638	450	414	336	341	328	253	293	287	288	308	316	353	365	347	329	460	503	10366		
0,5	235	185	235	311	519	377	315	261	235	180	170	178	136	136	149	125	124	132	146	111	117	102	169	208	4856		
Tot	2494	1497	1475	1859	2799	1945	1566	1315	1249	1116	1106	1404	1050	994	873	992	1110	1097	1433	1733	2713	2337	3151	4748	42056		
°N	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345			

Tabella 3.1 Analisi di frequenza direzionale dei dati del vento della stazione di Porto Empedocle

Distrib. direz. del vento dal 1973-01-01 09:00:00.0 al 2003-12-31 23:00:00.0  
Stazione di Porto Empedocle, parametro VV e DV.



*Figura 3.3 Distribuzione polare di frequenza dei dati di vento registrati nella stazione di Porto Empedocle (periodo 1973-2003)*

La lettura dei dati porta alle considerazioni che seguono:

- i venti regnanti sono quelli provenienti dal IV quadrante, in particolare la direzione con maggiore frequenza di accadimento nel periodo di osservazione (1973-2003) è 345°N, con una certa significatività anche per le direzioni di 330°N, 315°N, 300°N. Si nota inoltre la presenza di venti frequenti provenienti da 60°N;
- la frequenza massima assoluta, per fissata direzione e fissata velocità, si è avuta per venti con direzione 60°N e velocità  $0,5 \text{ m/s} < v < 1 \text{ m/s}$ ;
- i venti dominanti sono quelli proveniente dal settore di maestro (NE);
- la distribuzione delle tempeste di vento segue una tendenza modale (maestro) assolutamente confermata sia nella distribuzione giornaliera che stagionale;
- le calme registrate sul periodo di osservazione in esame (1973-2003) sono 3198 (7,6 %).

### 3.7 MAREA

Le escursioni di marea nel Canale di Sicilia non hanno mai grandi livelli come invece accade in altri siti; in particolare, non esiste un mareografo installato nella zona in studio.

Esperienze locali riportano dati di escursione storica complessiva prossima agli 60 cm. Tali valori risultano confermate dalle elaborazioni dei rilevamenti mareografici condotti nel Porto di Porto Empedocle<sup>2</sup>, di cui si riporta di seguito un estratto (cfr. Figura 3.4).

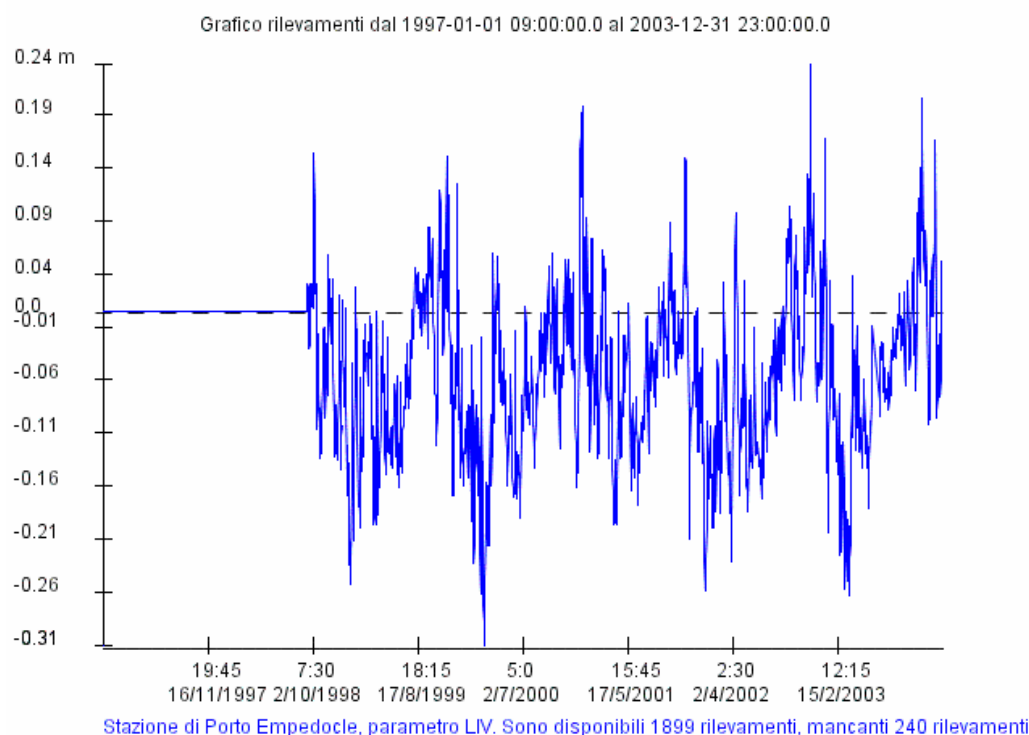


Figura 3.4 Rilevamenti mareografici condotti nel Porto di Porto Empedocle

### 3.8 CORRENTI

Con il termine correnti marine viene indicato il movimento di massa d'acqua collegato alla marea, al vento o al moto ondoso. Le correnti, di cui il navigante nota solo l'effetto superficiale, esistono lungo tutta la massa d'acqua, e talvolta solo in determinati strati senza causare effetti visibili in superficie; esse si verificano prevalentemente in acque profonde ed in mari aperti.

Inoltre, mentre le correnti di marea hanno un ciclo temporale ben definito, le correnti marine sono permanenti (o stazionarie) oppure stagionali (o semipermanenti). Esistono diversi tipi di correnti marine e possono essere classificate:

---

<sup>2</sup> Rete Mareografica Nazionale

- in base alle cause che le creano (correnti di gradiente e correnti di deriva);
- in relazione alla temperatura dell'acqua che si sposta confrontata con la temperatura dell' acqua che la circonda (correnti calde o fredde);
- in relazione alla profondità ove si verificano (superficiali se interessano lo strato d'acqua dalla superficie ai 200 metri; interne se interessano lo strato d'acqua al di sotto dei 200 metri; di fondo se interessano lo strato d'acqua vicino al fondale marino).

Il moto orizzontale della massa d'acqua superficiale (o corrente superficiale), è dovuto all'azione combinata di correnti di gradiente e di deriva, ed è quello di maggior interesse per le analisi idrodinamiche.

Le correnti che interessino seni, baie o foci sono fondamentali ai fini del ricambio idrico e per lo scambio fluido e di sedimenti da e verso il mare aperto.

### 3.8.1 LE CORRENTI DI GRADIENTE

Sono dovute alla irregolare distribuzione della pressione sulla superficie del mare, ed alla differenza di densità di masse d'acqua adiacenti. Queste correnti si generano quando la superficie dell'acqua assume una certa inclinazione, fatto che accade per l'azione del vento, o per la presenza di masse d'acqua contigue di diversa temperatura e salinità.

Le correnti di gradiente dovute a diversa pressione atmosferica ed all'ammassamento dell'acqua dovuto al vento, tendendo a ristabilire l'orizzontalità della superficie marina, sono di intensità modesta, e pressoché irrilevanti ai fini della navigazione in mare aperto. La situazione cambia in prossimità di costa, se il vento che spira verso la costa è di intensità adeguata, si possono ammassare lungo costa notevoli masse d'acqua che, non potendo rifluire verso il largo a causa del vento contrario, danno luogo a forti correnti che scorrono parallelamente alla costa.

Le correnti di gradiente dovute a differenza di densità si presentano soprattutto negli strati interni della massa d'acqua, e hanno effetto apprezzabile sulla navigazione solo nell'esempio sopra descritto.

### 3.8.2 LE CORRENTI DI DERIVA

Sono dovute all'azione di trascinamento creato dall'attrito esistente tra la massa d'aria in movimento e la massa d'acqua superficiale del mare. I forti venti costanti come gli alisei che spirano in Oceano Atlantico, ed i monsoni che spirano nell'oceano indiano, sono la causa di gran parte delle correnti di deriva costanti.

Il vento tende a trascinare lo strato superficiale delle acque marina nella sua stessa direzione, il movimento di deriva si trasmette agli strati inferiori con intensità decrescente e direzione man mano variabile; il movimento inizia con ritardo rispetto al momento di inizio dell'azione del vento e solo gradualmente raggiunge la velocità di regime.

Venti leggeri possono generare deboli correnti di deriva in circa sei ore, sono necessarie ben 48 ore di vento forte perché la relativa corrente di deriva raggiunga la velocità di regime.

L'intensità della corrente di deriva a regime è pari a circa l'1,5 % della velocità del vento che l'ha generata, velocità che dipende anche da altri fattori, ed in particolare dall'ampiezza dello specchio d'acqua libero da ostacoli, denominato fetch, esistente nella direzione di provenienza del vento. Fetch limitati non consentono alla corrente di raggiungere velocità della percentuale sopra indicata, anche se il vento spira dalla stessa direzione per periodi di tempo superiori alle 48 ore.

### 3.8.3 LA DIREZIONE DELLA CORRENTE

Le forze che mettono in movimento sia le correnti di gradiente sia quelle di deriva, tendono a muovere la massa d'acqua in una ben determinata direzione. Nel caso delle correnti di gradiente dal luogo a livello maggiore verso quello a livello minore, nel caso di correnti di deriva nello stesso senso di propagazione del vento (a meno di una differenza di circa 20°). In effetti le direzioni di propagazione sono sensibilmente diverse da quelle sopra descritte; in particolare le correnti che si propagano nell'emisfero Nord subiscono una deviazione verso la destra rispetto alla direzione di propagazione, quelle che si propagano nell'emisfero Sud subiscono una deviazione verso sinistra.

Le deviazioni sono dovute alla rotazione terrestre che genera una particolarissima forza, detta forza di Coriolis, che agisce su tutte le masse in movimento sul pianeta, ed il cui effetto è più sentito quanto più è grande la massa in movimento.

Oltre alla forza di Coriolis influiscono sulla direzione e sulla intensità delle correnti marine anche altri fattori, natura e vicinanza della costa, presenza di golfi o stretti, maggiore o minore distanza tra la superficie del mare ed il fondo.

### 3.8.4 CIRCOLAZIONE GENERALE

Le correnti marine così strettamente legate ai fattori meteorologici, sono oggetto di continui studi dai quali è stato possibile ricavare dei "modelli di circolazione", ossia situazioni standard che si verificano in concomitanza con determinate situazioni meteorologiche stagionali. Esistono innumerevoli modelli di circolazione che si applicano ai diversi bacini, da quelli oceanici che hanno validità temporale di mesi, a quelli di piccoli golfi di particolare interesse e validi solo per particolari situazioni di vento o insolazione.

In questa sede daremo qualche lineamento generale della circolazione superficiale del Mediterraneo.

### 3.8.5 CIRCOLAZIONE NEL MEDITERRANEO

Nel bacino del Mediterraneo le correnti sono solitamente deboli e di direzione variabile. La circolazione superficiale è fortemente influenzata dai venti che al largo possono generare correnti superficiali di intensità fino ai due nodi.



Poiché l'evaporazione dovuta all'effetto del sole è tale da non poter essere compensata dall'apporto di acqua fluviale e piovana, è sempre presente una corrente entrante dallo stretto di Gibilterra. In sostanza il Mediterraneo viene rifornito da acqua oceanica che, dopo aver passato lo stretto di Gibilterra, fluisce verso Est. In realtà in corrispondenza dello stretto la direzione della corrente non è sempre entrante, ma ciò è dovuto alla sovrapposizione alla corrente di gradiente appena descritta, della corrente di marea che in quell'area ha valori sensibili.

La corrente entrante nel Mediterraneo si spinge verso Est dividendosi in un ramo principale ed in altri secondari; il ramo principale, sotto l'effetto della forza di Coriolis, dirige verso destra e si addossa alla costa africana perdendo via via intensità fino ad estinguersi; l'intensità della corrente si mantiene fra 0,8 ed 1 nodo lungo le coste dell'Algeria, quindi diminuisce procedendo verso oriente; nello stretto di Sicilia l'intensità varia tra 0,4 ed 1 nodo. A questo andamento generale si sovrappongono numerose e varie situazioni particolari.

Gli estratti<sup>3</sup> di seguito riportati danno un'indicazione chiara della circolazione superficiale del mediterraneo e della zona d'interesse; le frecce mostrano la direzione media della corrente; in alcuni punti viene riportato il valore in nodi della corrente.

---

<sup>3</sup> Cfr. "Atlante delle Correnti Superficiali dei Mari d'Italia", Istituto Idrografico della Marina, Pub. I.I. 3068



---

## 4 FONTI DI DATI METEOMARINI A DISPOSIZIONE

---

In linea estremamente sintetica gli studi idraulici marittimi si possono svolgere sia con metodo diretto che con metodi indiretti.

Il metodo diretto è quello dell'analisi statistica di serie storiche di dati ondametrici locali che rispondano a determinati requisiti scientifici. Tuttavia molto frequentemente i siti da analizzare non sono immediatamente interessati da letture ondametriche locali affidabili; e ancora, il tempo disponibile e l'impegno economico connesso spesso non consentono l'apposizione di specifici apparecchi rilevatori del clima d'onda nel paraggio per periodi sufficientemente lunghi.

Ci si affida quindi spesso a metodi indiretti, con i quali si prendono in considerazione le principali cause della formazione delle onde marine (vento, pressioni atmosferiche, etc.) e, tramite la elaborazione di queste cause, a mezzo di opportuni modelli matematici che simulino la realtà fisica, si determina una verosimile formazione ondosa.

A seguito della finalità dello studio ecco che occorre effettuare una ricognizione delle base dati eventualmente disponibili ed affidabili e "ricostruire", nel rispetto della fisica di generazione del clima d'onda in un paraggio, la base dei dati da analizzare.

### 4.1 POSSIBILI DATI DA ELABORARE

L'acquisizione di rilevamenti strumentali diretti, eseguiti all'interno del campo d'onda, è un'esigenza molto importante per una conoscenza accurata e completa delle condizioni meteomarine di un paraggio.

In Italia non mancano misure ondametriche costiere, a partire dalle prime boe ondametriche varate dall'ENEL nel 1974-76, ma esse non sono mai state uniformemente distribuite, sia nello spazio che nel tempo, e soprattutto sono state poste e gestite da una moltitudine di Enti che hanno lavorato in modo non preordinato e non coordinato.

Sulla scorta di quanto accade da tempo in altri Paesi (in testa gli Stati Uniti, in Mediterraneo la Spagna e la Francia), anche in Italia dal 1989 esiste una Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dal "Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale" che controlla una rete di dieci boe accelerometriche direzionali telecontrollate i cui dati sono registrati e raccolti con frequenza minima trioraria.

L'alto grado di affidabilità del sistema consente l'uso di un patrimonio informativo, ancora non completamente sviluppato ai fini scientifici, che certamente deve essere tenuto in opportuno conto per le elaborazioni relative all'ingegneria costiera.

Infine si evidenzia che le registrazioni puntuali di cui è possibile disporre sono strumento indispensabile per la ricostruzione di mareggiate particolari e gravose e per la calibrazione dei modelli matematici utilizzati per la determinazione di onde al largo con metodi indiretti.

Nel rilevamento del moto ondoso i sistemi esistenti possono essere diretti, ovvero che effettuano il rilievo all'interno del campo d'onda, o a distanza, sfruttando l'impiego della luce, di onde radio o del radar.

Tra i sistemi diretti si possono ricordare i *wave staffs*, che effettuano misure in funzione della variazione di resistenza elettrica in un conduttore parzialmente immerso nel campo d'onde, le boe accelerometriche, che misurano accelerazioni ed effettuano una doppia integrazione per risalire agli spostamenti della superficie liquida, e gli ondometri a pressione, che con apposito algoritmo trasformano le differenze di pressione, lette a profondità inferiori ai 20 m, dovute ai passaggi dell'onda. I sistemi citati, con opportune integrazioni, possono dare informazioni di carattere direzionale.

La intensità del vento si può stimare effettuando una analisi delle carte meteorologiche di pressione atmosferica al livello del mare, ma tale metodo porta a notevoli imprecisioni e non è valido ove la topografia dei luoghi è molto particolare.

Nei casi di bacini limitati, quale quello del Mediterraneo, ove le regioni di formazione sono prossime alle coste, si possono utilizzare i dati raccolti da stazioni costiere, quali quelle dell'Aeronautica Militare in Italia.

Un cenno è doveroso per i sistemi di rilevamento satellitare, sistema che ancor oggi presenta dei notevoli limiti di affidabilità, ma che in futuro potrebbero divenire molto utili per le analisi del settore di nostro interesse. In Europa, per esempio, alcuni Enti, tra cui il "Satellite Observing Systems Ltd.- UK", forniscono rilevamenti satellitari (vento al suolo, onde, temperature, etc.) i cui dati, provenienti da tre satelliti, l'"US Navy GEOSAT", il "France/NASA TOPEX", e l'"ESA ERS-1", vengono analizzati e validati numericamente in modo molto sofisticato.

Infine si accenna al fatto che esistono diverse banche dati a indirizzo oceanografico e meteorologico, in grado di fornire dati ed elaborazioni di grandezze meteomarine anche in tempo reale. I Paesi ove ciò è ad un alto livello di sviluppo e che detengono il merito per una ottima divulgazione delle informazioni, Sono gli U.S.A. e, in Europa, la Spagna. Tali realtà stanno oggi trascinando la crescita di molte altre nazioni in tal senso.

#### **4.2 LA RETE ONDAMETRICA NAZIONALE**

La Rete Ondametrica Nazionale (RON) è attiva dal luglio 1989. La RON originaria era composta da otto boe direzionali di tipo pitch-roll, dislocate al largo di La Spezia, Alghero, Ortona, Ponza, Monopoli, Crotone, Catania e Mazara.

Nel 1999 sono state aggiunte alla rete preesistente le ulteriori boe a traslazione di Cetraro ed Ancona ed è stata sostituita con una ulteriore boa a traslazione la boa pitch-roll di Catania.

La Rete Ondametrica Nazionale era quindi basata su dieci stazioni di misura, di cui sette costituite da una boa direzionale Datawell-Wavec di tipo pitch-roll e tre costituite da una boa direzionale Datawell-Waverider di tipo a traslazione.

Dal 2002 il numero delle stazioni è stato portato a 14, aggiungendo 4 nuove boe posizionate a: Capo Dinaro (civitavecchia, Tirreno Centrale), Capo Gallo (Palermo, Sicilia), Punta della Maestra (alto Adriatico) e Capo Comino (Sardegna Orientale). Dal 2002 tutti gli ondometri direzionali della RON sono TRIAXYS, fabbricati dalla canadese “AXYS Inc” modificati per rispondere alle particolari esigenze della RON. La rete è stata completata da un centro di ricezione ed elaborazione a terra dei dati inviati via radio dalla boa.

Tutte le boe sono ancorate su fondali dell'ordine dei 100m. Il sistema di ormeggio è tale da consentirle di muoversi liberamente e misurare correttamente i movimenti della superficie del mare. Esso consiste in un corpo morto posto sul fondale del peso di 2500 kg e in una serie di cime di diverse caratteristiche: un cavo elastico in gomma, una cima in nylon, una cima di polipropilene.

Tutte le boe sono dotate di un sistema di posizionamento GPS con trasmissione satellitare della posizione via Inmarsat D+; tale sistema consente il controllo continuo della posizione delle boe ed attiva un sistema di allarme nel caso di disormeggio, dando la possibilità di recuperare la boa stessa.

I dati vengono acquisiti per periodi di 30' ogni tre ore con intervalli inferiori in caso di mareggiate più gravose; dalle misurazioni effettuate si ricavano:

- $H_s$ , altezza d'onda significativa spettrale;
- $T_p$ , periodo di picco;
- $T_m$ , periodo medio;
- $D_m$ , direzione media di propagazione;

ed i seguenti parametri spettrali per banda di frequenza:

- densità di energia;
- direzione media di propagazione;
- dispersione direzionale (spread);
- asimmetria (skewness);
- curtosi.

#### 4.2.1 LA BOA RON DI MAZARA DEL VALLO

La boa RON più vicina al campo di generazione del moto ondoso di nostro interesse per il paraggio in esame è quella di Mazara del Vallo.

La boa di Mazara del Vallo è situata a 37°31'05"N, 12°32'00"E su un fondale di 100m c.ca..

Nella Figura 4.1 è rappresentato il diagramma di distanze di mare libero. Il settore sotteso è compreso tra le direzioni  $125^{\circ}\text{N}$  e  $305^{\circ}\text{N}$ ; la distanza di mare libero maggiore è 700 m.m., in direzione  $264^{\circ}\text{N}$ .

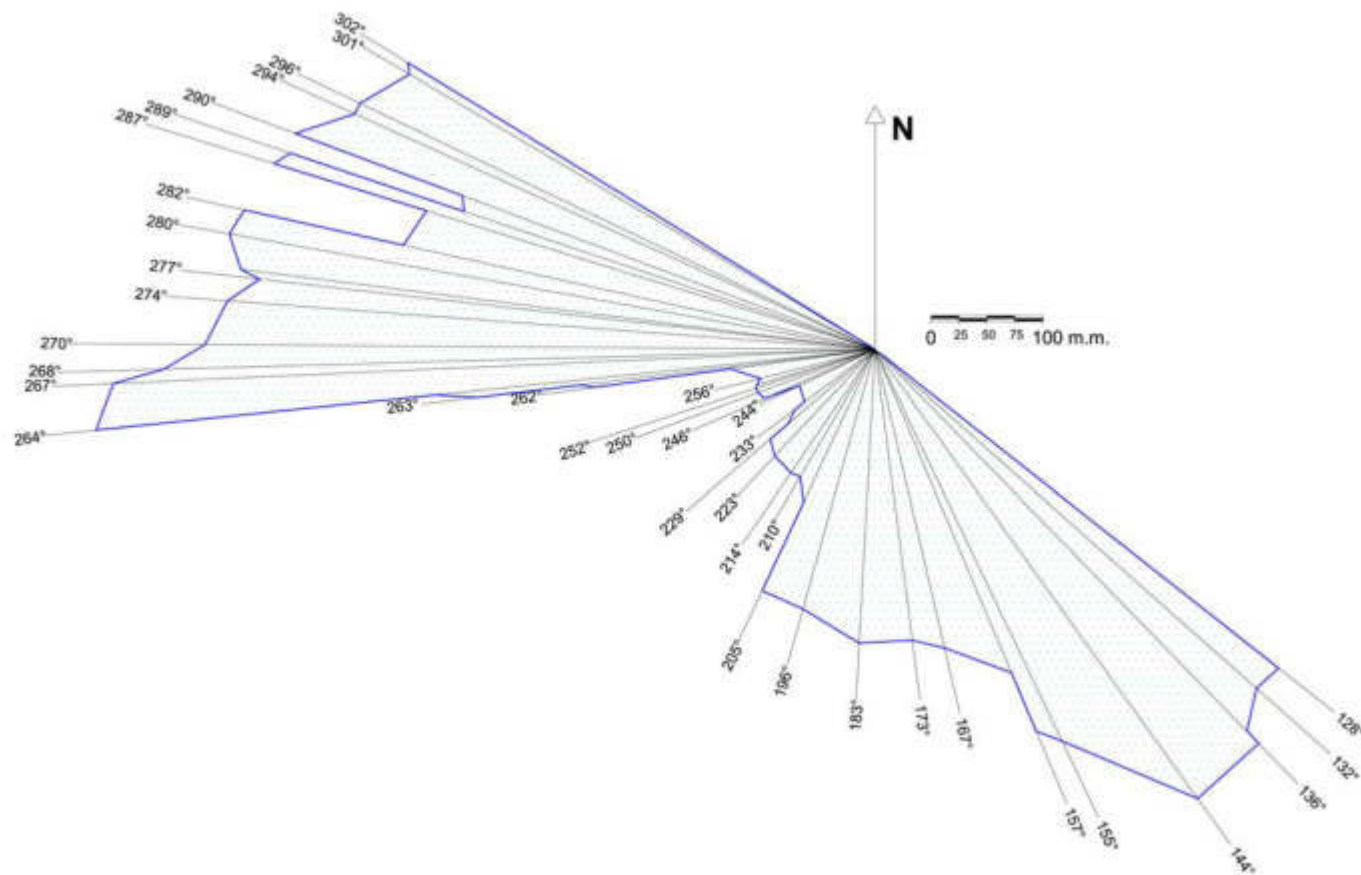


Diagramma dei Fetch Boa R.O.N. di Mazara del Vallo (TP)

Figura 4.1 Diagramma di distanza di mare libero del punto in cui è situata la boa RON di Mazara del Vallo (TP)

I dati registrati disponibili ricoprono un periodo che va da luglio del 1989 a giugno del 2001; le registrazioni sono triorarie per un totale di 33.293 dati disponibili. Nella Figura 4.2 sono riportati i risultati dell'analisi di frequenza del regime ondoso registrato dalla boa RON di Mazara del Vallo, tramite un diagramma polare è rappresentato il regime medio direzionale annuale dei dati registrati suddivisi per settori di  $15^\circ$  e quattro classi di altezza d'onda significativa.

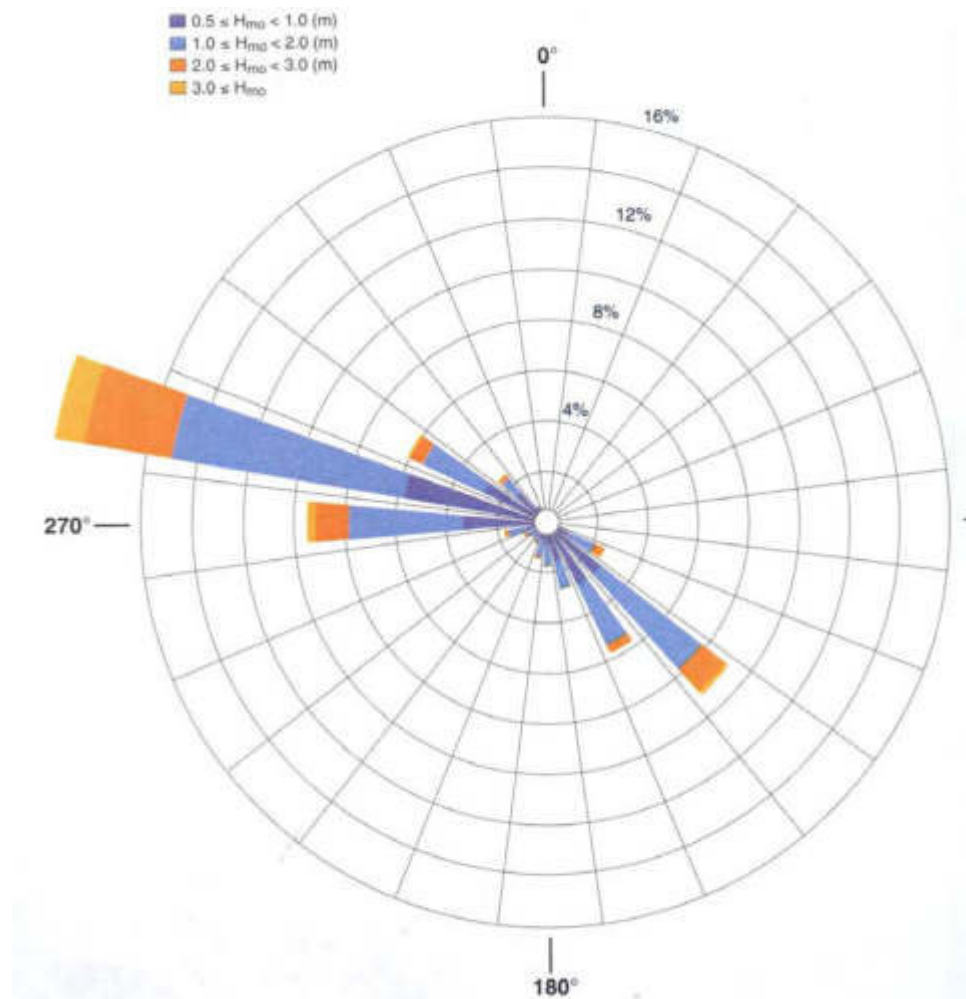


Figura 4.2 Diagramma polare del regime ondoso annuale per settori di  $15^\circ$  e quattro classi di altezza significativa, registrato dalla boa RON di Mazara del Vallo (periodo luglio 1989 – giugno 2001)



---

## 5 FETCH GEOGRAFICO ED EFFICACE

---

L'analisi dell'esposizione geografica di una stazione di misura del moto ondoso o di un sito costiero si basa sulla determinazione dei fetch geografici ed efficaci.

Per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso ad opera dell'azione esercitata dal vento. In bacini semichiusi di estensione limitata come il Mar Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione.

### 5.1 DETERMINAZIONE DEL FETCH GEOGRAFICO

L'individuazione dei settori geografici di traversia, che sottendono il paraggio di Marina di Palma, è stata effettuata sulle carte dell'Istituto Idrografico della Marina (fogli 19 e 340).

Il settore individuato per il paraggio in studio è compreso tra la direzione di 130°N e 284°N. Sono state poi rilevate le distanze di mare libero per varie direzioni, ritenute opportune (cfr. Figura 5.1); dall'esame del diagramma si nota che la distanza maggiore è 650 m.m. in direzione 273°N.

### 5.2 DETERMINAZIONE DEI FETCH EFFICACI

Per completare l'inquadramento geografico del paraggio è necessario determinare i valori dei fetch efficaci sulla base dei valori dei fetch geografici individuati; il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata; in questo modo i fetch efficaci consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 30^\circ$  rispetto alla direzione media di azione del vento; di conseguenza la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici. Il calcolo dei fetch efficaci può essere eseguito in base alla seguente relazione:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \Theta}^{\phi_w + \Theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \Theta}^{\phi_w + \Theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \quad (5)$$

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

- $F_{e,w}$  lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $jw$ ;
- $F_i$  lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione  $i$ -esima  $ji$ ;
- $\phi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo il paraggio;

- $\varphi_w - \theta \leq \varphi_i \leq \varphi_w + \theta$  direzione  $i$ -esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2\theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\varphi_w$ ;
- $\theta$  ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso;
- $n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n=2$ ).

Nella Figura 5.2 è rappresentato il diagramma dei fetch efficaci del sito in studio.

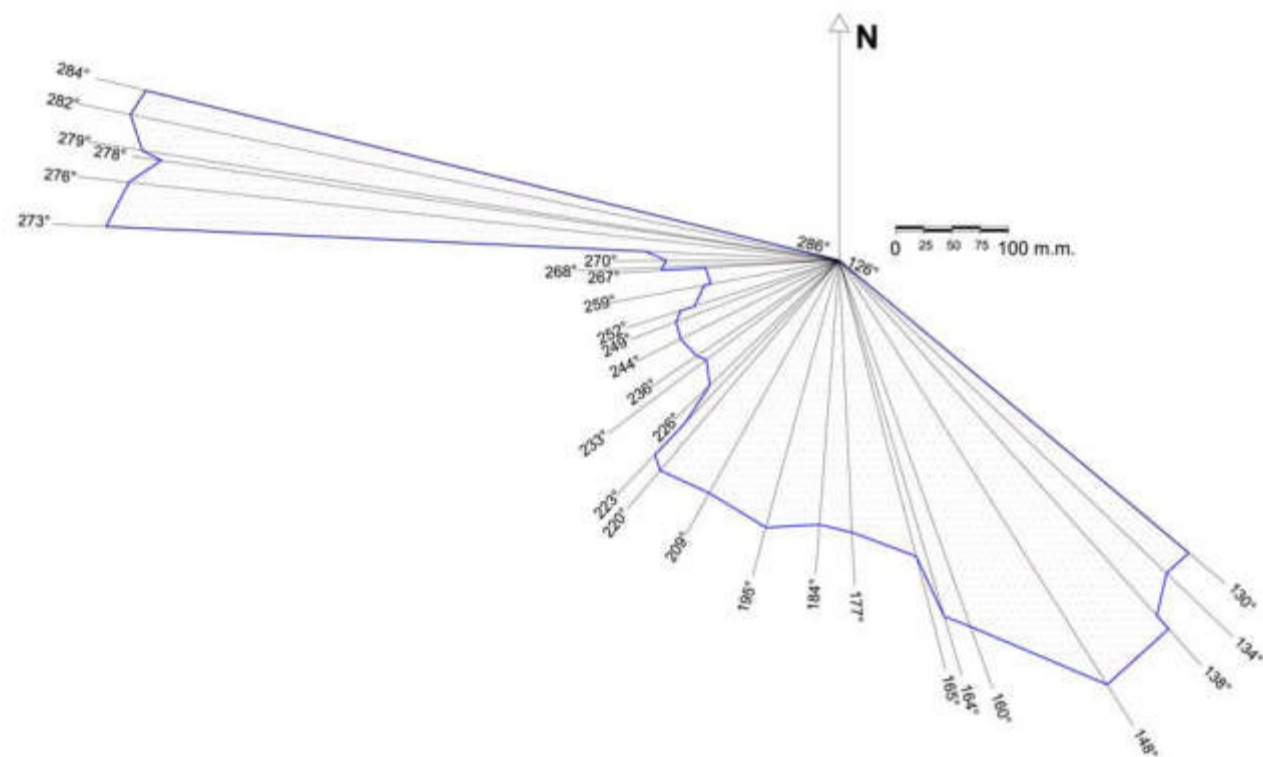


Figura 5.1 Diagramma di distanza di mare libero del paraggio di Marina di Palma – Palma di Montechiaro (AG)

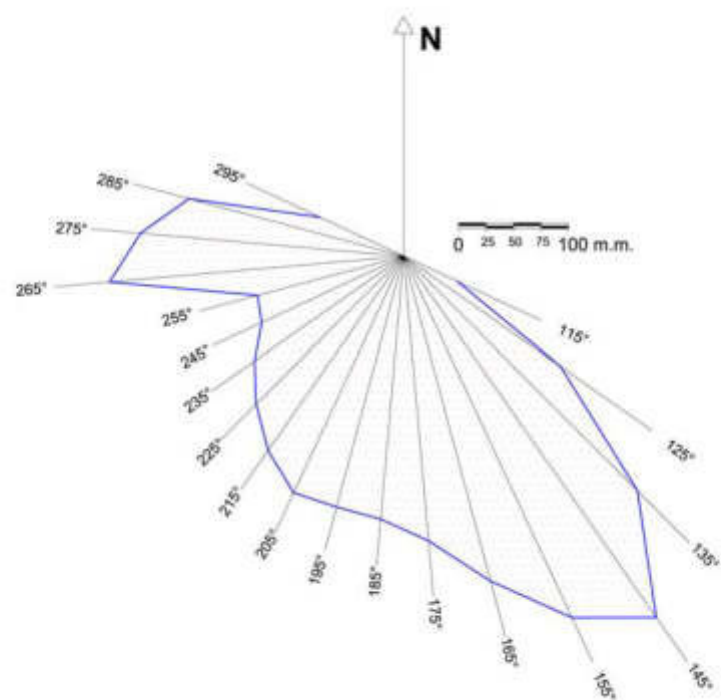


Figura 5.2 Diagramma dei fetch efficaci del paraggio di Marina di Palma – Palma di Montechiaro (AG)

---

## 6 CLIMA ONDOSO A LARGO DEL PARAGGIO

---

In ragione del numero limitato di ondometri presenti al largo delle coste italiane, il più delle volte il sito di interesse, pur ricadendo nella stessa area geografica, è spesso situato in una posizione decentrata rispetto al tratto di mare “sotteso” dall’ondametro: da qui nasce l’esigenza di ricorrere ad un metodo che consenta di “trasporre” geograficamente le misure ondametriche dal punto di misura a quello di interesse.

Precondizione fondamentale è che i dati ondametrici vengano rilevati direttamente nella stessa area di generazione del moto ondoso che interessa il paraggio.

L’attenzione è stata quindi rivolta alla disponibilità dei dati della boa RON di Mazara del Vallo. Si è quindi valutata la correlazione possibile tra un punto al largo del paraggio in questione e quello della boa ondamentrica disponibile.

Il metodo utilizzato si basa sul confronto dei campi di generazione del moto ondoso dei due siti, poiché la formazione dell’onda al largo, come è noto, dipende dal vento spirante (direzione, intensità e durata) e dalla lunghezza di mare libero (fetch) su cui tale vento spira.

Mediante l’impiego di apposito algoritmo di trasposizione, è stata quindi effettuata la correzione e l’adattamento dei dati disponibili.

### 6.1 CONFRONTO DEI CAMPI DI GENERAZIONE ONDOSI

Il confronto dei due diagrammi di distanze di mare libero (cfr. Figura 6.1 e Figura 6.2) evidenzia quanto segue:

- il campo di generazione del moto ondoso dei due siti risulta sostanzialmente coincidente;
- i diagrammi sono in grande parte sovrapponibili, ovvero sottendono praticamente lo stesso settore di traversia con differenze nelle distanze di mare libero, direzione per direzione, in buona parte trascurabili e a vantaggio di sicurezza;
- nel settore che va da 115°N a 215°N le differenze di mare libero sono trascurabili in quanto minori di 20 m.m..

A seguito di queste osservazioni, appare fisicamente verosimile l’uso dei dati ondametrici registrati dalla boa RON di Mazara del Vallo (TP) come identificativi del clima d’onda al largo del paraggio di Marina di Palma e quindi risulta ragionevole applicare uno dei metodi di trasposizione del clima d’onda citati in letteratura.

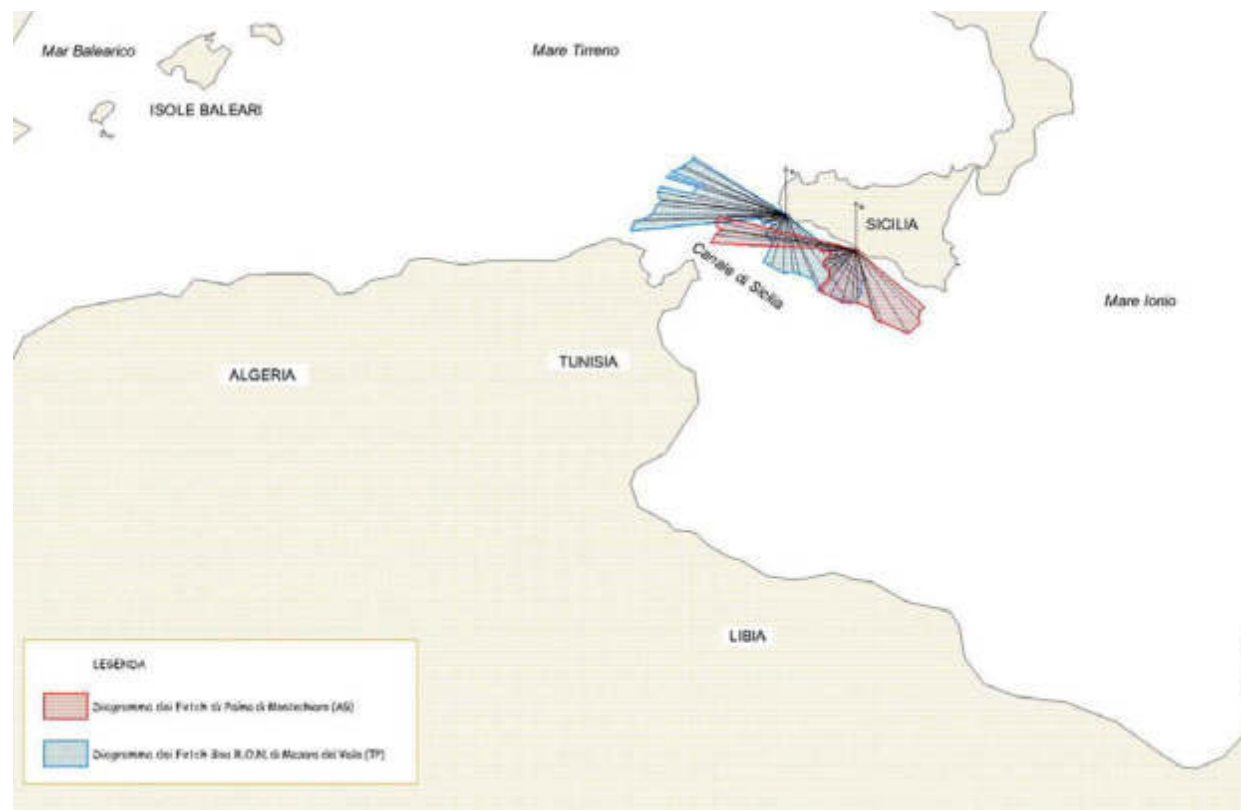
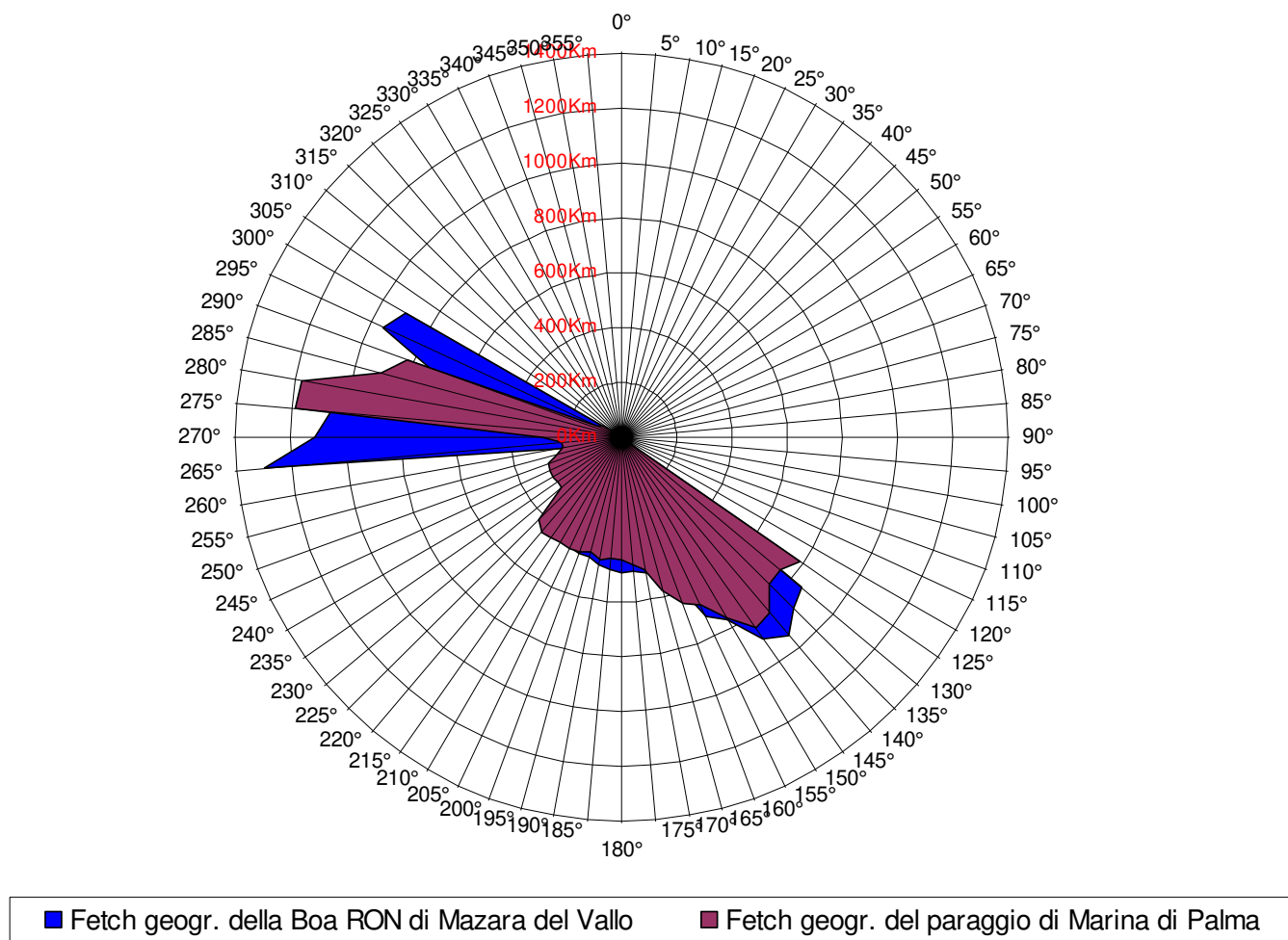


Figura 6.1



*Figura 6.2 Sovrapposizione dei diagrammi di fetch della boa RON di Mazara del Vallo e del paraggio in studio Marina di Palma*

## 6.2 TRASPOSIZIONE ED ADATTAMENTO DEI DATI DISPONIBILI

L'ipotesi di base della metodologia seguita consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione), che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondametro, abbiano interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito di interesse (Contini e De Girolamo 1998).

Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura e a quello di interesse. Questo procedimento verrà utilizzato per quelle direzioni in cui la differenza di mare libero non è trascurabile ( $>20$  m.m.).

Per poter trasporre le misure di altezze d'onde per questi settori di traversia sono state considerate le equazioni usate nel caso di fetch limitati. Tali leggi permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale  $H_{mo}$  e il periodo di picco spettrale  $T_p$  in funzione della lunghezza del fetch e della velocità del vento, in particolare (cfr. [10]):

$$\frac{gH_{mo}}{U_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{gT_m}{U_A^2} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left| \frac{gF}{U_A} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

dove:

- $U_A$  è il fattore di velocità del vento, dipendente in modo non lineare della velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m.;
- $F$  è il fetch efficace relativo ad una prefissata direzione geografica.

Indicando con gli apici O e P rispettivamente le grandezze relative al punto di misura e al punto di trasposizione, fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci  $F_p$  e  $F_o$ , le precedenti relazioni permettono di stabilire la ricercata corrispondenza tra le altezze ed i periodi delle onde relative al punto O e al punto P per fissata direzione:

$$\frac{H_{mo}^P}{H_{mo}^O} = \left| \frac{F^P}{F^O} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{T_{mo}^P}{T_{mo}^O} = \left| \frac{F^P}{F^O} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

dove si è ovviamente supposto che il fattore di velocità del vento sia lo stesso nei due punti in esame.



### 6.3 BASE DATI ONDAMETRICI

La zona in studio, come detto, è situata in un tratto di litorale rivolto verso il SUD e risulta quindi protetto dai mari provenienti dai settori del I e IV quadrante, è quindi conveniente che i dati ondametrici relativi a queste direzioni non siano considerati.

Sono stati quindi elaborati dati a disposizione per tutti i settori direzionali, di 45° di ampiezza (ogni settore è rappresentativo di onde che provengono da  $\pm 22,5^\circ$  rispetto alla direzione principale), compresi per quanto sopra detto, tra le direzioni 135°N e 270°N.

Nella tabella seguente vengono riportate le frequenze di occorrenza annue per settore di provenienza:

<b>classi di Hs(m)</b>	<b>135°</b>	<b>180°</b>	<b>225°</b>	<b>270°</b>	<b>Totale</b>
<b>0 - 0,5</b>	1628	877	693	2899	6097
<b>0,51 - 1</b>	2561	714	606	4316	8197
<b>1,01 - 1,5</b>	1686	390	64	4654	6794
<b>1,51 - 2</b>	575	107	289	731	1702
<b>2,01 - 2,5</b>	208	45	91	597	941
<b>2,51 - 3</b>	90	12	86	60	248
<b>3,01 - 3,5</b>	27	3	32	51	113
<b>3,51 - 4</b>	10	1	20	20	51
<b>4,01 - 4,5</b>	4	0	5	0	9
<b>4,51 - 5</b>	0	0	3	0	3
<b>5,01 - 5,5</b>	0	0	0	0	0
<b>5,51 - 6</b>	0	0	1	0	1
<b>6,01 - 6,5</b>	0	0	0	0	0
<b>&gt; 6,5</b>	0	0	0	0	0
<b>Totale</b>	6789	2149	1890	13328	24156

*Frequenze d'occorrenza del clima ondoso a largo di Marina di Palma per fissata direzione (dati ricavati da apposita elaborazione dei dati RON- Ma zara del Vallo (TP) – periodo: 1989 – 2001)*

Il clima ondoso al largo è inoltre descritto mediante un diagramma polare (cfr. Figura 6.3) in cui, per ogni direzione di provenienza considerata, è riportata la frequenza percentuale annua di apparizione di ciascuna classe di altezza d'onda; un tratto della lunghezza pari alla differenza tra i raggi di due circonferenze consecutive è pari al 10%.

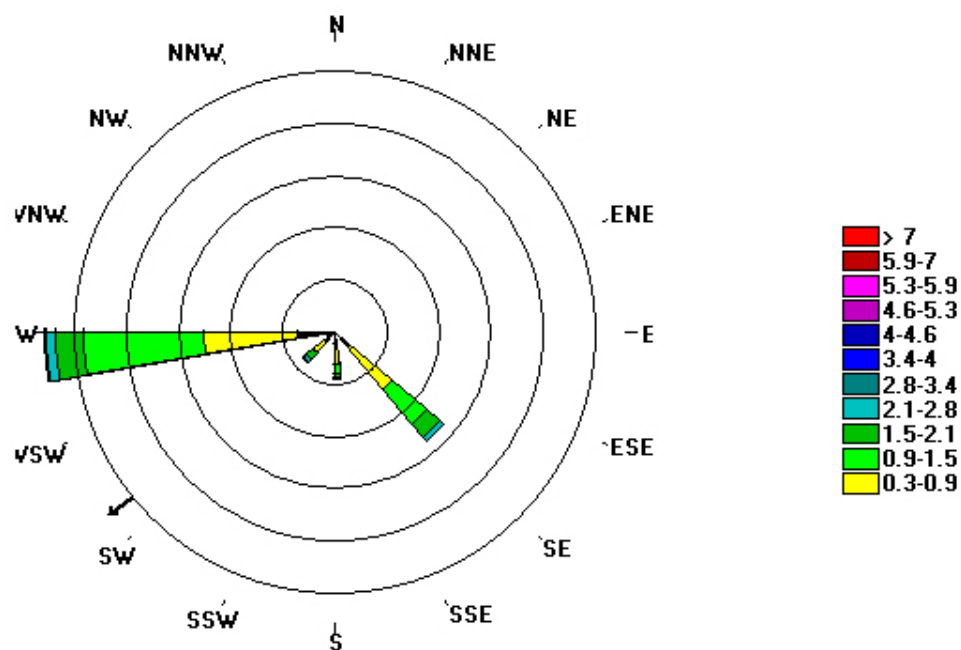


Figura 6.3 Frequenza d'occorrenza del moto ondoso direzionale per classi d'altezza d'onda a largo di Marina di Palma –Analisi Annuale (ogni settore individua un intervallo di frequenza pari al 10 %)

### 6.3.1 CARATTERIZZAZIONE STAGIONALE DEGLI EVENTI ONDOSI

Lo scopo di questo procedimento è quello di una più precisa identificazione su scala stagionale del clima ondoso del paraggio e verificare quante volte determinate condizioni, che di seguito verranno studiate, possono essere raggiunte o superate oltre su scala temporale annuale anche su scala stagionale.

Sono state identificate due macro stagioni una che copre i mesi che vanno da maggio ad ottobre e l'altra che va da novembre ad aprile denominate rispettivamente “stagione estiva” e “stagione invernale”, sono stati suddivisi i dati raccolti in funzione del mese di registrazione e per questi due campioni si è condotta un'analisi di frequenza analoga a quella precedentemente descritta.

Nella Figura 6.4 e nella Figura 6.5 è rappresentato il clima ondoso delle due stagioni (estiva, invernale) a largo del paraggio in studio sotto forma di diagrammi polari.

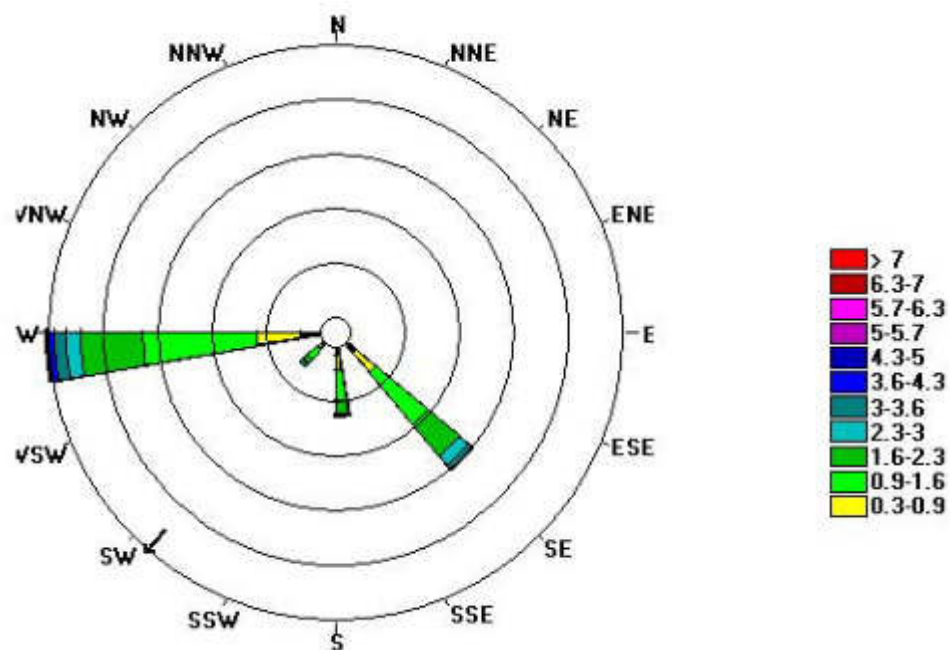


Figura 6.4 Frequenza d'occorrenza del moto ondoso direzionale per classi d'altezza d'onda a largo di Marina di Palma – Stagione Estiva (ogni settore individua un intervallo di frequenza pari al 10 %)

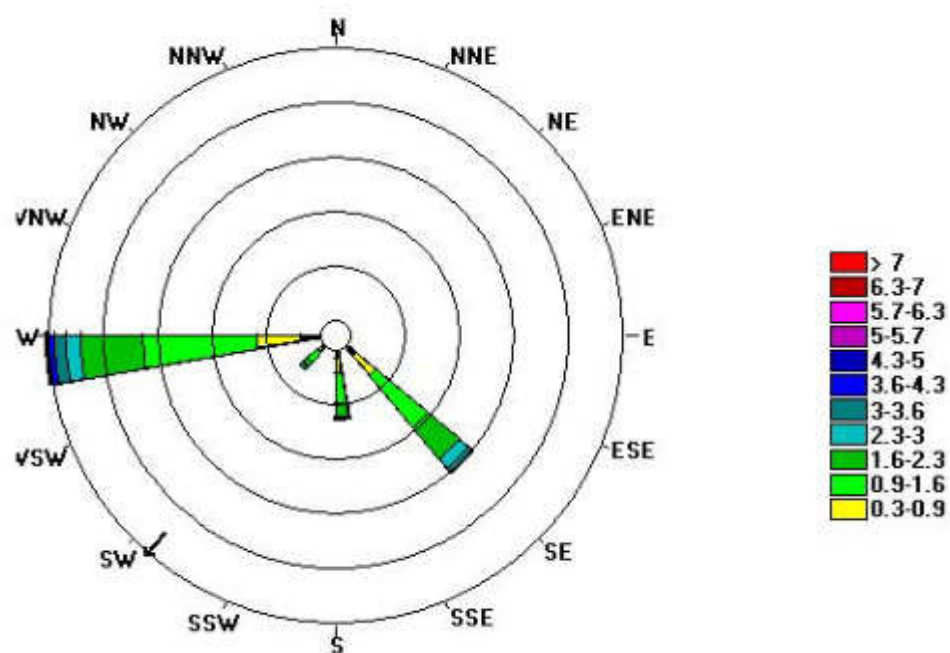


Figura 6.5 Frequenza d'occorrenza del moto ondoso direzionale per classi d'altezza d'onda a largo di Marina di Palma – Stagione Invernale (ogni settore individua un intervallo di frequenza pari al 10 %)

#### 6.4 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI

I dati utilizzati in questa analisi sono i massimi annuali delle altezze d'onda significativa per fissata direzione; trattandosi di massimi annuali la pratica più diffusa è l'adozione della prima legge del valore estremo (EV1) o legge di Gumbel. La funzione di probabilità di Gumbel ha la seguente espressione:

$$P(H_s) = \exp[-\exp(-\alpha(H_s - u))]$$

in cui  $P(H_s)$  è la probabilità di non superamento della variabile altezza d'onda  $H_s$ ,  $\alpha$  e  $u$  sono i due parametri della legge di Gumbel. I parametri  $\alpha$  e  $u$  sono legati alla media  $\mu(H_s)$  e allo scarto quadratico medio  $\sigma(H_s)$  della variabile  $H_s$  dalle seguenti relazioni:

$$\alpha = \frac{1.283}{\sigma(H_s)}$$

$$u = \mu(H_s) - \frac{0.5772}{\alpha} = \mu(H_s) - 0.45\sigma(H_s)$$

Si definisce tempo di ritorno di una variabile  $H_s$  il numero di anni  $T$  in cui l'altezza d'onda ( $H_s$ ) è raggiunta o superata mediamente una sola volta. La probabilità di superamento della variabile  $H_s$  è pari a  $1 - P(H_s)$  ed è legata al tempo di ritorno dalla seguente relazione:

$$1 - P(H_s) = \frac{1}{T}$$

da cui si deduce molto semplicemente:

$$P(H_s) = \frac{T-1}{T}$$

Sostituendo la precedente relazione nell'espressione di  $P(H_s)$  si ottiene:

$$\frac{T-1}{T} = \exp[-\exp(-\alpha(H_{s,T} - u))]$$

avendo indicato con  $H_{s,T}$  la variabile  $H_s$  di tempo di ritorno  $T$ . Applicando i logaritmi neperiani ad ambo i membri si ottiene:

$$-\ln \frac{T-1}{T} = \exp(-\alpha(H_{s,T} - u))$$

$$-\ln \ln \frac{T}{T-1} = \alpha(H_{s,T} - u)$$

da cui si ricava, infine, la seguente espressione per  $H_{s,T}$ :

$$H_{s,T} = u - \frac{1}{\alpha} \ln \ln \frac{T}{T-1} = \mu(H_s) - \sigma(H_s) \left[ 0.45 + 0.78 \ln \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right].$$

#### 6.4.1 CONCLUSIONI

Ricavate le massime altezze d'onda a largo per fissata direzione, è stato calcolato per ciascuna direzione la media  $\mu(H_s)$  e lo scarto quadratico medio  $\sigma(H_s)$ .

Valga la considerazione che l'affidabilità della previsione è strettamente dipendente dall'ampiezza del periodo dei dati disponibili; nel caso specifico si deve segnalare la scarsa affidabilità dei valori corrispondenti ai tempi di ritorno di 50 e 100 anni.

Nella successiva tabella sono mostrate le altezze d'onda significativa ed i relativi periodi di picco per i diversi valori del tempo di ritorno considerati:

dir.	135°N (SUD-EST)		180°N (SUD)		225°N (SUD-OVEST)		270°N (OVEST)	
Tr (anni)	HS (m)	Tp (s)	HS (m)	Tp (s)	HS (m)	Tp (s)	HS (m)	Tp (s)
2	3,91	9,59	2,96	8,35	3,49	9,07	4,27	10,02
3	4,23	9,98	3,46	9,02	4,11	9,84	4,65	10,45
5	4,60	10,40	4,01	9,71	4,80	10,63	5,06	10,91
10	5,05	10,90	4,70	10,52	5,67	11,54	5,59	11,47
20	5,48	11,36	5,37	11,24	6,50	12,36	6,10	11,97
30	5,73	11,61	5,75	11,63	6,97	12,81	6,39	12,26
40	5,91	11,79	6,02	11,90	7,31	13,11	6,59	12,45
50	6,05	11,93	6,23	12,10	7,57	13,34	6,75	12,60
100	6,47	12,33	6,87	12,72	8,38	14,04	7,24	13,05

I periodi di picco corrispondenti alle altezze d'onda significativa a largo sono stati determinate con la nota formulazione:

$$T_p = 4.85 * H_s^{0.5}$$

direttamente discendente dalle formule per la determinazione di onde in acque profonde su mari completamente sviluppati (cfr. [10]).

### 7.1 LA RIFRAZIONE E LO SHOALING

Con l'avvicinarsi verso riva le onde subiscono una trasformazione dovuta principalmente:

- alla orografia e al tipo di fondale;
- all'azione della marea;
- alla presenza di vento,
- all'azione delle correnti,
- all'interazione con le infrastrutture presenti.

Un'interpretazione semplice ed efficace dei fenomeni del primo tipo è fornita dalla teoria delle onde di piccola altezza, secondo la quale un'onda di oscillazione di periodo costante che avanza dal largo verso la riva, inizia a risentire del fondale sottostante ad una profondità  $h$  che si ritiene pari a 0,5 volte la lunghezza d'onda  $L$ ; l'”avvertimento” da parte dell'onda della presenza del fondale ha degli effetti diretti sulla celerità con la quale l'onda si propaga (relazione di Airy); in pratica, un medesimo fronte di un'onda monocromatica sarà caratterizzato da punti con celerità diversa in relazione ai fondali ad esso sottostanti; conseguenza ne è che il fronte dell'onda avanzerà con celerità diverse nei suoi punti subendo una rotazione progressiva man mano che si approssima alla riva, tendendo a disporsi parallelamente alla batimetria del fondale (*rifrazione*). Altra importante conseguenza dell'arrivo dell'onda nella zona di transizione è di carattere energetico: ammettendo che l'energia non si trasmetta in direzione trasversale al fronte dell'onda, può dimostrarsi con semplici passaggi matematici, che la morfologia del paraggio ha effetti diretti sulla concentrazione o sulla dispersione dell'energia, con conseguente aumento o diminuzione dell'altezza dell'onda (*shoaling*)<sup>4</sup>.

Un approccio più completo per lo studio della trasformazione dell'onda nel suo moto verso riva, deve necessariamente tenere conto nel contempo del fenomeno del frangimento e della conseguente dissipazione energetica ad esso associata. Il frangimento si verifica allorquando vengono raggiunte precise condizioni fisiche (generalmente espresse in termini di ripidità dell'onda) o a seguito dell'interazione dell'onda con strutture di protezione. L'individuazione delle zone in cui avviene il frangimento risulta determinante per comprendere l'effettiva operatività e sicurezza del bacino in concomitanza di eventi particolarmente gravosi.

---

<sup>4</sup> Quest'ultima affermazione discende direttamente dalla relazione fornita dalla teoria delle onde di piccola altezza, che lega l'energia per unità di larghezza del fronte d'onda con l'altezza dell'onda:  $E = \frac{\rho g H^2 L}{8}$

## 7.2 MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO

### 7.2.1 GENERALITÀ SUL MODELLO

Lo studio dei fenomeni legati alla trasformazione del clima d'onda verso riva è stato affrontato per mezzo del modello matematico STWAVE, modello stazionario spettrale alle differenze finite proposto da *J. McKee Smith, D. T. Resio e A. K. Zundel*. Lo scopo del modello è predire quantitativamente il cambiamento dei parametri dell'onda (altezza d'onda, periodo, direzione, e forma spettrale) tra il largo e la zona sottocosta.

STWAVE simula la rifrazione e lo shoaling indotti dalla variazione della profondità del fondale, il frangimento a cui è sottoposta l'onda in particolari condizioni fisiche e il fenomeno della diffrazione (trasferimento di energia in direzione trasversale rispetto alla cresta dell'onda); il modello è in grado di considerare la presenza di correnti e l'apporto energetico costituito dalla presenza del vento. L'input delle caratteristiche del moto ondoso incidente è costituito da uno spettro energetico di tipo bidimensionale.

Lo spettro è una rappresentazione statistica del campo d'onda; concettualmente può essere pensato come una sovrapposizione di più onde monocromatiche di diverso periodo e direzione; lo spettro rappresenta la distribuzione dell'energia associata al moto ondoso come funzione della frequenza (spettro monodimensionale) o come funzione della frequenza e della direzione (spettro bidimensionale); in quest'ultimo caso esso può essere descritto da una funzione da  $R^2$  in  $R$ , ovvero da una superficie  $z=f(x,y)$ , in cui  $x$  e  $y$  rappresentano rispettivamente le frequenze e le direzioni, mentre  $z$  rappresenta la densità di energia.

Le ipotesi del modello sono:

- fondo con dolce pendenza e riflessione dell'onda trascurabile;
- condizione dell'onda incidente costante su tutto il confine al largo del dominio di calcolo;
- stato stazionario delle onde, delle correnti e dei venti;
- rifrazione e shoaling lineari;
- corrente costante per tutta l'altezza della colonna d'acqua;
- attrito al fondo e fenomeni riflessivi trascurabili.

A ben guardare, l'ultima ipotesi comporta la necessità di ricorrere ad un ulteriore modello di calcolo per lo studio di dettaglio dell'agitazione interna del bacino portuale.

### 7.2.2 EQUAZIONE DI GOVERNO

Dal momento che il modello consente di considerare la presenza di corrente, le equazioni di governo sono scritte rispetto un sistema di riferimento solidale con la corrente stessa. I parametri dell'onda sono contrassegnati con il pedice  $r$ , quelli valutati rispetto al sistema di riferimento assoluto sono contrassegnati con il pedice  $a$ .

La relazione della dispersione dell'onda rispetto al sistema di riferimento relativo è (Jonsson et al., 1990):

$$\omega_r^2 = gk \tanh kd$$

dove:

$\omega$  = frequenza angolare;

$g$  = accelerazione di gravità;

$k$  = numero d'onda;

$d$  = profondità.

Nel sistema di riferimento assoluto, l'equazione della dispersione diventa:

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha)$$

dove:

$U$  = velocità della corrente

$\delta$  = direzione della corrente rispetto all'asse delle  $x$  del sistema di riferimento assoluto

$\alpha$  = angolo che la normale alla cresta dell'onda forma con l'asse delle  $x$  del sistema di riferimento assoluto (cfr. Figura 7.1).

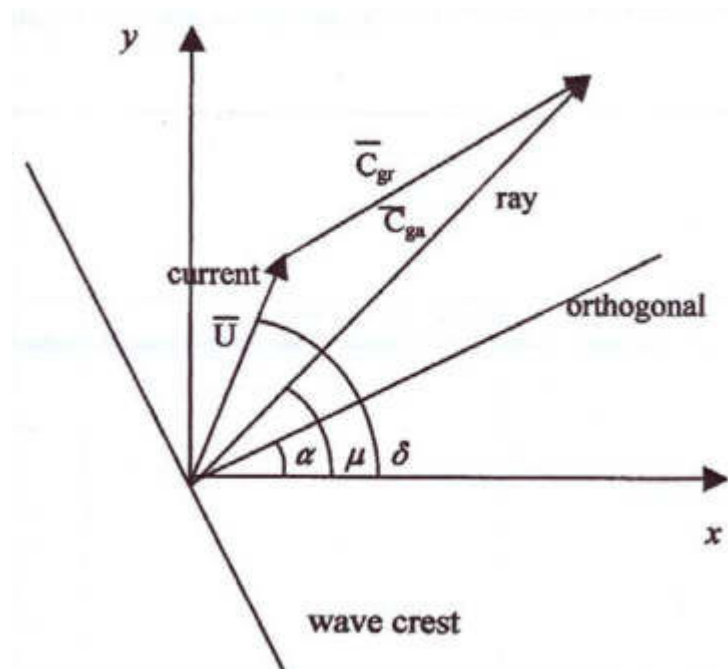


Figura 7.1 Definizione del sistema di riferimento



Le soluzioni per la rifrazione e lo shoaling richiedono sia la celerità dell'onda  $C$  che la celerità di gruppo  $C_g$  in entrambi i sistemi di riferimento; nel sistema di riferimento relativo si ha:

$$C_r = \frac{\omega_r}{k}$$

$$C_{gr} = 0.5C_r \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

La direzione di entrambe le celerità è  $\alpha$ ; nel sistema di riferimento assoluto le componenti delle celerità lungo  $x$  e  $y$  valgono invece:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha)$$

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

anche la celerità assoluta forma con l'asse delle  $x$  un angolo pari ad  $a$ . La celerità di gruppo assoluta definisce la direzione del raggio d'onda (direzione di propagazione dell'energia) (cfr. Figura 7.1); quest'ultima risulta dunque definita da:

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

L'ortogonale dell'onda indica la perpendicolare alla cresta dell'onda stessa, invece il raggio d'onda indica la direzione di propagazione dell'energia. La distinzione tra le due grandezze è necessaria solo nel caso in cui vi sia l'interazione tra onda e corrente; nel caso di assenza di quest'ultima, le due grandezze coincidono. La direzione dell'ortogonale dell'onda in condizioni stazionarie è data da (Mei 1989; Jonsson 1990):

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn}$$

dove  $D$  è il simbolo di derivata,  $R$  è una coordinata nella direzione del raggio d'onda ed  $n$  è una coordinata normale all'ortogonale d'onda.

In condizioni stazionarie, l'equazione della conservazione dell'azione dell'onda spettrale lungo la direzione del raggio d'onda è (Jonsson, 1990):

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r}$$

dove:

$E$  = densità d'energia dello spettro d'onda che è funzione della frequenza angolare assoluta  $\omega_a$  e direzione  $\vartheta$ ;

S = termine che indica un'entrata o un'uscita di energia.

Il criterio adottato per l'individuazione delle fasce di frangimento è quello proposto da Smith, Resio e Vincent (1997), i quali, a seguito di prove di laboratorio sul frangimento delle onde irregolari, proposero la seguente relazione:

$$(H_{m0})_{\max} = 0.1L \tanh kd$$

ogni qual volta il criterio risulta verificato, l'energia associata ad ogni frequenza dello spettro viene ridotta.

### 7.3 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO

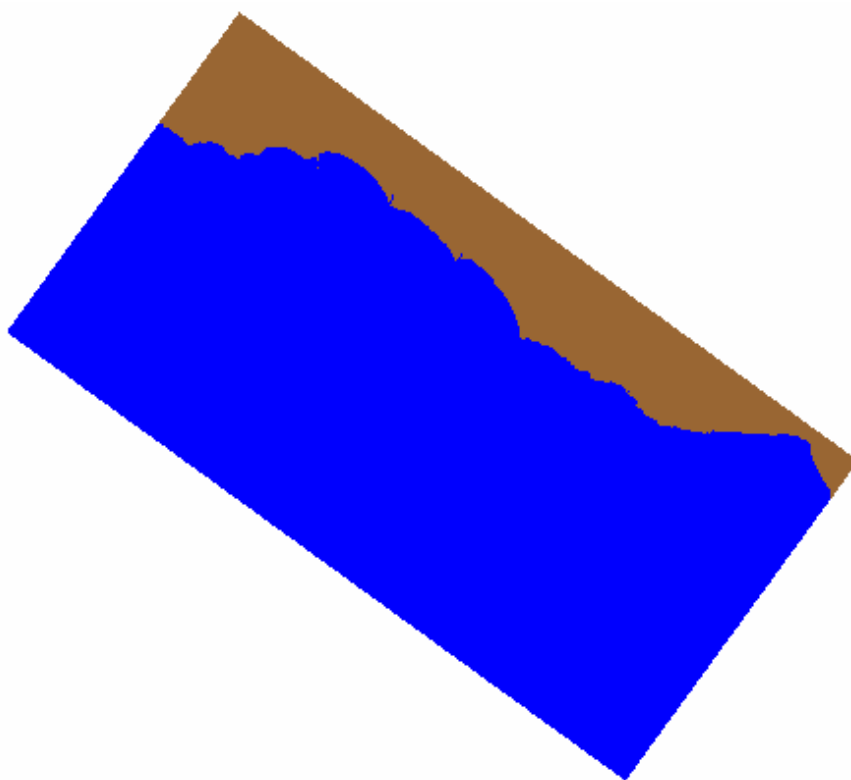
Data la particolare posizione del sito e della presenza di bassi fondali con curve batimetriche parallele alla costa, al fine di ottimizzare al massimo i tempi computazionali, sono stati individuati due domini di calcolo differenti in funzione della direzione di provenienza del clima ondoso a largo simulato.

Il dominio di calcolo denominato "1" (cfr. Figura 7.2) è stato utilizzato per le ondatazioni a largo provenienti 225° e 270°N, è costituito da un rettangolo di dimensioni 43260m x 22380m, suddiviso in celle quadrate (con lato pari a 30 m), per mezzo di una griglia formata da 746 colonne e 1442 righe.

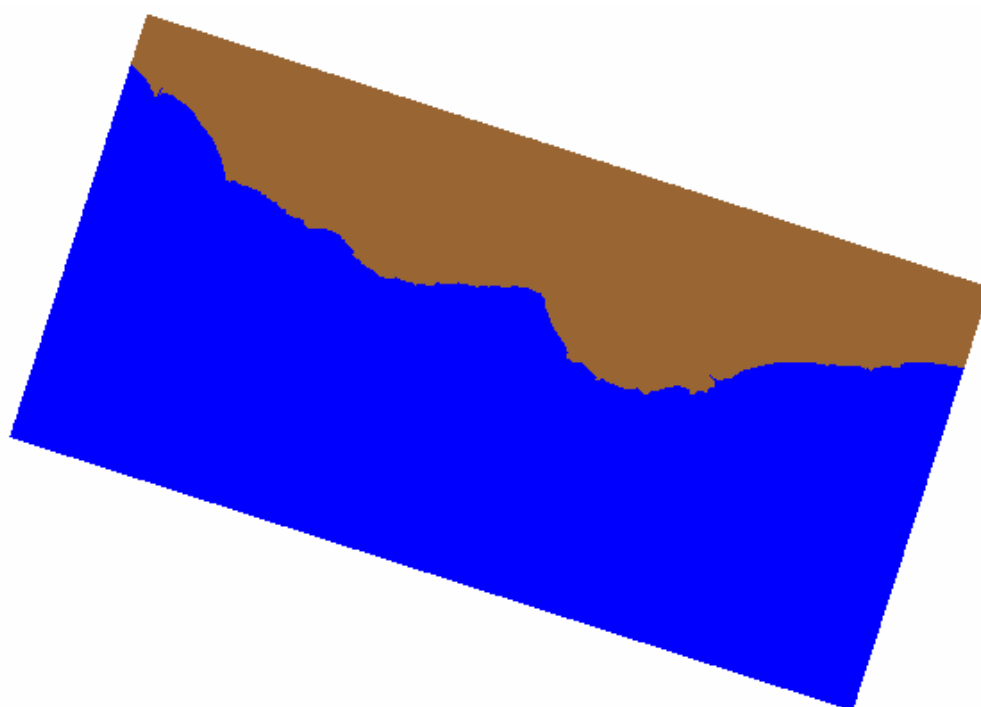
Il dominio di calcolo denominato "2" (cfr. Figura 7.3) è stato utilizzato per le ondatazioni a largo provenienti 135° e 180°N, è costituito da un rettangolo di dimensioni 45630 x 22900 m<sup>2</sup>, suddiviso in celle quadrate (con lato pari a 30 m), per mezzo di una griglia formata da 764 colonne e 1521 righe.

Come richiesto dal modello, per entrambi i domini l'asse j è stato orientato in maniera tale da risultare parallelo alla linea di costa; l'asse i, ortogonale al primo, è stato orientato positivamente nella direzione che dal largo punta la costa

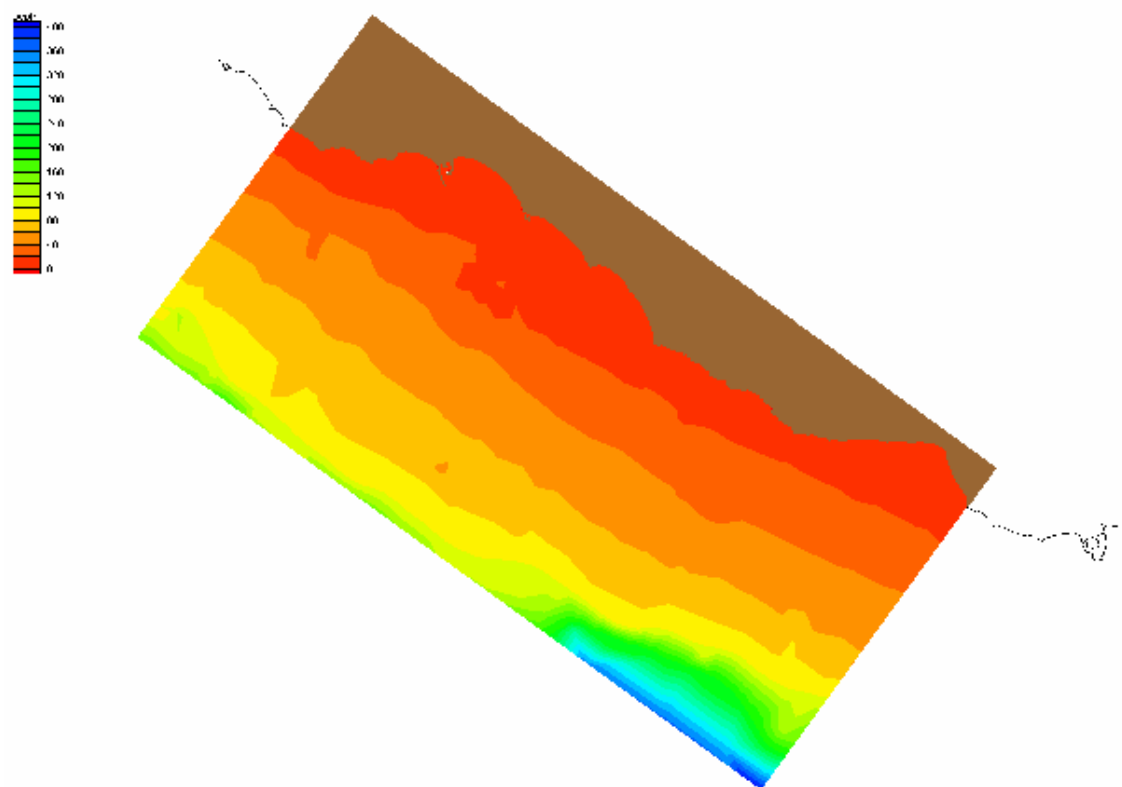
La Figura 7.4 mostra l'andamento della profondità dei fondali della zona in esame; la distribuzione è stata ottenuta attraverso un opportuno algoritmo di interpolazione applicato alle informazioni batimetriche contenute nelle Carte Nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina, Foglio 19.



*Figura 7.2 Definizione del dominio di calcolo "1"*



*Figura 7.3 Definizione del dominio di calcolo "2"*



*Figura 7.4 Batimetrie dei fondali del paraggio in studio*

#### 7.4 SIMULAZIONE NUMERICHE ESEGUITE

Il modello di calcolo è stato utilizzato per analizzare la trasformazione subita dalle onde nel loro procedere dal largo verso riva ed, in particolare, per individuare le fasce di frangimento.

Sono state oggetto di elaborazione le onde estreme risultate dalle considerazioni svolte nel capitolo 6; in particolare sono state considerate per le direzioni 135°N, 180°N, 225°N e 270°N, le onde relative ai tempi di ritorno di 2, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 100 anni, per un totale di 36 simulazioni.

Per ciascuna simulazione, a partire dai dati sull'altezza significativa, il periodo e la direzione, è stato costruito uno spettro bidimensionale, utilizzato come condizione al contorno su ciascun elemento della colonna più al largo. Lo spettro è stato specificato usando una funzione di forma (Bouws et al. 1985), caratterizzata oltre che dalle grandezze suddette, dai parametri  $\gamma$  e  $m$ , che controllano rispettivamente il grado di apertura dello spettro nella direzione dell'asse delle frequenze e dell'asse delle direzioni; i valori di  $\gamma$  e  $m$  sono stati messi in relazione al valore del periodo secondo quanto indicato in [3]. La Tabella 7.1 sintetizza le caratteristiche, in termini di altezza significativa, periodo, tempo di ritorno e direzione,  $\gamma$  e  $m$  delle onde studiate

<i>simul.</i>	<i>dir (°N)</i>	<i>Tr (anni)</i>	<i>HS (m)</i>	<i>Tp (s)</i>	$\gamma$	<i>nn</i>
1	135	2	3,91	9,6	3,3	4,0
2	135	3	4,23	10,0	3,3	4,0
3	135	5	4,60	10,4	3,3	4,0
4	135	10	5,05	10,9	4,0	8,0
5	135	20	5,48	11,4	4,0	8,0
6	135	30	5,73	11,6	4,0	10,0
7	135	40	5,91	11,8	4,0	10,0
8	135	50	6,05	11,9	4,0	10,0
9	135	100	6,47	12,3	4,0	10,0
10	180	2	2,96	8,3	3,3	4,0
11	180	3	3,46	9,0	3,3	4,0
12	180	5	4,01	9,7	3,3	4,0
13	180	10	4,70	10,5	3,3	4,0
14	180	20	5,37	11,2	4,0	8,0
15	180	30	5,75	11,6	4,0	10,0
16	180	40	6,02	11,9	4,0	10,0
17	180	50	6,23	12,1	4,0	10,0
18	180	100	6,87	12,7	4,0	10,0
19	225	2	3,49	9,1	3,3	4,0
20	225	3	4,11	9,8	3,3	4,0
21	225	5	4,80	10,6	3,3	4,0
22	225	10	5,67	11,5	4,0	8,0
23	225	20	6,50	12,4	4,0	10,0
24	225	30	6,97	12,8	5,0	12,0
25	225	40	7,31	13,1	5,0	12,0
26	225	50	7,57	13,3	5,0	12,0
27	225	100	8,38	14,0	5,0	16,0
28	270	2	4,27	10,0	3,3	4,0
29	270	3	4,65	10,5	3,3	4,0
30	270	5	5,06	10,9	4,0	8,0
31	270	10	5,59	11,5	4,0	8,0
32	270	20	6,10	12,0	4,0	10,0
33	270	30	6,39	12,3	4,0	10,0
34	270	40	6,59	12,5	4,0	10,0
35	270	50	6,75	12,6	4,0	10,0
36	270	100	7,24	13,1	5,0	12,0

*Tabella 7.1 Caratteristiche delle onde utilizzate per le simulazioni*

## 7.5 ANALISI DEI RISULTATI

I risultati delle simulazioni effettuate sono graficizzati nel gruppo di figure dell'Allegato A, dove per ciascuna onda incidente considerata sono riportati:

- la distribuzione dell'altezza d'onda nel dominio di calcolo;
- l'individuazione delle fasce di frangimento.

Rimandando alla visione dei grafici suddetti per un esame completo della casistica esaminata, appare opportuno formulare le seguenti considerazioni:

- l'onda che si propaga sottocosta si trasforma proponendosi in direzione d'attacco più vicina possibile all'ortogonale alla riva; i treni d'onda sottocosta tendono a posizionarsi con direzioni comprese tra 180°N e 215°N;

- la fascia di frangimento dipende fortemente dalla direzione dell'onda incidente, per fissato  $T_r$ , le condizioni più gravose si hanno per i treni d'onda a largo con direzione d'attacco di  $225^\circ\text{N}$  e  $270^\circ\text{N}$
- per fissato  $T_r$ , le onde provenienti da  $180^\circ\text{N}$  e  $225^\circ\text{N}$  creano le maggiori agitazioni sottocosta.

I livelli idrici del sito, ovvero le profondità dei fondali in un determinato momento nel paraggio in esame, possono avere un ruolo determinante nell'attività di studio e di analisi marittimistica dei siti e delle strutture.

Tali livelli infatti, influenzando la meccanica delle onde che si propagano, possono determinare condizioni più o meno gravose rispetto a quelle riferite al livello medio del mare, che, se non prese in opportuna considerazione, possono portare a risultati falsati ed erronei.

Valga pensare al fenomeno del frangimento, certamente connesso, tra l'altro alla profondità del fondale su cui l'onda evolve. Considerazioni superficiali sui livelli idrici effettivamente verificabili possono portare ad onde frangenti sottostimate, con gravi conseguenze sul calcolo strutturale delle opere, come è avvenuto in una cospicua casistica.

Deve considerarsi che i livelli idrici effettivi in un sito sono condizionati essenzialmente da:

- *livello di marea*
- *storm surge*, ovvero dalla combinazione di effetti meteorologici connessi alla tempesta, tra cui l'elevazione da gradiente di pressione, dal *wind stress* e dal *wave setup*;

La combinazione degli effetti delle suddette componenti è una caratteristica peculiare dei luoghi e differente tempesta per tempesta, per cui, ai fini di studio, l'unica previsione fattibile prende le mosse da considerazioni di tipo statistico e con tecniche basate sulla *life-cycle analysis*.

Considerando che per ogni tempesta vi sarà una condizione di modificazione del livello idrico, dettata dalla presenza di un certo *storm surge* e del livello di marea insistente in quel dato istante, per le calcolazioni ingegneristiche occorrerà definire quale condizione è più utile prendere in considerazione per il tipo di analisi in questione.

### 8.1 MAREE

Le maree possono avere una influenza notevolissima sulle escursioni dei livelli idrici che in alcuni casi possono raggiungere diversi metri.

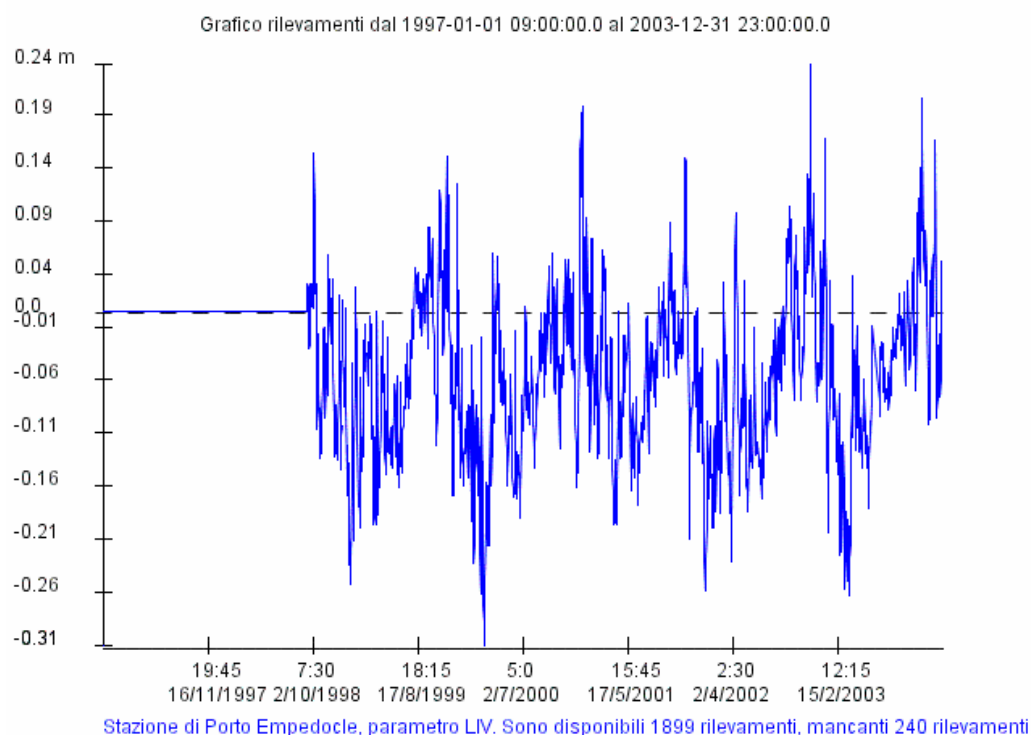
Nelle coste della Sicilia il fenomeno, è in genere significativo, presentando generalmente escursioni inferiori al metro.

Anche per questa grandezza è in genere difficile la disponibilità di dati immediatamente locali per periodi di tempo sufficientemente lunghi per una analisi completa. Vieppiù che nel caso delle maree la configurazione orografica del sito riveste un ruolo determinante nell'elevazione locale del livello idrico.

Ci si affida quindi a:

- misure mareografiche in siti vicini a quello in esame;
- analisi numeriche con modelli di calcolo che descrivano, con le dovute semplificazioni la fisica del fenomeno;
- osservazioni *in situ*, importanti e spesso determinanti ai fini dell'individuazione corretta delle possibili escursioni massime e minime.

Nel caso in esame si è fatto riferimento alla serie storica dei dati della Rete Mareografica Nazionale (RMN), relativamente al mareografo ubicato all'interno del Porto di Porto Empedocle .



Deve intanto segnalarsi che i dati sulla escursione dei livelli idrici, come letti da un mareografo, sono strettamente dipendenti dalle condizioni orografiche del sito ove il mareografo è installato (verosimilmente all'interno di porti) ed includono la componente di tipo climatico atmosferica, già denominata *storm surge*.

Valutazioni analitiche effettuate tramite l'ausilio di apposito modello matematico portano a valori di escursione complessiva per sola marea prossimi ai 60 cm.

## 8.2 ELEVAZIONE PER VENTO

L'azione del vento radente sugli specchi idrici comporta una leggera inclinazione degli stessi, montante nel verso della velocità dello stesso. In bacini chiusi, di semplice



forma con dimensioni comparabili è stato stimato che l'innalzamento del livello idrico rispetto al lmm può essere fornito dalla<sup>5</sup>:

$$S_w = U^2 F / (404.41 d)$$

Con:

$S_w$ (m), innalzamento del livello rispetto al lmm

$U$ (m/s), velocità del vento

$F$ (km), fetch

$d$ (m), profondità media dei fondali sul fetch

Per il caso in esame, da una analisi degli eventi che possono verificarsi in combinazione statistica con gli altri fattori, si considera:

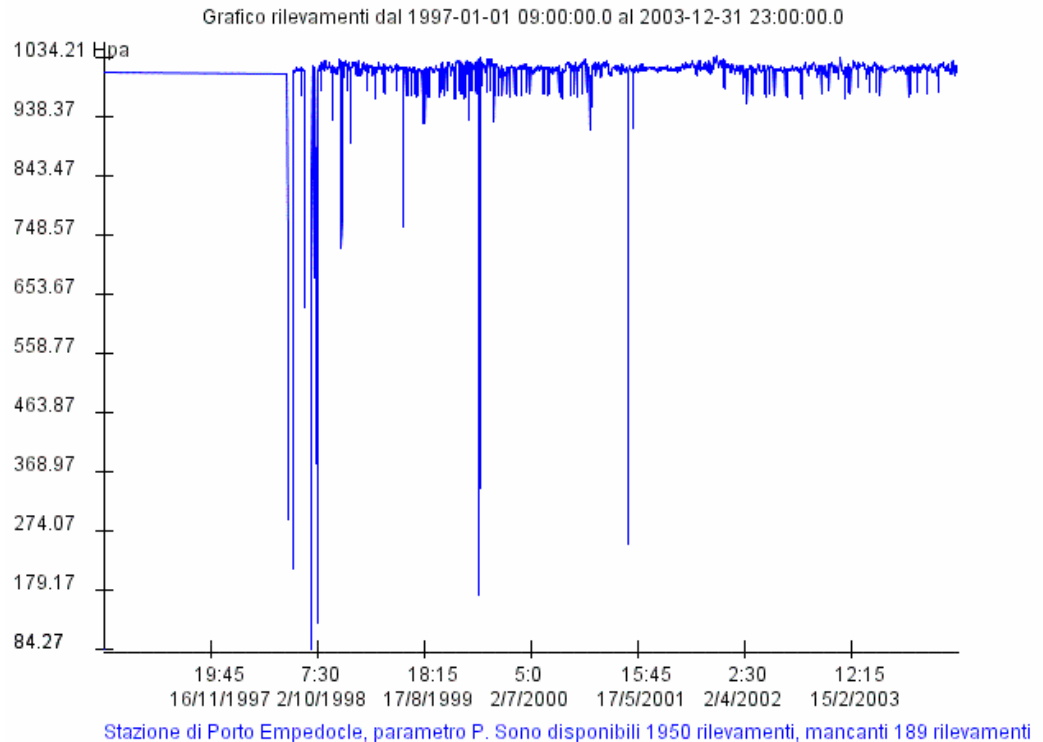
velocità del vento (m/s) =	8
Fetch (km) =	1000
profondità media (m) =	1500
coefficiente =	404,4
<b><math>S_w</math> wind setup (m) =</b>	<b>0,12</b>

### 8.3 ELEVAZIONE PER GRADIENTI DI PRESSIONE ATMOSFERICA

I gradienti di pressione, tra il centro della tempesta e le zone periferiche provocano dislivelli idrici.

---

<sup>5</sup> CECW-EH EM 1110-2-1414



L'elevazione prodotta dalle variazioni di pressione atmosferica dovute ad una tempesta sono state oggetto di rilevamenti sul campo da parte del CERC. Valori riferiti al livello idrico per la pressione atmosferica di 1013 millibars possono ricavarsi da CECW-EH EM 1110-2-1414.

Dai grafici suddetti, considerando un valore di centro tempesta possibile pari a 1000 millibar si ottiene una elevazione pari a,

$$S_p = 0.13 \text{ m.}$$

#### 8.4 ELEVAZIONE PER ONDE (WAVE SETUP)

Dovendo determinare lo *storm surge* al fine delle condizioni di progetto, si utilizza l'onda determinata con periodo di ritorno di 30 anni.

$$H_s = 6.9 \text{ m}$$

$$T_p = 12.8 \text{ s}$$

FRANGIMENTO, Komar e Gaughan, 1973

$$\Omega_b = H_b / H_0 = 0,56 (H'_0 / L_0)^{-1/5}$$

determinare  $H_b$  e  $dB$ , noto il resto

Onda al largo non rifratta	$H'_0 =$	6,9	$m, \tan \alpha =$	0,033
	$T =$	12,8	$a =$	20,5501
	$g =$	9,81	$b =$	1,02494
	$L_0 =$	255,805	$\gamma_b =$	0,92318
$\Omega_b = H_b / H_0$	$\Omega_b =$	1,15345		
	$H_b (m) =$	7,95883	$d_b (m) =$	8,62113

#### DETERMINAZIONE DEL WAVE SETUP

$$S_{wave} = 0.15 d_b - \frac{g^{1/2} (H'_0)^2 T}{64\pi d_b^{3/2}} \cos \alpha \quad d_b = \frac{H_b}{b - \frac{a H_b}{g T^2}}$$

$$a = 43.75(1 - e^{-19m}) \quad b = \frac{1.56}{1 + e^{-19.5m}}$$

$d_b$ , profondità al frangimento (m) =	8,62
$g$ , accelerazione di gravità ( $m/s^2$ ) =	9,81
$H'_0$ , altezza d'onda al largo non rifratta (m) =	6,9
$T$ (s), periodo =	12,8
$\alpha$ , angolo di incidenza della cresta d'onda =	0

$$S_{wave}(m) = 0,92$$

Ulteriori autori (Goda, 1985) hanno stimato il wave setup pari al massimo a  $0.15H'_0$ , limite rispettato nel caso in questione.

#### 8.5 CONCLUSIONI

Si è determinato che l'escursione di marea complessiva per il sito in questione possa essere pari a 60 cm c.ca.

Relativamente allo *storm surge*, dalle analisi effettuate, essendo verosimile per i casi estremi la composizione lineare dei fattori, composizione che a rigore andrebbe trattata con considerazioni di tipo probabilistico sulla occorrenza contemporanea, si ottiene:

#### STORM SURGE $S_{ss}$

$$S_{ss} = S_{wave} + S_{wind} + S_p = 0,92 + 0,12 + 0,13 = 1,17 \text{ m}$$

Si ritiene tale valore decisamente cautelativo per le situazioni effettivamente riscontrabili sui luoghi, utile ai soli fini del dimensionamento delle opere.

---

## 9 CONFIGURAZIONE DEL PORTO

---

### 9.1 PROGETTO PRELIMINARE DEL LAYOUT PORTUALE

Definito nei vari aspetti l'ambiente fisico che dovrà ospitare il nuovo intervento costiero, si può procedere alla definizione preliminare delle strutture di protezione portuali.

Diversi lay-outs possono soddisfare, più o meno bene, alla “griglia di riferimento”, costituita dai requisiti fisici, economici e sociali, definita e posta alla base del compito del progettista. Questi lay-outs dovranno tenere in opportuno conto, in linea non esaustiva:

- le dimensioni del bacino da proteggere;
- la batimetria del paraggio;
- le caratteristiche geotecniche dei fondali interessati dalle opere;
- il clima ondoso sottocosta;
- il regime dei venti;
- le condizioni di navigazioni in sicurezza;
- la manutenzione del canale d'accesso e dell'imboccatura;
- l'impatto ambientale e, in particolare, paesaggistico;
- gli effetti sull'evoluzione della linea di riva;
- l'agitazione interna residua dello specchio acqueo protetto;

### 9.2 DIMENSIONE DELLO SPECCHIO ACQUEO PROTETTO

Un parametro fondamentale è la dimensione dello specchio acqueo del bacino portuale da proteggere: il suo dimensionamento è tipico onere del progettista pianificatore, il quale ha fornito allo scrivente i requisiti fondamentali.

Lo specchio acqueo sarà interamente destinato alla nautica da diporto e soltanto un tratto di banchina sarà destinato all'attracco di piccole navi veloci ed aliscafi.

Si prevede che questo porto a regime possa ospitare circa 400 imbarcazioni all'ormeggio, con posti barca definiti nel rispetto delle “*Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*” del PIANC-AIPCN del febbraio 2002.

Tale flotta di progetto è stata ipotizzata perché abbia una distribuzione tale che un eventuale Ente gestore possa essere competitivo nel mercato del diporto nautico. Nella Tabella 9.1 si riporta la flotta di progetto ipotizzata.

Categoria	Dimensione (m)	Numero Posti
I	7X2,5	40
II	8,5X3	58
III	10X3,5	77
IV	11,5X4	78
V	13X4,5	80
VI	18X5,5	20
VII	21X6	7
VIII	24X6,5	10
IX	28X7	10
X	32X7,5	5
XI	36X8	5
<b>Totale</b>		<b>390</b>

*Tabella 9.1 Flotta di progetto ipotizzata*

Prevedendo una superficie di circa 130 m<sup>2</sup> per posto barca, inclusiva degli spazi di manovra, l'area complessiva raccomandata del bacino protetto deve essere circa 52.000 m<sup>2</sup>.

### 9.3 ORIENTAMENTO DELL'IMBOCCATURA

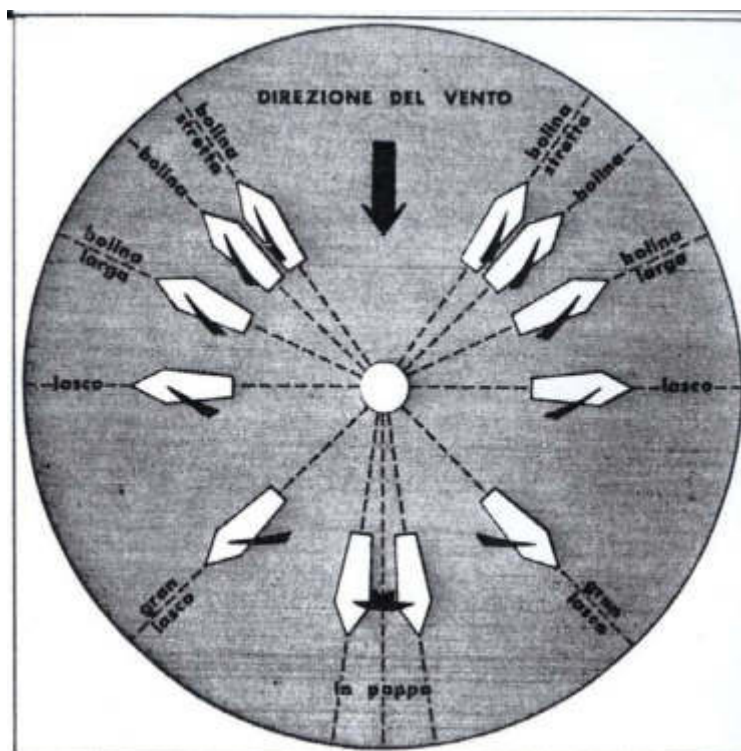
La determinazione dell'orientamento dell'imboccatura portuale, e quindi il suo relativo posizionamento, è stata effettuata cercando di cogliere principalmente i seguenti obiettivi:

- limitare i fenomeni di insabbiamento della darsena protetta;
- garantire la migliore risposta dello specchio acqueo in termini di agitazione interna residua;
- garantire la sicurezza massima per le manovre di ingresso ed uscita al porto in relazione ai mari ed ai venti.

Si è tenuto conto delle seguenti considerazioni ricavate dalle conclusioni degli studi effettuati, ed in particolare:

- dalle caratteristiche dell'unità fisiografica come riportate nello studio sull'evoluzione della linea di riva (cfr. Capitolo 14 e Capitolo 15) è evidente l'influenza della foce del F. Palma a ridosso del sito portuale; ciò sconsiglia la posizione dell'imboccatura del porto verso di essa, ove anzi è preferibile rivolgerla in posizione opposta.
- il clima ondoso sottocosta (cfr. Capitolo 7) ha direzione regnante e dominante all'interno del settore individuato dalle direzioni di 180°N e 260°N, per cui al fini di limitare l'agitazione interna portuale è consigliabile non rivolgere l'imboccatura verso queste direzioni.
- dall'analisi dei dati anemologici (cfr. Capitolo 3) i venti regnanti sono quelli provenienti dal IV quadrante dunque si deve prevedere l'imboccatura portuale in modo da non far seguire all'imbarcazioni, in ingresso al porto, una rotta formante con la direzione del vento un angolo

verso prua minore di  $70^\circ$  circa. Infatti in caso di ingresso di una barca a vela, che utilizza il vento come propulsore, le vele devono essere disposte in modo che la massima componente della pressione su di esse esercitata dal vento, risulti diretta verso prua, e sia minima la componente trasversale: la prima fa avanzare la barca mentre la seconda è, entro certi limiti, annullata dalla resistenza dell'acqua contro lo scafo e la chiglia. L'imbarcazione a vela può utilizzare il vento anche sotto angoli minori di  $90^\circ$  verso prua, ma non può stringere il vento che sino ad un certo punto, oltre il quale la prima componente riesce minore della seconda e la barca anziché avanzare scarroccia (cfr. Figura 9.1).



*Figura 9.1 Andature a vela*

Dalle considerazioni sopra riportate, vista la configurazione orografica del paraggio, risulta evidente l'opportunità di rivolgere l'orientamento dell'imboccatura alla direzione Nord (cfr. Figura 9.2).

Si consiglia inoltre il posizionamento dell'imboccatura portuale in corrispondenza di una profondità media di circa -5,5 m rispetto al l.m.m. che è esterna alla zona dei frangenti per una alta percentuale del tempo. Questa profondità, vista la tipologia del porto, è anche imposta dal fatto di limitare il costo delle opere foranee evitando la loro estensione su profondità elevate.

Tuttavia tale profondità di impostazione dell'imboccatura risulta ancora all'interno della "fascia attiva" di rimaneggiamento e potenziale trasporto dei sedimenti (cfr. "Studio di evoluzione della linea di riva", determinazione della "profondità di chiusura"). Ciò comporta la previsione di periodici interventi di manutenzione dell'imboccatura, assolutamente fisiologici e normali per la maggior parte delle strutture portuali. Si vedrà nella sezione apposita quali tecniche possono essere

adottate per rendere tali interventi compatibili con la vita economica di un porto turistico.

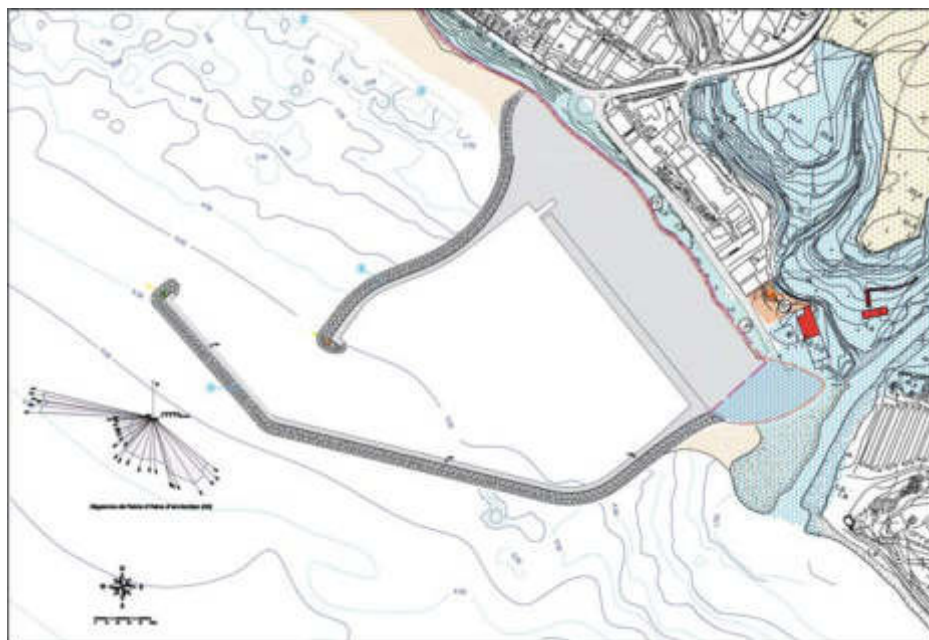


Figura 9.2 Configurazione finale delle opere marittime proposte

#### 9.4 DIMENSIONAMENTO IMBOCCATURA PORTUALE

Una delle variabili fondamentali che concorrono alla ottimizzazione del layout portuale é costituita dalla larghezza della imboccatura.

Per definirne le dimensioni si è fatto riferimento ad autorevoli raccomandazioni tecniche, ed in particolare al documento del PIANC-AIPCN “*Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*” del febbraio 2002.

Quale “imbarcazione di progetto” si è considerata l’imbarcazione più grande prevista nella Flotta Tipo:

lunghezza fuori tutta (L.O.A.) = 36 m

larghezza max (B) = 8 m

Adottando i criteri del citato documento PIANC-AIPCN, la larghezza del varco navigabile (calcolata alla quota di fondo) da considerare accettabile deve essere pari a 5 volte la larghezza.

Una larghezza al fondo della imboccatura di 60 m appare in definitiva rispondere, con sufficiente margine di prudenzialità, alle raccomandazioni.

#### 9.5 VERIFICA DI NAVIGABILITA' IN INGRESSO

Fissata la larghezza della imboccatura, si sono esaminati gli aspetti legati alla navigazione ed evoluzione dei mezzi nautici, che naturalmente risultano condizionanti per l’impostazione dell’intero *layout* portuale.



La barca inizia la manovra d'entrata con la poppa al mare, o meglio con una rotta formante un piccolo angolo con la direzione d'avanzamento dell'onda. In termini marinari ciò significa navigare con il mare al quarto, e la rotta forma un angolo di  $\frac{1}{4}$  di  $45^\circ$ , cioè  $11^\circ 15'$  con la direzione dell'onda. La barca procederà così in linea retta fino all'altezza del molo foraneo, quindi inizierà la virata per portarsi nelle acque protette. Al fine di non presentare il fianco durante la virata la rotta dovrà stringere al massimo la testata del molo di sopraflutto e durante la virata dovrà sempre rivolgere la poppa all'onda, che, per la rifrazione intorno alla testata del molo, procederà nell'avamposto con moto rotatorio.

E' stata verificata l'imboccatura durante le mareggiate simulate per le direzioni d'attacco del moto ondosso di  $135^\circ\text{N}$ ,  $180^\circ\text{N}$ ,  $225^\circ\text{N}$  e  $270^\circ\text{N}$ .

Per tracciare graficamente la rotta si è proceduto nel modo di seguito descritto.

Innanzitutto si è tracciata la rotta esterna per le traversie massime del paraggio, indicando la rotta esterna che sarà una retta con direzione inclinata di  $11^\circ 15'$  rispetto alla direzione dell'onda e tangente al cerchio avente raggio pari alla distanza minima della rotta dalla testata del molo foraneo, per la quale si adotta la semilunghezza della barca  $r=1/2 L$ .

Si ammette che la virata inizi dal punto di intersezione della rotta rettilinea con il limite di alimentazione. Il raggio di curvatura della virata per le imbarcazioni da diporto in condizioni di mareggiate si assume a pari a 3 volte la lunghezza delle barca.

Infine è stata ipotizzata una distribuzione della flotta tipo (distribuzione non assolutamente vincolante ai fini pianificatori) e sono stati previsti i canali di manovra garantendo una larghezza del canale pari a circa 1,7 volte la lunghezza del posto barca più grande, in attinenza al documento PLANCA-AIPCN *“Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici”* del febbraio 2002.

Nelle, Figura 9.3, Figura 9.4, Figura 9.5 e Figura 9.6 sono rappresentati i risultati delle elaborazioni grafiche per le manovre critiche tra quelle possibili nella configurazione del porto prevista dal PRP. Da esse, si può valutare l'adeguatezza della configurazione dell'imboccatura portuale e degli spazi disponibili per l'evoluzione delle imbarcazioni.

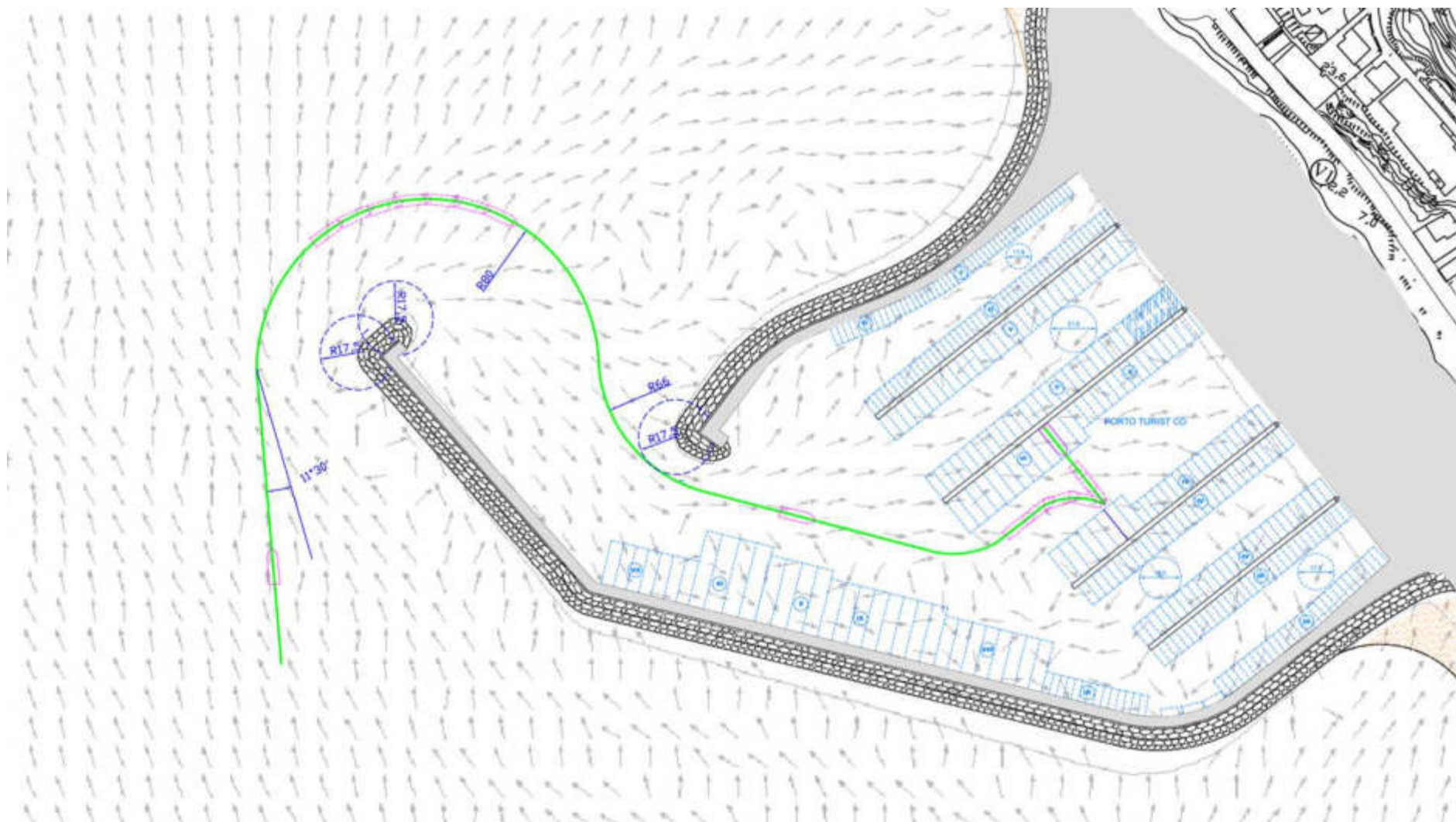




Figura 9.4 Tracciamento della rotta di entrata e manovre interne al porto con un clima d'onda sottocosta proveniente da 180°N



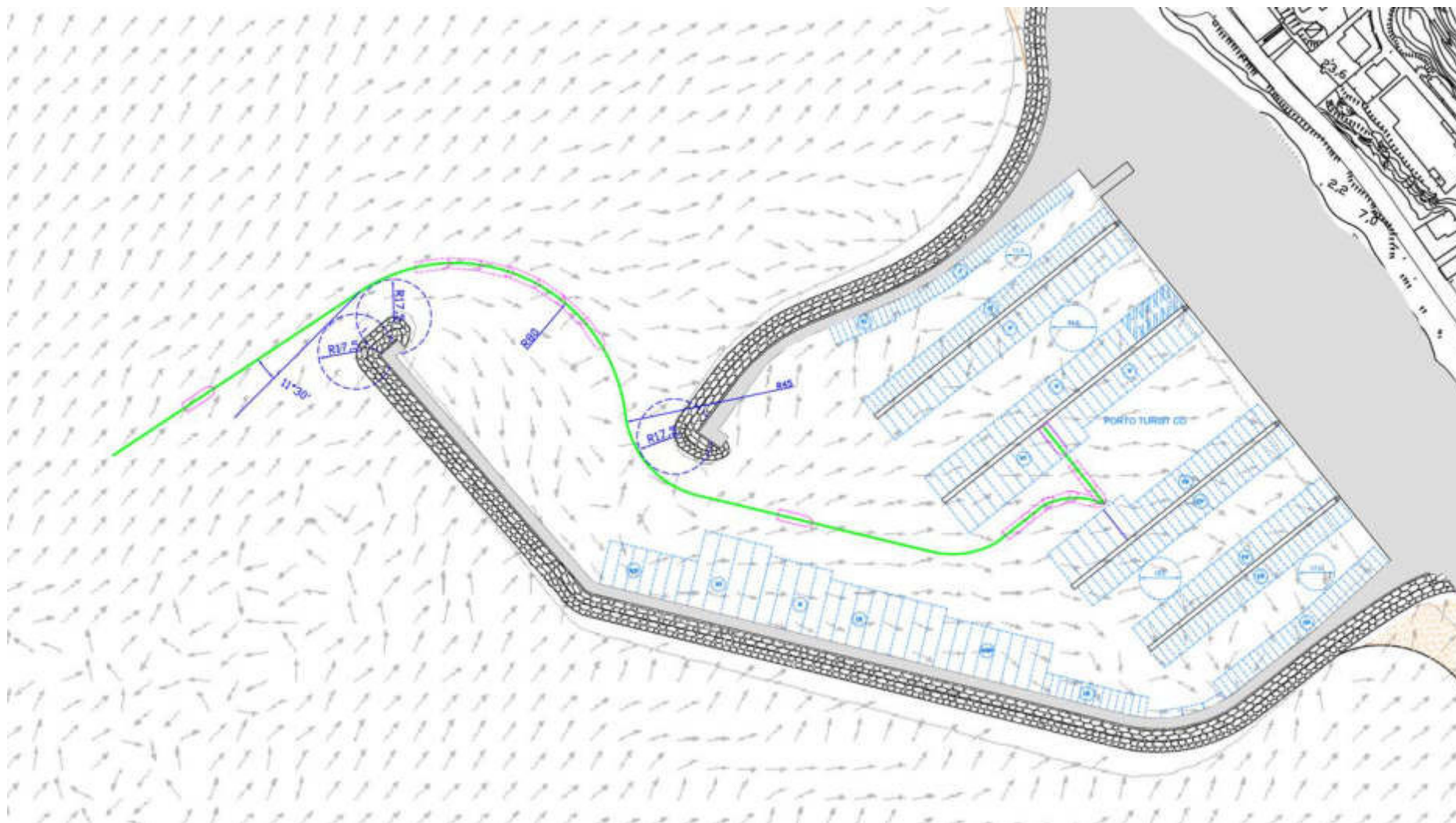




Figura 9.6 Tracciamento della rotta di entrata e manovre interne al porto con un clima d'onda sottocosta proveniente da 270°N

Lo studio della penetrazione del moto ondoso nel porto e della agitazione residua negli specchi acquei portuali ed in corrispondenza degli accosti è uno strumento fondamentale per definire la configurazione planimetrica e le caratteristiche principali delle opere di difesa e banchinamento.

La penetrazione del moto ondoso è infatti strettamente legata alla conformazione delle opere di difesa e della imboccatura portuale rispetto alla direzione di provenienza del moto ondoso incidente ed alla sua intensità.

L'agitazione che si determina negli specchi acquei portuali ed in corrispondenza degli accosti dipende naturalmente dalla penetrazione consentita dalle opere foranee e dalla imboccatura, ma è fortemente influenzata anche dalla forma dei bacini interni e dalla maggiore o minore capacità delle opere "di bordo" (le banchine) di riflettere il moto ondoso.

In generale, gli elementi da definire a questi fini (e le variabili da considerare) per il disegno del porto sono:

- la lunghezza, la conformazione e l'orientamento (rispetto alle possibili direzioni di provenienza del moto ondoso) delle opere foranee di difesa, di sopraflutto e di sottoflutto;
- la larghezza e l'orientamento "ottimale" della imboccatura, specie se interna al porto, non coincidente cioè con le testate delle opere foranee;
- la forma dei bacini portuali e la disposizione delle opere interne;
- le caratteristiche più o meno riflettenti delle banchine e delle altre opere "di bordo".

Le variabili di cui sopra devono, al massimo grado possibile:

- consentire la navigazione e la manovra delle imbarcazioni in condizioni di sicurezza, con eventuali limitate eccezioni (inagibilità del porto) solo in occasione di eventi estremi;
- garantire un livello di comfort delle imbarcazioni all'ormeggio compatibile con il tipo d'uso a cui il porto è destinato.

### 10.1 DIFFRAZIONE ED EFFETTI COMBINATI

Le informazioni fondamentali per valutare le condizioni di agitazione interna nell'ambito di un bacino portuale sono l'altezza, il periodo e la direzione dell'onda in ciascun punto di esso; dal momento che, come nella quasi totalità dei casi, non sono disponibili registrazioni dirette di queste grandezze all'interno del porto o di un bacino in studio, è necessario far riferimento ad un modello di trasformazione in grado di trasferire le informazioni relative alle onde al largo, ottenute nei capitoli precedenti, al sito di interesse.

Con lo spostamento dell'onda dalla zona delle acque profonde (rapporto tra lunghezza dell'onda e profondità minore o uguale a 2) alla zona delle acque basse, i parametri

fondamentali subiscono delle variazioni principalmente a seguito dei fenomeni rifrattivi, diffrattivi e riflessivi.

Il fenomeno della diffrazione consiste nel trasferimento di energia lateralmente rispetto alla cresta dell'onda; esso risulta evidente allorché un treno d'onda intercettato da un ostacolo (molo, promontorio etc.) pone in oscillazione la massa liquida dello specchio acqueo retrostante l'ostacolo stesso, con onde di espansione laterale radiali aventi per centro l'estremità di questo.

L'approccio tradizionalmente usato nei decenni passati (*wave ray theory*), secondo il quale l'energia del moto ondoso può trasferirsi esclusivamente in direzione normale alle creste dell'onda, trascura di fatto la presenza dei fenomeni diffrattivi nella zona di transizione, attribuendo la modifica delle caratteristiche dell'onda esclusivamente a fenomeni rifrattivi.

Nell'ambito della zona costiera, e più ancora in quella portuale, si risentono pesantemente gli effetti combinati della diffrazione e della riflessione, potendosi questi sommare in modo tale da dar luogo a condizioni peggiori rispetto a quelle presenti a largo (risonanza).

A partire dagli anni '80, i ricercatori impegnati nel campo dell'ingegneria costiera hanno riconosciuto l'importanza degli effetti combinati della rifrazione e della diffrazione da una parte, della diffrazione e della riflessione dall'altra, e hanno cominciato a sviluppare teorie e modelli che ne potessero tener conto; esiste oggi una copiosa serie di teorie disponibili che consentono di descrivere in maniera appropriata i fenomeni sopra richiamati, che caratterizzano il moto ondoso nella sua migrazione da acque profonde ad acque basse; tra queste, una delle più efficaci è la *mild slope equation*, equazione differenziale alle derivate parziali di tipo ellittico, mediata sulla profondità, alla base della quale sussiste l'ipotesi che le variazioni della profondità del fondale nell'ambito di una lunghezza d'onda siano contenute, da cui la dizione "*mild slope*"; in pratica, simulazioni numeriche confrontate con esperienze di pieno campo, hanno dimostrato che la *mild slope equation* è in grado di fornire soluzioni accurate in situazioni in cui la pendenza del fondale vale al massimo 1:3.

## 10.2 MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

### 10.2.1 GENERALITÀ SUL MODELLO

Il modello numerico utilizzato per lo studio dei fenomeni in questione è CGWAVE, modello agli elementi finiti messo a punto da Zeki Demirbilek e Vijay Panchang; come confermato da numerosi studi presenti in letteratura<sup>6</sup>, il modello rappresenta oggi uno degli strumenti più efficaci per studiare l'agitazione interna di un bacino portuale.

Le ipotesi semplificative introdotte nella formulazione del modello, da tenere ben presente per una corretta interpretazione dei risultati, possono essere così sintetizzate:

- non avviene trasmissione dell'onda attraverso le barriere frangiflutti;

---

<sup>6</sup> Cfr. per es. R. R. Botin, Jr. e E. F. Thompson, *Comparisons of Physical and Numerical Model Wave Predictions with Prototype Data at Morro Bay Harbor Entrance, California*, US Army Corps of Engineers, 2002.

- non sussiste il fenomeno dell'overtopping delle strutture;
- sono trascurati gli effetti sulla propagazione dell'onda legati alla presenza delle correnti;
- i fenomeni diffrattivi in corrispondenza delle estremità delle strutture sono assimilati a quelli che si verificano nel caso di parete verticale caratterizzata da un dato coefficiente di riflessione.

Come può evincersi dalla sua formulazione analitica, brevemente richiamata nel paragrafo successivo, il modello è in grado di simulare:

- gli effetti combinati della rifrazione e della diffrazione;
- l'effetto dissipativo legato all'attrito del fondo;
- l'effetto dissipativo dovuto al frangimento dell'onda;
- la propagazione di onde non lineari.

Il modello simula di fatto la propagazione di onde regolari (monocromatiche); lo studio delle onde irregolari può farsi combinando opportunamente i risultati relativi a casi diversi di onde regolari.

## 10.2.2 FORMULAZIONE ANALITICA

### 10.2.2.1. Equazioni di governo

L'equazione di governo, come precedentemente discusso, è la *mild slope equation*; essa può scriversi nella seguente forma:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (1)$$

dove:

$\hat{\eta} = \hat{\eta}(x, y)$  è la surface elevation function, funzione complessa a partire dalla quale può essere derivata l'altezza d'onda;

$\sigma$  è la frequenza d'onda;

$C = C(x, y)$  è la velocità di fase, pari al rapporto  $\sigma / k$  ;

$C_g = C(x, y)$  è la velocità di gruppo, pari a  $\partial \sigma / \partial k = nC$  , con

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (2)$$

$k = k(x, y)$  è il numero d'onda ( $= 2\pi / L$ ), dipendente dalla profondità  $d(x, y)$  per mezzo della relazione:  $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$  (3)



L'equazione (1) è in grado di descrivere analiticamente i fenomeni della rifrazione, della diffrazione e della riflessione di un'onda, nell'ambito di una regione costiera di forma qualunque.

Dal momento che anche altri fenomeni influenzano il comportamento dell'onda nella zona costiera, la *mild slope equation* può essere modificata in maniera tale da includere gli effetti:

- della dissipazione energetica per l'attrito del fondale (Dalrymple et al, 1984; Chen, 1986; Liu e Tsay, 1985),
- del frangimento dell'onda (Dally et al., 1985; De Girolamo et al., 1988);

L'equazione risultante può scriversi nella forma:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left( \frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad , \quad (4)$$

dove  $w$  è un fattore di attrito e  $\gamma$  è un parametro di frangimento dell'onda; per il parametro  $w$  il modello utilizza l'espressione proposta da Dalrymple et al. (1984):

$$w = \left( \frac{2n\sigma}{k} \right) \left[ \frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \quad (5)$$

dove  $a$  ( $= H/2$ ) è l'ampiezza d'onda ed  $f_r$  è un coefficiente di attrito dipendente dal numero di Reynolds e dalla scabrezza del fondale (Madsen, 1976, Dalrymple et al., 1984); valori usuali per  $f_r$  sono dello stesso ordine di grandezza del coefficiente di Manning.

Per il parametro  $\gamma$  si utilizza la seguente espressione (Dally et al., 198; Demirbilek, 1994; Demirbilek et al., 1996):

$$\gamma = \frac{\chi}{d} \left( 1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4a^2} \right) \quad (6)$$

dove  $\chi$  è una costante il cui valore può porsi pari a 0.15 (Dally et al, 1985), e  $\Gamma$  è un parametro sperimentale a cui si attribuisce il valore 0,4.

Oltre ai meccanismi sopracitati, la *mild slope equation* è in grado di simulare onde non lineari, per mezzo dell'adozione di una relazione tra frequenza d'onda, numero d'onda e profondità, che tenga conto anche dell'ampiezza d'onda; in pratica è sufficiente sostituire alla (3), la relazione:

$$\sigma^2 = gk \left[ 1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd \right] \tanh \{ kd + ka F_2 \} \quad (7)$$

con

$$F_1 = \frac{\cosh(4kd) - 2 \tanh^2(kd)}{8 \sinh^4(kd)} \quad \text{e} \quad F_2 = \left( \frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^4 \quad (8)$$

### 7.1.1.1. Condizioni al contorno

Lungo una parete verticale impermeabile, la condizione che il flusso normale alla superficie stessa sia nullo, è matematicamente espressa dalla relazione  $\partial \hat{\eta} / \partial n = 0$ . Nel caso di una parete parzialmente riflettente l'espressione diventa:

$$\frac{\partial \hat{\eta}}{\partial n} = \alpha \hat{\eta}, \quad (9)$$

dove  $\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$  è un coefficiente complesso, che può essere messo in relazione al coefficiente di riflessione del contorno ( $K_r$ ) per mezzo della seguente espressione (Tsay e Liu, 1983; Chen e Houston, 1987):

$$\alpha = ik \frac{1 - k_r}{1 + k_r}; \quad (10)$$

Il dominio di calcolo, nella direzione del mare aperto, è delimitato da un arco di circonferenza centrato in corrispondenza del *waypoint* del bacino portuale; lungo tale porzione del contorno si assume che le onde in uscita si propaghino all'infinito; tale condizione è analiticamente espressa dal soddisfacimento della seguente relazione (*Sommerfield Radiation Condition*):

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left( \frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{\eta}_s \rightarrow 0 \quad (11)$$

dove  $\hat{\eta}_s$  è lo *scattering wave potential*.

Può dimostrarsi (May, 1983) che l'espressione per  $\hat{\eta}_s$  che sia soluzione della *mild slope equation* e che soddisfi la condizione espressa dalla (11) può scriversi come:

$$\hat{\eta}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (\alpha_n \cos n\Theta + \beta_n \sin n\Theta) \quad (12)$$

dove  $H_n(kr)$  rappresentano i valori delle funzioni di Hankel del primo tipo calcolati nel punto  $kr$ ; l'espressione vista per  $\hat{\eta}_s$  è valida nell'ipotesi in cui:

- la profondità del fondale nella regione esterna al dominio si mantenga costante,
- i tratti di contorno della regione esterna A0-A1 e A2-A3 (cfr. Figura 10.1) siano rettilinei, appartengano alla stessa retta di sostegno e possano considerarsi totalmente riflettenti.

Per superare le limitazioni imposte dalle ipotesi suddette, alcuni autori (Xu, Panchang e Demirbilek, 1996) hanno proposto un modo alternativo di trattare il contorno della regione esterna; in particolare gli autori suggeriscono l'utilizzo della seguente approssimazione parabolica:

$$\frac{\partial \hat{\eta}_s}{\partial r} + \rho \hat{\eta}_s + q \frac{\partial \hat{\eta}_s^2}{\partial \Theta^2} = 0 \quad (13)$$

dove:

$$p = \frac{k^2 r^2 + k_0^2 r^2 + ik_0 r + \frac{1}{4}}{2ik_0 r^2} \quad (14)$$

$$q = \frac{1}{2ik_0 r^2}$$

in cui  $k_0$  è assunto pari al numero d'onda corrispondente al valore medio della profondità lungo l'arco di chiusura del dominio.

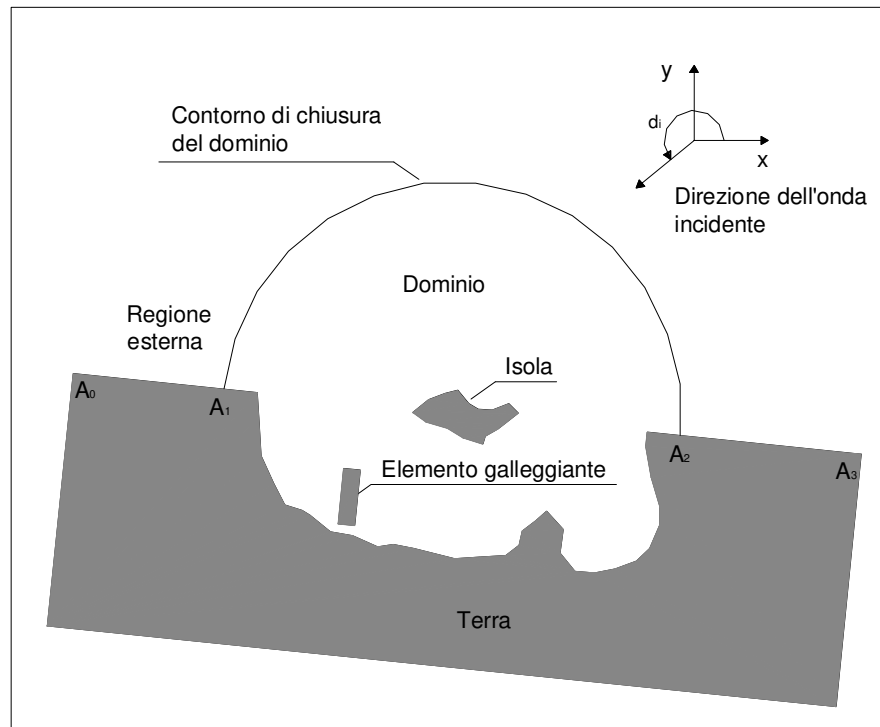


Figura 10.1 Definizione del dominio di calcolo

### 10.3 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO

Il dominio è stato delimitato, come richiesto dal modello di calcolo, da un arco di circonferenza centrato in corrispondenza del *waypoint* della darsena in studio; la lunghezza dell'arco è risultato pari a circa 1.500 m.

Al contorno del dominio sono stati attribuiti coefficienti di riflessione variabili da tratto a tratto in funzione della tipologia di costa presente; i coefficienti sono stati assegnati combinando opportunamente i valori di riferimento presenti in letteratura<sup>7</sup> con le osservazioni svolte in situ nel sopralluogo. In particolare sono stati distinti 8 tratti di costa.

Il dominio è stato ricoperto da mesh di calcolo triangolari, con grado di infittimento variabile, in modo tale da poter garantire un rapporto tra lunghezza dell'onda locale e dimensione dell'elemento, minore o uguale a dieci.

#### 10.4 SIMULAZIONI NUMERICHE ESEGUITE

In completa coerenza con quanto previsto dal modello, gli elementi che rappresentano le opere della struttura portuale sono stati caratterizzati da coefficienti di riflessione  $R$ , variabili a secondo della natura della superficie riflettente, i cui valori sono stati schematicamente assunti come segue:

- spiaggia	$R=20\%$
- mantellata esterna e scogliera	$R=50\%$
- banchina a parete verticale piena	$R=90\%$
- banchina con dispositivi anti-riflessione	$R=50\%$

##### 10.4.1 LE CONFIGURAZIONI PORTUALI STUDIATE

Come anticipato, il progettista ha proposto allo scrivente alcuni “Master Lay-Outs”, completamente diversi tra loro per natura del porto (porto esterno e porto isola), tipologia e forma geometrica delle opere foranee e configurazione dell'imboccatura (orientamento e dimensioni).

Determinato il “Master Lay-Out” maggiormente rispondente alle caratteristiche esposte nei paragrafi precedenti (ridosso dello specchio acqueo, protezione dall'interrimento, sicurezza della navigazione) si è compiuto un intenso sforzo elaborativo per l'ottimizzazione della configurazione delle opere foranee per gli aspetti relativi all'agitazione all'imboccatura e all'agitazione residua interna allo specchio acqueo protetto.

Sono così state provate diverse “soluzioni”, tutte derivate da modifiche del “Master Lay-Out” prescelto. In particolare sono state considerate:

- diverse estensioni e diversi orientamenti della testata del molo di sopraflutto;
- diverse larghezze dell'imboccatura del porto;
- diverse conformazioni della testata del molo di sottoflutto;
- diverse capacità di riflessione delle banchine interne.

---

<sup>7</sup> Cfr. *Coastal Engineering Manual* - US Army Corps of Engineers, 2002 e E. F. Thompson, Z. Demirebilek, *Wave Climate and Wave Response, 2025 Plan, Kahului Harbor, Maui, Hawaii*, 2002.

#### 10.4.2 L'OTTIMIZZAZIONE DELLA CONFIGURAZIONE

Si tralascia per brevità la descrizione puntuale dei risultati delle simulazioni eseguite su configurazioni delle opere altre rispetto al definitivo “Master Lay-Out”, limitandoci a descrivere le soluzioni appartenenti a quest’ultima famiglia e quindi quella definitivamente scelta.

Si è attentamente analizzata la configurazione del “Master Lay Out” ritenuto idoneo (*Soluzione 0*). Si è quindi fatto ulteriormente girare il modello matematico per onde unitarie con le seguenti combinazioni di direzione e periodo:

Dir	T
135°	4, 6, 8, 10, 12
180°	4, 6, 8, 10, 12
225°	4, 6, 8, 10, 12
270°	4, 6, 8, 10, 12

per un totale di 20 elaborazioni ed uno sforzo computazionale di diverse macchine per molte ore.

A seguito delle elaborazioni si è notato quanto segue:

- confermando le previsioni di avanprogetto, ai fini dell’agitazione all’imboccatura e residua interna, la configurazione prescelta risponde sostanzialmente bene in termini di ridosso del bacino per tutte le direzioni al largo e per tutte le classi di periodo;
- la configurazione entra in crisi, evidenziando agitazioni non accettabili, per i mari di terzo quadrante (da 225° e, soprattutto da 270°).
- il comportamento in termini di agitazione è molto ben rappresentato dalle onde con periodo 10s.

A questo punto si sono escogitate diverse soluzioni per rendere accettabile l’agitazione anche per i mari da 225° e da 270° (soluzioni 1, 2, 3 e 4).

Nella tabella seguente sono indicate le caratteristiche delle soluzioni che sono state esaminate utilizzando un’onda monocromatica con direzione d’attacco  $\theta = 270^\circ\text{N}$  e periodo di picco  $T_p = 10\text{s}$ .

Soluzione	Condizione Ondosa			Prolungamento diga sopraflutto (m)		Prolungamento diga sottoflutto (m)		Tipologia banchine	
	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	0	55	0	27	Riflettenti	Parz. Riflettenti
0	270	1	10	X		X		X	
1	270	1	10	X		X			X
2	270	1	10		X	X			X
3	270	1	10		X		X	X	
4	270	1	10		X		X		X

La *Soluzione 0* (il “Master Lay Out” della famiglia di soluzioni), rappresentata nella Figura 10.2 è costituita da un molo di sopraflutto della lunghezza di 510 m ed un molo di sottoflutto della lunghezza di 223 m. Le mantellate delle opere di protezione sono in scogli naturali e le banchine interne a parete verticali. Dall’esame dei risultati si osservano dei picchi dei coefficienti di amplificazioni dell’oscillazione residua di circa 0,5 sia in corrispondenza delle banchine di sopraflutto e di riva che al centro dello specchio acqueo, inoltre dall’esame dei risultati si nota che il molo di sopraflutto non offrirebbe adeguata protezione alle imbarcazioni durante la manovra di entrata, o più propriamente nell’accostata, in quanto le rotte si disporrebbero perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell’onda.

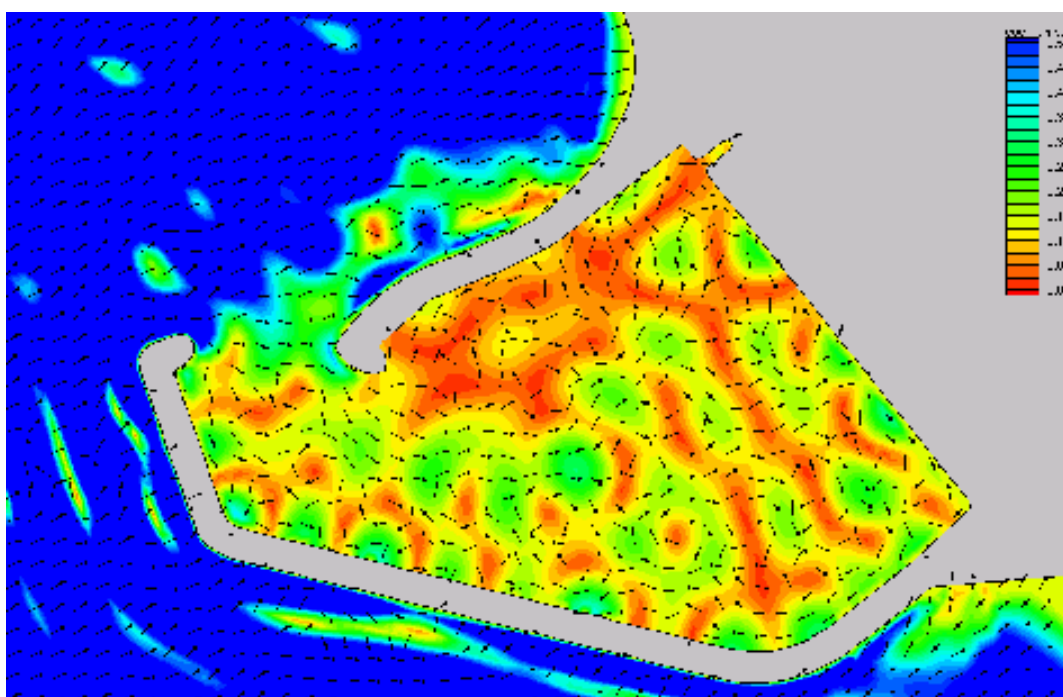


Figura 10.2 Soluzione 0 – Distribuzione del coefficiente di amplificazione e direzione d’onda per un’onda monocromatica  $\theta=270^\circ\text{N}$  e  $T_p=10\text{s}$

La *soluzione 1* (cfr. Figura 10.3) si differenzia dalla precedente sopradescritta per la tipologia delle banchine, che vengono previste a parete verticale forata o su pali, al fine di ridurre a circa il 50% il relativo coefficiente di riflessione. A parità di condizione ondosa si ha un miglioramento generale in termini di agitazione interna residua ma non si risolve rispetto alla soluzione precedente la problematica di ingresso al porto.

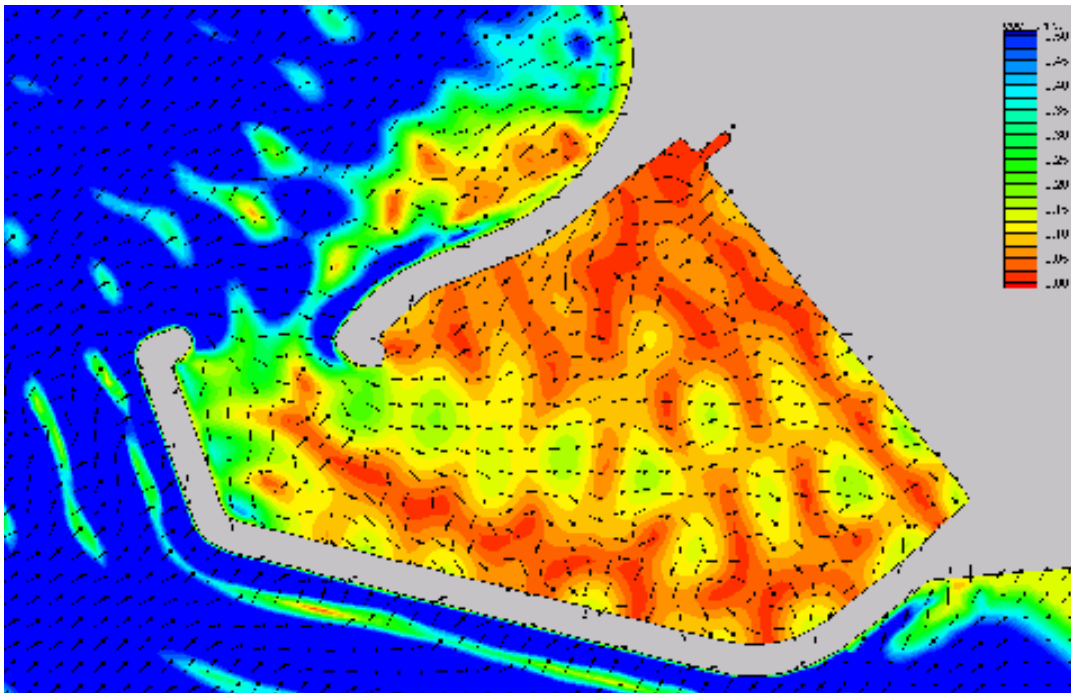


Figura 10.3 Soluzione 1 – Distribuzione del coefficiente di amplificazione e direzione d'onda per un'onda monocromati  $\theta=270^\circ\text{N}$  e  $T_p=10\text{s}$

La *soluzione 2* (cfr. Figura 10.4) si differenzia dalla 1 per il prolungamento del molo di sopraflutto di 55 m. Dall'esame dei risultati si nota un sostanziale peggioramento dell'agitazione residua infatti si nota un incremento dei picchi di coefficienti 0,5, ma un miglioramento dell'agitazione in corrispondenza della tesata del sopraflutto ed un formarsi di un canale di accesso al porto più riparato rispetto alla soluzione precedente.

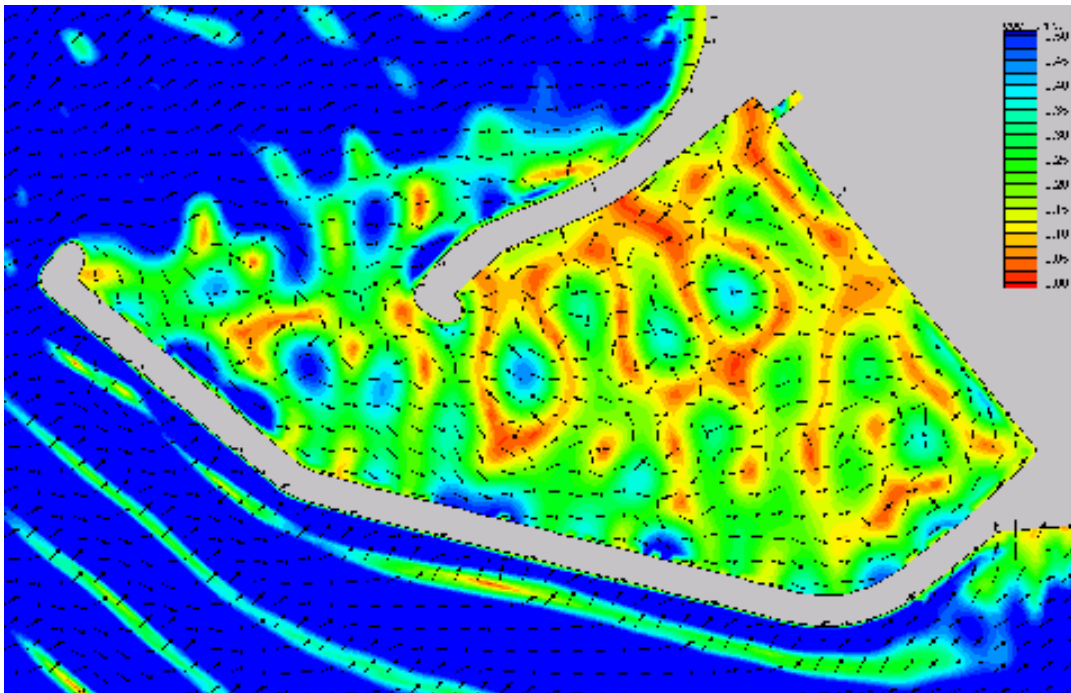


Figura 10.4 Soluzione 2 – Distribuzione del coefficiente di amplificazione e direzione d'onda per un'onda monocromati  $\theta=270^\circ\text{N}$  e  $T_p=10\text{s}$



La *soluzione 3* (cfr. Figura 10.5), prevede il prolungamento del molo di sopraflutto di 55 m, il prolungamento del molo di sottoflutto di circa 27 m e le banchine interne al porto a parete verticale riflettenti ( $R=90\%$ ). Si ha un sostanziale miglioramento in termini di agitazione interna residua sia nello specchio acqueo che in corrispondenza dell'imboccatura.

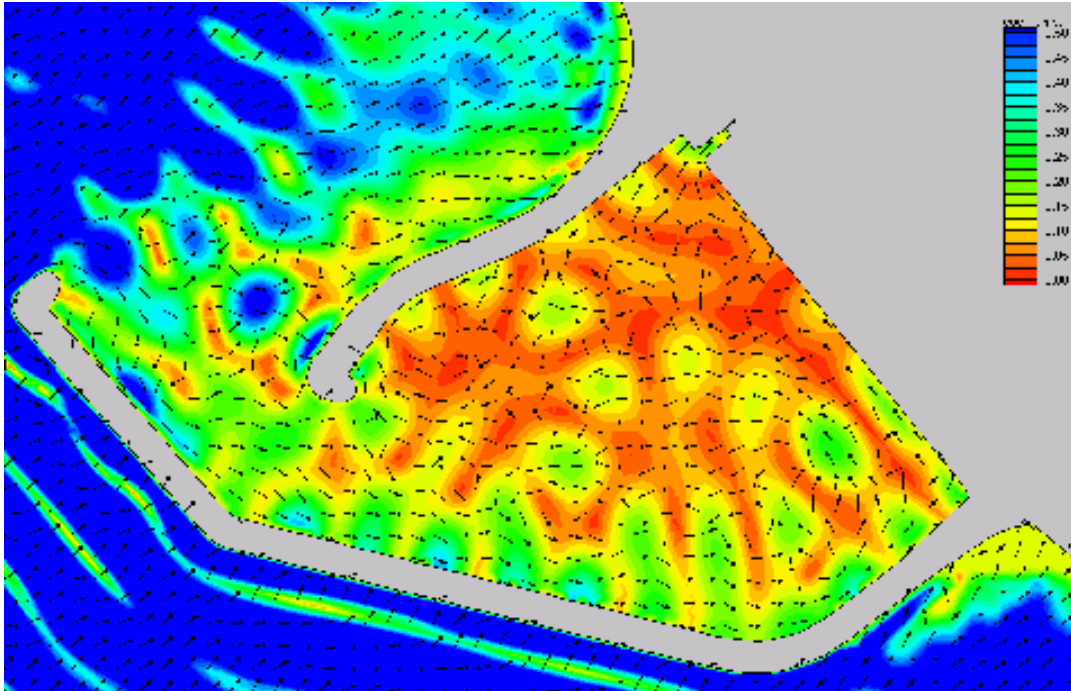
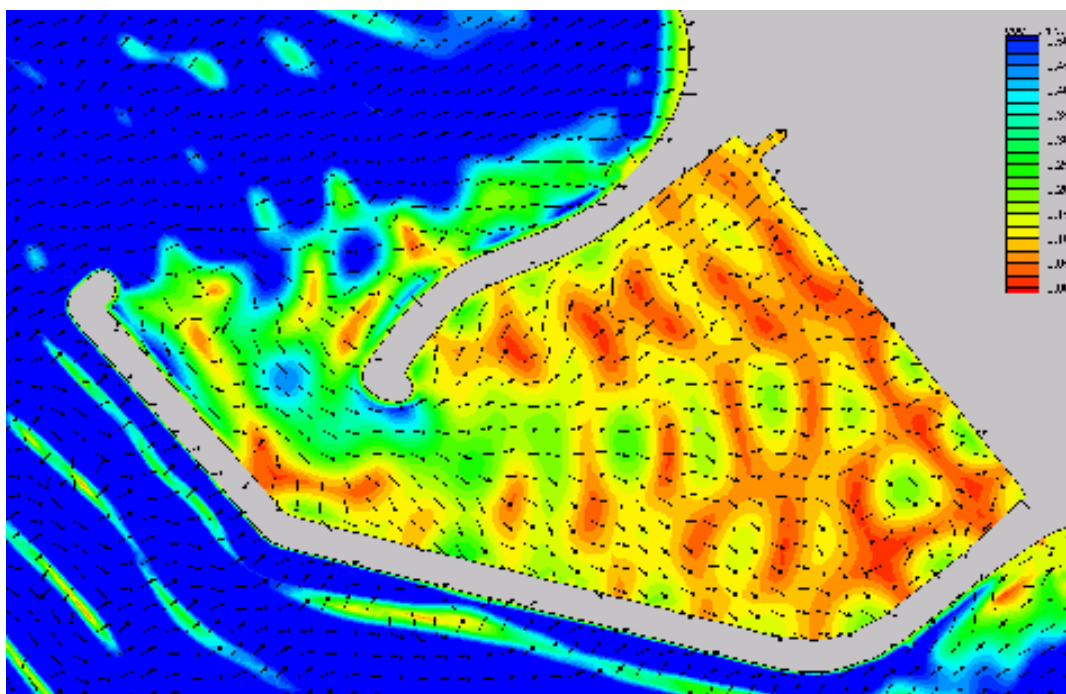


Figura 10.5 Soluzione 3 – Distribuzione del coefficiente di amplificazione e direzione d'onda per un'onda monocromatica  $\theta=270^\circ\text{N}$  e  $T_p=10s$

La *soluzione 4* (cfr. Figura 10.6) è analoga alla soluzione 3, da cui si differenzia per la tipologia delle banchine, che vengono previste a parete verticale forata o su pali, al fine di ridurre a circa il 50% il relativo coefficiente di riflessione ( $R=50\%$ ).

Si ha un abbattimento dell'agitazione interna rispetto alla soluzione precedente; anche il canale d'accesso risulta ben riparato ed il pattern delle onde all'interno dello specchio acqueo e del canale d'accesso risulta più regolare, condizione che favorisce tutte le manovre e la navigazione all'interno del bacino.



*Figura 10.6 Soluzione 4 – Distribuzione del coefficiente di amplificazione e direzione d'onda per un'onda monocromati  $\theta=270^\circ\text{N}$  e  $T_p=10s$*

La lettura critica dei risultati delle simulazioni eseguite con il modello matematico CGWAVE conducono alla conclusione che il miglior compromesso in termini di sicurezza dell'accesso e di agitazione residua è dato dalla *soluzione 4*.

## 10.5 VERIFICA DEL LAYOUT DEFINITIVO

Il modello di calcolo è stato quindi utilizzato per simulare l'agitazione interna del lay-out finale, indotta da un set completo di onde incidenti caratterizzate da diverse combinazioni di direzione e periodo.

La Tabella 10.1 sintetizza l'insieme delle direzioni e dei periodi considerati. In particolare per ciascuna direzione sono state considerate le classi di periodo indicate, per un totale di 20 elaborazioni.

Le direzioni sono state scelte in modo da rappresentare l'intero settore di traversia, mentre i valori di periodo sono tali da ricoprire il range riscontrato nell'analisi di frequenza delle onde critiche, di cui si è detto nel capitolo 5.

Le simulazioni sono state effettuate considerando onde di altezza unitaria. Al fine di ottenere la distribuzione dei coefficienti di amplificazione (rapporto tra l'altezza dell'onda in un punto e l'altezza dell'onda incidente) valevoli per qualsiasi valore dell'altezza dell'onda incidente, non sono stati inclusi nel modello termini non lineari; in pratica, come d'altra parte espressamente suggerito da diverse pubblicazioni presenti in letteratura<sup>8</sup>, per la tipologia di onde in esame (*short wave*) e per la limitatezza dell'estensione del dominio si è ritenuto trascurabile l'effetto dell'attrito al fondo sulla propagazione dell'onda.

Tabella 10.1 Caratteristiche delle onde incidenti utilizzate per le simulazioni

Direzione $\vartheta$	Periodo $T_p$ [s]
SE (135°)	6
S (180°N)	8
SW (225°N)	10
W (270°N)	12
	14

## 10.6 ANALISI DEI RISULTATI

I risultati delle simulazioni effettuate sono graficizzati nel gruppo di figure dell'Allegato B, dove per ciascuna onda incidente considerata sono riportati:

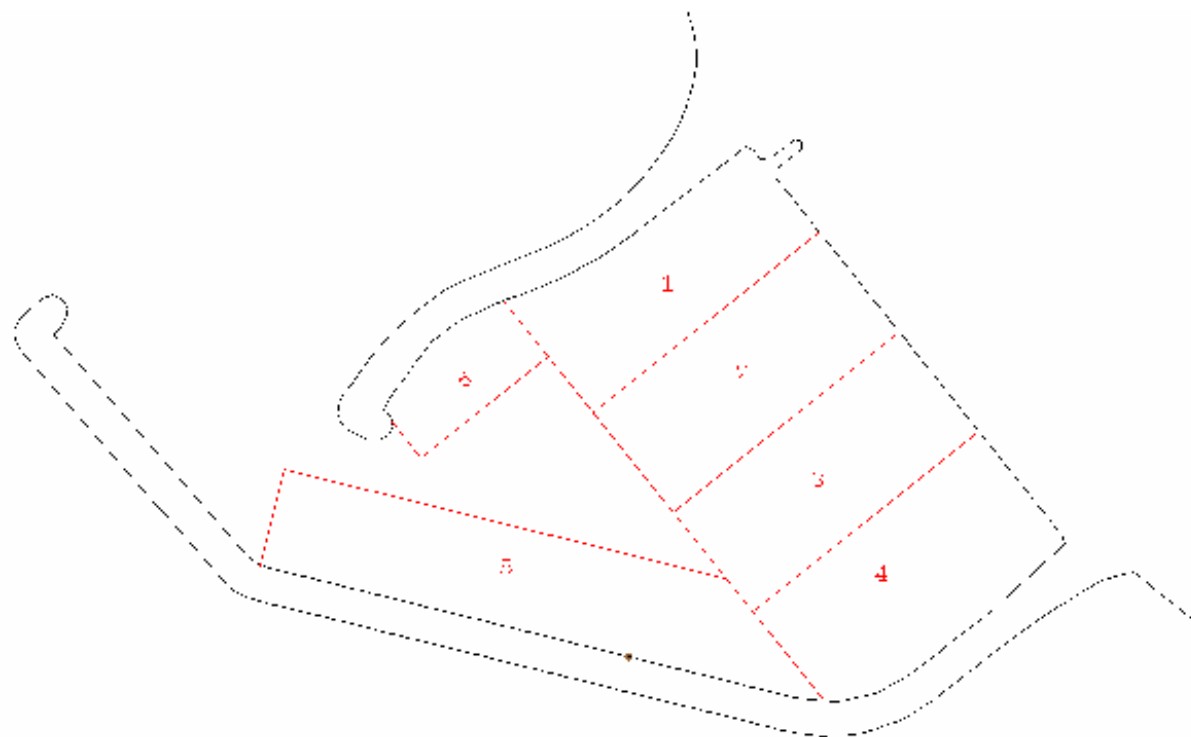
- la distribuzione del coefficiente di amplificazione su tutto il dominio di calcolo;
- un particolare della distribuzione del coefficiente di amplificazione relativo alla zona della configurazione portuale in esame;
- la distribuzione della direzione di propagazione delle onde sulla configurazione portuale in esame.

Ai fini di una puntuale disamina delle agitazioni residue dello specchio acqueo protetto, per fornire una “zonizzazione” utile per la più corretta gestione degli ormeggi, nella Figura

<sup>8</sup> Cfr. E. F. Thompson, Z. Demirbilek, *Wave Climate and Wave Response, 2025 Plan, Kabului Harbor, Maui, Hawaii*, 2002.

10.7 è rappresentato lo specchio acqueo protetto suddiviso in 6 aree omogenee. Tale suddivisione è stata fatta ipotizzando che la disposizione interna sia quella della Tav. G degli elaborati Grafici di Piano del PRP di Palma di Montechiaro, determinata dal posizionamento di pontili galleggianti radicati alla banchina di riva con direzione sub parallela al molo di sopraflutto.

Per ogni area, così determinata, per tutte le condizioni d'onda analizzate, è stato calcolato il coefficiente di amplificazione medio. Nelle tabelle seguenti per fissata area funzionale, si riportano i coefficienti di amplificazione media in funzione delle caratteristiche dell'onda esterna al porto.



*Figura 10.7 Suddivisione dello specchio acqueo protetto in aree omogenee*

Area	Direzione	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>1</b>	135°	6	0,013
		8	0,004
		10	0,013
		12	0,011
		14	0,014
	180°	6	0,014
		8	0,016
		10	0,023
		12	0,02
		14	0,044
	225°	6	0,01
		8	0,063
		10	0,044
		12	0,051
		14	0,095
	270°	6	0,014
		8	0,065
		10	0,092
		12	0,064
		14	0,15

Area	Direzione	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>2</b>	135°	6	0,017
		8	0,007
		10	0,013
		12	0,008
		14	0,011
	180°	6	0,02
		8	0,023
		10	0,022
		12	0,03
		14	0,02
	225°	6	0,013
		8	0,1
		10	0,056
		12	0,031
		14	0,077
	270°	6	0,034
		8	0,11
		10	0,084
		12	0,042
		14	0,1

Area	Direzione	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>3</b>	135°	6	0,016
		8	0,006
		10	0,012
		12	0,013
		14	0,017
	180°	6	0,024
		8	0,021
		10	0,022
		12	0,047
		14	0,021
	225°	6	0,014
		8	0,1
		10	0,075
		12	0,027
		14	0,09
	270°	6	0,04
		8	0,1
		10	0,095
		12	0,041
		14	0,11

Area	Direzione	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>4</b>	135°	6	0,015
		8	0,005
		10	0,01
		12	0,015
		14	0,017
	180°	6	0,022
		8	0,017
		10	0,019
		12	0,053
		14	0,022
	225°	6	0,016
		8	0,08
		10	0,074
		12	0,044
		14	0,1
	270°	6	0,041
		8	0,075
		10	0,085
		12	0,065
		14	0,12

Area	Direzione	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>5</b>	135°	6	0,022
		8	0,01
		10	0,02
		12	0,047
		14	0,041
	180°	6	0,026
		8	0,025
		10	0,04
		12	0,12
		14	0,063
	225°	6	0,059
		8	0,089
		10	0,11
		12	0,091
		14	0,16
	270°	6	0,052
		8	0,11
		10	0,12
		12	0,12
		14	0,16

Area	Direzione	Tp (s)	Coeff. ampl.
<b>6</b>	135°	6	0,023
		8	0,01
		10	0,018
		12	0,015
		14	0,02
	180°	6	0,034
		8	0,031
		10	0,033
		12	0,023
		14	0,067
	225°	6	0,011
		8	0,089
		10	0,047
		12	0,064
		14	0,13
	270°	6	0,03
		8	0,07
		10	0,11
		12	0,076
		14	0,21

Dal confronto dei risultati suddetti, con particolare attenzione alla zona in studio, possono formularsi le seguenti considerazioni:

- a parità di periodo dell'onda incidente, la direzione di provenienza alla quale corrispondono valori più elevati del coefficiente di amplificazione per tutte le aree individuate è  $270^{\circ}\text{N}$ ;
- in assoluto i valori mediati più elevati dei coefficienti di amplificazione si hanno per la direzione  $270^{\circ}\text{N}$  e per la zona n.3;
- la zona n.4, per tutte le direzioni e tutti i periodi di picco dell'onda a largo ha i valori mediati più bassi dei coefficienti di amplificazione;
- il valore mediato più alto dei coefficienti di amplificazione si ha nella zona 6 per un'onda a largo proveniente da  $270^{\circ}\text{N}$  con  $T_p=14\text{s}$ .

---

## 11 VERIFICA DEL RISPETTO DEGLI STANDARDS PIANC-AIPCN IN MERITO ALL'AGITAZIONE INTERNA

---

L'*AIPCN*, Associazione Internazionale di Navigazione, ai fini del controllo delle agitazioni degli specchi acquei protetti a servizio della nautica da diporto, raccomanda le seguenti altezze d'onda significativa all'interno del porto.

*condizione di "comfort"* (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni):

$H_s = 0.15$  m, per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;

*condizione di "sicurezza"*:

$H_s = 0.30$  m, per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;

*condizione "limite"*:

$H_s = 0.50$  m, per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Relativamente alla disposizione delle opere foranee, dall'esame dei risultati dello studio dell'agitazione interna, sono state verificate le ricorrenze statistiche delle condizioni sopradescritte all'interno dello specchio acqueo protetto.

Con le elaborazioni per la determinazione del clima d'onda sottocosta, si è proceduto determinando le caratteristiche dell'onda in corrispondenza della batimetria -14 m per tutte le direzioni in studio e per  $T_r = 2, 5$  e 50 anni (cfr. Tabella 11.1). Tale scelta è dovuta ai limiti del dominio di calcolo del modello matematico utilizzato per la determinazione dell'agitazione (CGWAVE).

Quindi, utilizzando gli opportuni coefficienti di amplificazione, è stata calcolata l'altezza d'onda residua all'interno dello specchio acqueo, suddiviso per le aree funzionali prima individuate, per vari  $T_r$ , successivamente confrontati agli standard suggeriti dall'*AIPCN*.



Tr (anni)	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)
2	135	2,55	7,74
	180	2,66	7,91
	225	3,13	8,58
	270	2,98	8,37
5	135	2,99	8,39
	180	3,63	9,24
	225	4,37	10,14
	270	3,51	9,09
50	135	3,97	9,66
	180	6,06	11,94
	225	7,56	13,34
	270	4,71	10,53

*Tabella 11.1 Caratteristiche del clima ondoso in corrispondenza della batimetria -14m*

Di seguito vengono sintetizzati nelle tabelle i risultati per le varie condizioni raccomandate dall'AIPCN:

Verifica della condizione di confort ( $H_s < 0.15$  m)

zona	Dir (°N)	Tp (s)	Hs (m)	Status
1	135	7.74	0.0102	VERIFICA
2			0.0179	VERIFICA
3			0.0153	VERIFICA
4			0.0128	VERIFICA
5			0.0255	VERIFICA
6			0.0255	VERIFICA
1	180	7.91	0.0426	VERIFICA
2			0.0612	VERIFICA
3			0.0559	VERIFICA
4			0.0452	VERIFICA
5			0.0665	VERIFICA
6			0.0825	VERIFICA
1	225	8.58	0.1409	VERIFICA
2			0.1471	VERIFICA
3			0.1440	VERIFICA
4			0.1377	VERIFICA
5			0.1283	VERIFICA
6			0.1377	VERIFICA
1	270	8.37	0.1475	VERIFICA
2			0.1481	VERIFICA
3			0.1484	VERIFICA
4			0.1481	VERIFICA
5			0.1487	VERIFICA
6			0.1487	VERIFICA

Tabella 11.2 Verifica delle condizioni di confort

Verifica della condizione di sicurezza ( $H_s < 0.30$  m)

zona	Dir (°N)	Tp (s)	Hs (m)	Status
1	135	8.39	0.0120	VERIFICA
2			0.0209	VERIFICA
3			0.0179	VERIFICA
4			0.0150	VERIFICA
5			0.0299	VERIFICA
6			0.0299	VERIFICA
1	180	9.24	0.0835	VERIFICA
2			0.0799	VERIFICA
3			0.0799	VERIFICA
4			0.0690	VERIFICA
5			0.1452	VERIFICA
6			0.1198	VERIFICA
1	225	10.14	0.1923	VERIFICA
2			0.2447	VERIFICA
3			0.2884	VERIFICA
4			0.2797	VERIFICA
5			0.2972	VERIFICA
6			0.2054	VERIFICA
1	270	9.09	0.2352	VERIFICA
2			0.2948	VERIFICA
3			0.2141	VERIFICA
4			0.2984	VERIFICA
5			0.4212	NON VERIFICA
6			0.3861	NON VERIFICA

Tabella 11.3 Verifica delle condizioni di Sicurezza

Verifica della condizione limite ( $H_s < 0.50$  m)

zona	Dir (°N)	Tp (s)	Hs (m)	Status
1	135	9.66	0.0516	VERIFICA
2			0.0516	VERIFICA
3			0.0476	VERIFICA
4			0.0397	VERIFICA
5			0.0794	VERIFICA
6			0.0715	VERIFICA
1	180	11.94	0.1212	VERIFICA
2			0.1818	VERIFICA
3			0.2848	VERIFICA
4			0.3212	VERIFICA
5			0.7272	NON VERIFICA
6			0.1394	VERIFICA
1	225	13.34	0.7182	NON VERIFICA
2			0.4763	VERIFICA
3			0.4990	VERIFICA
4			0.7560	NON VERIFICA
5			1.2096	NON VERIFICA
6			0.9828	NON VERIFICA
1	270	10.53	0.3156	VERIFICA
2			0.3956	VERIFICA
3			0.2873	VERIFICA
4			0.4004	VERIFICA
5			0.5652	NON VERIFICA
6			0.5181	NON VERIFICA

Tabella 11.4 Verifica delle condizioni limite

In cui:

- Dir = Direzione d’attacco dell’onda in corrispondenza della batimetria – 14 m;
- zona = zone omogenee di agitazione interna in cui è stato suddiviso il bacino in studio;
- Tp= periodi di picco;
- Hs= altezza d’onda significativa all’interno della zona d’agitazione;
- Status= identifica se la condizione è verificata o meno.

Dall'esame delle tabelle riepilogative si possono desumere le seguenti conclusioni in merito all'agitazione interna del bacino in studio e quindi del suo utilizzo:

- le raccomandazioni AIPCN sono generalmente sempre rispettate
- le condizioni di confort sono sempre rispettate in tutte le aree omogenee, per tutte le direzioni d'attacco del clima ondoso esaminate;
- le condizioni di sicurezza imposte dalle Raccomandazioni dell'AIPCN sono rispettate in tutte le aree omogenee considerate tranne che per le aree 5 e 6 per condizioni di agitazioni indotte da onde provenienti da 270°N
- le condizioni di limite non sono verificate nella area 5 per le direzioni di 180°N, 225°N e 270°N, per l'area 6 per le direzioni di 270°N e 225°N, per l'area 1 per la direzione 225°N.
- le zone omogenee 5 e 6 sono prevedibilmente meglio adatte all'ormeggio stabile di imbarcazioni di maggiore dimensione.

## 12 ALTEZZE D'ONDA DI PROGETTO

### 12.1 DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI RITORNO

Per determinare il tempo di ritorno dell'onda di progetto si è fatto riferimento alle “*Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Opere Marittime*” emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che suggeriscono una espressione che fornisce il Tempo di Ritorno dell'onda di progetto per il dimensionamento di varie strutture marittime. Tale espressione dipende da:

- la *durata minima di vita* delle opere progettate, desumibile, in funzione del tipo di opera e dal livello di sicurezza richiesto, dalla seguente tabella:

Tipo dell'opera	Livello di sicurezza richiesto		
	1	2	3
	Vita di progetto (anni)		
Infrastrutture di uso generale	25	50	100
Infrastrutture ad uso specifico	15	25	50

- *massima probabilità di danneggiamento ammissibile* nel periodo di vita operativa dell'opera desumibile dal tipo di danneggiamento, dalla ripercussione economica e dal rischio per la vita umana come da tabella seguente

<i>Danneggiamento incipiente</i>		
	Rischio per la vita umana	
Ripercussione economica	Limitato	Elevato
Bassa	0.50	0.30
Media	0.30	0.20
Alta	0.25	0.15
<i>Distruzione totale</i>		
	Rischio per la vita umana	
Ripercussione economica	Limitato	Elevato
Bassa	0.20	0.15
Media	0.15	0.10
Alta	0.10	0.05

La combinazione del tempo di vita dell'opera  $T_v$  e della probabilità di danneggiamento  $P_f$  determina il tempo di ritorno dell'evento di progetto  $T_r$  con la seguente espressione:

$$T_r = \frac{T_v}{[-\ln(1 - P_f)]}$$

Per il caso in esame si assume:

- $T_v = 25$  poiché l'infrastruttura in progetto è di tipo generale ed il livello di sicurezza richiesto è 1;
- $P_f = 0.30$  poiché le strutture in progetto sono riparabili (dighe a scogliera) si assume la probabilità di danneggiamento incipiente, con rischio per la vita umana limitato e ripercussione economica media.

Per il caso in esame si assume quindi un Tempo di Ritorno dell'evento di progetto pari a 70 anni.

## 12.2 LIVELLO IDRICO DI PROGETTO

Il livello idrico più sfavorevole da considerare per un corretto dimensionamento delle opere in progetto è quello che tenga conto del *massimo livello di marea* combinato con lo *storm surge*.

Dunque per la determinazione delle caratteristiche dell'onda di progetto sono stati considerati questi fattori. Sono stati determinati i clima d'onda sottocosta con il modello matematico STWAVE, descritto nel Capitolo 7, considerando un nuovo dominio di calcolo, che è stato ricavato incrementando le quote batimetriche di una quantità di 1,5 m.

## 12.3 SIMULAZIONI ESEGUITE

Sono state oggetto di elaborazione le onde estreme di  $T_r = 70$  anni per tutte le direzioni considerate. Per ciascuna simulazione, a partire dai dati di altezza significativa, periodo e direzione, è stato costruito uno spettro bidimensionale, utilizzato come condizione al contorno su ciascun elemento più al largo del dominio. Lo spettro è stato specificato usando una funzione di forma (Bouws et al. 1985), caratterizzata oltre che dalle grandezze suddette, dai parametri  $\gamma$  e  $nn$ , che controllano rispettivamente il grado di apertura dello spettro nella direzione dell'asse delle frequenze e dell'asse delle direzioni; i valori di  $\gamma$  e  $nn$  sono stati messi in relazione al valore del periodo secondo quanto indicato in J. McKee Smith, D. T. Resio, A. K. Zundel, *STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model – User's manual*, US Army Corps of Engineers, 1999. La Tabella 12.1 sintetizza le caratteristiche, in termini di altezza significativa, periodo e direzione, delle onde studiate con  $T_r = 70$  anni:

Direzione	Hs (m)	Tp (s)
135°N	6,25	12,13
180°N	6,54	12,41
225°N	7,96	13,69
270°N	6,99	12,82

Tabella 12.1 Caratteristiche delle onde estreme a largo per  $T_r = 70$  anni

Il livello idrico considerato è stato quello che tiene conto della massima marea e dello *storm surge*.

Nelle figure dell'Allegato C sono rappresentate le altezze e le direzioni d'onda sottocosta determinate dalle condizioni estreme soprariportate.

## 12.4 CONDIZIONI ESTREME ALLE OPERE

Goda (1985), per il progetto di opere a gettata quando la profondità è minore della metà dell'altezza dell'onda significativa al largo, raccomanda di utilizzare un'onda di progetto computata ad una profondità pari almeno a metà dell'altezza dell'onda significativa al largo.

Per altro verso Goda consiglia di computare l'onda ad una distanza  $5H_s$  dal piede della struttura, per tener conto, appunto, della distanza di trasferimento delle grandi onde frangenti. Quindi le caratteristiche dell'onda misurate in corrispondenza del molo di sopraflutto e quello di sotto flutto sono:

Tr (anni)	Dir (°N)	Soprafl.		Sottofl.	
		$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
70	135	3,67	9,29	0,66	3,94
	180	4,58	10,38	1,21	5,34
	225	4,61	10,41	2,05	6,94
	270	4,54	10,33	1,99	6,84

Per un dimensionamento preliminare delle strutture, sono state considerate le condizioni più gravose :

Tr (anni)	Dir (°N)	Soprafl.		Sottofl.	
		$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
70	225	4,61	10,41	2,05	6,94

## 12.5 DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELLE OPERE PREVISTE

L'approccio calcolistico, che come si basa su formulazioni di carattere empirico, è stato il seguente:

⇒ calcolo della mantellata esterna del molo di sopraflutto e del sottoflutto;

## 12.6 TABELLE DI CALCOLO

Si riportano di seguito le tabelle di calcolo per l'opera in questione con l'avvertenza che per ciascuna di esse è indicata la finalità, l'autore di riferimento per gli studi di carattere teorico sperimentale e la verifica o meno del rispetto delle condizioni di applicazione fornite negli studi relativi.



Formula di Van der Meer, 1990

$h_c = (A_t / \exp(\alpha N_s^*))$	
dove:	DATI
$h_c$ , altezza della struttura dal piede (m), $h_c=h'_c$ no danno	
$A_t$ , area della sezione iniziale della struttura	166,5
$h$ , profondità al piede lmm (m)	6
$h'_c$ , altezza iniziale della struttura dal piede (m)	9
$N_s^*$ , numero di stabilità spettrale pari a: $H_s s_p^{(-1/3)} / \Delta D_{n50}$	
$H_s$ (m)	4,6
$T_p$ (s)	10,41
$L_0$ (m)	105,6
$s_p = H_s/L_p$	
$\Delta = \rho_s/\rho_w - 1$	1,52
$D_{n50}$ (m), dimensione del cubo mediano equivalente	

$\alpha = -0,028+0,045A_t/(h'_c)^2+0,034 h'_c/h - 6*10^{-9} A_t^2/D_{n50}^4$

B, cresta della scogliera	5
cot $\beta$ , pendenza scogliera	1,5
$g$ , accelerazione di gravità	9,81
storm surge (m)	1,17
escursione di marea (m)	0,70
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1030
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2600

h (m)	$\alpha$	$h'_c/h$	$h/h'_c$	$L_p$ (m)	dia. $D_{n50}$	Peso, $W_{50}$ (kg)	$N_s^*$
5,30	0,12	1,698	0,59	58,35	1,20	4444,4	5,89
5,55	0,12	1,623	0,62	59,60	1,18	4259,7	6,02
5,79	0,12	1,554	0,64	60,81	1,16	4095,6	6,14
6,04	0,12	1,490	0,67	61,99	1,15	3949,0	6,26
6,29	0,11	1,432	0,70	63,14	1,14	3817,3	6,37
6,53	0,11	1,378	0,73	64,26	1,12	3698,5	6,47
6,78	0,11	1,327	0,75	65,34	1,11	3590,9	6,57
7,03	0,11	1,281	0,78	66,39	1,10	3492,9	6,67
7,27	0,11	1,237	0,81	67,42	1,09	3403,4	6,76
7,52	0,11	1,197	0,84	68,42	1,09	3321,3	6,85

NOTE:  
MANTELLATA - TRONCO - MOLODI SOPRAFLUTTO

## Formula di Van der Meer, 1990

$$h_c = (A_t / \exp(\alpha N_s^*))$$

dove:

$h_c$ , altezza della struttura dal piede (m),  $h_c = h'_c$  no danno

$A_t$ , area della sezione iniziale della struttura

$h$ , profondità al piede lmm (m)

$h'_c$ , altezza iniziale della struttura dal piede (m)

$N_s^*$ , numero di stabilità spettrale pari a:

$$H_s s_p^{(-1/3)} / \Delta D_{n50}$$

$H_s$  (m)

$T_p$  (s)

$L_0$  (m)

$$s_p = H_s / L_p$$

$$\Delta = \rho_s / \rho_w - 1$$

$D_{n50}$  (m), dimensione del cubo mediano equivalente

DATI

150,875

5

8,5

2,1

6,94

46,9

1,52

h (m)	$\alpha$	$h'_c/h$	$h/h'_c$	$L_p$ (m)	dia. $D_{n50}$	Peso, $W_{50}$ (kg)	$N_s^*$
4,30	0,13	1,977	0,51	33,83	0,62	617,6	5,53
4,55	0,13	1,870	0,53	34,59	0,61	581,0	5,68
4,79	0,13	1,773	0,56	35,31	0,60	549,3	5,83
5,04	0,12	1,687	0,59	35,99	0,59	521,6	5,97
5,29	0,12	1,608	0,62	36,63	0,58	497,1	6,10
5,53	0,12	1,536	0,65	37,24	0,57	475,3	6,23
5,78	0,12	1,471	0,68	37,81	0,56	455,8	6,35
6,03	0,11	1,410	0,71	38,35	0,55	438,3	6,46
6,27	0,11	1,355	0,74	38,86	0,55	422,4	6,57
6,52	0,11	1,304	0,77	39,35	0,54	408,0	6,68

$$\alpha = -0,028 + 0,045 A_t / (h'_c)^2 + 0,034 h'_c / h - 6 \cdot 10^{-9} A_t^2 / D_{n50}^4$$

B, cresta della scogliera

cot  $\beta$ , pendenza scogliera

g, accelerazione di gravità

storm surge (m)

escursione di marea (m)

$\rho_w$  (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  (kg/m<sup>3</sup>)

NOTE:

**MANTELLATA - TRONCO - MOLODI SOTTOFLUTTO**

---

### 13 INDICAZIONI SULLE OPERE MARITTIME PREVISTE

---

Le principali opere marittime prettamente portuali previste dal PRP sono (la Figura 13.1 mostra l'ubicazione delle sezioni tipo citate nel seguito):

- molo di sopraflutto del nuovo porto;
- molo di sottoflutto del nuovo porto;
- banchina di riva del nuovo porto.

Oltre a queste opere è opportuno che in sede di programmazione degli investimenti venga presa in considerazione la necessità di rifiorire la mantellata e consolidare il molo esistente sul Lungomare Todaro, previsto a protezione della nuova “Piazza a Mare”.

Ulteriore famiglia di opere costiere previste nel PRP riguarda la costruzione del nuovo arenile, preceduto dalla nuova “Passeggiata a Mare”, realizzati per colmata e ripascimento con apporto di materiale granulometricamente idoneo, a seguito del salpamento e della eventuale ricollocazione di scogliere soffolte a protezione dello stesso.

Per ciascuna delle opere portuali da realizzare si descrivono brevemente nel seguito le caratteristiche considerate e si forniscono indicazioni per gli approfondimenti e le verifiche da eseguire in sede di progettazione.

Per le altre opere, soprattutto per la colmata e per il nuovo arenile, si rimanda ai progetti di dettaglio, raccomandando, sin d'ora, la massima cura progettuale e le necessarie prove su modello fisico per l'ottimizzazione del profilo di spiaggia, della curva granulometrica e per la verifica dell'esigenza di sistemi di protezione della stessa.

#### 13.1.1 MOLO DI SOPRAFLUTTO

Il PRP prevede un molo di sopraflutto di lunghezza complessiva di 565m. Sarà formato da tre tratti di diversa lunghezza e direzione; il primo tratto si estende per circa 90m con una direzione di 234° rispetto al Nord, il secondo tratto è ruotato in senso antiorario di 50° rispetto al primo, ed ha una lunghezza di 253m, il tratto finale, inclinato in senso antiorario rispetto al precedente di circa 35°, ha una lunghezza di circa 139m.

La sezione tipo è rappresentata in Figura 13.2, ed è costituita da un'opera a scogliera con mantellata principale in massi artificiali di calcestruzzo. La sezione è così costituita:

- uno strato di imbasamento di pietrame;

- un corpo costituito da un nucleo in pietrame e da due strati successivi di massi naturali, rispettivamente di prima categoria (spessore circa 1,5 m) e di terza categoria (spessore 3,0 m). La pendenza della mantellata è 3/2 e berma a quota +4,5 m sul l.m.m. e larghezza di circa 5 m;
- un cassone cellulare in cemento armato antiriflettente a costituire il muro di sponda della banchina del molo. Le celle all'interno dei cassoncini potranno essere riempite con scogli naturali di adeguate dimensioni onde costituire così una struttura quanto meno possibile riflettente il moto ondoso;
- una sovrastruttura di coronamento che è composta da un getto ad "L" di calcestruzzo armato, che assolve anche sia la funzione di massiccio di carico che di muro paraonde. La parte carrabile si trova a quota +1,5 m mentre il muro paraonde ha una quota di sommità di +5,5 m.

In sede di progettazione appare altamente raccomandabile eseguire le opportune ulteriori verifiche relative a:

- assestamenti, cedimenti, stabilità complessiva manufatto+terreno in condizioni statiche e dinamiche in relazione alle caratteristiche dei terreni di fondazione, da accertare mediante specifiche indagini;
- stabilità dei massi di mantellata esterna ed interna, stabilità del muro paraonde, risalita del moto ondoso e tracimazione, erosione/scalzamento del fondale, etc., il tutto da definire mediante prove su modello fisico relative sia alla sezione corrente (mostrata in Figura 13.2) sia alla testata che, come è noto, costituisce nelle dighe a scogliera, una zona particolarmente delicata e più soggetta a danni.

### 13.1.2 MOLO DI SOTTOFLUTTO

Nel PRP, il molo di sottoflutto assume una configurazione ad "S", con una lunghezza totale di circa 250 m.

La sezione tipica sarà costituita da (cfr. Figura 13.3): uno strato di imbasamento di pietrame;

- un corpo costituito da un nucleo in pietrame e da due strati successivi di massi naturali, rispettivamente di prima categoria (spessore circa 1,5 m) e di terza categoria (spessore 3,0 m). La pendenza della mantellata è 3/2 con berma a quota +3,5 sul l.m.m. e larghezza di circa 5m;
- un cassone cellulare in cemento armato antiriflettente. Le celle all'interno dei cassoncini potranno essere riempite con scogli naturali di adeguate dimensioni onde costituire così una struttura quanto meno possibile riflettente il moto ondoso.
- una sovrastruttura di coronamento che è composta da un getto ad "L" di calcestruzzo armato, che assolve anche sia la funzione di massiccio di carico

che di muro paraonde. La parte carrabile si trova ha quota +1,5 m mentre il muro paraonde ha una quota di sommità di +4,5 m.

In sede di progettazione tutte le suddette indicazioni relative alla sezione tipica ipotizzata dovranno essere ottimizzate e verificate con modalità analoghe – tenuto conto delle diverse caratteristiche dell'opera – a quelle di cui si è detto per il molo di sopraflutto.

### 13.1.3 BANCHINA DI RIVA

L'ubicazione delle nuove banchine previste dal PPR è indicata in Figura 13.1, si prevede una quota rispetto il l.m.m. di +1,5 m, si sono supposte due tipologie differenti entrambe a riflessione attenuata, schematicamente rappresentate nella Figura 13.4 e nella Figura 13.5. In particolare è presumibile l'utilizzo di:

- banchine a cassoni cellulari in cemento armato, con fori e celle antirisacca;
- banchine a giorno su pali, con sottostante scarpata di massi naturali;

Si conferma anche a proposito delle banchine che in sede di progettazione le suddette indicazioni orientative dovranno essere approfondite e verificate, apportando le necessarie modifiche alla tipologia ed al dimensionamento delle sezioni tipiche schematicamente illustrate.

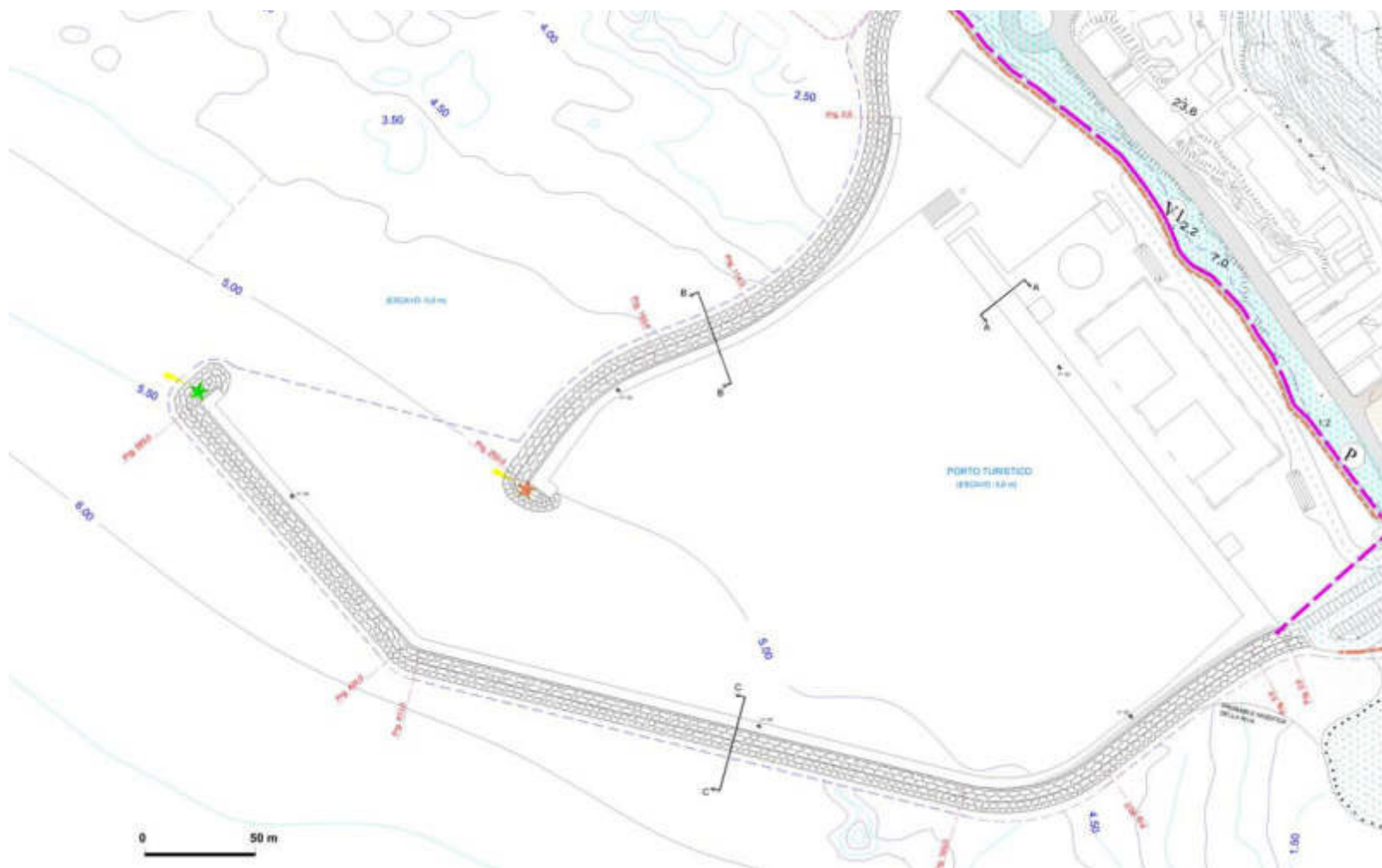


Figura 13.1 Opere di difesa e banchine – Ubicazioni sezioni tipo

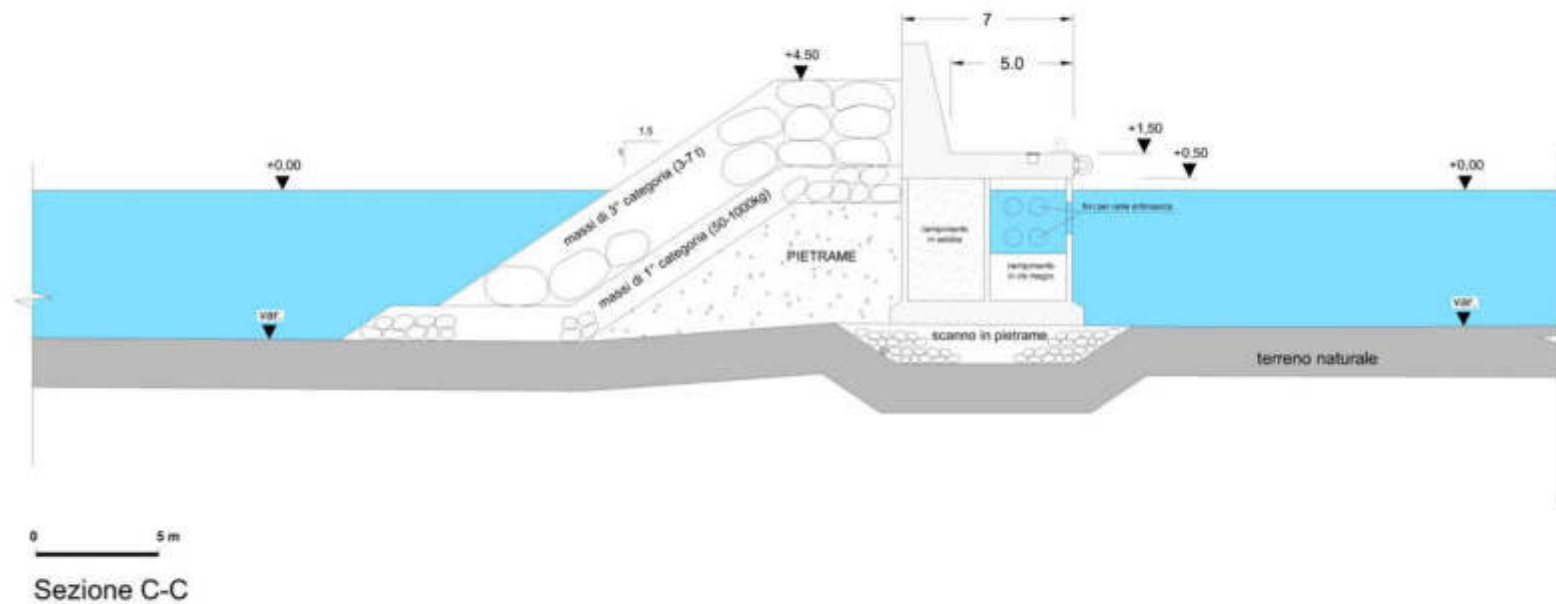


Figura 13.2 Molo di sopraflutto – Sezione tipo C-C

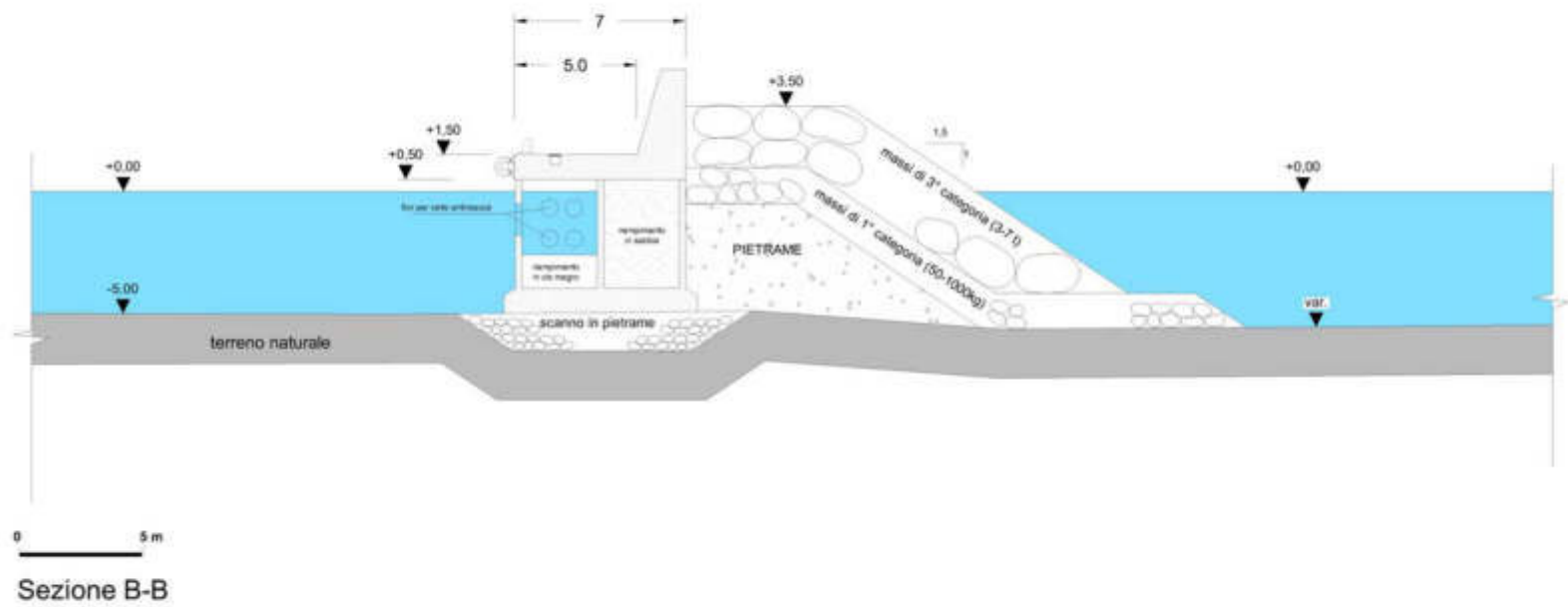
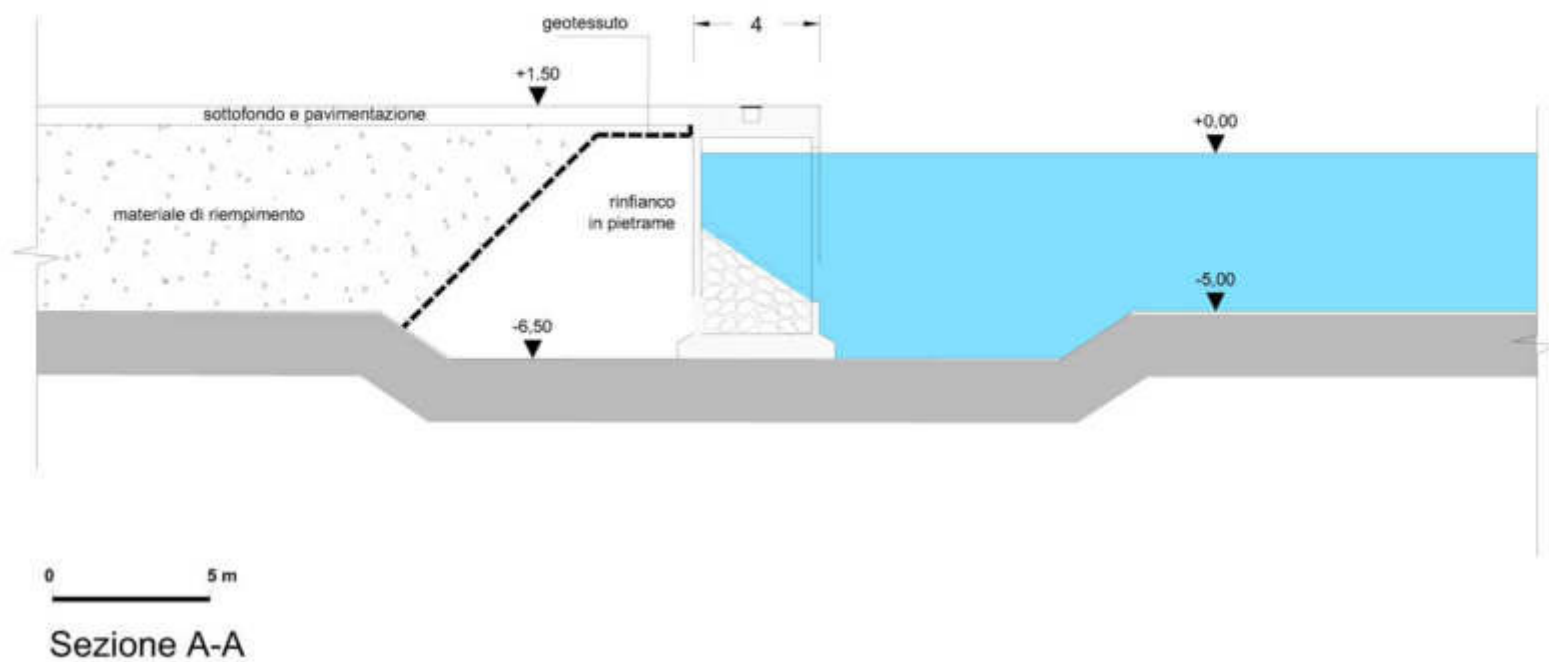


Figura 13.3 Molo di Sottoflutto – Sezione B-B





*Figura 13.4 Banchina di Riva – Sezione A-A – Ipotesi 1*

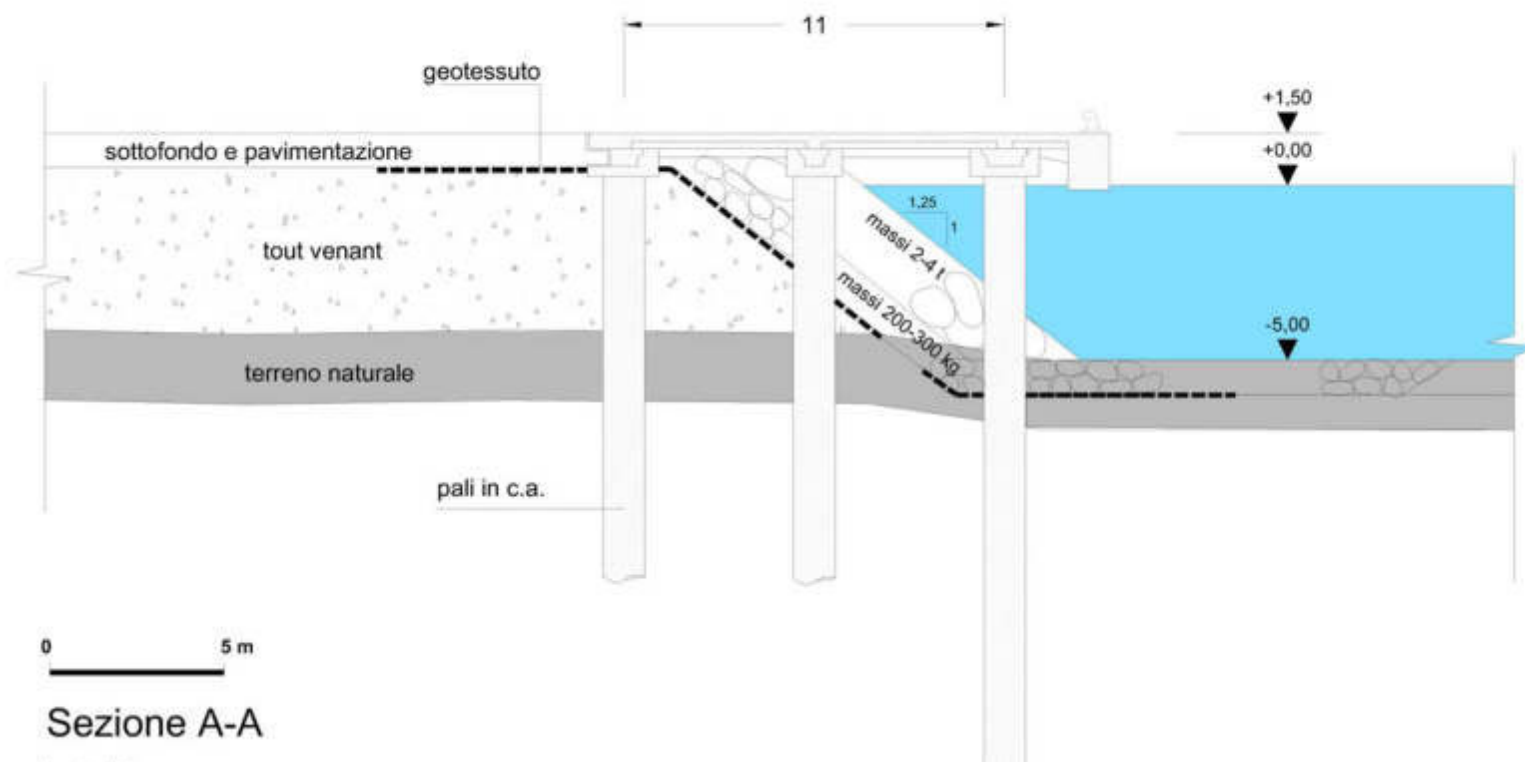


Figura 13.5 Banchina di Riva – Sezione A-A – ipotesi 2

### 14.1 INTRODUZIONE

La protezione e la stabilizzazione di un tratto di costa sono tra gli argomenti maggiormente considerati nel campo dell'ingegneria costiera.

Un'osservazione comune è che il profilo della spiaggia conserva una forma “media” che è caratteristica di quel tratto di costa.

L'esperienza inoltre fa registrare casi in cui fenomeni meteomarini particolarmente gravosi sconvolgono la costa e producono modifiche sostanziali spesso irreversibili.

In una spiaggia in sostanziale equilibrio, sebbene i cambiamenti stagionali nel clima delle onde provochino il movimento verso mare o verso terra della linea di riva in modo ciclico, con corrispondenti cambiamenti nella forma e nella pendenza media del profilo, lo scostamento complessivo dai valori medi è relativamente basso.

L'erosione della spiaggia, o il suo accrescimento, ed il cambiamento della topografia dei fondali attorno a valori medi sono fenomeni che occorrono naturalmente, ma l'intervento antropico nelle zone costiere, così come negli alvei delle aste fluviali, influenza notevolmente il movimento dei sedimenti sia lungo la spiaggia che trasversalmente a questa, alterando gli equilibri e cambiando irreversibilmente le forme del paraggio ed i contorni sommersi.

L'evoluzione della spiaggia è determinata dal vento, dalle onde marine, dalle correnti, dai livelli idrici, dalla natura del sedimento. Questi costituenti del litorale interagiscono e la loro azione viene disequilibrata dalle perturbazioni introdotte dalle strutture costiere, dai ripascimenti artificiali e dalle altre attività costruttive o distruttive.

### 14.2 ELEMENTI FISIOGRAFICI E DI CLIMA MARITTIMO DEL SITO

Il tratto costiero di nostro interesse è quello che allo stato attuale si è giudicato strettamente influenzato dalle strutture portuali in progetto. Questo segmento di litorale è sostanzialmente antistante l'abitato di Marina di Palma, che si sviluppa immediatamente a ridosso dello stesso, ed a levante dello stesso, a partire dalla sinistra idraulica della foce.

La frammentazione delle coste in unità fisiografiche al fine del loro studio è un fatto di notevole semplificazione per l'approccio all'identificazione dei problemi.

Si ricorda che l'unità fisiografica è una zona litoranea, in genere limitata da due capi, nell'ambito della quale si abbia, rispetto ai tratti di costa vicini, una certa indipendenza di rifornimento e di distribuzione dei materiali alluvionali.

L'analisi della documentazione disponibile, sia pubblicata che gli studi specificatamente condotti<sup>9</sup>, hanno consentito la definizione macroscopica dell'unità fisiografica principale e delle sue caratteristiche (cfr. Figura 14.1).

---

<sup>9</sup> Cfr. “Indagini Geomorfologiche”, contenute in “Studio Sedimentologico”, della stessa serie propedeutica al P.R.P.. Per le pubblicazioni rilevanti, tra le altre, “Atlante delle Spiagge Italiane”, tavv. 1/100.000, CNR (1999).

Si è così visto come il segmento di costa in attenzione è un tratto sabbio-ghiaioso di c.ca 2 km, inserito nel più ampio contesto dell' "unità fisiografica principale" identificabile tra Punta Bianca e Punta Tenna ed al cui interno si trova la foce del fiume Palma (cfr. Figura 14.2).

Morfologicamente l'unità appartiene ai morfotipi della COSTA ARTICOLATA. Essa è caratterizzata da rilievi montuosi o collinari affacciati direttamente sul mare. Il profilo sottomarino comunemente riproduce quello subaereo e, meno frequentemente, esibisce piattaforme di erosione. Il contatto terra – mare è eventualmente rappresentato da seni di spiaggia comunemente in ghiaia. Gli apporti solidi provengono da corsi d'acqua ad alto gradiente e da accumuli di frana e crollo della parete dei rilievi.

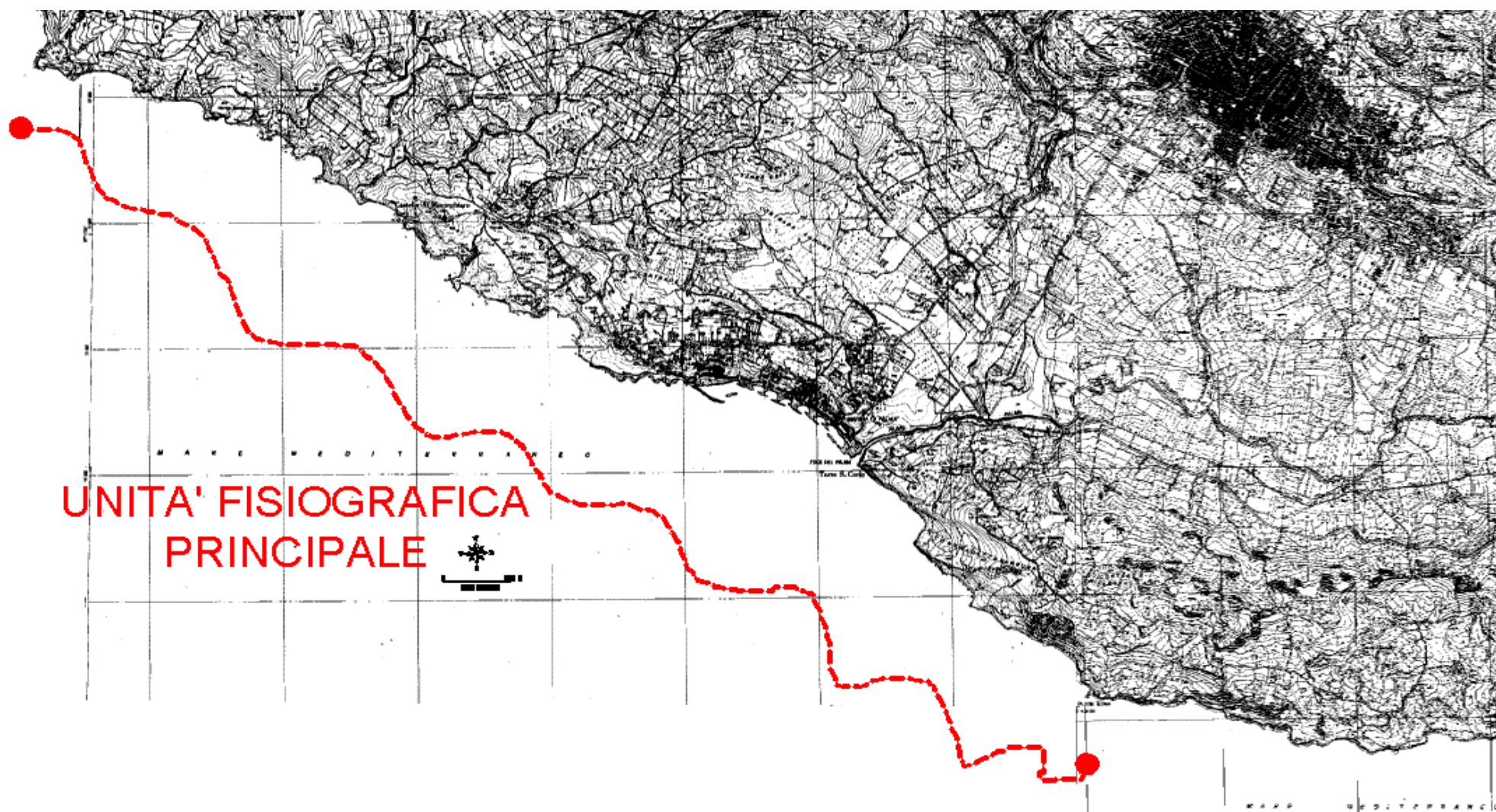
Tra gli elementi di sicuro interesse per una corretta interpretazione degli eventi dinamici relativi al tratto di costa in oggetto, si devono evidenziare (si considera il sito di Marina di Palma come base geografica di riferimento):

- la presenza, a circa 1 km ad Est dall'opera foranea esistente, della foce del Palma (Bacino 120 km<sup>2</sup>);
- la presenza, a circa 11 km ad Ovest, della foce del Naro che si può ritenere poco influente ai nostri fini;
- la presenza a circa 21 km verso Est della foce del Salso che si può ritenere poco influente ai nostri fini.

Sotto il profilo del clima marittimo del sito, nell'apposita sezione del presente studio, Capitolo 7 "Trasformazione del clima d'onda verso riva", si evince che il treno d'onda incidente sulla spiaggia tende fortemente ad approssimarsi alla normale alla riva.

Dopo la sua rottura, fase in cui libera energia che serve per mettere in moto materiale di fondo, il treno d'onda prosegue trasportando tale materiale secondo la componente di velocità risultante lungo la riva. L'equilibrio si ottiene quando, in un determinato tratto di costa, le componenti in un verso ed in quello opposto hanno un effetto praticamente paritario.

Qualsiasi turbamento del campo dell'onda, realizzato a mezzo di interventi antropici che hanno effetti rifrattivi e diffrattivi, provoca una variazione nelle condizioni di frangimento (angolo di incidenza dell'onda, altezza dell'onda al frangimento, profondità di frangimento) e quindi una variazione nelle condizioni di trasporto solido che influiscono sull'evoluzione della linea di riva per un tratto più o meno ampio.



*Figura 14.1 Unità fisiografica principale*





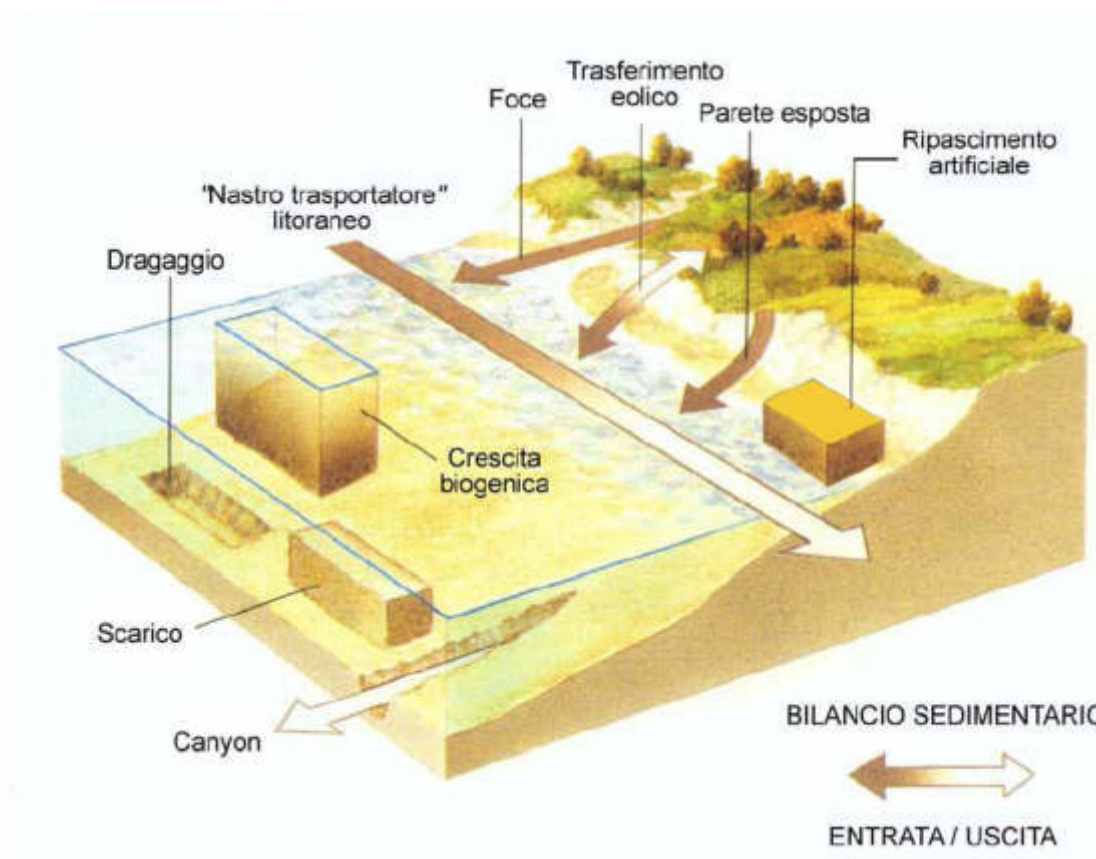
*Figura 14.2 Ortofoto con indicazione dell'unità fisiografica in studio*

### **14.3 STATO DELLA COSTA**

Il riconoscimento dell'unità fisiografica è indispensabile ai fini della ricostruzione del bilancio sedimentario. Ai fini di una corretta anamnesi è altrettanto fondamentale ricostruire con la massima precisione possibile la storia dei fenomeni sedimentari che hanno interessato il litorale, per un periodo il più lungo possibile, in funzione del livello quanti-qualitativo della base dati disponibile.

L'analisi dello stato della costa dell'unità fisiografica si è potuta compiere rispetto ai dati storici relativi all'unità principale, passando poi ad un dettaglio superiore per l'area in interesse, a mezzo di una valutazione delle posizioni storiche della linea di riva.

Notizie storiche delle situazioni in atto negli ultimi decenni possono evincersi dalle seguenti fonti.



#### 14.3.1 STATO DEI LITORALI ITALIANI AL 1968 - COMMISSIONE DE MARCHI

Nell'ambito dei lavori della Commissione Interministeriale per lo Studio della Sistemazione Idraulica e della Difesa del Suolo, nota come "Commissione De Marchi", la V Sottocommissione, presieduta il Prof. Guido Ferro, ha operato sul tema "Difesa dal Mare dei Territori Litoranei".

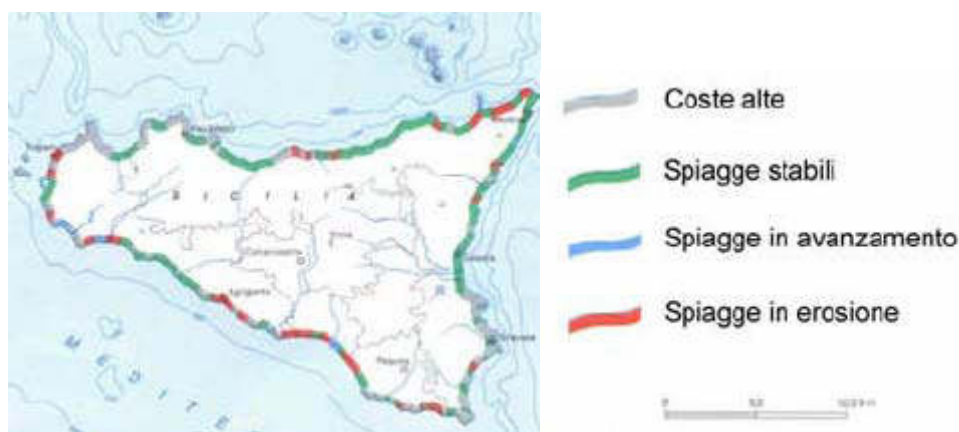
Col supporto degli uffici del Genio Civile per le Opere Marittime, sono state prodotte 39 carte in scala 1:250.000, ricavate dalle carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina, che coprono l'intero territorio nazionale e rappresentano lo stato del fenomeno erosione e delle relative opere di difesa al 1968-69 (C.I.S.S.I.D.S., 1974).



*Figura 14.3: Rapporto "De Marchi" 1970 - situazione al 31/10/1968*

#### 14.3.2 STATO DEI LITORALI ITALIANI SECONDO L'ATLANTE DELLE SPIAGGE CNR

L'Atlante delle Spiagge Italiane del Prof. Giuliano Fierro (C.N.R., M.U.R.S.T., 1997) consiste di 108 Fogli in scala 1:100.000 in cui sono sintetizzate le ricerche finanziate dal CNR e dal MURST nel periodo 1985-1997. Si tratta quindi di una cartografia redatta dai 15 ai 30 anni dopo quella della Commissione De Marchi.



#### 14.4 EVOLUZIONE STORICA DELLA LINEA DI RIVA

L'indagine cartografica condotta, le ricerche documentali, insieme al reperimento di tutte le aerofotografie fatte sul sito per fini cartografici ha consentito la ricostruzione storica qualitativa delle posizioni di battigia nonché un inventario ed una identificazione temporale della successione degli interventi antropici, nonché del riscontro qualitativo degli effetti conseguenti sull'evoluzione della linea di riva.

Sono stati reperiti gli originali di aerofotogrammi adiacenti di strisciate aeree relative a:

- A) Volo del novembre 1977, produzione S.A.S. Palermo
- B) Volo del 1979, produzione ENEL



C) Volo del 1987, produzione C.G.R. Parma

D) Volo del 23/07/88, produzione S.A.S. Palermo

E) Ortofoto del 1998, produzione: Assessorato Regionale Territorio ed Ambiente.

Sono state quindi effettuate le elaborazioni grafiche opportune per il montaggio dei vari fotogrammi e per la restituzione degli stessi a scala media uniforme, e ciò al fine di poter effettuare un confronto visuale più agevole tra le varie situazioni nel corso del tempo (cfr. Allegato D).

Si deve ricordare che le condizioni istantanee della spiaggia sono strettamente dipendenti dalla stagione e dalle condizioni meteomarine. Di ciò si è tenuto conto nell'analisi e nel confronto degli aerofotogrammi.

Si è potuto quindi redigere un elaborato dove venissero sintetizzate le posizioni storiche della linea di riva (cfr. Allegato D).

#### 14.5 EVENTI ANTROPICI ED EFFETTI PRODOTTI SULLA RIVA

Come risulta qualitativamente evidente il tratto costiero in esame ha subito delle forti evoluzioni, essendo stata irreversibilmente abbandonata la situazione originaria di equilibrio di almeno sessanta anni or sono, in quanto l'attività antropica ha influito sul trasporto solido litoraneo con la costruzione di opere costiere.

- la realizzazione di sei scogliere in prossimità della linea di riva e parallelamente a questa con la conseguente intercettazione degli apporti solidi provenienti da SE (in periodo antecedente all'anno 1977).

- La realizzazione della diga foranea del porto (1987/88 c.ca): questa intercetta i più frequenti flussi di trasporto provenienti da NW. La darsena protetta dall'opera foranea per i sedimenti trasportati dal vettore idraulico marittimo diventa un *coulde sac*, che causa una caduta repentina delle velocità del vettore idraulico marittimo nelle zone d'ombra dell'opera stessa; a seguito di ciò avviene la sedimentazione del materiale trasportato; tale situazione ha comportato il patologico grave interrimento del sito portuale, fenomeno tuttora in atto.

- A seguito dell'esame visuale dell'Allegato D si può quindi affermare quanto segue:

- **fino al 1977** (cfr. fig. 4.1 dell' "allegato D")

##### *Le opere*

Di fronte al borgo oggi denominato Marina di Palma risultano già realizzate sei scogliere frangiflutti subparallele alla riva lungo il tratto di costa situato tra 300 e 1000 m a Nord-Ovest della foce del fiume Palma.

##### *Lo stato della costa*

Si presenta una situazione diversa tra i tratti armati, dotati di scogliere di protezione e quelli liberi: nei primi è presente la spiaggia sedimentaria, con una profondità variabile da qualche metro a c.ca 100 m in corrispondenza della foce del fiume Palma ed in cui risulta evidente come le scogliere attivino efficacemente la loro funzione di trappole della sabbia.

Nel secondo, la costa presenta ancora una situazione di sostanziale equilibrio per la tipologia morfologica in oggetto.

La foce del F. Palma, sostanzialmente perpendicolare alla linea di riva, non denuncia situazioni di squilibrio meteomarinico che determinino riconoscibili prevalenze di trasporto solido litoraneo nell'uno o nell'altro verso.

▪ **dal 1977 al 1979** (cfr. fig. 4.2 dell'allegato D)

*Le opere*

Nel periodo non sono state realizzate nuove opere.

*Lo stato della costa*

Progredisce il deposito sabbioso immediatamente a ridosso delle scogliere. Si conferma lo stato di sostanziale equilibrio della riva dell'unità fisiografica.

▪ **dal 1979 al 1987** (cfr. fig. 4.3 dell'allegato D)

*Le opere*

Prosegue la costruzione delle opere di difesa; vengono realizzate tre nuove scogliere subparallele alla riva, due in prossimità della foce del Palma ed una a ponente. Risulta in fase di realizzazione il molo di sopraflutto ad ovest dell'abitato.

*Lo stato della costa*

Pur in assenza di certezza documentale, si può ritenere che inizialmente sia stata attivata la costruzione del molo a ponente dell'abitato. Questa opera ha innescato tipici fenomeni deposizionali a tergo che hanno coinciso con l'incipiente erosione del segmento di riva immediatamente adiacente alla sponda destra della foce del F. Palma, fino a quel momento stabile, o in leggero avanzamento. Risulta infatti evidente dalla ripresa aerea l'insabbiamento dell'area compresa tra il costruendo molo e le vicine scogliere e il forte arretramento a ridosso della foce.

Tale arretramento della spiaggia a ridosso della foce del F. Palma, seppur modesto, avrà determinato la decisione di costruire altre due scogliere frangiflutti a ponente delle precedenti.

Il sostanziale cambiamento della situazione idrodinamica costiera viene sancito dalla variazione di direzione della foce del fiume Palma che progressivamente, proprio per la presenza di queste ultime scogliere, si sposta verso mezzogiorno.

▪ **dal 1987 al 1988** (cfr. fig. 4.4 dell'allegato D)

*Le opere*

Vengono realizzati 180m c.ca del molo di sopraflutto.

#### *Lo stato della costa*

la situazione permane sostanzialmente identica a quella prima descritta, visto il breve lasso temporale tra le due riprese.

- **dal 1988 al 1998** (cfr. fig. 4.5 dell'allegato D)

#### *Le opere*

Il molo di ponente è ultimato con la definizione della testata (ulteriori 90m c.ca del secondo tratto) e si presenta come nella configurazione odierna; siamo quasi a questi giorni e non si sono effettuate altre opere.

#### *Lo stato della costa*

Il prevedibile interrimento completo a ridosso del molo è in fase molto avanzata: l'avanzamento della spiaggia in tale punto rispetto al 1977 è pari a c.ca 100m e sta ancora progredendo.

La foce del F. Palma è definitivamente disposta verso mezzogiorno e la situazione appare stabile.

L'intera costa dell'unità, al di fuori di quella tra la foce del fiume e il molo di ponente, interessata dalle opere descritte, continua ad apparire in sostanziale equilibrio.

I fatti dinamici sopra esposti sono rappresentati nella figura 14.6, in cui è stata graficizzata la posizione storica della linea di riva, che riprende le evidenze delle foto aeree e della cartografia che è stato possibile reperire.

### **14.6 ALTRI STUDI ED INDAGINI AI FINI DELL'ANAMNESI**

La situazione riscontrata con l'esame delle caratteristiche dell'unità fisiografica e con l'evoluzione storica della linea di riva ha fatto ritenere indispensabile completare i livelli conoscitivi con:

- Studio Idrologico del F. Palma;
- Studio Sedimentologico.

E' stato ritenuto importante approcciare allo studio del fenomeno di evoluzione della linea di riva con le conoscenze doverosamente estese agli aspetti sedimentologici, questi ultimi strettamente connessi al comportamento del bacino imbrifero inciso dal F. Palma, in termini di perdita di suolo e di trasporto di tale suolo al mare.

#### **14.6.1 APPORTO SOLIDO DEL FIUME PALMA**

In sintesi si riportano i risultati dello "Studio Idrologico del F. Palma" a cui si rimanda per una descrizione esaustiva:

- è stata stimata una perdita di suolo anno del bacino idrografico in esame che è risultata pari a circa 62.763 t; quindi supponendo un peso specifico del materiale

trasportato di  $2,5 \text{ t/m}^3$  si è stimato un volume di perdita di suolo annuo pari a c.ca  $25.000 \text{ m}^3/\text{anno}$ .

- secondo le applicazioni numeriche da letteratura (V. Ferro et al.), si è stimata quota della perdita di suolo che si trasforma in trasporto solido alla foce, risultata in c.ca  $5.000 \text{ m}^3/\text{anno}$ .

#### 14.6.2 DATI SEDIMENTOLOGICI

I sedimenti di superficie possono fornire informazioni riguardanti l'energia dell'ambiente, i processi a lungo termine e i movimenti di materiale, come i percorsi di trasporto del sedimento, le aree d'origine e quelle di destinazione.

Lo “Studio Sedimentologico”, a cui si rimanda per maggiore approfondimento, è stato eseguito sulla base delle considerazioni geo-morfologiche e sulle risultanze dell'analisi granulometrica e mineralogica eseguita su una serie di campioni opportunamente prelevati.

I campioni di sedimento sono stati prelevati nella cosiddetta “fascia attiva” soggetta alla naturale evoluzione del profilo per l'azione marina.

Utilizzando le tecniche e le analisi tipiche della sedimentologia costiera sono state redatte apposite carte tematiche, che riportano la distribuzione spaziale degli indici sedimentologici (si veda Figura 14.4).

Lo studio ha confermato i pattern energetici per il trasporto nella sub unità fisiografica in attenzione, evidenziando lo status di zona soggetta a stato erosivo con effetti di accumulo dovuti esclusivamente alle scogliere presenti, relativamente a materiale proveniente in grande parte dal territorio inciso dal F. Palma e dallo stesso trasportato all'estuario, nonché, anche se in minima parte, dalla stessa erosione, dovuta dall'azione del mare e del vento, dei fronti rocciosi a mare.

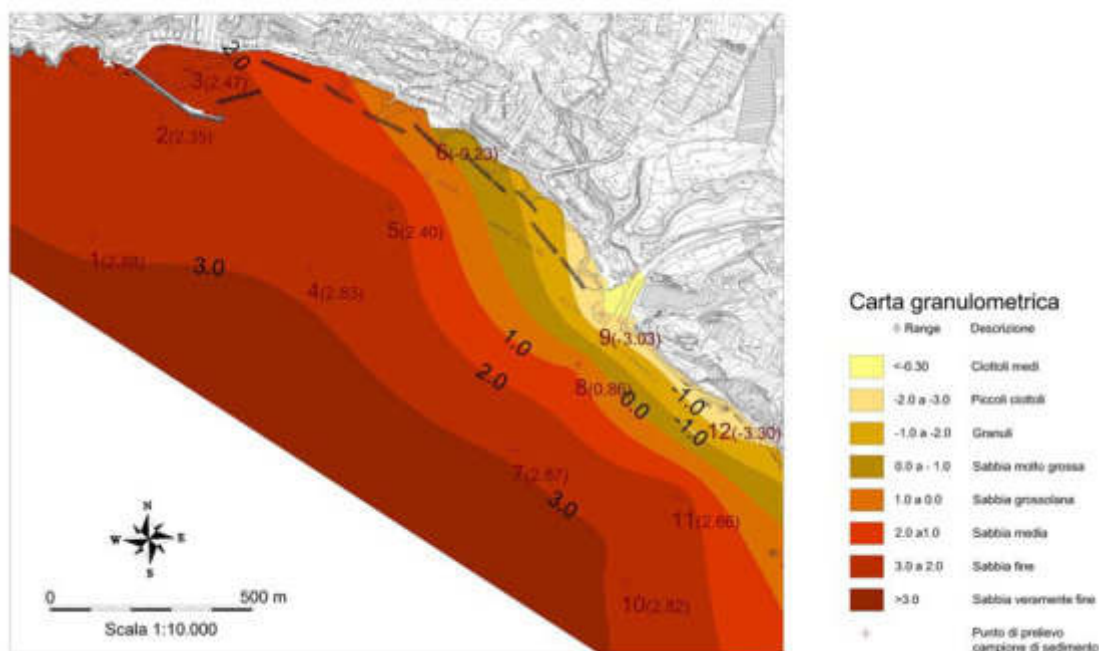


Figura 14.4 Carta Granulometrica tratta dallo "Studio Sedimentologico"(fuori scala)

#### 14.7 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SULLA SITUAZIONE IN ATTO

L'anamnesi compiuta per le coste in questione fa rilevare quanto segue:

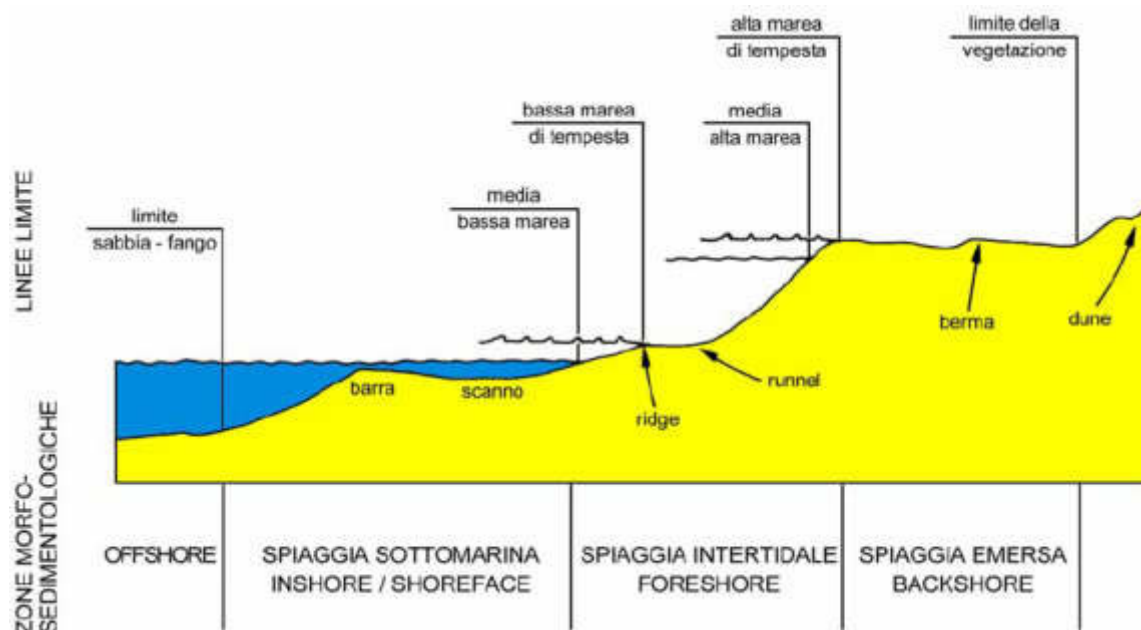
- l'unità fisiografica presenta una conformazione di "Costa Articolata", con preponderante presenza costiera di affioramenti rocciosi; sono quindi scarse le spiagge sabbiose di formazione naturale, ove piuttosto si assiste alla formazione di depositi di sedimenti per motivi morfodinamici in piccole insenature (seni), oltre che per cause dovute agli interventi antropici;
- la situazione fisiologica è quella della modellazione della costa a causa dell'azione eolica e marina, ove i fronti rocciosi subiscono erosioni al piede e conseguenti crolli;
- ai fini dell'analisi dei bilanci sedimentari risulta rilevante la presenza della foce del F. Palma che contribuisce agli apporti;
- tale situazione di endemica e fisiologica erosione, in prossimità dell'abitato di Marina di Palma, è stata contrastata con l'apposizione di difese rigide (scogliere) che hanno determinato la crescita degli accumuli sedimentari a tergo delle stesse.

Il tratto di costa in attenzione si può definire *a prevalente trasporto trasversale*. Lo status ante operam era infatti quello di litorali in sostanziale assenza di spiagge di sedimenti, essendo tuttalpiù presente solo una fascia di materiali provenienti dal deposito nei seni di materiale fluviale di pezzatura grossolana e dai crolli dei fronti rocciosi, successivamente rimaneggiati dall'azione del mare.

I vari squilibri antropici apportati nei decenni hanno sempre condotto ad un nuovo punto di equilibrio, legato proprio alla caratteristica traspo-deposizionale che interessa tale unità fisiografica. Così le scogliere, o il molo, hanno funzionato tipicamente da trappole per i sedimenti che, dopo il frangimento delle onde, non riuscivano a trovare nuovamente la via verso le acque più profonde.

Non si rilevano quindi fenomeni evolutivi a lungo termini ulteriori rispetto all'arretramento fisiologico a ponente del F. Palma, essendo sostanzialmente stabilizzata la situazione a levante.

I modelli matematici fin oggi in uso sono una soluzione analitica in forma chiusa di una equazione differenziale semplificata identificante l'evoluzione della linea di riva. A causa delle troppe semplificazioni utilizzate per la determinazione della soluzione in forma chiusa, le soluzioni analitiche servono per analisi preliminari, e quindi per identificare tendenze evolutive e legami e dipendenze di massima tra le varie grandezze in gioco.



### 15.1 PROCESSI DI TRASPORTO TRASVERSALE DI SEDIMENTI

Si è visto come l'unità fisiografica in oggetto sia interessata da fenomeni di trasporto pressoché trasversali alla linea di riva.

Ciò comporta che le azioni fondamentali nella modellazione dei profili di spiaggia siano soprattutto dovute agli eventi di tempesta.

La realizzazione di opere costiere in tali situazioni comporta la valutazione delle effettive capacità di refluentamento che i sedimenti hanno lungo il profilo trasversale della spiaggia.

#### 15.1.1 CENNI SULLO SCHEMA TEORICO

I modelli matematici che simulano l'erosione dovuta a tempeste sono oggi basati sulla concettualizzazione dell'equilibrio di profilo trasversale della spiaggia.

Tali modelli assumono che il profilo di spiaggia evolverà verso una forma d'equilibrio in risposta ai cambiamenti dei livelli idrici ed all'azione ondosa e che la portata di sedimenti in gioco è proporzionale alle differenze esistenti tra ogni tratto di profilo nel tempo rispetto a quello di equilibrio.

Ciò viene quantificato in termini di "eccesso" di dissipazione energetica per unità di volume nella zona dei frangenti. La dissipazione energetica d'equilibrio viene data dalla forma:

$$D_* = \frac{5}{24} \rho g^{\frac{3}{2}} \kappa^2 A^{\frac{3}{2}}$$

dove il parametro del profilo di equilibrio  $A$  è in attinenza alla nota equazione del profilo di equilibrio:

$$h = Ay^{2/3}$$

#### 15.1.2 CONSIDERAZIONI GENERALI

Ritenendolo non proficuo, non si è ritenuto pertinente all'attuale livello di studio investigare analiticamente tutte le possibili situazioni di effetti delle tempeste sull'equilibrio del profilo di riva dell'unità fisiografica in attenzione, seppur modificato dalla previsione delle opere del PRP.

A suffragare tale posizione valgano le seguenti considerazioni.

Così come già avvenuto negli ultimi decenni per gli interventi fin qui condotti nel sito, le opere previste nel PRP, che hanno duplice natura sposteranno l'equilibrio sedimentario trasversale verso nuovi profili che si può già da ora prevedere non particolarmente preoccupanti.

Infatti le opere previste dal PRP atterranno a:

- A. nuova organizzazione del fronte litorale col salpamento e la ricollocazione eventuale delle attuali scogliere, ai fini della formazione della nuova passeggiata a mare e del nuovo arenile;
- B. costruzione delle nuove strutture portuali.

Gli effetti qualitativi di queste opere sul profilo di riva, che verrebbero solo confermati dalle analisi calcolistiche analitiche a questo livello di dettaglio, sarebbero quelli di raggiungere una nuova configurazione stabile ed in equilibrio, dove:

- le opere sub A hanno una ottima possibilità di essere mantenute nel tempo, se correttamente progettate anche con l'ausilio di opportuna modellazione fisica;
- le opere sub B comporteranno:
  - un avanzamento della linea di riva a ridosso della radice del sopraflutto con conseguente ulteriore modesta rotazione della foce del fiume Palma verso SE;
  - contribuiranno al mantenimento dell'arenile previsto a levante del sottoflutto;
  - la riduzione degli effetti di interrimento a ridosso del moletto preesistente, a seguito del relativo impoverimento di sedimenti non pelitici depositati a ridosso del sopraflutto;



- effetti trascurabili sul tratto di litorale a levante della foce del F. Palma che rimarrà sostanzialmente nell'attuale posizione di equilibrio.

## 15.2 PROCESSI DI TRASPORTO LITORANEO DEI SEDIMENTI

Si è voluto investigare con attenzione gli effetti delle opere previste dal PRP ipotizzando una componente di trasporto litoraneo superiore rispetto a quella effettivamente riconosciuta. Si è cioè desiderato conoscere quali meccanismi macroscopici possano interagire nell'ipotesi di infrastrutturazione prevista, qualora si assistesse ad una sostanziale variazione del vettore idraulico marittimo del paraggio e delle stesse caratteristiche traspos-deposizionali dell'unità fisiografica.

Si è ritenuta utile questa elaborazione per meglio comprendere i fenomeni deposizionali "a regime" in un più ampio ventaglio di ipotesi, seppur avvertendo che le condizioni al contorno come il modello matematico utilizzato in tale ipotesi non aderiscono completamente alla realtà investigata, e che i risultati, ancor più dell'usuale, devono essere considerati solo per evidenziare *trends* evolutivi di larga massima.

### 15.2.1 CENNI SULLO SCHEMA TEORICO

Tra i primi Autori a sviluppare una teoria di risposta della linea di riva sotto l'azione del moto ondoso vi fu Pelnard-Considere (1956). L'ipotesi di base è che il profilo della spiaggia si muove parallelamente a se stesso. In tale ipotesi un qualsiasi punto è sufficiente a specificare la posizione dell'intero profilo rispetto una linea di origine.

Una seconda assunzione riguarda il fatto che la sabbia viene trasportata lungo la spiaggia all'interno di uno spazio fisico determinato da due precise posizioni altimetriche: il limite verso riva è costituito dall'elevazione massima della berma attiva, il limite verso mare è costituito dalla profondità oltre la quale non si registra alcun movimento (profondità di blocco).

Ancora si specifica che l'espressione per la stima del trasporto solido *longshore* totale è una funzione dell'altezza dell'onda al frangimento e della direzione del fronte della stessa. Ciò fa sì che un tale modello non potrebbe essere utilizzato in quei casi in cui le onde frangenti non siano la causa principale del trasporto *longshore*, ma piuttosto lo siano il vento, le correnti o altre cause di spostamento.

Ultima assunzione importante riguarda il fatto che nella spiaggia in esame deve essere instaurata una tendenza evolutiva precisa, ovvero l'esistenza di uno stato di transizione e non piuttosto un sostanziale equilibrio della stessa che comporti fluttuazioni periodiche o stagionali attorno a valori medi.

### 15.2.2 MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO

La modellazione numerica per lo studio dell'evoluzione della linea di riva in funzione degli interventi antropici trova oggi applicazione in tutte le fasi preposte alla realizzazione, ovvero nei processi di pianificazione, di successiva progettazione esecutiva e di valutazione delle risposte di progetti localizzati di difesa delle spiagge.

La possibilità di confrontare a basso costo il comportamento di diverse ipotesi di progetto senza dover accedere alle costose prove su modello, se non che per problemi di particolare delicatezza ed importanza, consente di analizzare con maggiore attenzione le

risposte delle opere costiere, lasciando un più modesto margine ai danni generati da previsioni sbagliate e da effetti non considerati.

A seconda della fase progettuale, se di pianificazione propedeutica o di progettazione esecutiva, il modello numerico può essere utilizzato con scopo di indirizzo di massima o con scopo progettuale avanzato.

L'uso del modello a scopo di indirizzo di massima richiede un minore sforzo per la definizione delle ipotesi progettuali e consente lo studio ricognitivo del fenomeno in attenzione, la sua migliore definizione nonché l'identificazione delle potenziali alternative di progetto.

Nell'uso del modello a scopo progettuale avanzato, l'obiettivo è ottenere una corretta evoluzione della linea di riva tanto quanto la quantità e la direzione del trasporto di sabbia *longshore*. In tal caso la prassi operativa prevede la sistematica raccolta dei dati, il settaggio del modello, la calibrazione dello stesso e la verifica delle risposte, ed infine un intenso lavoro di valutazione delle alternative di progetto fino all'ottimizzazione della scelta finale effettuata.

#### 15.2.2.1. EQUAZIONI DI GOVERNO

L'equazione che governa i fenomeni di evoluzione della linea di riva nelle spiagge sabbiose è formulata sulla base del criterio della conservazione dei volumi di sabbia.

Lo spostamento di una quantità di sabbia attraverso una certa sezione trasversale alla linea di riva e quindi la conseguenziale variazione di volume nella sezione è data da:

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C)$$

e rappresenta l'ammontare netto di sabbia che entra o esce dai quattro lati della sezione in esame.

Un contributo alla differenza di volume esiste se c'è una differenza  $\Delta Q$  nella trasporto di sabbia lungo la linea di riva,  $Q$ , che attraversa le facce della sezione in questione (cella).

Questa variazione di volume netto è :

$$\Delta Q \Delta t = \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \Delta x \Delta t$$

Un altro contributo può venire da un aggiunta esterna o da un inghiottitoio in loco della sabbia, e ciò produrrebbe un'altra variazione di volume pari a  $q \Delta x \Delta t$ .

La somma dei contributi eguagliata alla variazione totale dei volumi fornisce la:

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) = \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \Delta x \Delta t + q \Delta x \Delta t$$

Da questa, al limite per  $\Delta t$  tendente a 0, proviene l'equazione che governa la variazione della posizione della linea di riva (1):

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left[ \frac{\partial Q}{\partial x} + q \right] = 0 \quad (1)$$

Per risolvere la (1) devono essere noti Q, q, D<sub>B</sub> e D<sub>C</sub>.

La formula utilizzata per la previsione del trasporto solido lungo la linea di riva è la (2):

$$Q = (H^2 C_g)_b \left[ a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_b \quad (2)$$

dove:

H , altezza d'onda

C<sub>g</sub>, celerità di gruppo

b, indicativo delle condizioni di rottura dell'onda

θ<sub>bs</sub>, angolo dell'onda frangente rispetto la linea di riva

a<sub>1</sub> e a<sub>2</sub> sono parametri adimensionali dati dalle :

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - p) 1.416^{5/2}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - P) \tan \beta \cdot 1.416^{7/2}}$$

dove:

K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, coefficienti empirici, utilizzati come parametri di calibrazione

ρ<sub>s</sub> , densità della sabbia (che si assume pari a 2,65 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup> per sabbia di quarzo)

ρ , densità dell'acqua (pari a 1,03 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup> per l'acqua di mare)

p, porosità del letto di sabbia (assunta pari a 0,4)

tan β, pendenza media del fondo dalla linea di riva alla profondità limite del trasporto solido attivo.

Per i valori da considerare per K<sub>1</sub> si rimanda a Kraus et al. (1982). Il secondo termine della (2) è utilizzato per descrivere l'effetto di un altro meccanismo di generazione del trasporto solido *longshore*, ovvero il gradiente *longshore* dell'altezza d'onda frangente. Questo contributo fu introdotto nella modellazione numerica della evoluzione della linea di riva da Brampton e Osaza (1980). Tale assunzione migliora decisamente le prestazioni del modello matematico soprattutto in prossimità delle strutture, ove gli effetti della diffrazione

producono effetti sostanziali nella variazione dell'altezza dell'onda di rottura, su un tratto considerevole di spiaggia.

Si può ancora dire sui “parametri di trasporto”  $K_1$  e  $K_2$ , vista l'importanza che rivestono nella calibratura del modello matematico, che  $K_1$  controlla la scala temporale dell'evoluzione simulata, tanto quanto la quantificazione dei volumi che interessano il trasporto solido *longshore*. Il valore di  $K_2$  è tipicamente da 0,5 a 1 volte il valore di  $K_1$ .

La quantità  $q$  nella (1) rappresenta il contributo di una sorgente o di un inghiottitoio di sabbia nel sistema. Tipiche sorgenti sono i fiumi e le falesie, mentre gli inghiottitoi sono le baie, le insenature e gli ingressi dei canali.

Anche l'azione del vento sul versante terrestre, può determinare degli apporti sabbiosi. La simulazione di tali effetti può essere effettuata, nel modello matematico che utilizziamo, a mezzo di un apporto sabbioso (*beach fill*) positivo o negativo.

La larghezza del profilo sul quale ha luogo il trasporto *longshore* è un dato necessario per la stima dell'ammontare di sabbia (come percentuale del totale) che aggira la presenza di pennelli o di moli.

Dacché la maggior parte dei movimenti di sabbia si ha nella zona dei frangenti, tale distanza è approssimativamente uguale alla larghezza della zona di frangimento, strettamente dipendente dall'onda incidente e dalla sua altezza di rottura.

Nel modello utilizzato, l'algoritmo richiede una profondità limite di trasporto attivo definita con :

$$D_{LT} = \frac{1.27}{\gamma} (H_{1/3})_b$$

dove:

1.27 , fattore di conversione tra  $H_{1/10}$  e l'altezza d'onda significativa  $H_{1/3}$

$\gamma$  , indice di rottura, rapporto tra altezza d'onda e profondità dell'acqua al frangimento

$(H_{1/3})_b$ , altezza dell'onda significativa al frangimento

Si deve osservare che  $D_{LT} \ll D_c$ , essendo  $D_c$  la citata profondità di blocco, eccetto nel caso di mareggiate ad altezza d'onda notevole.

Il modello utilizza inoltre un'altra profondità caratteristica, denominata “profondità massima del trasporto *longshore*”,  $D_{LT0}$ , per calcolare la pendenza media della spiaggia,  $\tan \beta$ , presente nell'equazione (2).

$$D_{LT0} = (2.3 - 10.9 H_o) \frac{H_o}{L_o}$$

dove:

$H_o/L_o$  , ripidità dell'onda

$H_0$  , altezza dell'onda significativa al largo

$L_0 = gT^2/2\pi$  , lunghezza dell'onda significativa al largo

L'equazione dell'evoluzione della linea di riva non richiede specifiche sul profilo del fondale, giacché si assume che il profilo si mantenga, muovendosi, parallelo a se stesso. Tuttavia la definizione di tale profilo di fondo diviene necessaria per la determinazione dell'onda frangente e per il calcolo della pendenza media utilizzata nell'equazione dell'evoluzione della linea di riva. Viene utilizzata a tal proposito la forma dedotta da Bruun (1954) e Dean (1977). Questi Autori hanno dimostrato che la forma per il profilo medio di un gran numero di spiagge può essere in generale rappresentata dalla semplice espressione:

$$D = A y^{2/3}$$

dove:

$D$  è la profondità dell'acqua

$A$  è un parametro empirico di scala.

È quindi stato dimostrato da Moore (1982) che  $A$  dipende dalla granulometria della spiaggia. La forma del profilo viene quindi determinata in funzione della mediana dei diametri dei grani della granulometria di cui la spiaggia è composta,  $d_{50}$ .

La pendenza media vicino la riva,  $\tan \beta$ , per il profilo di equilibrio di cui alla precedente equazione, è calcolata come valor medio dell'integrale delle pendenze,  $dD/dy$ , da 0 a  $y_{LT}$ , essendo  $y_{LT}$  la larghezza della zona di litorale fino alla profondità  $D_{LT0}$ . Per cui, dalla definizione,  $y_{LT} = (D_{LT0}/A)^{3/2}$ , la pendenza media viene calcolata come:

$$\tan \beta = \left[ \frac{A^3}{D_{LT0}} \right]^{1/2}$$

La profondità di blocco, limite al di là del quale il profilo non subisce cambiamenti significativi,  $D_C$ , è un altro elemento di non facile individuazione, anche se alcuni Autori hanno provato a darne una definizione analiticamente utilizzabile.

Il modello utilizzato può gestire il caso in cui il saliente raggiunge le strutture di protezione (scogliere) e forma un "tombolo". La spiaggia può raggiungere la struttura ma non può superarla. Nella figura Figura 15.1 è schematizzato l'evoluzione di una spiaggia protetta da una scogliera. L'asse delle  $x$  è parallelo alla linea di costa e la posizione della linea di costa,  $y$ , è rappresentato dalla lunghezza di ogni cella. La linea di costa va modificandosi in ogni cella in funzione del flusso netto di sedimenti, il tombolo si è creato dalla cella  $i+1$  alla  $i+4$ .

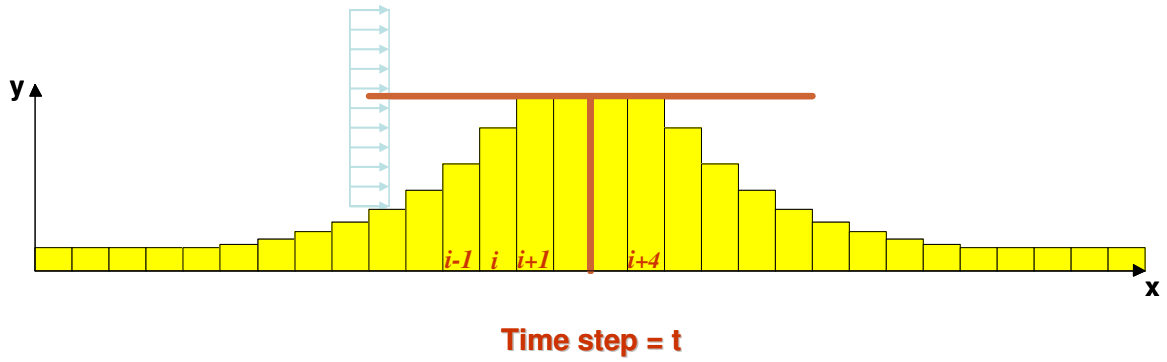
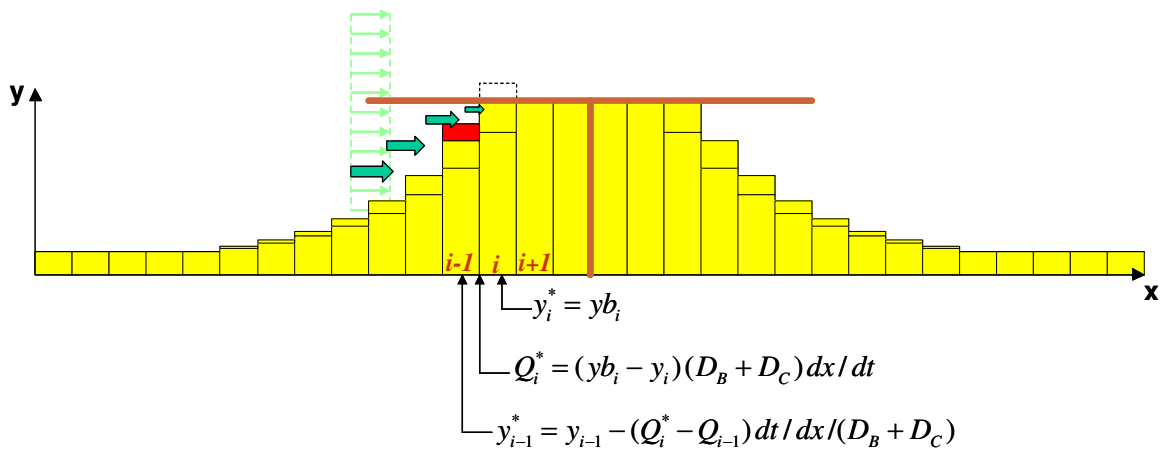
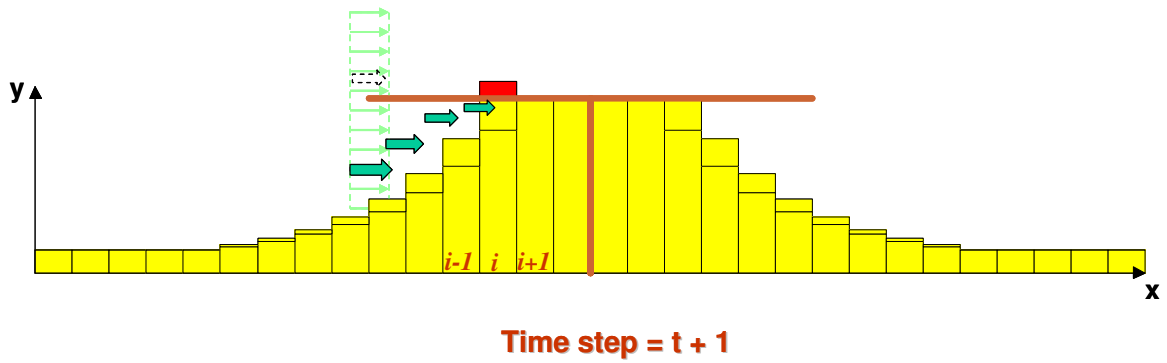
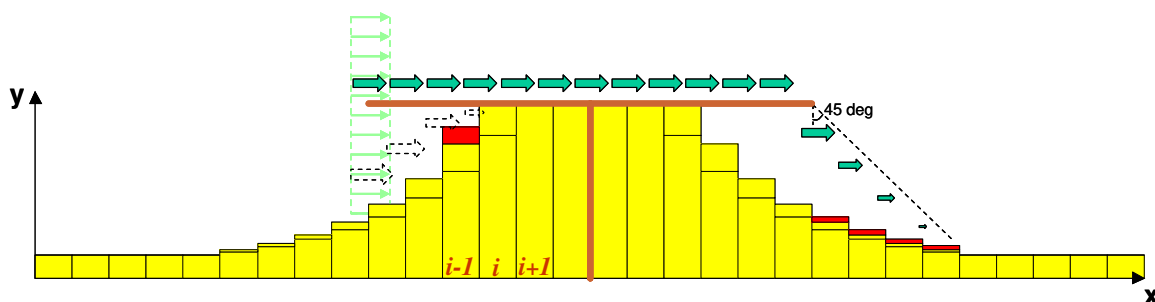


Figura 15.1

Nelle figure seguenti è schematizzato lo schema di calcolo del modello utilizzato. Nell'intervallo  $t+1$  il trasporto solido è diviso in una porzione che ricade all'interno della zona di calma e che causa un eccessivo avanzamento della posizione della linea di riva ed una parte che è esterna all'opera di protezione. A questo punto il modello fa delle correzioni per evitare che la linea di costa in corrispondenza della cella  $i$  avanzi oltre la scogliera di protezione (soluzione fisicamente insensata). La frazione di trasporto solido che passa esternamente alla struttura di protezione a seguito di fenomeni diffrattivi si depositerà in corrispondenza del lato di sottoflutto.





### 15.2.3 SERIE STORICA DELLE MAREGGIATE

Il modello dell'evoluzione della linea di riva necessita della serie storica delle ondatazioni nel periodo di analisi. Infatti il modello procede per passi temporali successivi analizzando l'evento ondamentico disponibile, modificandolo dal largo fino alla sua rottura per i noti fenomeni di rifrazione e di diffrazione e verificando quindi l'azione del fenomeno ondoso sull'evoluzione della linea di riva.

Tale serie storica può essere fornita o da dati ondamentici diretti, o da elaborazioni specifiche nel caso di assenza di dati diretti, o da metodi previsionali statistici.

Nel caso che il modello segua una delle necessarie fasi propedeutiche di calibrazione, sul periodo temporale in questione necessitano dati di ondatazioni il più vicino possibile a quelle effettivamente verificatesi nel paraggio in esame e nel periodo in cui si è verificata l'evoluzione in osservazione.

### 15.2.4 DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL FRANGIMENTO

Il modello dell'evoluzione della linea di riva assume proprio le caratteristiche delle onde al frangimento come elemento principale per la valutazione del trasporto solido.

Tali caratteristiche dell'onda frangente possono venire determinate o tramite un modello interno per la trasformazione delle onde o tramite un modello esterno di rifrazione-diffrazione dal quale derivare i dati delle onde calcolati su una linea ideale vicina al punto di frangimento dell'onda stessa.

La determinazione delle caratteristiche dell'onda al frangimento viene compiuta inizialmente senza considerare gli effetti diffrattivi delle strutture esistenti lungo la costa.

Con tale ipotesi la determinazione delle tre incognite, altezza d'onda, angolo di incidenza e profondità di frangimento, viene effettuata con l'uso delle tre note equazioni:

1. equazione dell'altezza d'onda al frangimento in funzione delle caratteristiche dell'onda al largo:

$$H_2 = K_R K_S H_{rif}$$

dove:

$H_2$  , altezza di frangimento in un determinato punto

$K_R$  , coefficiente di rifrazione

$K_S$ , coefficiente di shoaling

$H_{rif}$ , altezza dell'onda di riferimento

2. criterio di profondità limite per il frangimento:

$$H_b = \gamma D_b$$

dove:

$D_b$  , profondità al frangimento

$\gamma$  , funzione della ripidità dell'onda al largo e della pendenza media della spiaggia

3. equazione della rifrazione dell'onda, legge di Snell (5) :

$$\frac{\sin \theta_b}{L_b} = \frac{\sin \theta_1}{L_1}$$

dove:

$\theta_b, L_b$  angolo di incidenza e lunghezza dell'onda al frangimento

$\theta_1, L_1$  angolo di incidenza e lunghezza dell'onda in un punto al largo

Le tre incognite  $H_b$  ,  $D_b$  e  $\theta_b$  sono ottenuti cella per cella con un processo iterativo di approssimazione successiva grazie alle equazioni (3), (4) e (5).

Se sono presenti strutture quali moli, pennelli o frangiflutti che si estendono oltre la zona di frangimento, queste intercettano l'onda prima che essa franga.

Ciascuno spigolo delle suddette strutture creerà una zona di espansione laterale dell'energia con andamento pressochè circolare, e tale distorsione provocata nel campo dell'onda é un fattore di controllo determinante per l'evoluzione della linea di riva. Infatti la sabbia tipicamente si accumula nella zona d'ombra provocata dalla struttura e l'altezza dell'onda decresce man mano che si penetra in tale zona d'ombra.

Quindi nelle zone affette dalla diffrazione l'altezza dell'onda al frangimento viene calcolata con la:

$$H_b = K_D (\theta_D, D_b) H_b '$$

dove:



$K_D$ , coefficiente di diffrazione

$\theta_D$ , angolo tra il raggio dell'onda incidente in un punto  $P_1$  e la linea tra  $P_1$  e  $P_2$ , se  $P_2$  è in zona d'ombra

$H_b$ , altezza d'onda frangente alla stessa cella, senza fenomeni diffrattivi

#### 15.2.5 LE FINESTRE DI ENERGIA D'ONDA

Il concetto di finestre d'energia d'onda è fondamentale nel modello matematico considerato e ne determina la struttura computazionale.

Una finestra d'energia è una porzione d'area aperta alle onde incidenti, così come potrebbe essere vista da una posizione sulla spiaggia: essa è definita da due confini che limitano la penetrazione delle onde verso la spiaggia. Le finestre d'energia sono confinate da moli diffrattivi, da pennelli diffrattivi, da frangiflutti isolati non trasmissivi, e dagli estremi di frangiflutti isolati trasmissivi. L'energia dell'onda incidente deve entrare attraverso una di queste finestre per raggiungere la spiaggia. Una posizione su una spiaggia può essere raggiunta dalle onde attraverso più di una finestra.

#### 15.2.6 SCHEMA DELLA SOLUZIONE NUMERICA

Note tutte le informazioni necessarie, con l'uso dell'equazione dell'evoluzione della linea di riva (1), dell'equazione del trasporto di sabbia longshore (2) e dell'equazione sul criterio di rottura dell'onda, si può calcolare la risposta della linea di riva all'azione dell'onda.

Nei procedimenti di soluzione numerica la lunghezza della spiaggia è divisa in celle elementari di data dimensione, e la durata della simulazione è divisa in passi di tempo. Se le dimensioni delle celle, come i passi di tempo, sono sufficientemente piccoli l'equazione differenziale (1) può essere risolta accuratamente col metodo delle differenze finite.

Il cambiamento della posizione della linea di riva può essere scritto :

$$\Delta y = - \frac{\Delta t}{(D_B + D_C)} \frac{\Delta Q}{\Delta x}$$

in cui  $\Delta Q$  è la differenza di sabbia trasportata attraverso le pareti della cella elementare.

#### 15.2.7 APPLICAZIONE DEL MODELLO

##### 15.2.7.1. I DATI NECESSARI

Le condizioni fisiche del paraggio interessato alla modellazione sono rappresentate dalle seguenti famiglie di dati:

- Posizioni della linea di riva nel tempo;
- Stato ondamentico del paraggio (serie storiche);
- Configurazione delle strutture costiere e dati sulle altre attività antropiche interessanti;

- Profili trasversali della spiaggia;
- Condizioni ai confini del tratto di costa in esame.

#### 15.2.7.2. *Posizioni della linea di riva nel tempo*

La posizione della linea di riva, mutevole nel tempo per i fenomeni a deciso trend evolutivo, è stata rilevata da cartografie ufficiali o da digitalizzazioni e seguito di opportune elaborazioni di aerofotografie. Per un maggiore dettaglio di questa disamina effettuata si rimanda al Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

#### 15.2.7.3. *Stato ondamentrico del paraggio (serie storiche)*

L'onda al largo, definita tramite le sue grandezze caratteristiche, viene poi trattata per la determinazione delle caratteristiche sottocosta. Il trasporto solido dipende infatti dalle condizioni dell'onda frangente (altezza, direzione e periodo).

Al fine della determinazione delle condizioni d'onda al frangimento il modello utilizzato consente sia l'applicazione di routine interne o, nei casi di studio a livello avanzato, l'uso di modelli di rifrazione diffrazione esterni, per i quali si rimanda agli appositi studi.

Il clima d'onda applicato per il paraggio in studio è quello della boa ondamentrica di Mazara del Vallo (TP) opportunamente trasposto con un metodi di trasposizione geografica (cfr. Capitolo 6). I dati utilizzati, sono registrazioni triorarie, e ricoprono un intervallo temporale di 14 anni (1989-2003).

#### 15.2.7.4. *Configurazione delle strutture costiere e dati sulle altre attività antropiche interessanti*

Anche la posizione e la dimensione delle strutture costiere, in essere o oggetto della progettazione, devono essere note. Per queste strutture si utilizzano delle schematizzazioni matematiche utilizzando la composizione di strutture elementari quali moli, pennelli o frangiflutto (*jetties, groins e breakwaters*) identificando e specificando tra questi elementi quelli che hanno spiccato comportamento diffrattivo ai fini della determinazione delle condizioni di frangimento dell'onda. La schematizzazione consente anche di tener conto della trasmissività del manufatto come di altre caratteristiche che possano interessare l'oggetto delle calcolazioni.

Altre attività antropiche ingegneristiche interessanti il progetto possono essere i ripascimenti artificiali, così come i dragaggi di materiale, o la presenza di by-pass per sabbie. Di tali attività bisogna identificare, oltre che i volumi di materiale interessati, anche le date e la posizione di inizio e fine dei fenomeni.

#### 15.2.7.5. *Profili trasversali della spiaggia*

Per profili trasversali si intendono le sezioni di equilibrio trasversali alla linea di riva, strettamente dipendenti dalla morfologia e dalla litologia dei fondali nonché dalle caratteristiche del sedimento.

La determinazione del profilo trasversale di equilibrio è uno dei passi fondamentali dell'analisi dell'evoluzione della linea di riva.

#### 15.2.7.6. *Condizioni ai confini del tratto di costa in esame*

Il tratto di costa in considerazione può essere una intera unità fisiografica, intesa come già definito o può estendersi per una parte di essa, per il qual motivo bisogna conoscere le condizioni di confine in termini di quantità e direzione di trasporto solido che possono transitare dagli stessi.

#### 15.2.8 LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Per l'accesso a tale indispensabile fase è necessario considerare un periodo temporale sufficientemente ampio di cui si conoscano lo stato iniziale della linea di riva, lo stato finale della stessa e le date in cui sono stati inseriti elementi strutturali, o attuati interventi antropici in genere, che possano aver influenzato l'evoluzione della linea di costa.

Occorre inoltre conoscere le condizioni storiche meteomarine del paraggio con alto dettaglio temporale (almeno ogni 6h) al fine di simulare, in unico atto o in atti successivi, le evoluzioni accadute.

Nel caso in esame si sono valutati i dati cartografici in possesso e si è ritenuto idoneo rivolgersi all'uso dei rilievi aerofotogrammetrici del 1992 (CTR della Regione Siciliana, sezione 642010) e del 1998 (CTC del Comune di Palma di Montechiaro, fogli 15 e 16, ed. SAS Palermo). Tali riprese in effetti ben rappresentano l'andamento della linea di riva in relazione ai più importanti interventi antropici subiti da questo tratto di costa..

Dopo alcuni tentativi ci si è rivolti a perfezionare l'analisi del periodo tra il 1 settembre 1992 ed il 1 gennaio 1998, visto soprattutto che i periodi precedenti si riferivano a situazioni di equilibrio della costa ormai irrimediabilmente perdute a seguito della costruzione del molo di sopraflutto del porto e delle scogliere.

Costruita una serie storica delle probabili ondatazioni, si è proceduto alla calibrazione del modello intervenendo sui parametri disponibili in relazione al modello fisico da rappresentare. I risultati della calibrazione, sia tabellari che grafici, sono riportati nella Figura 15.2.

Il risultato ritenuto soddisfacente ha visto l'utilizzazione di parametri di calibrazione ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $D$ ) con valori non dissimili da quelli ampiamente riscontrati sperimentalmente da diversi Autori (vedi riferimenti bibliografici) con studi su modello e verifiche in situ, ottenendo matematicamente il trend di evoluzione attualmente in atto con accettabile errore in relazione allo scopo dello studio.

**STUDIO DELLA DINAMICA COSTIERA - Evoluzione della Linea di Riva  
PALMA DI MONTECHIARO (AG) - Calibrazione del modello - periodo: 1992-1998**

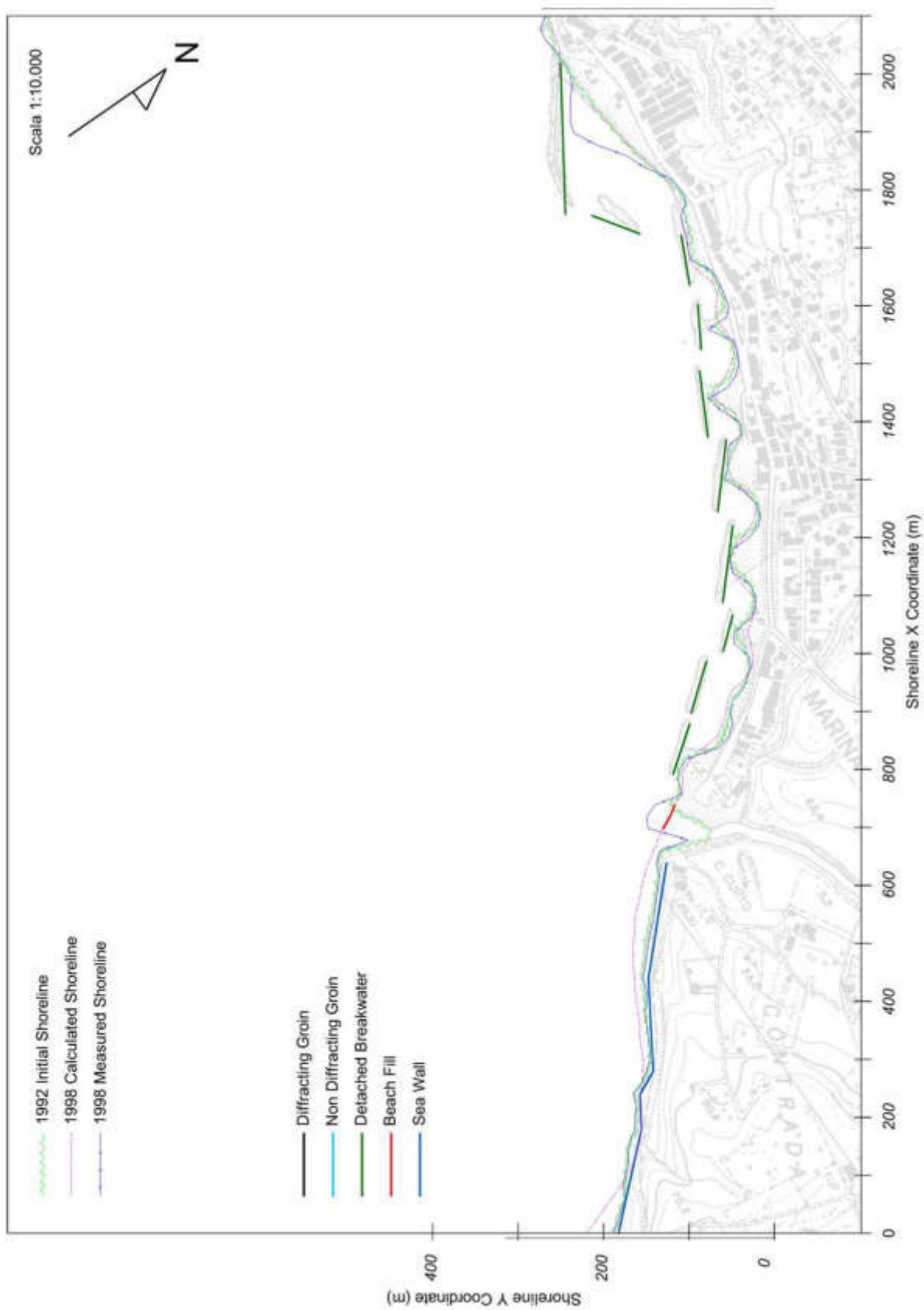


Figura 15.2 – Immagine relativa all'esito della calibrazione del modello matematico

Si è quindi effettuata una verifica qualitativa della risposta per un periodo successivo a quello di calibrazione confermando la bontà delle scelte non solo per i valori dei parametri ma anche per la modellazione fisica, e per il passo temporale.

#### 15.2.9 ANALISI DELL'IPOTESI DI NON INTERVENTO

Effettuata la calibrazione e la verifica del modello, si è effettuata una applicazione del modello alla situazione di non intervento, considerando un periodo temporale con estensione decennale.

Lo stato iniziale della linea di riva è quello del gennaio 1998 e stato finale stimato per il 1 gennaio 2008. La modellazione numerica delle condizioni fisiche è rimasta inalterata rispetto a quella della calibrazione, così come tutti gli altri parametri.

La serie storica delle ondatazioni utilizzata ha ricalcato quella del periodo temporale utilizzato per la calibrazione, supponendo quindi che i valori medi delle altezze significative, dei periodi e delle direzioni di incidenza delle onde si mantengano pressoché costanti su un arco temporale di circa dieci anni.

In conclusione si è potuto riscontrare che la situazione di stato di fatto è in sostanziale equilibrio, perdurando gli attuali livelli di apporto del F. Palma e di erosione marittima ed eolica dei fronti rocciosi. I risultati delle elaborazioni sono evidenziati nella Figura 15.3.

#### 15.2.10 ANALISI DELL'IPOTESI PROGETTUALE

Si è quindi analizzata l'evoluzione del litorale implementando le opere previste dal PRP.

Lo stato iniziale della linea di riva è quello del 1 gennaio 2005 e stato finale stimato per il 1 gennaio 2015.

Le nuove opere di difesa sono state schematizzate matematicamente utilizzando la composizione di strutture elementari quali moli, pennelli o frangiflutto (*jetties, groins e breakwaters*). La realizzazione del nuovo arenile è stata simulata con un ripascimento (*beach fill*) distribuito temporalmente nei primi due mesi del periodo analizzato.

La rappresentazione numerica delle altre condizioni fisiche è rimasta inalterata rispetto quella della calibrazione, così come tutti gli altri parametri fondamentali. È stato mantenuto l'elemento di accrescimento aggiuntivo dovuto ai sovradepositi provenienti dal Palma.

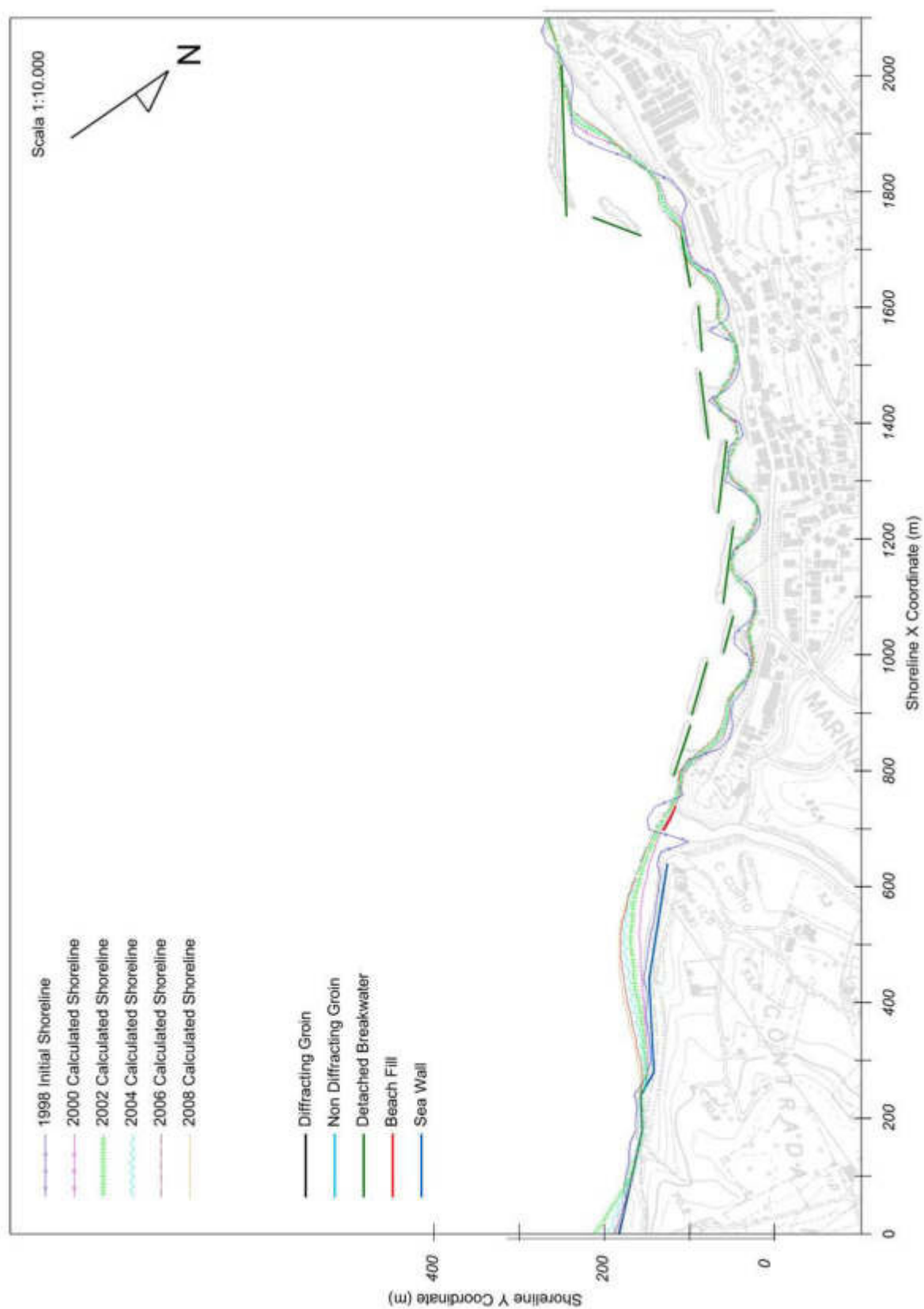
La serie storica delle ondatazioni utilizzata ha ricalcato quella del periodo temporale utilizzato per la calibrazione, supponendo quindi che i valori medi delle altezze significative, dei periodi e delle direzioni di incidenza delle onde si mantengano pressoché costanti su un arco temporale di circa dieci anni.

I risultati delle elaborazioni sono evidenziati nella Figura 15.4. L'elaborazione grafica riporta a levante la tendenza notevole all'accrescimento che è da interpretare più correttamente come efficace contrasto al fenomeno erosivo in atto.

In conclusione, con le avvertenze di cui al paragrafo 15.2, si è potuto riscontrare che l'implementazione delle opere marittime previste nel PRP (nuovo porto turistico, nuovo arenile e scogliere soffolte di protezione), non provocherà effetti particolarmente gravosi ed indesiderati. Si è infatti delineato, per il livello attuale dello studio:

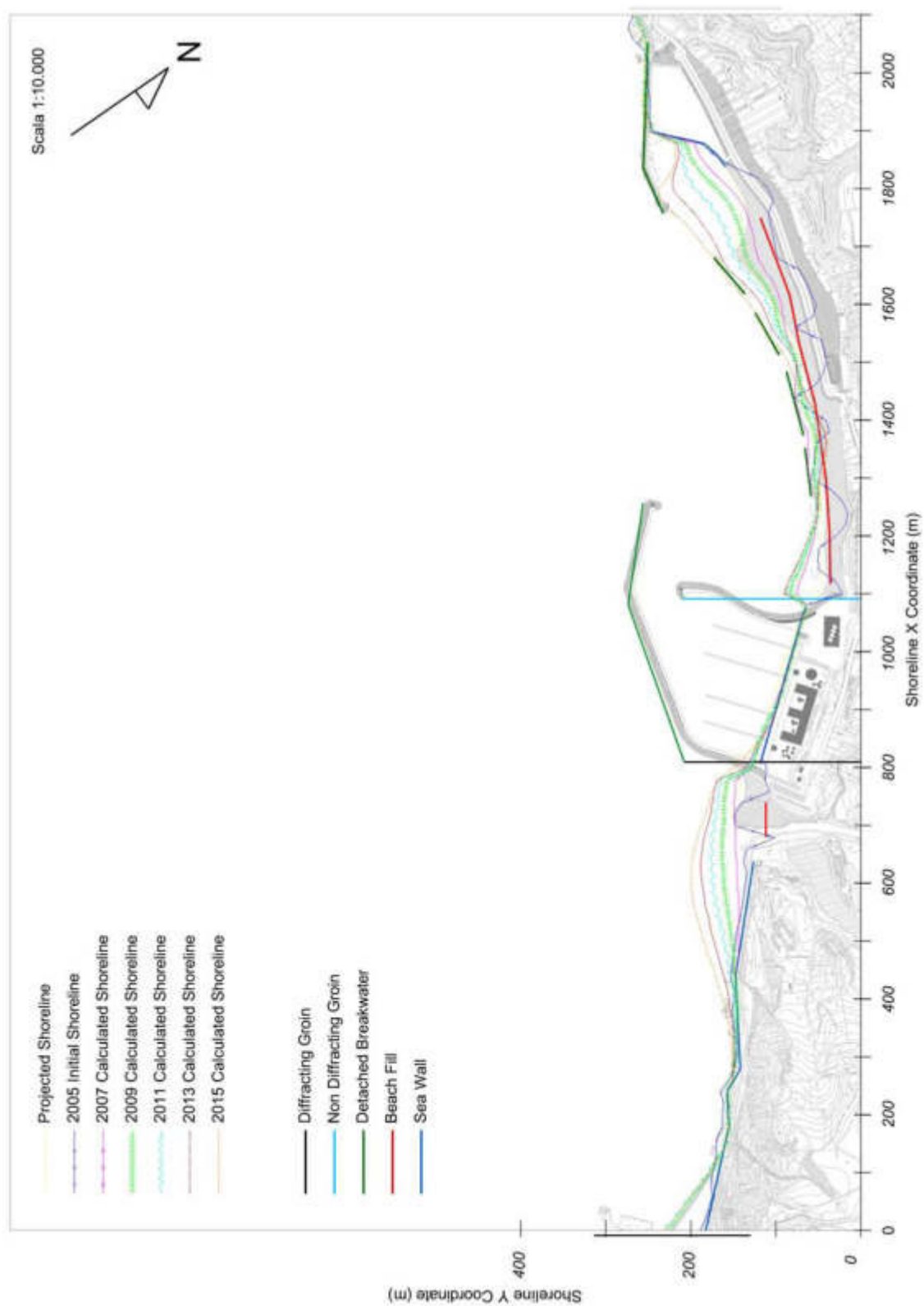
- una sostanziale possibilità di mantenimento in equilibrio del nuovo arenile;
- un discreto accumulo a ridosso della radice del molo di sopraflutto del porto turistico, dovuto alla difficile distribuzione del materiale trasportato dal fiume Palma, agli effetti diffrattivi dello stesso nei confronti delle mareggiate di III quadrante e dall'ostacolo da esso rappresentato alle mareggiate da II quadrante.

**STUDIO DELLA DINAMICA COSTIERA - Evoluzione della Linea di Riva  
PALMA DI MONTECHIARO (AG) - Proiezione senza intervento - periodo: 1998-2008**



*Figura 15.3 - Immagine relativa all'esito della proiezione senza intervento*

**STUDIO DELLA DINAMICA COSTIERA - Evoluzione della Linea di Riva  
PALMA DI MONTECHIARO (AG) - Proiezione con intervento - periodo: 2005-2015**



*Figura 15.4 - Immagine relativa all'esito della proiezione con le nuove opere*



---

## 16 PROVVEDIMENTI MITIGATORI DEGLI EFFETTI DEPOSIZIONALI

---

Le considerazioni sopra esposte consentono in sede preliminare di non riconoscere a seguito delle opere proposte particolari scompensi alla linea di riva dell'unità fisiografica che possano comportare particolari preoccupazioni.

Và da sé che i livelli progettuali successivi e di dettaglio che tipicamente si innestano sulle previsioni di PRP dovranno approfondire tutti gli aspetti, con l'uso dei più attuali livelli di conoscenze e delle necessarie prove su modello fisico, ancor oggi non completamente soppiantabili dalla sola modellazione numerica.

Alcune considerazioni tuttavia vanno doverosamente fatte in termini di provvedimenti mitigatori che potranno tornare utili sia in fase progettuale che a regime.

### 16.1 PROGETTAZIONE DEL NUOVO ARENILE

Il nuovo arenile, realizzato con depositi di materiale granulometricamente e con caratteristiche opportune, dovrà essere progettato secondo le più attuali tecniche di ripascimento e di conservazione delle spiagge disponibili.

La protezione dello stesso potrà avvenire con tecniche aggiornate riducendo al massimo l'uso di protezioni rigide (scogliere) che al più, ove indispensabili, saranno soffolte e comunque in misura ottimizzata alle necessità.

Queste ultime dovranno eventualmente essere in elementi naturali, il più possibile omogenei e compatibili con l'ambiente.

### 16.2 MANUTENZIONE DELL'IMBOCCATURA E DEL BACINO PORTUALE

Qualsiasi porto necessita di manutenzione dei fondali. Questa affermazione, troppo spesso trascurata e disattesa è bene venga tenuta in opportuna considerazione.

Lo sforzo deve essere quello di rendere compatibili i costi delle manutenzioni periodiche (dragaggi), con la gestione dell'infrastruttura stessa.

In questo settore la tecnologia odierna ha fatto molti passi avanti, soprattutto nell'indirizzo di agevolare le strutture a bilancio di gestione contenuto.

Esistono molte applicazioni nel mondo, per esempio, di impianti di aspirazione e refluimento a facilissima gestione e con costi assolutamente contenuti. Tali impianti funzionano come "aspirapolvere" portatili, con la testa aspirante movimentata da non più di due uomini su piccolissimi natanti.

La tecnologia adottata in questi casi è quella denominata "jet pump", ove un flusso primario di acqua marina, pressurizzato da una pompa centrifuga tradizionale, passa attraverso un profilo idraulico (jet pump) il quale, tramite appositi accorgimenti costruttivi, disgrega, aspira e miscela i sedimenti dal fondo che si allontanano in condotta verso il punto di deiezione. La testa aspirante non contiene parti meccaniche mobili, ed il flusso creato con tale tecnica non comporta i frequentissimi blocchi dei sistemi aspiranti con pompa tradizionale sommersa. Anche i costi, è dimostrato, sono compatibili con una gestione economica di un *marina*.



COMMITTENTE:

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI  
S.I.I.T. SICILIA - CALABRIA  
GENIO CIVILE OPERE MARITTIME PER LA SICILIA

TESTATA:

STUDI PROPEDEUTICI ALLA REDAZIONE DEL  
**PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI MARINA DI PALMA**  
- PALMA DI MONTECHIARO (AG) -

TITOLO:

**STUDIO IDRAULICO MARITTIMO**

**Allegati**

ELABORATO:

**SIM.02**

DATA:

Aprile 2005

NS.RIF.:

SIM.ALL.doc

REDATTORE.:

Ing. Giancarlo Inserra

CONTROLLO:

Ing. Guglielmo Migliorino

RIF.ARC. - N.A4:

PALAAG04 - 70

IL COMMITTENTE

IL TECNICO  
Ing. Elio Ciralli



ING. ELIO CIRALLI

- STUDIO DI INGEGNERIA CIVILE E COSTIERA -

Viale delle Magnolie, 36 - 90144 Palermo - tel.: ++39 0916851557 - 0916850224

e-mail: elio.ciralli@cirallistudio.com

# INDICE

<b>1</b>	<b>ALLEGATO A.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ALLEGATO B.....</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>ALLEGATO C.....</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>ALLEGATO D.....</b>	<b>62</b>

---

## **1 ALLEGATO A**

---

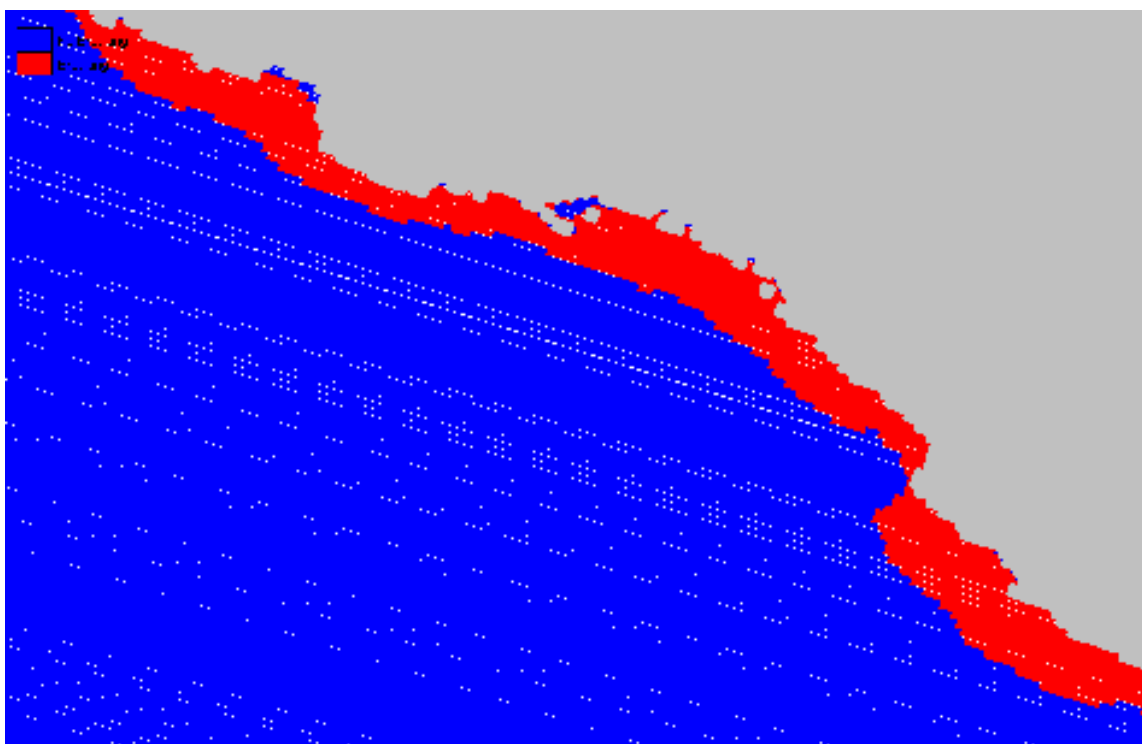


Figura 1.1- Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 2$   $\theta = 135^\circ N$   $H_s = 3,91m$   $T_p = 9,6s$

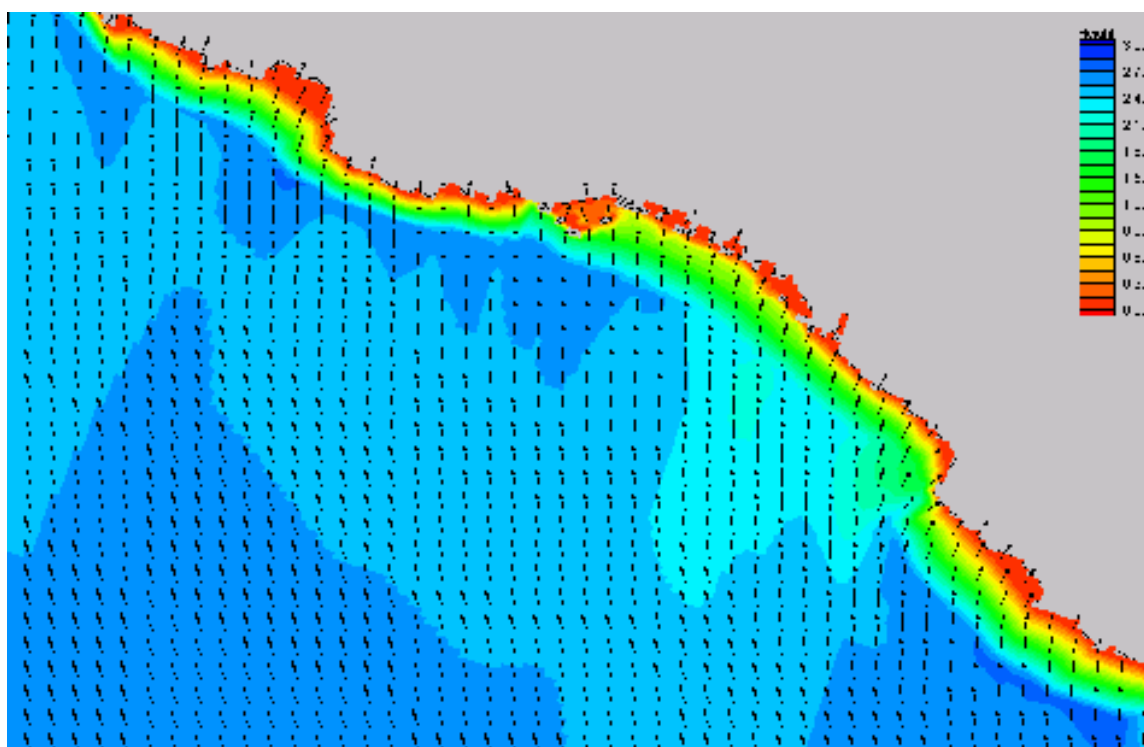


Figura 1.2 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta  $Tr = 2$   $\theta = 135^\circ N$   
 $H_s = 3,91m$   $T_p = 9,6s$

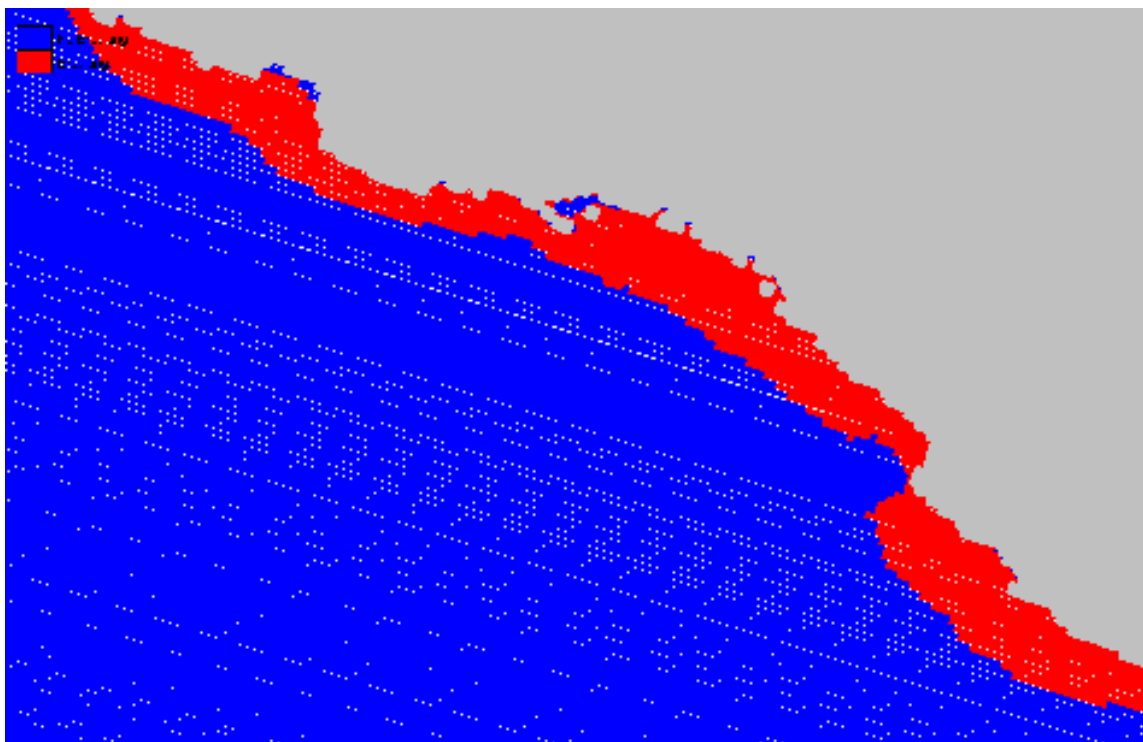


Figura 1.3 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $T_r = 2$   $\theta = 180^\circ N$   $H_s = 2,96m$   $T_p = 8,3s$

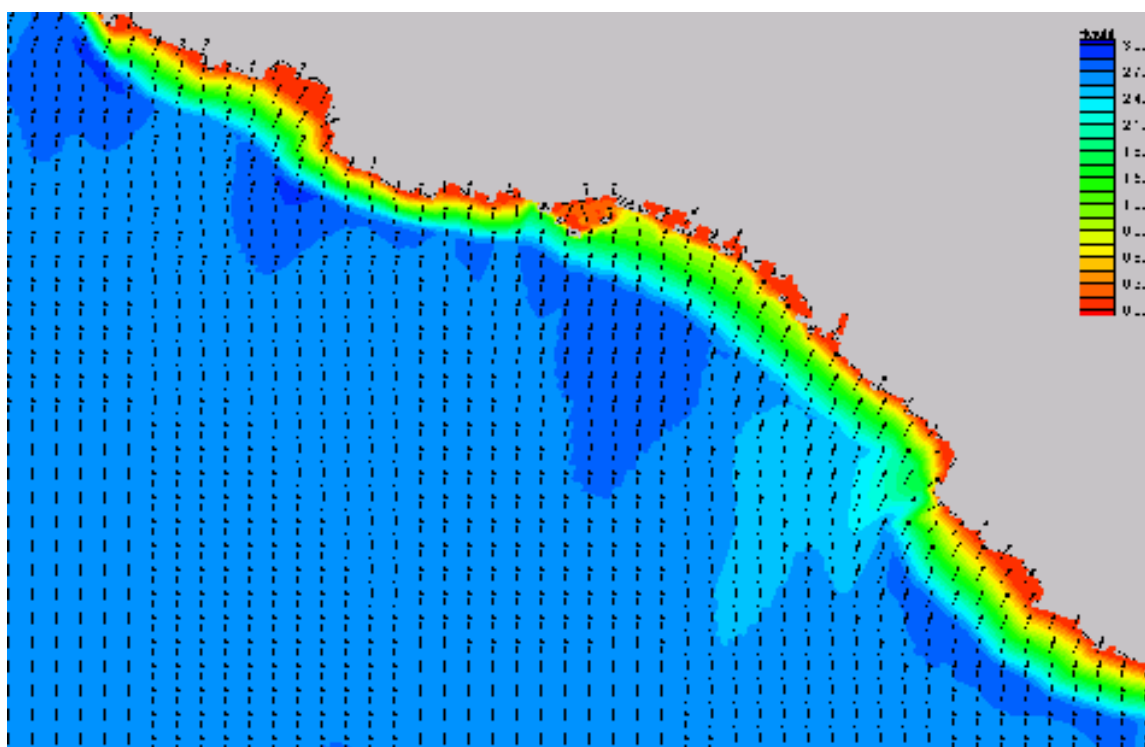


Figura 1.4 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta  $T_r = 2$   $\theta = 180^\circ N$   
 $H_s = 2,96m$   $T_p = 8,3s$

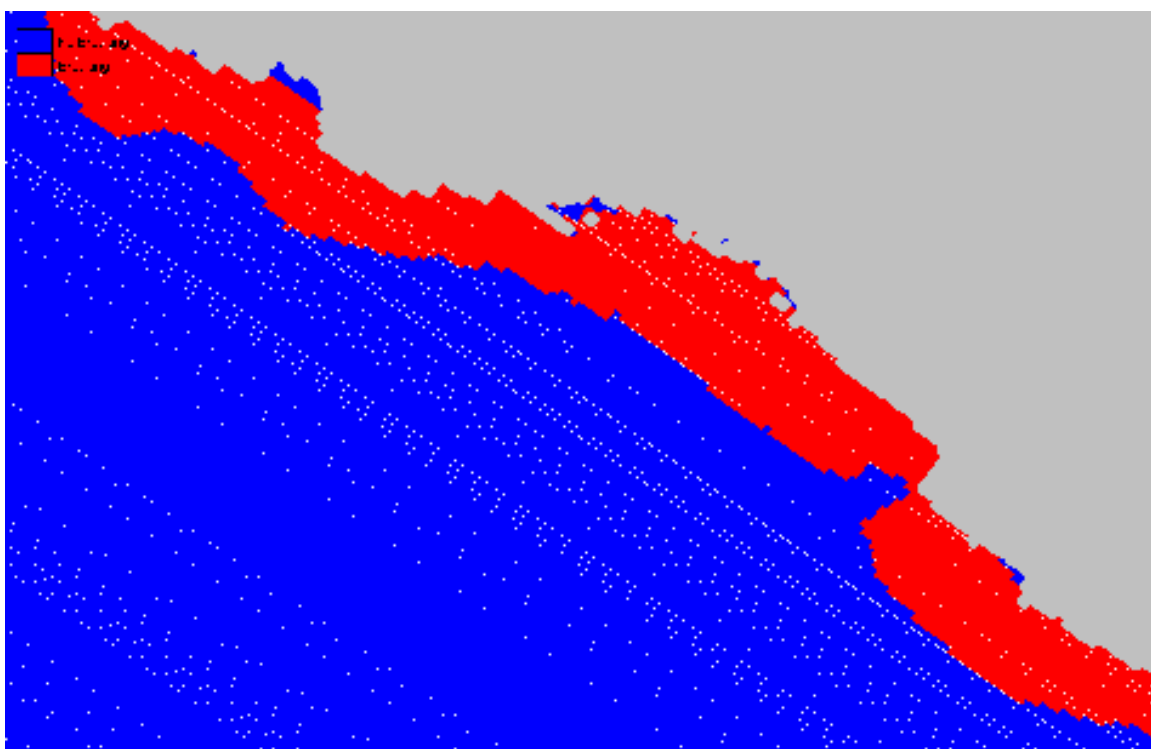


Figura 1.5 – Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 2$   $\vartheta = 225^\circ N$   $Hs = 3,49m$   $Tp = 9,1s$

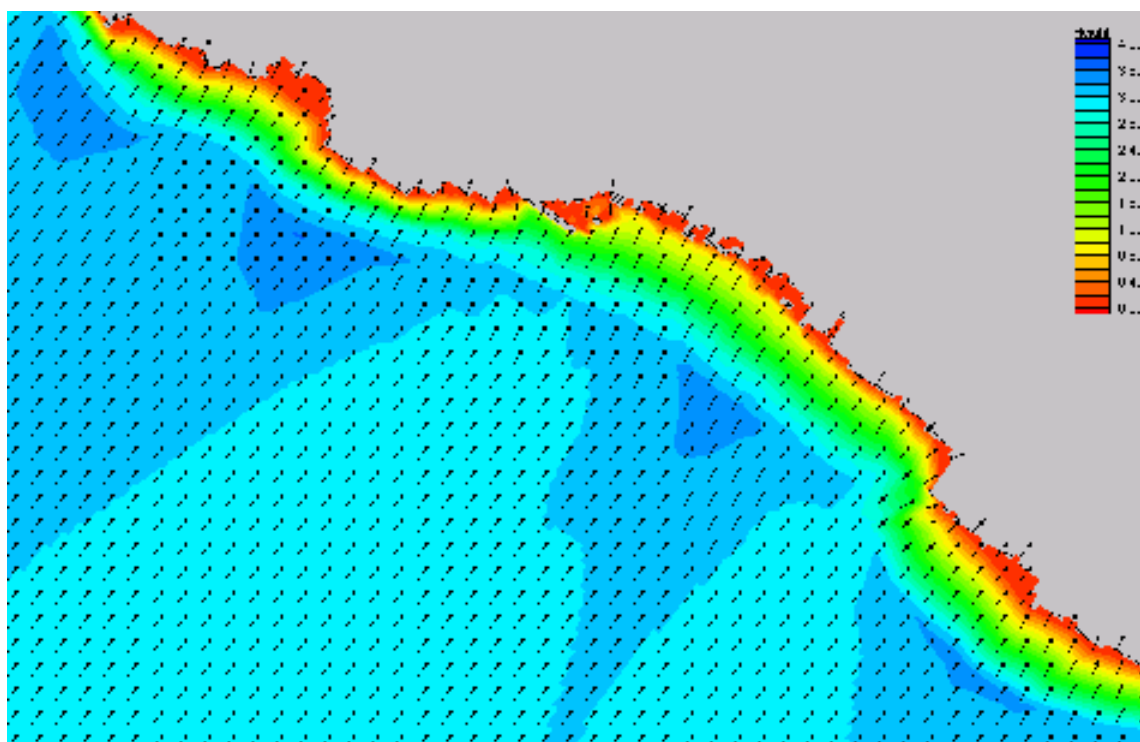


Figura 1.6 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta  $Tr = 2$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $Hs = 3,49m$   $Tp = 9,1s$

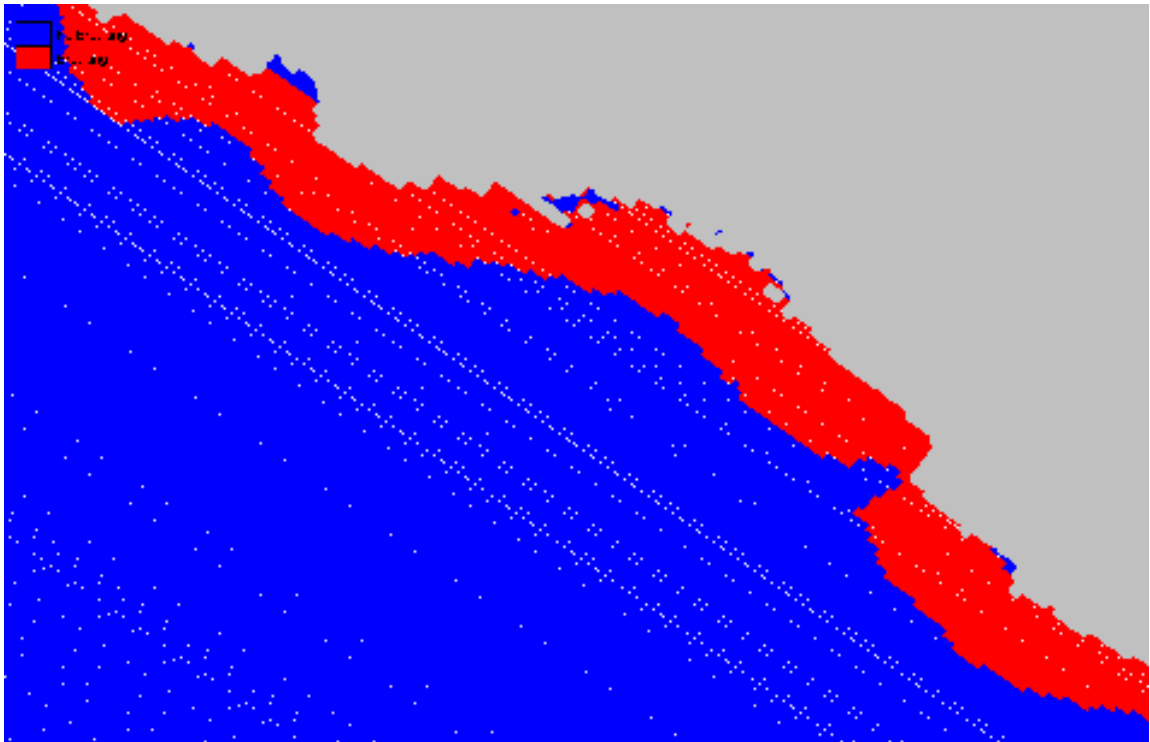


Figura 1.7 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 2$   $\theta = 270^\circ N$   $H_s = 4,27m$   $Tp = 10,0s$

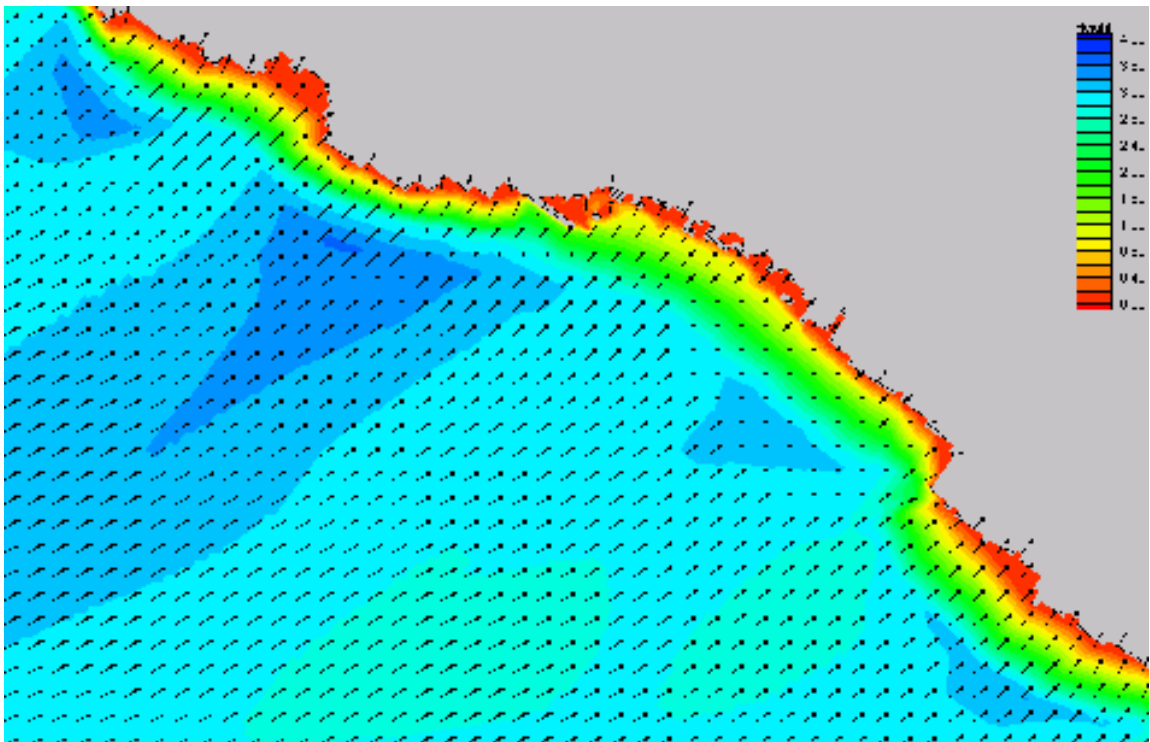


Figura 1.8 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 2$   $\theta = 270^\circ N$   
 $H_s = 4,27m$   $Tp = 10,0s$



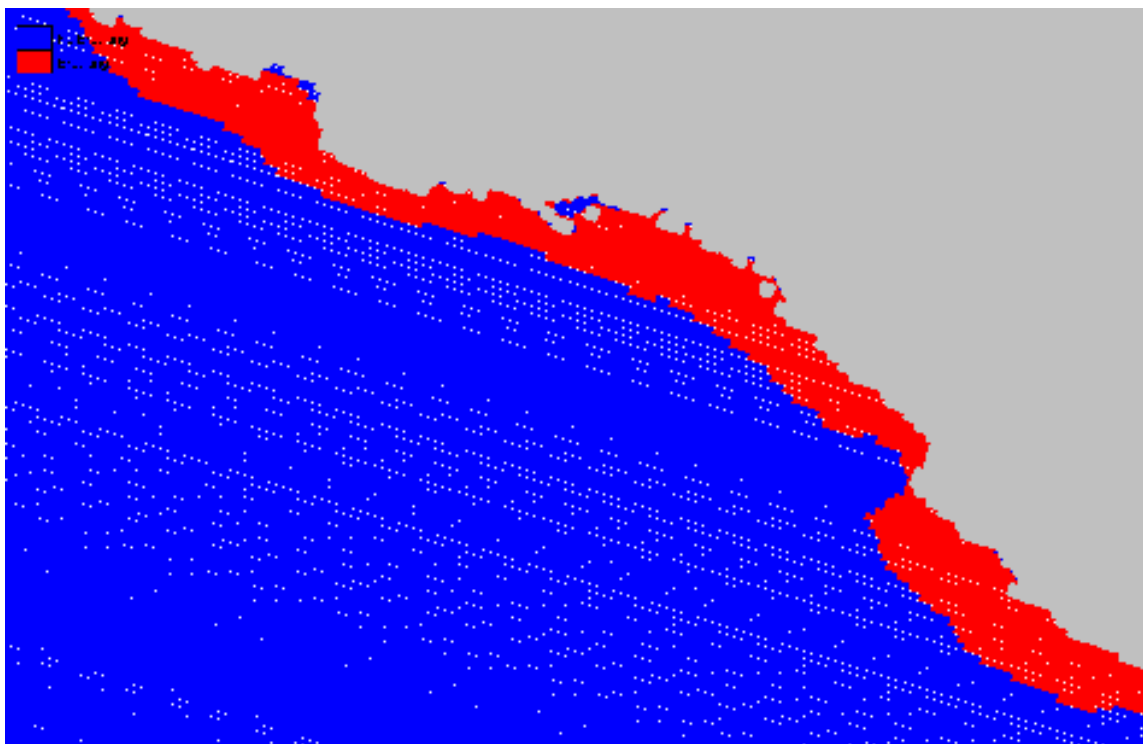


Figura 1.9– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 3$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 4,23m$   $Tp = 10,0s$

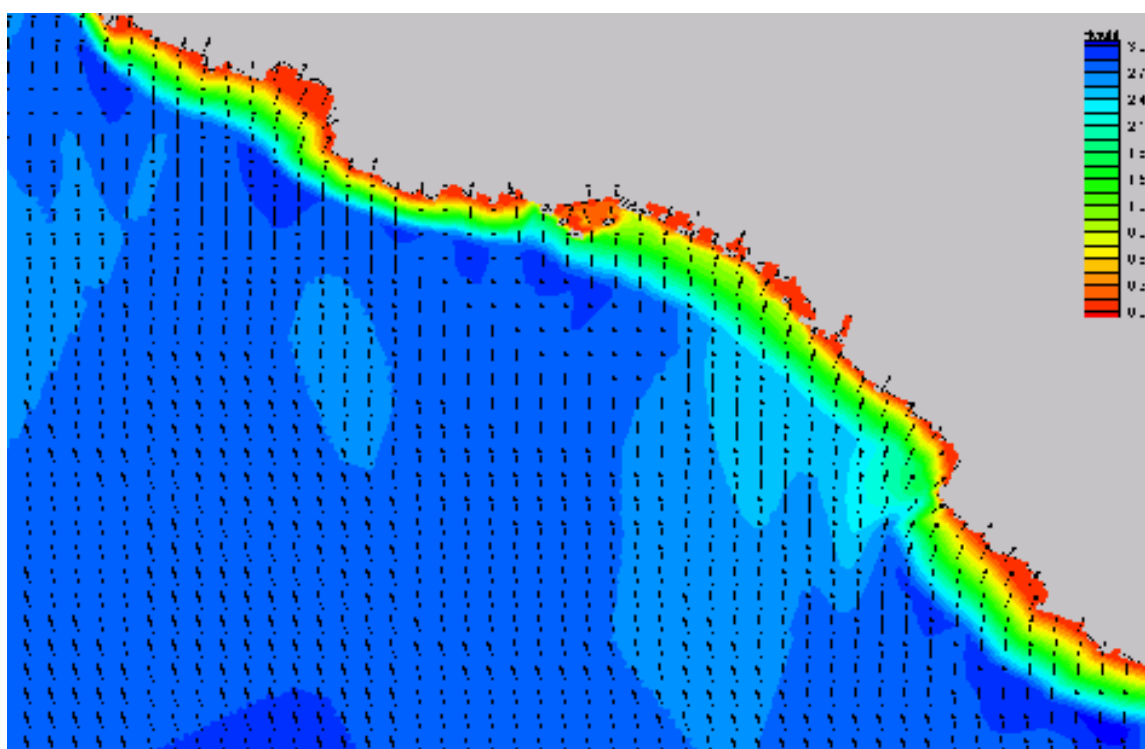


Figura 1.10 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 3$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 4,23m$   $Tp = 10,0s$

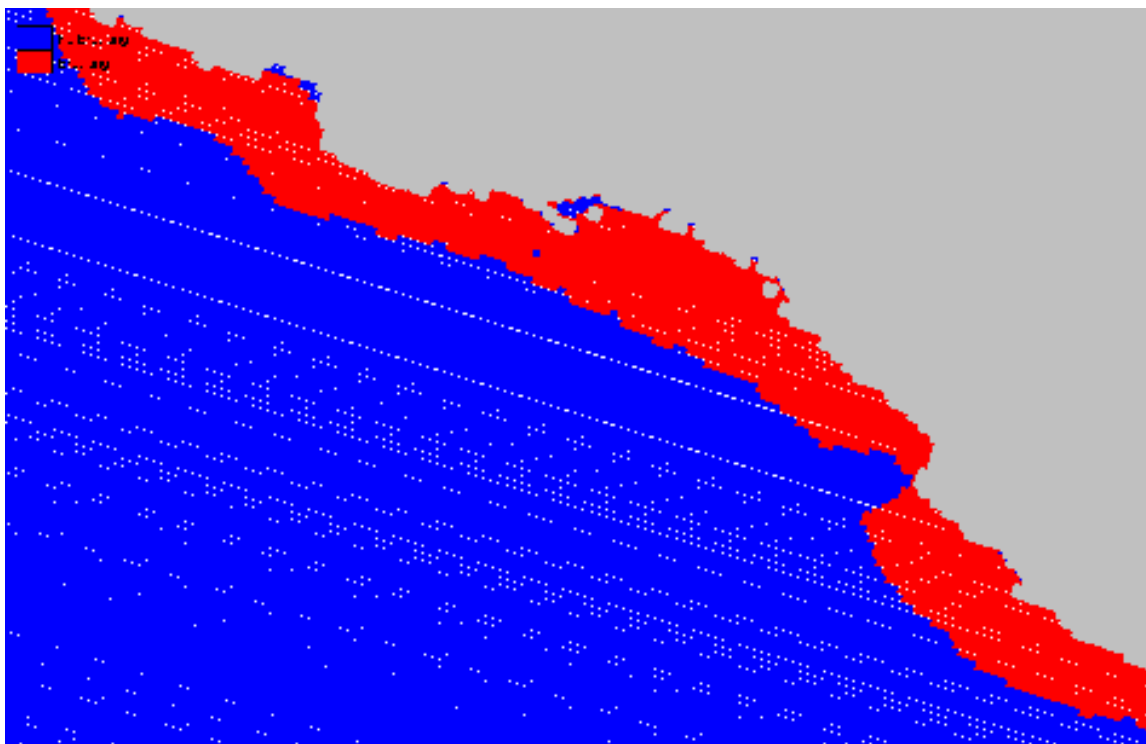


Figura 1.11– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 3$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 3,46m$   $Tp = 9,0s$

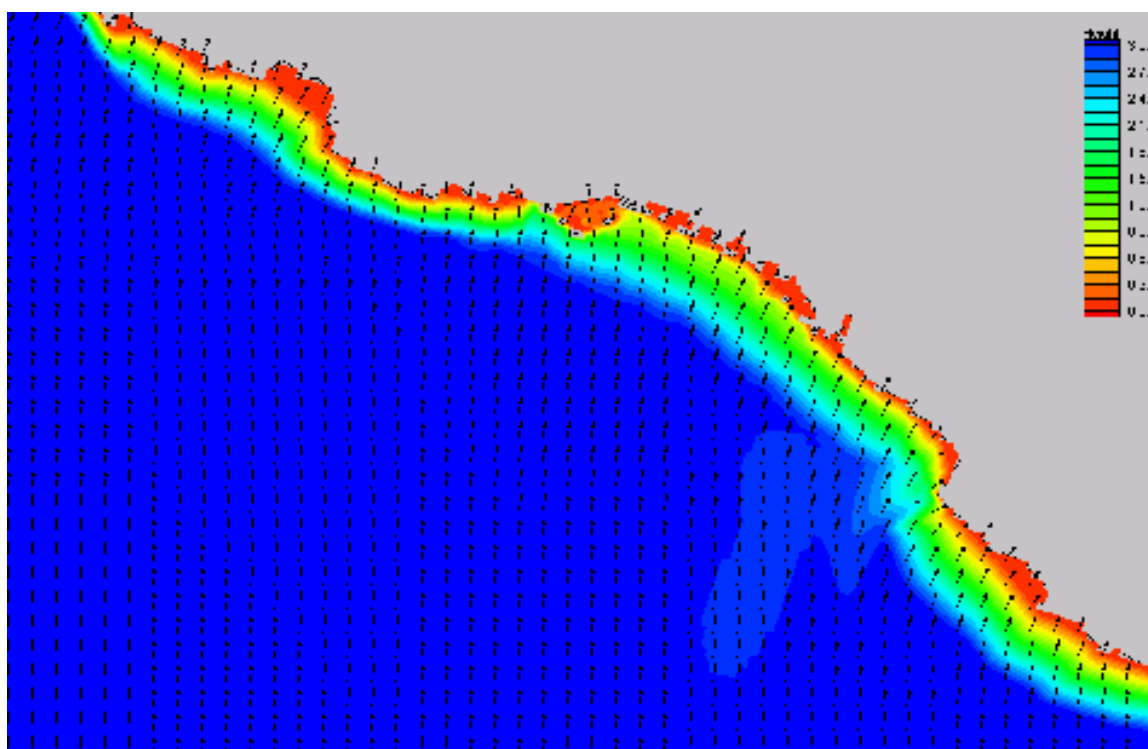


Figura 1.12 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 3$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 3,46m$   $Tp = 9,0s$

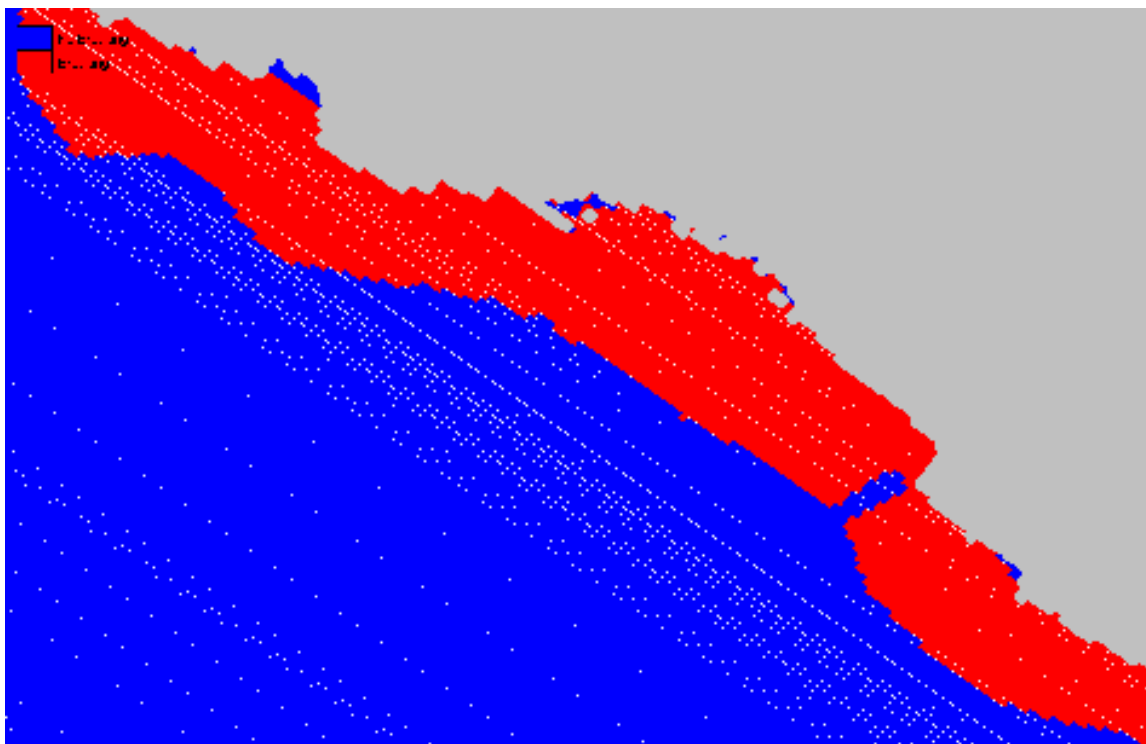


Figura 1.13– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 3$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 4,11m$   $Tp = 9,8s$

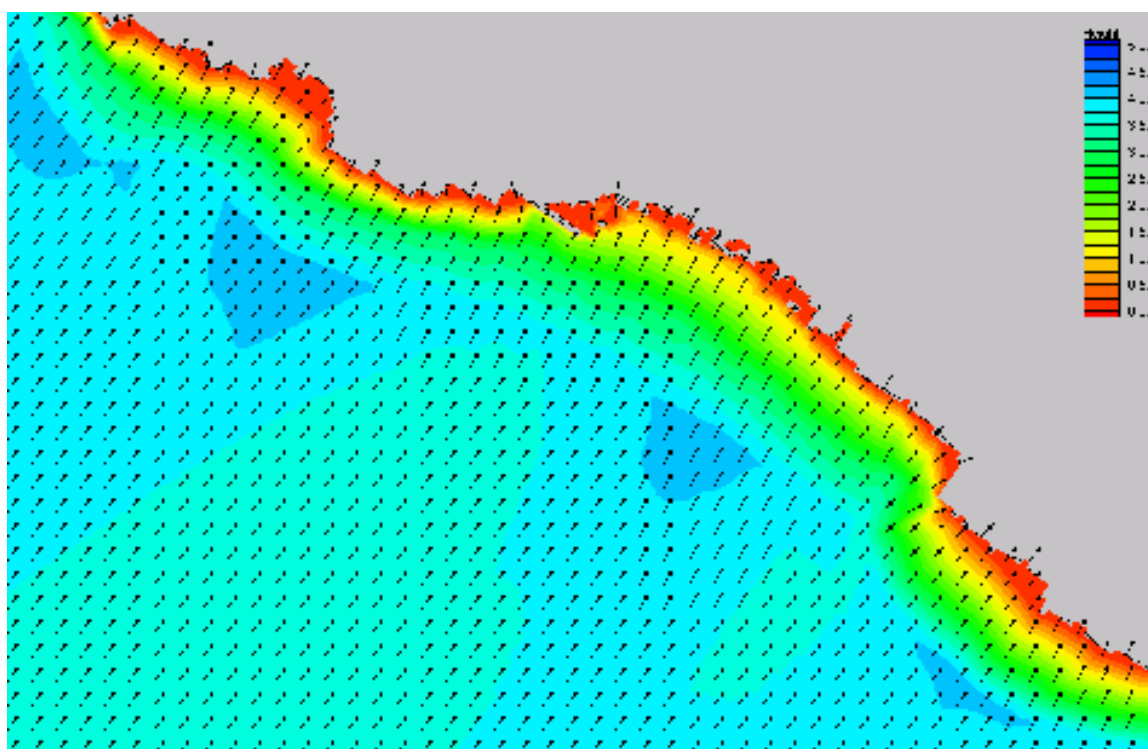


Figura 1.14 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 3$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 4,11m$   $Tp = 9,8s$

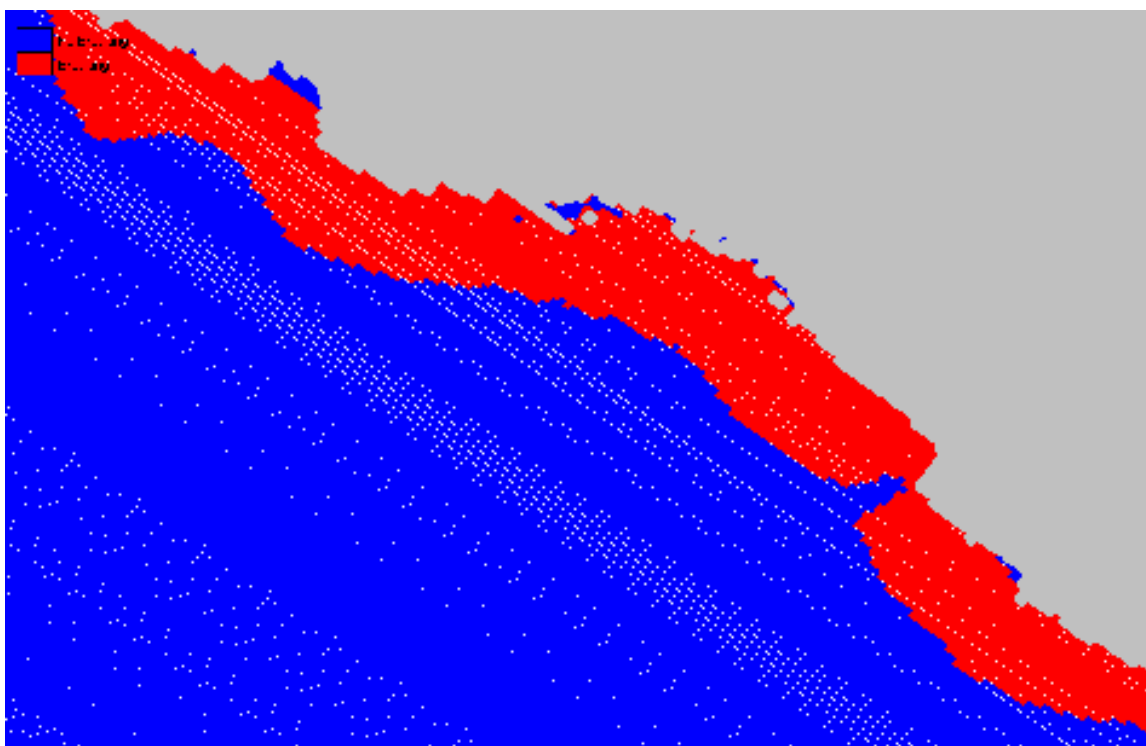


Figura 1.15– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 3$   $\vartheta = 270^\circ N$   $H_s = 4,65m$   $Tp = 10,5s$

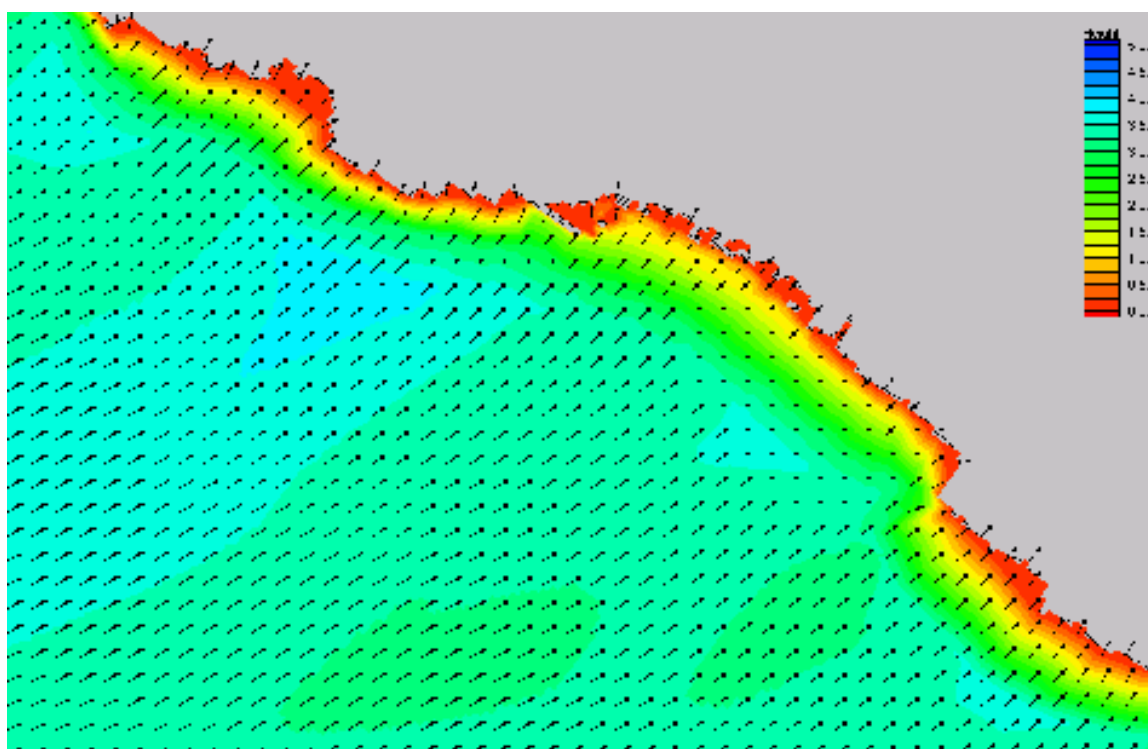


Figura 1.16 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 3$   $\vartheta = 270^\circ N$   
 $H_s = 4,65m$   $Tp = 10,5s$

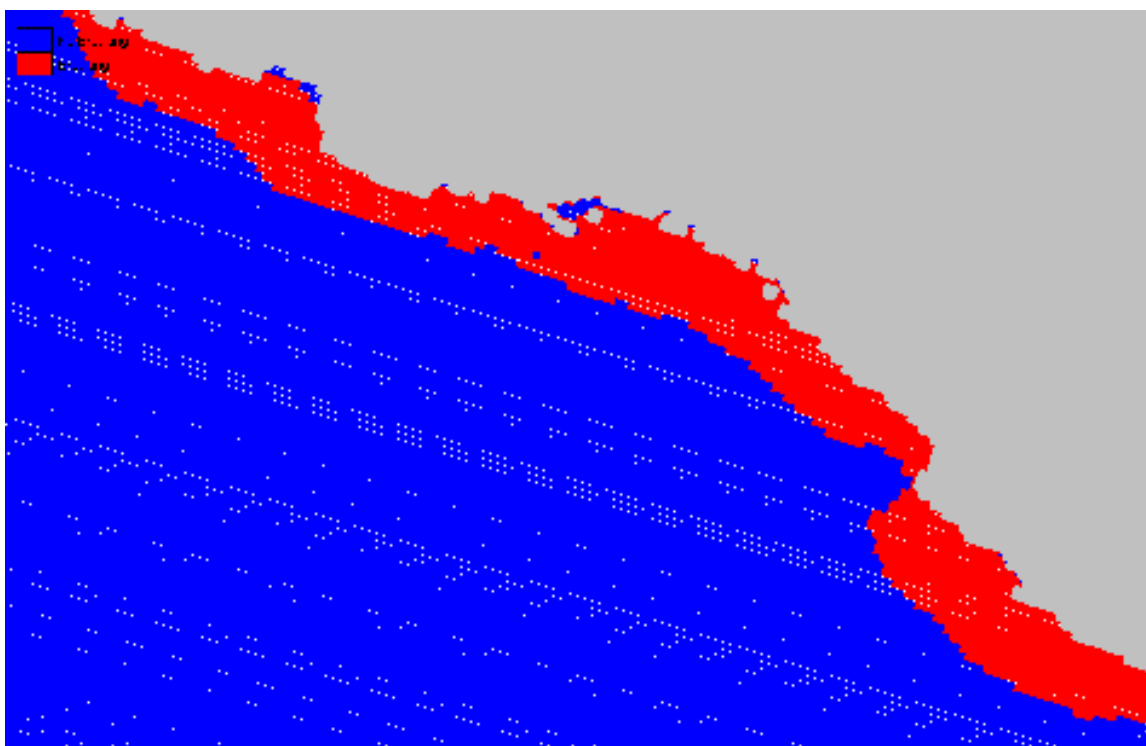


Figura 1.17– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 5$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 4,60m$   $Tp = 10,4s$

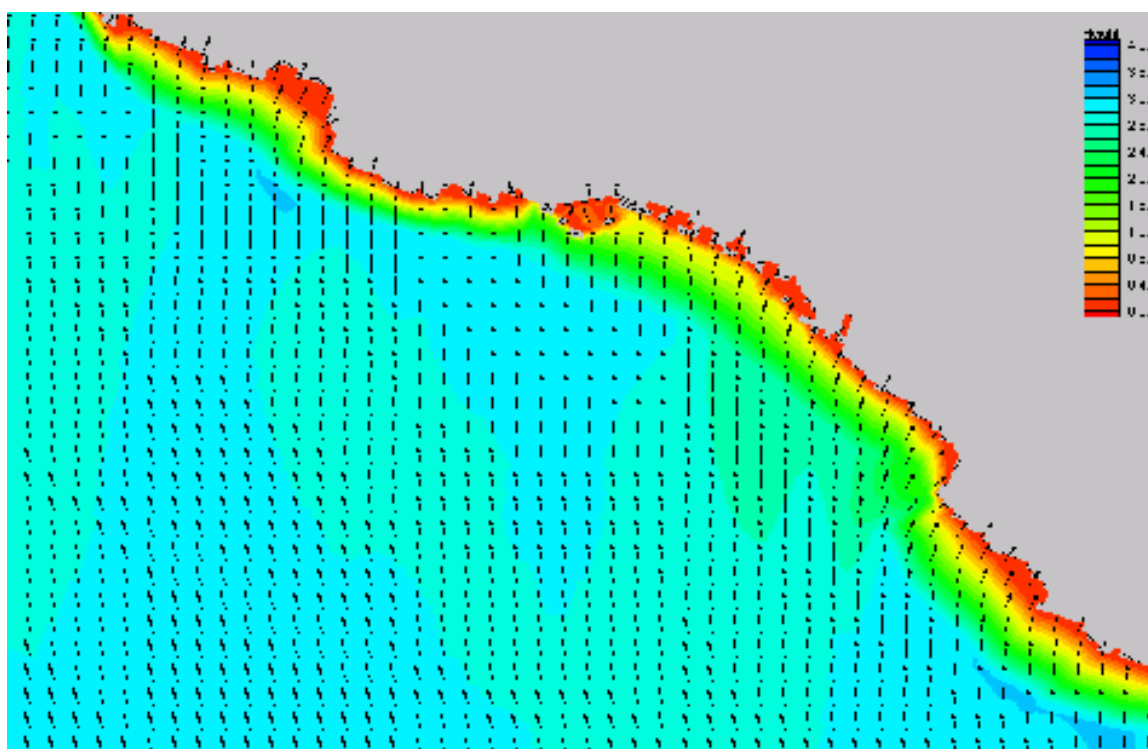


Figura 1.18 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 5$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 4,60m$   $Tp = 10,4s$

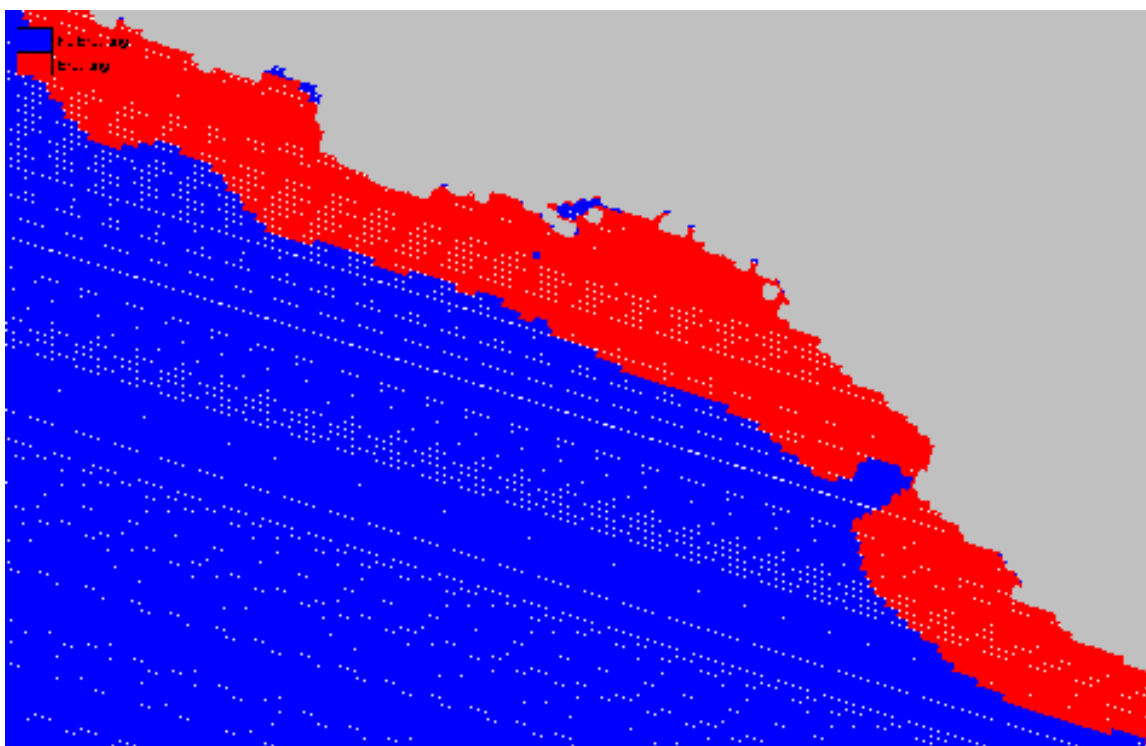


Figura 1.19– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 5$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 4,01m$   $Tp = 9,7s$

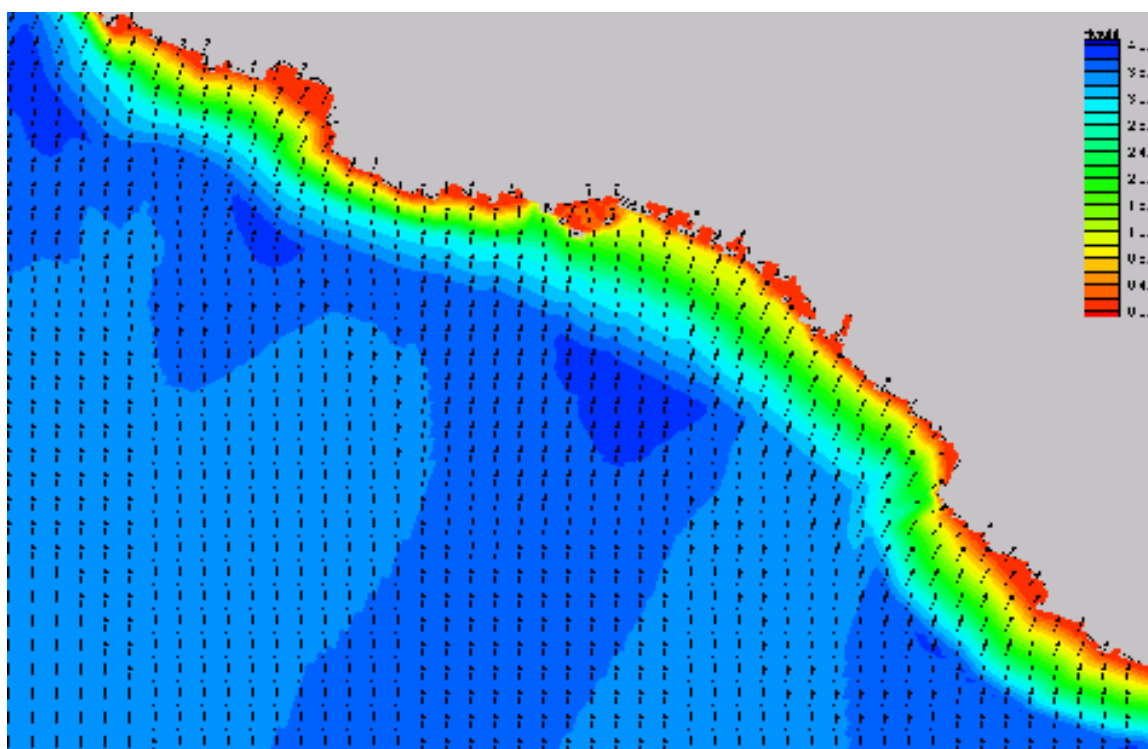


Figura 1.20 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 5$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 4,01m$   $Tp = 9,7s$

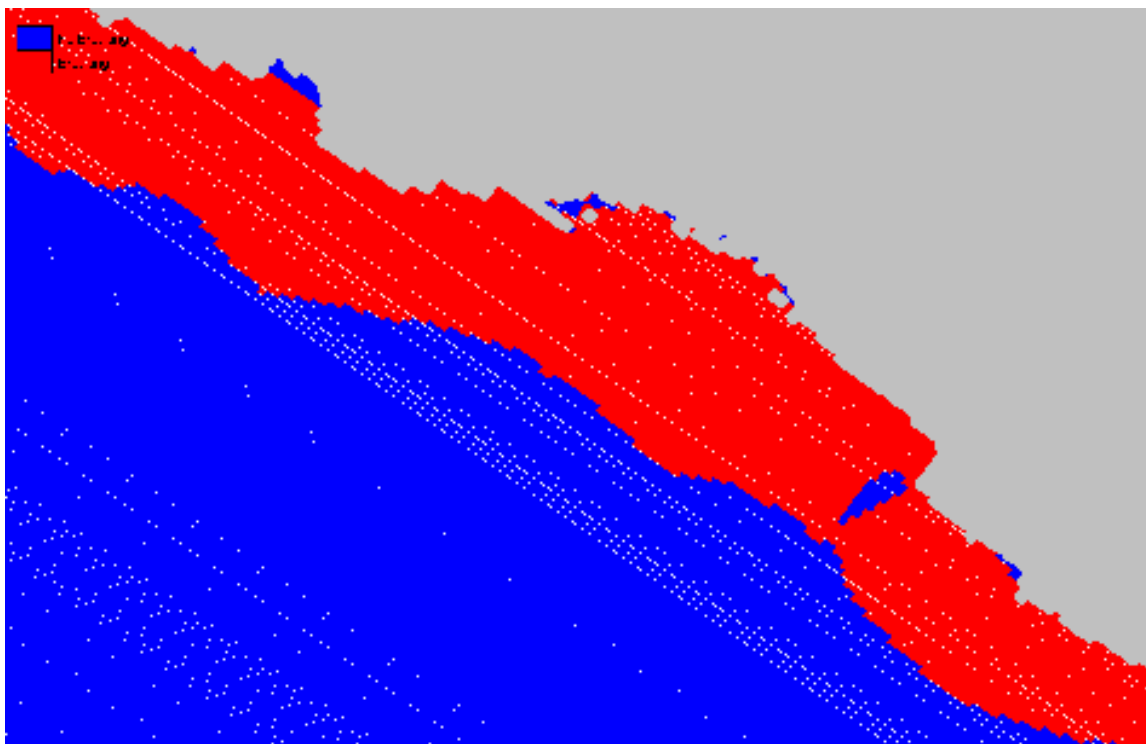


Figura 1.21– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 5$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 4,80m$   $Tp = 10,6s$

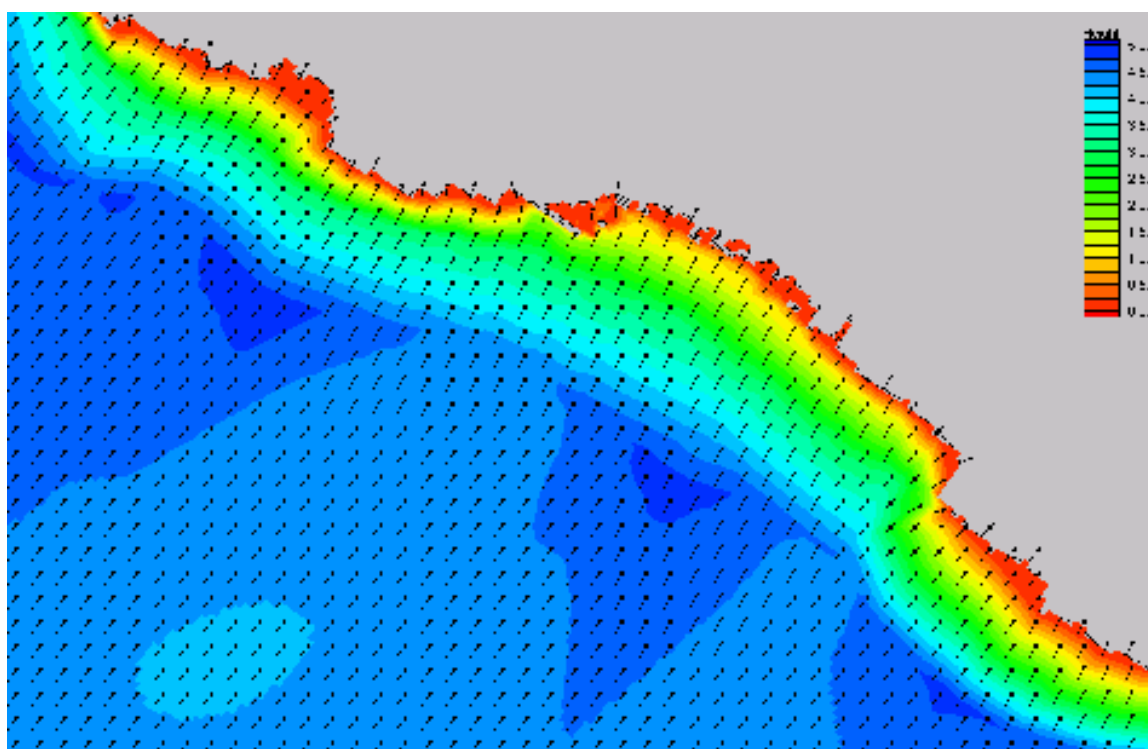


Figura 1.22 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 5$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 4,80m$   $Tp = 10,6s$

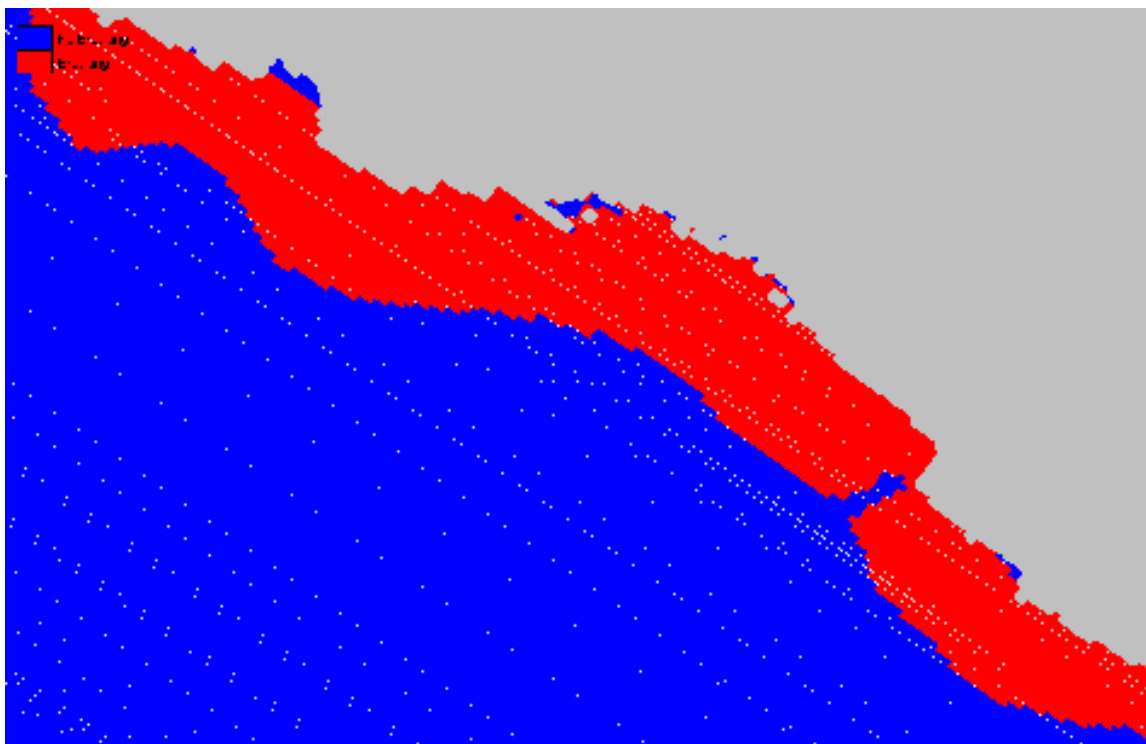


Figura 1.23– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 5$   $\vartheta = 270^\circ N$   $H_s = 5,06m$   $Tp = 10,9s$

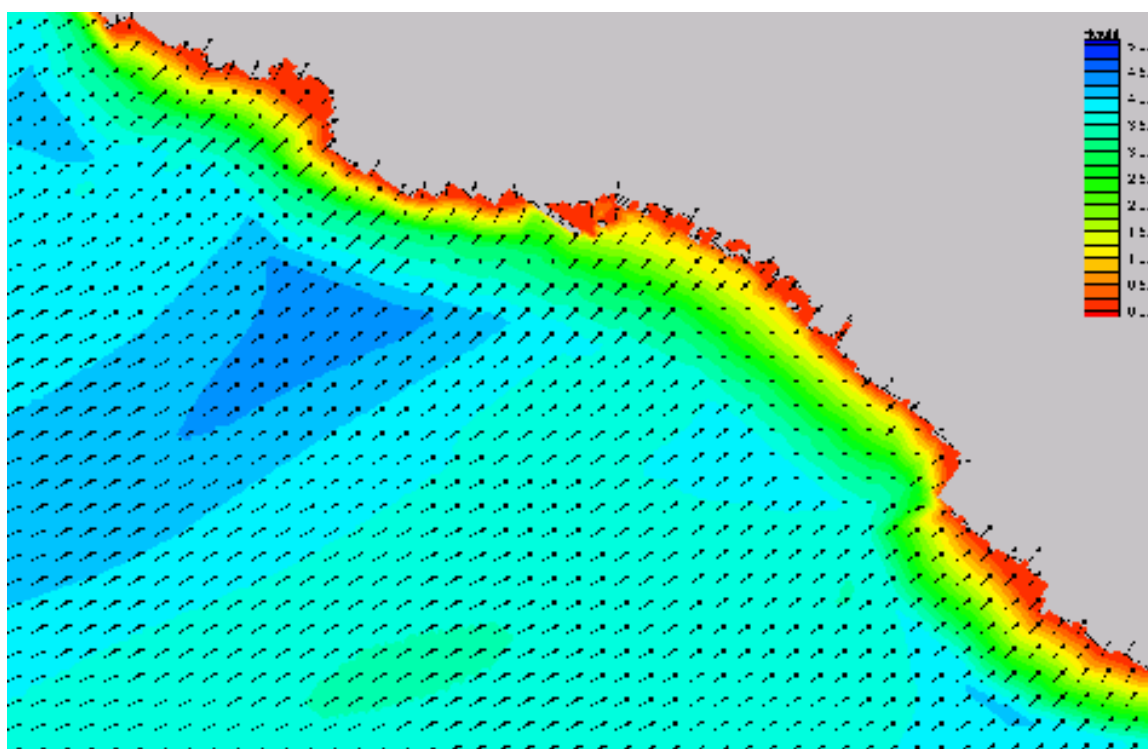


Figura 1.24 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 5$   $\vartheta = 270^\circ N$   
 $H_s = 5,06m$   $Tp = 10,9s$



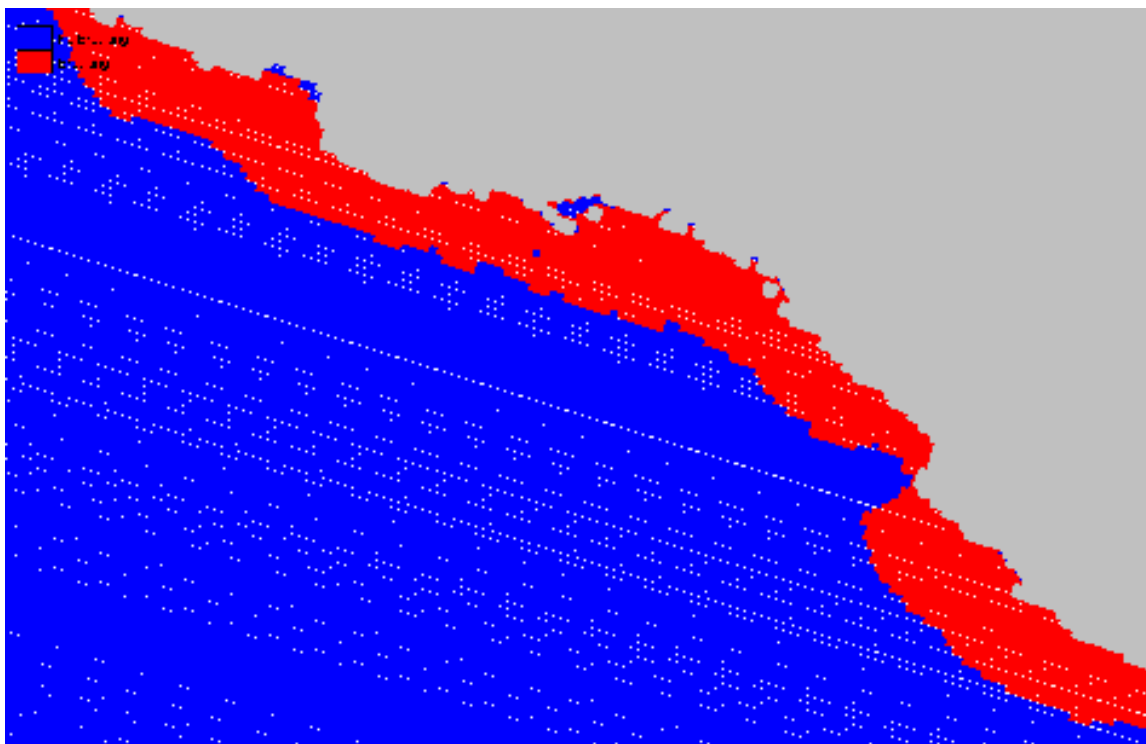


Figura 1.25– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 10$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 5,05m$   $Tp = 10,9s$

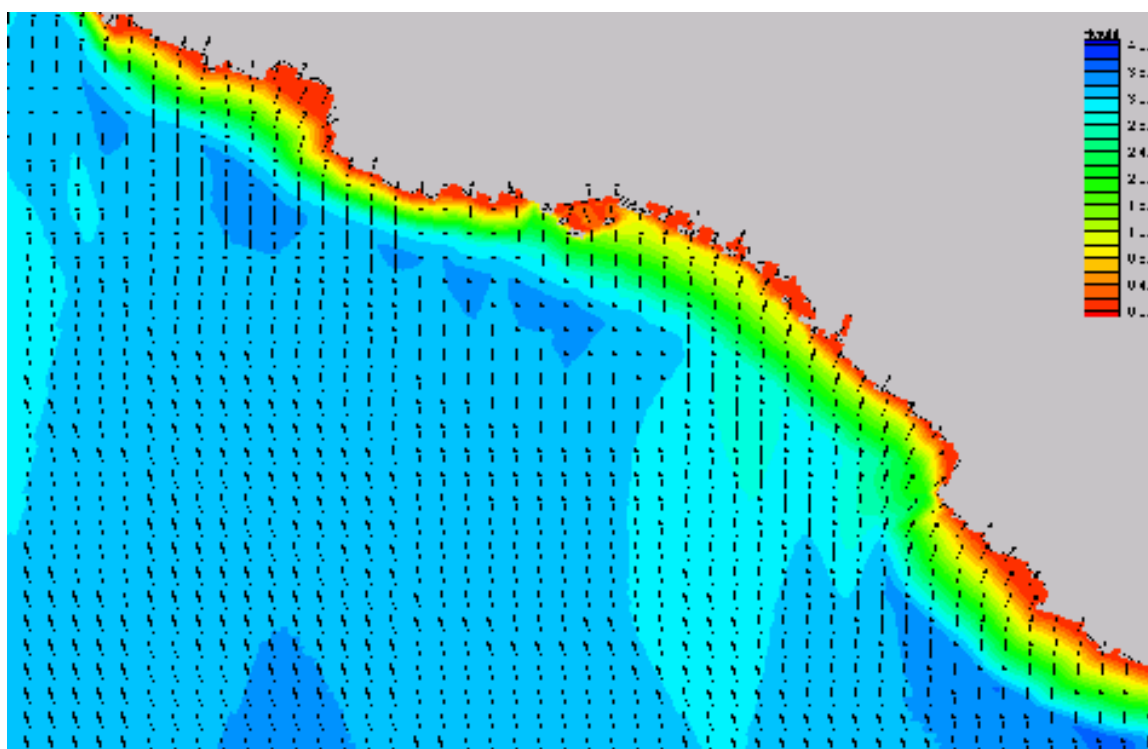


Figura 1.26 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 10$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 5,05m$   $Tp = 10,9s$

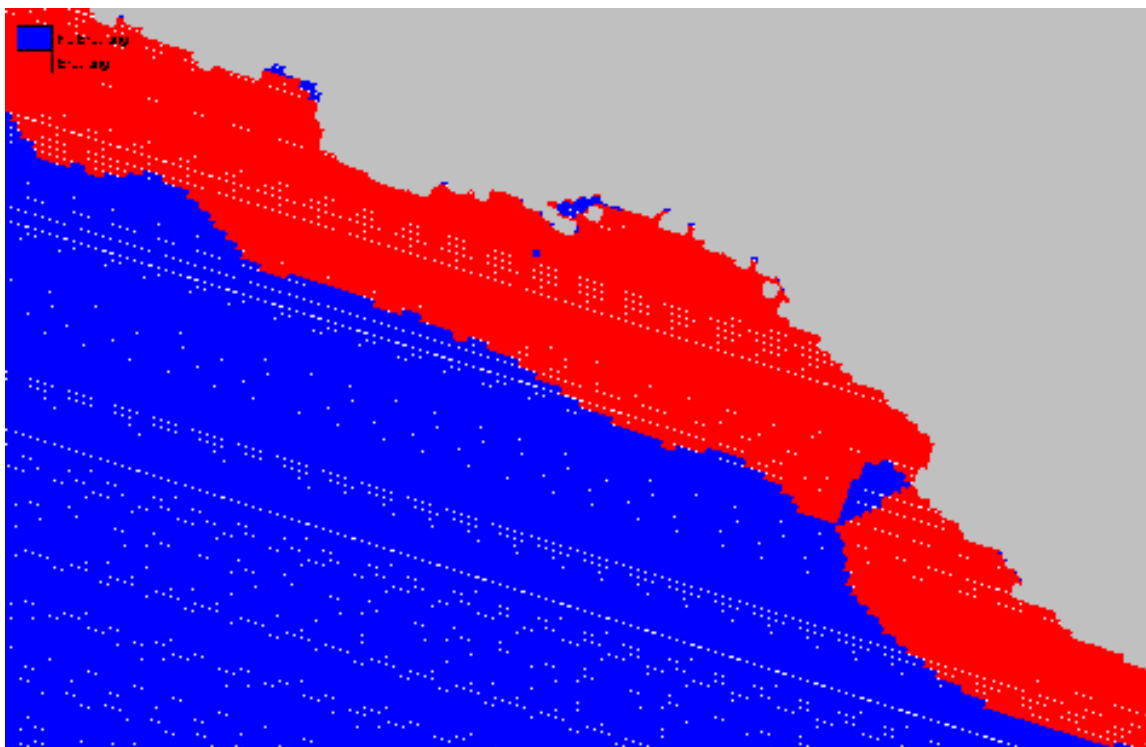


Figura 1.27– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 10$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 4,70m$   $Tp = 10,5s$

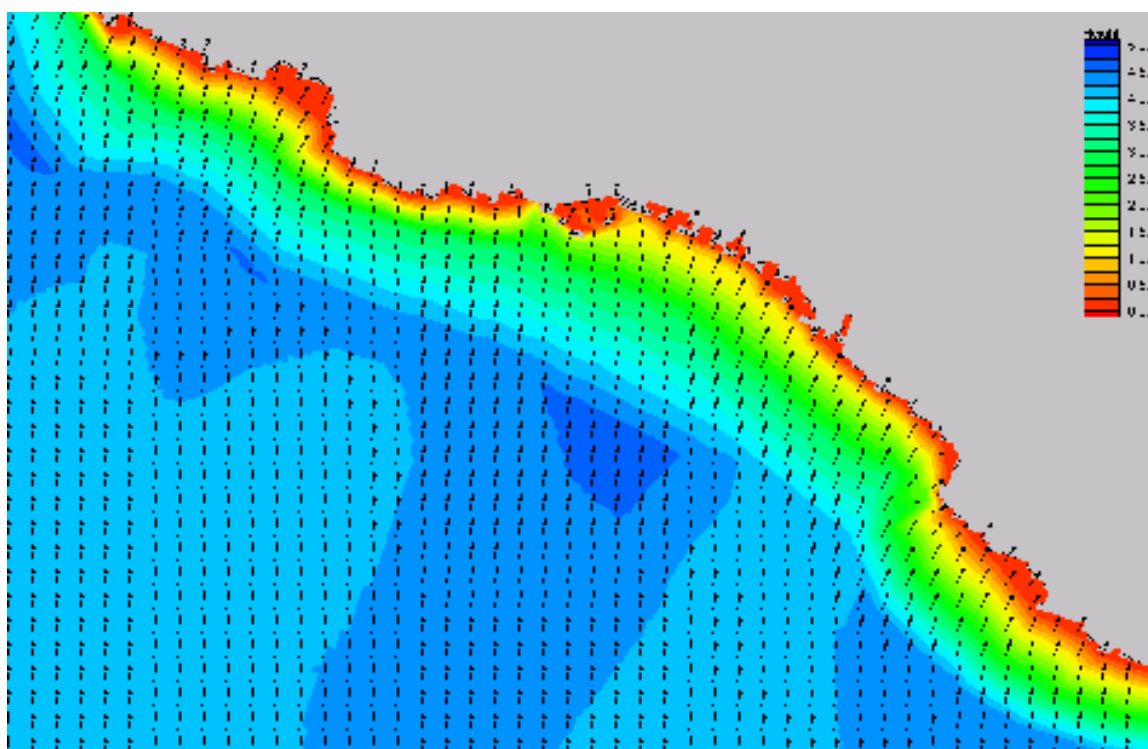


Figura 1.28 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 10$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 4,70m$   $Tp = 10,5s$

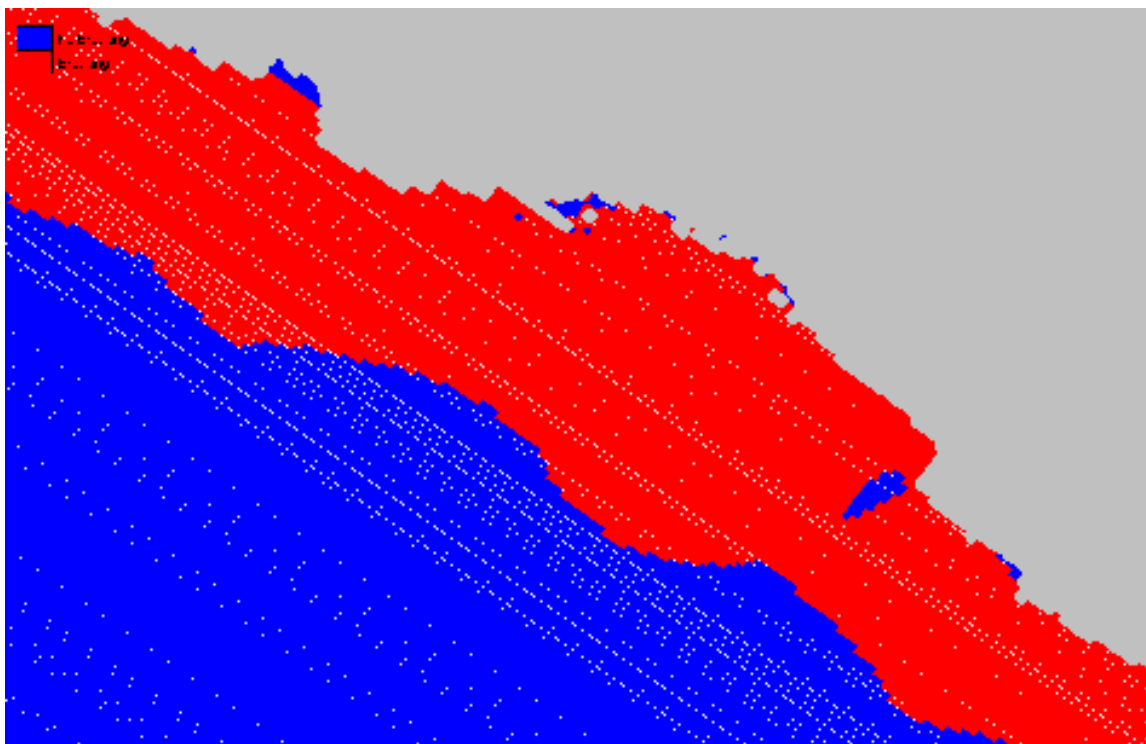


Figura 1.29– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 10$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 5,67m$   $Tp = 11,5s$

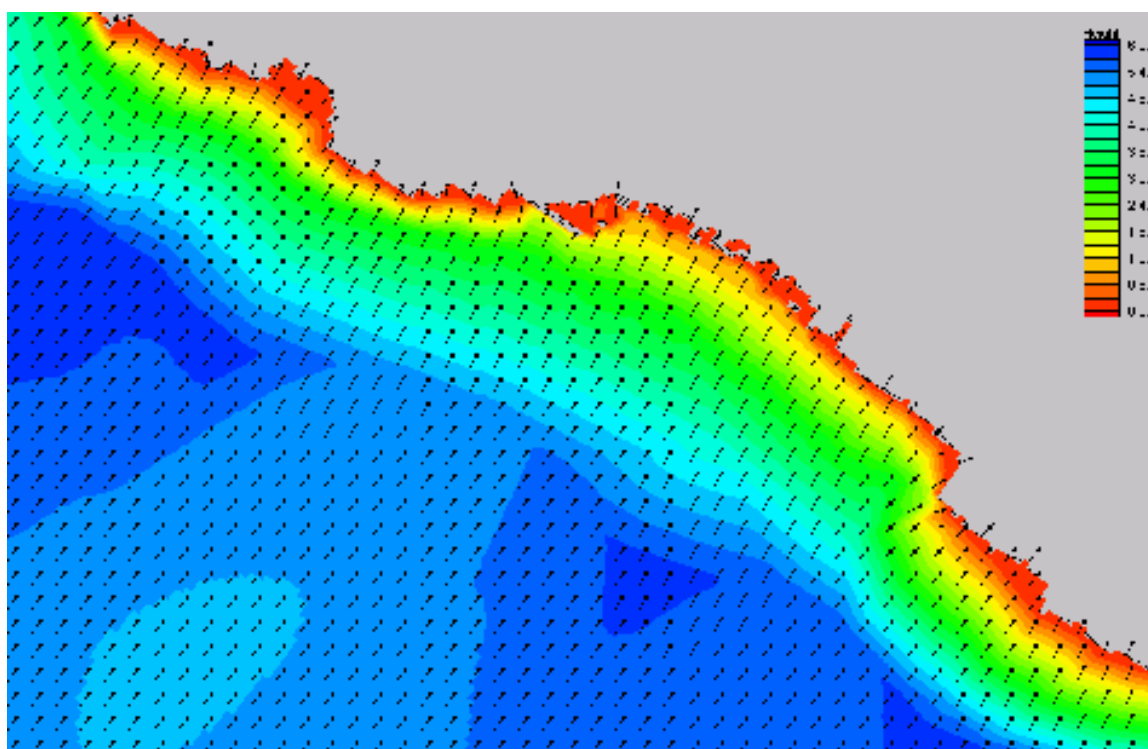


Figura 1.30 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 10$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 5,67m$   $Tp = 11,5s$

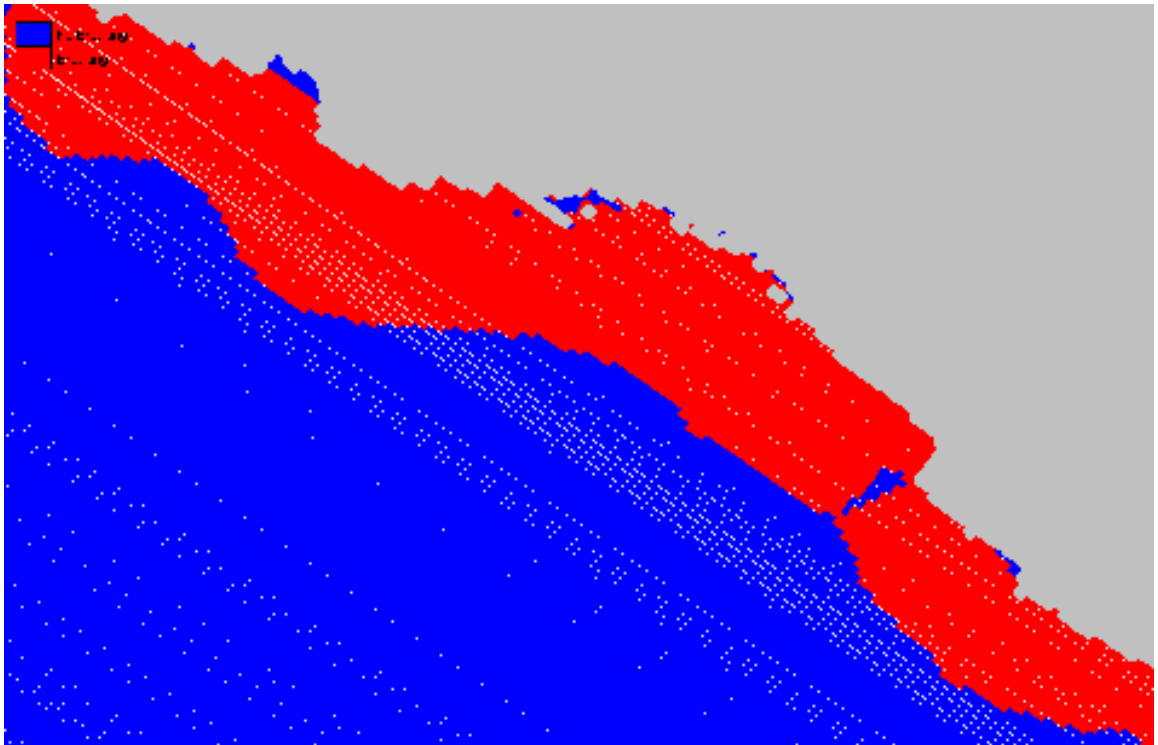


Figura 1.31– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 10$   $\vartheta = 270^\circ N$   $H_s = 5,59m$   $Tp = 11,5s$

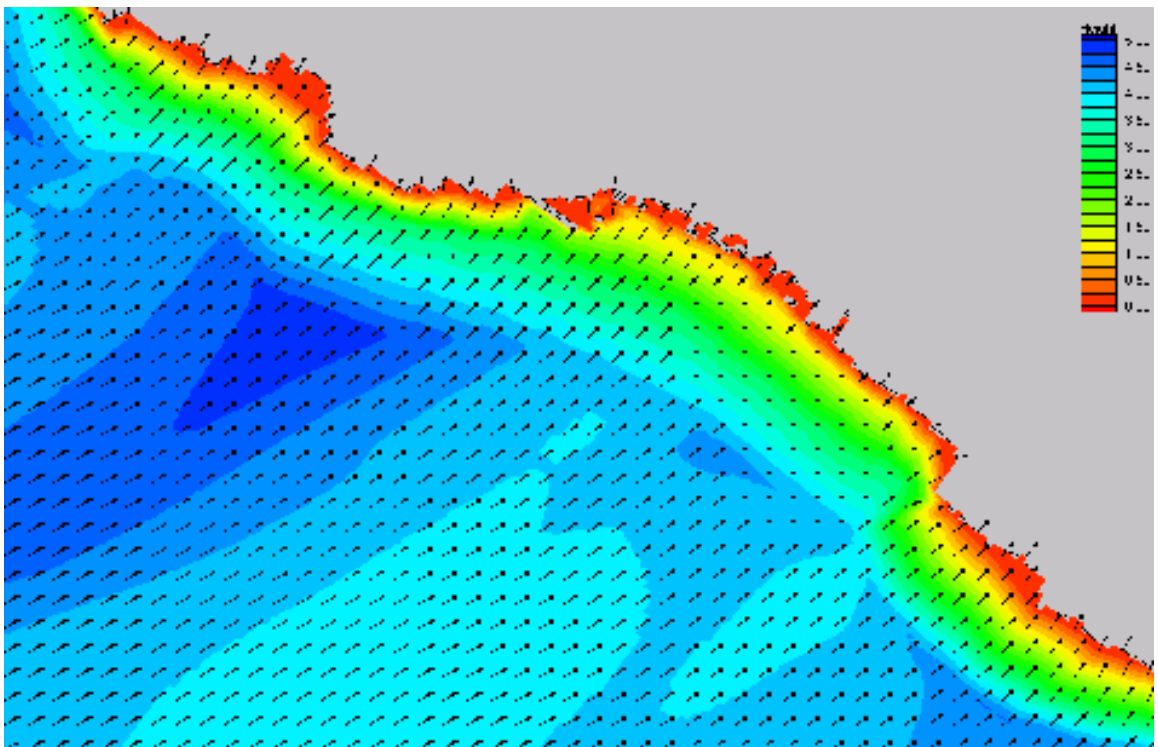


Figura 1.32 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 10$   $\vartheta = 270^\circ N$   
 $H_s = 5,59m$   $Tp = 11,5s$

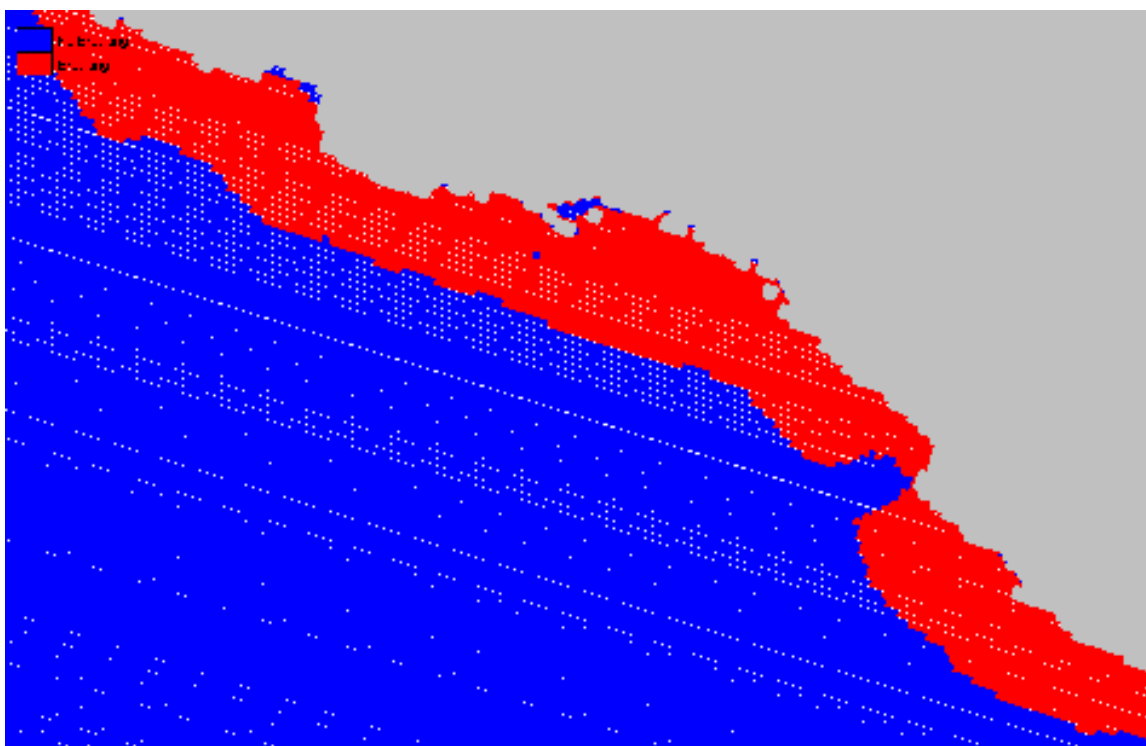


Figura 1.33– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 20$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 5,48m$   $Tp = 11,4s$

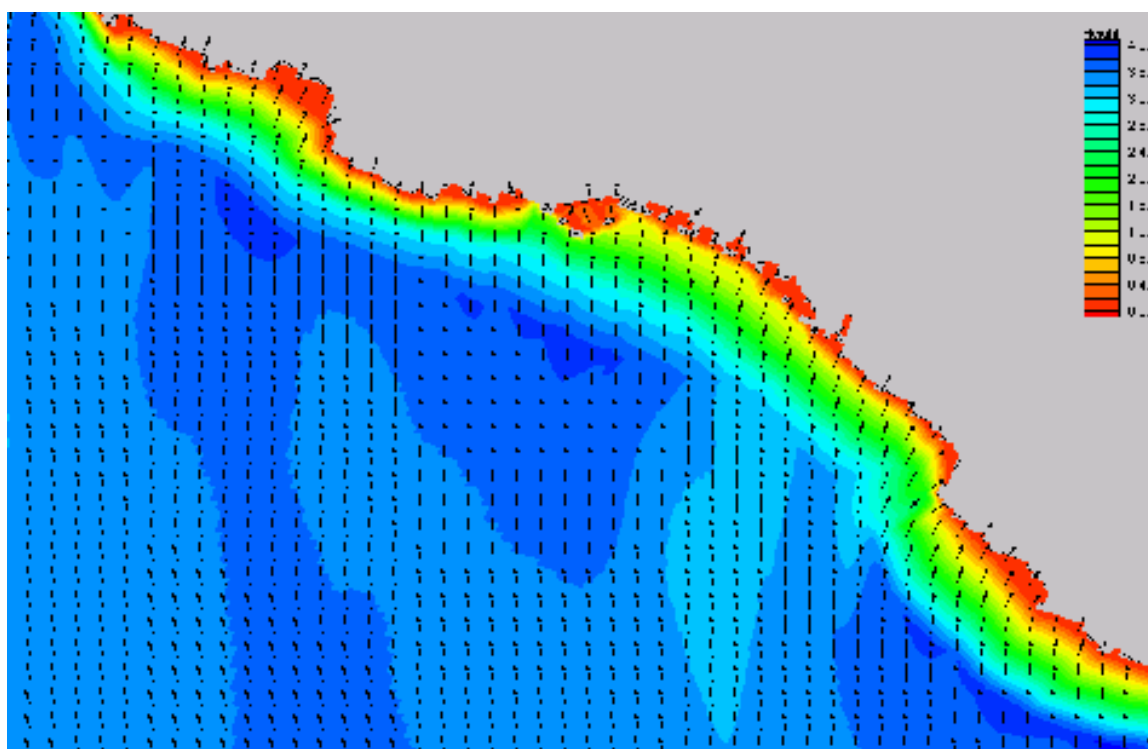


Figura 1.34 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 20$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 5,48m$   $Tp = 11,4s$

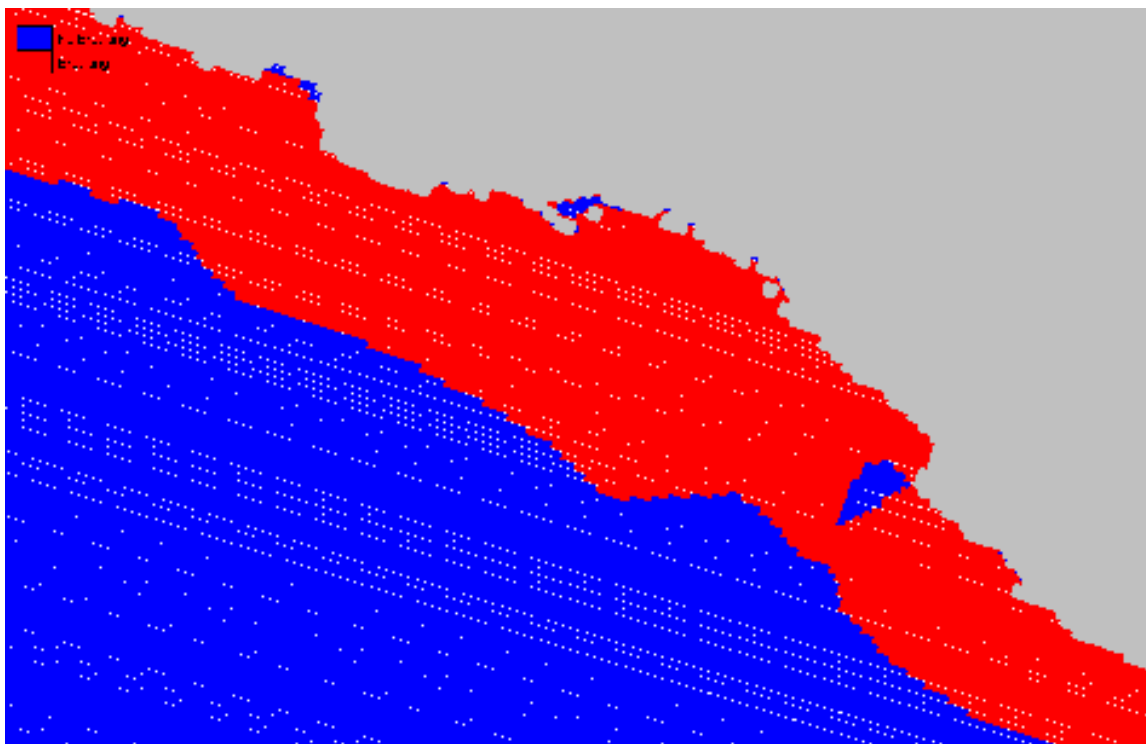


Figura 1.35– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 20$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 5,37m$   $Tp = 11,2s$

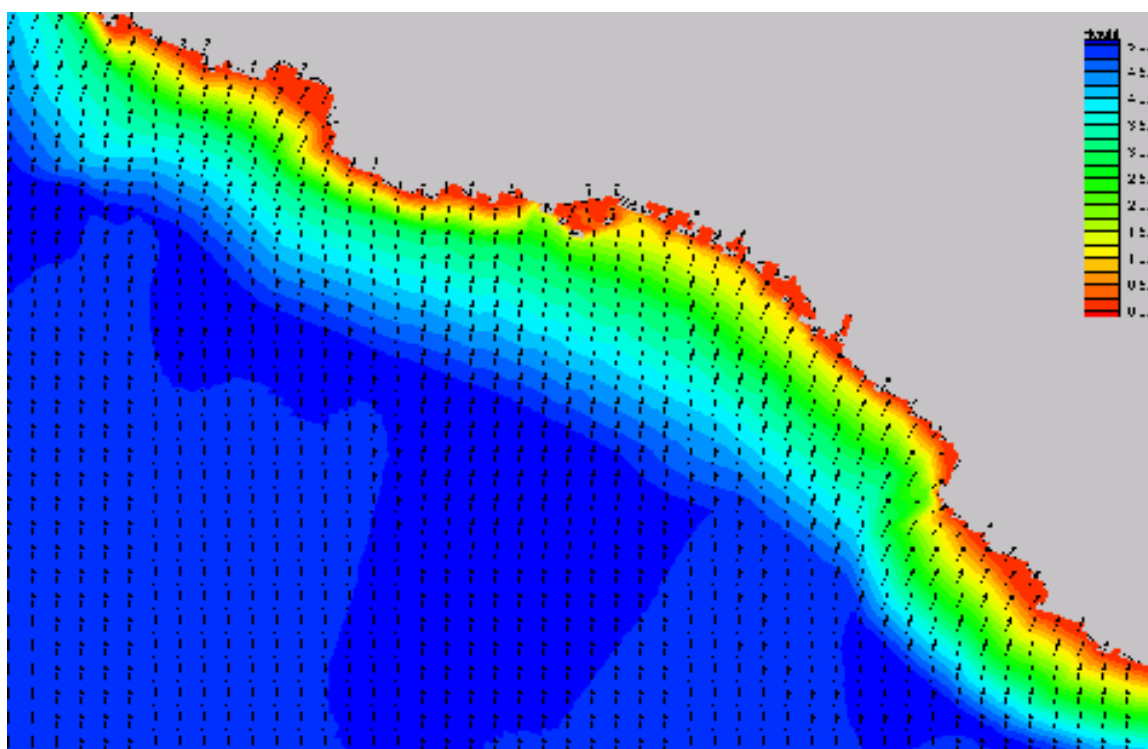


Figura 1.36 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 20$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 5,37m$   $Tp = 11,2s$

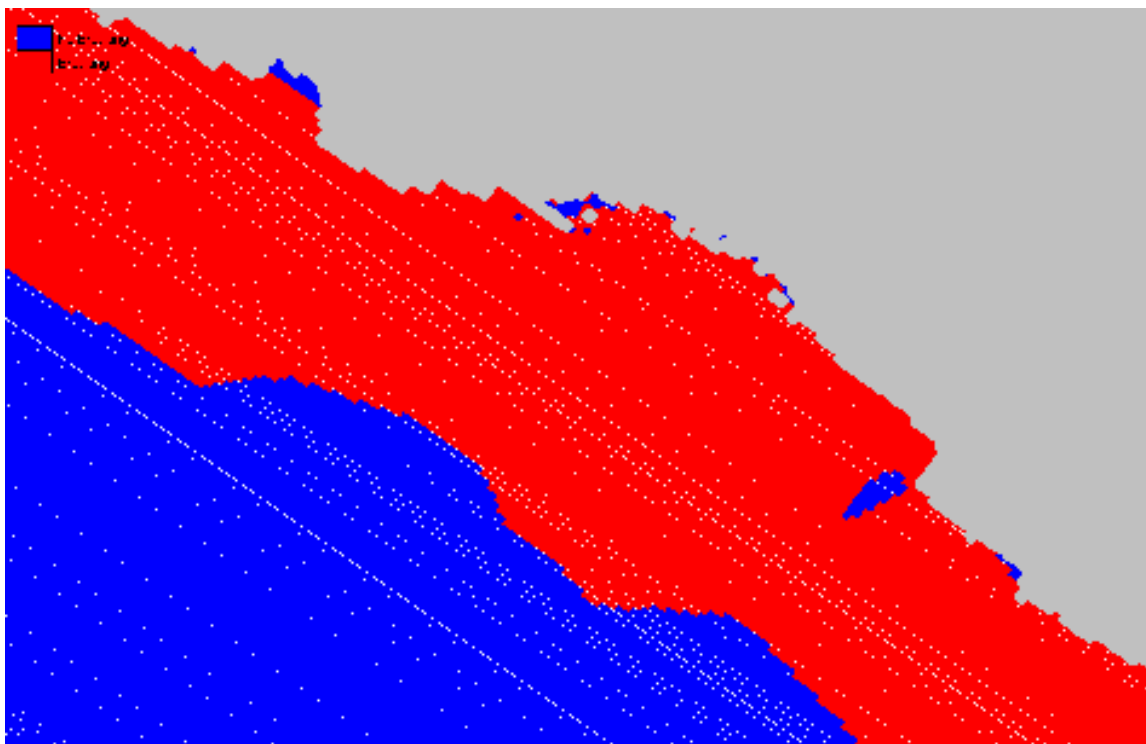


Figura 1.37 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 20$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 6,50m$   $Tp = 12,4s$

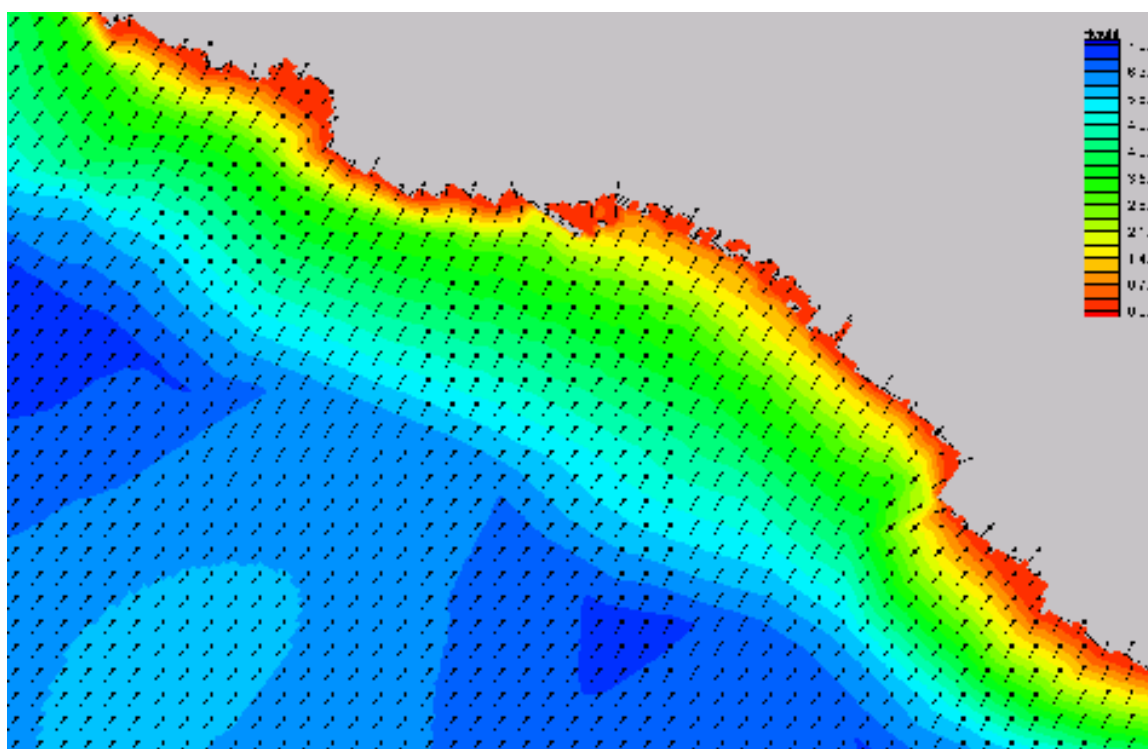


Figura 1.38 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 20$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 6,50m$   $Tp = 12,4s$

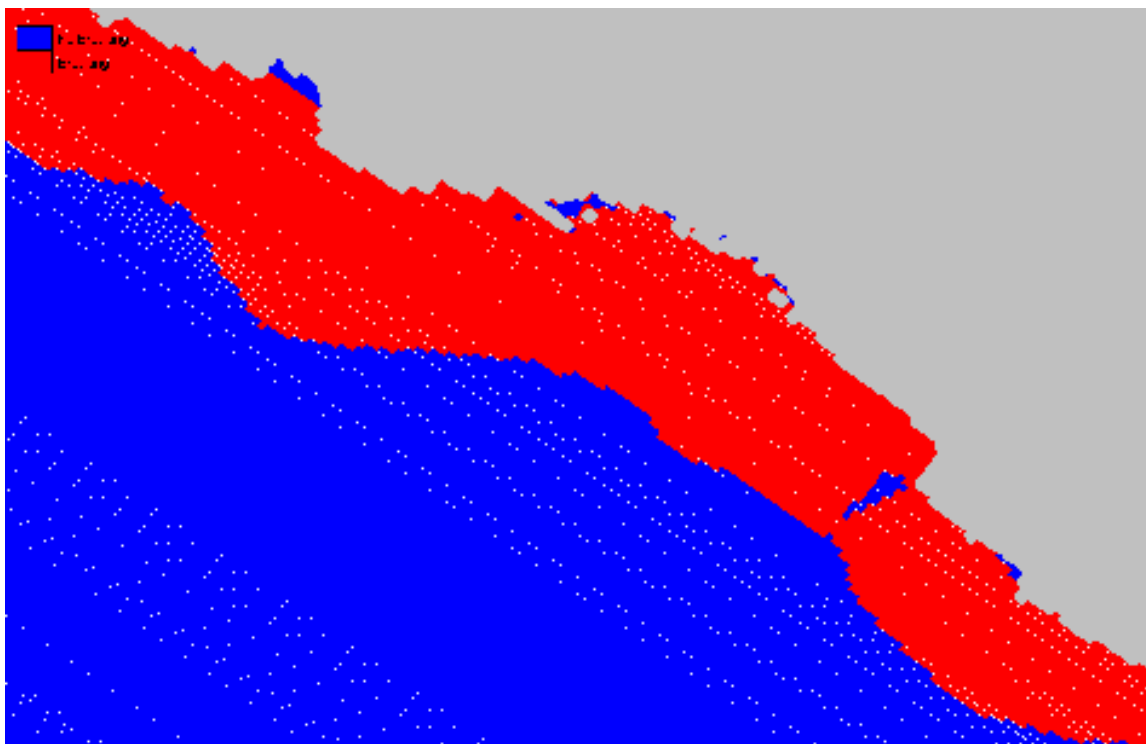


Figura 1.39 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 20$   $\vartheta = 270^\circ N$   $H_s = 6,10m$   $Tp = 12,0s$

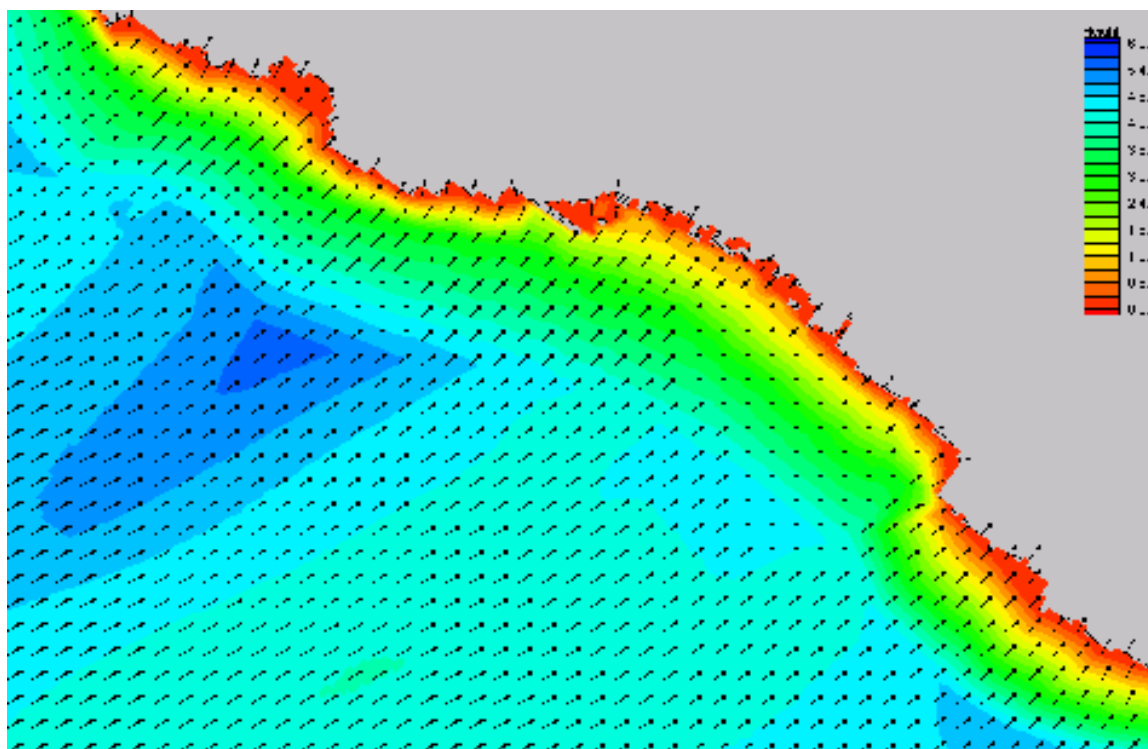


Figura 1.40 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 20$   $\vartheta = 270^\circ N$   
 $H_s = 6,10m$   $Tp = 12,0s$



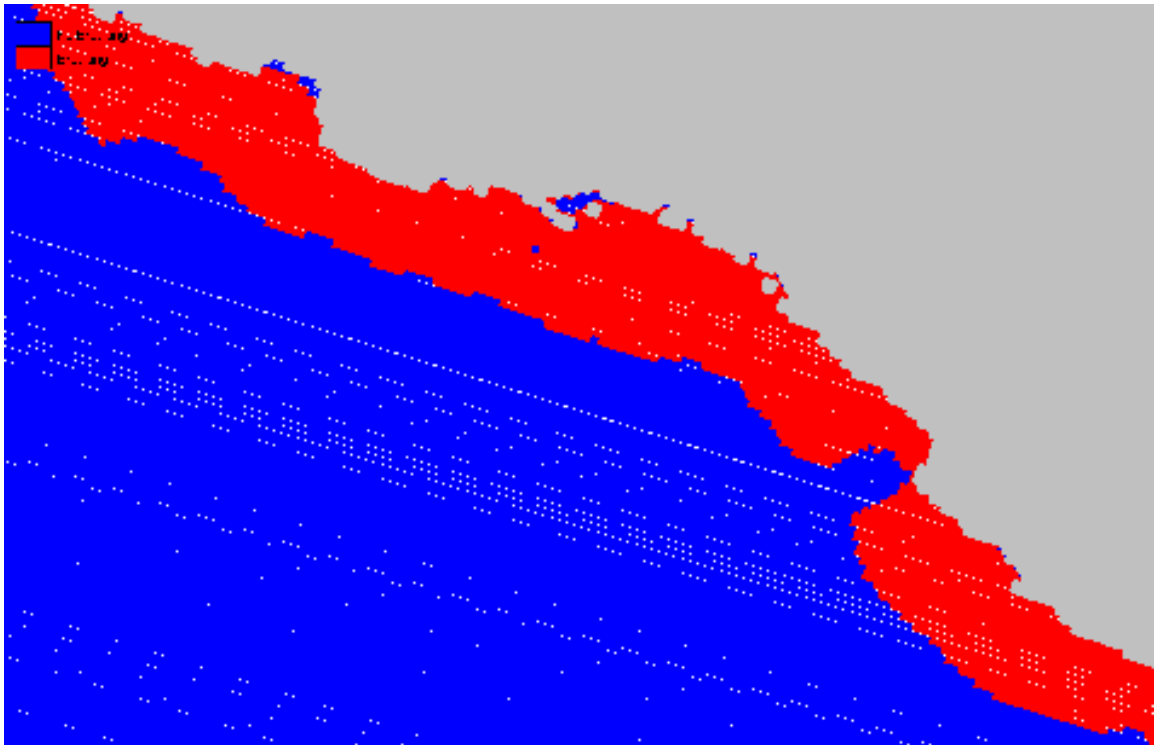


Figura 1.41– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 30$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 5,73m$   $Tp = 11,6s$

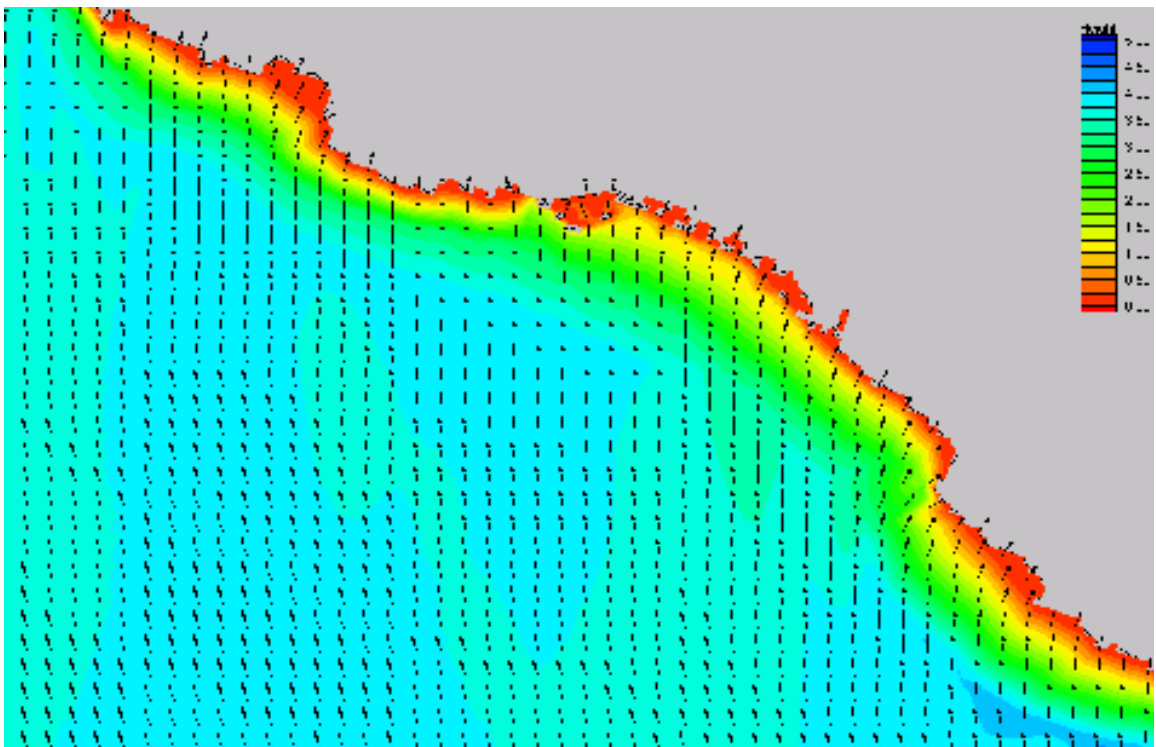


Figura 1.42 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 30$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 5,73m$   $Tp = 11,6s$

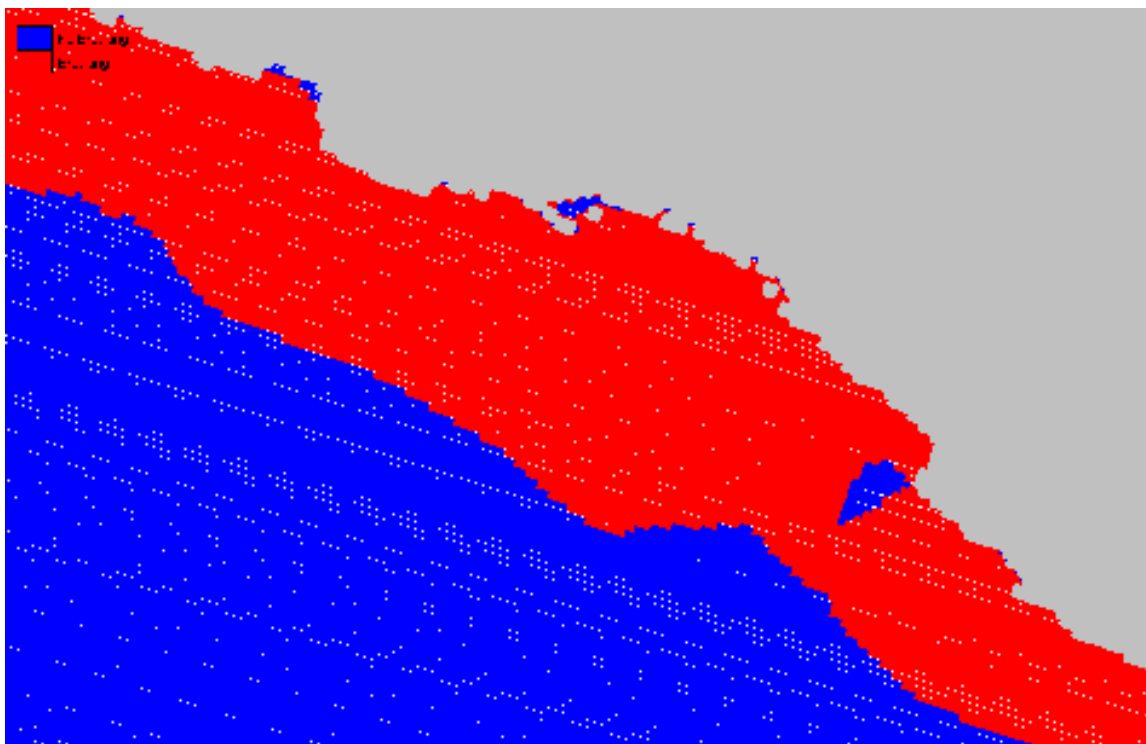


Figura 1.43 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 30$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 5,75m$   $Tp = 11,6s$

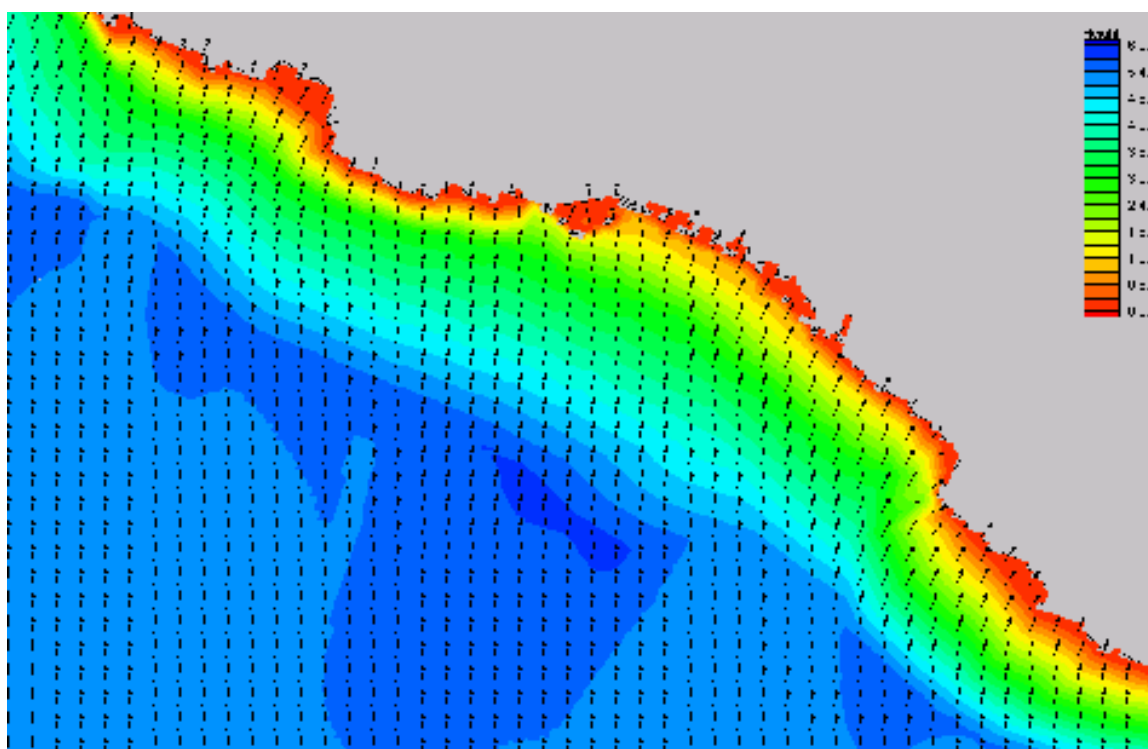


Figura 1.44 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 30$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 5,75m$   $Tp = 11,6s$

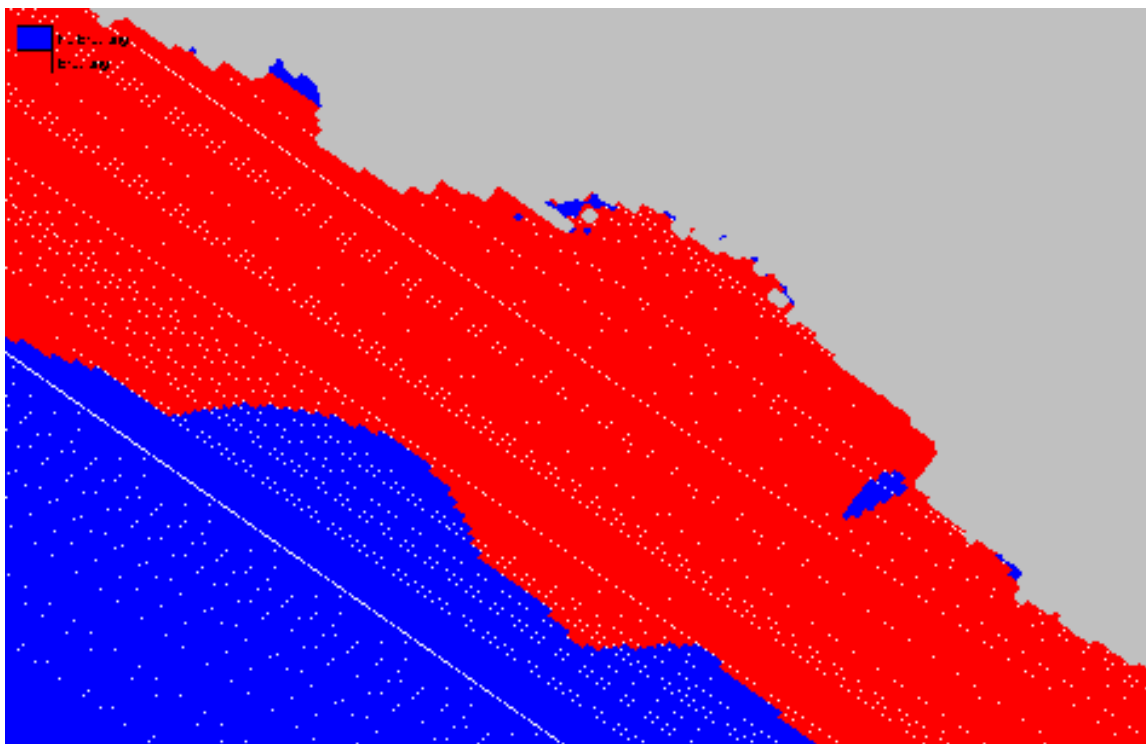


Figura 1.45 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 30$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 6,97m$   $Tp = 12,8s$

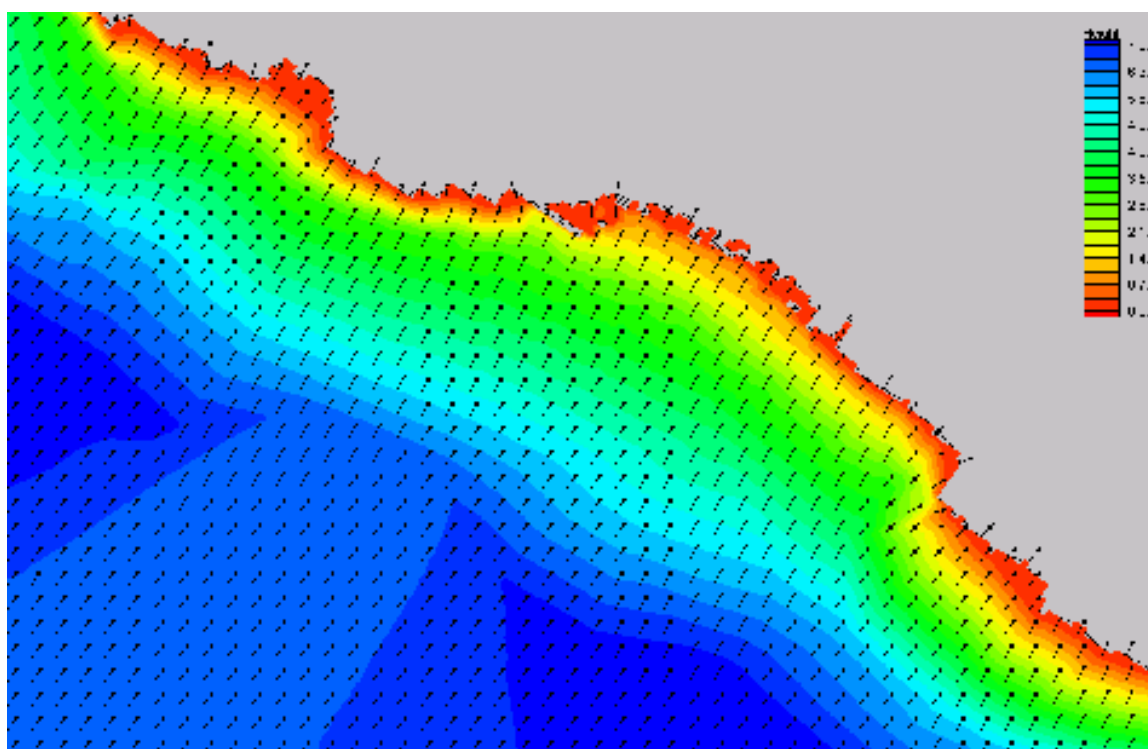


Figura 1.46 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 30$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 6,97m$   $Tp = 12,8s$

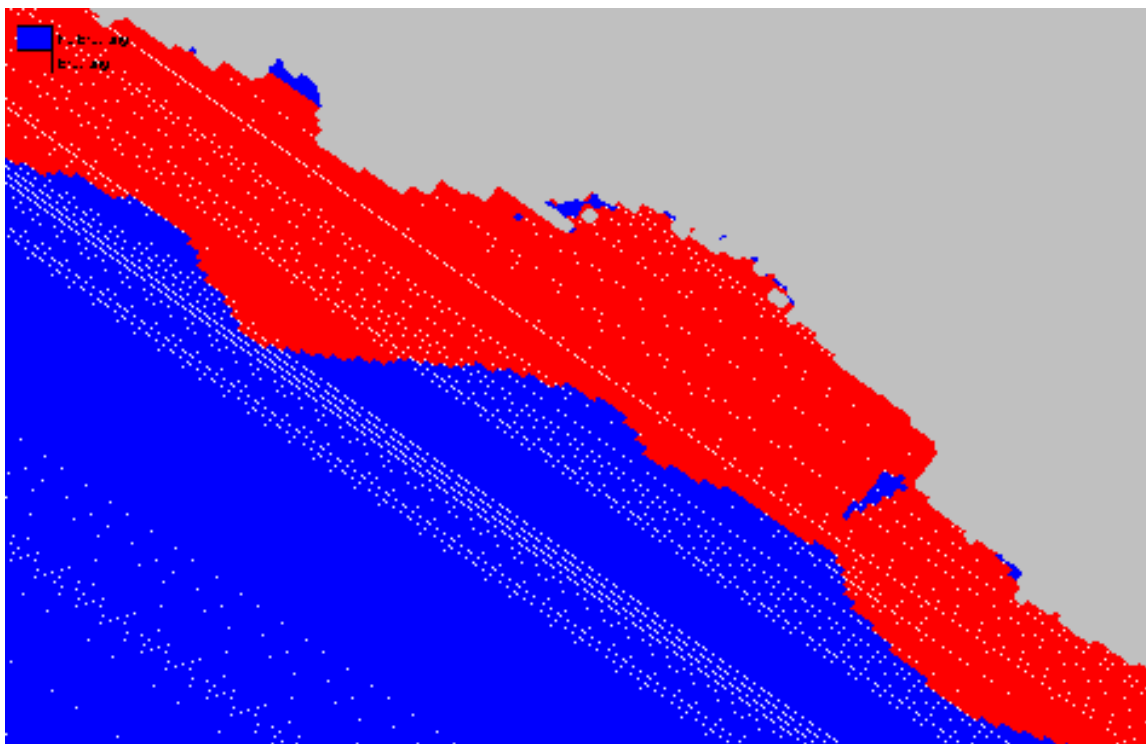


Figura 1.47 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 30$   $\vartheta = 270^\circ N$   $H_s = 6,39m$   $Tp = 12,3s$

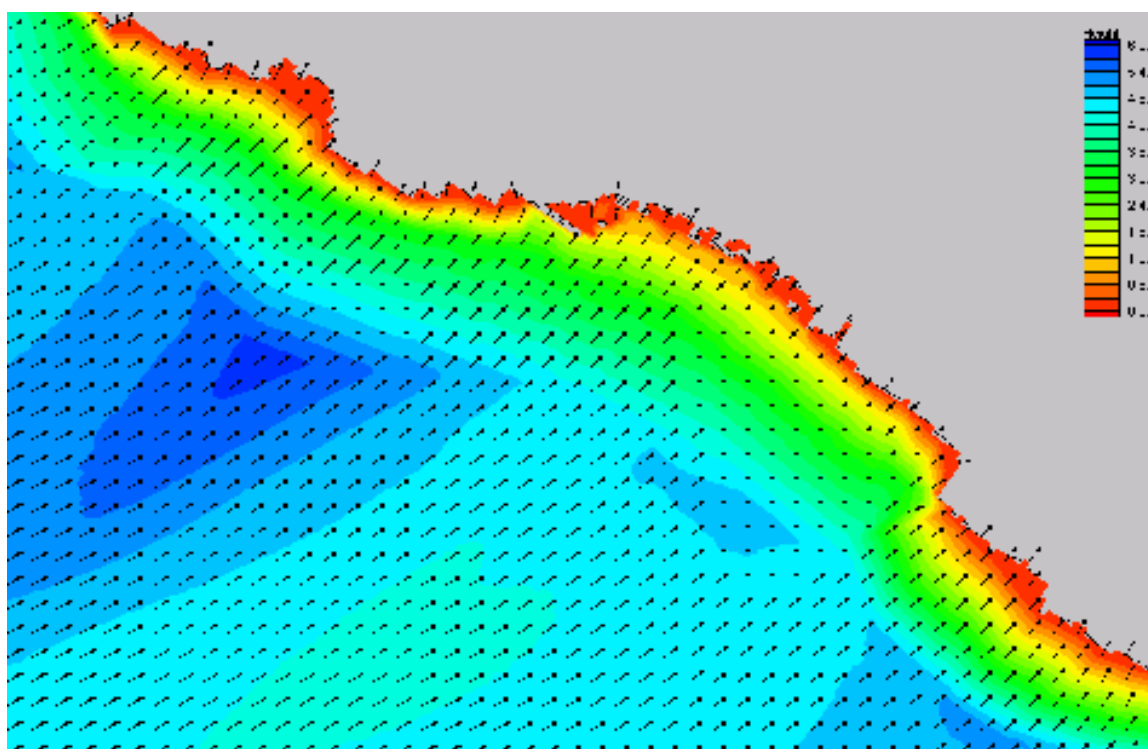


Figura 1.48 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 30$   $\vartheta = 270^\circ N$   
 $H_s = 6,39m$   $Tp = 12,3s$

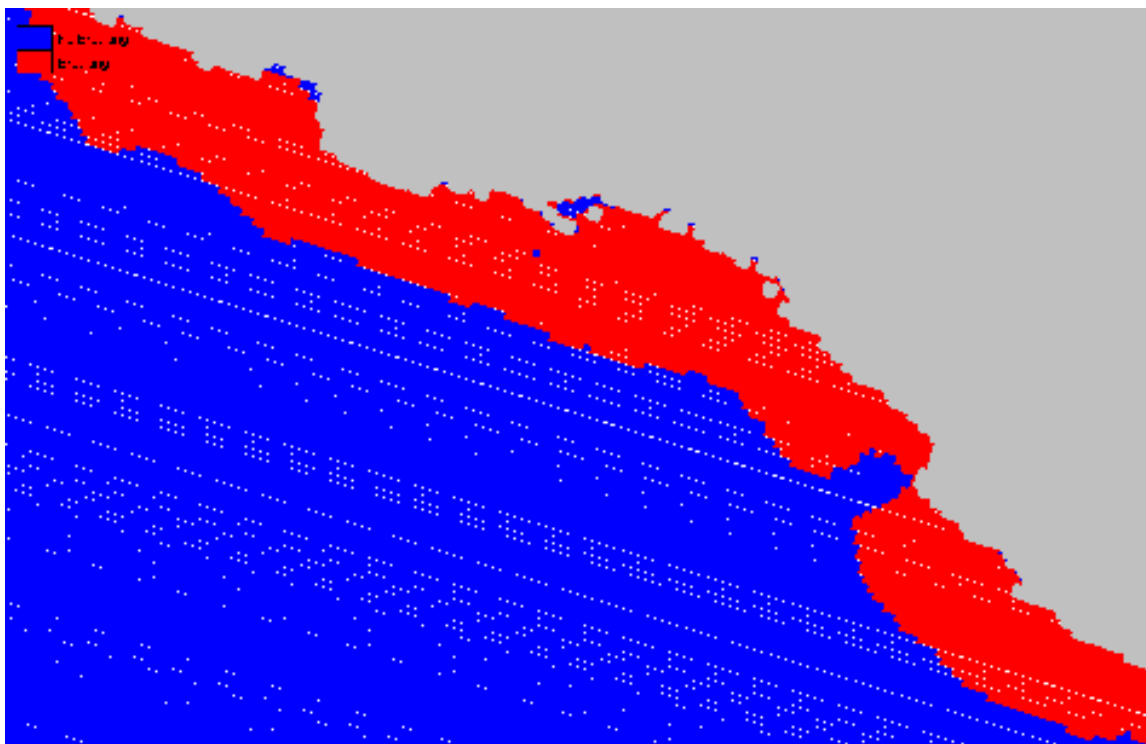


Figura 1.49– Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 40$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 5,91m$   $Tp = 11,8s$

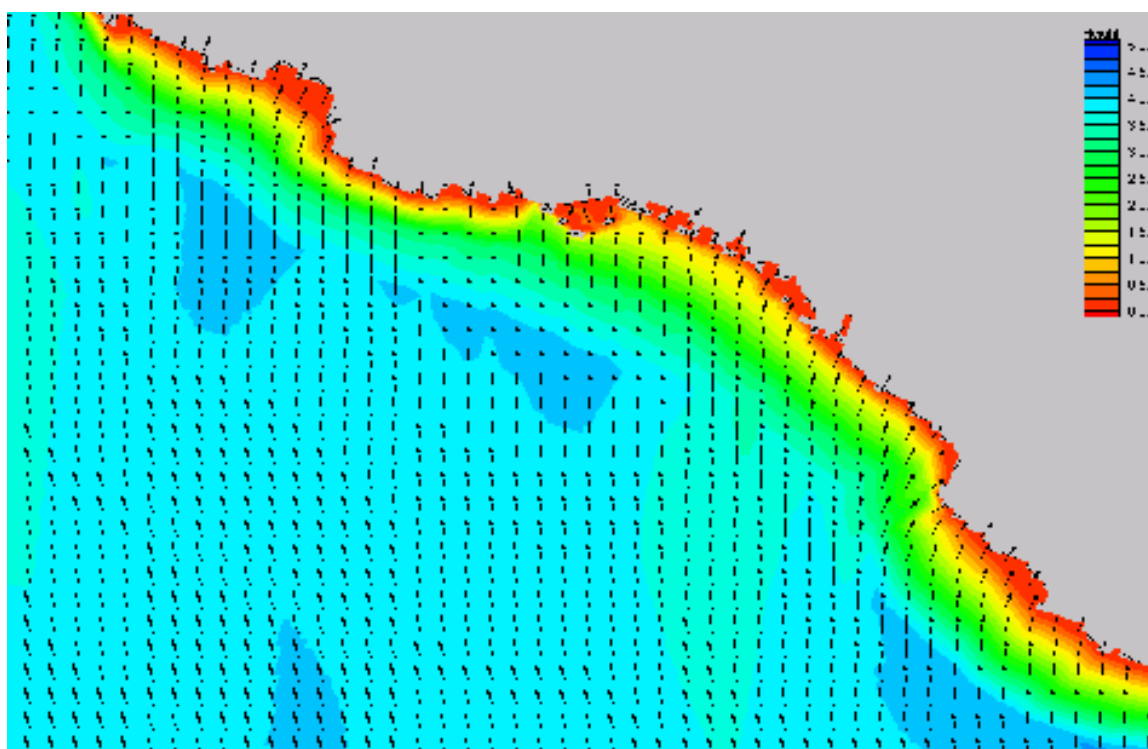


Figura 1.50 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 40$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 5,91m$   $Tp = 11,8s$

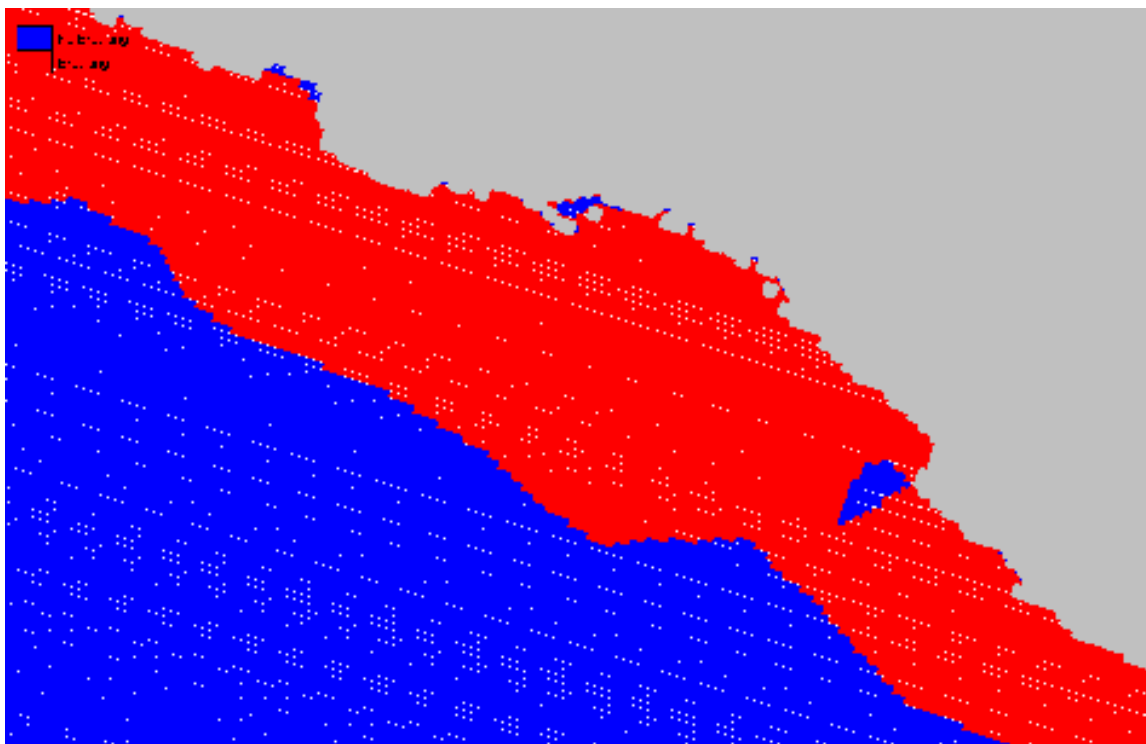


Figura 1.51 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 40$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 6,02m$   $Tp = 11,9s$

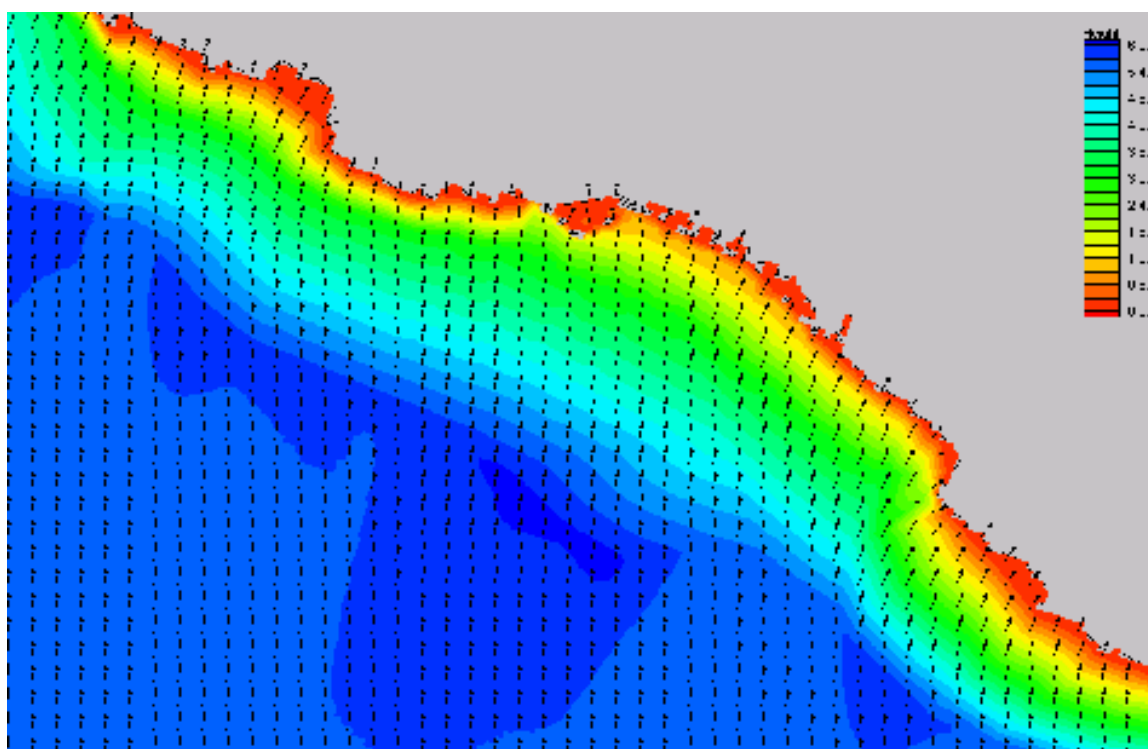


Figura 1.52 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 40$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 6,02m$   $Tp = 11,9s$

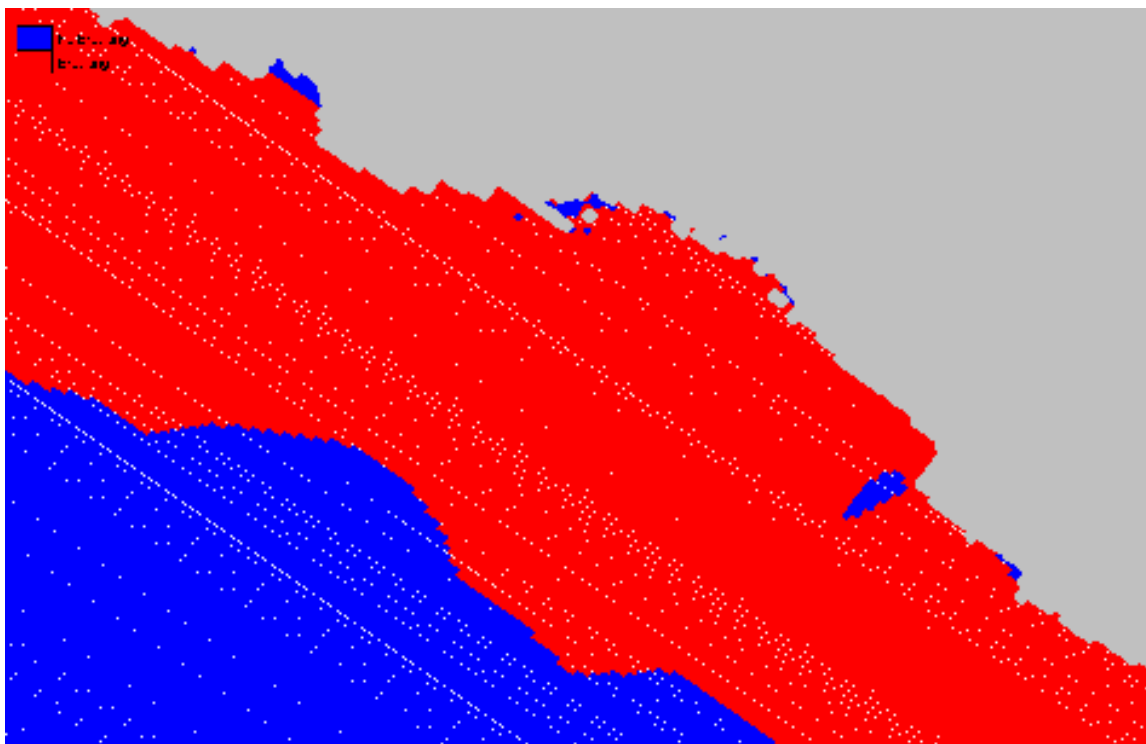


Figura 1.53 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 40$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 7,31m$   $Tp = 13,1s$

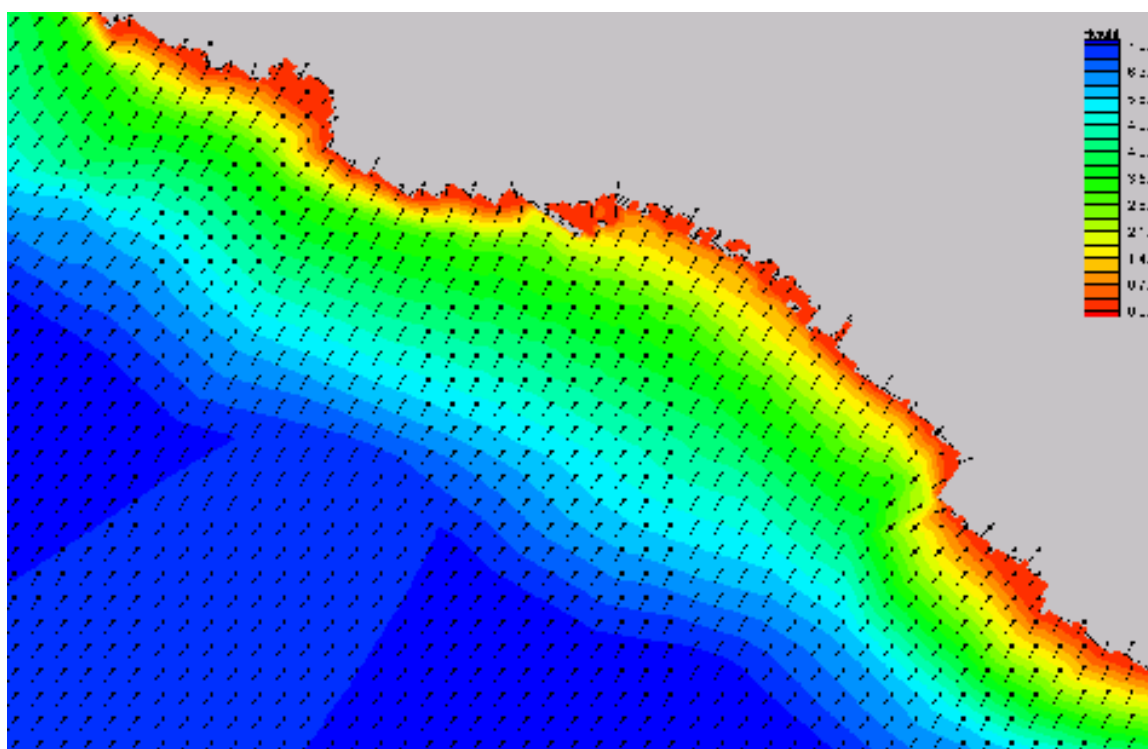


Figura 1.54 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 40$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 7,31m$   $Tp = 13,1s$



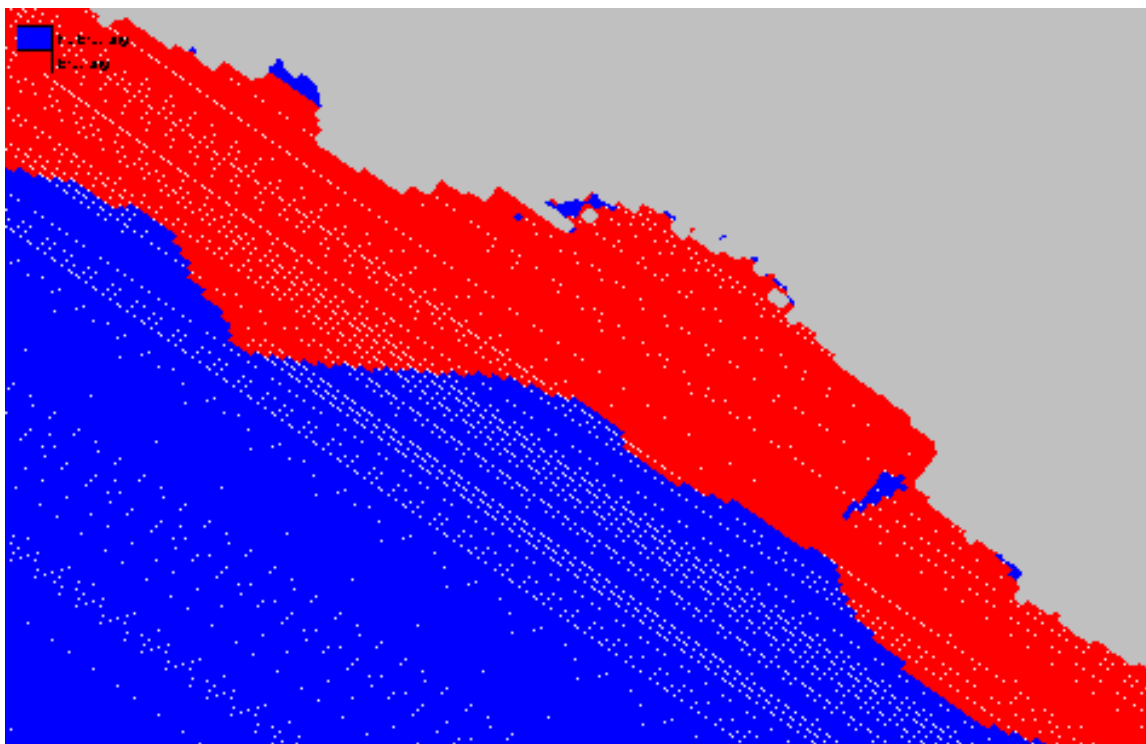


Figura 1.55 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 40$   $\vartheta = 270^\circ N$   $H_s = 6,59m$   $Tp = 12,5s$

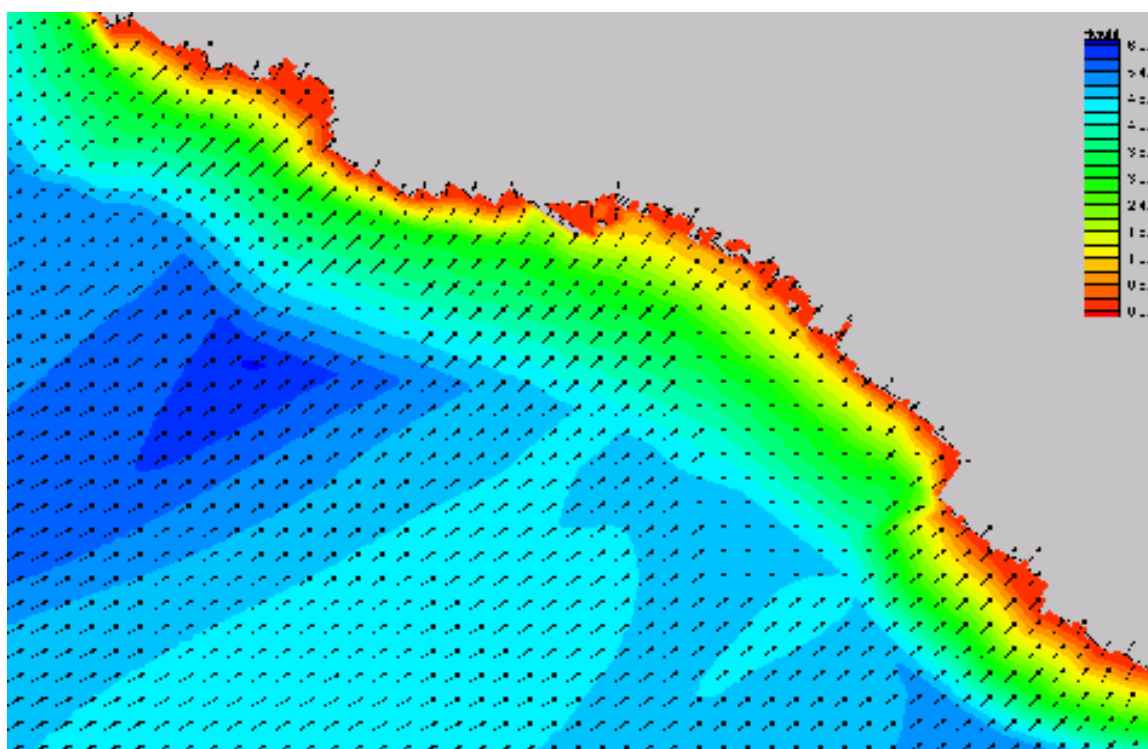


Figura 1.56 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 40$   $\vartheta = 270^\circ N$   
 $H_s = 6,59m$   $Tp = 12,5s$



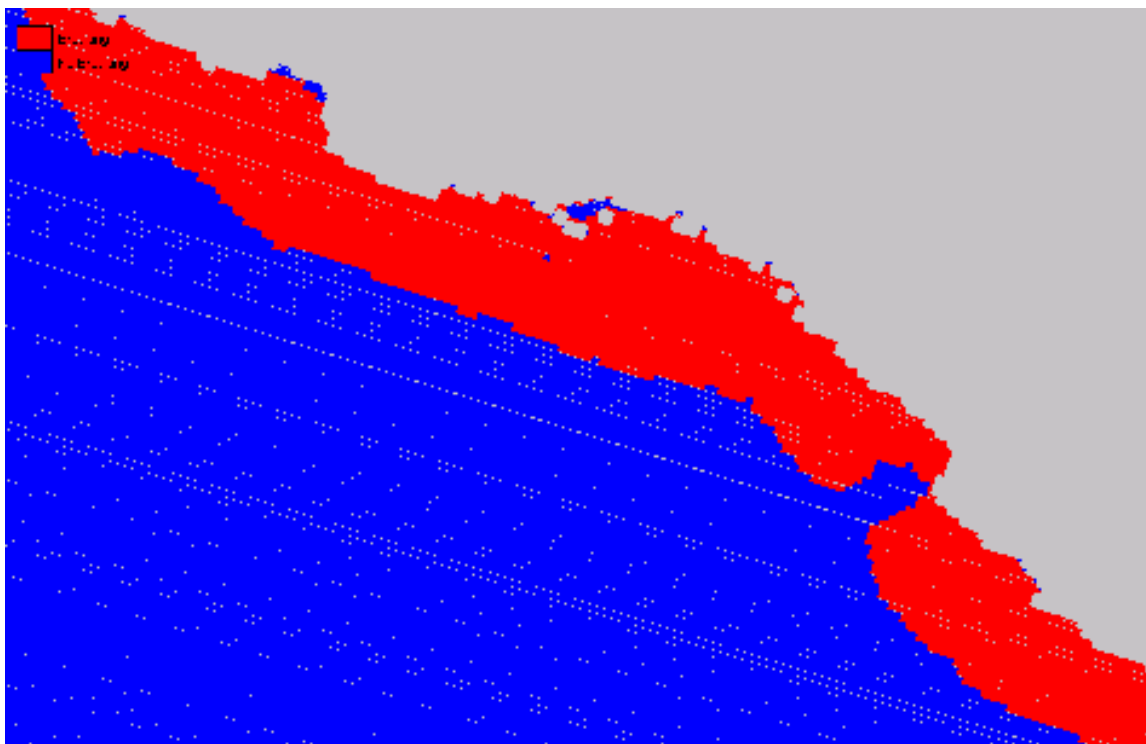


Figura 1.57 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 50$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 6,05m$   $Tp = 11,9s$

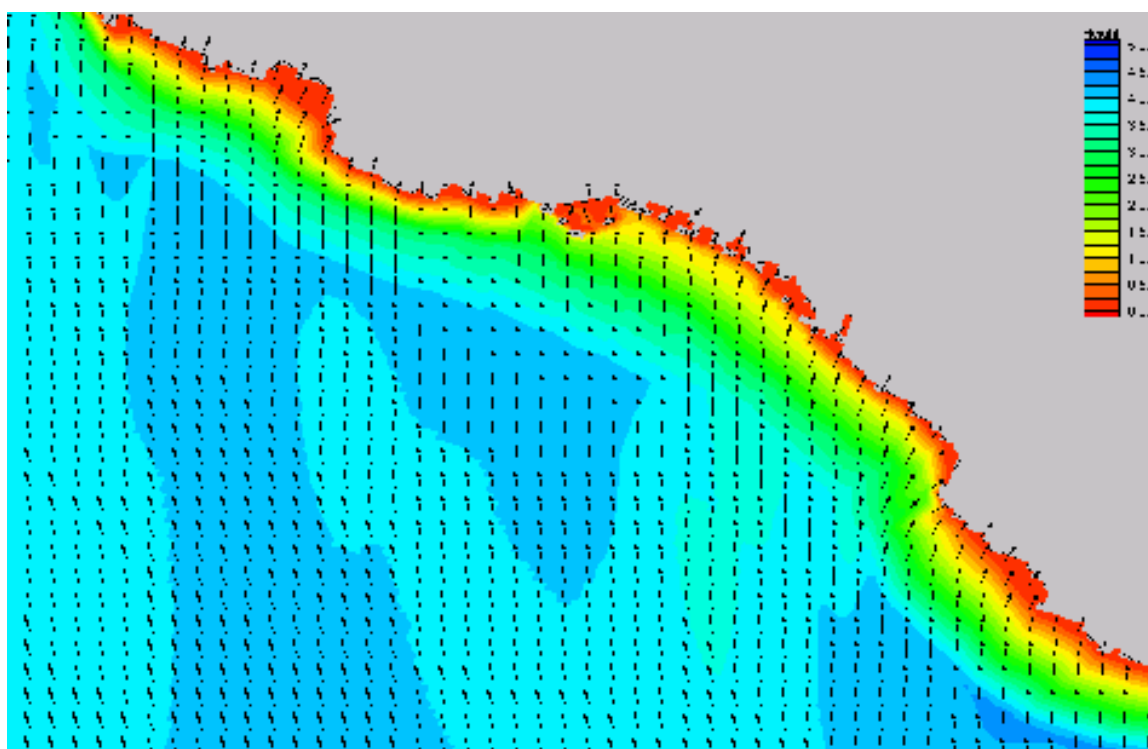


Figura 1.58 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 50$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 6,05m$   $Tp = 11,9s$

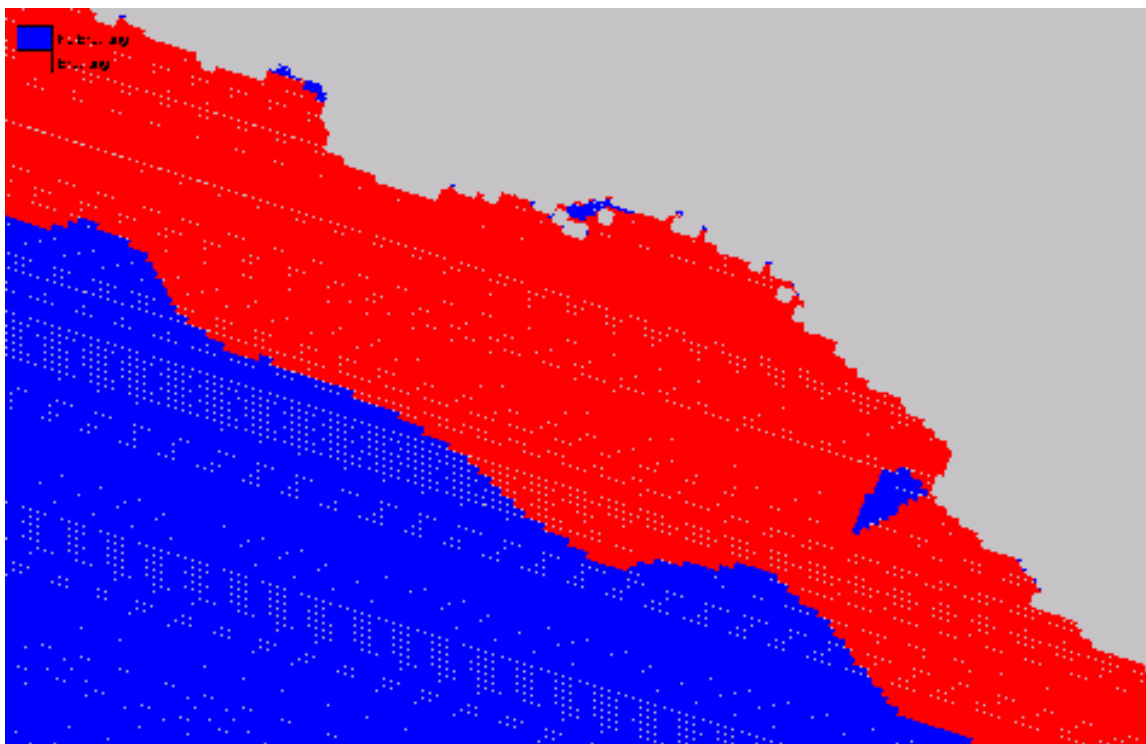


Figura 1.59 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 50$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 6,23m$   $Tp = 12,1s$

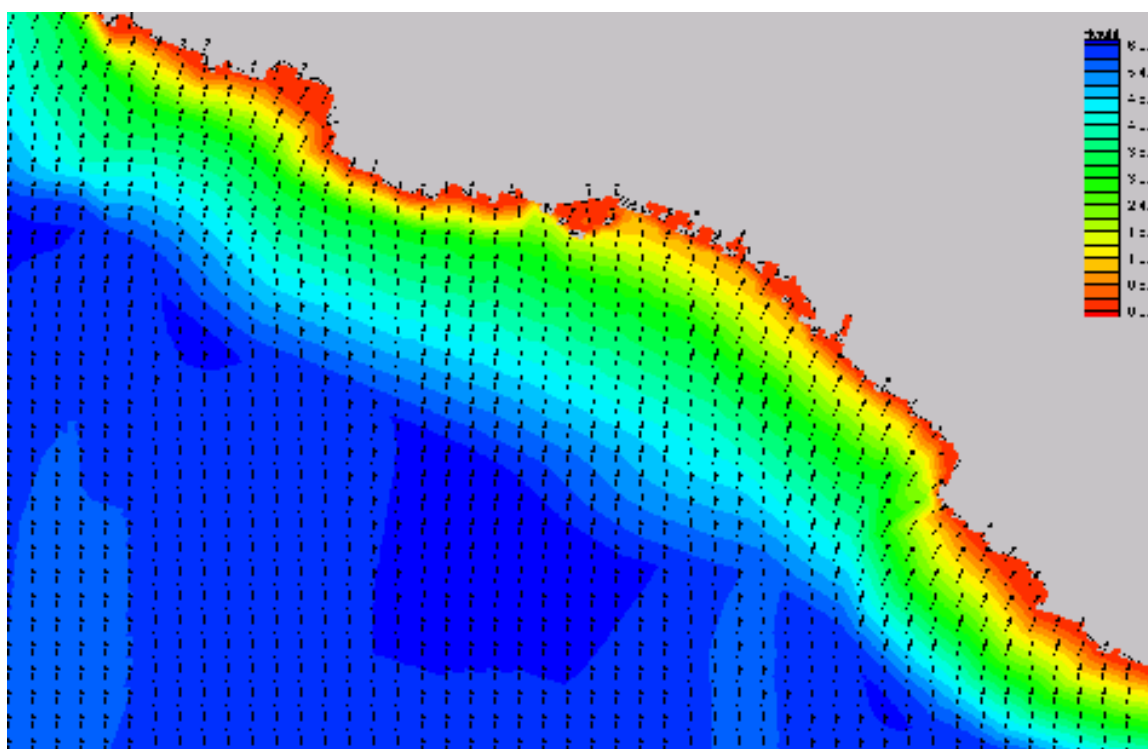


Figura 1.60 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 50$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 6,23m$   $Tp = 12,1s$

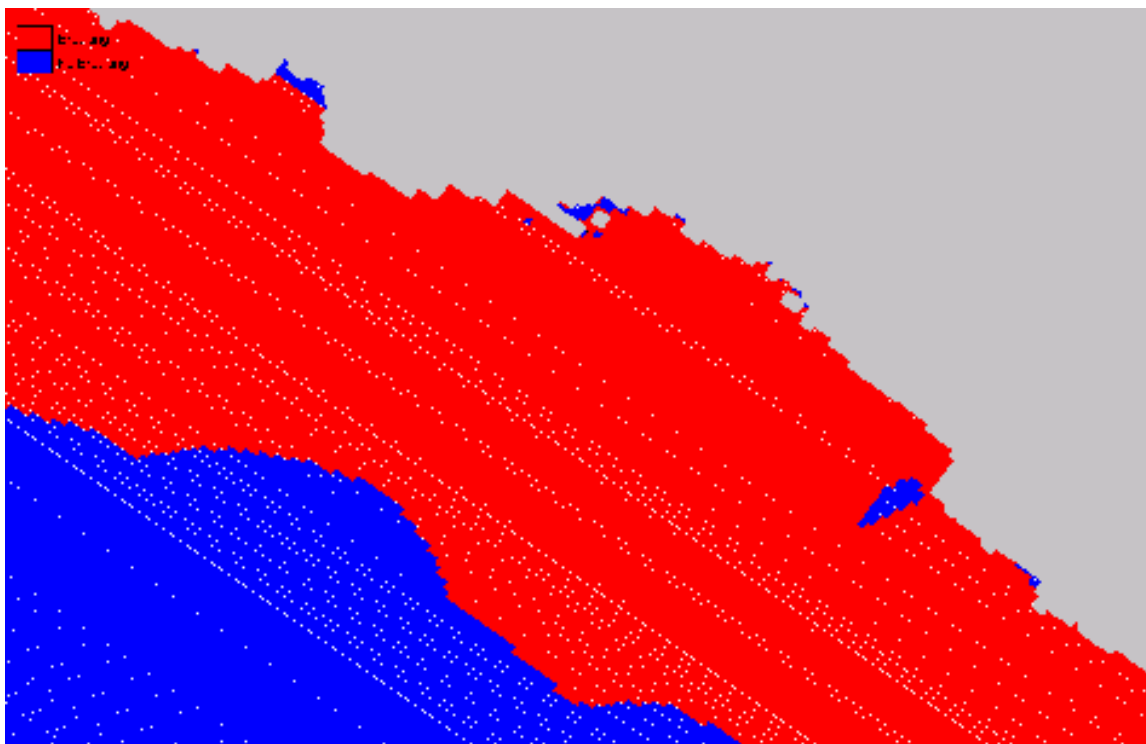


Figura 1.61 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 50$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 7,57m$   $Tp = 13,3s$

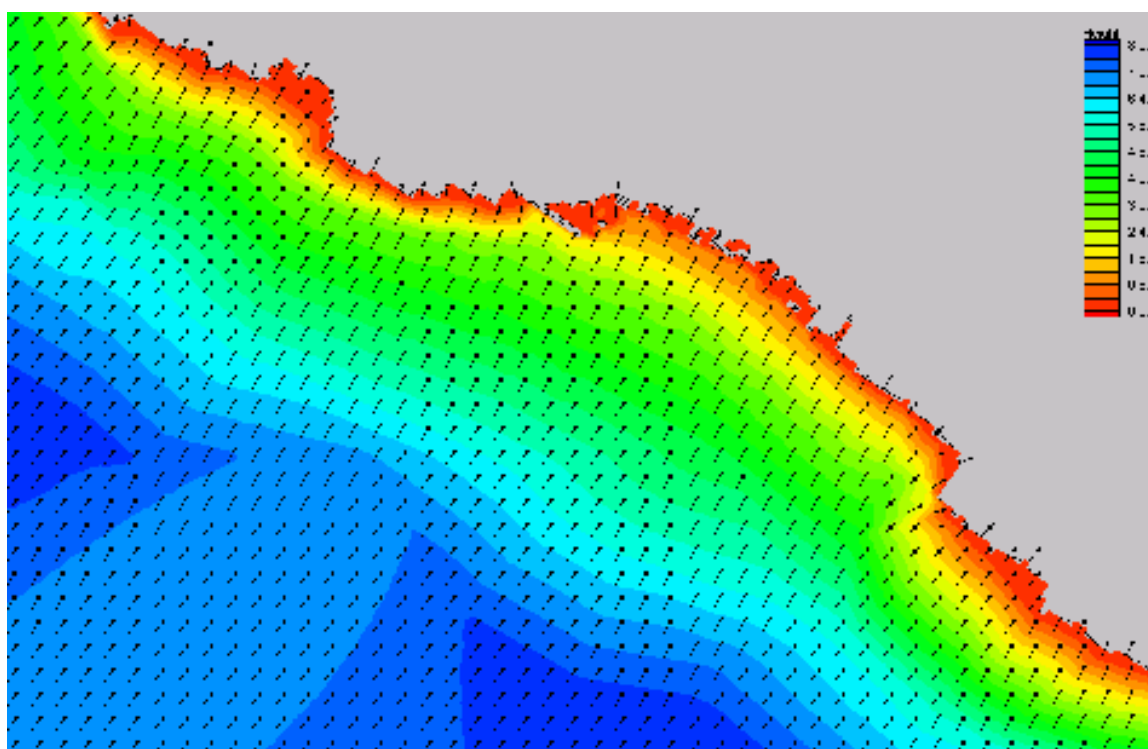


Figura 1.62 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 50$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 7,57m$   $Tp = 13,3s$

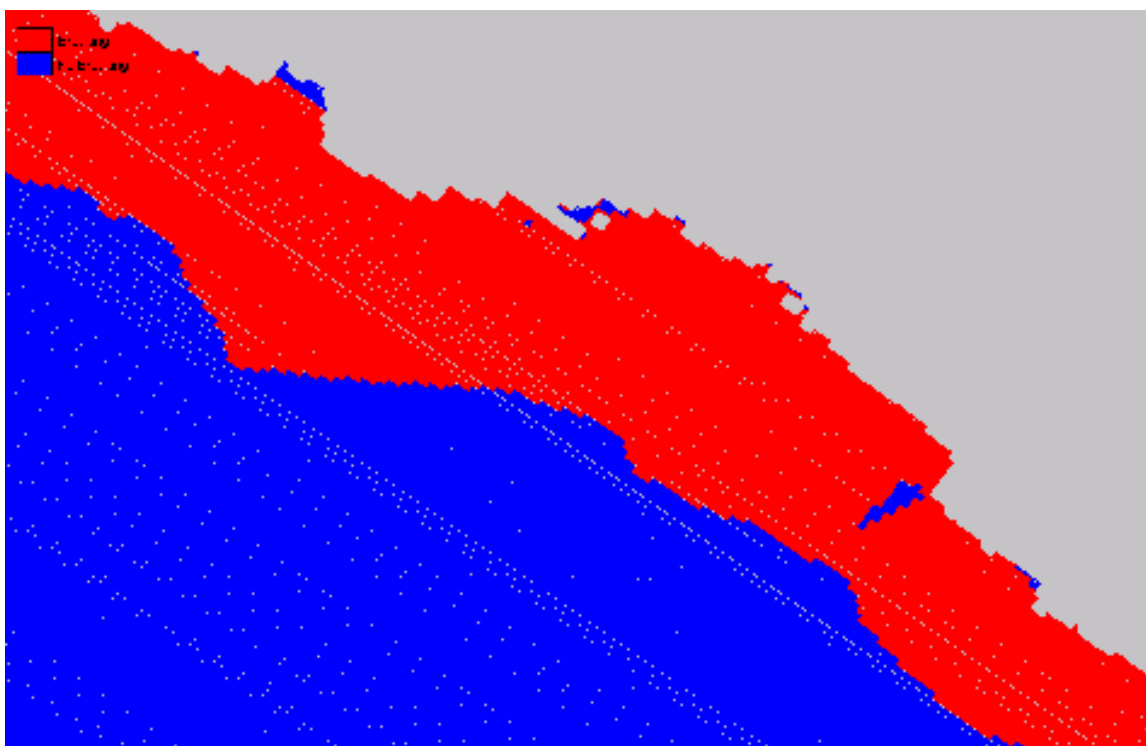


Figura 1.63 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 50$   $\vartheta = 270^\circ N$   $H_s = 6,75m$   $Tp = 12,6s$

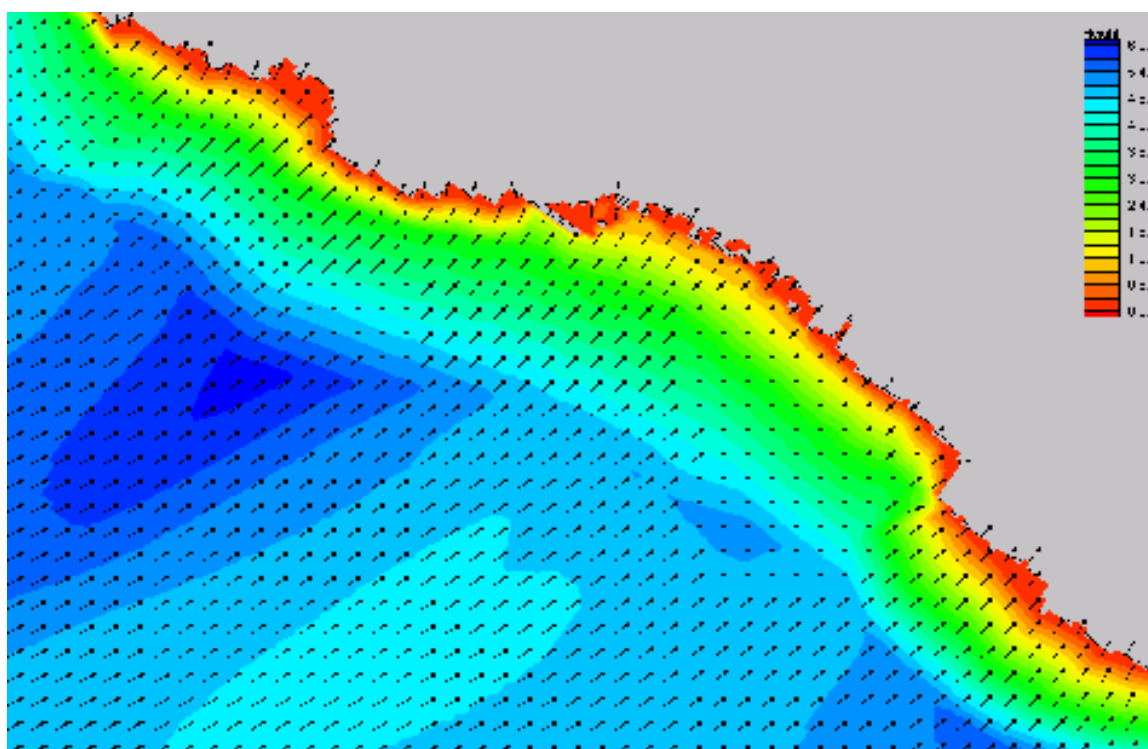


Figura 1.64 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 50$   $\vartheta = 270^\circ N$   
 $H_s = 6,75m$   $Tp = 12,6s$

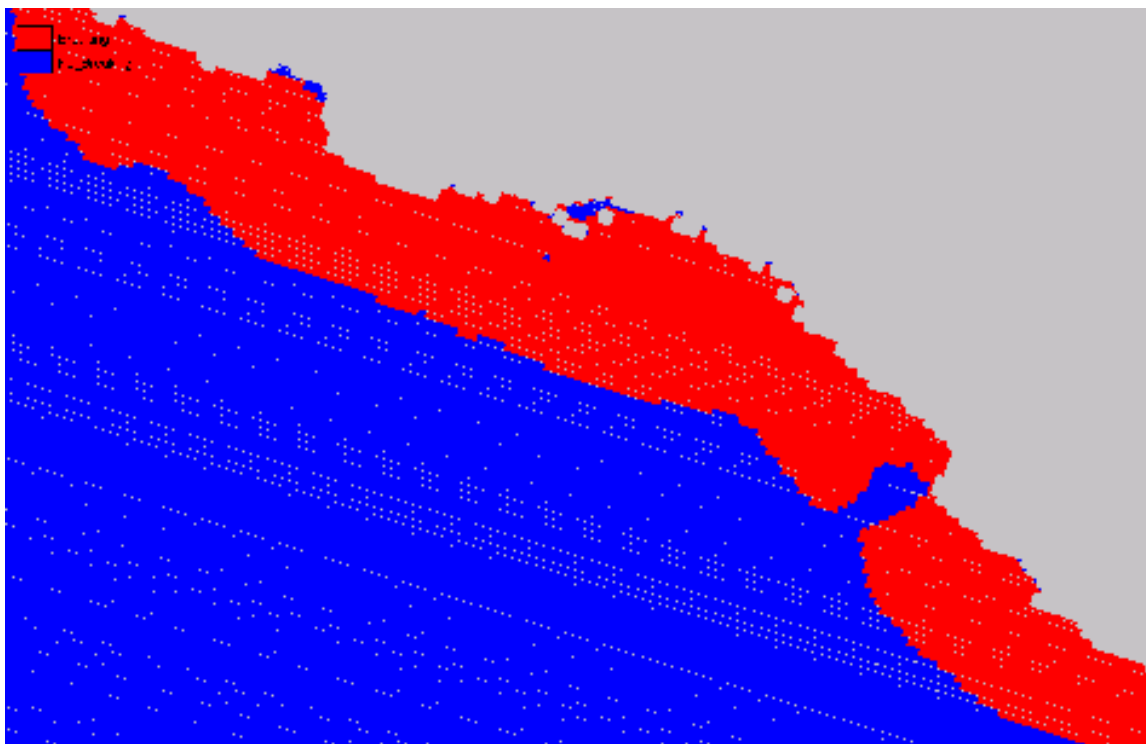


Figura 1.65 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 100$   $\vartheta = 135^\circ N$   $H_s = 6,47m$   $T_p = 12,3s$

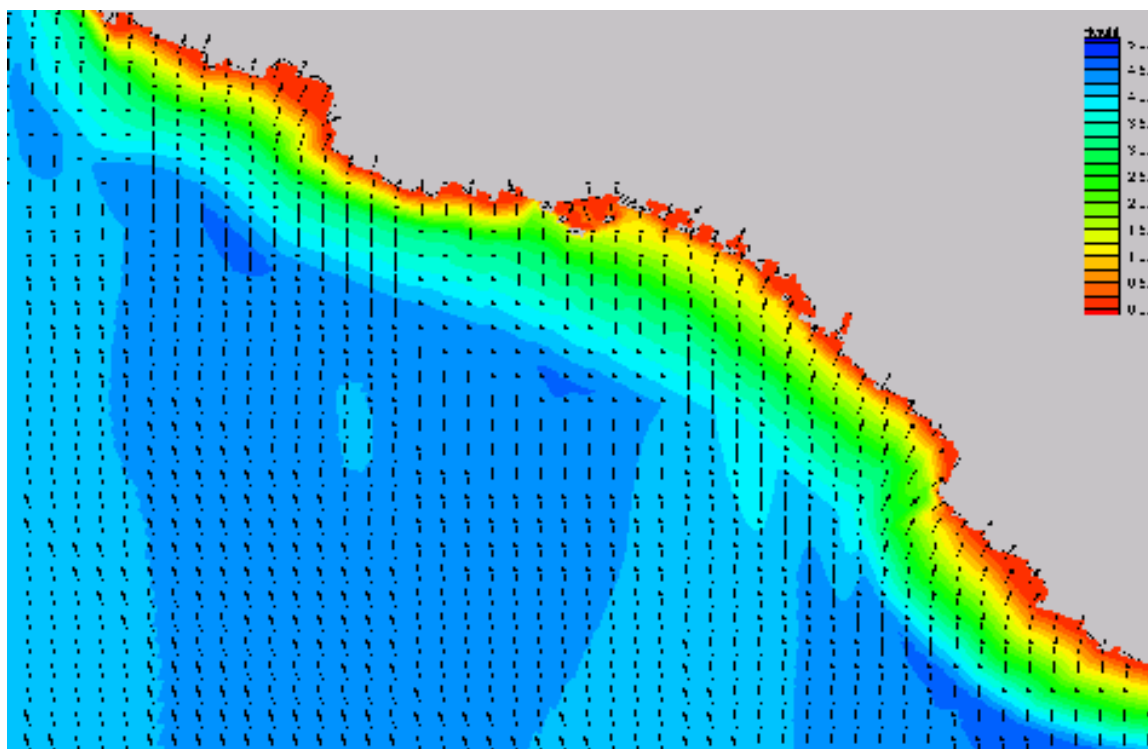


Figura 1.66 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 100$   $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 6,47m$   $T_p = 12,3s$

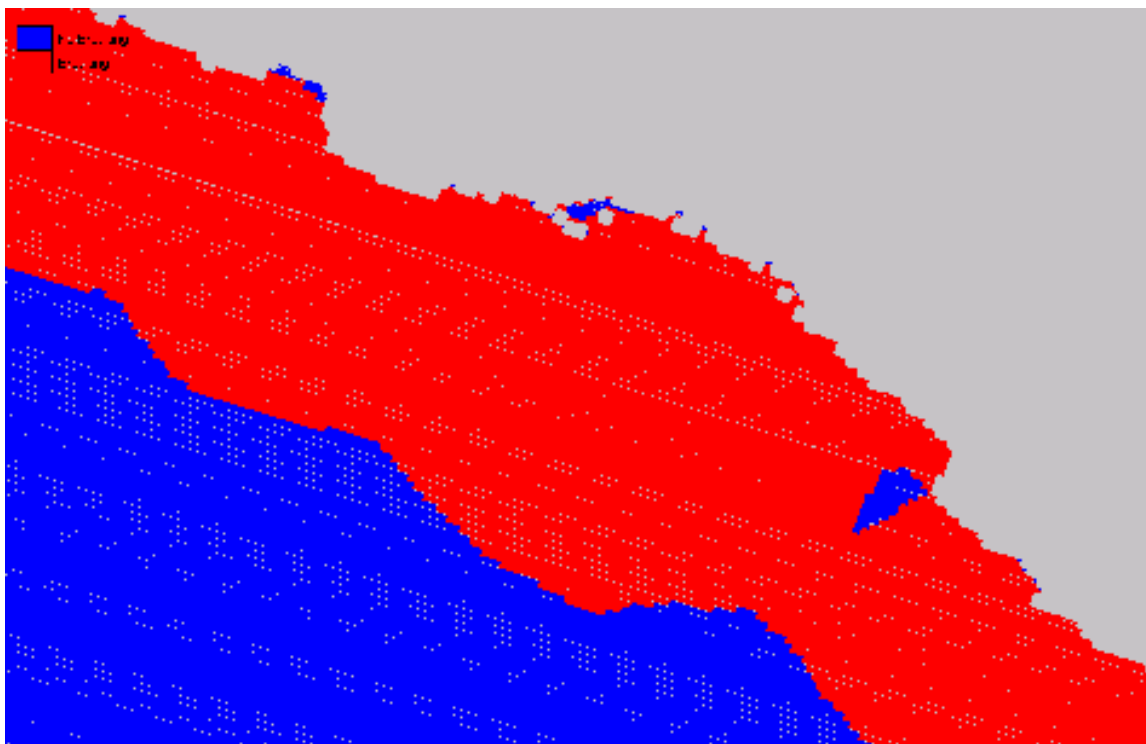


Figura 1.67 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 100$   $\vartheta = 180^\circ N$   $H_s = 6,87m$   $Tp = 12,7s$

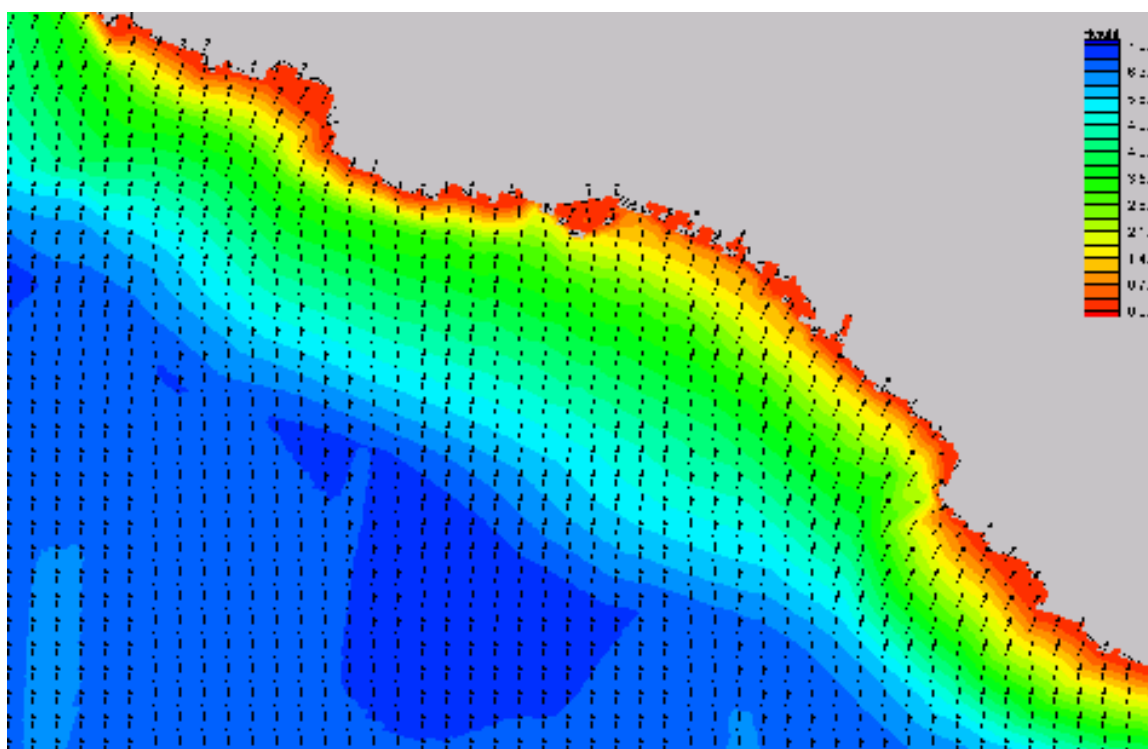


Figura 1.68 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 100$   $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 6,87m$   $Tp = 12,7s$

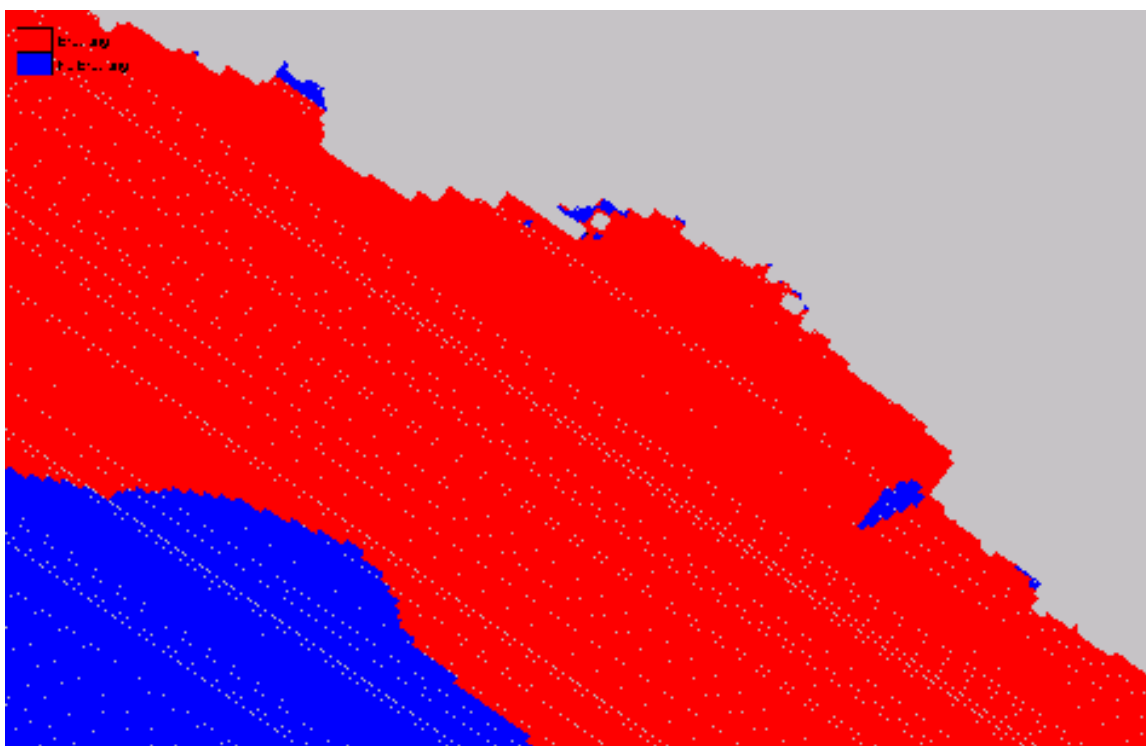


Figura 1.69 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 100$   $\vartheta = 225^\circ N$   $H_s = 8,38m$   $Tp = 14,0s$

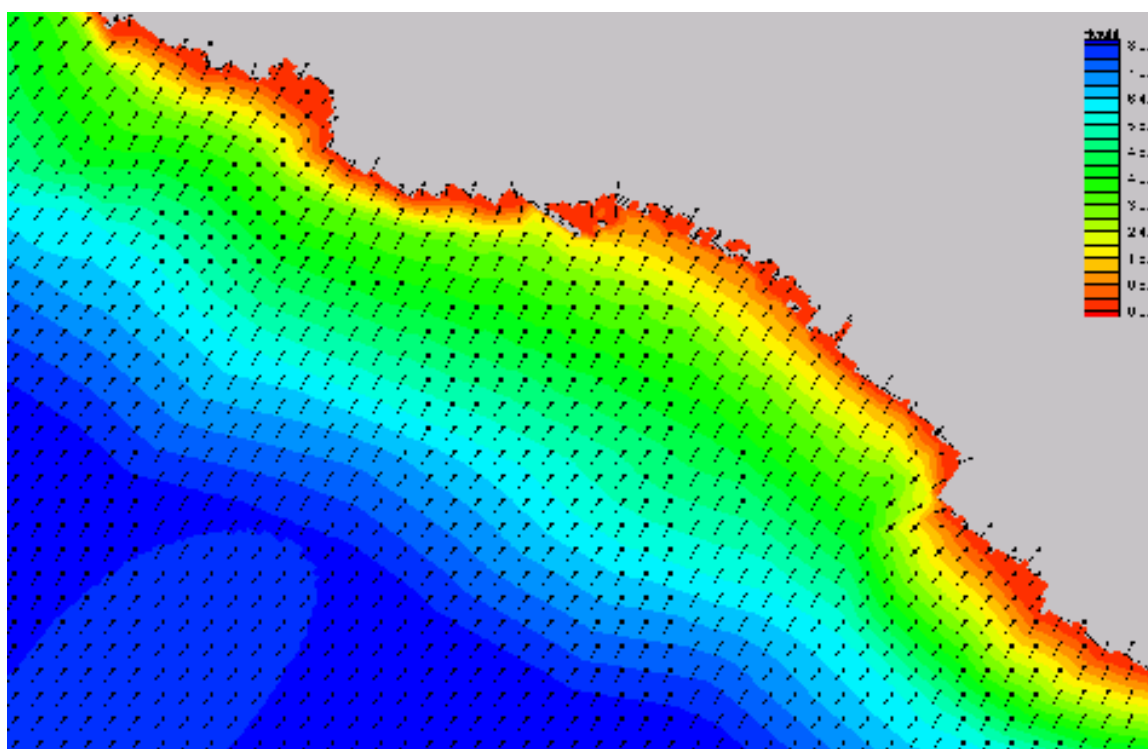


Figura 1.70 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 100$   $\vartheta = 225^\circ N$   
 $H_s = 8,38m$   $Tp = 14,0s$



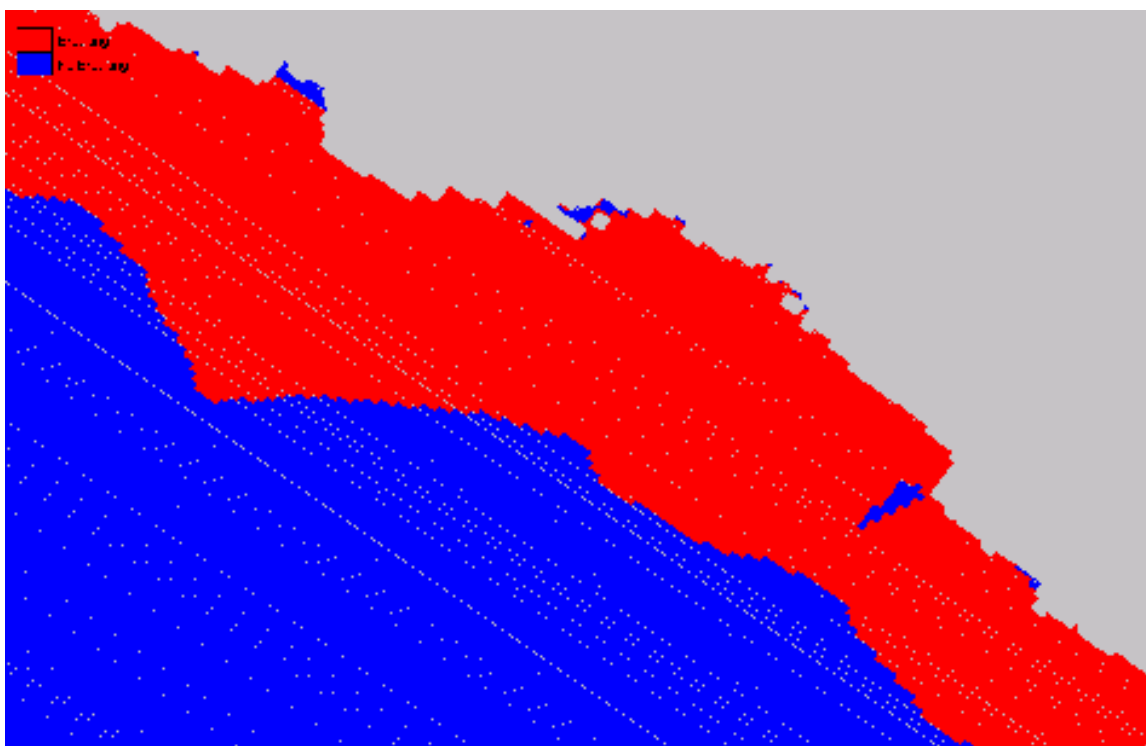


Figura 1.71 - Stato di fatto - Zona dei frangenti  $Tr = 100$   $\theta = 270^\circ N$   $H_s = 7,24m$   $Tp = 13,1s$

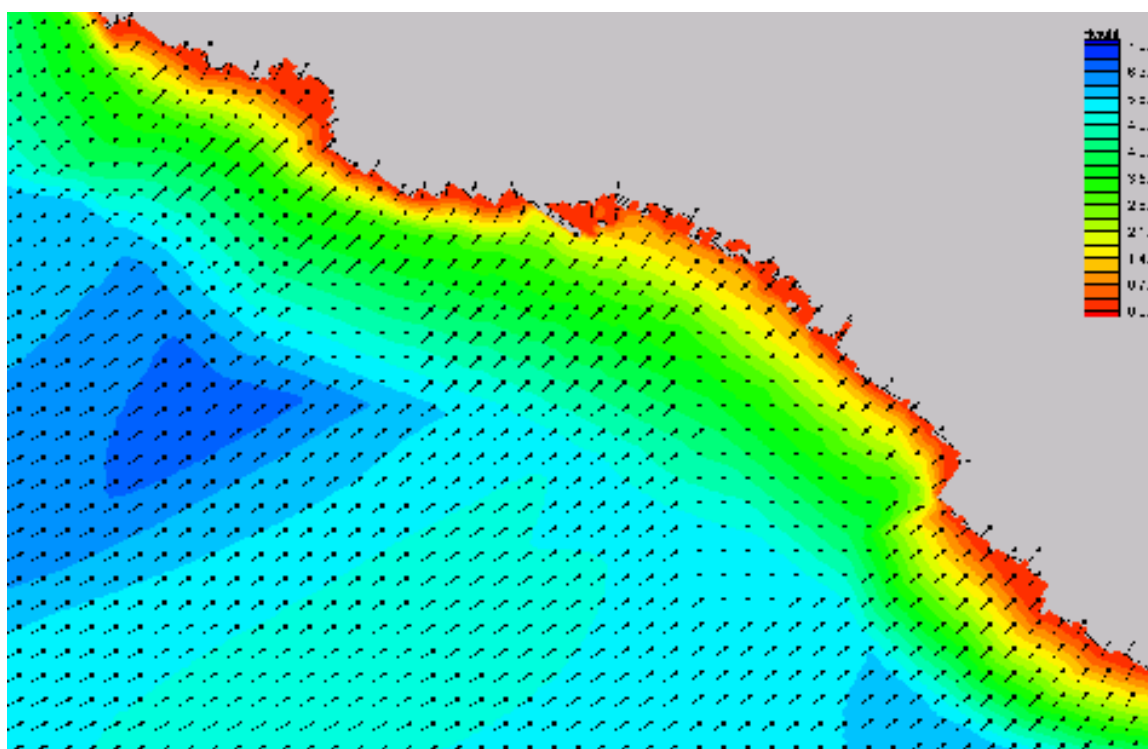


Figura 1.72 - Stato di fatto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta -  $Tr = 100$   $\theta = 270^\circ N$   
 $H_s = 7,24m$   $Tp = 13,1s$



---

## 2 ALLEGATO B

---

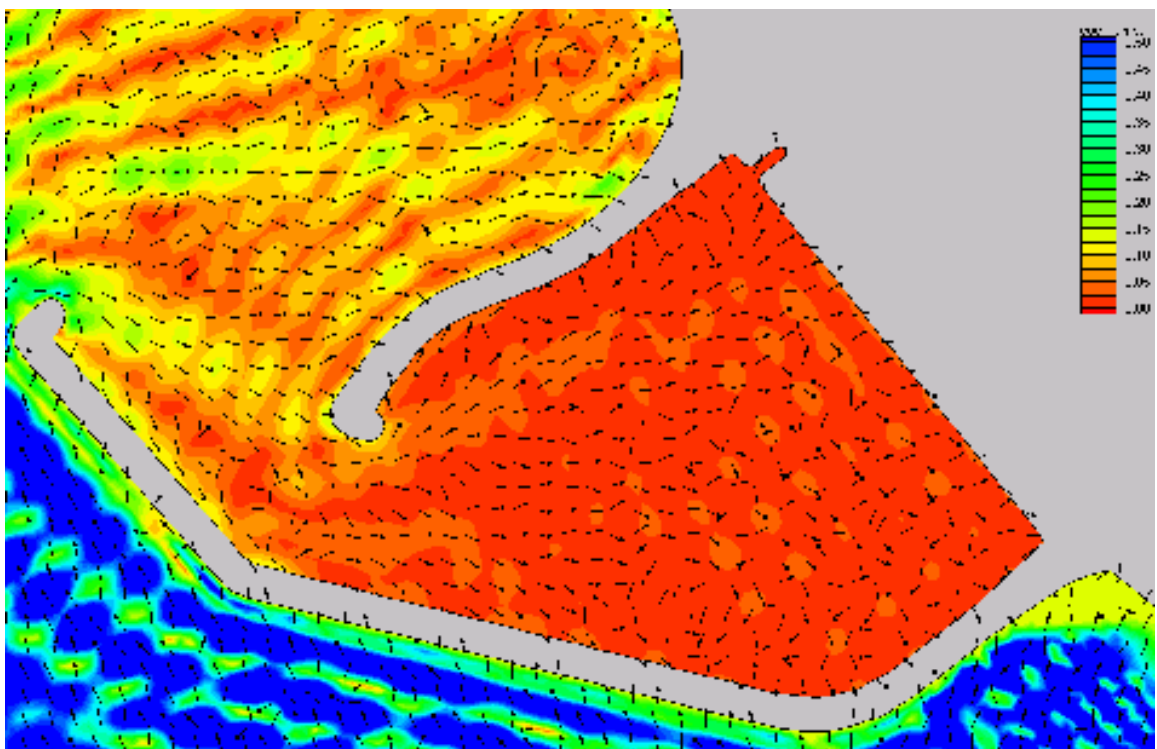
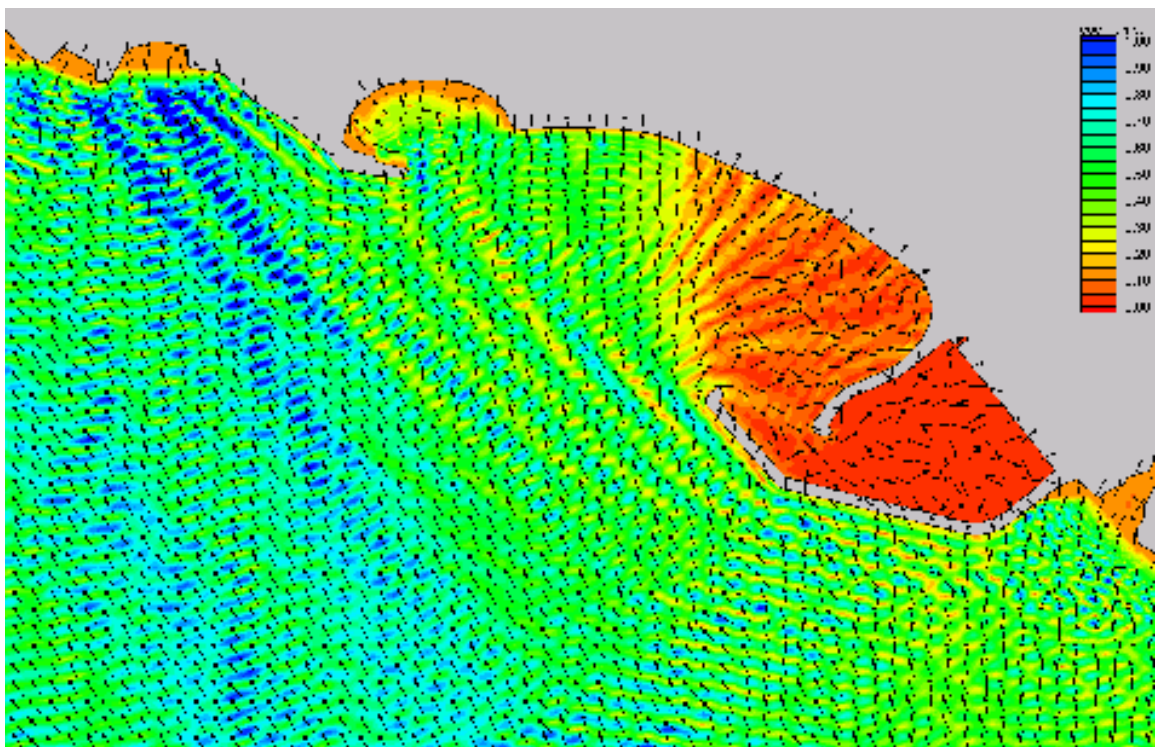


Figure 2.1 e 2.2 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=135^\circ$  N e  $T_p=6s$

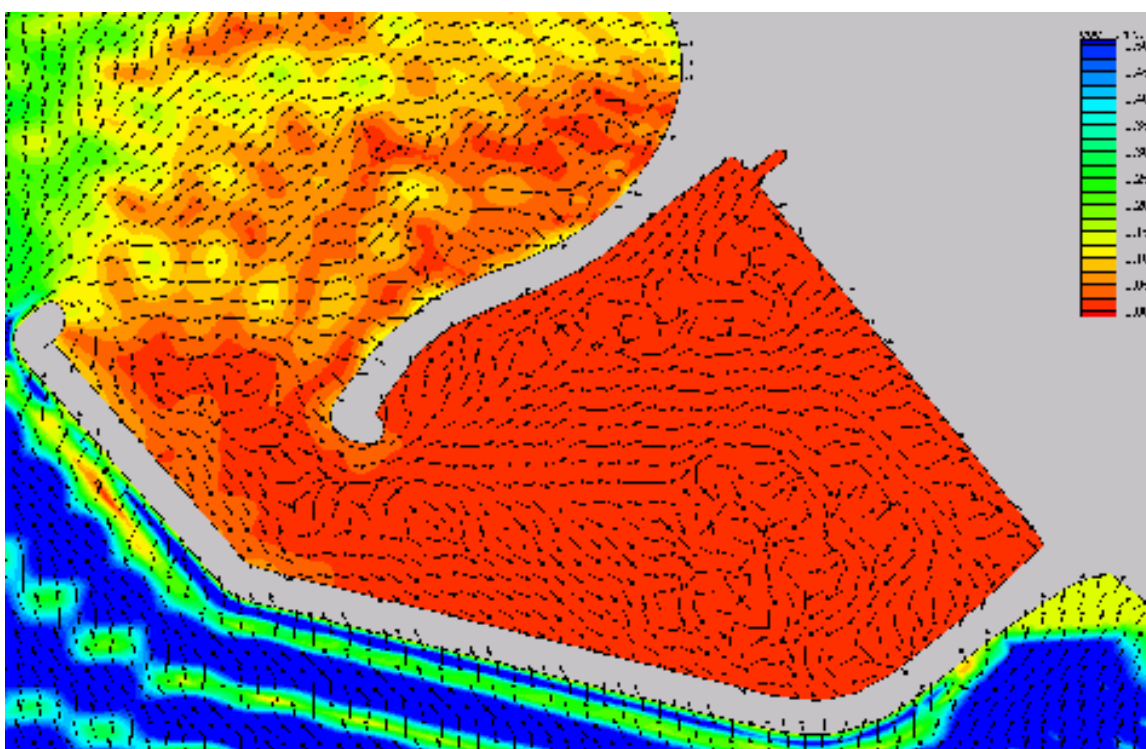
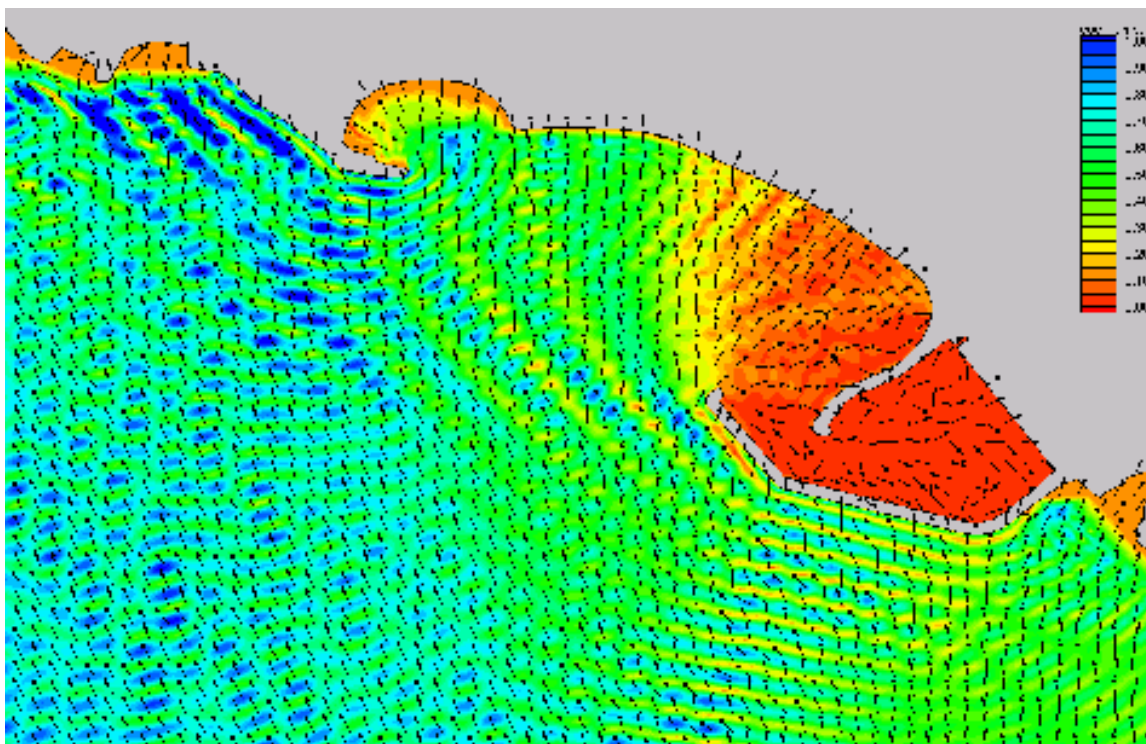


Figure 2.3 e 2.4 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=135^\circ$  N e  $T_p=8s$

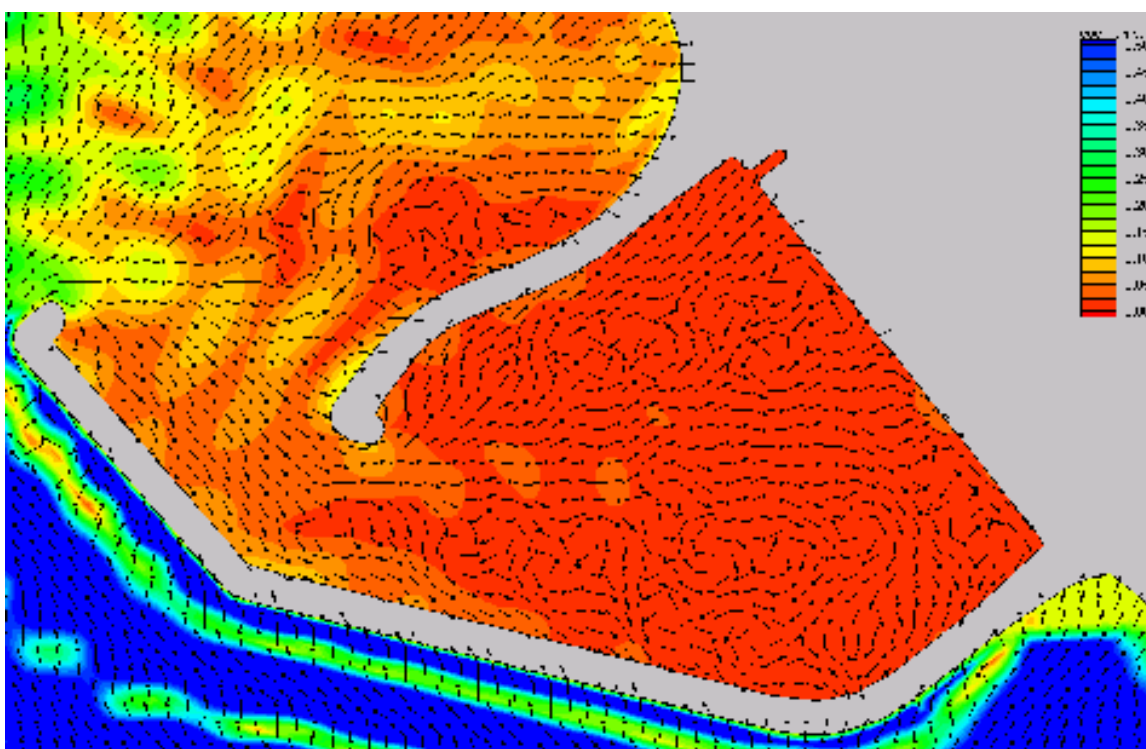
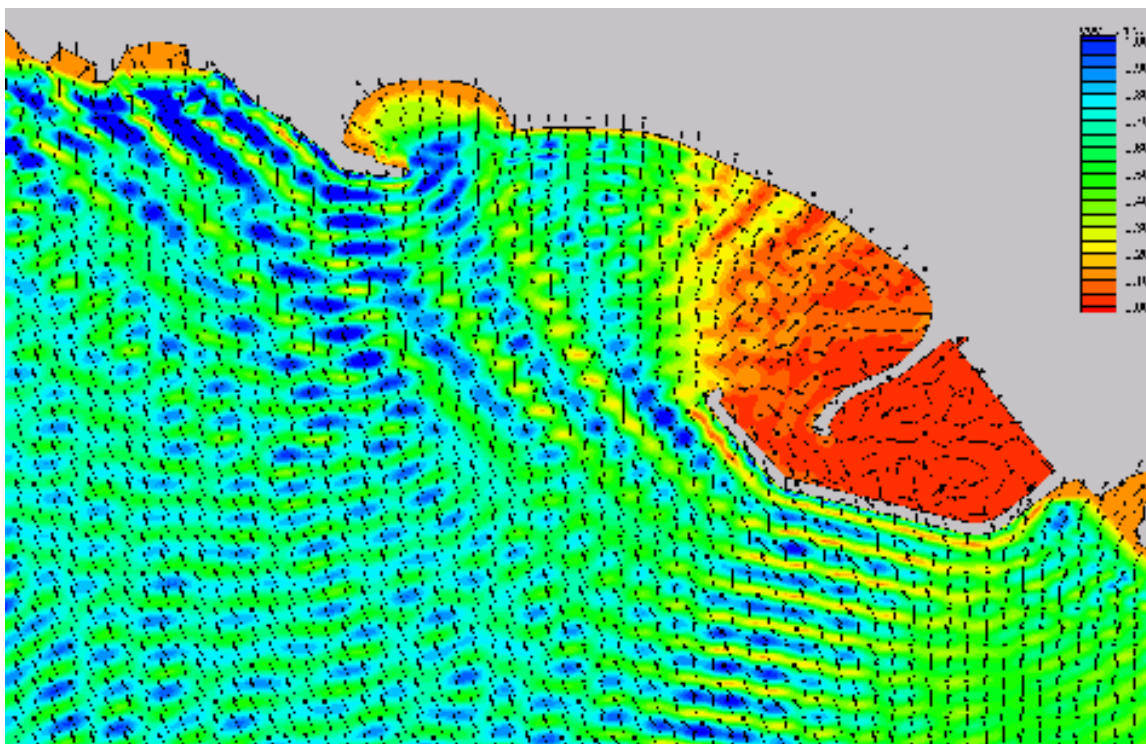


Figure 2.5 e 2.6 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=135^\circ$  N e  $T_p=10s$



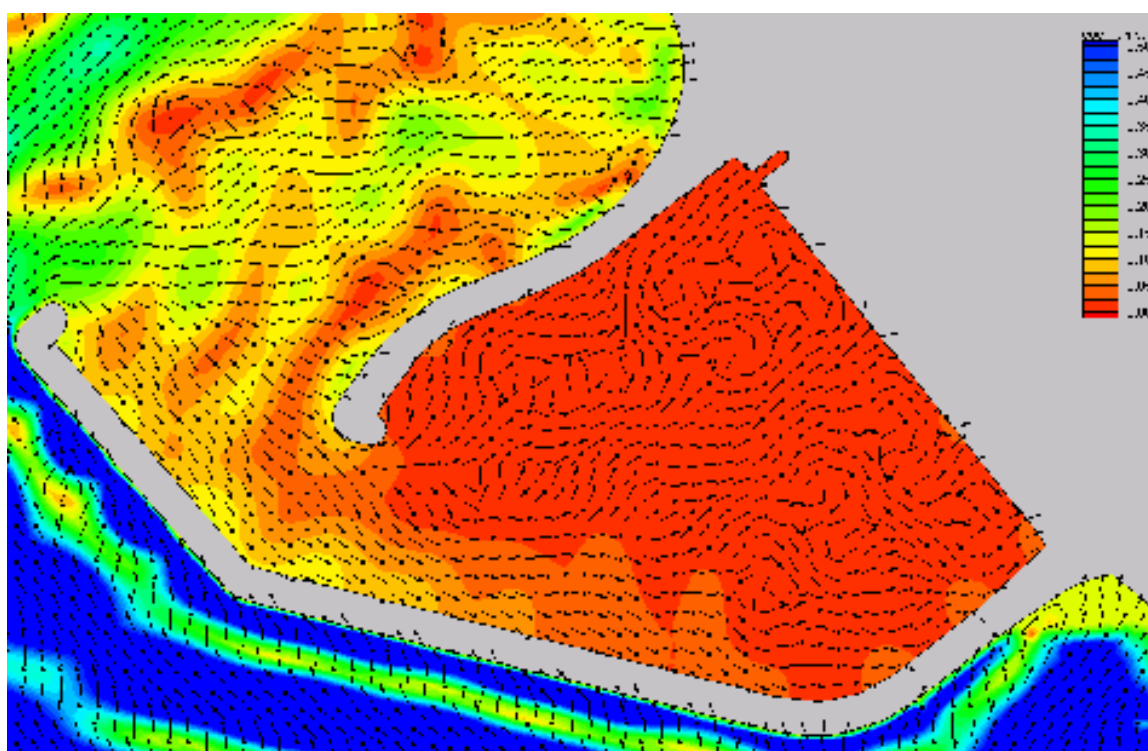
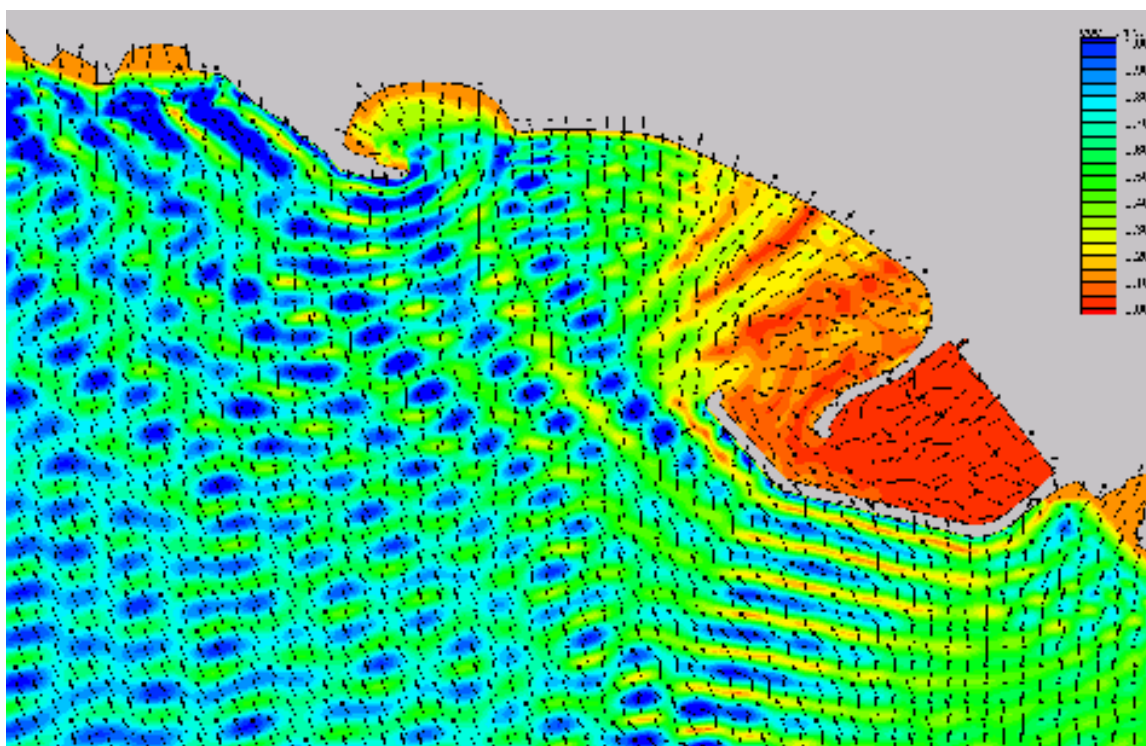


Figure 2.7 e 2.8 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=135^\circ$  N e  $T_p=12s$

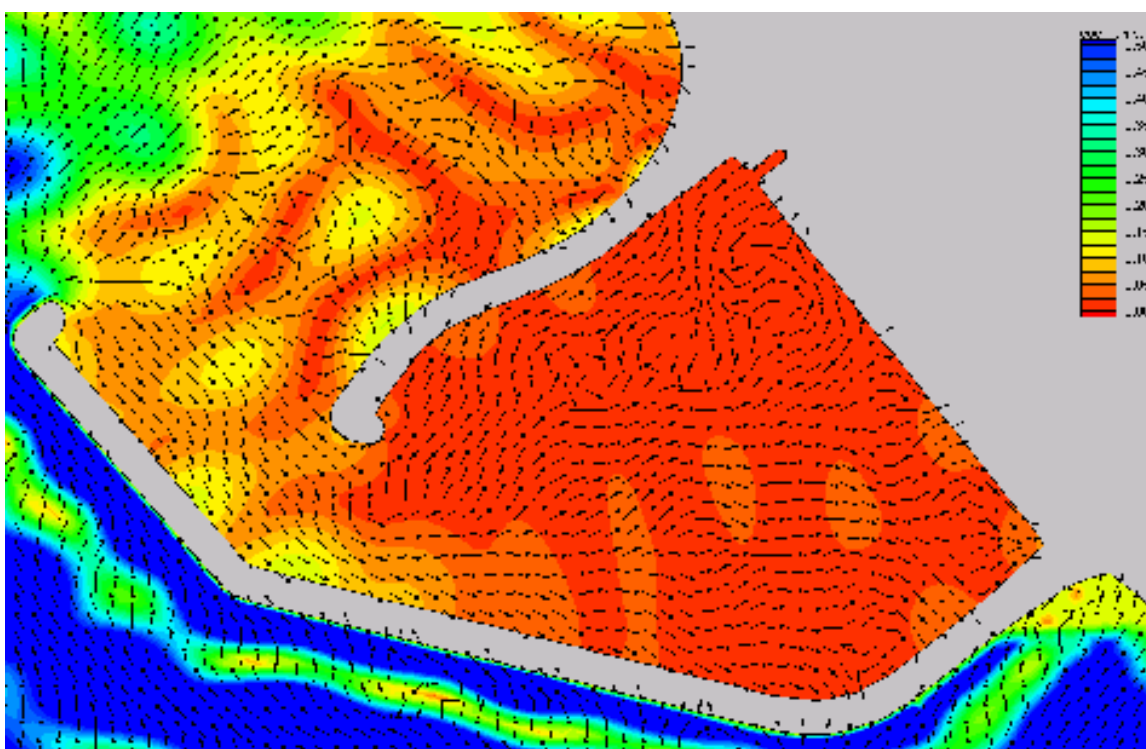
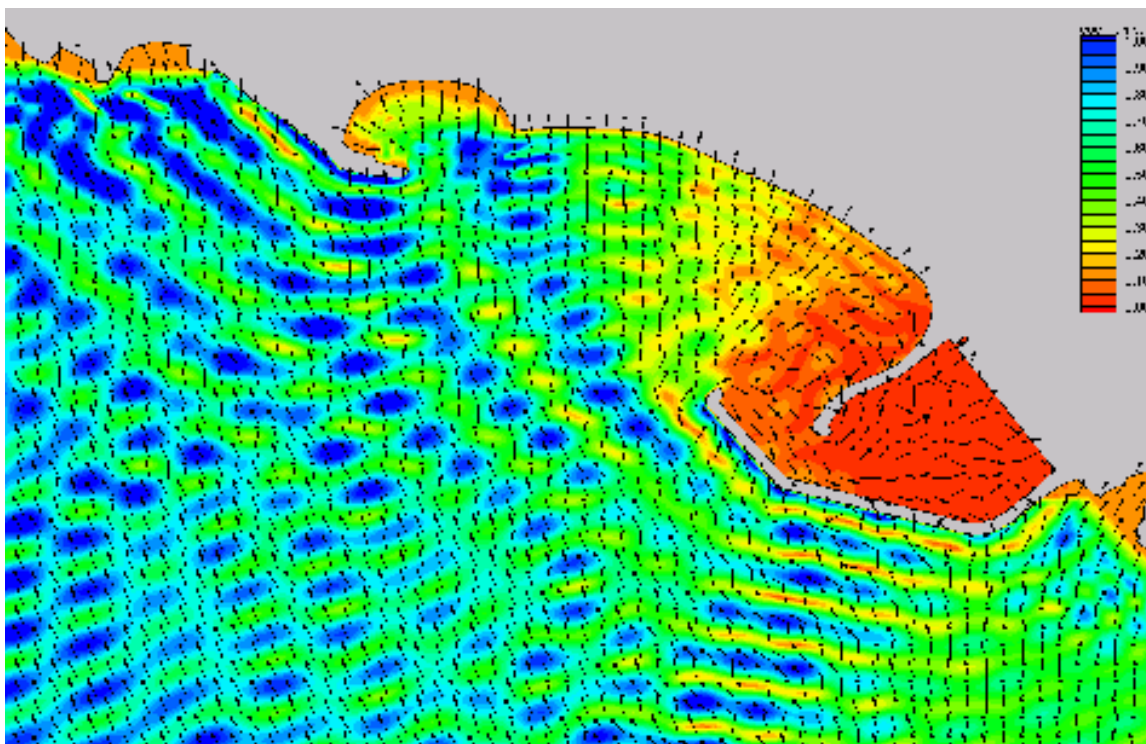


Figure 2.9 e 2.10 -Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=135^\circ$  N e  $T_p=14s$

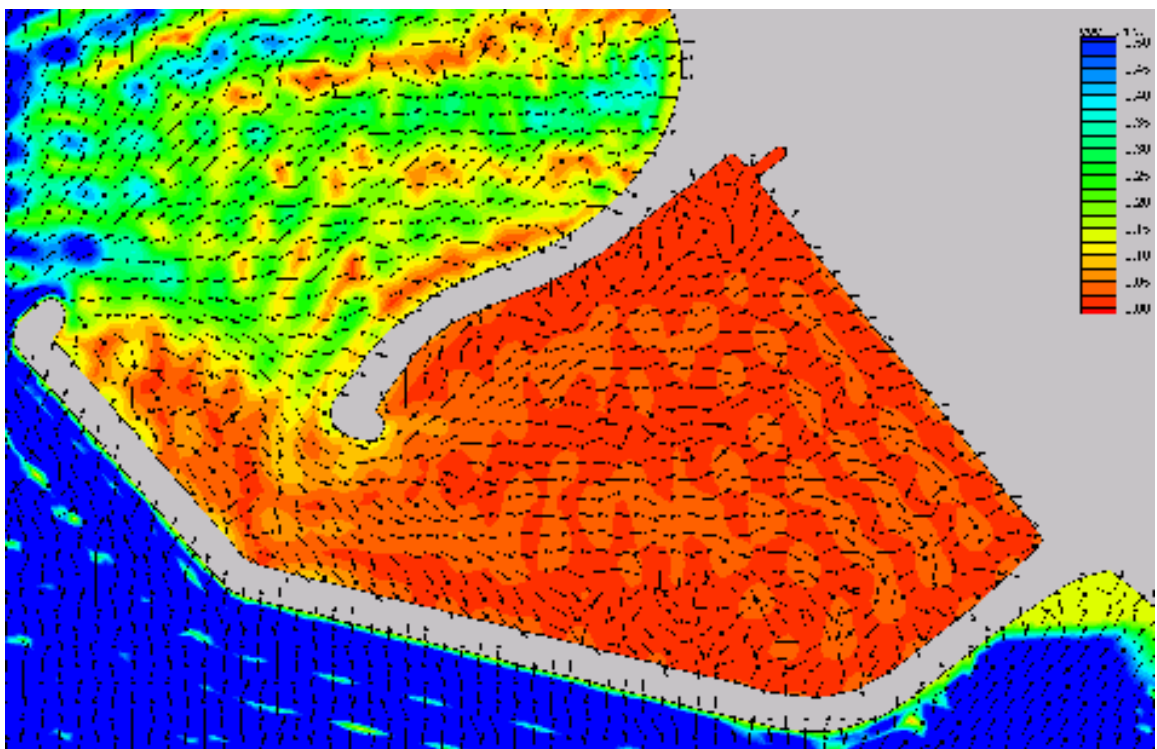
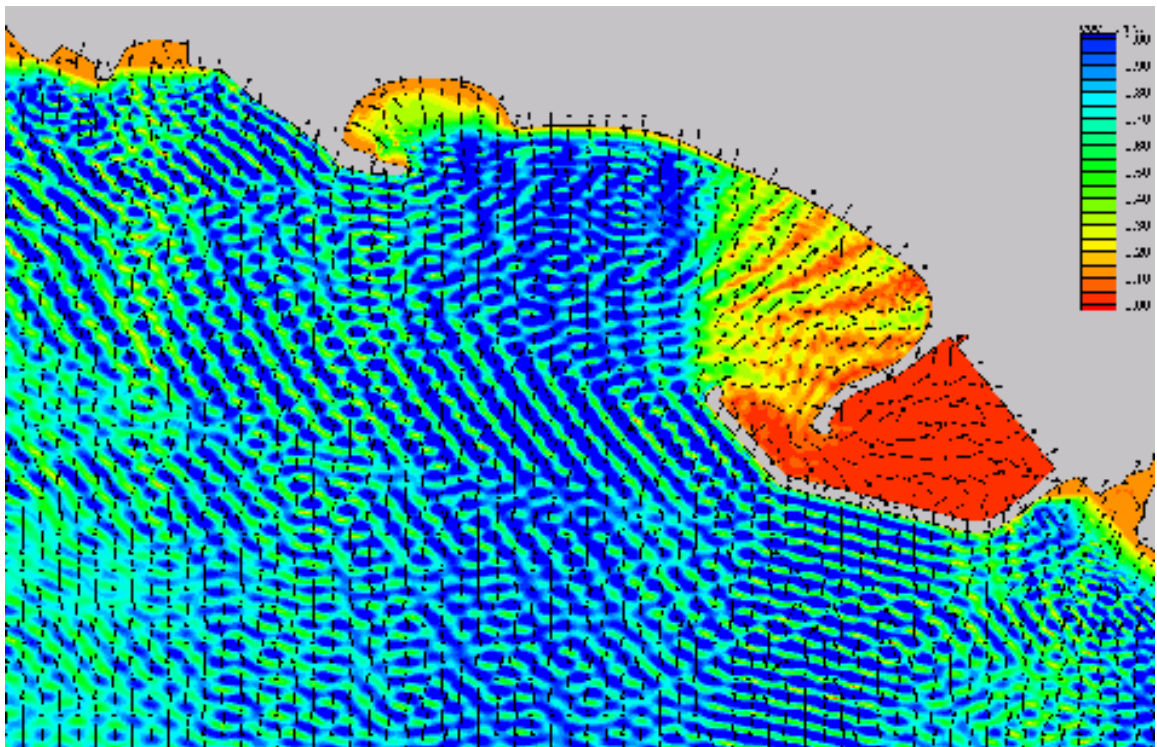


Figure 2.11 e 2.12 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=180^\circ$  N e  $T_p=6s$



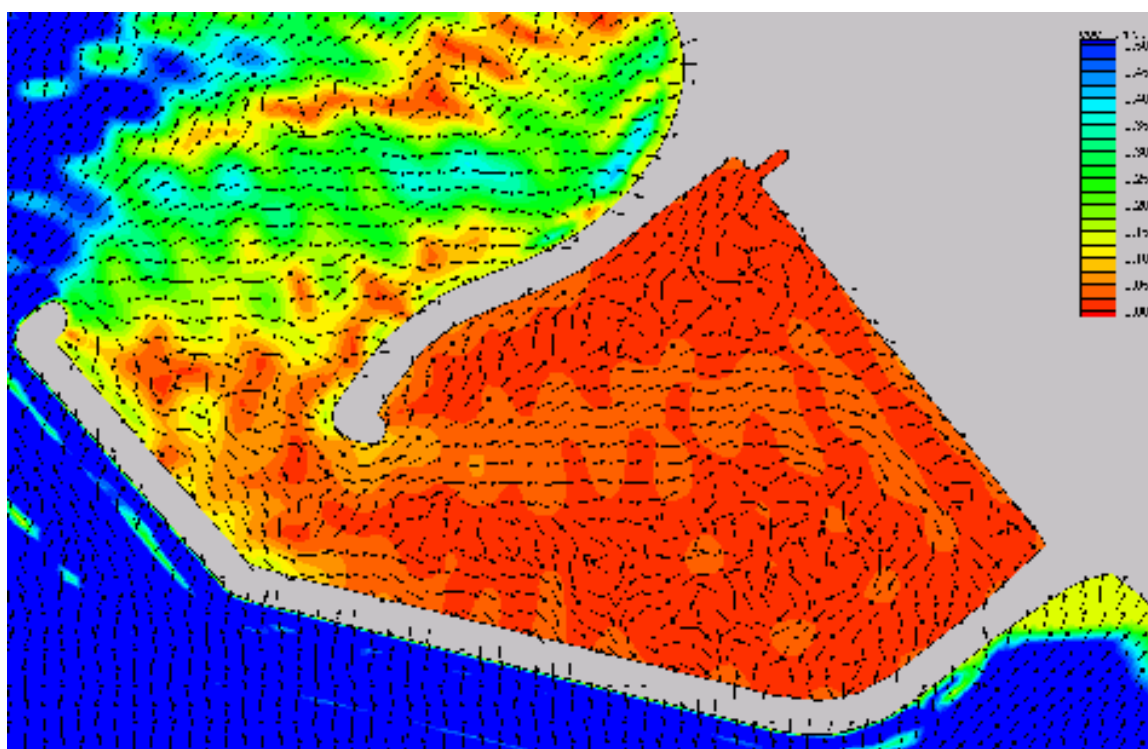
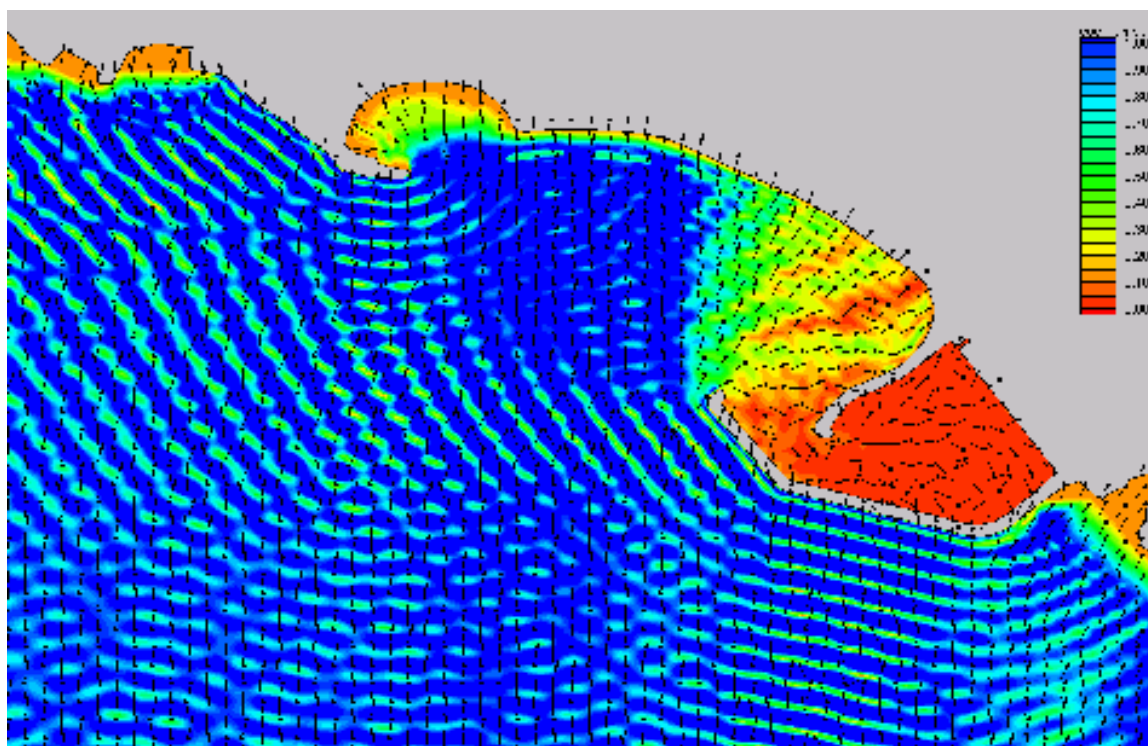


Figure 2.13 e 2.14 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=180^\circ$  N e  $T_p=8s$



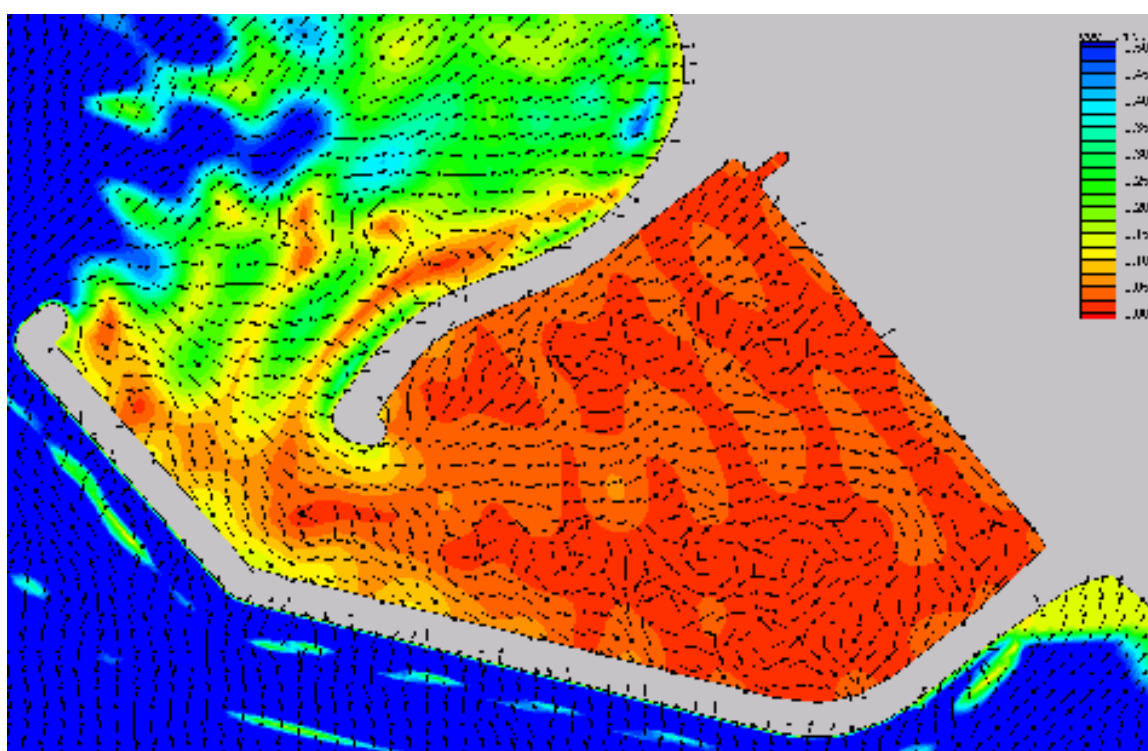
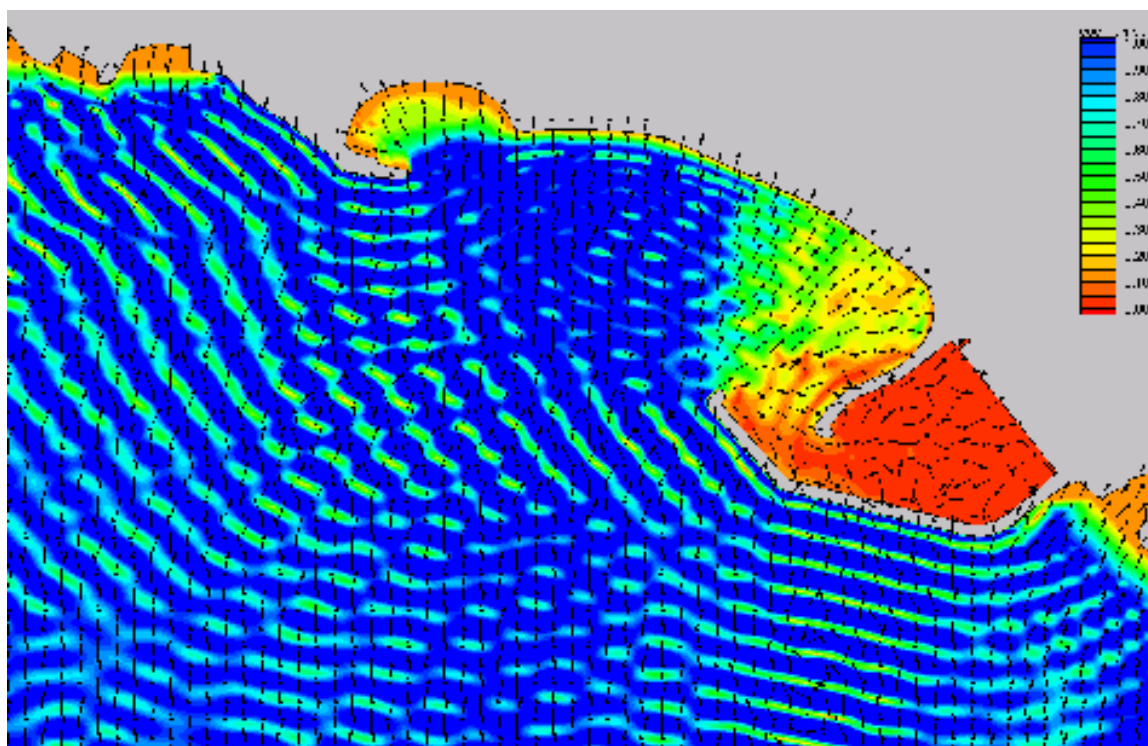


Figure 2.15 e 2.16 -Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=180^\circ$  N e  $T_p=10s$

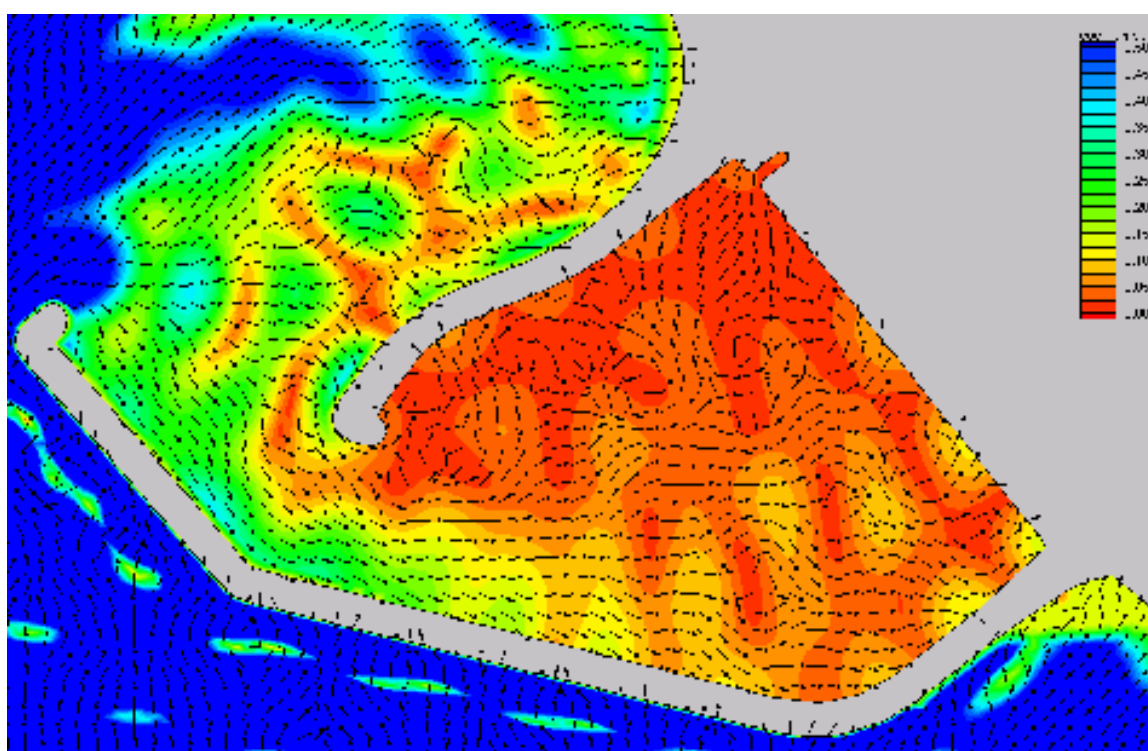
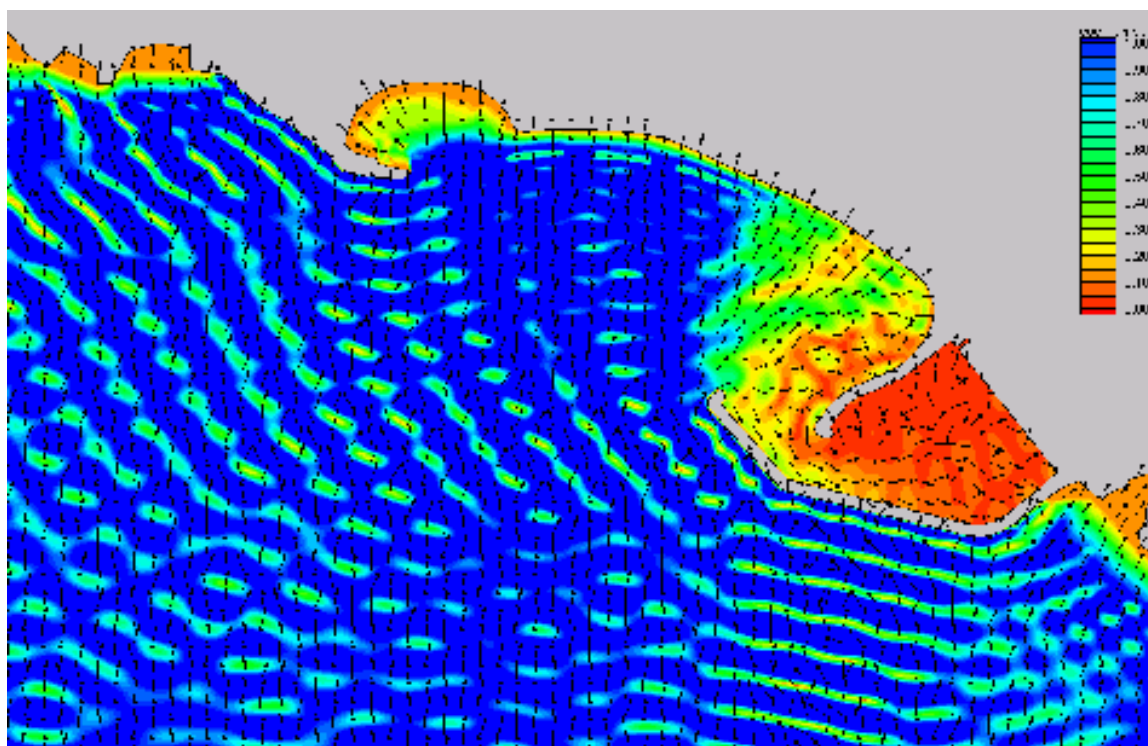


Figure 2.17 e 2.18 -Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=180^\circ$  N e  $T_p=12s$

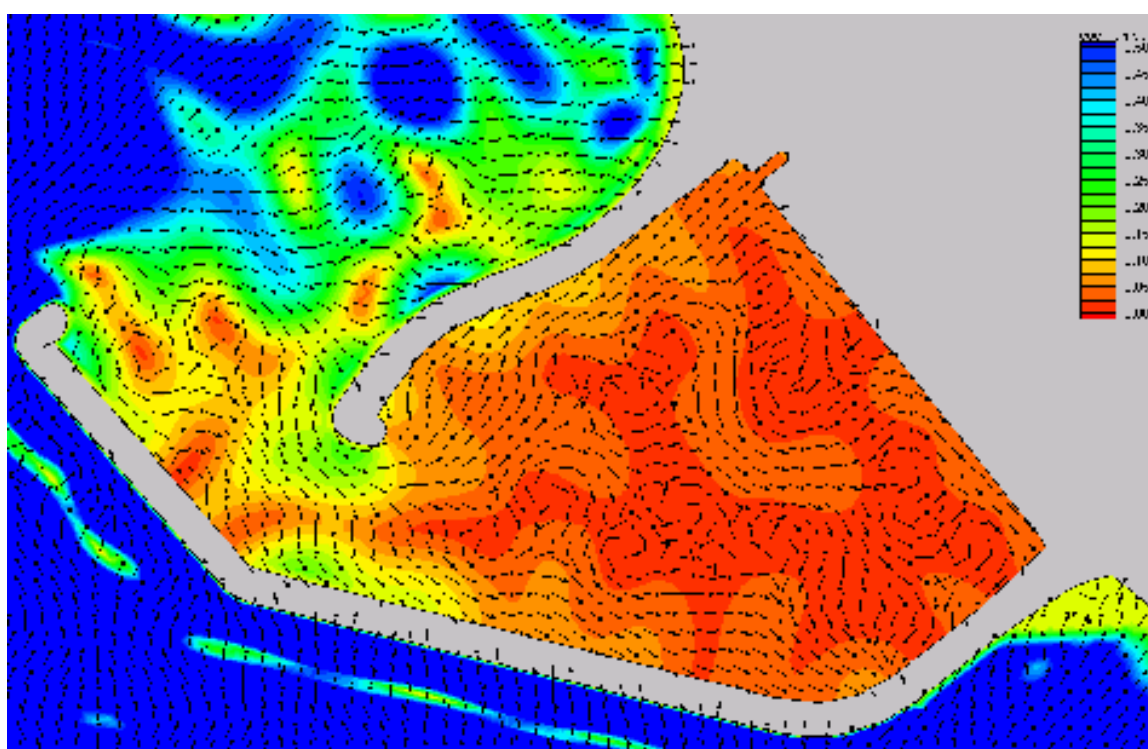
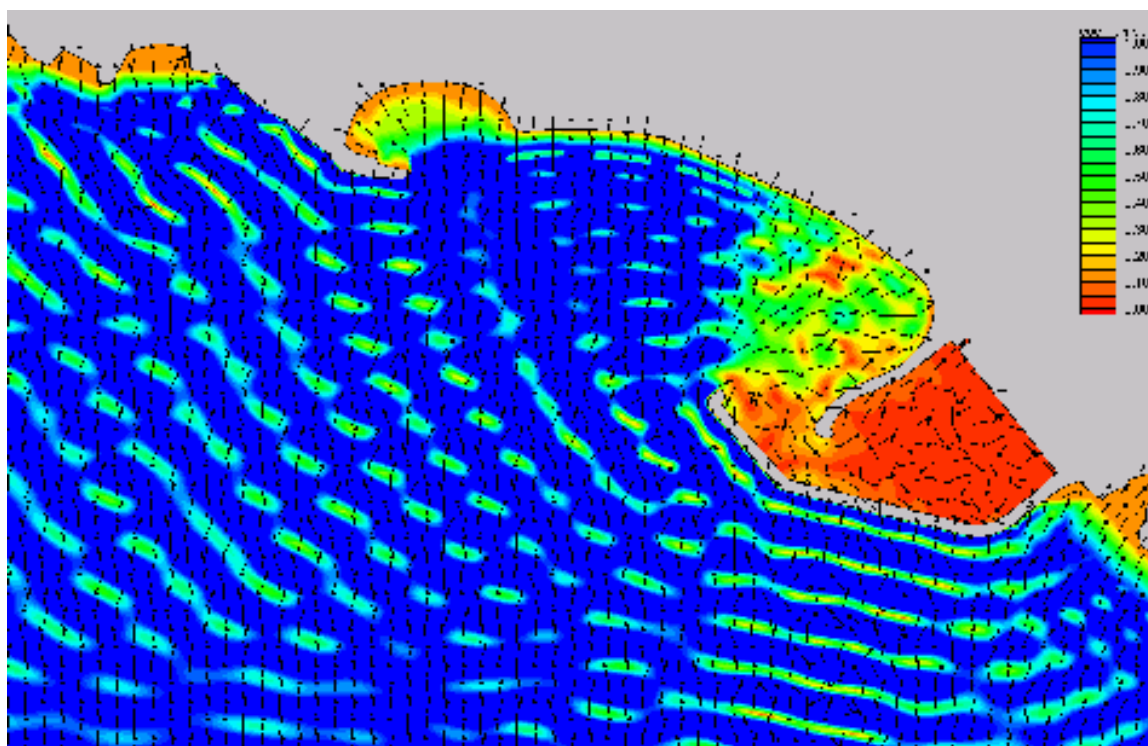


Figure 2.19 e 2.20- Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=180^\circ$  N e  $T_p=14s$



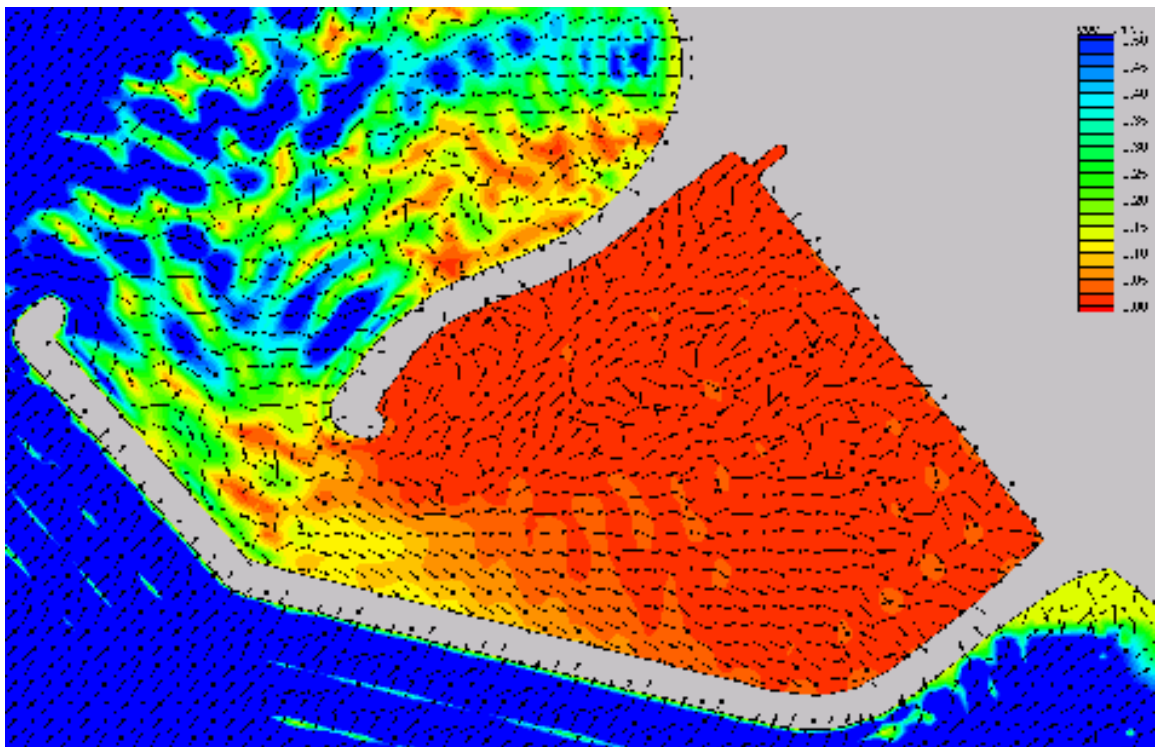
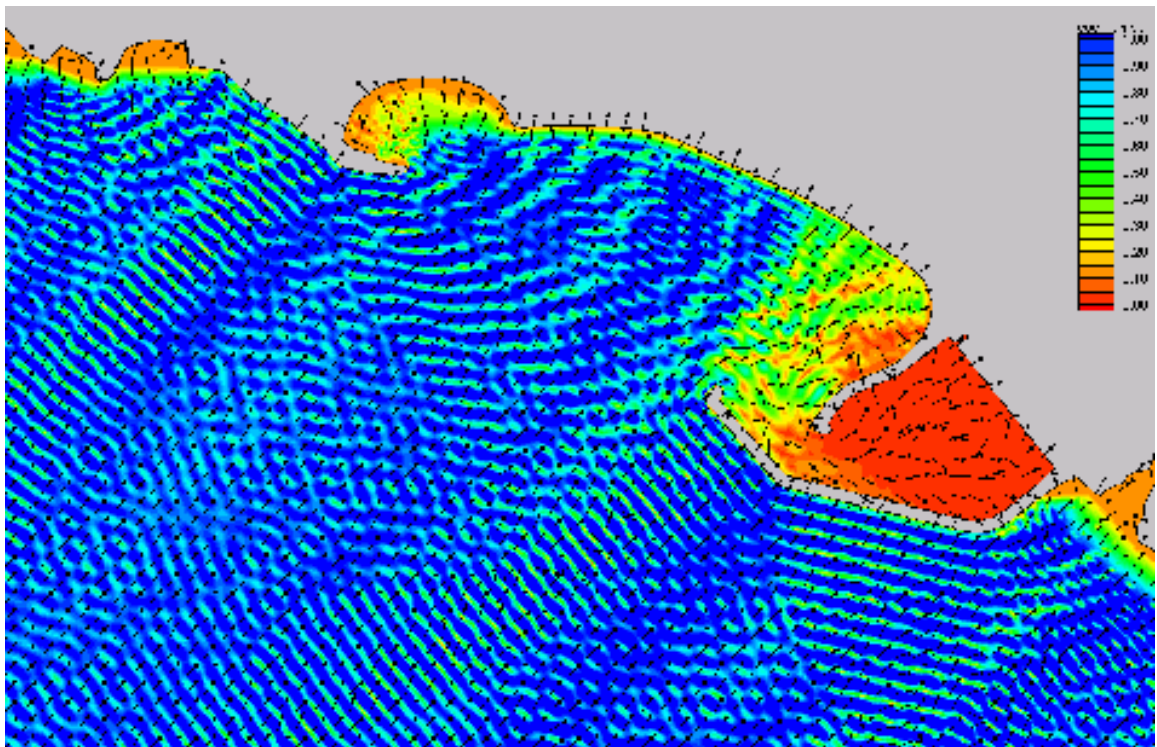


Figure 2.21 e 2.22 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=225^\circ$  N e  $T_p=6s$

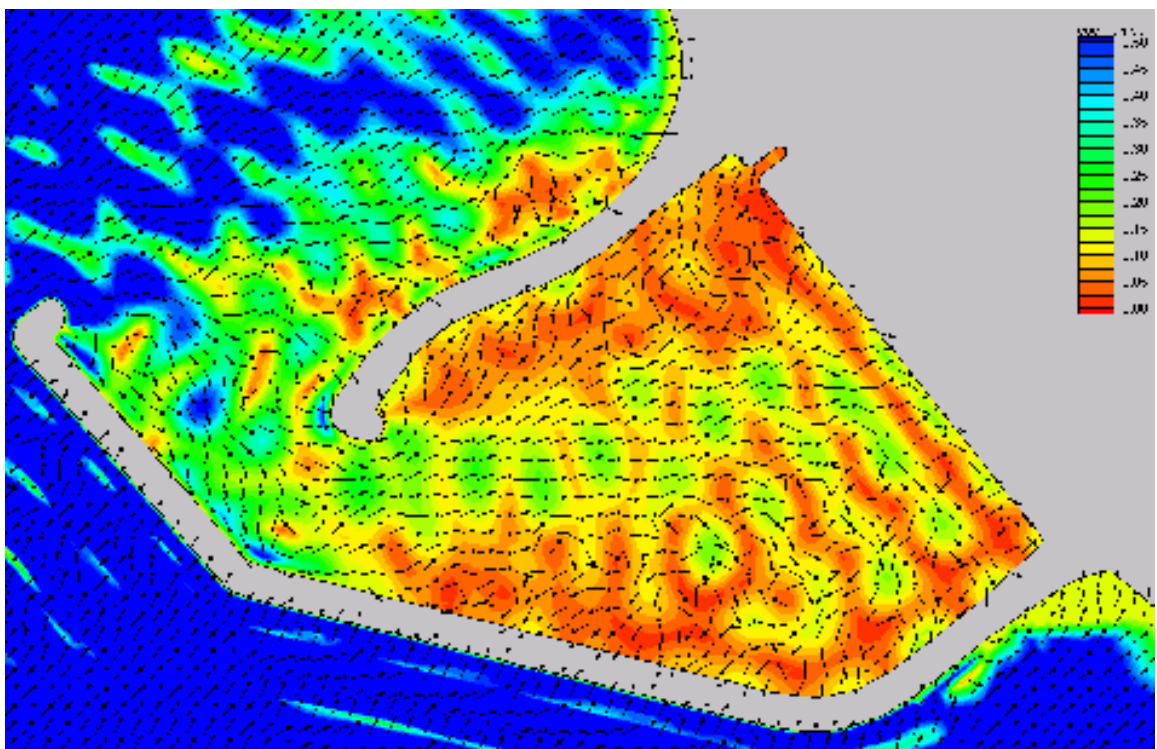
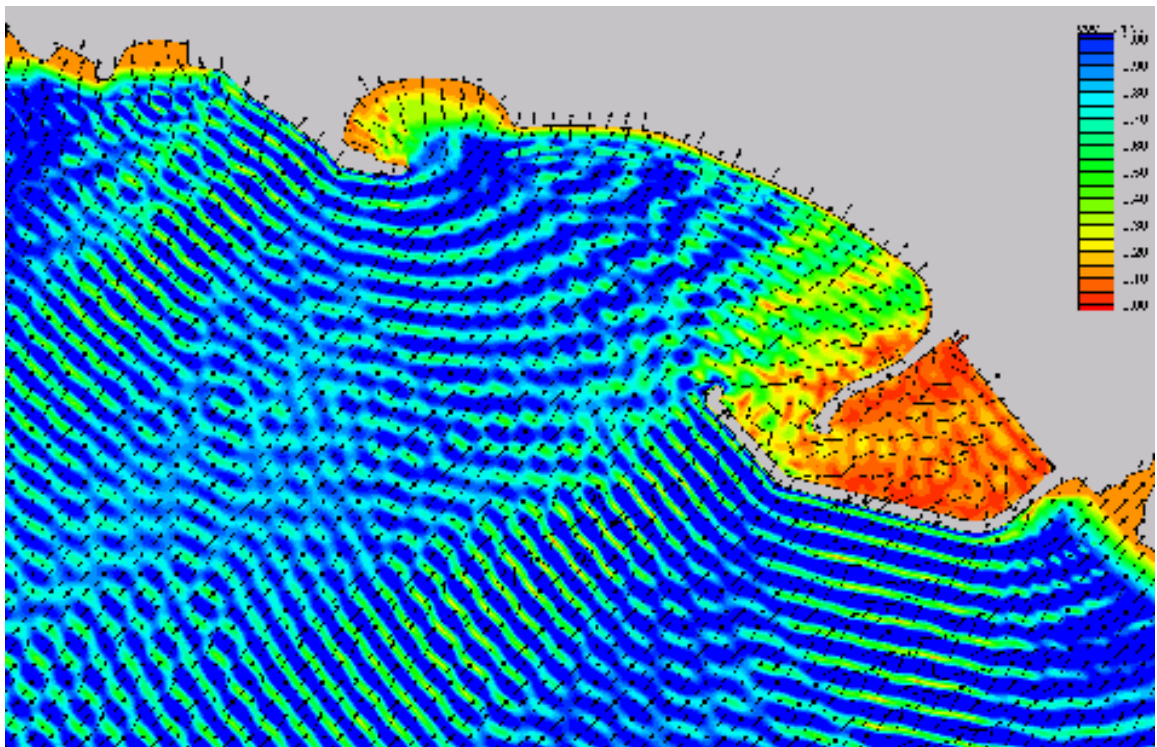


Figure 2.23 e 2.24 - Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=225^\circ$  N e  $T_p=8s$



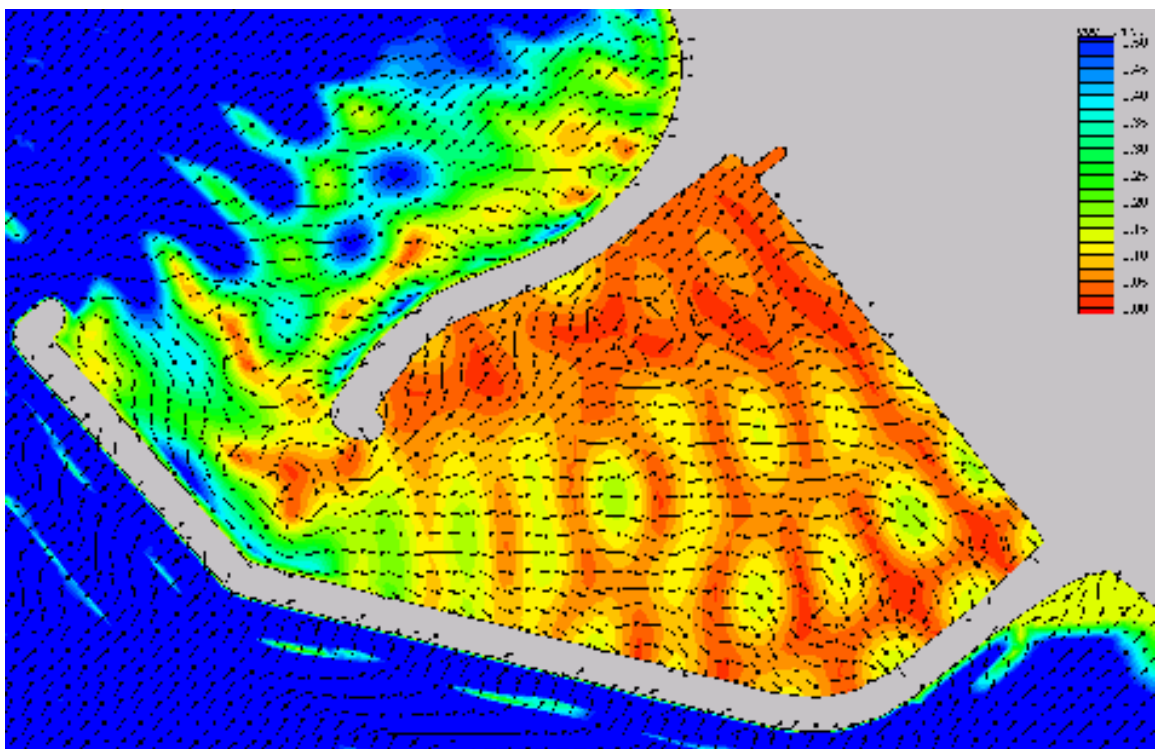
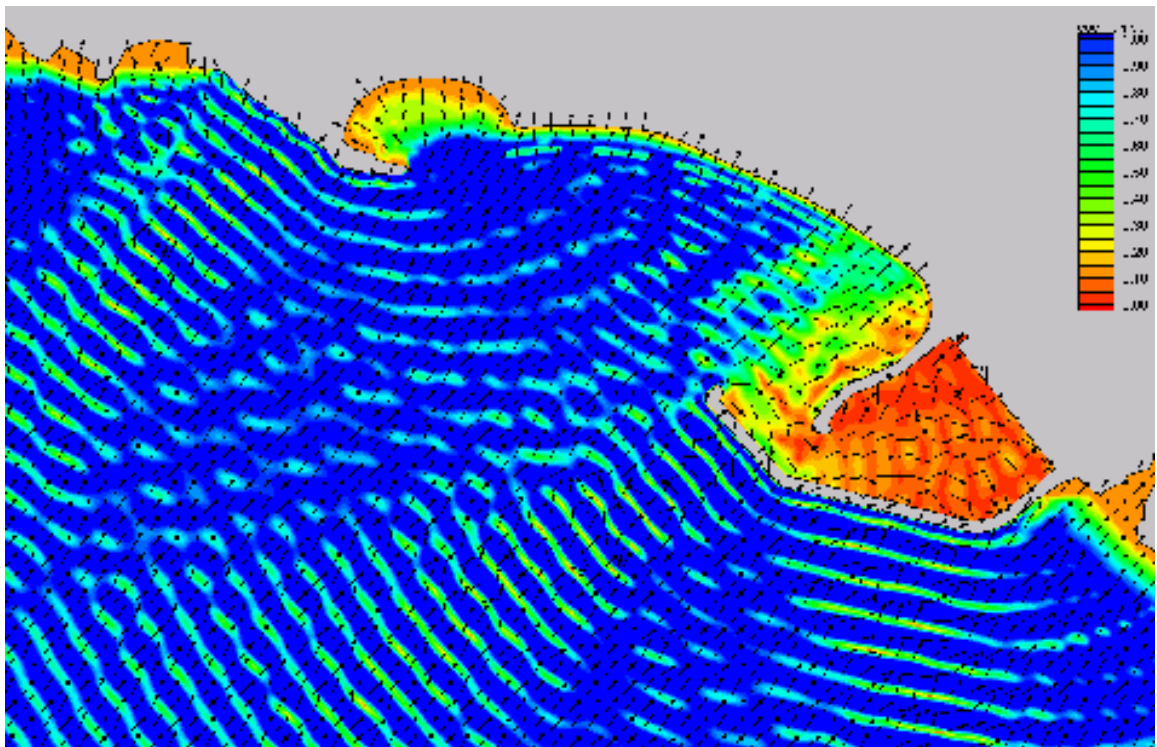


Figure 2.25 e 2.26 -Progetto.Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=225^\circ$  N e  $T_p=10s$

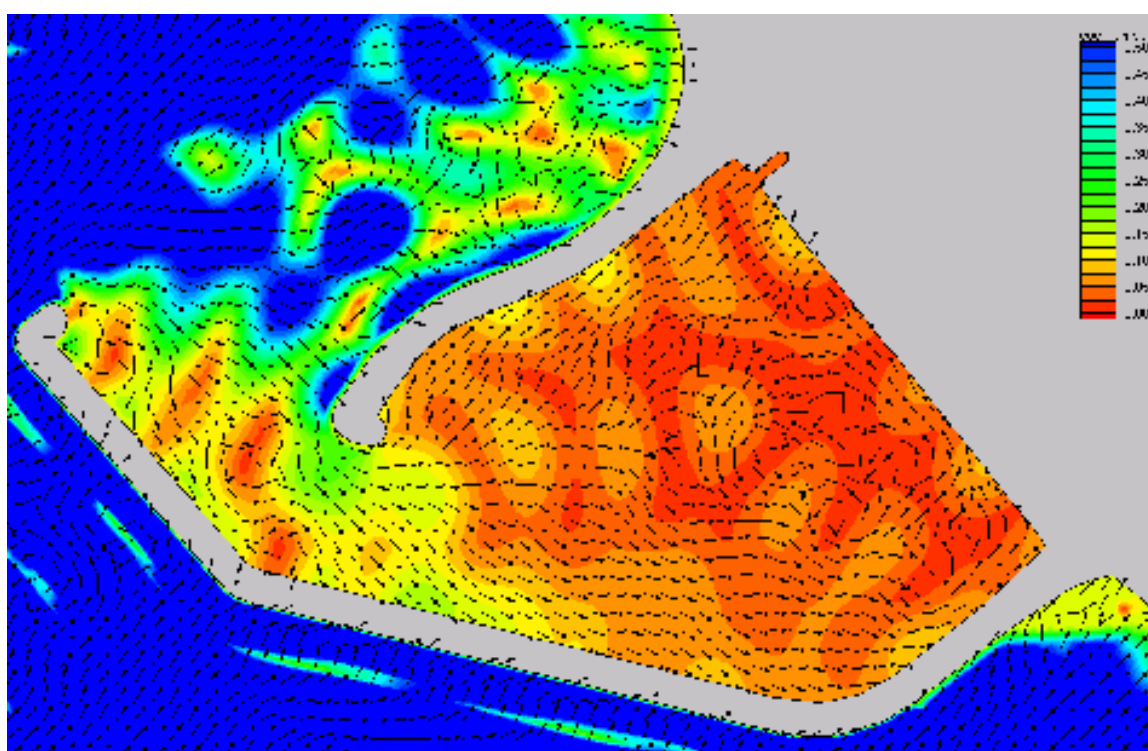
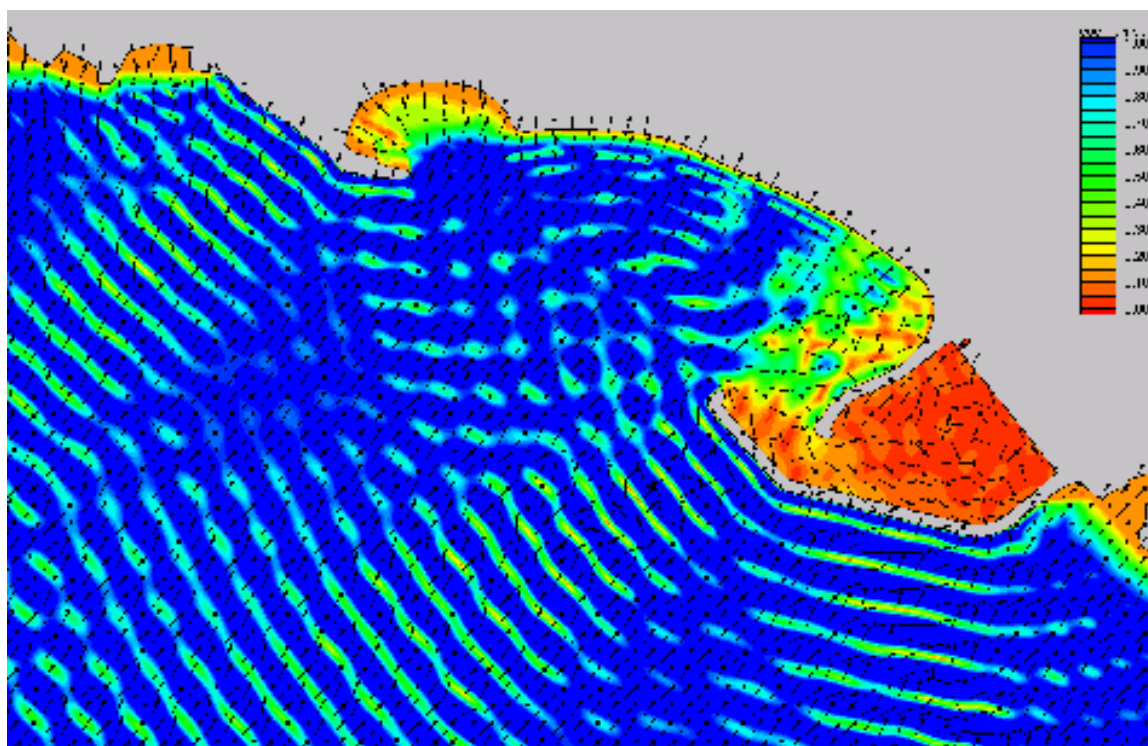


Figure 2.27 e 2.28. Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=225^\circ$  N e  $T_p=12s$

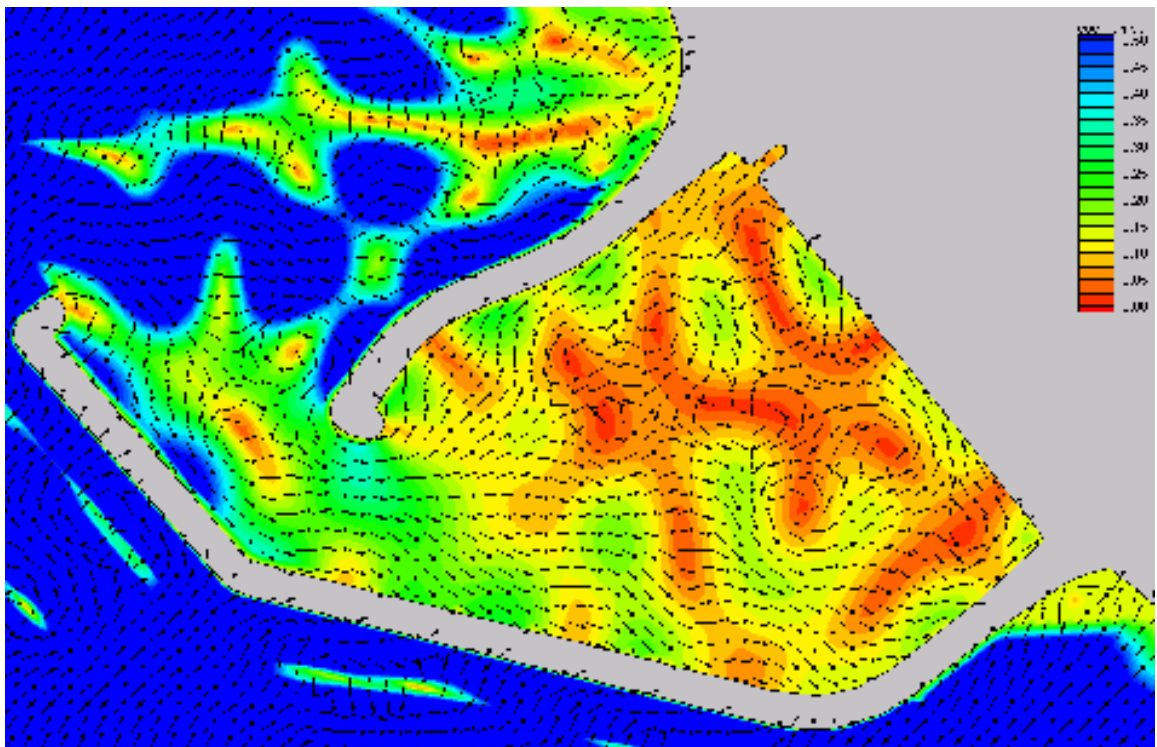
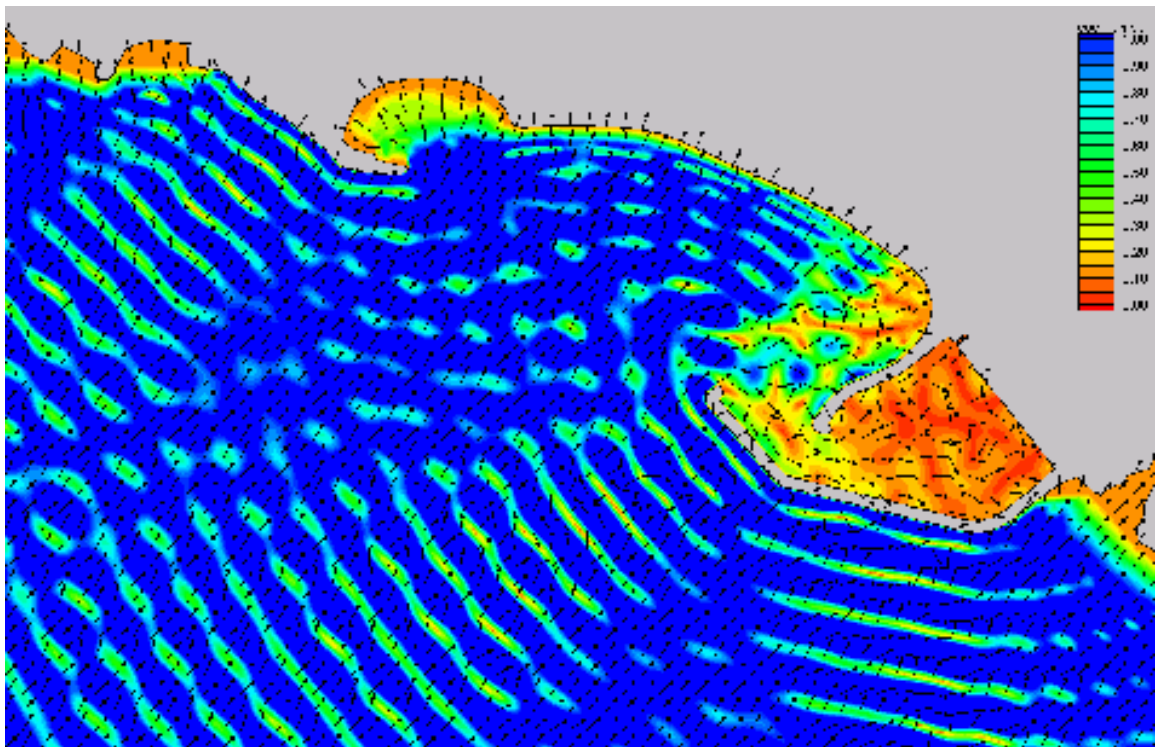


Figure 2.29 e 2.30. Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=225^\circ$  N e  $T_p=14s$



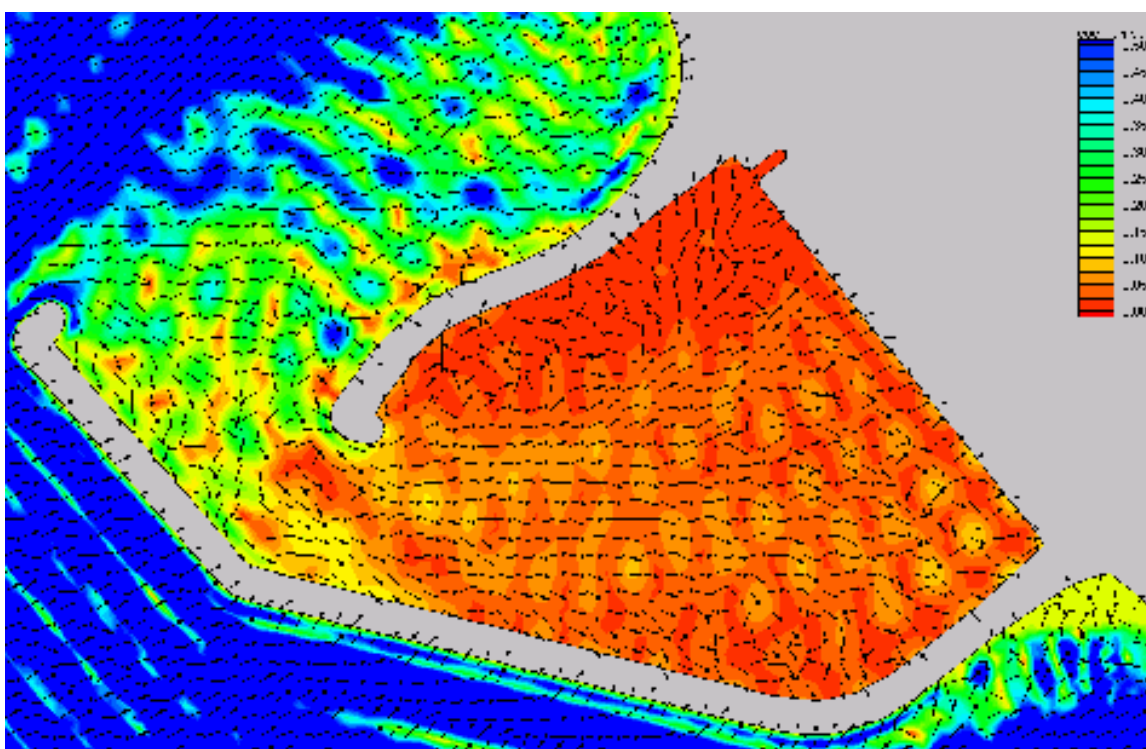
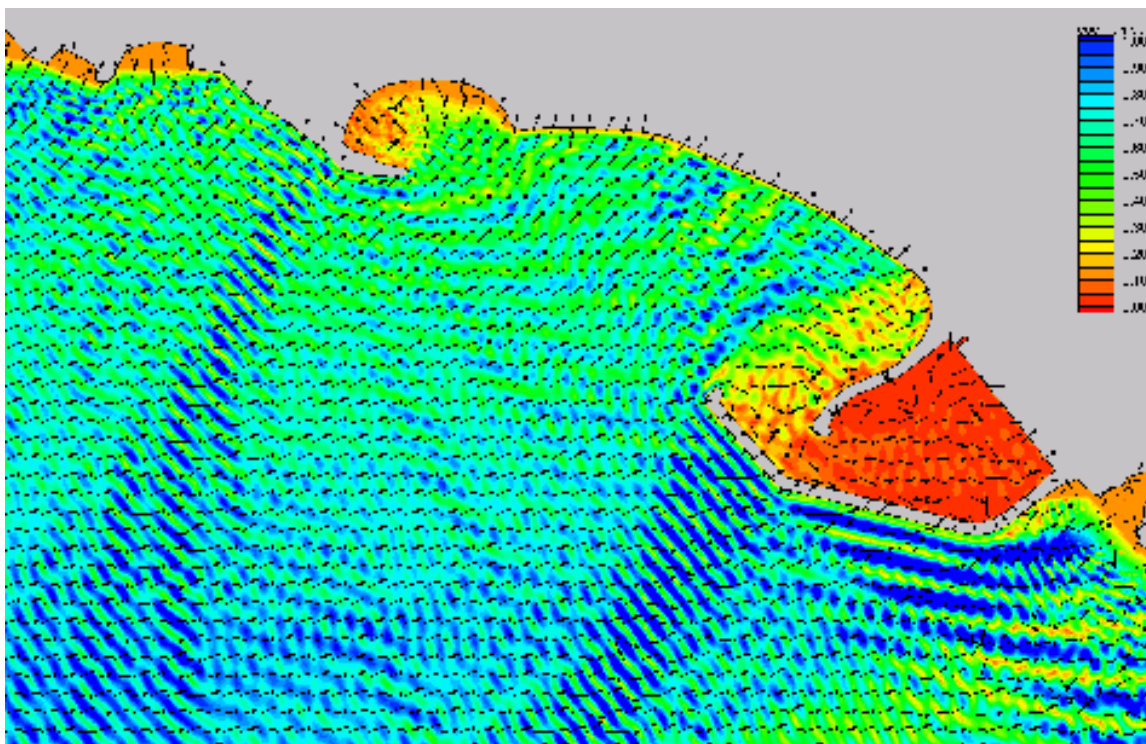


Figure 2.31 e 2.32. Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=270^\circ$  N e  $T_p=6s$

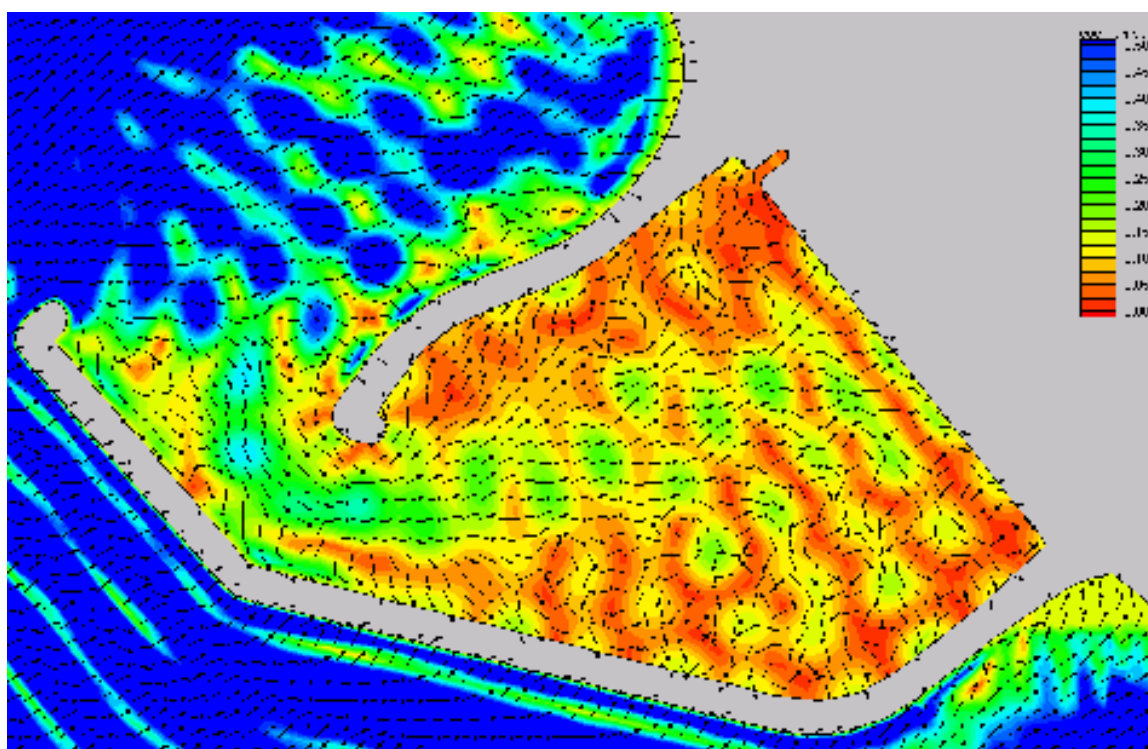
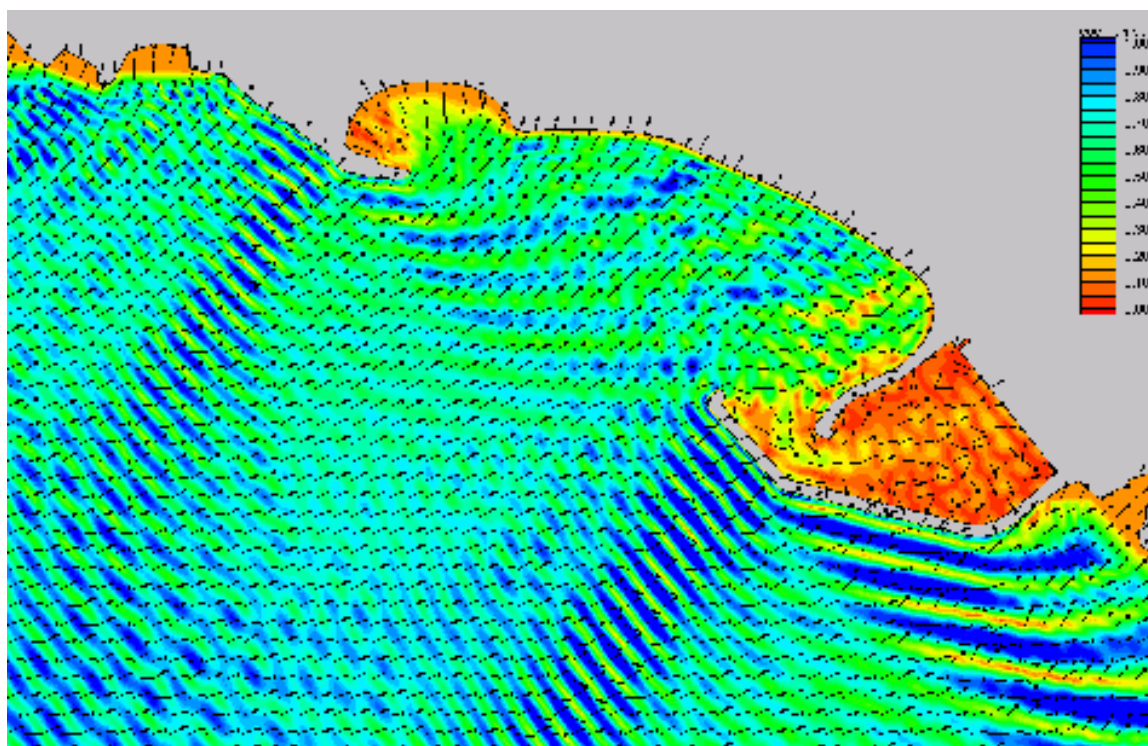


Figure 2.33 e 2.34 Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=270^\circ$  N e  $T_p=8s$



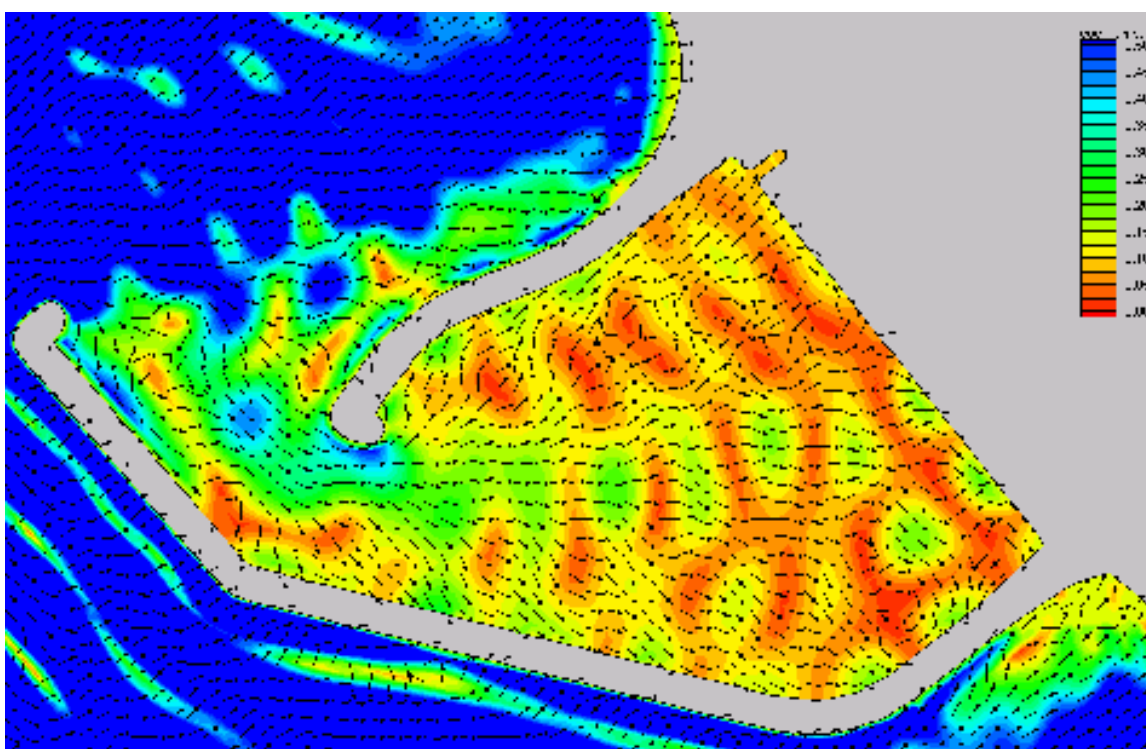
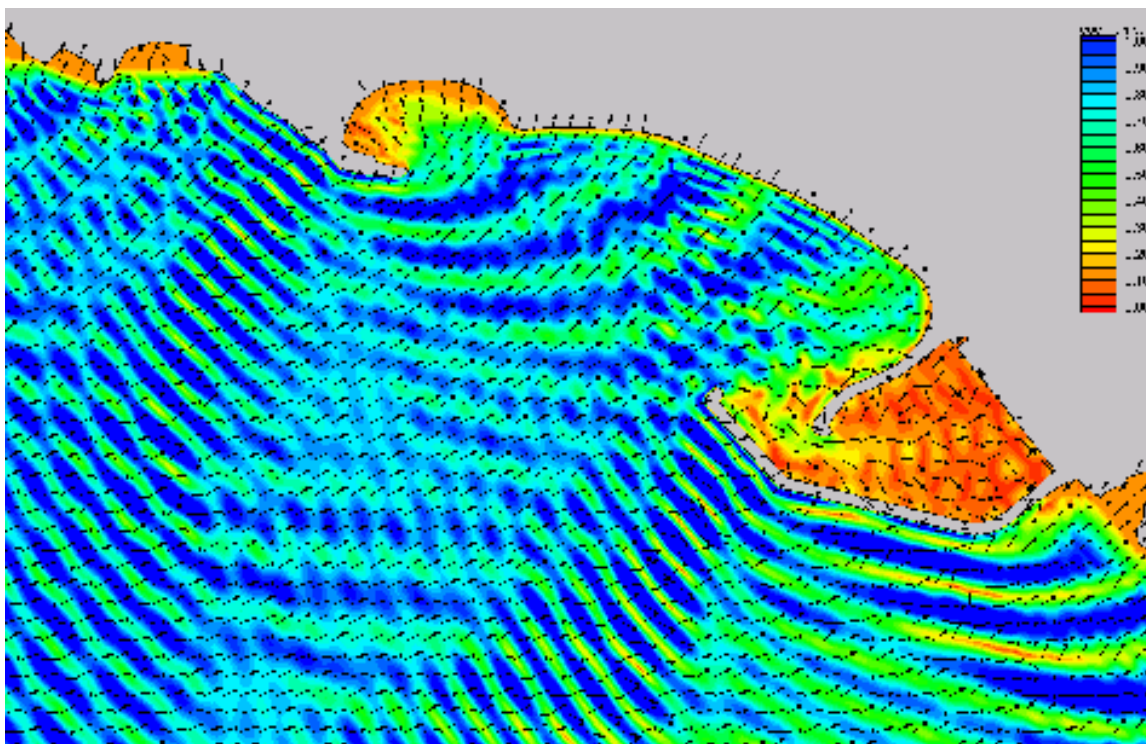


Figure 2.35 e 2.36. Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=270^\circ$  N e  $T_p=10s$

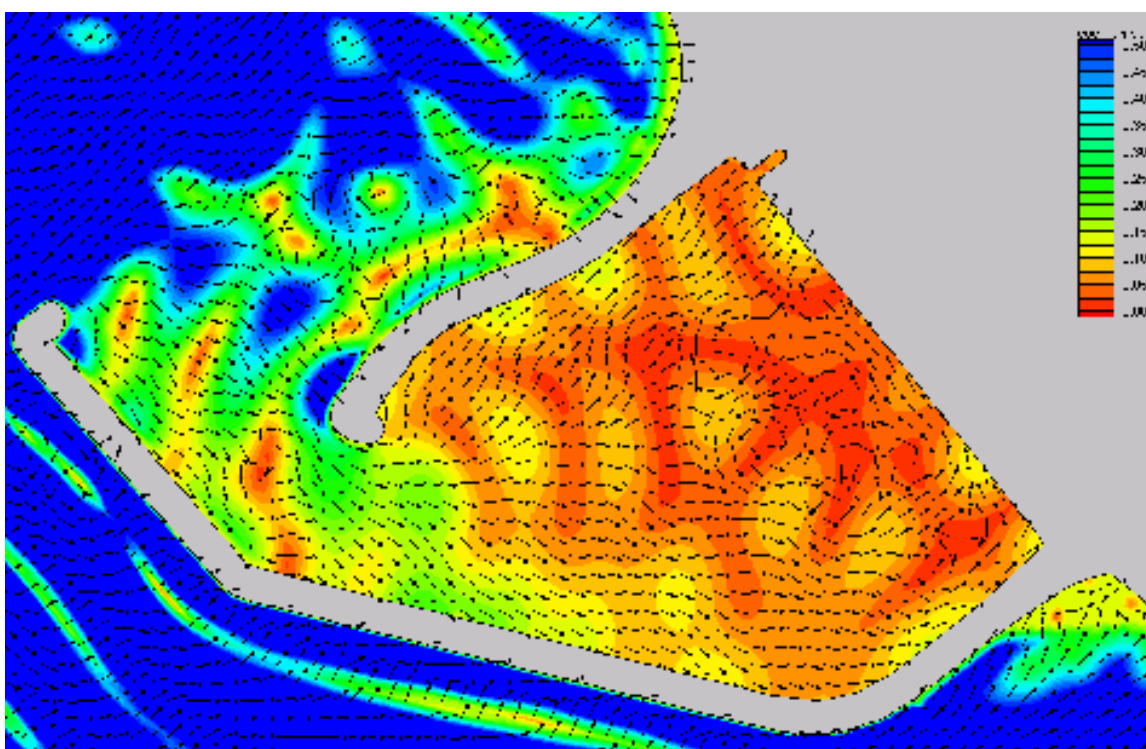
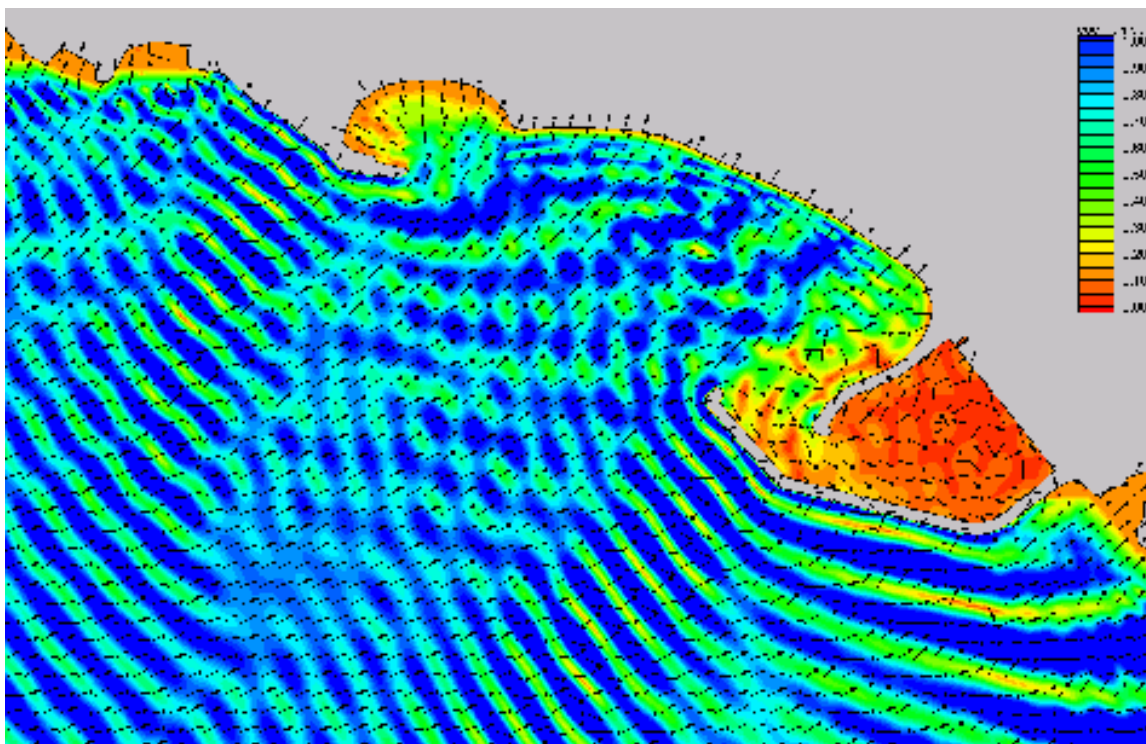


Figure 2.37 e 2.38. Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=270^\circ$  N e  $T_p=12s$



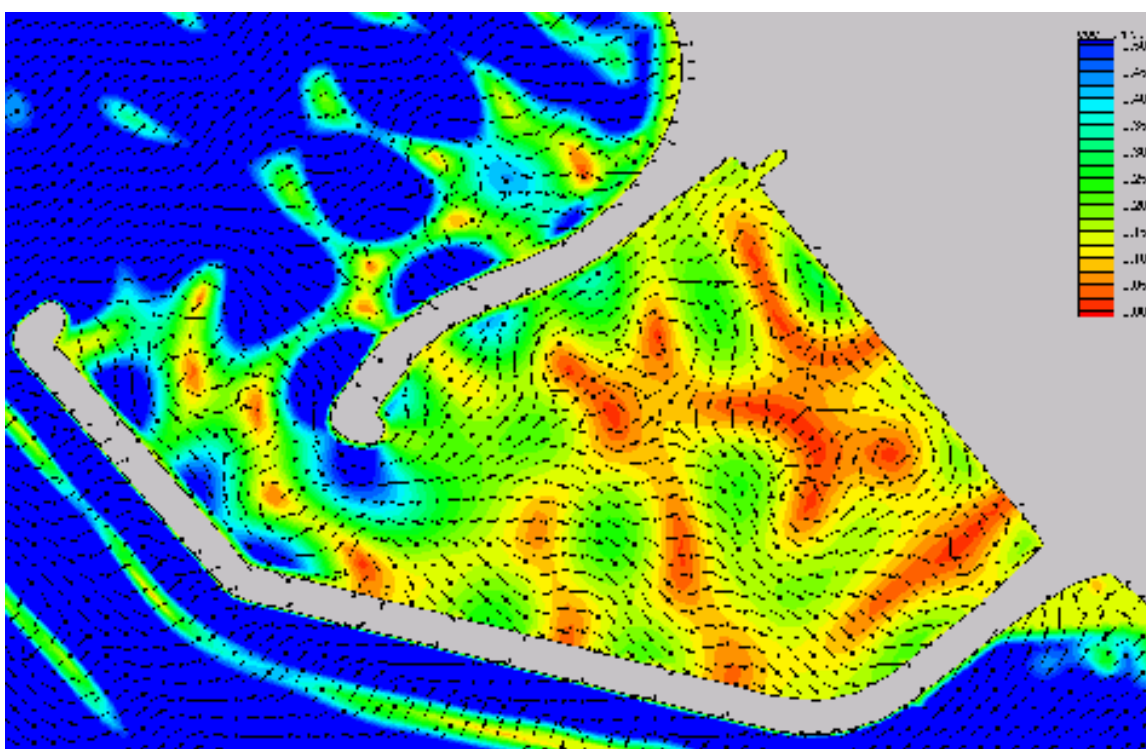
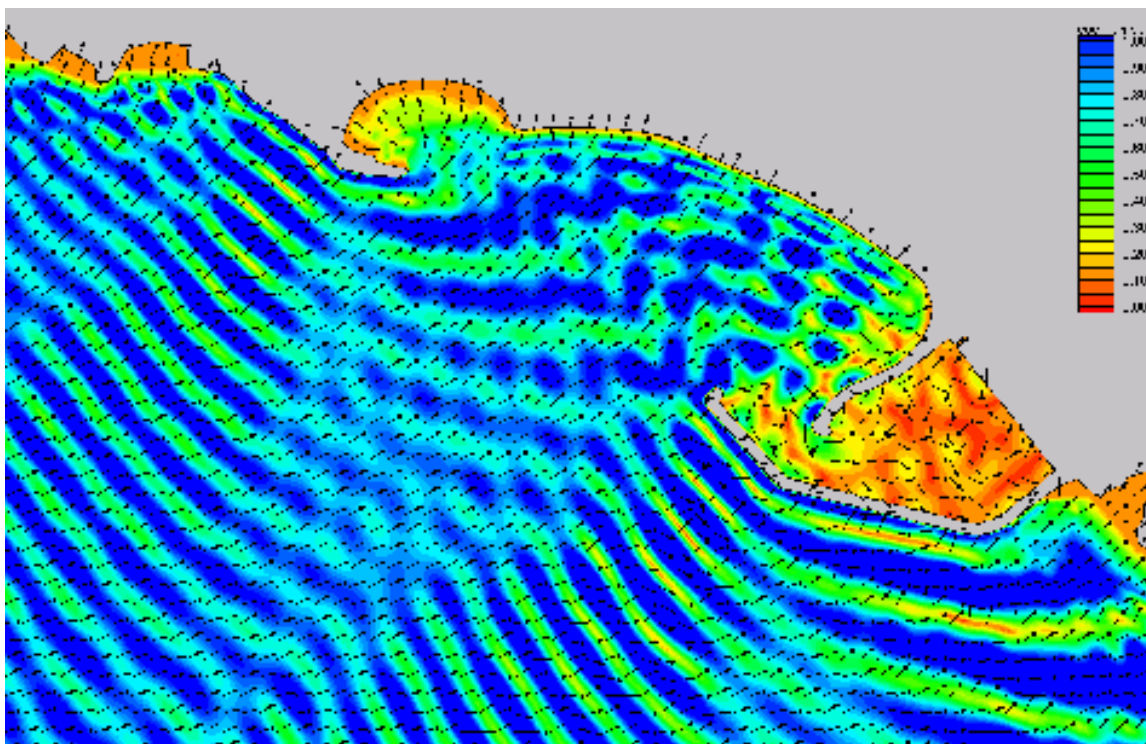


Figure 2.39 e 2.40. Progetto. Coefficienti di amplificazione per un'onda monocromatica di  $\theta=270^\circ$  N e  $T_p=14s$

---

### **3 ALLEGATO C**

---

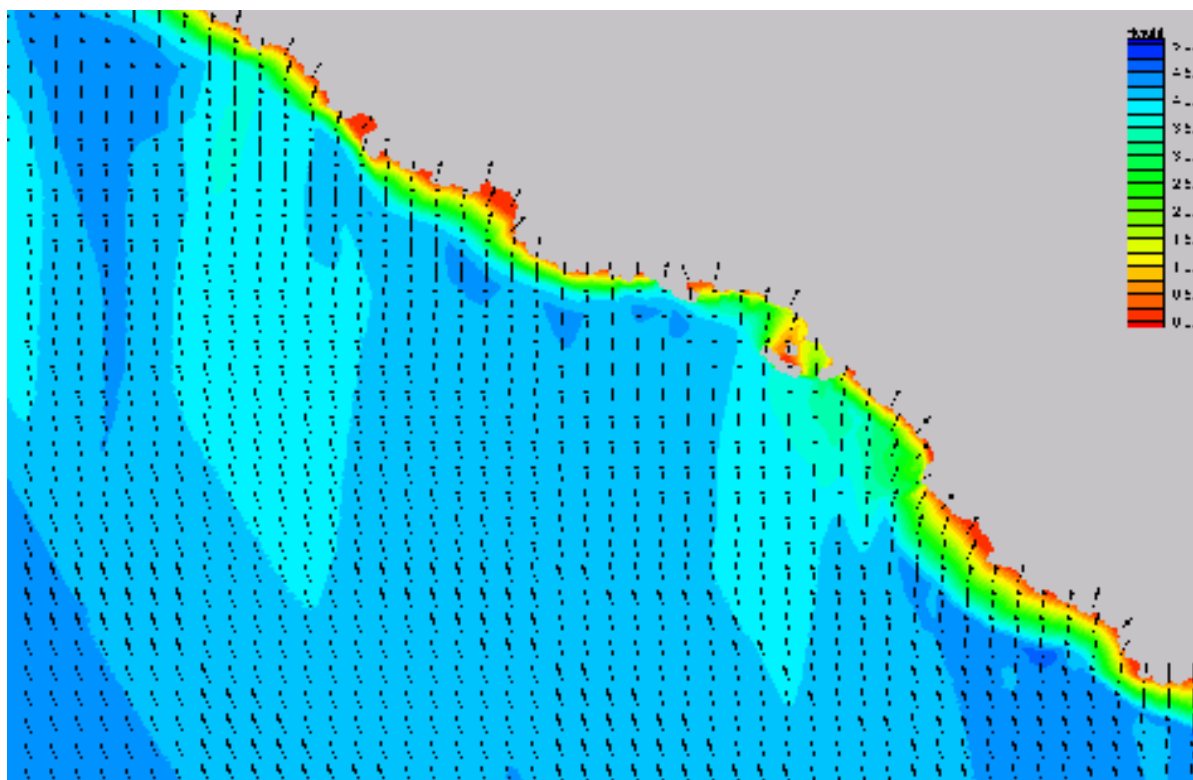


Figura 3.1 - Progetto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta  $Tr = 70$  anni  $\vartheta = 135^\circ N$   
 $H_s = 6,25m$   $T_p = 12,1s$

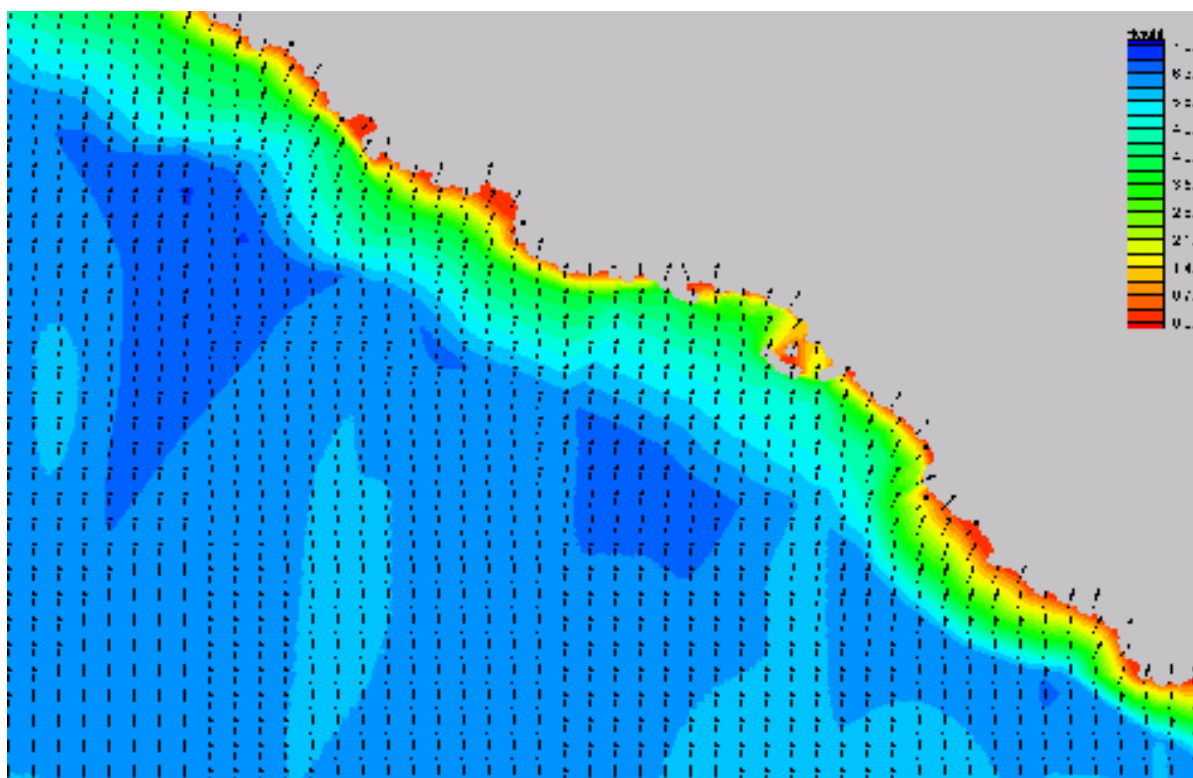


Figura 3.2 - Progetto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta  $Tr = 70$  anni  $\vartheta = 180^\circ N$   
 $H_s = 6,54m$   $T_p = 12,41s$

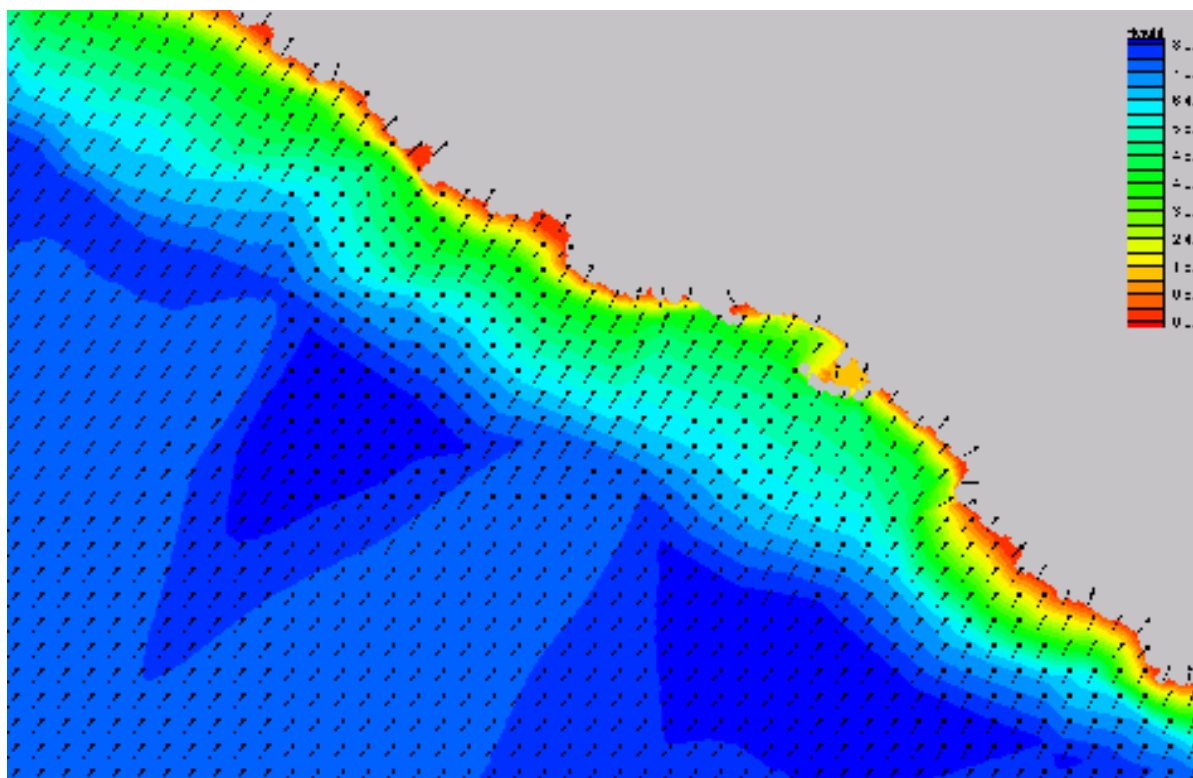


Figura 3.3 - Progetto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta  $Tr = 70 \text{ anni}$   $\theta = 225^\circ N$   
 $H_s = 9,96m$   $T_p = 13,69s$

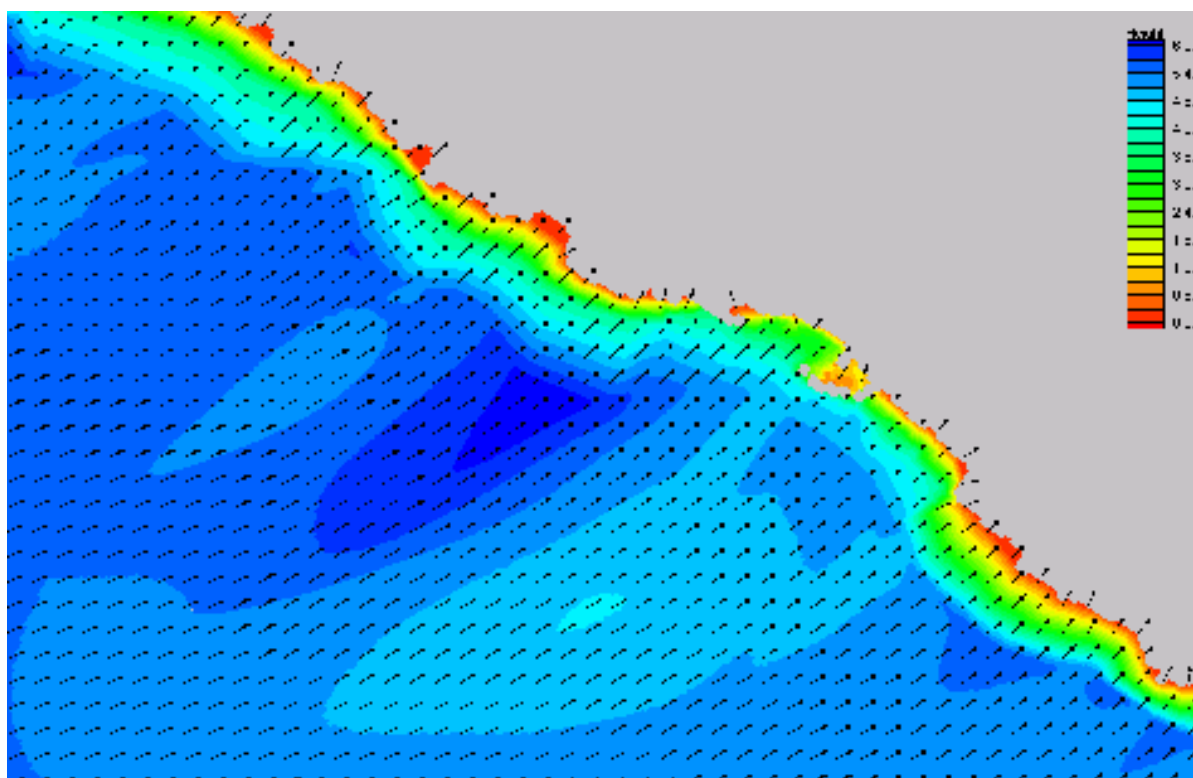


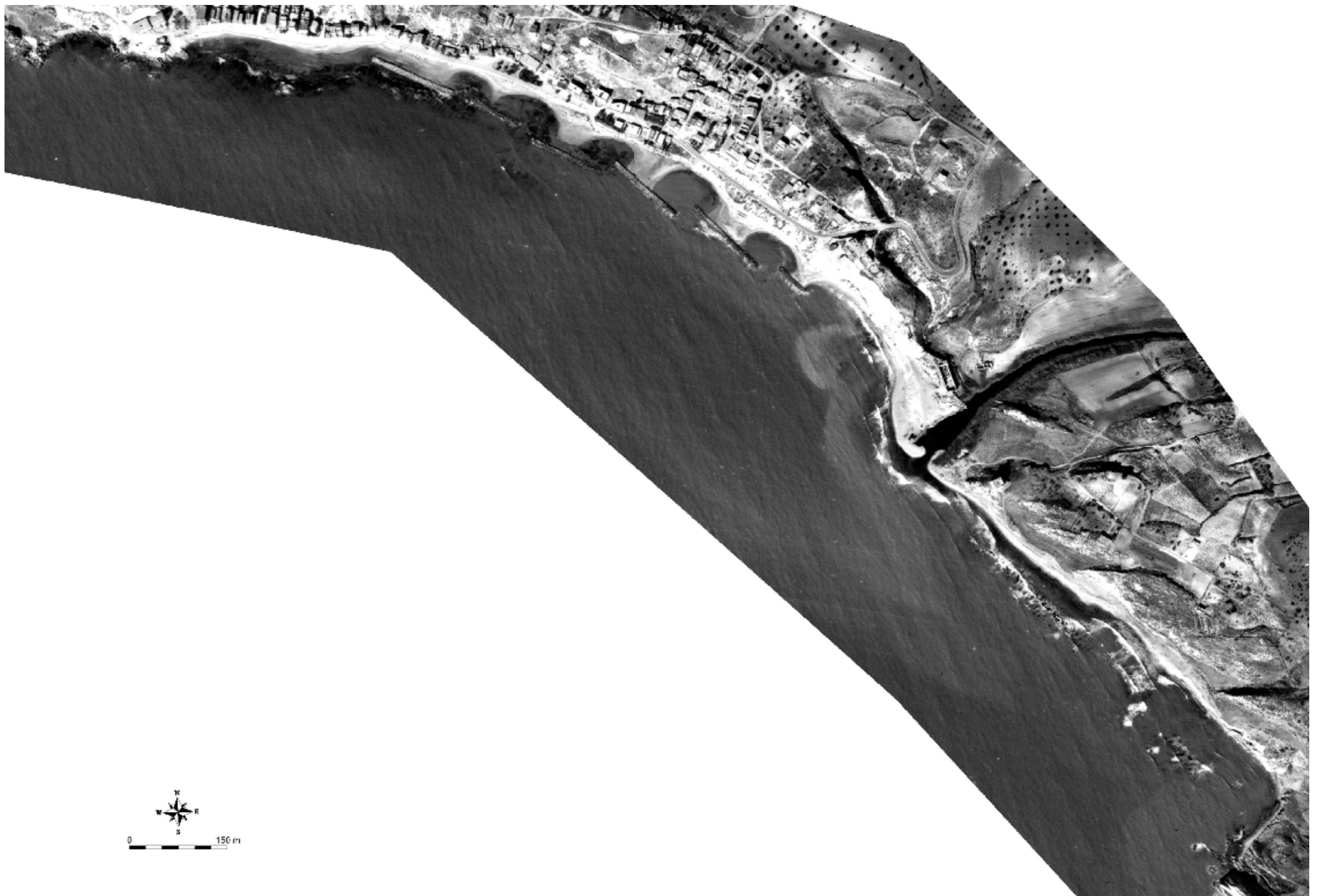
Figura 3.4 - Progetto - Distribuzione altezza e direzione dell'onda sottocosta  $Tr = 70 \text{ anni}$   $\theta = 270^\circ N$   
 $H_s = 6,99m$   $T_p = 12,82s$



---

#### 4 ALLEGATO D

---



*Figura 4.1 - Volo del novembre 1977 – Produzione: SAS Palermo*





*Figura 4.2 - Volo ENEL 1979 – Proprietà: ENEL Spa*





*Figura 4.3 - Volo A.T.A. 1987 – Produzione: C.G.R. Spa Parma*





*Figura 4.4 - Volo del 23/07/1988 – Produzione: SAS Palermo*





*Figura 4.5 - Ortofoto dal volo del 1998 – Produzione: Ass. Reg. Territorio e Ambiente - C.G.R. Spa Parma*



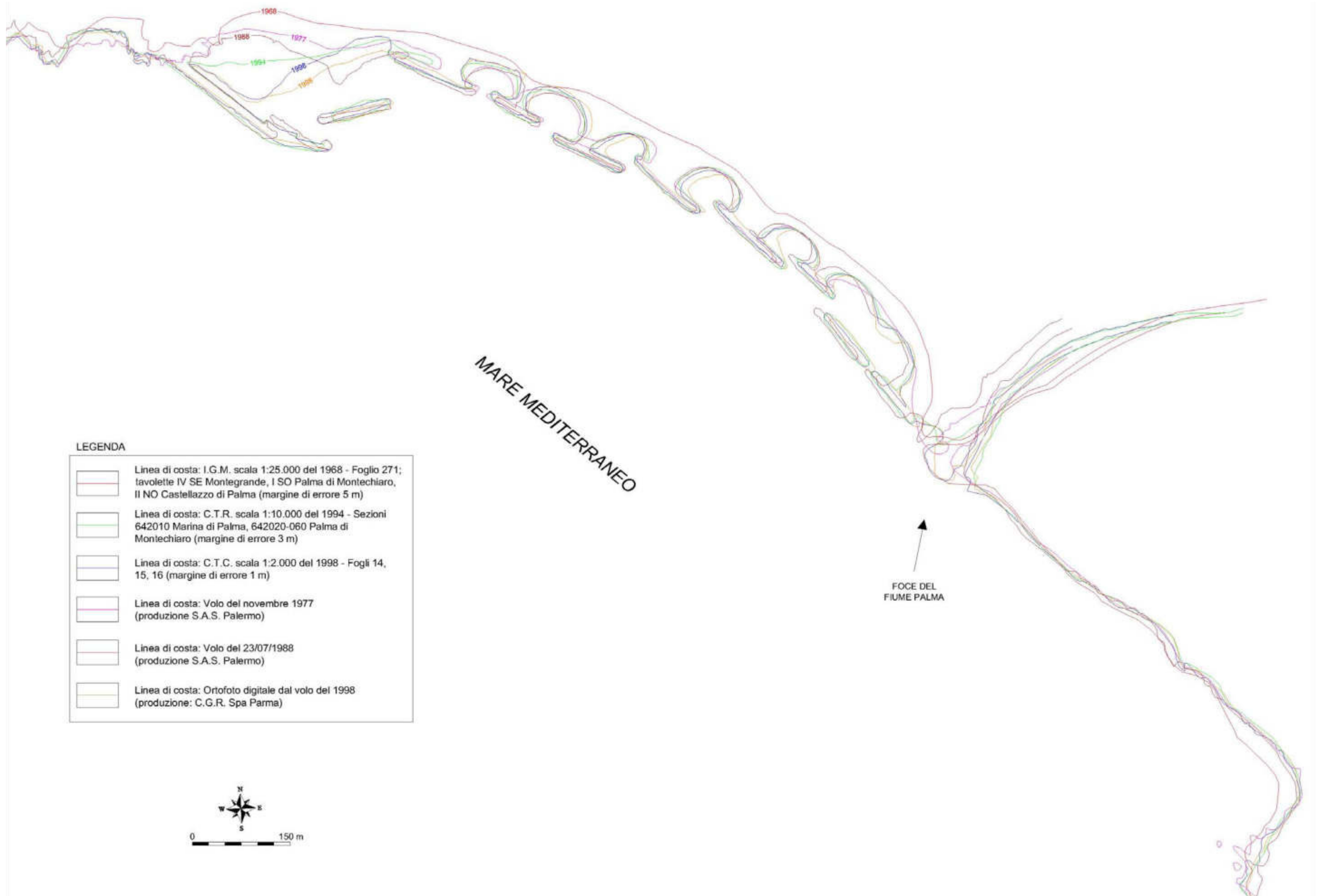


Figura 4.6 – Evoluzione storica della linee di riva