



**REGIONE MARCHE**  
SERVIZIO GOVERNO DEL TERRITORIO, MOBILITA' ED INFRASTRUTTURE

*P.F. Demanio Idrico, Porti e Lavori Pubblici*



**COMUNE DI NUMANA**



## **PIANO REGOLATORE PORTUALE (ai sensi della Legge 84/94)**

### **A.1 – MODELLO MATEMATICO**

#### **COMPOSIZIONE DEL GRUPPO DI LAVORO**

Arch. Rodolfo Novelli – Responsabile del Procedimento  
Ing. Giorgio Occhipinti – Responsabile della progettazione del Piano

#### **PROGETTAZIONI**

##### **ASPETTI MARITTIMI**

Ing. Giorgio Occhipinti

##### **ASPETTI URBANISTICI E ARCHITETTONICI**

Ing. Giorgio Occhipinti

Ing. Nicoletta Santelli

Ing. Stefano Leti

Ing. Massimiliano Gabrielli

##### **ASPETTI AMBIENTALI**

Dott.ssa Simona Palazzetti

in collaborazione con l'Ing. Nicoletta Santelli

##### **ASPETTI GEOLOGICI**

Geol. Luca Amico

##### **COLLABORATORE PER GLI ASPETTI INFORMATICI**

P.I. Eugenio Giuliani

##### **COLLABORATORI**

Geom. Roberto Frey – *Collaboratore del Responsabile del procedimento*

Geom. Carmine Bellino

Geom. Angelo Olivi

Geom. Nazzareno Santinelli

Arch. Paolo Storani

##### **STUDI METEOMARINI**

Università degli studi di Ancona

Dipartimento di Idraulica, Strade, Ambiente, e Chimica

Sezione Idraulica e Ambiente



COMUNE DI NUMANA  
PROVINCIA DI ANCONA



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTA' DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI IDRAULICA STRADE AMBIENTE E CHIMICA  
SEZIONE IDRAULICA E AMBIENTE

**CONVENZIONE DI CONSULENZA TECNICO  
SCIENTIFICA PER LO STUDIO, MEDIANTE MODELLO  
MATEMATICO, DI SUPPORTO ALLA INDIVIDUAZIONE  
DELLA CONFORMAZIONE OTTIMALE DELLA NUOVA  
IMBOCCATURA DEL PORTO DI NUMANA**

**RELAZIONE**

**Comune di Numana**  
Il Sindaco  
Geom. Marzio Carletti

**Università Politecnica delle Marche**  
Il Responsabile Scientifico  
Prof. Ing. Alessandro Mancinelli

## INDICE

1) PREMESSA.....	1
2) ELABORAZIONE DEI DATI DI MOTO ONDOSI.....	2
2.1) Dati ondametrici registrati dal sito della R.O.N. al largo di Ancona .....	2
2.2) Regime ondoso medio al largo di Ancona .....	5
2.3) Analisi delle onde estreme.....	9
2.3.1) <i>Selezione dei dati da analizzare e metodologia adottata</i> .....	9
2.3.2) <i>Scelta della legge probabilistica</i> .....	9
2.3.3) <i>Analisi statistica delle onde estreme con i dati della boa R.O.N. di Ancona</i> .....	10
2.4) Individuazione degli eventi ondosi significativi più gravosi per lo studio.....	20
2.5) Trasposizione geografica delle ondazioni dal sito della boa fino al largo di Numana.....	25
2.6) Individuazione dei valori delle sopraelevazioni del livello medio superficiale da associare alle mareggiate individuate per le applicazioni .....	32
3) MODELLO NUMERICO PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSI NEL TRASFERIMENTO DAL LARGO VERSO LA RIVA.....	37
3.1) Lo spettro del moto ondoso .....	37
3.2) Il trasferimento spettrale dal largo verso riva. Il codice WISPH3.....	38
4) CARATTERISTICHE DELLE CONFIGURAZIONI PORTUALI PRESE IN ESAME.....	40
4.1) Configurazione A .....	41
4.2) Configurazione B.....	42
4.3) Configurazione C.....	43
4.4) Configurazione D .....	44
5) AGITAZIONE ONDOSA ALL'IMBOCCATURA DEL PORTO DI NUMANA.....	45
5.1) Introduzione.....	45
5.2) Codice di calcolo MIKE 21 BW .....	45
5.2.1) <i>Definizione della batimetria</i> .....	46
5.2.2) <i>Selezione dell'area da modellare e del passo di integrazione temporale</i> .....	48
5.2.3) <i>Condizioni al contorno</i> .....	50
5.2.4) <i>Caratteristiche delle strutture portuali</i> .....	50
5.2.5) <i>Condizione iniziale</i> .....	50
5.2.6) <i>Dati ondosi</i> .....	50
5.3) Risultati del modello.....	50
5.4) Analisi dei risultati .....	83
6) VERIFICA DELL'AGIBILITÀ DELLA ROTTA D'INGRESSO .....	89
6.1) Introduzione.....	89
6.2) Tracciamento della rotta d'ingresso .....	89
6.3) Delimitazione del cerchio di manovra.....	89
7) CONCLUSIONI .....	102

## 1) PREMESSA

Su incarico del Comune di Numana (AN) il Dipartimento di Idraulica, Strade, Ambiente e Chimica dell'Università Politecnica delle Marche ha stipulato una Convenzione di Consulenza tecnico-scientifica avente come oggetto "lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana", da svolgere a cura e attraverso la propria Sezione di Idraulica e ambiente, con responsabile scientifico, per queste attività, il prof. ing. Alessandro Mancinelli.

In tal merito si premette che la Regione Marche, con disposizione del Segretario Generale in data 07.05.2008 ed in collaborazione con il predetto Comune, ha costituito il gruppo per la redazione del Piano Regolatore Portuale di Numana, coordinato dal Dott. Ing. Giorgio Occhipinti, dirigente della struttura regionale competente in materia di porti.

Il predetto dirigente ha elaborato delle proposte preliminari per la messa in sicurezza del bacino portuale e la definizione di un'unica imboccatura. Tali proposte sono state presentate ed illustrate nella riunione in data 01.08.2008, alla presenza di tutti i soggetti interessati. Sulla base degli elementi acquisiti, a seguito di tale presentazione, il progettista ha individuato tre soluzioni, ritenute le più significative per gli obiettivi da raggiungere.

Detto Comune ha la necessità di supportare la redazione del P.R.P. con studi specialistici, mediante modello matematico per l'individuazione della soluzione ottimale delle opere foranee del Piano Regolatore ed il citato Dipartimento svolge attività di ricerca in questo settore presso la propria Sezione di Idraulica, quindi il Comune ha affidato al Dipartimento l'incarico degli studi e delle ricerche innanzi detti e come meglio indicati nel prosieguo.

I contenuti della Convenzione sono specificati all'art. 2 e riguardano i seguenti argomenti che il Dipartimento ha avuto il compito di eseguire:

1. ricostruire e definire le caratteristiche del moto ondoso in prossimità del porto di Numana, utilizzando i dati disponibili;
2. effettuare lo studio, mediante modello matematico, delle tre soluzioni più significative, a modifica dello stato di fatto, elaborate dal progettista al fine di individuare la soluzione ottimale, in rapporto all'agitazione ondosa della nuova imboccatura, dell'agibilità della rotta d'ingresso e dell'agitazione all'interno del bacino portuale.

Al fine di individuare la soluzione più funzionale, durante lo studio potranno essere apportate, su indicazione del progettista, modifiche alle soluzioni iniziali per un massimo di n. 2.

Il Comune di Numana ha fornito la documentazione in suo possesso ed in particolare la configurazione del Piano Regolatore Generale (terrestre) ed alcune informazioni sulle indagini batimetriche, che poi sono state integrate con i risultati dei rilievi eseguiti nello stesso paraggio marino, proveniente da fonti diverse.

Nei paragrafi che seguono sono riportati i risultati degli studi effettuati che sono:

- elaborazione delle onde registrate alla boa della Rete Ondametrica Nazionale situata davanti al largo di Ancona (determinazione del clima medio, elaborazione statistica dei valori estremi ed individuazione di alcuni eventi ondosi significativi) per le onde al largo;
- trasferimento delle onde al picco delle mareggiate individuate al largo dal sito della boa ondametrica della RON di Ancona fino alle condizioni di acque profonde al largo del paraggio marino di Numana, mediante il metodo di trasposizione geografica;
- trasferimento delle onde a riva con la costruzione dei piani d'onda attraverso modello matematico spettrale del tipo *Wisph3*, utilizzando una distribuzione generale regolare delle profondità deducibile dalla cartografia nautica dal largo fino alla profondità di 10 metri;
- studio dell'agitazione ondosa sull'imboccatura ed all'interno del bacino portuale, per la configurazione attuale e per quelle indicate dal progettista, tramite modello matematico Mike21; elaborazione dei dati e rappresentazione sintetica dei risultati di confronto fra le configurazioni;
- studio della rotta di ingresso per diverse condizioni del moto ondoso gravante.



## **2) ELABORAZIONE DEI DATI DI MOTO ONDOSI**

### **2.1) Dati ondametrici registrati dal sito della R.O.N. al largo di Ancona**

Dal 9 marzo 1999 al 14 luglio 2002 lo strumento di misura per il sito ondametrico di Ancona, appartenente alla R.O.N. del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale è stato la boa, del tipo Directional Waverider, della società olandese Datawell. Essa era stata ancorata inizialmente su una profondità di oltre 50 metri, in posizione di coordinate geografiche  $43^{\circ}37'13''N$  e  $13^{\circ}51'04''E$ , circa 12 miglia marine ad Est-NordEst del promontorio del Monte Conero. Per problemi dovuti a frequenti disormeggi della boa, probabilmente dovuti all'intensa attività di pesca nel paraggio ed all'estrema vicinanza con le rotte dei traghetti che incrociano per la Grecia o l'Albania, il sito della stazione di misura è stato spostato alla fine del mese di Maggio 2000 su una profondità di circa 70 metri, in posizione di coordinate geografiche  $43^{\circ}50'30''N$  e  $13^{\circ}42'50''E$ , circa 15 miglia marine a Nord-NordEst del porto di Ancona nei pressi (circa 500 metri a NordEst) dell'isola artificiale di Clara Ovest della società A.G.I.P. (si veda lo schema planimetrico in Figura 2.1).

Riguardo alle misure della stazione ondametrica nel paraggio di Ancona, si dispone delle registrazioni dei dati ondosi di oltre 7 anni, pur con alcuni periodi di interruzione, rilevati nel periodo dal 9 marzo 1999 al 31 maggio 2006. Per garantire un'opportuna omogeneità climatologica le elaborazioni sono state effettuate sui 7 anni di osservazione dal 9 marzo 1999 al 9 marzo 2006.

In seguito alla ristrutturazione della rete avvenuta nel 2002, con la generale sostituzione degli strumenti di misura della Rete con le boe Triaxys, le registrazioni delle misure hanno subito tra il 14 luglio 2002 ed il 17 ottobre dello stesso anno varie interruzioni che non hanno permesso di considerare alcuna misura valida; questo è stato il periodo di interruzione più lungo occorso durante l'intero periodo di osservazione.

Sono stati rilevati i principali dati statistici (si tratta di altezza d'onda significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione media delle onde) degli stati di mare su base trioraria (cioè un dato completo sulle caratteristiche dello stato di mare lungo mezzora di tempo ogni tre ore) e di misure degli stessi valori statistici in continuo su base semioraria (cioè dati consecutivi degli stati di mare ogni 30 minuti). I valori ondosi sono dedotti dall'analisi spettrale degli stati di mare, quindi generalmente l'altezza d'onda significativa di riferimento è indicata con  $H_s$  oppure  $H_{m0}$ .

Precisamente nel citato periodo di osservazione di 2557 giorni (7 anni) si hanno a disposizione dati statistici relativamente a 43427 stati di mare considerati validi. Di questi 43427 stati di mare 8595 sono stati rilevati dalla boa Directional Waverider (8417 stati di mare triorari sui 9784 complessivamente rilevabili) con una percentuale di funzionamento pari all'86%. I restanti 34832 stati di mare sono stati rilevati dalla boa Triaxys in continuo (ogni 30 minuti) però con una minore percentuale di funzionamento, risultata pari al 58,5%. Complessivamente per i 7 anni di osservazione si è rilevata una percentuale di funzionamento generale pari ad oltre il 72,1%.

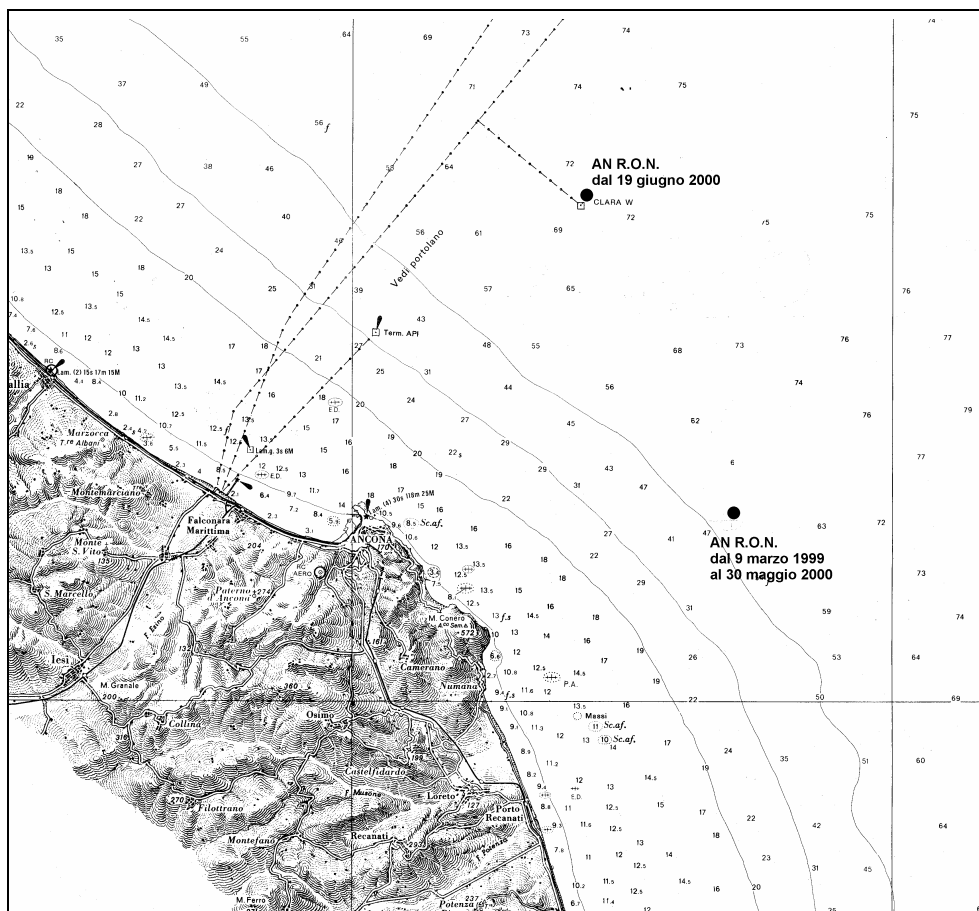


Figura 2.1 - Posizione geografica della stazione di misura gestita dalla R.O.N. al largo di Ancona

La conoscenza dell'andamento cronologico delle altezze significative del moto ondoso ha consentito di individuare, per l'intero periodo di osservazione di 7 anni, sia il regime ondoso medio (clima) che tutti gli eventi di mareggiata, i cui valori massimi sono stati utilizzati nell'analisi statistica degli eventi estremi per la determinazione del periodo di ritorno più probabile relativamente alle altezze d'onda raggiunte dalle mareggiate provenienti da predefiniti settori direzionali.

Dall'esame dell'insieme cronologico dei dati statistici a disposizione, si ricava che, nell'intero periodo di osservazione della boa (7 anni complessivi) sono stati rilevati ben 497 eventi di mareggiata indipendenti tra loro, di diversa durata, in cui le onde hanno raggiunto almeno un metro di altezza d'onda significativa (133 di essi hanno raggiunto i 2 metri, 37 hanno raggiunto i 3 metri, 5 eventi hanno superato i 4 metri ed in due soli casi si sono superati i 5 m di altezza d'onda significativa). Da notare che i due eventi ondosi che hanno superato i 5m sono avvenuti rispettivamente nel novembre 2002 per una mareggiata da scirocco-levante e nel settembre 2004 per una mareggiata da bora, mentre quelli con valori sopra i 4m sono avvenuti nell'aprile 2005 per un evento da libeccio, quindi non di traversia per i siti costieri in esame, gli altri due nel novembre 1999 e nel gennaio 2001, entrambi provenienti da greco-levante.

Dall'esame della rappresentazione cronologica delle altezze d'onda medie mensili, riportata in Figura 2.2, si nota che i mesi con altezza media più alta sono quelli invernali da novembre a febbraio, che generalmente il valore medio dell'altezza significativa si mantiene sopra i 60 cm da settembre-ottobre fino ad aprile-maggio. Nei mesi estivi tale valore, generalmente, non viene raggiunto e quasi sempre le medie mensili si mantengono attorno ai 40-50 cm. Inoltre, si può notare che in ogni invernata viene raggiunta, per almeno due o tre mesi, la soglia media di almeno 90 centimetri.

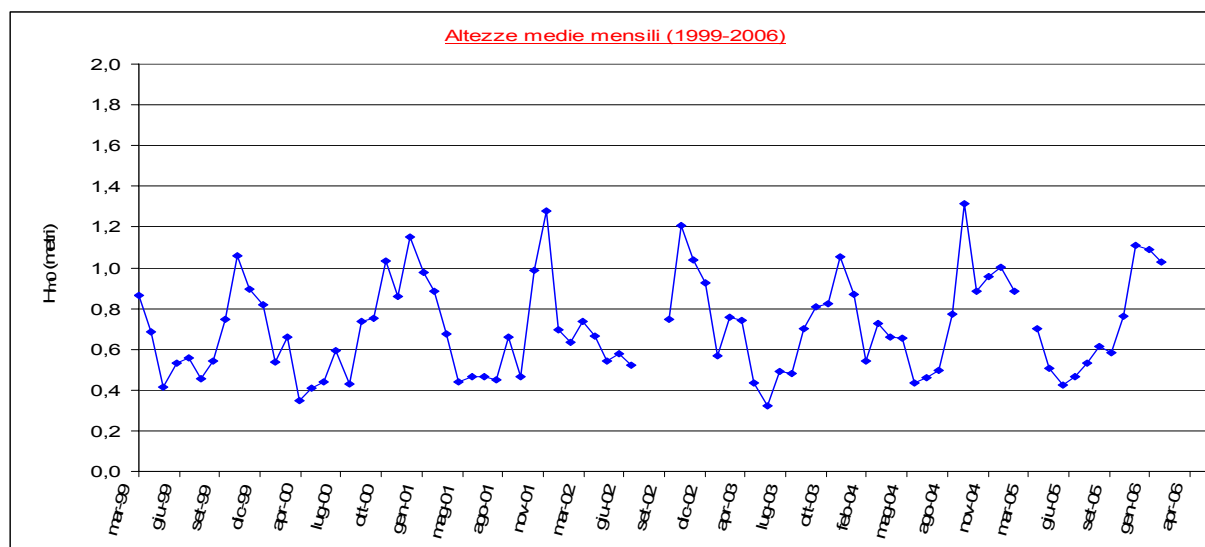


Figura 2.2 - Andamento cronologico delle altezze d'onda significative medie mensili rilevate su base trioraria dalla boa ondometrica della R.O.N. al largo di Ancona dal marzo 1999 al marzo 2006

Dal punto di vista ondometrico le stagioni calme (altezze d'onda medie inferiori a 60 cm) sono durate generalmente circa 5 mesi (quella del 1999 da maggio a settembre, quella del 2000 da aprile ad agosto, quella del 2001 da maggio a settembre e così via). In particolare i mesi più calmi risultano spesso essere quelli di primavera (aprile, maggio e giugno). I mesi estivi veri e propri non sono risultati sempre così calmi (medie mensili anche oltre i 60-70 cm).

Dal punto di vista ondometrico la stagione invernale '99-'00 è stata breve (solo da ottobre a gennaio l'altezza d'onda media mensile è stata superiore a 70 cm). In questo periodo è stato raggiunto il picco di oltre 100 cm nel novembre '99.

Al contrario l'inverno '00-'01 è risultato particolarmente lungo, da settembre a marzo l'altezza d'onda media mensile si è mantenuta sopra i 70 cm. La stagione invernale '01-'02 ha presentato caratteristiche simili a quelle del '99-'00: breve durata ma forti mareggiate (è stato raggiunto il picco di quasi 130 cm nel dicembre del '01).

L'inverno '02-'03 non è risultato particolarmente lungo ma discretamente intenso; mentre la stagione invernale '03-'04 ha avuto una simile durata ma di minor intensità, si è superata la media mensile di 90 cm di altezza d'onda solo in dicembre.

L'invernata '04-'05 è risultata particolarmente lunga (da settembre ad aprile) ed anche intensa (in ottobre la media ha superato i 130cm); come la stagione invernale '05-'06 che è iniziata a novembre e da dicembre fino a febbraio la media mensile di altezza d'onda si è mantenuta oltre i 100 cm.

Le differenze riscontrate fra le stagioni ondose invernali delle annate descritte è indice della variabilità meteo-marina del paraggio anconetano e di tutto il medio Adriatico.

Va comunque rilevato che la citata carenza di dati in certi periodi può aver influito sul suddetto risultato descritto alterando un poco tale climatologia mensile ondosa.

## 2.2) Regime ondoso medio al largo di Ancona

Il clima o regime ondoso medio in un paraggio marino individua la fenomenologia ondosa completa nella zona di mare cui si riferisce, caratterizzandone l'esposizione alle condizioni ondose provenienti dal largo. Generalmente il regime ondoso viene ricavato in condizioni di profondità infinita, in cui il moto delle onde è direttamente collegato al vento agente in superficie che lo ha generato e non risulta alterato dagli effetti di rifrazione, morfologia dei fondali, batimetria, acclività e diminuzione del fondale. Il successivo trasferimento su profondità finite viene effettuato adottando modelli matematici basati su schemi di onde regolari o irregolari spettrali, da cui è possibile poi individuare le altezze delle onde significative alle varie posizioni sottocosta.

L'esposizione di un paraggio marino è data dall'intensità delle agitazioni ondose che possono raggiungerlo per effetto dell'azione dei venti provenienti dal largo. Il settore di traversia è l'angolo comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire le agitazioni ondose da vento dal largo e si suddivide nella traversia principale, da cui provengono le onde più violente, e nella traversia secondaria, che include tutte le direzioni meno pericolose.

L'andamento significativo del regime ondoso medio o clima generale nel paraggio di Ancona è stato ricostruito utilizzando tutti i dati registrati nel periodo preso in esame.

La Tabella 2.1 contiene la raccolta della distribuzione di frequenza percentuale dei dati ondosi triorari per l'intero periodo di osservazione rispettivamente suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di periodi di picco, classi di altezze d'onda significative e di periodi medi, classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza.

Si possono costruire analoghe tabelle della distribuzione (assoluta o percentuale) del flusso energetico  $F$  che rappresenta l'energia delle onde che nell'unità di tempo passa attraverso una superficie normale alla direzione di propagazione dell'onda di larghezza unitaria e altezza pari alla profondità del fondale nel punto in cui viene calcolato, che è funzione dell'altezza d'onda e del periodo, in particolare viene valutato proporzionalmente al quadrato dell'altezza d'onda significativa media spettrale e al periodo medio relativi a ciascuna registrazione  $F = f(H^2, T)$  secondo la seguente formula:

$$\bar{F} = \text{cost} \cdot H_{m0}^2 \cdot T_m \quad [\text{kgf}/(\text{s} \cdot \text{m})] \quad (2.1)$$

dove  $H_{m0}$  è l'altezza d'onda significativa media spettrale,  $T_m$  è il periodo medio e  $\text{cost}$  è una costante che viene preventivamente calcolata. Per ogni classe il flusso energetico assoluto si ottiene come somma dei flussi di ciascun evento appartenente alla classe in considerazione. La potenza complessiva è la somma di tutti i flussi di energia per metro di lunghezza di cresta degli stati di mare compresi negli intervalli temporali e dei parametri ondosi prescelti. La potenza media per metro di lunghezza di cresta è il rapporto tra la potenza e il numero di dati totali considerati.

Dal punto di vista grafico in Figura 2.3 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale del moto ondoso triorario rilevato dalla boa ondometrica posta al largo di Ancona nei 7 anni di osservazioni, secondo il dato direzionale di provenienza di picco suddiviso per intervalli di  $5^\circ$  e con le distribuzioni di frequenza riportate per diversi intervalli di altezza d'onda.

Nella Figura 2.4 sono riportate le distribuzioni direzionali percentuali del flusso energetico delle onde al largo per metro di lunghezza di cresta, suddivisi negli stessi intervalli di altezze d'onda.

Dall'analisi di tali andamenti ed anche dal grafico di confronto delle suddette distribuzioni direzionali delle serie complessive dei dati, riportato in Figura 2.5, si può evidenziare una serie di caratteristiche legate alla fenomenologia climatologica ondosa del mare Adriatico: risulta infatti che gli eventi ondosi provengono più frequentemente (mari regnanti) dai settori attorno a SudEst (scirocco), a Nord-NordEst (bora-greco) e a NordOvest (maestro), mentre i casi più violenti (mari dominanti, per esempio con altezze significative superiori a 2-3 metri) interessano soprattutto le direzioni da scirocco-levante e da bora-greco, ed in misura minore le rimanenti direzioni da maestro-tramontana, greco-levante e quelle fuori della traversia delle coste occidentali.

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

Tabella 2.1 - Distribuzioni percentuali di  $H_{m0}-T_P$ ,  $H_{m0}-T_M$  e di  $H_{m0}-D_{mt}$  per i dati ondosi triorari dei sette anni di osservazione dal 9/3/1999 al 9/3/2006.

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TP (sec)	Classi di $H_{M0}$ (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	> 5,0	
< 2,0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25
2,0 - 2,5	1,95	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,96
2,5 - 3,0	6,39	0,41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,8
3,0 - 3,5	6,98	2,66	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	9,65
3,5 - 4,0	5,98	5,9	0,09	0	0	0	0	0	0	0	0	11,97
4,0 - 4,5	3,69	7,34	0,8	0,01	0	0	0	0	0	0	0	11,84
4,5 - 5,0	1,99	5,45	2,02	0,1	0	0	0	0	0	0	0	9,56
5,0 - 5,5	1,64	4,09	3,02	0,45	0,03	0	0	0	0	0	0	9,22
5,5 - 6,0	1,79	1,87	2,37	1,01	0,11	0,01	0	0	0	0	0	7,16
6,0 - 6,5	1,73	1,24	1,56	1,43	0,47	0,03	0	0	0	0	0	6,45
6,5 - 7,0	1,35	0,67	0,95	1	0,55	0,18	0,03	0,01	0	0	0	4,74
7,0 - 7,5	1,57	0,49	0,52	0,64	0,54	0,39	0,08	0,01	0	0	0	4,24
7,5 - 8,0	0,7	0,26	0,12	0,22	0,13	0,14	0,07	0,01	0,01	0	0	1,67
8,0 - 8,5	1,3	0,41	0,22	0,2	0,26	0,17	0,1	0,02	0,01	0	0	2,69
8,5 - 9,0	1,61	0,18	0,09	0,06	0,08	0,05	0,05	0,01	0	0	0	2,14
9,0 - 9,5	2,43	0,16	0,09	0,01	0,05	0,03	0,02	0,02	0	0	0,01	2,8
9,5 - 10,0	0,78	0,06	0,07	0,01	0,02	0,01	0,01	0	0,01	0	0	0,97
>10,0	4,22	1,28	0,3	0,05	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0	5,87
<b>TOTALE</b>	<b>46,36</b>	<b>32,48</b>	<b>12,23</b>	<b>5,2</b>	<b>2,24</b>	<b>1,02</b>	<b>0,36</b>	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>100</b>

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TM□ (sec)	Classi di $H_{M0}$ (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	> 5,0	
< 2,0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01
2,0 - 2,5	1,63	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,63
2,5 - 3,0	3,54	1,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,9
3,0 - 3,5	5,18	4,19	0,09	0	0	0	0	0	0	0	0	9,45
3,5 - 4,0	12,76	7,96	1,05	0,01	0	0	0	0	0	0	0	21,78
4,0 - 4,5	9,35	6,87	2,66	0,14	0,01	0	0	0	0	0	0	19,03
4,5 - 5,0	4,53	4,15	2,71	0,79	0,07	0	0	0	0	0	0	12,25
5,0 - 5,5	2,26	3,37	2,81	1,45	0,28	0,09	0	0	0	0	0	10,25
5,5 - 6,0	1,5	2,03	1,67	1,63	0,7	0,09	0,01	0	0	0	0	7,63
6,0 - 6,5	1,1	1,12	0,73	0,74	0,71	0,34	0,03	0,01	0	0	0	4,77
6,5 - 7,0	0,99	0,62	0,18	0,3	0,24	0,23	0,19	0,01	0	0	0	2,76
7,0 - 7,5	0,68	0,31	0,11	0,09	0,18	0,19	0,09	0,04	0,01	0	0,01	1,7
7,5 - 8,0	0,66	0,18	0,06	0,03	0,04	0,05	0,04	0,02	0,01	0	0	1,08
8,0 - 8,5	0,56	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0	0,68
8,5 - 9,0	0,31	0,06	0,02	0	0	0,01	0	0,01	0,01	0	0	0,42
9,0 - 9,5	0,3	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,35
9,5 - 10,0	0,25	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0,28
>10,0	0,75	0,16	0,09	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	1,03
<b>TOTALE</b>	<b>46,36</b>	<b>32,48</b>	<b>12,23</b>	<b>5,2</b>	<b>2,24</b>	<b>1,02</b>	<b>0,36</b>	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>100</b>

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI DIREZIONE E DI ALTEZZA D'ONDA												
DMT (gradi Nord)	Classi di $H_{M0}$ (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	> 5,0	
345,00-15,00	3,65	3,81	2,18	1,13	0,44	0,19	0,07	0,03	0	0	0,01	11,51
15,00- 45,00	2,22	2,49	1,65	1,22	0,72	0,3	0,1	0	0	0	0	8,7
45,00- 75,00	2,34	1,62	0,86	0,54	0,24	0,12	0,08	0,02	0,01	0	0	5,83
75,00-105,00	4,76	4,82	2,24	1	0,49	0,22	0,09	0,03	0,01	0,01	0	13,65
105,00-135,00	8,86	5,57	1,24	0,36	0,1	0,09	0,03	0,01	0	0	0	16,26
135,00-165,00	5,22	2,17	0,24	0,06	0,03	0,01	0	0	0	0	0	7,72
165,00-195,00	1,72	0,71	0,14	0,03	0,01	0,01	0	0	0	0	0	2,61
195,00-225,00	1,44	0,71	0,13	0,02	0,02	0	0	0	0	0	0	2,32
225,00-255,00	2,05	0,99	0,18	0,07	0,01	0,01	0	0	0	0	0	3,31
255,00-285,00	3,55	2,49	1	0,22	0,04	0,03	0	0	0	0	0	7,33
285,00-315,00	5,42	4,28	1,31	0,25	0,07	0,02	0	0	0	0	0	11,35
315,00-345,00	5,15	2,82	1,04	0,3	0,07	0,03	0	0	0	0	0	9,41
<b>TOTALE</b>	<b>46,36</b>	<b>32,48</b>	<b>12,23</b>	<b>5,2</b>	<b>2,24</b>	<b>1,02</b>	<b>0,36</b>	<b>0,09</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>100</b>



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

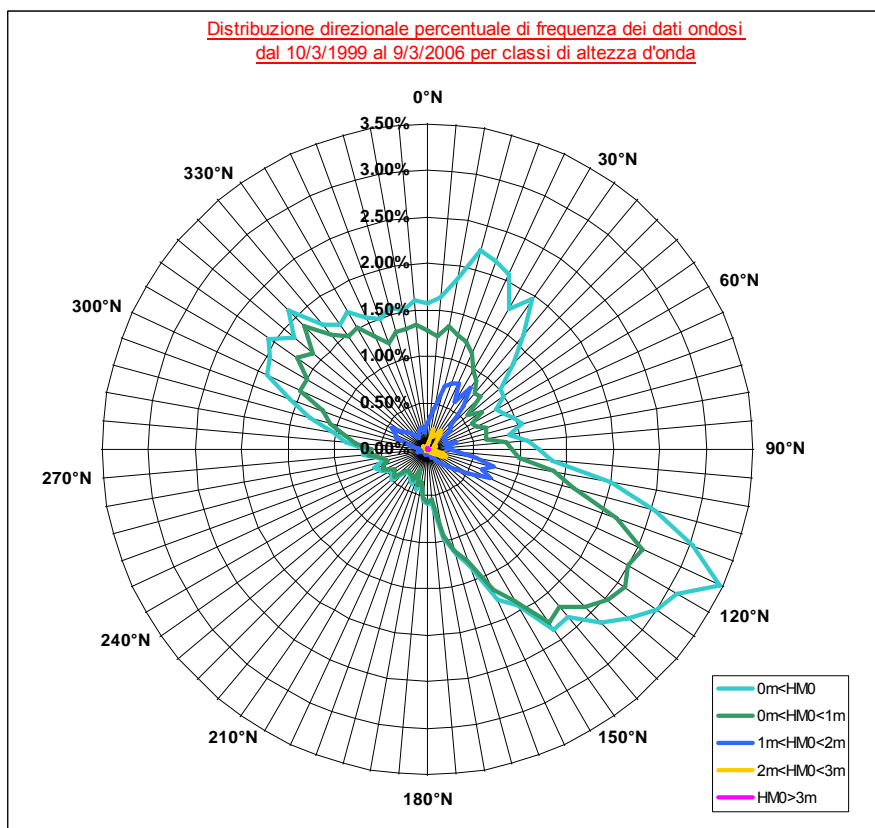


Figura 2.3 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei dati ondosi per classi di altezze d'onda significative, registrate dalla stazione di misura della R.O.N. al largo di Ancona dal 9/3/1999 al 9/3/2006

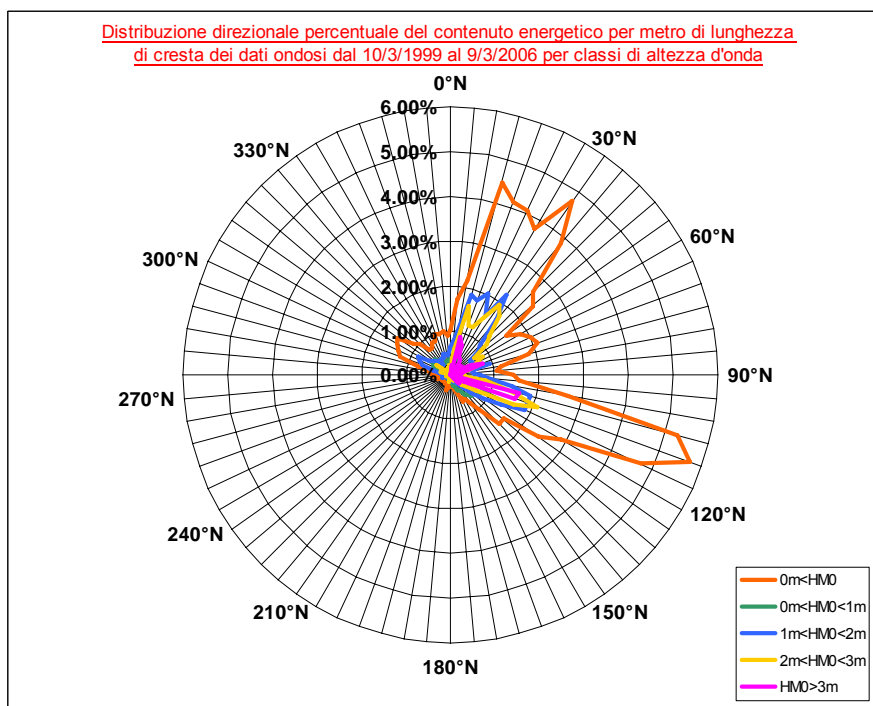


Figura 2.4 - Distribuzione percentuale del flusso energetico delle onde registrate dalla stazione di misura della R.O.N. al largo di Ancona nell'intervallo temporale 9/3/1999 all'9/3/2006 per classi di altezze d'onda.

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

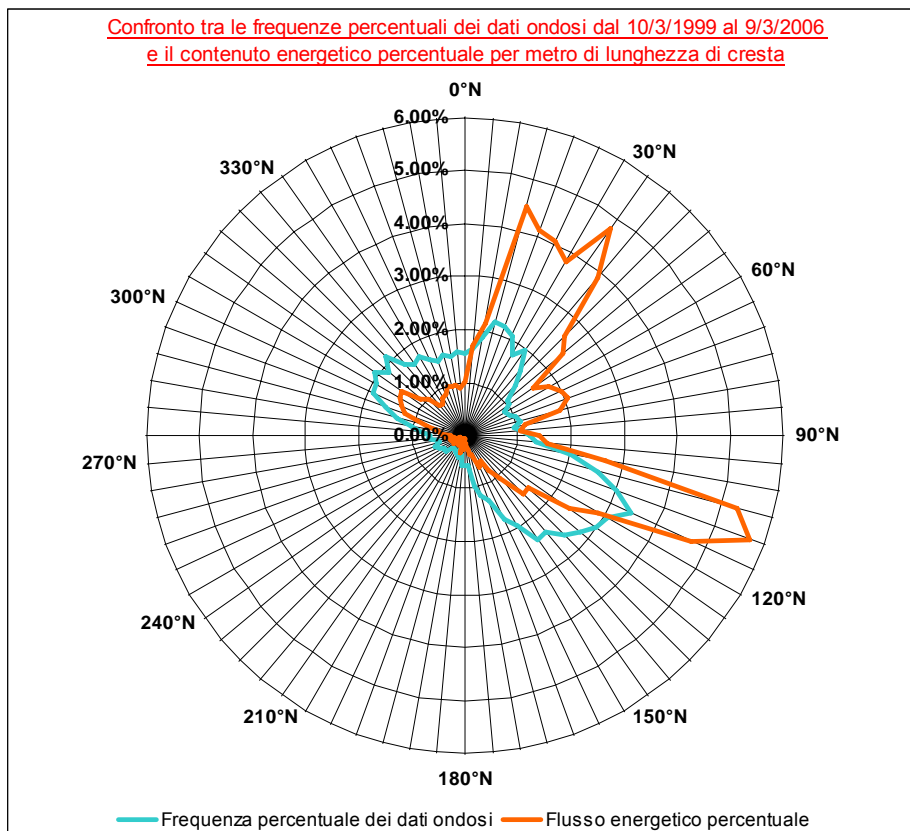


Figura 2.5 - Distribuzione direzionale percentuale di confronto fra la frequenza ed il flusso energetico delle onde registrate dalla stazione di misura della R.O.N. al largo di Ancona dal 9/3/1999 al 9/3/2006.

### 2.3) Analisi delle onde estreme

L'onda di progetto deve essere rappresentativa delle condizioni ambientali che possono considerarsi pericolose ai fini della stabilità delle strutture marittime. In generale, l'onda di progetto può essere sia un'onda significativa sia un'onda caratteristica dello stato di mare ( $H_{1/10}$ ,  $H_{1/100}$ ,  $H_{1/250}$ ).

Il rischio da associare all'onda di progetto si specifica generalmente, attraverso il periodo di ritorno  $T_r$  degli stati di mare che la contengono e dalla loro probabilità di accadimento durante la vita prevista dell'opera.

Le fasi da affrontare in un'analisi volta alla previsione dei massimi valori che l'altezza d'onda può assumere in un determinato arco temporale, si possono così riassumere:

- selezione dei dati omogenei ed indipendenti tra quelli disponibili;
- individuazione del modello probabilistico che meglio rappresenta i dati selezionati;
- determinazione del massimo valore d'altezza d'onda atteso in un fissato arco di tempo;
- calcolo dell'intervallo di confidenza associato al valore atteso.

In questi paragrafi viene illustrata la procedura standardizzata adottata per l'analisi statistica dei valori estremi delle altezze d'onda significative, che viene applicata alla serie di dati ondosi a disposizione, cioè quelli rilevati dalla boa ondometrica della R.O.N. situata al largo di Ancona, per il periodo di sette anni fra il 9 marzo 1999 ed il 9 marzo 2006.

#### 2.3.1) Selezione dei dati da analizzare e metodologia adottata

La selezione dei dati da elaborare è probabilmente l'aspetto più importante dell'analisi statistica dei valori estremi. In generale i modelli di analisi richiedono che il campione da elaborare venga estratto dall'intera serie di dati e che debba essere rappresentativo dell'intera popolazione da cui è estratto.

Nel 1990 la "Section on Maritime Hydraulics of the International Association for Hydraulic Research" ha organizzato un "Working Group on Extreme Wave Statistics" le cui conclusioni sono state pubblicate da Mathiesen et al. nel 1994. Tale gruppo di lavoro raccomanda di utilizzare, per le elaborazioni delle altezze d'onda estreme, il metodo "delle serie tronche" o "di durata parziale sopra una soglia" (P.O.T.) proposto da Goda, come illustrato nella relativa pubblicazione del 1988.

L'elaborazione delle altezze d'onda estreme descritta nella presente relazione viene effettuata seguendo il procedimento suddetto.

L'uso di questo metodo richiede che i massimi scelti siano tra loro indipendenti. La scelta della soglia dovrebbe essere basata su informazioni fisiche e meteorologiche: ad esempio l'analisi meteorologica delle carte del tempo potrebbe condurre a determinare il numero medio annuale degli eventi significativi di tempesta  $N_\alpha$  che interessano la zona in esame. Il gruppo di lavoro raccomanda che, per ottenere una buona significatività, la soglia di troncamento per l'elaborazione dei dati estremi con il metodo P.O.T. sia scelta in modo tale che il numero medio dei dati all'anno superiori alla soglia sia uguale o poco meno ad  $N_\alpha$ . Dalle analisi meteorologiche effettuate per le fasce costiere italiane risulta che  $N_\alpha$  sia pari circa a 25-30, con i valori più alti relativamente alle fasce costiere estreme (nord)occidentali.

#### 2.3.2) Scelta della legge probabilistica

Non esistono giustificazioni teoriche per scegliere una legge di distribuzione di probabilità rispetto ad un'altra, di solito si utilizzano quelle che meglio interpretano i dati sperimentali. Spesso per interpolare le altezze d'onda significative viene utilizzata la distribuzione di Weibull a tre parametri. Tale legge è data dall'espressione:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\frac{(x-a)^c}{b}\right] \quad (2.2)$$

dove  $x(>a)$  è la variabile statistica ed i parametri sono detti:

$a$  = parametro locale

$b$  = parametro di scala

$c$  = parametro di forma (di valore compreso tra 0,75 e 2).

La corrispondente funzione di distribuzione tronca per il metodo P.O.T. è data dalla:

$$F_T(x) = \frac{[F(x) - F(x_0)]}{[1 - F(x_0)]} = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(x-a)}{b}\right]^c + \left[\frac{(x_0-a)}{b}\right]^c\right\} \quad (2.3)$$

dove  $F_T(x)$  è la probabilità di non superamento per le serie tronche, o distribuzione tronca per i picchi di tempesta sopra la soglia, o punto di troncamento,  $x_0$ .

Se il fattore di forma della distribuzione tronca di Weibull a tre parametri è valutato essere prossimo ad 1, un adattamento accettabile può essere fornito dalla distribuzione di Gumbel per le serie tronche. La distribuzione di Gumbel è data da:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left[\frac{-(x-a)}{b}\right]\right] \quad (2.4)$$

dove  $x$  è la variabile statistica, ed i parametri sono detti:  $a$  parametro locale e  $b$  parametro di scala. La corrispondente distribuzione tronca per il metodo P.O.T. è data dall'espressione:

$$F_T(x) = \frac{\exp\{-\exp[-(x-a)/b]\} - \exp\{-\exp[-(x_0-a)/b]\}}{1 - \exp\{-\exp[-(x_0-a)/b]\}} \quad (2.5)$$

Riguardo alla scelta di una legge di distribuzione di probabilità rispetto ad un'altra, in assenza di altre giustificazioni teoriche, Goda [1988] suggerisce di tentare l'adattamento dei dati ondati estremi con le leggi di distribuzione tronca di Gumbel e di Weibull a tre parametri (per diversi valori del parametro  $c$ ), scegliendo poi quella che fornisce il miglior adattamento ai dati, che può essere indicato dal valore dell'indice di regressione della legge di distribuzione rispetto ai dati sperimentali, che deve risultare quanto più possibile prossimo all'unità.

### 2.3.3) Analisi statistica delle onde estreme con i dati della boa R.O.N. di Ancona

L'intero procedimento descritto nei paragrafi precedenti è stato utilizzato per l'elaborazione degli eventi ondati estremi dei dati rilevati dalla boa della R.O.N. posta al largo di Ancona fra il 9 marzo 1999 ed il 9 marzo 2006. Di volta in volta, per le elaborazioni, è stata considerata la serie dei dati aventi direzione di provenienza compresa rispettivamente nei seguenti settori:

- 285°N – 315°N;
- 315°N – 345°N;
- 345°N – 15°N;
- 15°N – 45°N;
- 45°N – 75°N;
- 75°N – 105°N;
- 105°N – 135°N;
- 0°N – 360°N (intero settore omnidirezionale).

avendo posto, nella loro individuazione, la maggior attenzione su quelli compresi nella traversia del paraggio marino di Numana.

Dall'andamento cronologico delle altezze d'onda sono state individuate le mareggiate più intense rilevate dalla boa ondometrica direzionale al largo di Ancona durante il periodo di tempo preso in considerazione (in cui si aveva la disponibilità di registrazioni). Fra queste sono stati selezionati tutti gli eventi ondati indipendenti in cui era stata raggiunta o superata l'altezza d'onda di un metro (soglia scelta per indicare un evento di mareggiata) e compresi volta per volta in ognuno dei suddetti settori direzionali. Come valore rappresentativo di ogni evento indipendente è stata considerata la massima altezza d'onda significativa raggiunta dal picco della mareggiata. Il numero dei dati da elaborare con il metodo P.O.T. va poi ulteriormente ridotto considerando solo quelli con valore di altezza d'onda superiore ad un prefissato valore della soglia di troncamento.

Per ogni settore direzionale considerato la serie dei dati ondati estremi così determinati è stata elaborata statisticamente secondo la procedura sopra indicata ed utilizzando le leggi analitiche di

Gumbel e di Weibull a tre parametri per tentare l'adattamento della distribuzione probabilistica al campione statistico. Poi per ogni caso (di elaborazione) diverso viene scelta quella fra esse che assicuri la migliore interpolazione della serie dei dati estremi sperimentali analizzati per le eventuali valutazioni probabilistiche dei prevedibili eventi ondosi futuri e dei relativi tempi di ritorno associati.

A tal riguardo è stato scelto per la soglia di troncamento un unico valore indipendentemente dal settore direzionale considerato e dal numero di mareggiate estreme individuabili in ognuno di essi. La procedura è stata applicata con un valore della soglia di troncamento pari a 1,5 metri.

Di seguito sono riportate le tabelle riassuntive da Tabella 2.2 a Tabella 2.5 dei dati ai picchi delle mareggiate individuate durante i 7 anni di osservazione ed i grafici delle Figure dalla 2.6 alla 2.13 in cui sono riportati gli andamenti della legge probabilistica di miglior adattamento con la nuvola dei dati sperimentali per ciascun settore direzionale analizzato.

Nella Figura 2.14 e nella Tabella 2.6 sono invece riportati, in forma grafica ed in forma numerica, in maniera sintetica per tutti i settori direzionali di provenienza presi in esame, i principali risultati dell'elaborazione statistica in termini di legami analitici risultati fra altezza d'onda e tempo di ritorno dell'evento ondoso.

Tabella 2.2 - Valori al picco delle mareggiate dei settori direzionali 315°N-345°N e 345°N-15°N

n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	07/07/1999 21:30	1.09	4.70	5.71	355.71
2	10/09/1999 12:30	1.08	4.60	5.13	10.00
3	17/12/1999 00:30	1.76	5.59	6.90	8.40
4	31/12/1999 15:30	1.74	4.91	5.56	351.29
5	02/01/2000 21:30	1.17	4.10	4.00	356.20
6	02/03/2000 09:30	3.02	6.51	7.14	5.96
7	13/07/2000 06:30	1.74	4.86	5.71	345.88
8	16/07/2000 00:30	1.09	4.23	4.88	354.94
9	30/07/2000 15:30	1.13	4.73	5.88	13.17
10	22/12/2000 18:30	1.28	4.54	5.26	12.02
11	18/02/2001 09:30	1.18	4.26	4.44	2.43
12	17/09/2001 06:30	1.84	5.62	6.45	5.87
13	03/11/2001 18:30	1.04	4.57	5.56	12.89
14	29/11/2001 15:30	1.45	4.77	5.56	11.84
15	05/01/2002 06:30	1.43	4.57	5.56	11.62
16	11/03/2002 06:30	1.65	5.21	6.06	12.40
17	25/04/2002 06:30	1.06	4.35	5.26	7.44
18	03/06/2002 03:30	1.09	3.99	4.44	8.87
19	29/06/2002 06:30	1.68	5.46	5.41	348.58
20	24/10/2002 13:00	1.11	5.24	5.88	13.35
21	04/11/2002 10:30	2.02	5.68	7.14	14.81
22	08/11/2002 18:30	1.54	5.11	5.88	8.97
23	01/12/2002 23:30	1.36	4.85	4.65	13.72
24	15/05/2003 05:00	1.77	5.75	4.88	7.99
25	21/05/2003 12:00	1.96	5.57	5.71	5.15
26	15/08/2003 01:00	1.35	5.61	6.25	352.14
27	31/08/2003 21:30	2.45	6.18	6.90	12.15
28	10/09/2003 19:00	1.76	5.31	5.88	8.86
29	11/09/2003 20:00	2.08	6.37	6.67	14.48
30	25/10/2003 00:30	1.46	5.36	6.25	10.30
31	25/04/2004 00:30	2.81	6.84	8.00	10.49
32	13/05/2004 06:00	1.77	5.71	6.25	4.12
33	29/05/2004 17:00	1.83	5.55	6.25	4.50
34	03/07/2004 04:00	1.53	5.95	6.45	14.51
35	27/07/2004 11:30	2.15	6.30	6.67	356.41
36	18/09/2004 13:30	1.12	5.49	4.35	350.39
37	24/09/2004 22:00	3.97	7.60	8.70	13.17
38	19/11/2004 21:00	2.82	5.40	7.10	352.60
39	03/01/2005 06:30	1.60	4.10	5.40	14.30
40	05/02/2005 21:00	1.28	4.00	5.40	8.60
41	01/10/2005 08:30	2.11	5.78	6.67	13.58
42	08/01/2006 20:30	1.04	3.70	5.10	6.10
43	13/01/2006 16:00	1.08	3.60	4.20	2.00



Tabella 2.3 - Valori al picco delle mareggiate del settore direzionale 15°-45°N

n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	3/18/1999 6:30	3.08	6.58	6.90	37.93
2	4/3/1999 15:30	1.00	4.14	4.55	25.18
3	7/9/1999 3:30	1.36	4.84	6.06	37.79
4	7/24/1999 12:30	1.67	5.26	6.06	28.99
5	10/6/1999 6:30	1.94	5.15	5.71	24.54
6	11/19/1999 19:00	3.59	7.10	8.33	28.68
7	11/25/1999 15:30	1.07	4.54	6.06	25.24
8	1/17/2000 0:30	1.45	5.44	6.45	27.48
9	1/19/2000 9:30	2.71	6.35	6.67	16.19
10	1/23/2000 18:30	2.85	6.45	8.00	15.31
11	2/21/2000 12:30	1.24	4.96	5.26	26.12
12	5/30/2000 9:30	1.93	5.84	7.41	40.97
13	7/31/2000 0:30	1.08	5.62	4.88	37.43
14	1/14/2001 9:30	2.77	6.51	7.69	40.70
15	2/11/2001 15:30	1.92	5.28	6.25	23.69
16	2/14/2001 15:30	1.25	5.08	6.06	40.57
17	2/19/2001 9:30	1.51	5.16	6.06	23.69
18	2/24/2001 18:30	1.74	5.57	5.88	35.41
19	2/26/2001 15:30	2.80	6.63	8.00	33.25
20	3/6/2001 12:30	1.23	5.18	5.00	41.89
21	3/31/2001 9:30	2.19	5.89	7.14	33.67
22	4/17/2001 15:30	1.61	5.31	6.06	26.60
23	5/7/2001 15:30	1.03	4.67	5.41	20.57
24	8/11/2001 12:30	2.79	6.62	7.14	19.50
25	9/9/2001 18:30	1.26	4.74	5.56	43.40
26	9/10/2001 6:30	1.10	4.11	4.65	32.90
27	11/10/2001 6:30	2.31	6.07	7.41	31.02
28	11/20/2001 18:30	1.66	5.15	6.25	23.02
29	11/23/2001 18:30	2.73	6.05	6.67	27.51
30	12/1/2001 3:30	1.46	5.39	6.06	21.97
31	12/16/2001 23:00	3.77	7.31	8.70	23.48
32	12/18/2001 9:30	2.39	5.94	6.45	44.81
33	12/24/2001 6:30	1.93	6.03	6.67	31.63
34	12/27/2001 12:00	3.46	6.86	7.41	24.26
35	12/31/2001 15:30	2.51	5.93	6.67	19.77
36	1/3/2002 18:30	2.51	6.06	7.41	32.75
37	1/15/2002 15:30	1.38	4.80	5.13	17.39
38	3/4/2002 6:30	1.01	4.80	4.88	43.27
39	3/27/2002 3:30	1.49	5.22	5.88	39.47
40	4/5/2002 6:30	1.63	5.39	6.06	21.80
41	4/9/2002 18:30	2.29	5.95	6.90	31.23
42	4/21/2002 12:30	1.16	5.06	5.71	18.60
43	6/6/2002 9:30	2.85	7.46	8.33	26.06
44	11/6/2002 2:30	2.11	6.10	6.45	36.41
45	12/19/2002 4:00	2.35	6.13	7.41	19.67
46	1/1/2003 6:30	2.17	5.81	6.67	23.25
47	3/16/2003 7:00	3.42	6.78	7.41	32.36
48	3/18/2003 13:00	1.29	5.35	5.13	27.89
49	3/19/2003 4:00	1.34	5.18	5.26	39.50
50	4/8/2003 1:30	1.49	5.18	5.56	30.00
51	4/18/2003 6:00	1.04	5.11	4.44	22.92
52	5/23/2003 12:00	1.11	5.11	4.76	30.09
53	8/1/2003 22:00	1.37	5.33	5.41	21.74
54	9/13/2003 0:00	1.06	5.40	4.00	28.45
55	9/13/2003 15:00	1.00	5.34	4.88	44.67
56	9/14/2003 0:00	2.30	5.92	6.90	42.36
57	9/24/2003 16:30	2.31	6.11	5.71	39.59
58	10/15/2003 9:00	2.03	5.94	6.67	20.14
59	12/8/2003 12:00	3.61	7.08	8.00	36.35
60	12/15/2003 22:30	1.78	5.58	6.06	23.77
61	1/19/2004 2:30	2.55	6.41	6.67	30.83
62	1/22/2004 0:30	2.73	6.07	6.67	31.92
63	1/24/2004 4:30	1.48	5.30	4.88	20.52
64	1/30/2004 4:30	2.27	5.80	5.71	15.94
65	3/9/2004 4:00	2.13	6.06	6.67	30.08
66	3/27/2004 8:30	1.16	5.46	5.88	18.56
67	4/12/2004 10:30	1.44	6.08	6.67	31.57
68	4/14/2004 14:00	1.07	4.60	4.55	17.03
69	5/17/2004 12:00	1.85	5.69	5.88	21.26
70	5/24/2004 7:00	1.66	5.39	6.06	26.75
71	6/4/2004 9:00	1.38	5.69	5.71	18.97
72	7/28/2004 7:00	1.42	5.44	5.88	23.14
73	9/5/2004 0:00	1.14	6.26	5.13	25.21
74	9/6/2004 6:00	1.40	5.85	5.26	42.27
75	9/9/2004 9:30	1.44	5.68	5.71	19.96
76	9/17/2004 13:30	1.69	5.74	6.25	35.38
77	9/24/2004 18:30	5.45	7.00	9.10	17.00
78	11/8/2004 19:00	3.18	5.80	6.90	16.30
79	11/16/2004 18:00	1.74	4.30	5.90	27.40
80	1/26/2005 7:00	3.70	7.43	8.70	23.73
81	2/2/2005 0:30	1.96	4.70	6.50	43.40
82	2/4/2005 18:00	1.87	4.60	6.50	27.30
83	2/15/2005 3:30	3.71	6.45	6.67	22.49
84	4/21/2005 12:30	1.65	4.40	6.10	27.30
85	5/8/2005 19:00	1.27	4.20	5.40	44.60
86	5/20/2005 1:00	1.44	4.00	5.40	30.30
87	6/7/2005 23:00	2.80	6.28	6.90	27.53
88	8/4/2005 10:30	2.16	5.84	5.71	15.26
89	12/18/2005 0:00	2.13	4.80	6.30	15.00
90	1/5/2006 11:00	1.24	4.90	5.88	31.00
91	2/6/2006 14:00	3.13	5.90	7.70	38.10
92	2/12/2006 1:00	1.07	14.47	33.33	16.50
93	2/21/2006 21:30	1.11	5.00	28.60	40.00
94	2/24/2006 5:30	2.22	5.30	6.50	40.30
95	2/27/2006 17:30	2.35	5.20	6.50	15.40
96	3/6/2006 15:30	3.29	6.10	8.00	39.80

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

Tabella 2.4 - Valori al picco delle mareggiate dei settori direzionali 45°-75°N e 75°N-105°N

n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	02/09/1999 03:30	2.12	5.79	6.45	45.44
2	04/10/1999 12:30	1.40	5.32	6.06	69.00
3	19/10/1999 00:30	1.85	5.28	6.06	65.93
4	07/11/1999 13:30	4.47	7.46	8.00	73.78
5	16/11/1999 00:30	2.34	5.89	6.45	66.27
6	05/12/1999 18:30	3.02	6.71	7.14	70.16
7	05/03/2000 06:30	2.34	6.15	7.14	63.32
8	18/03/2000 00:30	1.20	4.91	5.56	57.26
9	20/03/2000 03:30	1.09	4.27	4.55	68.15
10	08/09/2000 06:30	1.72	5.34	6.06	72.07
11	17/11/2000 18:30	2.06	6.78	7.41	68.55
12	20/12/2000 12:30	1.55	5.30	5.71	63.93
13	01/04/2001 09:30	1.67	5.48	6.45	60.81
14	12/04/2001 06:30	1.62	4.89	5.00	73.66
15	14/04/2001 06:30	1.89	5.36	5.88	46.29
16	12/05/2001 15:30	1.22	4.78	5.71	52.55
17	01/06/2001 09:30	1.34	4.68	4.76	46.06
18	02/11/2001 18:30	1.89	5.60	6.90	54.35
19	13/11/2001 14:00	3.86	7.23	8.00	48.09
20	07/12/2001 19:00	3.82	7.20	8.33	45.20
21	14/12/2001 01:00	3.65	7.07	7.69	68.08
22	22/02/2002 06:30	2.39	6.23	6.67	50.86
23	25/03/2002 03:30	3.14	6.79	7.69	61.61
24	07/12/2002 01:30	2.64	6.00	6.06	56.36
25	25/12/2002 08:00	1.27	4.46	4.76	64.70
26	03/03/2003 15:30	2.08	5.84	6.67	74.85
27	22/03/2003 06:30	1.23	5.21	5.71	63.79
28	23/03/2003 05:30	1.89	5.82	6.06	54.00
29	04/04/2003 12:30	2.55	6.36	7.14	47.33
30	03/09/2003 08:30	1.39	5.65	6.06	51.07
31	04/09/2003 04:00	1.40	5.37	5.88	48.40
32	18/10/2003 01:30	1.17	4.60	5.56	73.67
33	27/10/2003 04:30	2.23	6.07	6.06	70.53
34	11/11/2003 04:00	1.28	5.18	5.71	67.85
35	12/02/2004 07:00	2.23	6.25	6.45	73.13
36	14/05/2004 11:30	1.04	5.05	5.00	48.51
37	17/05/2004 23:00	1.01	5.33	4.35	47.89
38	14/06/2004 12:30	1.39	5.54	4.88	52.29
39	10/09/2004 05:00	1.08	5.37	6.06	60.85
40	16/09/2004 17:00	1.19	4.88	4.44	56.26
41	30/12/2004 00:00	3.13	6.69	7.41	47.42
42	14/02/2005 03:00	1.45	4.20	5.40	52.70
43	18/02/2005 13:00	1.09	4.00	5.30	48.50
44	18/09/2005 04:30	2.74	6.02	6.90	67.03
45	24/11/2005 05:00	1.96	6.39	6.06	60.64
46	09/12/2005 23:00	3.40	6.60	6.90	59.36
47	12/01/2006 10:00	1.34	4.40	5.40	56.40
48	12/03/2006 19:30	3.76	6.60	8.30	66.30
1	10/04/1999 06:30	1.93	5.65	7.14	86.66
2	22/04/1999 09:30	1.67	5.94	6.90	101.55
3	17/05/1999 03:30	1.09	4.48	5.56	79.91
4	16/07/1999 09:30	1.05	4.34	5.41	88.39
5	16/10/1999 03:30	1.42	4.89	5.88	97.54
6	04/11/1999 09:30	1.43	4.82	5.00	77.68
7	21/11/1999 06:30	2.54	6.25	6.90	80.31
8	15/03/2000 21:30	2.01	5.50	6.45	87.02
9	17/03/2000 03:30	1.06	4.51	5.00	79.72
10	26/08/2000 12:30	1.14	4.53	4.76	82.46
11	21/09/2000 00:30	2.69	6.97	8.00	104.01
12	03/10/2000 03:30	1.22	4.91	4.44	81.51
13	04/10/2000 06:30	1.40	6.29	8.33	87.83
14	13/11/2000 21:30	2.09	6.38	7.41	102.95
15	16/11/2000 03:30	1.22	5.47	6.90	78.27
16	31/12/2000 09:30	2.45	6.06	6.45	76.45
17	30/01/2001 08:00	4.69	7.68	8.00	75.12
18	04/02/2001 09:30	1.11	5.39	5.88	89.12
19	13/03/2001 15:30	1.95	7.04	8.00	76.33
20	15/02/2002 21:30	2.03	5.39	5.88	81.01
21	28/02/2002 06:30	1.04	5.39	6.25	104.48
22	02/03/2002 09:30	1.50	6.63	7.14	99.04
23	03/03/2002 03:30	1.17	6.35	6.67	101.91
24	29/03/2002 03:30	1.03	4.66	5.41	89.23
25	27/04/2002 21:30	1.23	5.19	6.06	78.72
26	17/10/2002 21:30	1.72	6.38	7.14	96.76
27	22/10/2002 06:00	2.08	6.19	7.41	103.21
28	29/10/2002 09:00	1.25	4.82	5.41	93.81
29	04/12/2002 13:30	3.64	6.72	7.69	86.20
30	06/04/2003 18:00	1.97	5.74	6.45	78.40
31	21/04/2003 15:30	1.15	5.30	4.26	96.17
32	14/07/2003 05:00	1.76	5.23	5.71	101.51
33	08/09/2003 21:30	1.66	5.94	6.45	97.33
34	29/10/2003 22:30	1.48	6.44	6.67	103.07
35	08/11/2003 15:00	2.19	6.64	7.41	104.92
36	24/11/2003 19:00	1.14	5.29	5.71	97.61
37	10/12/2003 00:00	2.72	6.80	9.09	102.98
38	17/12/2003 12:00	1.08	5.13	5.71	81.39
39	12/03/2004 01:00	2.62	6.98	8.33	95.92
40	31/10/2004 17:30	2.54	6.10	8.30	103.60
41	12/11/2004 05:00	1.65	4.10	4.90	81.70
42	24/11/2004 14:30	1.10	4.10	5.70	88.30
43	15/01/2005 01:00	1.26	4.00	5.10	80.10
44	19/01/2005 14:00	3.35	7.12	7.69	93.25
45	22/01/2005 06:00	1.08	4.00	5.00	80.50
46	03/10/2005 15:30	2.03	5.90	6.90	104.92
47	08/10/2005 09:30	2.26	6.15	6.90	98.56
48	03/12/2005 14:30	1.92	7.06	6.90	99.96
49	01/01/2006 01:30	1.76	5.10	6.90	92.70
50	03/01/2006 13:00	2.20	4.80	5.60	75.90
51	12/02/2006 06:30	1.04	10.64	28.57	95.59
52	15/02/2006 18:30	1.19	19.47	33.33	101.02

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

Tabella 2.5 - Valori al picco delle mareggiate dei settori direzionali 105°N-135°N e 285°N-315°N

n° mareggiata	data&ora del dato max	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	27/03/1999 12:30	2.21	6.87	7.69	106.66
2	16/04/1999 03:30	3.03	7.72	9.09	108.32
3	14/05/1999 15:30	1.21	4.43	5.13	115.51
4	16/09/1999 06:30	1.26	4.51	5.13	126.40
5	20/09/1999 19:00	3.07	6.92	8.00	132.61
6	21/10/1999 14:00	3.55	7.38	8.00	126.00
7	25/10/1999 18:30	1.73	6.09	6.25	118.47
8	15/12/1999 03:30	1.08	5.53	6.45	115.29
9	27/03/2000 09:30	1.03	5.24	6.67	126.21
10	29/03/2000 12:30	2.68	7.02	8.33	106.74
11	07/05/2000 18:30	1.03	4.90	6.06	122.32
12	04/07/2000 15:30	1.06	4.86	5.71	131.54
13	27/08/2000 18:30	1.37	4.88	5.71	134.56
14	31/08/2000 21:30	1.28	5.40	6.90	118.30
15	30/09/2000 18:00	3.24	7.36	8.33	119.27
16	13/10/2000 18:30	2.66	7.63	8.00	126.43
17	06/11/2000 20:30	3.82	12.04	8.70	117.85
18	21/11/2000 15:30	1.53	6.19	6.67	123.20
19	24/11/2000 18:30	1.87	6.12	6.90	117.75
20	09/12/2000 18:30	1.17	5.57	6.25	115.53
21	25/12/2000 09:30	2.22	7.22	8.00	117.08
22	29/12/2000 12:30	1.11	6.15	10.00	118.11
23	03/01/2001 06:30	1.56	6.64	7.69	116.27
24	07/01/2001 18:30	2.81	7.42	8.33	114.60
25	25/01/2001 21:30	1.76	6.09	7.14	106.45
26	08/02/2001 15:30	1.42	6.45	7.41	110.15
27	28/02/2001 09:30	2.99	6.69	7.14	133.45
28	04/03/2001 03:30	1.29	7.34	8.70	113.88
29	04/03/2001 12:30	1.11	5.93	9.09	130.27
30	09/03/2001 09:30	1.94	6.98	7.69	108.10
31	17/03/2001 15:30	2.25	7.11	8.00	109.14
32	25/03/2001 15:30	1.58	6.16	7.41	132.38
33	30/03/2001 06:30	2.10	5.96	7.41	114.57
34	08/04/2001 00:30	1.68	6.93	8.00	118.46
35	16/04/2001 18:30	1.10	4.51	5.00	133.26
36	15/05/2001 15:30	1.38	5.17	5.88	126.76
37	23/06/2001 06:30	1.06	5.00	5.71	133.09
38	23/09/2001 18:30	1.51	5.85	6.90	116.38
39	21/10/2001 03:30	1.65	5.65	6.06	119.80
40	29/12/2001 18:30	1.23	5.26	6.67	116.48
41	06/02/2002 21:30	1.86	6.22	7.41	122.96
42	06/03/2002 09:30	2.44	7.03	7.69	111.68
43	15/03/2002 06:30	1.24	5.86	6.90	111.59
44	12/04/2002 12:30	2.33	7.60	8.33	133.67
45	03/05/2002 21:30	1.59	6.20	6.45	120.69
46	08/05/2002 18:30	2.01	5.92	7.14	113.53
47	12/11/2002 02:00	1.29	5.52	6.06	124.32
48	16/11/2002 13:00	5.23	8.61	9.52	115.85
49	18/11/2002 12:30	2.95	7.48	8.70	109.22
50	25/11/2002 20:00	3.77	7.58	8.70	106.07
51	28/12/2002 16:00	1.58	6.76	7.14	119.27
52	03/01/2003 04:00	1.39	5.88	6.90	110.92
53	02/04/2003 22:30	2.03	6.59	7.14	111.71
54	10/04/2003 21:30	1.76	6.77	7.14	111.83
55	28/04/2003 14:30	1.05	5.68	7.69	121.75
56	29/04/2003 22:00	1.13	4.74	5.00	126.24
57	30/04/2003 19:30	1.35	5.24	5.56	122.41
58	29/08/2003 21:30	2.01	6.64	7.41	111.90
59	28/09/2003 22:00	1.19	5.38	5.71	121.33
60	01/11/2003 15:30	2.72	7.17	8.00	122.70
61	28/11/2003 03:30	2.33	7.31	8.00	127.00
62	04/12/2003 11:30	1.23	5.29	5.56	120.00
63	12/01/2004 23:30	1.40	6.13	6.45	113.43
64	07/03/2004 15:00	3.18	7.83	8.70	109.90
65	24/03/2004 08:30	1.86	7.78	9.09	124.98
66	17/04/2004 03:30	1.76	6.75	7.41	120.26
67	30/04/2004 09:00	1.84	6.59	7.14	109.58
68	04/05/2004 07:00	2.85	7.01	7.69	110.22
69	25/08/2004 20:00	1.02	5.84	4.88	106.44
70	14/09/2004 20:00	1.31	5.45	4.88	119.81
71	10/11/2004 00:00	2.81	5.50	7.10	133.20
72	25/11/2004 06:30	1.06	4.71	5.56	108.68
73	25/11/2004 13:30	1.02	3.80	6.30	130.30
74	26/12/2004 10:30	3.81	7.40	9.10	114.20
75	16/04/2005 15:30	2.09	6.20	7.70	110.40
76	25/04/2005 03:00	2.01	5.70	8.00	106.50
77	26/11/2005 14:30	2.42	7.59	9.52	113.81
78	30/11/2005 12:00	1.06	6.00	6.67	119.35
79	05/12/2005 13:00	1.22	5.83	6.45	110.49
80	05/12/2005 22:00	1.07	5.66	5.71	108.94
81	27/12/2005 18:00	1.21	3.80	4.70	124.20
82	09/02/2006 11:00	1.49	4.40	28.60	124.30
83	16/02/2006 04:30	1.00	4.30	28.60	118.40
84	16/02/2006 11:00	1.07	4.40	28.60	121.20
85	03/03/2006 09:30	1.30	13.32	28.57	118.96
86	04/03/2006 11:30	1.33	4.40	28.60	131.30
87	09/03/2006 00:00	1.05	4.20	28.60	120.00

n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	23/03/1999 06:30	1.81	5.07	5.56	307.49
2	18/04/1999 09:30	1.75	5.15	6.45	306.39
3	22/06/1999 03:30	2.87	6.10	7.14	292.75
4	10/07/1999 09:30	1.12	4.15	4.76	286.28
5	26/07/1999 06:30	1.00	3.77	3.92	307.03
6	29/07/1999 06:30	1.43	4.73	5.56	301.78
7	21/08/1999 06:30	1.35	4.42	5.00	296.64
8	12/11/1999 12:30	1.13	4.39	4.65	295.34
9	23/11/1999 03:30	1.97	5.28	5.71	296.01
10	11/12/1999 06:30	1.61	5.05	5.71	314.25
11	01/01/2000 09:30	1.15	3.91	3.92	298.08
12	11/01/2000 12:30	1.32	4.34	4.88	300.88
13	14/01/2000 15:30	1.59	4.71	5.41	297.45
14	26/01/2000 12:30	1.28	4.32	4.88	305.35
15	03/02/2000 09:30	1.02	3.84	4.65	301.09
16	20/02/2000 09:30	1.33	4.18	4.65	313.44
17	19/11/2000 15:30	2.11	5.47	5.88	305.85
18	27/11/2000 03:30	2.33	5.87	6.06	297.13
19	30/12/2000 03:30	2.68	6.26	7.14	289.36
20	05/01/2001 03:30	1.74	5.26	5.88	291.64
21	22/04/2001 21:30	1.22	4.28	4.88	309.86
22	20/07/2001 21:30	2.16	5.65	6.90	300.98
23	02/09/2001 12:30	1.13	4.05	4.88	311.53
24	05/09/2001 09:30	2.04	5.50	6.45	294.23
25	15/09/2001 12:30	1.69	4.96	5.88	298.21
26	26/09/2001 18:30	1.32	4.44	5.00	304.05
27	04/11/2001 12:30	1.01	4.14	4.88	307.38
28	19/11/2001 09:30	1.57	4.98	5.41	306.33
29	28/11/2001 12:30	1.44	4.64	5.13	303.13
30	03/12/2001 06:30	1.12	4.13	4.76	310.64
31	21/12/2001 09:30	1.15	4.38	5.00	303.84
32	08/01/2002 06:30	1.18	4.29	5.13	297.68
33	16/01/2002 06:30	1.06	4.20	4.76	299.16
34	25/01/2002 00:30	1.84	5.50	6.90	290.63
35	21/04/2002 00:30	1.19	4.37	4.76	289.82
36	03/12/2002 03:00	1.48	4.94	6.06	307.44
37	13/12/2002 15:30	1.76	5.24	6.06	293.44
38	16/12/2002 04:30	1.41	4.88	5.41	295.90
39	22/04/2003 10:00	1.43	5.10	5.13	313.08
40	10/09/2003 08:30	1.39	5.51	5.00	288.02
41	29/09/2003 14:30	1.29	5.24	5.56	297.93
42	06/10/2003 06:00	2.84	6.84	7.14	304.13
43	08/10/2003 07:30	2.44	6.01	6.67	309.93
44	09/11/2003 12:30	1.60	5.78	5.88	305.74
45	29/11/2003 17:00	1.45	5.05	4.88	305.68
46	13/12/2003 15:00	1.36	5.01	5.13	312.47
47	15/12/2003 04:30	1.49	4.79	5.00	306.29
48	10/01/2004 03:30	1.19	4.81	4.35	313.20
49	10/01/2004 15:30	1.33	5.23	5.26	301.60
50	15/01/2004 10:30	3.18	6.97	7.41	307.81
51	28/01/2004 11:30	1.79	5.59	5.71	308.41
52	13/04/2004 17:00	1.02	4.95	4.17	298.92
53	24/07/2004 23:30	1.27	5.55	4.26	297.70
54	14/08/2004 10:30	1.03	5.20	4.65	314.86
55	21/08/2004 19:00	1.62	5.01	5.56	313.37
56	12/11/2004 00:00	1.56	4.10	5.10	293.80
57	17/11/2004 09:00	1.01	3.10	4.20	295.60
58	20/11/2004 17:00	1.01	3.40	4.40	287.80
59	23/12/2004 13:00	3.06	31.00	33.30	291.80
60	01/01/2005 11:30	1.47	4.10	5.30	294.50
61	17/01/2005 07:30	1.64	4.30	5.90	295.90
62	06/02/2005 10:30	1.00	3.40	4.30	312.70
63	10/02/2005 09:30	1.16	3.80	5.00	286.10
64	01/12/2005 05:00	1.47	4.88	4.55	309.53
65	06/12/2005 10:30	2.09	5.46	5.71	296.17
66	07/12/2005 11:00	1.52	4.57	4.55	288.90
67	28/12/2005 03:30	1.82	4.50	5.40	285.30
68	30/12/2005 05:30	1.69	4.50	5.60	291.50
69	07/01/2006 01:00	1.39	4.00	5.00	308.50
70	10/01/2006 06:30	1.39	3.90	5.00	299.10
71	11/01/2006 13:30	1.16	3.50	5.00	285.50
72	14/01/2006 07:30	1.04	3.90	4.80	293.20

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

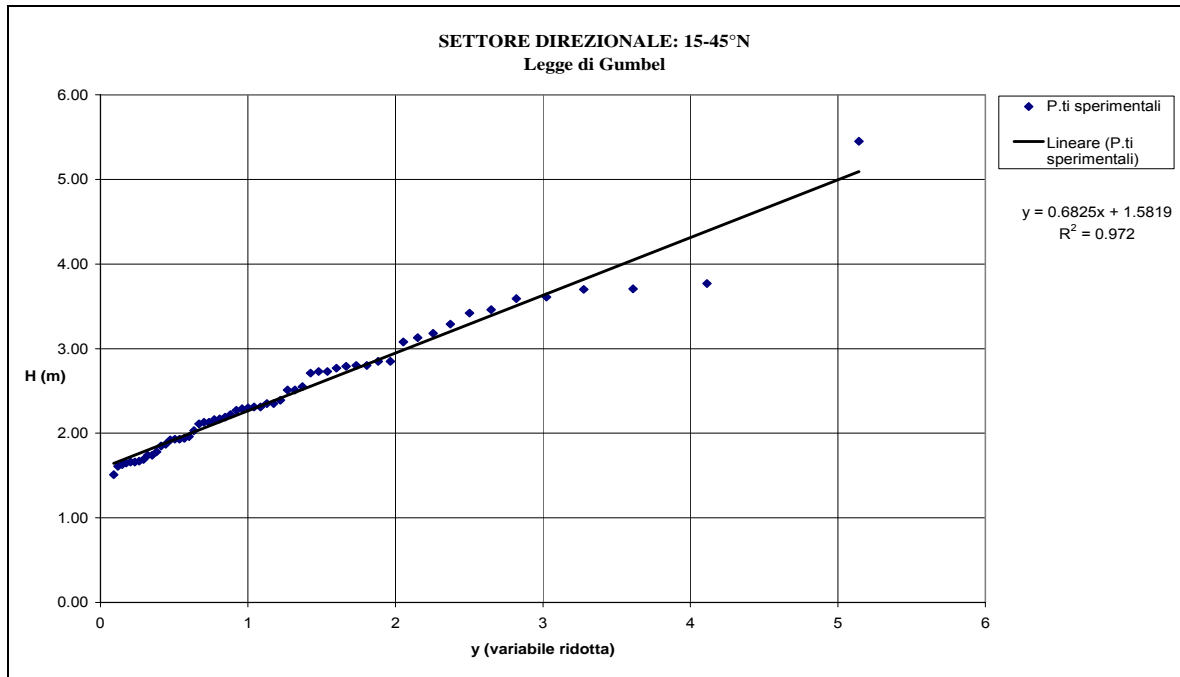


Figura 2.6 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 15°N-45°N.

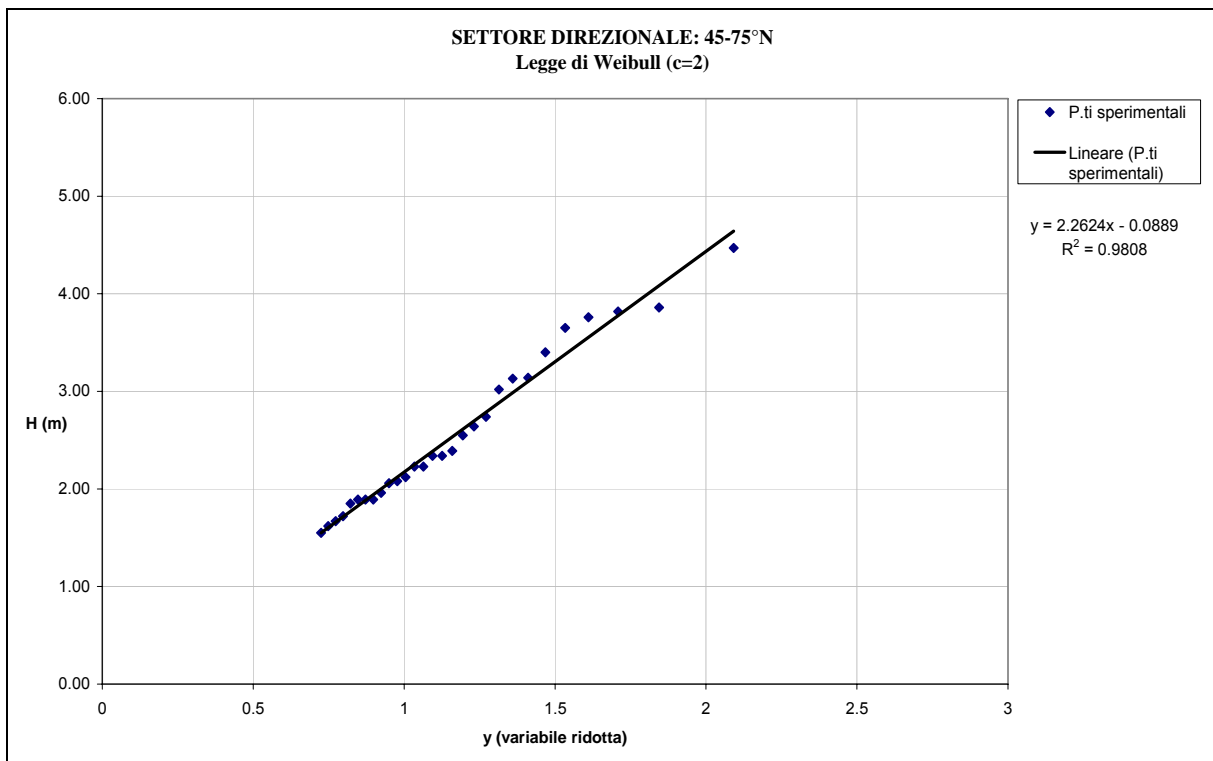


Figura 2.7 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 45°N-75°N.

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

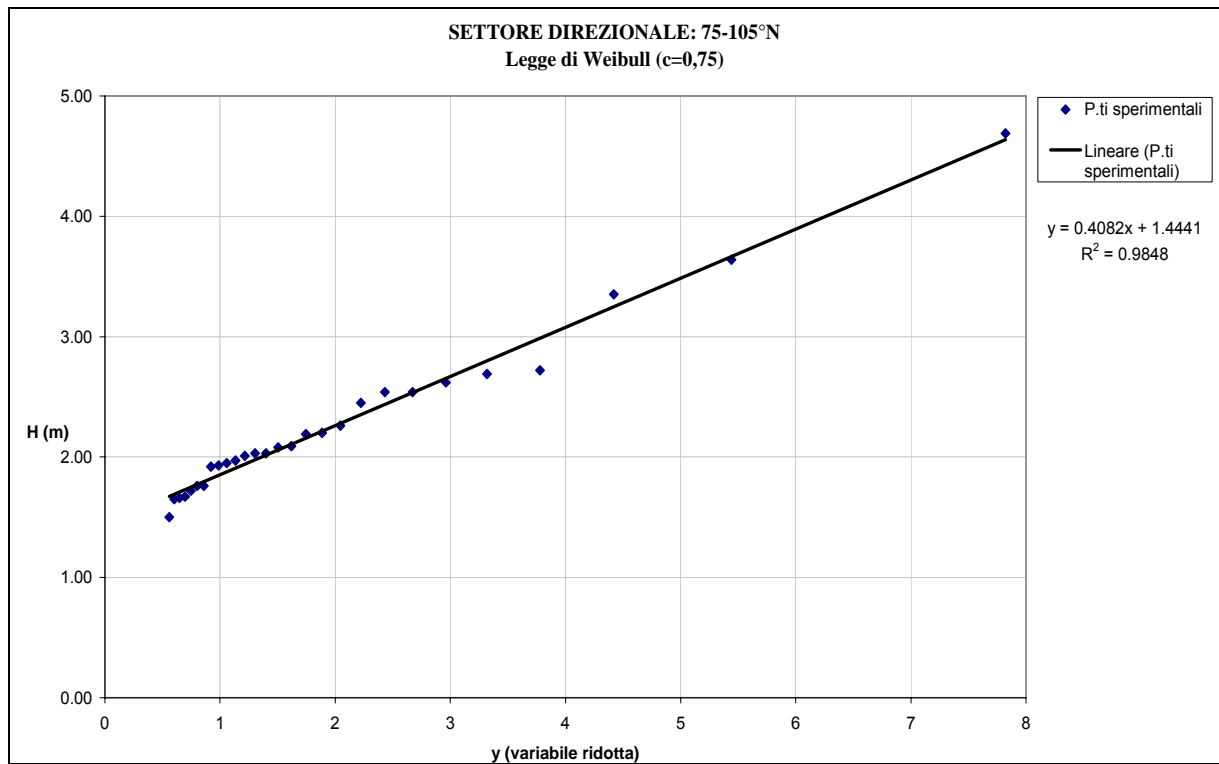


Figura 2.8 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 75°N-105°N.

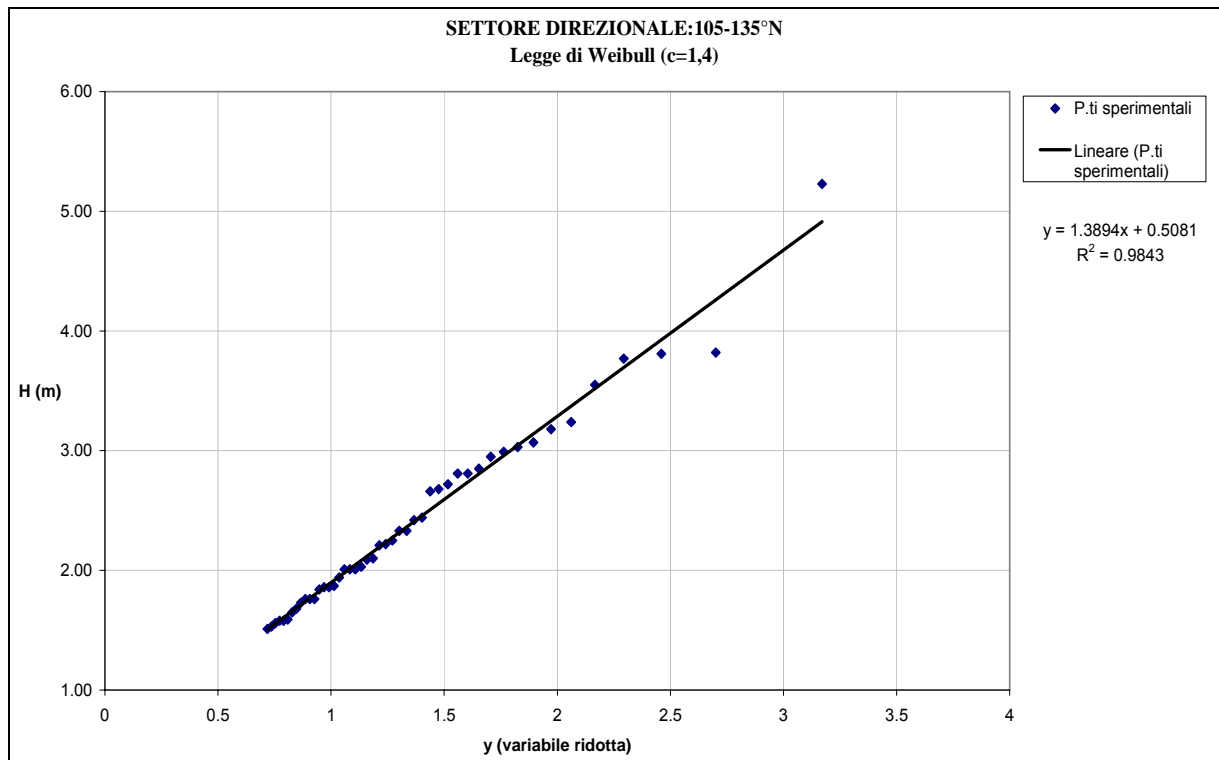


Figura 2.9 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 105°N-135°N



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

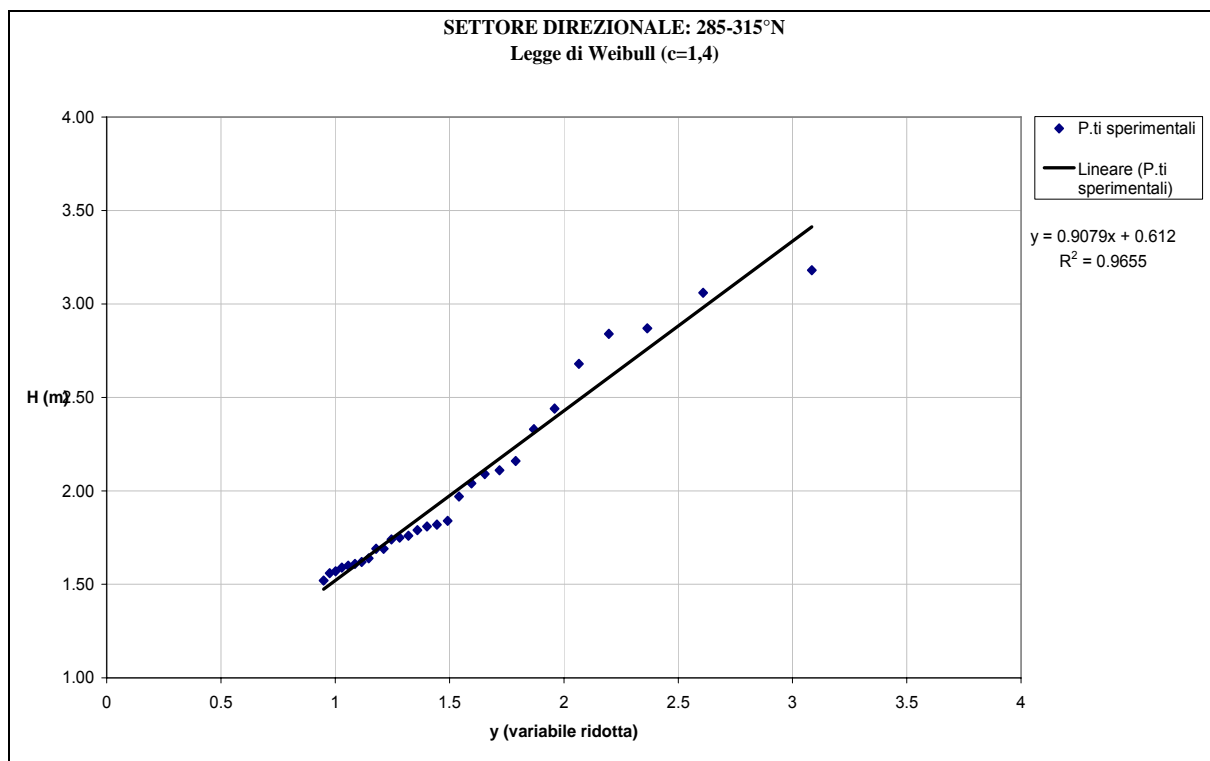


Figura 2.10 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 285°N-315°N

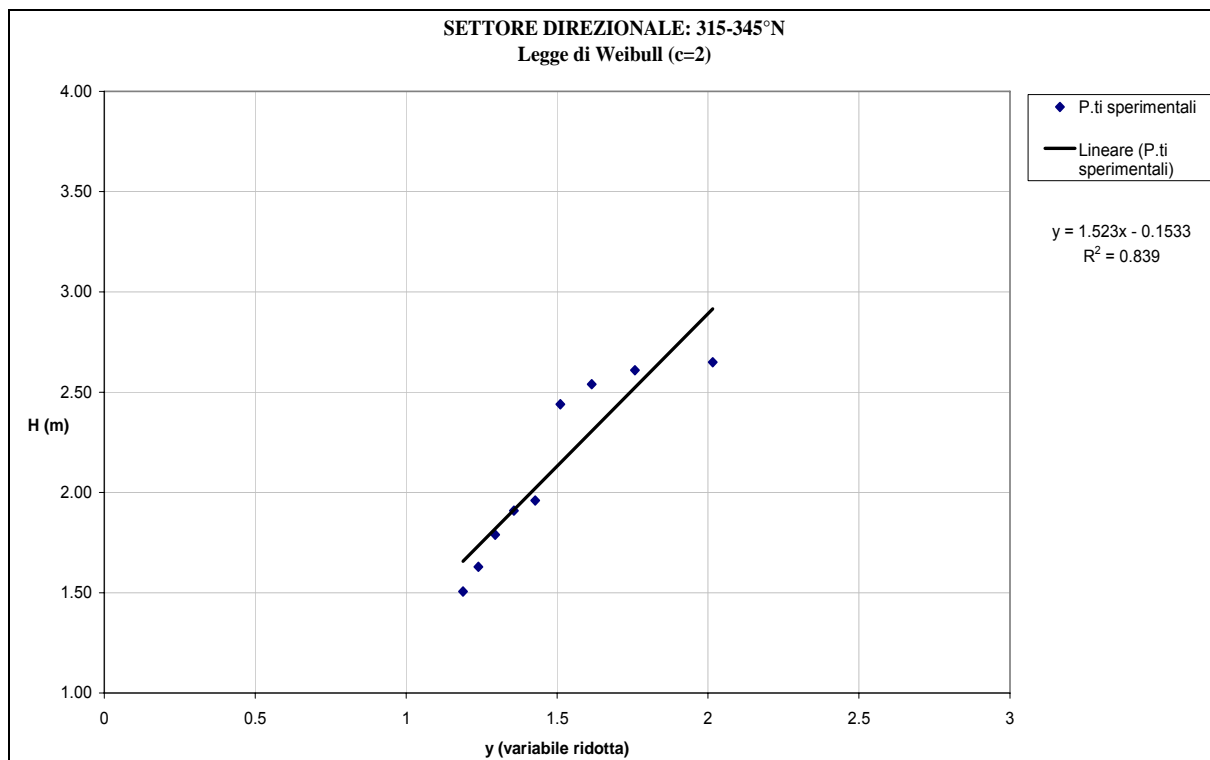


Figura 2.11 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 315°N-345°N

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

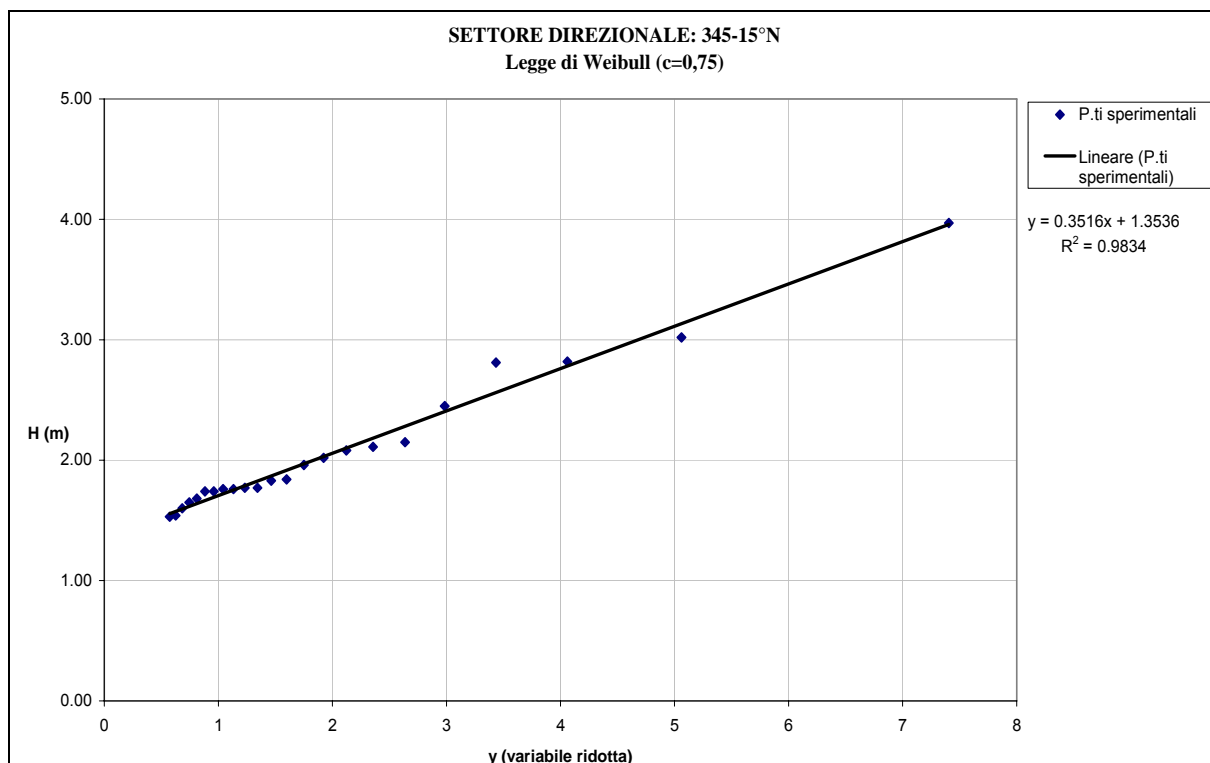


Figura 2.12 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 345°N-15°N.

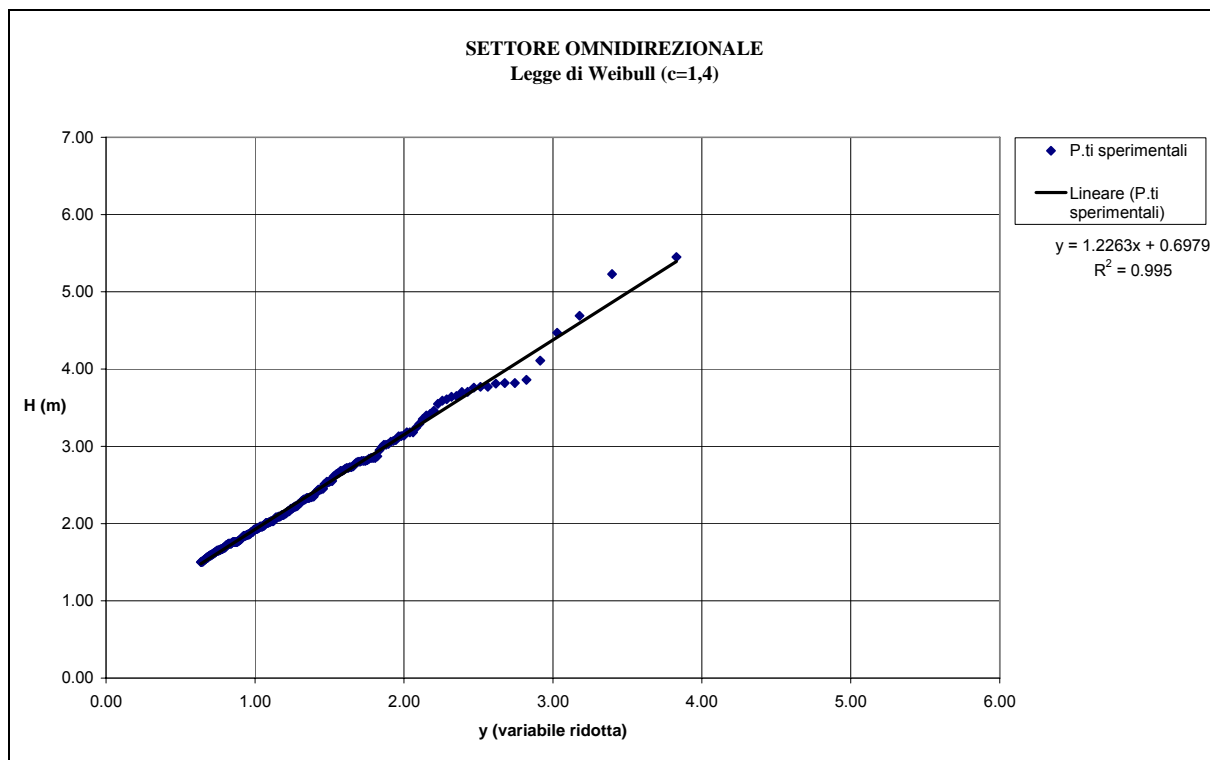


Figura 2.13 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore omni-direzionale.

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

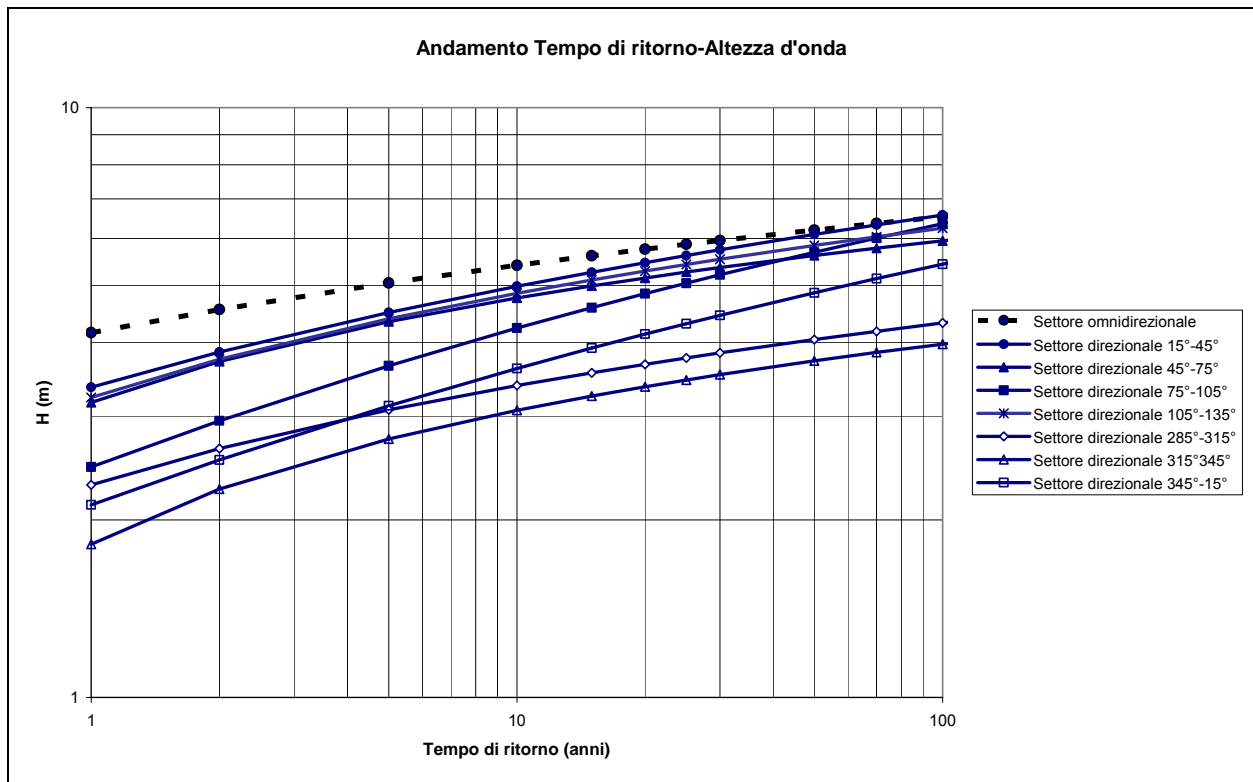


Figura 2.14 - Risultati dell'elaborazione in termini di tempo di ritorno da associare alle mareggiate.

Tabella 2.6 - Risultati dell'elaborazione per ogni settore direzionale e legge di migliore adattamento.

Settore 15°-45°		
Gumbel		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	3.356	3.358
2	3.849	3.852
5	4.491	4.495
10	4.973	4.978
15	5.255	5.260
20	5.454	5.460
25	5.609	5.615
30	5.735	5.741
50	6.089	6.096
70	6.322	6.329
100	6.569	6.576
140	6.802	6.810
150	6.850	6.858
200	7.049	7.057
300	7.330	7.338
500	7.684	7.692
1000	8.164	8.173

Settore 45°-75°		
Weibull (c=2)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	3.050	3.164
2	3.577	3.714
5	4.176	4.338
10	4.579	4.757
15	4.799	4.986
20	4.950	5.143
25	5.063	5.261
30	5.154	5.356
50	5.402	5.614
70	5.558	5.777
100	5.720	5.946
140	5.869	6.100
150	5.899	6.132
200	6.022	6.260
300	6.192	6.438
500	6.400	6.654
1000	6.672	6.937

Settore 75°-105°		
Weibull (c=0.75)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	2.474	2.460
2	2.978	2.944
5	3.714	3.651
10	4.315	4.228
15	4.683	4.581
20	4.950	4.837
25	5.161	5.040
30	5.335	5.207
50	5.834	5.687
70	6.171	6.010
100	6.535	6.359
140	6.884	6.694
150	6.956	6.764
200	7.260	7.056
300	7.724	7.501
500	8.255	8.011
1000	9.032	8.757

Settore 105°-135°		
Weibull (c=1.4)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	3.198	3.226
2	3.712	3.746
5	4.345	4.386
10	4.798	4.844
15	5.054	5.103
20	5.232	5.283
25	5.368	5.421
30	5.478	5.533
50	5.782	5.840
70	5.978	6.039
100	6.183	6.246
140	6.374	6.440
150	6.413	6.479
200	6.574	6.642
300	6.812	6.883
500	7.075	7.149
1000	7.445	7.523

Settore 285°-315°		
Weibull (c=1.4)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	2.275	2.292
2	2.621	2.643
5	3.045	3.073
10	3.347	3.379
15	3.518	3.552
20	3.636	3.672
25	3.727	3.764
30	3.801	3.839
50	4.003	4.044
70	4.133	4.176
100	4.270	4.315
140	4.397	4.443
150	4.422	4.469
200	4.529	4.578
300	4.678	4.728
500	4.862	4.915
1000	5.107	5.164

Settore 315°-345°		
Weibull (c=2)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	1.744	1.819
2	2.158	2.257
5	2.619	2.744
10	2.924	3.067
15	3.091	3.243
20	3.204	3.363
25	3.290	3.454
30	3.358	3.526
50	3.543	3.722
70	3.661	3.846
100	3.781	3.973
140	3.892	4.091
150	3.915	4.114
200	4.007	4.211
300	4.141	4.354
500	4.287	4.508
1000	4.489	4.722

Settore 345°-15°		
Weibull (c=0.75)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	2.129	2.122
2	2.552	2.528
5	3.174	3.124
10	3.683	3.613
15	3.995	3.912
20	4.222	4.130
25	4.402	4.302
30	4.550	4.445
50	4.976	4.853
70	5.263	5.129
100	5.573	5.426
140	5.871	5.712
150	5.933	5.772
200	6.193	6.021
300	6.589	6.401
500	7.043	6.837
1000	7.708	7.475

Settore Omnidir		
Weibull (c=1.4)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	4.157	4.154
2	4.551	4.547
5	5.047	5.044
10	5.409	5.404
15	5.615	5.610
20	5.759	5.754
25	5.870	5.865
30	5.960	5.955
50	6.208	6.203
70	6.369	6.364
100	6.538	6.532
140	6.696	6.690
150	6.728	6.722
200	6.861	6.855
300	7.046	7.040
500	7.277	7.271
1000	7.586	7.579

## 2.4) Individuazione degli eventi ondosi significativi più gravosi per lo studio

L'analisi dell'efficacia protettiva delle diverse configurazioni portuali da esaminare per confronto viene effettuata, mediante l'uso di modelli matematici di ausilio, sotto l'azione di determinate condizioni ondose gravose ed estreme, facendo riferimento ai valori raggiunti da alcune delle mareggiate più intense avvenute nel paraggio di mare anconetano, cui appartiene anche il sito di Numana, nel periodo di osservazione disponibile per la boa ondometrica della R.O.N. presente al largo di Ancona.

Dall'analisi degli estremi e dall'andamento cronologico delle misure ondometriche, descritte nei paragrafi precedenti, è risultato che i settori con le mareggiate costiere più intense (onde più alte) per predeterminati tempi di ritorno sono quelli di bora-tramontana, 15°N-45°N, di greco-levante, 45°N-75°N e 75°N-105°N e di scirocco-levante, 105°N-135°N. Quindi le onde al largo che si verificano nell'ambito di questi settori raggiungono altezze generalmente maggiori di quelle degli altri settori, a parità di tempo di ritorno o probabilità di superamento. I settori di provenienza più meridionali sono inoltre caratterizzati dai periodi ondosi più lunghi.

In particolare partendo dai dati forniti dalla boa ondometrica posta al largo di Ancona, relativi al periodo compreso da Marzo 1999 a Marzo 2006, si sono individuate tre fra le mareggiate massime registrate, in funzione di ognuno dei tre suddetti settori direzionali più gravosi e significativi.

Nei 7 anni di osservazione solo in 4 eventi ondosi di traversia l'altezza d'onda aveva superato il valore di 4 metri. Come si è già detto in precedenza, si tratta di 2 mareggiate provenienti da greco-levante (nel novembre 1999 e nel gennaio 2001 con altezza significativa massime attorno a 4,5m), mentre quelli che hanno superato i 5m sono avvenuti rispettivamente nel novembre 2002 per una mareggiata da scirocco-levante e nel settembre 2004 per una mareggiata da bora.

Quindi per gli scopi del presente lavoro sono state individuate le seguenti 3 mareggiate:

- mareggiata del Novembre 1999, proveniente da EstNordEst, denominata in seguito OS1;
- mareggiata del Novembre 2002, proveniente da EstSudEst, denominata in seguito OS2;
- mareggiata del Settembre 2004, proveniente da NordNordEst, denominata in seguito OS3.

Le evoluzioni cronologiche di altezza, periodo medio, periodo di picco e direzione di provenienza media, relativamente a ciascuna di esse, sono rappresentate graficamente rispettivamente nelle Figure dalla 2.15 alla 2.26, mentre nella Tabella 2.7 sono riportati i parametri ondosi relativi al picco di ciascuna mareggiata.

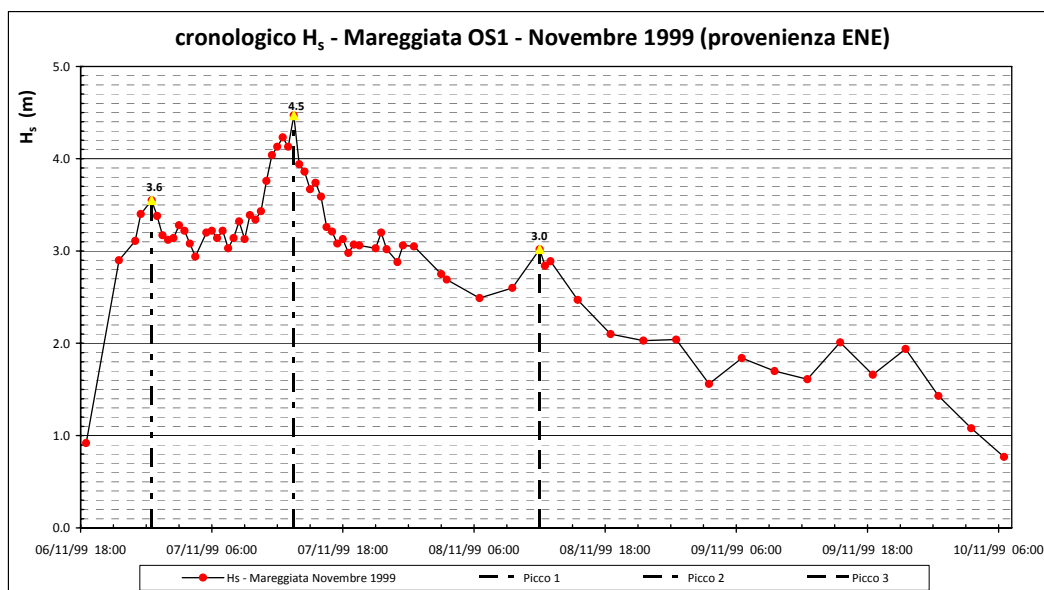


Figura 2.15 - Andamento cronologico delle altezze d'onda significative nella mareggiata OS1 del Nov.1999

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

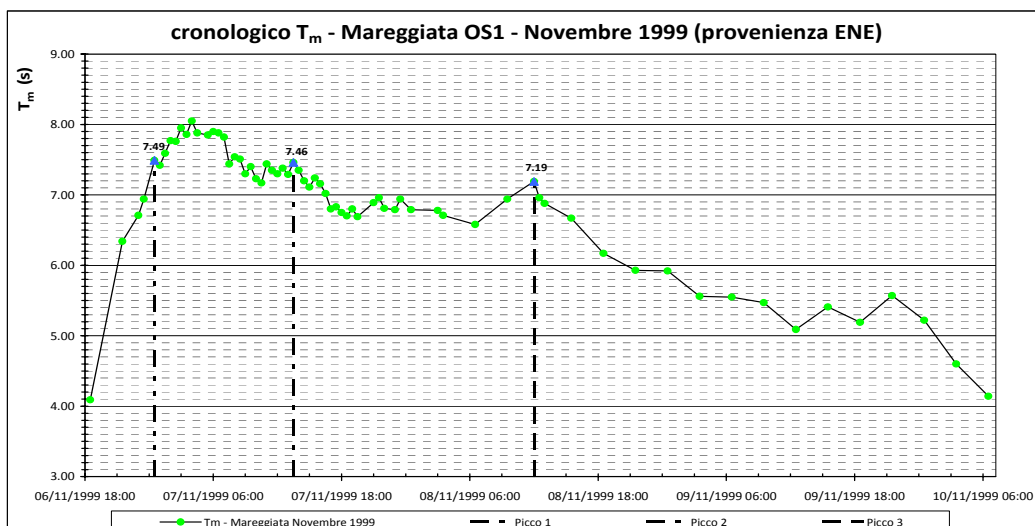


Figura 2.16 - Andamento cronologico dei periodi d'onda medi nella mareggiata OS1 del Nov.1999

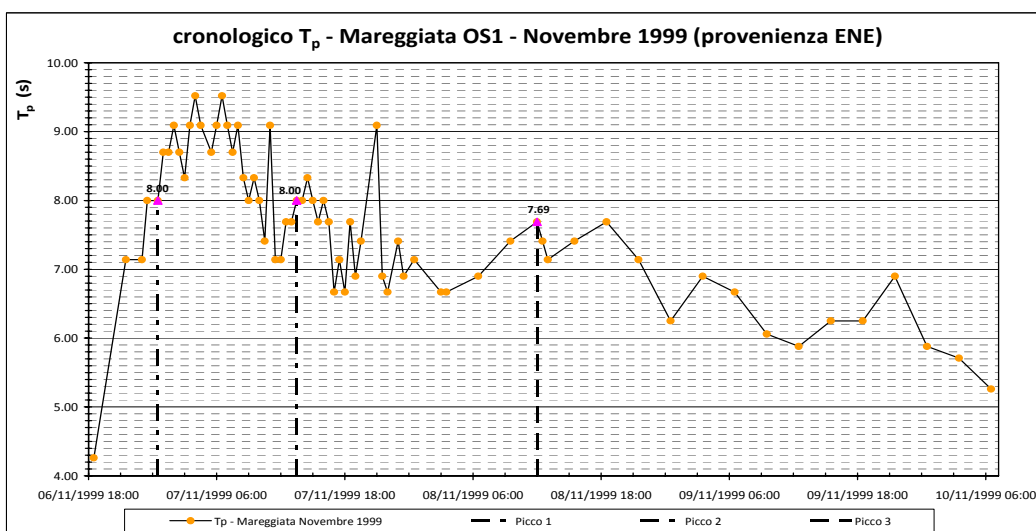


Figura 2.17 - Andamento cronologico dei periodi d'onda di picco nella mareggiata OS1 del Nov.1999

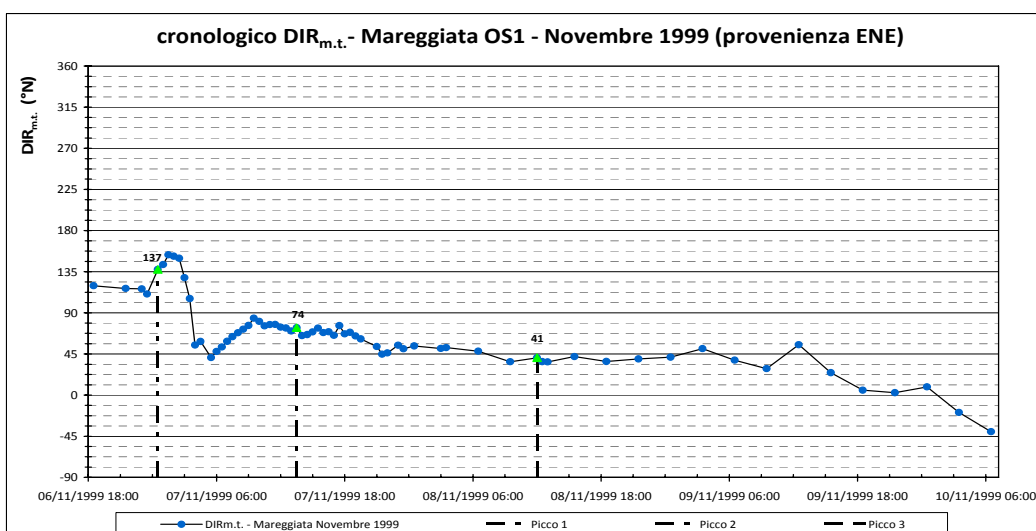


Figura 2.18 - Andamento cronologico delle direzioni di provenienza nella mareggiata OS1 del Nov.1999



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

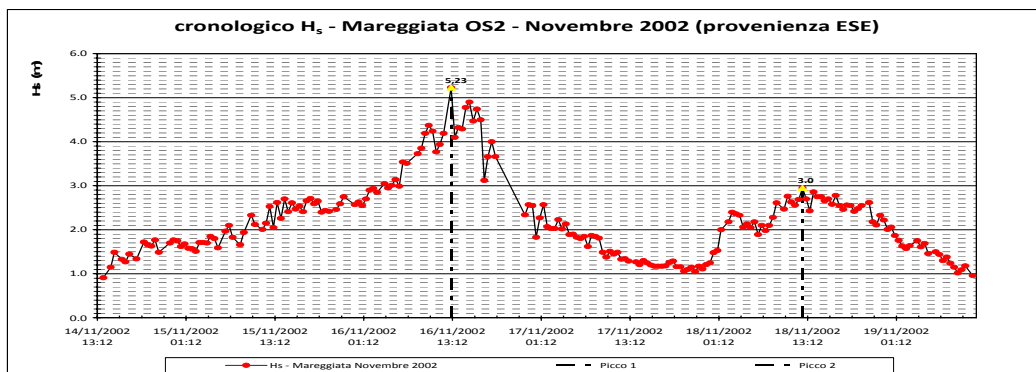


Figura 2.19 - Andamento cronologico delle altezze d'onda significative nella mareggiata OS2 del Nov.2002

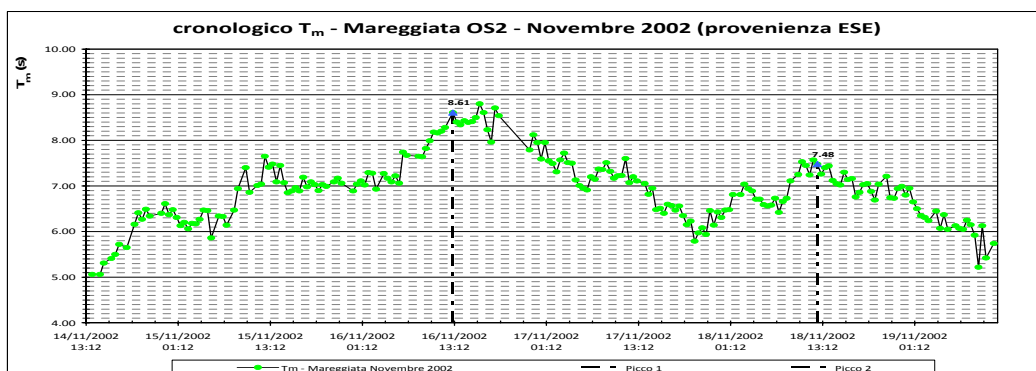


Figura 2.20 - Andamento cronologico dei periodi d'onda medi nella mareggiata OS2 del Nov.2002

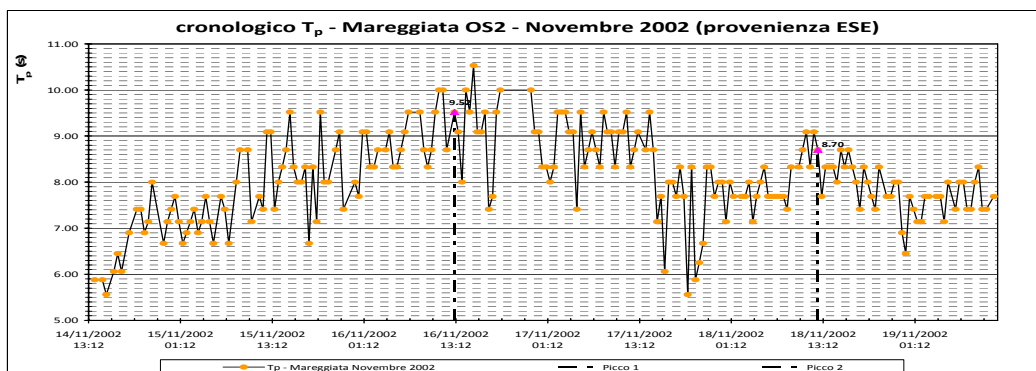


Figura 2.21 - Andamento cronologico dei periodi d'onda di picco nella mareggiata OS2 del Nov. 2002

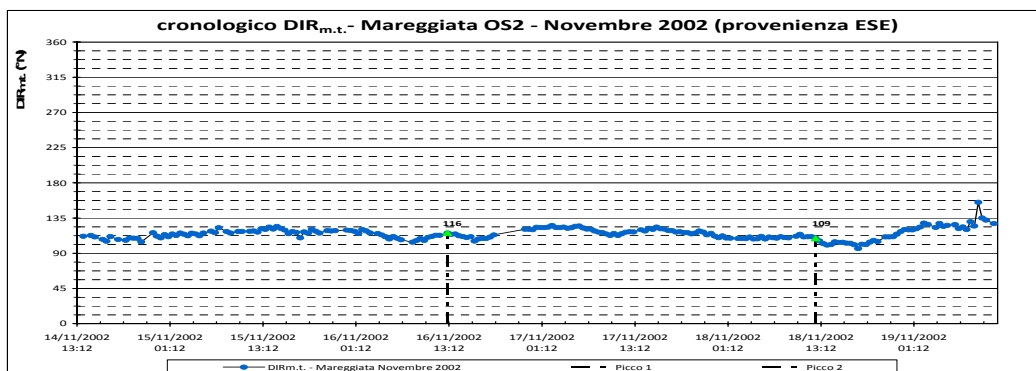


Figura 2.22 - Andamento cronologico delle direzioni di provenienza nella mareggiata OS2 del Nov.2002

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

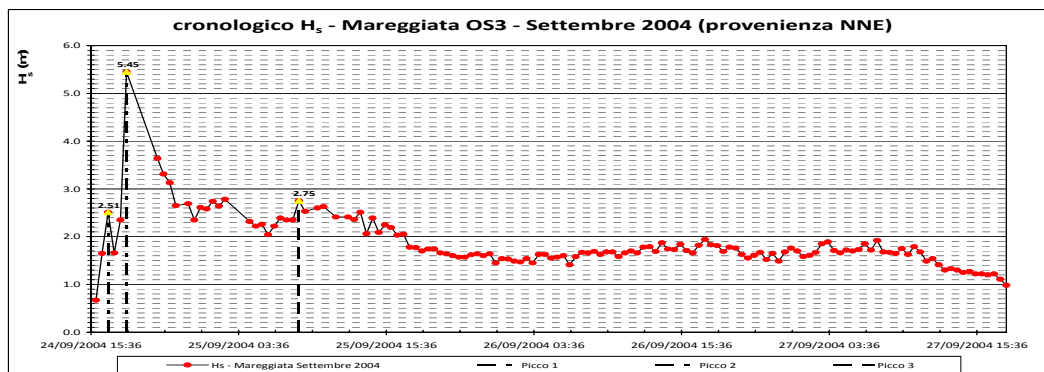


Figura 2.23 - Andamento cronologico delle altezze d'onda significative nella mareggiata OS3 del Set.2004

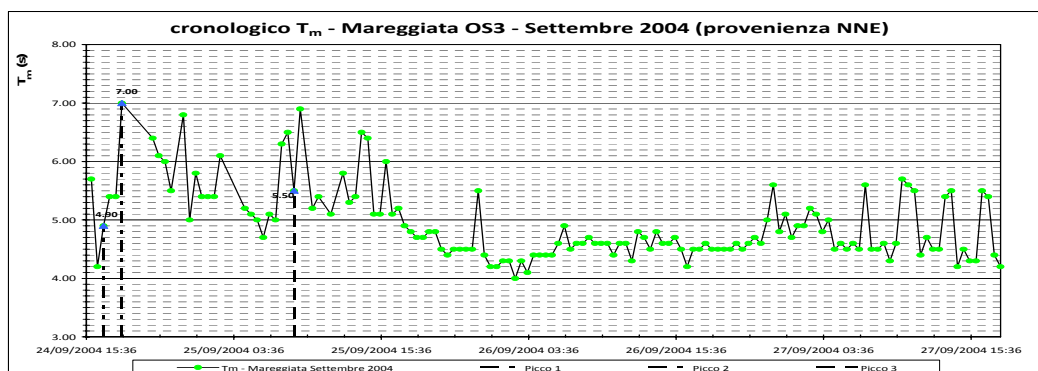


Figura 2.24 - Andamento cronologico dei periodi d'onda medi nella mareggiata OS3 del Set.2004

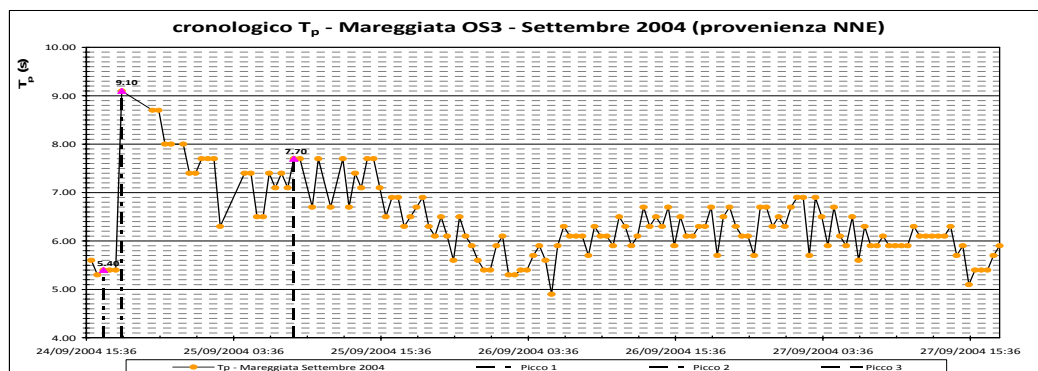


Figura 2.25 - Andamento cronologico dei periodi d'onda di picco nella mareggiata OS3 del Set.2004

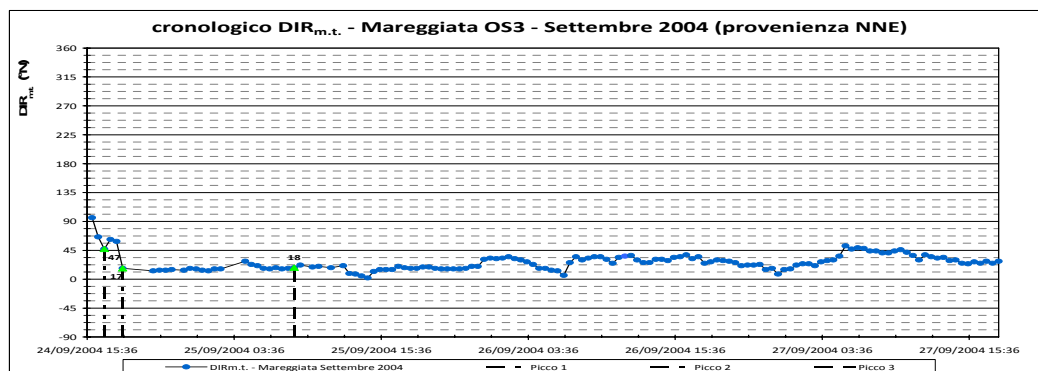


Figura 2.26 - Andamento cronologico delle direzioni di propagazione nella mareggiata OS3 del Set.2004

Tabella 2.7 - Caratteristiche dei parametri ondosi principali rilevati dalla boa ondometrica della R.O.N. posta al largo di Ancona al picco di ciascuna delle tre mareggiate individuate per il presente studio

<b>MAREGGIATA</b>	<b>ORARIO DEL PICCO</b>	<b><math>H_s</math> (m)</b>	<b><math>T_m</math> (s)</b>	<b><math>T_p</math> (s)</b>	<b>DIR<sub>m.t.</sub> (°N)</b>
<b>OS1</b>	07/11/1999 ore 13:30	4,47	7,46	8,00	74
<b>OS2</b>	16/11/2002 ore 13:00	5,23	8,61	9,52	116
<b>OS3</b>	24/09/2004 ore 18:30	5,45	7,00	9,10	17

Per considerare le condizioni ondose gravose ed estreme con cui studiare l'efficacia della disposizione delle opere portuali di protezione delle diverse configurazioni portuali messe a confronto, si fa riferimento proprio alle caratteristiche ondose delle mareggiate significative individuate al picco di ciascun evento.

Facendo riferimento alle conclusioni dello studio delle altezze d'onda estreme descritte precedentemente, si possono valutare i relativi periodi di ritorno di queste tre eventi di mareggiata individuati dalle tre direzioni più significative.

Nell'ambito del proprio settore direzionale di appartenenza la mareggiata OS1 risulta avere un tempo di ritorno di circa 8 anni, la OS2 di circa 20 anni, come la OS3. Nell'ambito del generico settore omnidirezionale i rispettivi tempi di ritorno sono di circa 2 anni per la mareggiata OS1, di circa 8 anni per la OS2 e di circa 12 anni per la OS3.

## 2.5) Trasposizione geografica delle ondazioni dal sito della boa fino al largo di Numana

L'analisi dell'esposizione geografica di una stazione di misura del moto ondoso o di un sito costiero si basa sulla determinazione dei *fetches geografici* ed *efficaci*. Per trasferire quindi i dati misurati al largo di Ancona fino ad un sito di riferimento al largo del paraggio di Numana è stato utilizzato il metodo di trasposizione geografica basato sulla similitudine dei *fetches* efficaci, ipotizzando che l'evento climatico responsabile di una mareggiata registrata dall'ondametro di riferimento abbia interessato anche l'area di generazione del sito costiero in esame.

Nei bacini di estensione limitata come il Mare Adriatico per l'individuazione dei *fetches* si fa ricorso al concetto del *fetch* geografico, che indica la distanza tra il punto geografico di interesse e la terra più vicina in relazione ad una prefissata direzione, in quanto le dimensioni caratteristiche delle perturbazioni che normalmente interessano l'Adriatico sono dello stesso ordine di grandezza dei valori massimi che caratterizzano i *fetches* geografici (circa 400-500 Km).

Il valore del *fetch* efficace relativo ad una determinata direzione è funzione dei valori dei *fetches* geografici associati a direzioni contigue a quella considerata in quanto uno stato di mare viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore  $\vartheta$  ( $\pm 90^\circ$  secondo il metodo di Seymour,  $\pm 45^\circ$  secondo il metodo di Saville) rispetto alla direzione media del vento.

Il calcolo dei *fetches* efficaci viene eseguito tramite la seguente relazione (S.M.B. 1947):

$$F_{e,W} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_W - \vartheta}^{\phi_W + \vartheta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_W)}{\sum_{\phi_i = \phi_W - \vartheta}^{\phi_W + \vartheta} \cos^n(\phi_i - \phi_W)} \quad (2.6)$$

con

- $F_{e,W}$  lunghezza del *fetch* efficace relativo alla direzione  $\phi_W$ ;
- $F_i$  lunghezza del *fetch* geografico relativo alla direzione  $i$ -esima  $\phi_i$ ;
- $\phi_W$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso;
- $\phi_i$  direzione  $i$ -esima compresa nel settore di possibile provenienza del moto ondoso  $\phi_W \pm \vartheta$  (nel nostro studio si è assunto  $\vartheta$  pari a  $45^\circ$ );
- $n$  termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso del sito in esame (in genere si assume  $n$  pari a 2).

L'ipotesi fondamentale, che sussiste alla base del *metodo di trasposizione geografica*, è che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione) che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate dall'ondametro di riferimento (in questo caso Ancona), abbiano in realtà interessato anche l'area di generazione situata al largo del sito d'interesse (in questo caso Numana). Supponendo, inoltre, che le aree di generazione del moto ondoso possano essere determinate per ciascun sito utilizzando solo ed esclusivamente il concetto di *fetch efficace*, il metodo di trasposizione geografica dovrà semplicemente stabilire una corrispondenza tra le direzioni, le altezze ed i periodi del moto ondoso relative al sito di registrazione e a quello oggetto di esame.

Nel caso di eventi limitati in *fetch* e nell'ipotesi che siano valide le teorie che descrivono la formazione del moto ondoso a seguito degli eventi eolici, le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa spettrale  $H_s$  ed il relativo periodo spettrale  $T_p$  in funzione della lunghezza del *fetch* considerato e della velocità del vento sono le seguenti:

$$\frac{g \cdot H_s}{U_A^2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{g \cdot F_e}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

$$\frac{g \cdot T_p}{U_A^2} = 2,857 \cdot 10^{-1} \cdot \left( \frac{g \cdot F_e}{U_A^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.8)$$

dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $U_A$  è il fattore di velocità del vento ("wind stress factor"), dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota di +10m s.l.m.;
- $F_e$  è la lunghezza del *fetch efficace* relativo alla direzione prefissata.

Fissata quindi una generica direzione geografica dalla quale si ritenga spiri il vento, ed indicando con i suffissi  $An$  e  $Num$  le grandezze associate rispettivamente al sito di misura ed a quello oggetto di studio, le precedenti relazioni permettono di trovare la corrispondenza ricercata tra le altezze ed i periodi delle onde relative ai punti  $An$  e  $Num$  ed alla direzione considerata attraverso la determinazione dei relativi *coefficienti di trasposizione geografica*  $K_H$  e  $K_T$ . Ritenendo, infatti, che il fattore di velocità del vento ( $U_A$ ) sia lo stesso per i due punti in esame, dalle relazioni precedenti si ottiene:

- coefficiente di trasposizione delle altezze d'onda: 
$$K_H = \frac{H_s^{Num}}{H_s^{An}} = \left( \frac{F_e^{Num}}{F_e^{An}} \right)^{\frac{1}{2}}$$
- coefficiente di trasposizione dei periodi d'onda: 
$$K_T = \frac{T_p^{Num}}{T_p^{An}} = \left( \frac{F_e^{Num}}{F_e^{An}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Il calcolo dei coefficienti  $K_H$  e  $K_T$  andrà effettuato, quindi, per ognuna delle direzioni considerate per l'individuazione dei *fetches geografici ed efficaci* relativi al sito oggetto di studio ed a quello di misura. Trovati i coefficienti  $K_H$  e  $K_T$ , sarà sufficiente moltiplicare i dati registrati dalla stazione di misura (altezza d'onda significativa  $H_s$  e relativo periodo  $T_p$ ) per i valori di tali coefficienti relativi alla direzione a cui i dati stessi si riferiscono, ed ottenere i corrispondenti valori di  $H_s$  e  $T_p$  per il sito d'interesse.

Il calcolo dei *fetches geografici ed efficaci* è stato fatto, per i siti della boa di registrazione dei dati ondosi di Ancona e per il sito di riferimento al largo del paraggio costiero di Numana, ogni 5° a partire dal Nord geografico. Mentre l'analisi della trasposizione geografica dei dati ondosi e quindi la valutazione dei coefficienti  $K_H$  e  $K_T$  sono state effettuate separatamente suddividendo l'intero arco delle direzioni in settori direzionali di ampiezza 30° a partire dal Nord geografico. All'interno di ciascun settore più ampio (30°) sono stati considerati i valori medi dei *fetches* calcolati per i sottosectori di ampiezze ristrette (5°) ivi compresi.

Nelle Figure da 2.27 a 2.30 sono riportati, sulla carta nautica del Mare Adriatico e del Mare Jonio, i grafici delle rose ottenute rispettivamente per i *fetches geografici* e per quelli *efficaci* per il sito della boa della R.O.N. di Ancona e per il sito di riferimento al largo del paraggio costiero di Numana.

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

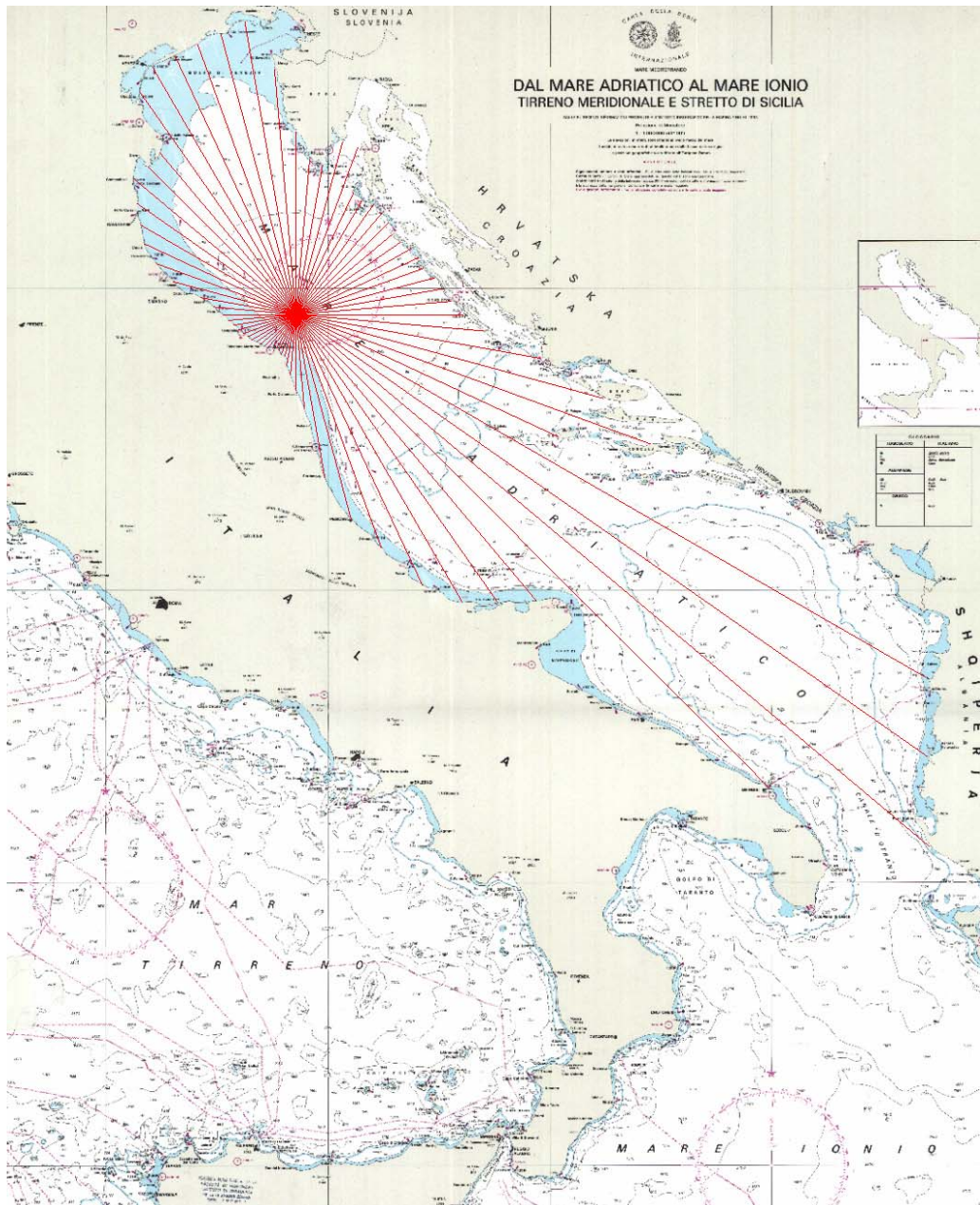


Figura 2.27 - Fetches geografici del sito della boa R.O.N. di Ancona



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

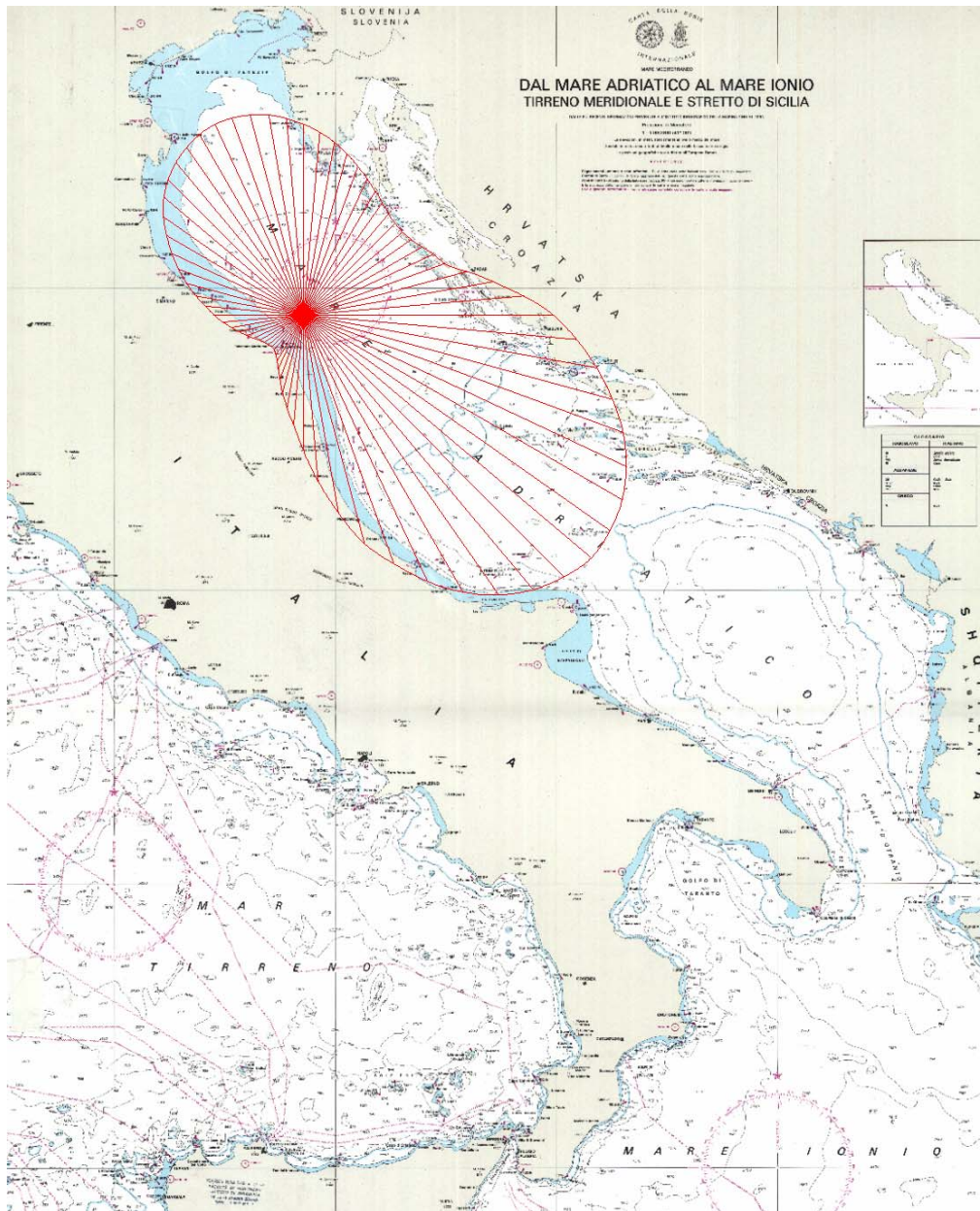


Figura 2.28 - Fetches efficaci del sito della boa R.O.N. di Ancona

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

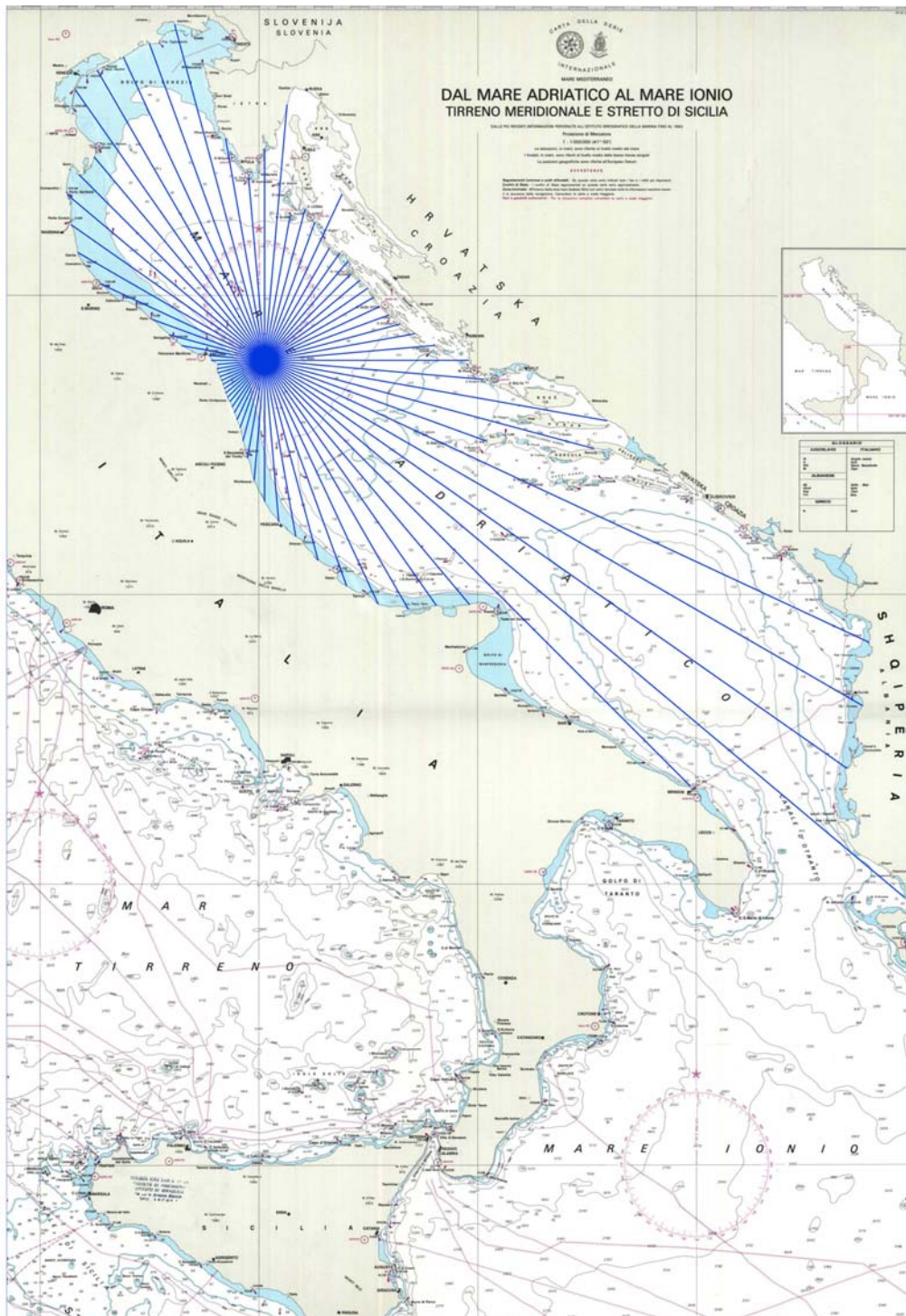


Figura 2.29 - Fetches geografici del sito di riferimento al largo della costa di Numana



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

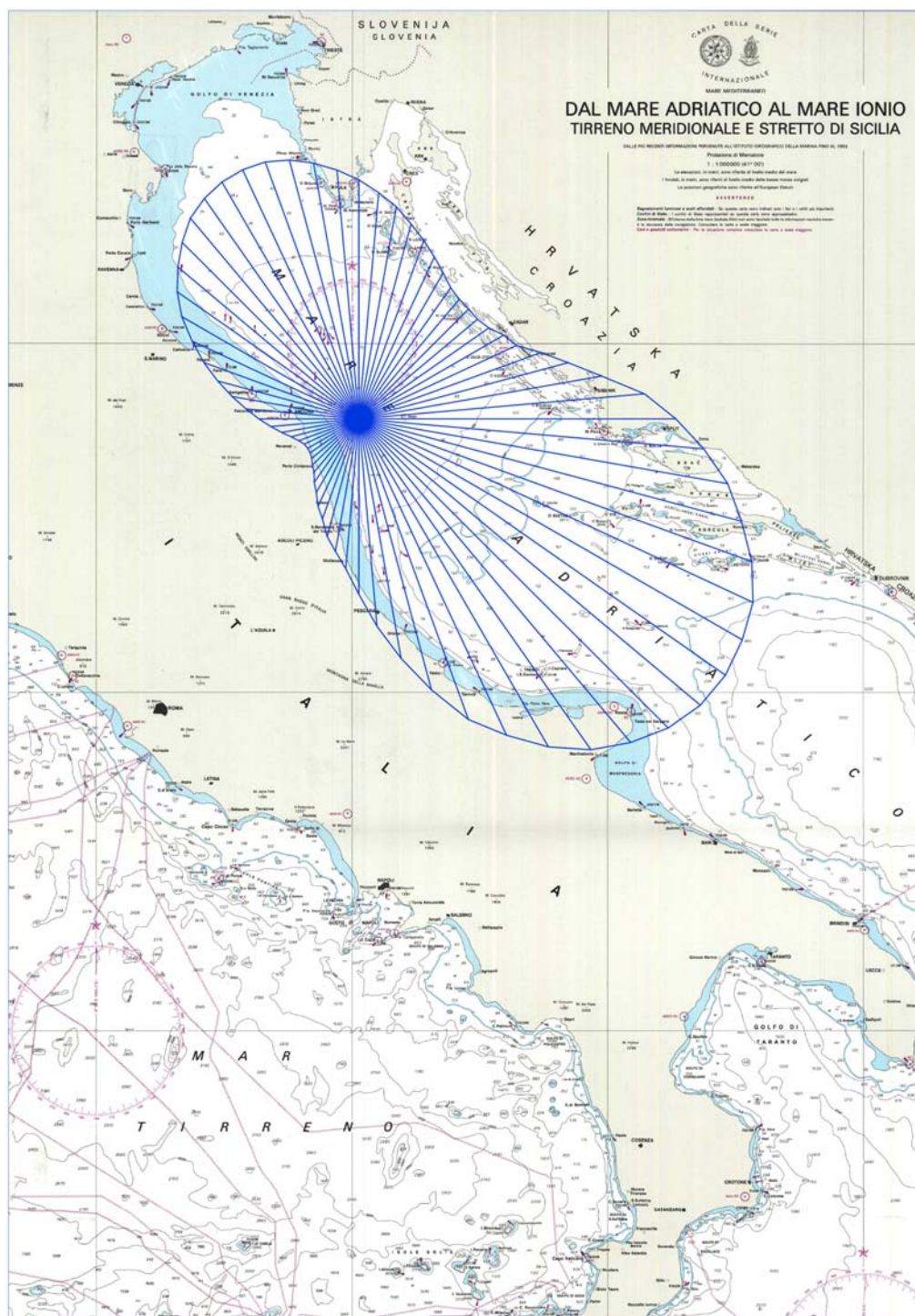


Figura 2.30 - Fetches efficaci del sito di riferimento al largo della costa di Numana

Applicando analisi della trasposizione geografica sono stati ottenuti i risultati in termini di coefficienti moltiplicativi riportati nella Tabella 2.8 che raccoglie la sintesi dei valori ottenuti per i diversi settori direzionali ampi 30° in cui è stato suddiviso l'intero angolo giro.

Di conseguenza i valori dei parametri ondosi ai rispettivi punti di picco delle 3 mareggiate individuate, trasferiti dal sito della boa ondometrica di rilevamento posta al largo di Ancona fino al sito di riferimento posto al largo del paraggio marino relativo al porto di Numana, sono raccolti e riportati nella Tabella 2.9 e costituiscono la base delle caratteristiche ondose da applicare nelle analisi successive del presente lavoro.

Tabella 2.8 - Valori dei coefficienti moltiplicativi per la trasposizione di altezze e periodi ondosi dal sito della boa R.O.N. di Ancona a quello di riferimento al largo di Numana.

Settore	F <sub>e,Ancona</sub> (km)	F <sub>e,Numana</sub> (km)	F <sub>e(Num)/F<sub>e(An)</sub></sub>	K <sub>H</sub>	K <sub>T</sub>
				(F <sub>e(Num)/F<sub>e(An)</sub>)<sup>1/2</sup></sub>	(F <sub>e(Num)/F<sub>e(An)</sub>)<sup>1/3</sup></sub>
15°N-45°N	112,23	109,77	0,978	0,989	0,993
45°N-75°N	103,86	104,64	1,008	1,004	1,003
75°N-105°N	177,86	187,25	1,053	1,026	1,017
105°N-135°N	270,29	273,86	1,013	1,007	1,004
135°N-165°N	246,31	245,60	0,997	0,999	0,999
165°N-195°N	119,51	126,81	1,061	1,030	1,020
195°N-225°N	44,98	58,51	1,301	1,141	1,092
225°N-255°N	38,61	38,81	1,005	1,003	1,002
255°N-285°N	65,42	60,59	0,926	0,962	0,975
285°N-315°N	115,18	120,72	1,048	1,024	1,016
315°N-345°N	154,46	166,24	1,076	1,037	1,025
345°N-15°N	146,17	151,43	1,036	1,018	1,012

Tabella 2.9 - Valori dei parametri ondosi spettrali per le altezze ed i periodi trasposti dal sito della boa R.O.N. di Ancona a quello di riferimento al largo del paraggio costiero di Numana.

Mareggiata OS1 - Nov. 1999 - provenienza ENE							
H <sub>s,An</sub> (m)	T <sub>p,An</sub> (s)	DIR (°N)	settore (°N)	K <sub>H</sub>	K <sub>T</sub>	H <sub>s,Num</sub> (m)	T <sub>p,Num</sub> (s)
4,47	8,00	74	45°-75°	1,004	1,003	4,49	8,02

Mareggiata OS2 - Nov. 2002 - provenienza ESE							
H <sub>s,An</sub> (m)	T <sub>p,An</sub> (s)	DIR (°N)	settore (°N)	K <sub>H</sub>	K <sub>T</sub>	H <sub>s,Num</sub> (m)	T <sub>p,Num</sub> (s)
5,23	9,52	116	105°-135°	1,007	1,004	5,26	9,56

Mareggiata OS3 - Set. 2004 - provenienza NNE							
H <sub>s,An</sub> (m)	T <sub>p,An</sub> (s)	DIR (°N)	settore (°N)	K <sub>H</sub>	K <sub>T</sub>	H <sub>s,Num</sub> (m)	T <sub>p,Num</sub> (s)
5,45	9,10	17	15°-45°	0,989	0,993	5,39	9,03

## 2.6) Individuazione dei valori delle sopraelevazioni del livello medio superficiale da associare alle mareggiate individuate per le applicazioni

La sopraelevazione del livello medio del mare rappresenta il dislivello fra la quota media superficiale, raggiunta durante un evento temporaneo, e quella corrispondente al l.m.m. (livello medio mare) in condizione di quiete a lungo termine. Nel Mare Adriatico tale variazione è dovuto principalmente all'effetto della marea astronomica e, in particolari condizioni meteorologiche, all'effetto della cosiddetta marea meteorologica data soprattutto dal cosiddetto ingorgo da vento sulla superficie marina e dall'effetto barometrico in presenza di eventi ciclonici (bassa pressione).

I valori raggiunti dalla sopraelevazione del livello medio superficiale in un determinato paraggio lungo le coste italiane si possono verificare a partire dai dati misurati della R.M.N. (Rete Mareografica Nazionale), considerando le stazioni mareografiche più vicine al luogo di studio. Nel nostro caso, la stazione scelta è quella di Ancona; il dato fornito dalla stazione è il livello del mare rispetto al l.m.m. in condizione di quiete per ogni ora. Dalla conformazione del Mare Adriatico come bacino semichiuso, è evidente che la sopraelevazione, nel caso di forti mareggiate, non è trascurabile; in particolare la massima sopraelevazione si raggiunge, in genere, con le mareggiate di scirocco-levante (direzioni di provenienza ESE), mentre con quelle di bora (direzioni di provenienza NNE) essa è inferiore: ciò è facilmente spiegabile dal fatto che a Sud il Mare Adriatico prosegue, attraverso il Canale di Otranto, nello Ionio mentre sugli altri lati è chiuso dalla terraferma. Per il calcolo della sopraelevazione da considerare nelle applicazioni ondose riferibili a Numana, si sono presi i dati della stazione mareografica di Ancona, in corrispondenza dei giorni in cui si sono manifestate le tre mareggiate OS1, OS2 e OS3 individuate per essere utilizzate nelle applicazioni e nelle indagini del presente lavoro.

Nei grafici delle Figure 2.31, 2.32 e 2.33 si sono messi a confronto i valori della sopraelevazione del l.m.m. ottenute dalle registrazioni della R.M.N. rispettivamente con quelli dell'altezza d'onda significativa riferite alle tre mareggiate individuate rilevati dalla R.O.N.

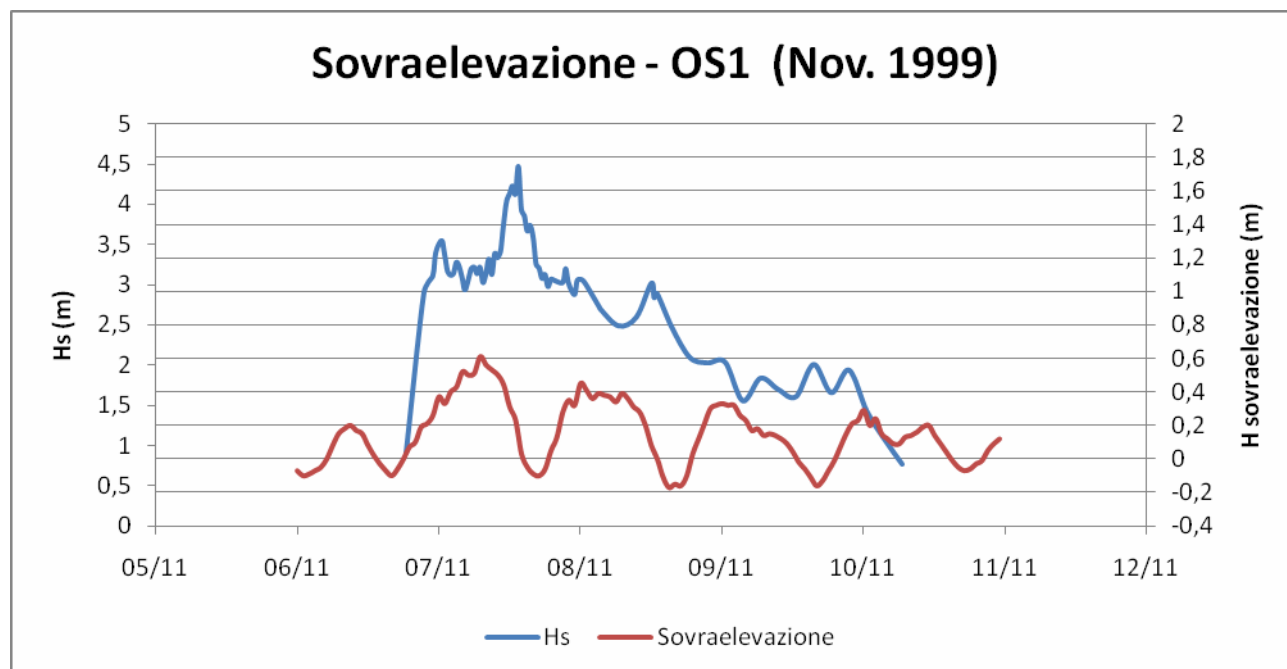


Figura 2.31 - Andamento cronologico delle misure di altezza d'onda significativa e del livello superficiale medio rilevati nel paraggio di Ancona in occasione dell'evento di mareggiata denominata OS1

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

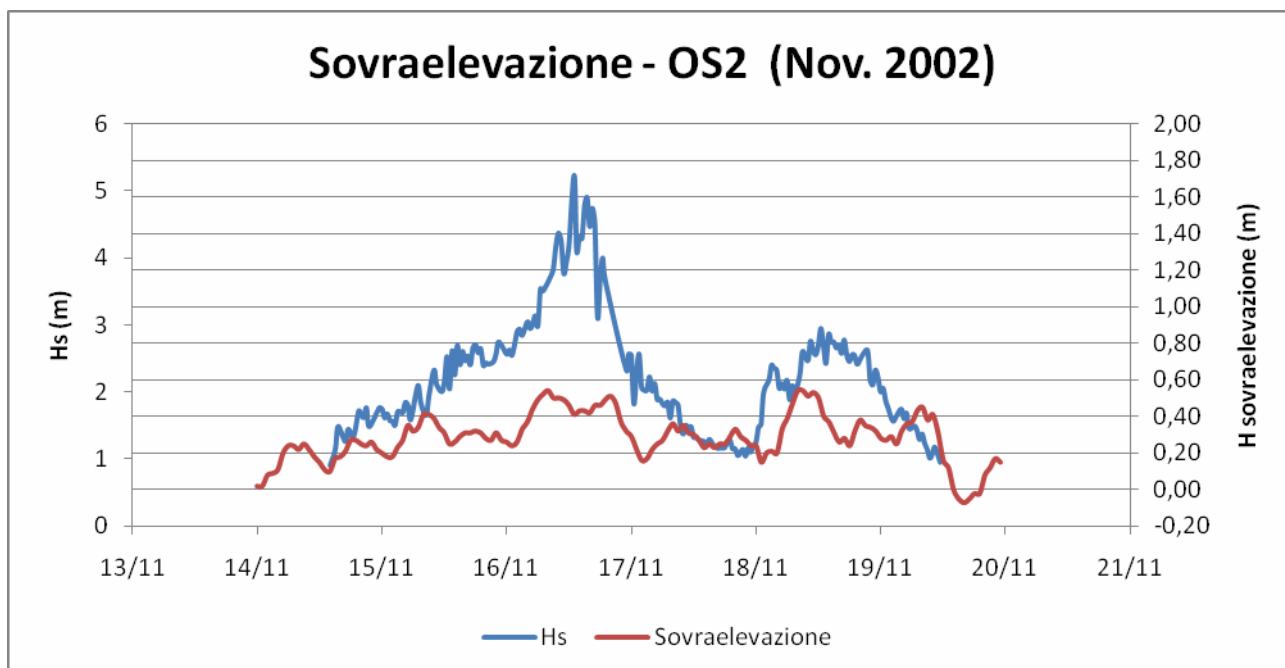


Figura 2.32 - Andamento cronologico delle misure di altezza d'onda significativa e del livello superficiale medio rilevati nel paraggio di Ancona in occasione dell'evento di mareggiata denominata OS2.

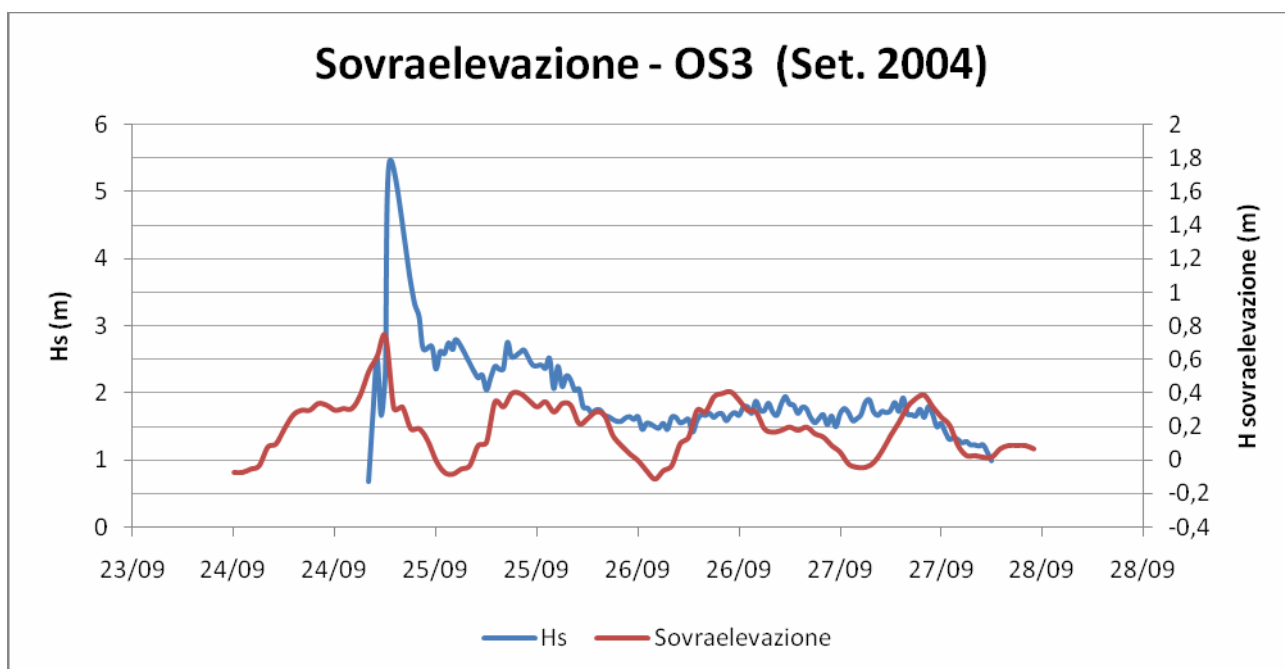


Figura 2.33 - Andamento cronologico delle misure di altezza d'onda significativa e del livello superficiale medio rilevati nel paraggio di Ancona in occasione dell'evento di mareggiata denominata OS3.

Dall'analisi dei predetti andamenti cronologici, si è potuto dedurre che, mentre risultano soddisfacenti le misure dei livelli per le mareggiate OS1 ed OS3 (provenienti dai settori nord-orientali), per la mareggiata OS2 (proveniente da scirocco-levante) le aspettative dei valori di sopraelevazione erano superiori a quelli risultati dai rilievi della R.M.N.

Quindi per approfondire l'analisi di questo aspetto per le differenti mareggiate considerate sono stati acquisiti anche i dati del livello superficiale rispetto alle condizioni di quiete registrati dai mareografi di Ravenna, Ancona e Ortona (sempre forniti dalla Rete Mareografica Nazionale) nei mesi in cui si sono verificate le tre mareggiate esaminate (Novembre 1999; Novembre 2001;

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

Settembre 2004) per tentare che il confronto fra loro possa verificare l'ipotesi delle misurazioni delle basse sopraelevazioni rilevabili nel porto di Ancona in occasione delle mareggiate di provenienza meridionale, avendo tale bacino portuale l'imboccatura aperta a ponente. Il confronto fra questi dati viene evidenziato nei grafici delle Figure dalla 2.34 alla 2.36, riportati assieme ai grafici dei dati ondosì registrati contemporaneamente dalla boa ondometrica di Ancona, relativi all'altezza significativa dell'onda  $H_s$  (m) e la direzione di provenienza  $D_{MT}$  ( $^\circ$ ) :

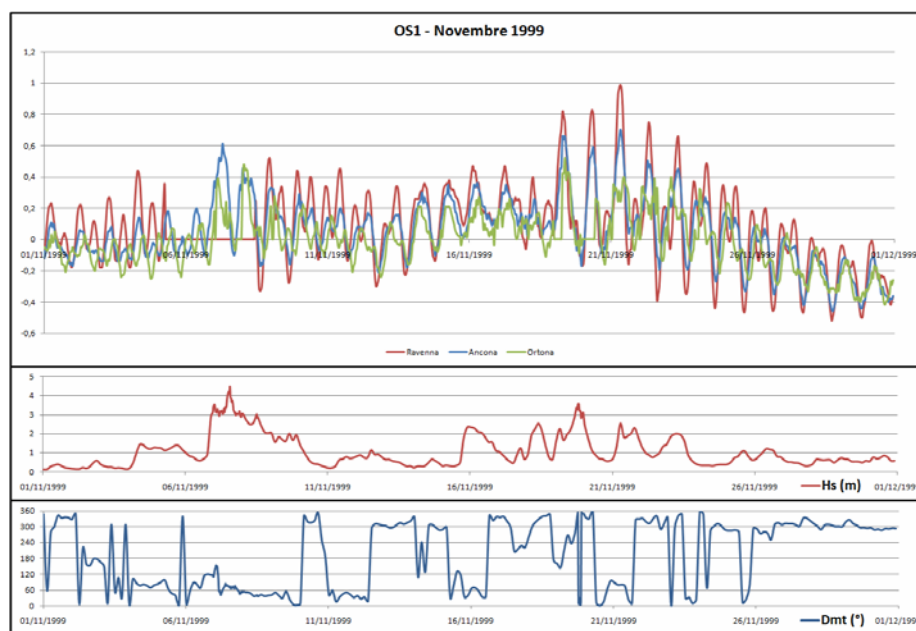


Figura 2.34 - Andamenti cronologici di confronto dei livelli medi superficiali rilevati nei porti di Ravenna, Ancona ed Ortona in occasione del mese di novembre 1999 in cui si è verificata la mareggiata OS1 e relative misure di altezza d'onda e direzione di provenienza della boa ondometrica R.O.N. di Ancona

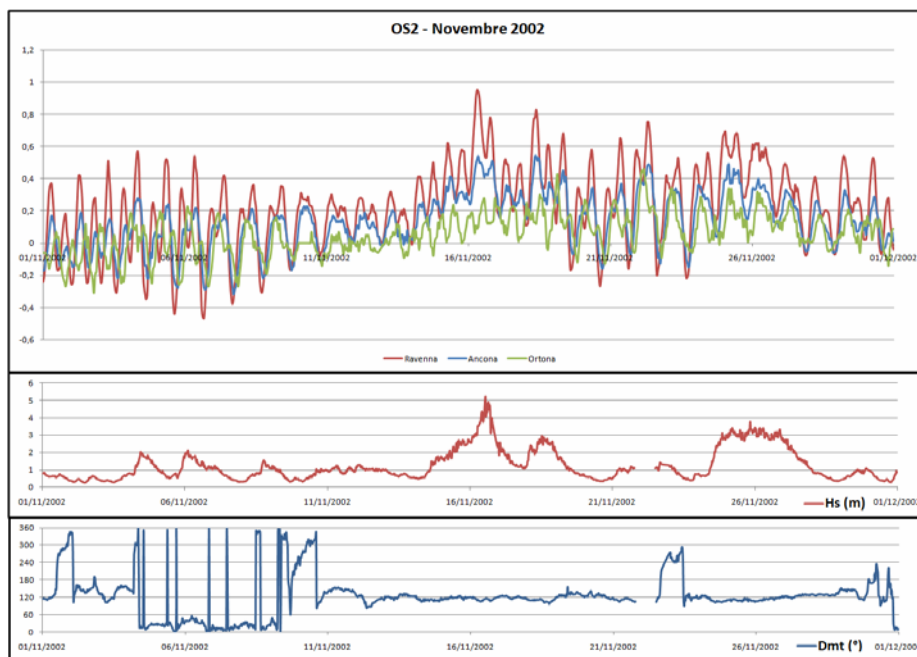


Figura 2.35 - Andamenti cronologici di confronto dei livelli medi superficiali rilevati nei porti di Ravenna, Ancona ed Ortona in occasione del mese di novembre 2002 in cui si è verificata la mareggiata OS2 e relative misure di altezza d'onda e direzione di provenienza della boa ondometrica R.O.N. di Ancona



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

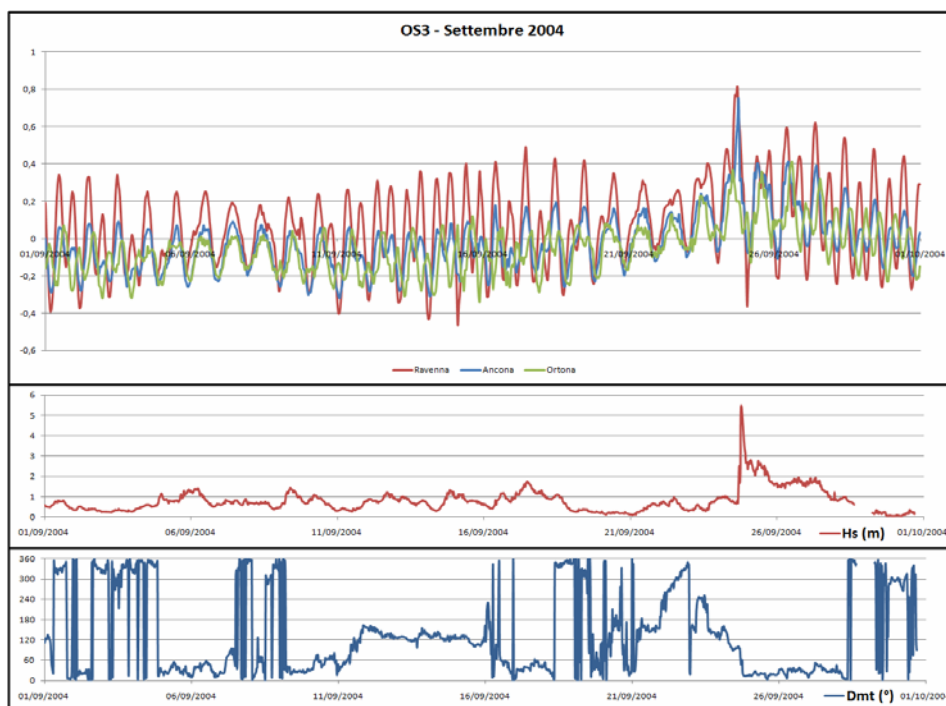


Figura 2.36 - Andamenti cronologici di confronto dei livelli medi superficiali rilevati nei porti di Ravenna, Ancona ed Ortona in occasione del mese di settembre 2004 in cui si è verificata la mareggiata OS3 e relative misure di altezza d'onda e direzione di provenienza della boa ondometrica R.O.N. di Ancona

Per completare l'analisi di questi dati in occasione delle mareggiate di provenienza meridionale sono stati acquisiti anche i dati relativi alla recente intensa mareggiata di scirocco-levante, avvenuta durante il 10-12 Dicembre 2008, di direzione prevalente ESE, come possibile confronto dei valori di sopraelevazione rilevabili in occasione di simili mareggiate, pur non disponendo in questo caso dei dati ondosi della boa di Ancona.

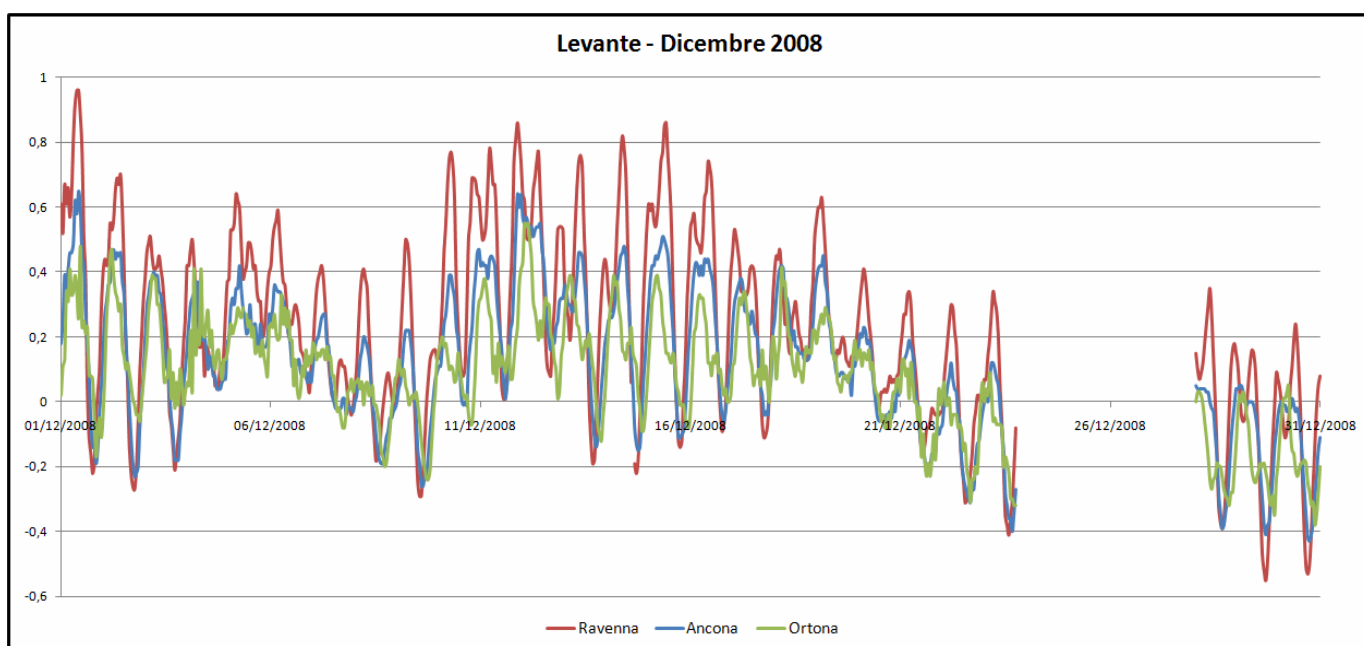


Figura 2.37 - Andamenti cronologici di confronto dei livelli medi superficiali rilevati nei porti di Ravenna, Ancona ed Ortona in occasione della intensa mareggiata da scirocco-levante accaduta il 10-12 dicembre 2008

Come ulteriore utile riferimento per tali eventi ondosi di provenienza meridionale sono inoltre disponibili le informazioni, riportate dalla società *Aquater*, su un rilievo effettuato per conto della Regione Marche, nell'ambito della redazione del *Piano di Monitoraggio e Controllo dell'Erosione Costiera (P.M.C.)* nel 1987. Viene preso in considerazione l'eccezionale fenomeno di acqua alta verificatosi fra il 31/01/1986 e il 01/02/1986, sovrapposto ad una mareggiata di intensità elevata ma inferiore ai massimi registrati. I valori massimi del livello marino registrato dai mareografi appositamente installati per la redazione del suddetto piano vanno decrescendo dai 104 cm a Pesaro, ai 92 cm di Ancona, ai 47 cm di S. Benedetto del Tronto.

Il *Servizio Meteorologico della Marina*, basandosi sui propri bollettini (non erano presenti strumenti di misura diretta), ha valutato l'intensità della mareggiata in esame con vento di forza 7-8 al largo, con direzione di provenienza ESE. Quindi si è stimata un'altezza d'onda di  $3,5 \div 4$  m.

Questa mareggiata può quindi essere confrontata con le due mareggiate provenienti da scirocco-levante (ESE) che sono state precedentemente esaminate (Novembre 2002 e Dicembre 2008): si può notare come il valore stimato dalla società *Aquater* nell'anno 1987 in Ancona sia nettamente superiore a quelli misurati nelle due mareggiate successive. Ciò conferma l'ipotesi che i dati relativi alle generiche mareggiate provenienti da scirocco-levante misurati all'interno del porto di Ancona possano, in certi casi, sottostimare i valori raggiunti dal fenomeno in mare aperto.

Sulla base di tutti i dati e i grafici descritti e delle ipotesi formulate, vengono stimate, a favore di sicurezza, le seguenti sopraelevazioni del livello marino rispetto al l.m.m. in quiete nell'area di Numana da considerare in occasione delle citate tre mareggiate individuate:

- OS1 (Nov. 1999 – provenienza ENE): 50 cm
- OS2 (Nov. 2002 – provenienza ESE): 100 cm
- OS3 (Set. 2004 – provenienza NNE): 50 cm

### 3) MODELLO NUMERICO PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSONO NEL TRASFERIMENTO DAL LARGO VERSO LA RIVA

Nel presente Capitolo si utilizza un modello numerico per il trasferimento delle tre mareggiate individuate da una profondità infinita (al largo) ad una finita (sottocosta).

Il problema della determinazione delle caratteristiche del moto ondoso in profondità finita può essere affrontato o con modelli di hindcasting che si spingono sino alla profondità assegnata, o trasferendo gli spettri del moto ondoso dal largo verso riva. Una rappresentazione dello spettro d'onda indica il contenuto energetico del mare in una mareggiata e risulta essere funzione della frequenza ( $f$ ) e della direzione ( $\theta$ ).

Lo studio dell'efficacia delle configurazioni portuali che sono messe a confronto mediante il codice di calcolo MIKE21, necessita come dato di input delle caratteristiche ondose alla profondità di chiusura del modello. Si è scelta per l'applicazione del paraggio del Porto di Numana una profondità pari a 10 m.

Un modello numerico deve necessariamente tener conto oltre che dei fattori conservativi della rifrazione e dello shoaling, dei termini dissipativi dovuti alle perdite per attrito sul fondo e al frangimento, al fine di non sovrastimare le altezze d'onda di progetto.

WISPH3 fa parte di un insieme di solutori numerici per problemi di ingegneria marittima e costiera contenuti nel pacchetto CEDAS (Coastal Engineering Design and Analysis System), una piattaforma informatica sviluppata in ambiente Windows prodotta dalla americana CHL (Coastal and Hydraulics Laboratory). Il codice, fornisce uno spettro direzionale trasferito a terra (a profondità finita) nelle condizioni di generazione di regime stazionario (indipendente dal tempo).

Le onde provenienti dai settori direzionali di greco-levante, pur già tra i più gravosi, subiscono solo modeste diminuzioni di altezza nel trasferimento dalle acque alte verso quelle di profondità finita. La direzione di provenienza risulta sostanzialmente ortogonale alla batimetria del paraggio marittimo di Numana, che si mantiene con un andamento regolare dalle acque alte fino alla profondità di circa 8 metri, avendo un orientamento ortogonale di circa  $70^\circ\text{N}$ . Le onde appartenenti a questi settori di traversia non subiscono quindi alcun effetto di rifrazione, l'abbattimento ondoso è alimentato principalmente dalla diminuzione del fondale (*shoaling*).

Per effetto della presenza del Monte Conero e della rotazione che subisce la batimetria in corrispondenza di tale promontorio, la direzione ortogonale alla riva considerata è stata assunta diversa fra le onde di provenienza settentrionale ( $45^\circ\text{N}$ ) e quelle di provenienza orientale ( $74^\circ\text{N}$ ).

#### 3.1) Lo spettro del moto ondoso

Lo spettro semplice del moto ondoso è rappresentato da una curva che riporta, in funzione della frequenza  $f$ , la densità di energia specifica contenuta dalle onde. (Vedi Figura 3.1)

L'area compresa tra la curva e l'asse delle ascisse  $f$  corrisponde all'energia specifica complessiva del moto ondoso; l'area sottesa dalla curva, a partire dalla frequenza massima (pari al 95 % dell'energia specifica totale) fino alla frequenza generica  $f$ , rappresenta l'energia compresa tra la  $f_{\max}$  e la  $f$ . La massima densità di energia specifica si ha per la frequenza di picco  $f_p$ , corrispondente al periodo di picco  $T_p=1/f_p$ .

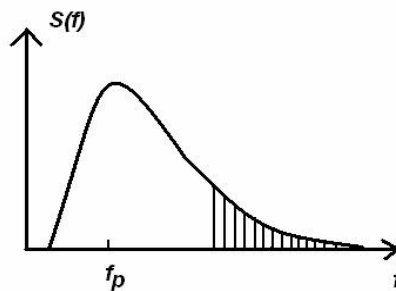


Figura 3.1 - Spettro semplice del moto ondoso



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

Lo spettro di JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), valido per uno sviluppo del mare limitato dalla lunghezza del fetch, ha l'equazione:

$$E_1(f) = \frac{0.0081g^2 f^{-5}}{(2\pi)^4} \exp\left[-1.25\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right] \gamma^r \quad \text{con} \quad (3.1)$$

$$r = \exp\left[-\frac{(f - f_m)^2}{2\sigma^2 f_m^2}\right], a = 0.076\left(\frac{U_{10}^2}{Fg}\right), \varpi_p = 22\left(\frac{g^2}{U_{10} F}\right)^{1/3} \quad \gamma = 3.3, \sigma = \begin{cases} 0.07 & \varpi < \varpi_p \\ 0.09 & \varpi > \varpi_p \end{cases} \quad (3.2)$$

Nel corso di una mareggiata, le onde non provengono da una sola, ma da molteplici direzioni: lo spettro direzionale semplice fornisce la densità di energia relativa a un intervallo  $df$  di frequenza delle onde e a un intervallo  $d\theta$  di direzione. Lo spettro cumulato, espresso in termini di energia totale, è dato da:

$$E_t = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [E_2(f, \theta)] d\theta df \quad (3.3)$$

Si fa rilevare che per le onde generate dal vento si può senz'altro ritenere che gli estremi del primo integrale varino tra  $-\pi/2$  e  $+\pi/2$  rispetto alla direzione del vento, in quanto è ragionevole pensare che esistano onde che si propagano in senso opposto rispetto a tale direzione.

### 3.2) Il trasferimento spettrale dal largo verso riva. Il codice WISPH3

Definito lo spettro delle tre mareggiate considerate, secondo il modello JONSWAP, si passa alla ricostruzione della distribuzione della densità spettrale alla profondità richiesta (10 m).

Tutti i fenomeni che si sviluppano in un processo di trasformazione ondosa dalle acque profonde a quelle più basse possono essere classificati in conservativi e non conservativi. Nei processi conservativi, qualsiasi variazione dell'energia spettrale avviene per una redistribuzione del pacchetto energetico piuttosto che per una perdita effettiva di energia (dissipazione) all'interno del sistema. Tradizionalmente, i principali processi conservativi considerati nel trasferimento ondoso dal largo verso la riva sono la rifrazione e lo shoaling. (Vedi Figura 3.2)

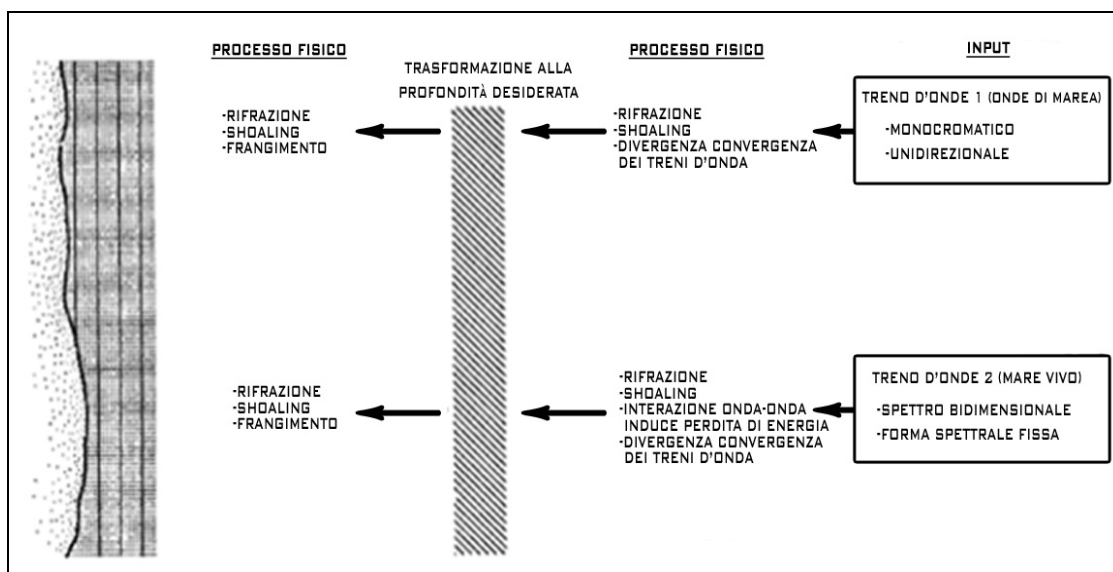


Figura 3.2 - Schema di flusso del codice WISPH3: input, trasformazione e output.

Il trasferimento ondoso dal largo verso riva, oltre che a provocare una ridistribuzione del pacchetto energetico per effetto della rifrazione, subisce gli effetti di interazione onda-fondale di natura dissipativa e non dissipativa (shoaling). Attrito al fondo, percolazione, effetti visco – elastici sono capaci di rimuovere una sensibile fetta di energia dalle onde nelle acque basse (Hsiao, 1978). Il processo dominante nel trasferimento verso le basse profondità si traduce nella condizione di frangimento, per mezzo della quale si ha una netta perdita di energia totale. Il problema della stima della perdita di energia, secondo come viene descritto da Goda (1974), si interpreta come una caduta di energia per turbolenza innescata da fenomeni vorticosi. Questo approccio complica notevolmente la stima dello spettro e generalmente si opera secondo una chiusura locale, tradotta in una troncatura dell'area spettrale nelle acque basse.

Hasselmann (1980) e Shemdin (1980) mostrano che le interazioni onda-onda possono creare un forte flusso di energia verso le alte frequenze nelle onde da shoaling. Sebbene le interazioni onda-onda sono conservative, il flusso di energia avviene nella regione in cui le onde sono instabili e dove può accadere il frangimento. Il vantaggio di questo tipo di approccio verso i processi non lineari è che la quantità predetta indica il flusso di energia all'interno di queste regioni instabili e non c'è necessità di avere informazioni sulla natura della singola onda che sia in condizioni di frangimento o di non frangimento. Non è necessario neanche riformulare una nuova legge probabilistica per le onde nelle acque basse. Il processo di trasferimento alle basse profondità non comporta delle sensibili differenze nella forma spettrale (Kitaigordiskii, 1975): nelle acque profonde la forma dello spettro segue una legge del tipo  $f^{-5}$ , nelle acque basse il corrispondente spettro a profondità finita si traduce analiticamente nella relazione:

$$E_2(f) = E_1(f)\phi(\omega_h) \quad (3.4)$$

valida per acque molto basse, dove  $\phi(\omega_h)$  è funzione della profondità.

Studi di Goda (1974), Thornton (1977), Ou (1980), Iwata (1980) e Vincent (1981) confermano la precedente equazione sulla quale si basa il processo di trasformazione spettrale del presente modello numerico.

Ottenuto lo spettro alla profondità di 10 m vengono definite le caratteristiche ondose alla profondità prestabilita di cui si riporta una tabella di sintesi:

Tabella 3.1 Caratteristiche del moto ondoso alla profondità di 10 metri, trasferite con il codice WISPH3.

	Mareggiate	<b>OS1</b>	<b>OS2</b>	<b>OS3</b>
	Direzione a largo (°N)	<b>74</b>	<b>115</b>	<b>17</b>
Parametri	Periodo (s)	8.02	9.56	9.03
	Hs largo (m)	<b>4.49</b>	<b>5.26</b>	<b>5.39</b>
	fond. largo (m)	70	70	70
	fond. riva (m)	10	10	10
	Hs riva (m)	<b>3.19</b>	<b>3.19</b>	<b>3.56</b>
	Dir. Prov. riva (°N)	<b>74</b>	<b>96.1</b>	<b>29.3</b>

#### **4) CARATTERISTICHE DELLE CONFIGURAZIONI PORTUALI PRESE IN ESAME**

Il citato gruppo progettista per la redazione del Piano Regolatore Portuale di Numana, coordinato dal Dott. Ing. Giorgio Occhipinti, dirigente della struttura regionale competente in materia di porti, ha fornito lo schema planimetrico di diverse possibili configurazioni portuali del bacino di Numana, in cui risulta presente un'unica imboccatura di ingresso al bacino.

Tali schemi sono stati discussi assieme ai progettisti per estrarre da questi le 3 configurazioni portuali (denominate rispettivamente A, B e C) da esaminare con la modellazione numerica sulla agitazione ondosa interna risultante nel bacino in occasione delle mareggiate estreme individuate per le applicazioni del presente lavoro.

Alle 3 configurazioni richieste si è poi deciso di aggiungerne una quarta (denominata D) per ampliare il ventaglio delle differenti proposte e garantire una miglior completezza di indagine.

Gli schemi planimetrici di queste 3+1 configurazioni sono stati riportati su mappe georeferenziate, per garantire un più affidabile confronto planimetrico.

In una fase successiva, in accordo con i progettisti, sono state adattate le rispettive caratteristiche delle configurazioni per omogeneizzare sia le dimensioni inerenti le diverse imboccature ed i relativi avamporti che quelle relative all'ingombro planimetrico delle strutture portuali, come le dighe di protezione. A tale riguardo si è fatto riferimento alle dimensioni, rese omogenee per tutte le configurazioni proposte, descritte sinteticamente di seguito. L'imboccatura esterna è stata portata in ogni caso all'ampiezza di 66-70m, mentre quella per cui si accede al bacino interno è stata portata a 48-50m. Qualsiasi avamporto contiene un cerchio di manovra con specchio acqueo completamente libero da opere del diametro minimo di 106-110m. L'ingombro planimetrico delle dighe di protezione esterne portuali è stato considerato largo 25-27m nella sezione corrente e 30-32m in testata.

Ovviamente tutte le suddette dimensioni, come le caratteristiche planimetriche delle stesse configurazioni, potranno essere ottimizzate in una fase successiva di approfondimento nella soluzione-configurazione che risulterà quella prescelta fra quelle molteplici messe a confronto nell'ambito del presente lavoro.

Nella fase di sviluppo delle predette operazioni di adattamento ed omogeneizzazione delle dimensioni di imboccatura e avamporto, ovviamente sono state mantenute le principali caratteristiche di impostazione generale delle configurazioni schematicamente proposte dai progettisti, come in particolare la tipologia e l'esposizione marittima dell'imboccatura e dell'avamporto, nonché la loro posizione rispetto al bacino.

Al termine di queste fasi di sviluppo e di adattamento sono risultate da mettere a confronto le configurazioni le cui caratteristiche si descrivono brevemente nel dettaglio nei paragrafi di seguito, analizzandone una per volta.

Una considerazione risulta valida in maniera generale e per tutte le configurazioni individuate: l'attuale bocca meridionale del porto è risultata chiusa in tutte le ipotesi di sistemazione. Ciò viene fatto non per motivi prettamente marittimi di esposizione o di navigazione, ma in quanto aperta verso il litorale della spiaggia bassa di Numana Bassa e Marcelli e quindi risulta naturalmente quella più predisposta a permettere il massiccio ingresso nel bacino portuale dei materiali solidi sedimentari trasportati lungo la spiaggia dal processo dinamico dei litorali. Infatti nel litorale in questione la direzione prevalente del trasporto solido lungocosta risulta appunto procedere da Sud verso Nord. La raccolta di tali massicce quantità di sedimenti nel bacino portuale, agevolata appunto dalla presenza della bocca aperta a meridione, conduce a negative conseguenze nel mantenimento dei fondali portuali, quindi una delle prescrizioni principali per individuare le idonee configurazioni portuali è stata proprio quella di cercare di evitare tale massiccio, sconsigliato apporto solido nel bacino, con periodiche e frequenti deleterie ripercussioni nella funzionalità portuale.

#### 4.1) Configurazione A

Con la chiusura della bocca meridionale il bacino interno risulta inalterato nelle forme e dimensioni. Viene realizzato un classico avamposto a moli convergenti in corrispondenza della zona settentrionale del bacino, appena al di fuori della attuale bocca settentrionale. L'imboccatura risulta aperta alla direzione di  $97^{\circ}\text{N}$  e lo specchio acqueo dell'avamposto ha la forma di una sorta di ellisse contenente due cerchi liberi del diametro di  $110\text{m}$  ognuno, semisovrapposti con distanza dei centri di circa  $26\text{m}$  in linea con la predetta direzione di esposizione della apertura esterna. La bocca interna è ricavata ampliando quella settentrionale attuale. Il bacino interno risulta aperto all'ingresso diretto delle ondatazioni provenienti dal settore direzionale compreso fra i  $46^{\circ}\text{N}$  ed gli  $89^{\circ}\text{N}$ . La planimetria di tale configurazione A è riportata nella Figura 4.1.

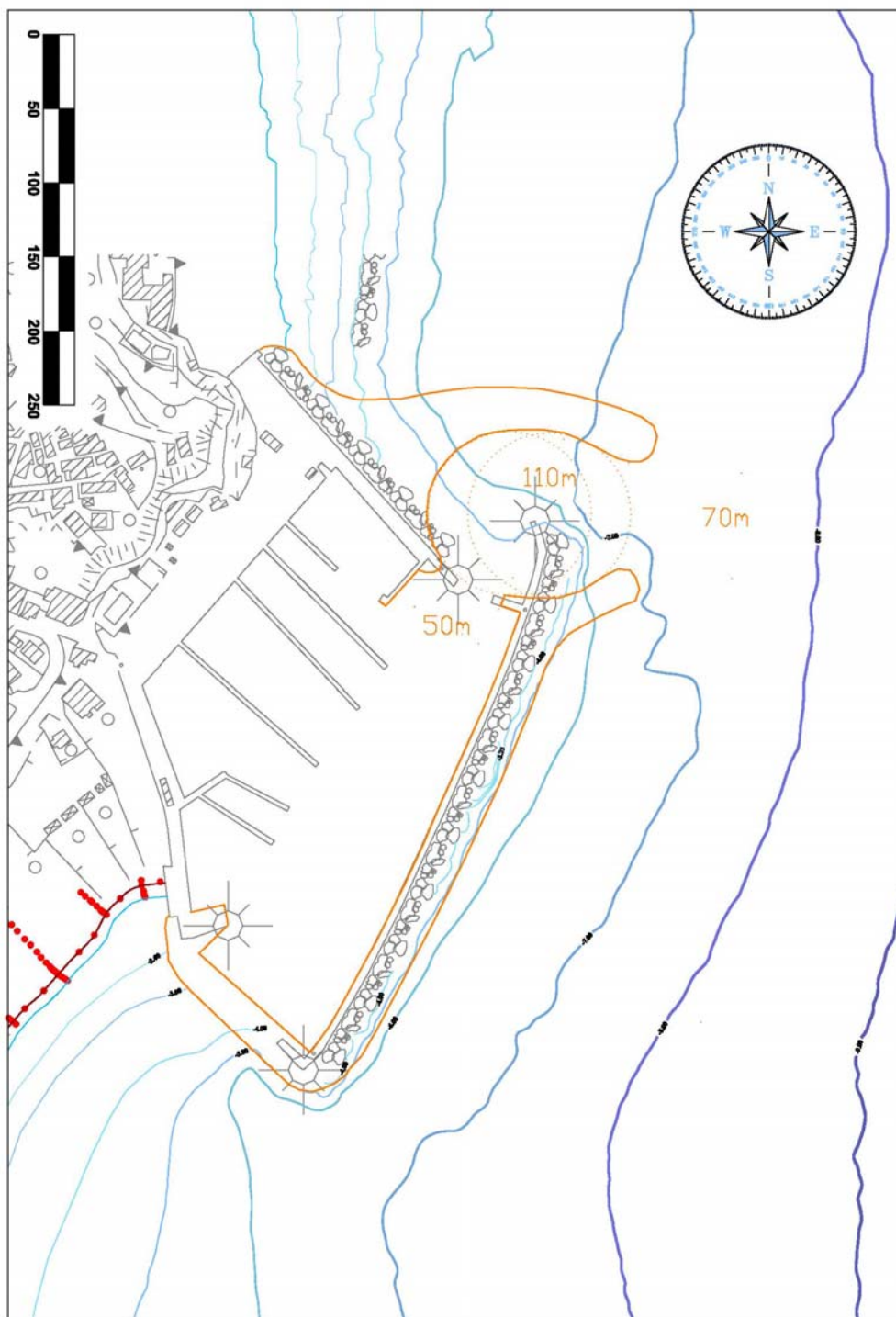


Figura 4.1 – Planimetria del porto di Numana attuale con l'inserimento della configurazione A

#### 4.2) Configurazione B

La bocca meridionale viene chiusa ed il bacino interno viene parzialmente ampliato nella zona settentrionale orientando la diga di protezione dall'attuale radice fino alla testata della attuale diga foranea presente. Viene aperto un varco nel tratto centrale della stessa diga foranea fra circa 100m e 150m dalla sua testata meridionale, per costituire la bocca al bacino interno. Viene realizzato un classico avamposto a bacino protendendosi in aggetto circa 150m al largo della stessa diga foranea attuale. L'imboccatura risulta aperta alla direzione settentrionale di  $28^{\circ}\text{N}$  e lo specchio acqueo dell'avamposto contiene un cerchio libero di manovra del diametro di circa 106m. Il bacino interno risulta aperto all'ingresso diretto delle ondatazioni provenienti dal settore direzionale compreso fra i  $62^{\circ}\text{N}$  ed i  $97^{\circ}\text{N}$ . La planimetria di tale configurazione B è riportata nella Figura 4.2.

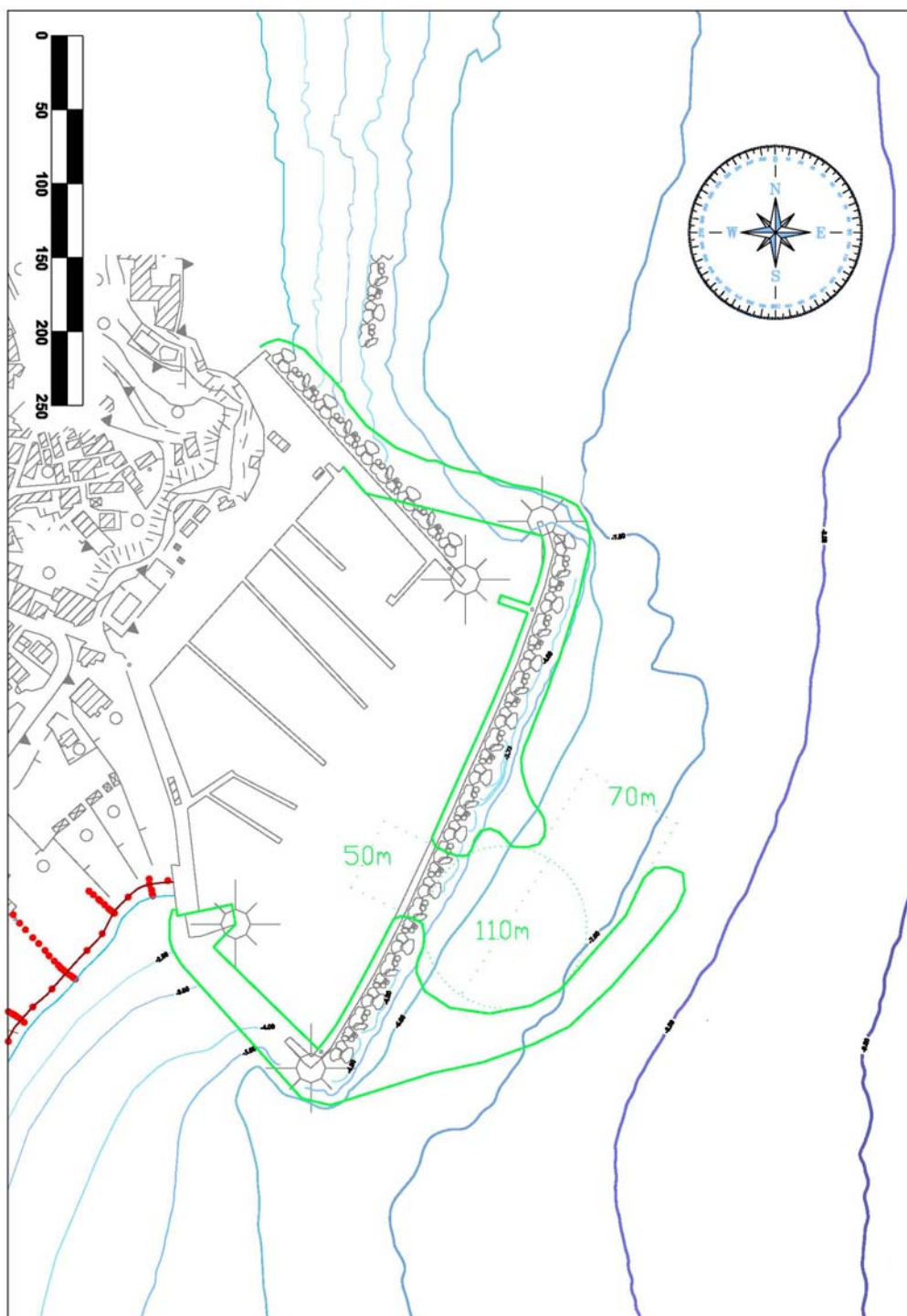


Figura 4.2 – Planimetria del porto di Numana attuale con l'inserimento della configurazione B

### 4.3) Configurazione C

Come nella configurazione precedente anche in questo caso la bocca meridionale viene chiusa ed il bacino interno viene parzialmente ampliato nella zona settentrionale orientando la diga di protezione dall'attuale radice fino alla testata della attuale diga foranea presente. In questo caso il bacino interno risulta parzialmente ridotto nella parte meridionale, per far posto ad una parte dell'avamposto. Infatti la diga di chiusura della bocca meridionale risulta di forma curvilinea e prosegue con raggio di curvatura minore in aggetto dalla testata della diga foranea attuale ad abbracciare e confinare in protezione l'avamposto, previsto quindi in questa zona. La costituzione di questo avamposto richiede la necessaria demolizione del tratto dei primi 100m circa meridionali della diga foranea attuale. Viene realizzato un classico avamposto a bacino. L'imboccatura risulta aperta alla direzione di  $57^{\circ}\text{N}$  e lo specchio acqueo dell'avamposto assume la forma di una sorta di grande otto contenente due cerchi liberi e disposti praticamente uno successivamente all'altro (la sovrapposizione è ridotta a circa 10m) quasi in linea con la predetta direzione di esposizione dell'imboccatura esterna. Essi hanno il diametro di 90m quello più esterno e di 110m quello più interno. Il bacino interno risulta molto protetto, infatti risulta aperto all'ingresso diretto delle ondatazioni provenienti dalla sola direzione dei  $110^{\circ}\text{N}$ . La planimetria di tale configurazione C è riportata nella Figura 4.3.

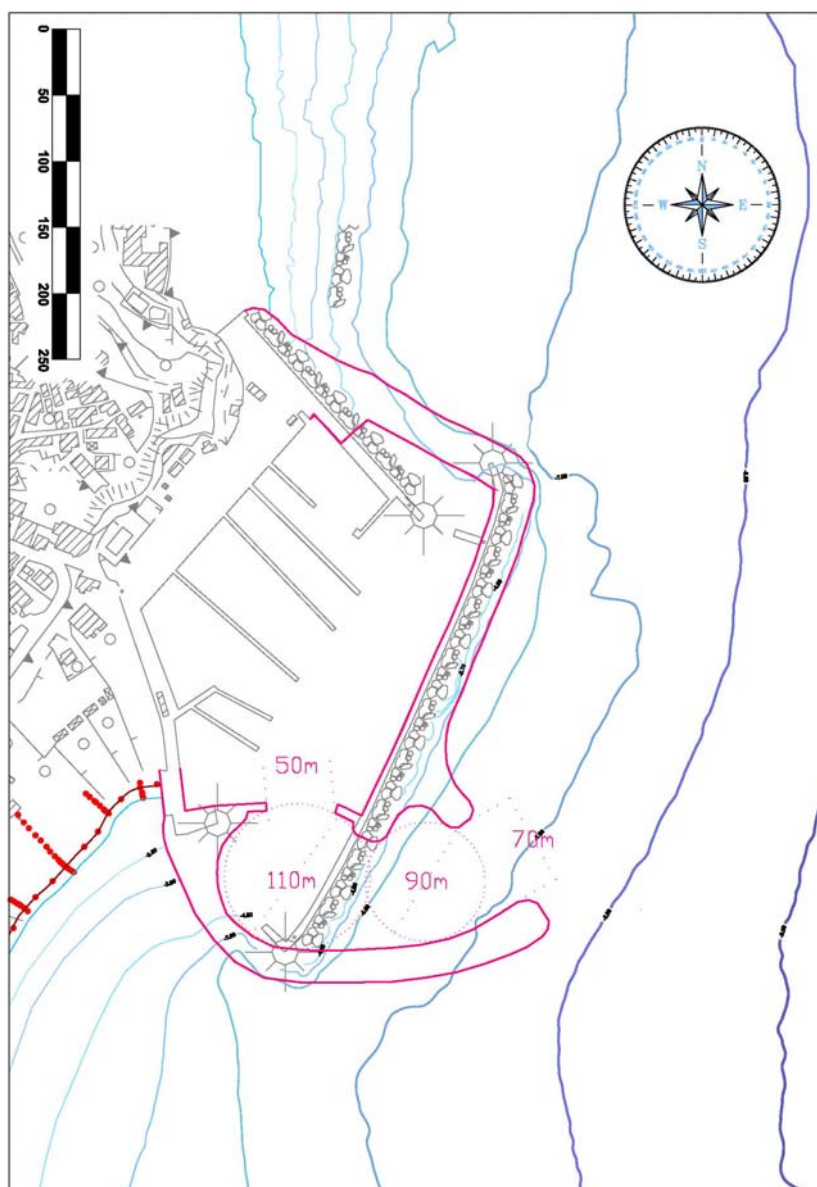


Figura 4.3 – Planimetria del porto di Numana attuale con l'inserimento della configurazione C



#### 4.4) Configurazione D

Come la prima configurazione presa in esame, questa soluzione comporta un ridotto intervento strutturale sulle opere attualmente presenti. Con la chiusura della bocca meridionale il bacino interno risulta inalterato nelle forme e dimensioni. Viene realizzato un classico avamposto a bacino in corrispondenza della zona settentrionale portuale, appena al di fuori della attuale bocca settentrionale. L'imboccatura risulta aperta alla direzione di  $357^{\circ}\text{N}$  e lo specchio acqueo dell'avamposto contiene un cerchio completamente libero del diametro di 110m. La bocca interna è prevista ricavata ampliando quella settentrionale attuale, ma, in una eventuale fase successiva di ottimizzazione, essa può essere prevista più a ridosso del suddetto cerchio di manovra, per garantire la protezione più efficace del bacino interno dall'agitazione ondosa ed anche per consentire di ampliare il bacino interno a favore del numero di ormeggi ricavabili. Il bacino interno risulta aperto all'ingresso diretto delle ondate provenienti dal settore direzionale settentrionale compreso fra i  $342^{\circ}\text{N}$  ed  $26^{\circ}\text{N}$ . La planimetria di tale configurazione D è riportata nella Figura 4.4.

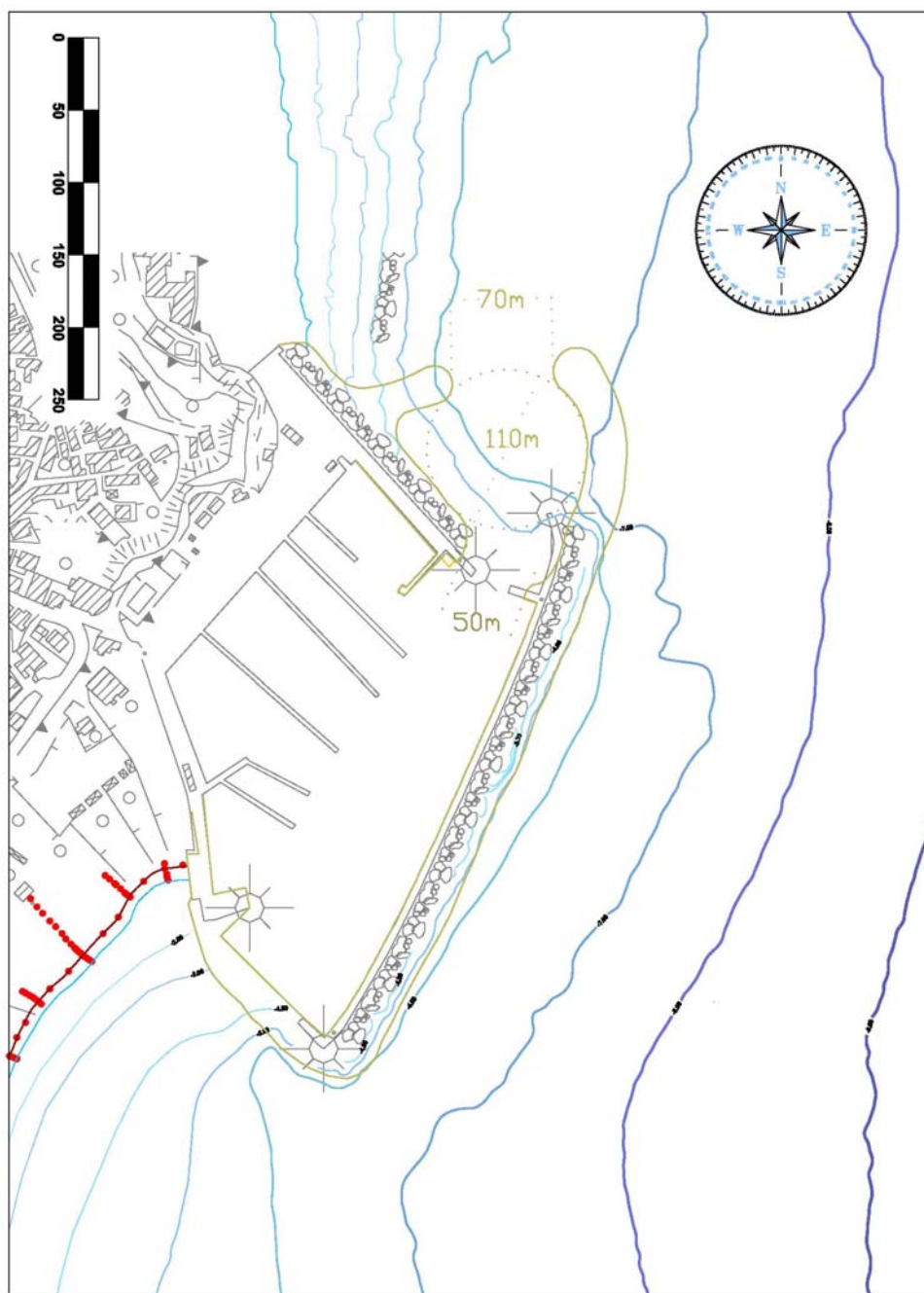


Figura 4.4 – Planimetria del porto di Numana attuale con l'inserimento della configurazione D

## 5) AGITAZIONE ONDOSA ALL'IMBOCCATURA DEL PORTO DI NUMANA

### 5.1) Introduzione

La validità di una soluzione progettuale per l'ampliamento di un bacino portuale dipende principalmente dal grado di protezione offerto dalle strutture portuali in presenza di moto ondoso nei riguardi delle imbarcazioni sia in fase di accesso al porto che in condizioni di ormeggio. Per analizzare il moto ondoso trasmesso dai moli del porto occorre studiare un problema di propagazione del moto ondoso in acque basse o intermedie in presenza di tutti i fenomeni di modifica del moto ondoso, quali rifrazione, frangimento, riflessione e diffrazione, ecc. La soluzione di questo problema complesso è generalmente affidata a due tipi di soluzioni approssimate: la modellazione di tipo fisico e quella di tipo numerico. La possibilità di disporre di entrambe rappresenta ovviamente la condizione ottimale, in quanto ognuna delle due, presa singolarmente, presenta pregi e difetti. Lo studio mediante modello fisico offre il vantaggio di una soluzione più simile al vero, ma presenta possibili errori legati ad effetti scala e/o di laboratorio e comporta un notevole investimento economico. Dall'altra parte l'utilizzo della modellazione matematica offre la possibilità sia di un minor costo dello studio che di modificare più facilmente le condizioni da provare. Tuttavia tutti i modelli matematici presentano comunque una soluzione approssimata, più o meno raffinata, a causa della schematizzazione utilizzata per risolvere le equazioni matematiche descrittive della fisica del problema.

Lo studio dell'agitazione ondosa del porto di Numana effettuato nella presente Convenzione è stato condotto mediante utilizzo di modello matematico di tipo commerciale MIKE 21 BW.

### 5.2) Codice di calcolo MIKE 21 BW

Il codice di calcolo MIKE 21 è stato realizzato dal Danish Hydraulic Institute Water & Environment sulla base di esperienze di applicazioni di modelli numerici di simulazione sviluppati su un periodo di oltre 20 anni.

È un software per la simulazione delle correnti a pelo libero con schema bidimensionale, applicabile in uguale maniera all'ambiente fluviale e a quello marino. Il MIKE 21 può essere usato per la simulazione di fenomeni legati all'idraulica in fiumi, laghi, estuari, baie, aree costiere e mari, potendo considerare il trasporto solido, la qualità delle acque, la propagazione delle onde, lo spargimento di oli, il trasporto di sedimenti e altro.

Il codice MIKE 21 ha una struttura modulare con quattro ambienti di applicazione principali, che comprendono i relativi moduli di applicazione: nel nostro studio è stato utilizzato il modulo BW (*Boussinesq Wave*) per determinare la propagazione in acque basse ed intermedie di onde irregolari corte o lunghe, condizione tipica delle aree portuali.

Il codice MIKE 21 BW contiene due sotto-moduli di calcolo basati sulla soluzione numerica delle equazioni di Boussinesq per la determinazione e l'assegnazione di onde dinamiche nei porti e nelle aree costiere. Queste equazioni includono la non linearità e la dispersione di frequenza.

Fondamentalmente, la distribuzione di frequenza è introdotta nell'equazione della quantità di moto tenendo in considerazione gli effetti dell'accelerazione verticale sulla distribuzione della pressione. Entrambi i sotto-moduli risolvono le equazioni di Boussinesq usando una formulazione di flussi con sviluppo lineare delle caratteristiche di dispersione. Le equazioni di Boussinesq modificate (originariamente derivate da Madsen et al, [1991], e Madsen e Sørensen, [1992]) costruiscono i moduli adatti per la simulazione della propagazione di treni di onde direzionali che si propagano da acque profonde ad acque basse.

In questo modello sono ben descritte la generazione e la distribuzione di basse frequenze di energia dovute alle principali trasformazioni delle onde. Il modello è capace di riprodurre gli effetti combinati di più fenomeni d'onda in ambito costiero e nell'ingegneria portuale includendo rifrazione, diffrazione e riflessione parziale di onde corte irregolari e onde lunghe di ampiezza limitata che si propagano su batimetrie complesse.



MIKE 21 BW include la porosità per la simulazione di parziale riflessione e/o trasmissione attraverso banchine e frangiflutti e la generazione interna di onde uni-direzionali e direzionali. Gli strati assorbenti sono applicati quando è richiesto il completo assorbimento dell'energia delle onde. MIKE 21 è affiancato da numerose procedure o "utility", quale ad esempio, il modulo MIKE ZERO (PP - Pre e Post Processing) sviluppato per alleggerire il lavoro di inserimento dei dati di input, l'analisi e la presentazione dei risultati delle simulazioni.

L'applicazione del codice di calcolo richiede la definizione preliminare dei seguenti dati di ingresso per il corretto funzionamento del modello:

- la batimetria della zona;
- le condizioni al contorno;
- le caratteristiche delle strutture portuali;
- la condizione iniziale;
- le caratteristiche delle onde incidenti.

### *5.2.1) Definizione della batimetria*

Il primo passo per l'utilizzo del MIKE 21 è rappresentato dalla definizione della batimetria dell'area da modellare e conseguentemente si è proceduto alla raccolta di tutte le informazioni disponibili riguardanti la zona di mare sottocosta antistante il porto di Numana. È stato possibile raccogliere dati sia in formato cartaceo che in formato digitale. I dati in formato cartaceo sono rappresentati dalla carta nautica dell'Istituto Idrografico della Marina relativa a "Dalla foce del Tronto ad Ancona" (n° 35 – scala 1:100.000) aggiornata al 2004 (Vedi Figura 5.1) e "Indagini e studi meteomarini per il tratto di costa compreso tra i porti di Ancona e Numana" (Ufficio del Genio Civile OO.MM- Ancona) realizzato dalla ditta Estramed nel Febbraio del 1992. I dati in formato digitale sono rappresentati da un rilievo batimetrico relativo alla zona che va dal molo nord del porto di Numana al litorale di Marcelli realizzato dalla Geomarine per la nostra struttura universitaria nella primavera del 2006 (Vedi Figura 5.2a) ed alla zona delle imboccature portuali effettuato dall'Ufficio Tecnico del Comune di Numana per il gruppo dei progettisti nell'estate del 2008 (vedi Figura 5.2b).

Per quanto riguarda i dati cartacei si è proceduto con la scansione e la georeferenziazione delle carte nautiche e successivamente con una digitalizzazione dei punti batimetrici riportati su di esse. Data la limitata estensione delle carte, nessuna delle quali copriva l'intera area di studio completamente, si è proceduto ad una interpolazione di tutti i dati acquisiti.

Come si può notare i dati a disposizione sono caratterizzati da una disomogeneità abbastanza evidente tra i diversi insiemi, la quale deve essere tenuta presente in sede di interpolazione per la costruzione del reticolo di calcolo.

Il reticolo di calcolo per il modello numerico è stato definito da una maglia quadrata di passo  $\Delta x = \Delta y = 5m$  ed è stato costruito tramite il software *3D-Analyst* di *ArcView*, utilizzando la tecnica di interpolazione delle distanze inverse pesate (IDW).

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

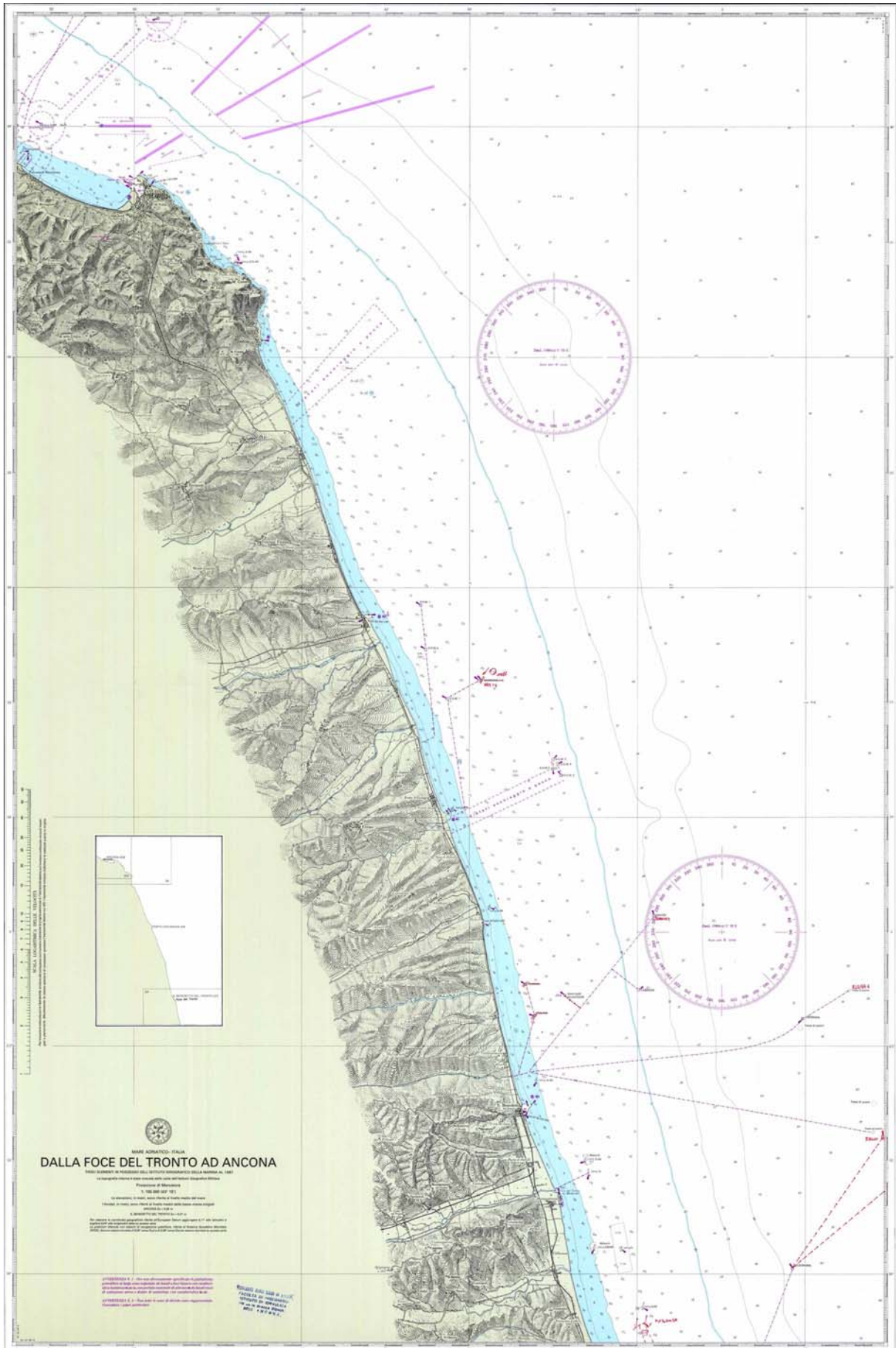


Figura 5.1 - Carta nautica del Mare Adriatico dalla foce del Tronto ad Ancona

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

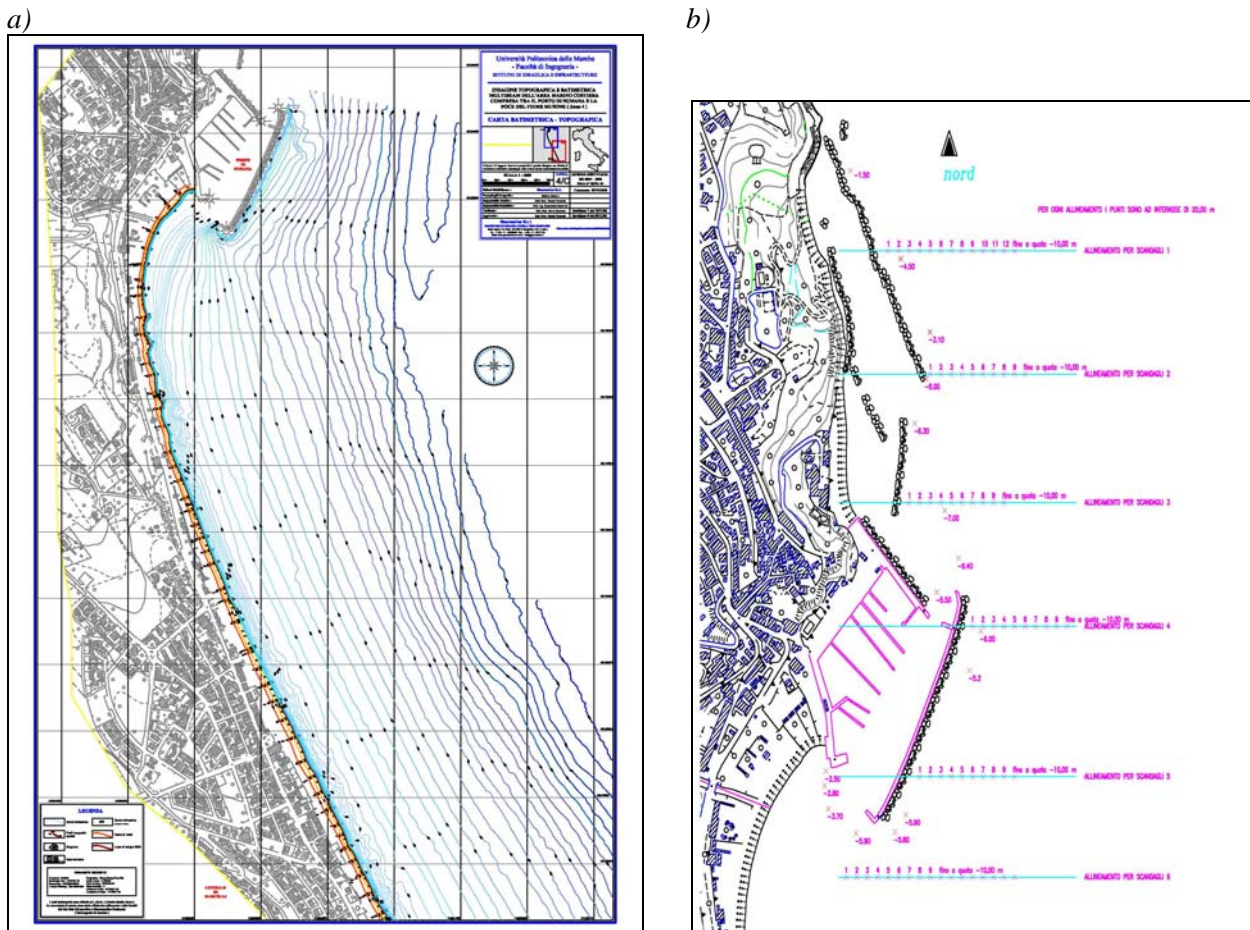


Figura 5.2 - Rilievo batimetrico del porto di Numana: a) Rilievo Geomarine (2006); b) Rilievo Comune di Numana (2008)

### 5.2.2) Selezione dell'area da modellare e del passo di integrazione temporale

Nella scelta dell'area da modellare con il codice MIKE 21 BW si deve tener conto della zona di interesse, dell'inclinazione del modello rispetto ai treni di onde incidenti ed il tipo di condizioni al contorno.

La scelta della dimensione della griglia spaziale e del passo di integrazione temporale dipende dalle condizioni ondose che si vogliono simulare e dalla profondità dell'acqua nell'area del modello. In sintesi si deve tener presente che:

- il rapporto tra la massima profondità dell'acqua e la lunghezza d'onda in acque profonde deve essere inferiore a 0.22 per poter applicare le equazioni classiche di Boussinesq ed inferiore a 0.55 per l'applicazione delle equazioni modificate;
- la dimensione della griglia spaziale deve tener conto della più piccola lunghezza d'onda. Per molte applicazioni 2DH sono sufficienti 7-10 punti griglia per lunghezza d'onda;
- il passo temporale deve tener conto del più piccolo periodo d'onda. Generalmente per le equazioni classiche sono richiesti 8-10 passi temporali per periodo d'onda mentre 25-35 passi per periodo d'onda sono necessari se si devono utilizzare le equazioni modificate;
- il numero di Courant deve essere inferiore ad 1. Per una efficiente determinazione del numero di Courant si può usare il MIKE 21 BW Model Setup Planner incluso nel On-line Help. Nella Figura 6.4 viene riportato un esempio di applicazione svolto nel presente studio.

Nel caso oggetto della presente Convenzione il rispetto di tutte le condizioni precedentemente elencate ha condotto alla scelta di un passo temporale pari a 0.2s ed un passo spaziale di 2m.



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

La nuova griglia di calcolo è stata realizzata tramite l'applicazione "Bathymetry" di MIKE ZERO a partire dai dati del reticolo ottenuti in precedenza. Il risultato è mostrato in Figura 5.3 e Figura 5.4.

**MIKE 21 BW Model Setup Planner**

**Define your model**

Max. water depth (m)

Min. water depth (m)

Model extent in X-direction (m)

Model extent in Y-direction (m)

Percentage of water points (%)

Max. distance for waves to propagate (m)

Time required for calculation of statistics (minutes prototype time)

Computational points per CPU second <sup>2)</sup>

Spectral peak period (s)

Exclude wave breaking/moving shoreline  
 Include wave breaking/moving shoreline

**Calculate simulation period**

**A: Total simulation time**

Total time required for simulation (minutes prototype time) <sup>3)</sup>

**Legend:** OK Not OK

**Notes:**

1) The MIKE 21 BW Model Setup Planner is based on the step-by-step procedure shown [here](#).

2) The computational points per CPU second can be found at the end of the run log file.

**Calculate and check/evaluate  $T_{min}$ , dx and dt <sup>1)</sup>**

Upper limits	Classical eq.	Enhanced eq.
Min. wave period, $T_{min}$ (s)	5.4	3.58
Max. spatial resolution, dx (m)	3.26	2.02
Max. time step, dt (s)	0.329	0.102

**Own suggestion**

Min. wave period, $T_{min}$ (s)	5.4	3.58
Spatial resolution <sup>4)</sup> , dx (m)	2	2.02
Time step, dt (s)	0.2	0.102

**Check/evaluation of selected  $T_{min}$ , dx and dt**

Max. ratio $h/L_D$ for $T_{min}$	0.2194	0.4992
Max. ratio $h/L_D$ for $T_p$	0.0196	0.0196
Min. ratio $L/dx$ for $T_{min}$	11.413	7.0296
Min. ratio $L/dx$ for $T_p$	17.490	17.317
Ratio $T/dt$ for $T_{min}$	27	35.098
Ratio $T/dt$ for $T_p$	40.3	79.019
Max. Courant Number	0.9909	0.5003
Estimated CPU time (hours)	8.1595	15.684
Estimated RAM (MB)	55.639	54.662

Figura 5.3 - MIKE 21 BW Model Setup Planner per il numero di Courant

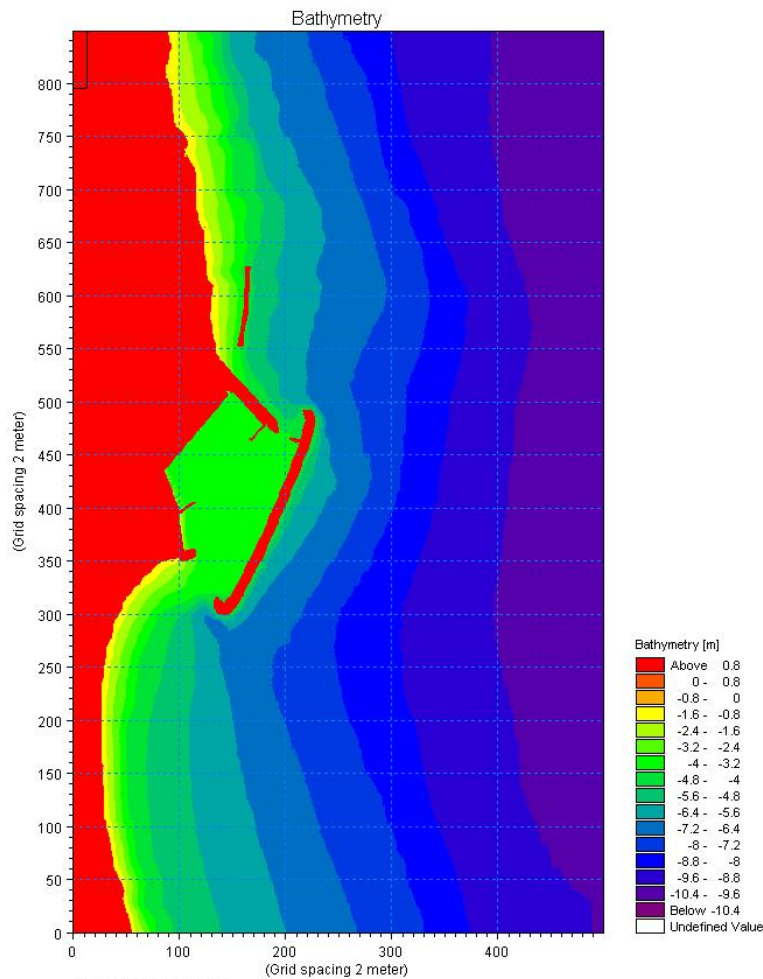


Figura 5.4 - Planimetria del porto di Numana per MIKE 21 BW

### *5.2.3) Condizioni al contorno*

Il codice MIKE 21 BW può schematizzare i limiti del dominio di calcolo come contorni aperti o come contorni chiusi. I contorni aperti sono posti generalmente in corrispondenza di una linea di delimitazione in acqua, mentre quelli chiusi sono posti al limite tra acqua e terra. Il modello considera il contorno aperto come completamente riflettente e quindi non in grado di simulare la condizione “radiativa”, cioè del contorno del modello capace di assorbire le onde in uscita dall’area di simulazione. Il contorno chiuso è invece capace di modellare la condizione di assorbimento tramite la definizione di un fascia di strati assorbenti disposti lungo il bordo del modello, in cui viene simulata la dissipazione del flusso per filtrazione attraverso un mezzo poroso.

Nello studio oggetto della presente Convenzione si è scelto di utilizzare per l’area da modellare un contorno chiuso reso assorbente da un numero di 20 strati.

### *5.2.4) Caratteristiche delle strutture portuali*

In maniera simile al trattamento della condizione di assorbimento lungo i contorni chiusi, il modello può simulare il comportamento di strutture costiere o portuali riflettenti o parzialmente assorbenti tramite l’inserimento lungo il bordo delle strutture di una serie di strati porosi. Il coefficiente di porosità deve essere scelto in modo di riprodurre il desiderato grado di riflessione delle strutture.

I moli del porto di Numana sono stati schematizzati in generale come strutture parzialmente assorbenti. Si è scelto di riprodurre un diverso comportamento alla riflessione del lato esterno delle strutture rispetto a quello interno per poter considerare l’eventualità del banchinamento dei moli. In particolare si è scelto di riprodurre due diverse configurazioni caratterizzate la prima da un coefficiente di riflessione del 40% sul lato esterno e del 100% su quello interno per le strutture portuali, mentre la seconda, che riguarda la scogliera frangiflutti adiacente il porto, si è scelto un coefficiente di riflessione pari al 40% sia per il lato mare che per il lato terra.

### *5.2.5) Condizione iniziale*

La condizione iniziale scelta è quella di superficie libera in quiete, trascurando le oscillazioni dovute alle maree. E’ stato considerato ai fini delle simulazioni, una sopraelevazione media del livello superficiale di 50 cm per le mareggiate da Greco-Levante (OS1) e Bora (OS3), mentre un sovrizzo di 1 m per la mareggiata da Scirocco-Levante (OS2).

### *5.2.6) Dati ondosi*

Nello studio oggetto della presente Convenzione si è scelto di disporre la linea di generazione ondosa in corrispondenza della linea batimetrica  $-10m$  perché caratterizzata da una maggiore regolarità e parallelismo rispetto alla linea di costa.

Rispetto alle onde individuate con il modello di trasferimento a riva, lo studio dell’agitazione interna è stato condotto considerando le agitazioni ondose OS1, OS2 ed OS3. Per quanto riguarda le direzioni di provenienza sulla linea di generazione, sono state studiate le onde con angolo di  $74^{\circ}N$ ,  $96^{\circ}N$  e  $29^{\circ}N$  rispettivamente per le tre mareggiate considerate.

Nel modello sono state simulate onde di tipo spettrale, per riprodurre una mareggiata avente le medesime caratteristiche per un periodo di 25 minuti. La durata della simulazione è stata scelta dopo una serie di prove preliminari per verificare il raggiungimento della condizione stazionaria.

## **5.3) Risultati del modello**

I risultati delle simulazioni effettuate con il codice MIKE 21 BW consistono essenzialmente sulla distribuzione in ogni nodo della griglia di calcolo del valore mediato sulla verticale della profondità totale dell’acqua e delle componenti di flusso nelle due direzioni di moto. La Figura 5.5 rappresenta un esempio di mappa planimetrica dell’elevazione della superficie libera del mare calcolata all’istante finale di una simulazione ed è utile per avere un’idea qualitativa generale dei fenomeni di riflessione e diffrazione che le onde subiscono per la presenza della struttura portuale.

Questi dati possono essere ulteriormente elaborati per avere dell'informazioni più idonee, anche dal punto di vista quantitativo, alla rappresentazione del problema in studio. In particolare per l'analisi dell'agitazione ondosa in corrispondenza delle diverse configurazioni del Porto di Numana sono stati ricavati due tipi di risultati:

- il valore dell'altezza d'onda significativa nella zona portuale;
- la distribuzione planimetrica del coefficiente di diffrazione nella zona portuale.

Il coefficiente di diffrazione nei punti del reticolo di calcolo viene calcolato come rapporto tra l'altezza significativa nel punto e quella calcolata fuori dall'imboccatura portuale, ad una profondità di 7m. Ricordando il significato statistico dell'onda significativa, la mappa del coefficiente di diffrazione può essere calcolata in diversi istanti della simulazione. Nel caso in esame, dopo aver testato la stabilità del valore dell'altezza significativa, si è calcolato il coefficiente in questione al termine della simulazione. Esse possono essere interpretate come la rappresentazione del disturbo d'onda nell'area del modello per la presenza delle strutture portuali e sono in grado di fornire un'idea immediata del grado di protezione offerto dalla configurazione planimetrica del porto rispetto alle diverse condizioni ondose. Le mappe prodotte per le 3 condizioni ondose e per le soluzioni proposte sono riportate nelle Figure dalla 5.6 alla 5.35.

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

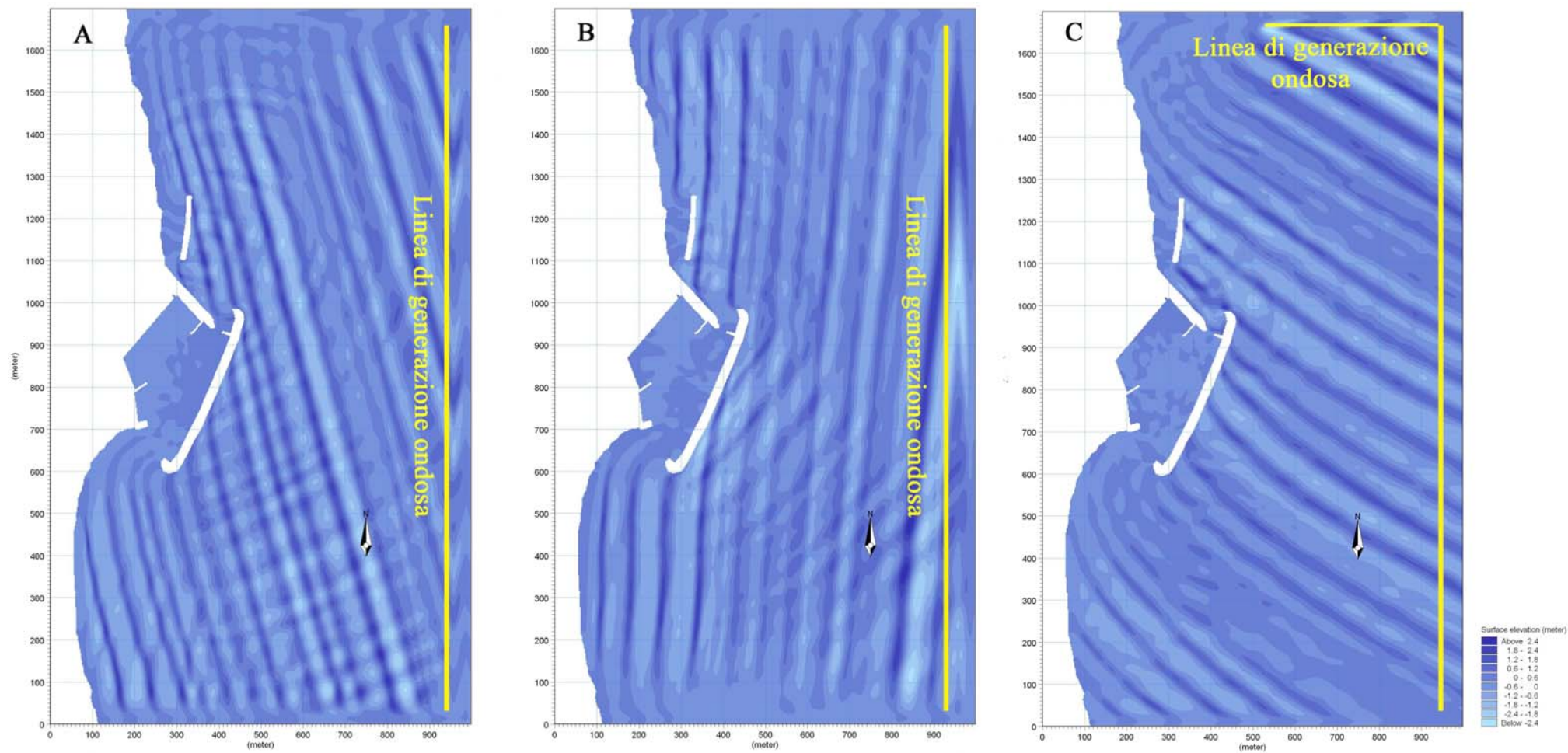


Figura 5.5 - Mappa dell'elevazione della superficie libera: A: Mareggiata OS1; B: Mareggiata OS2; C: Mareggiata OS3



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

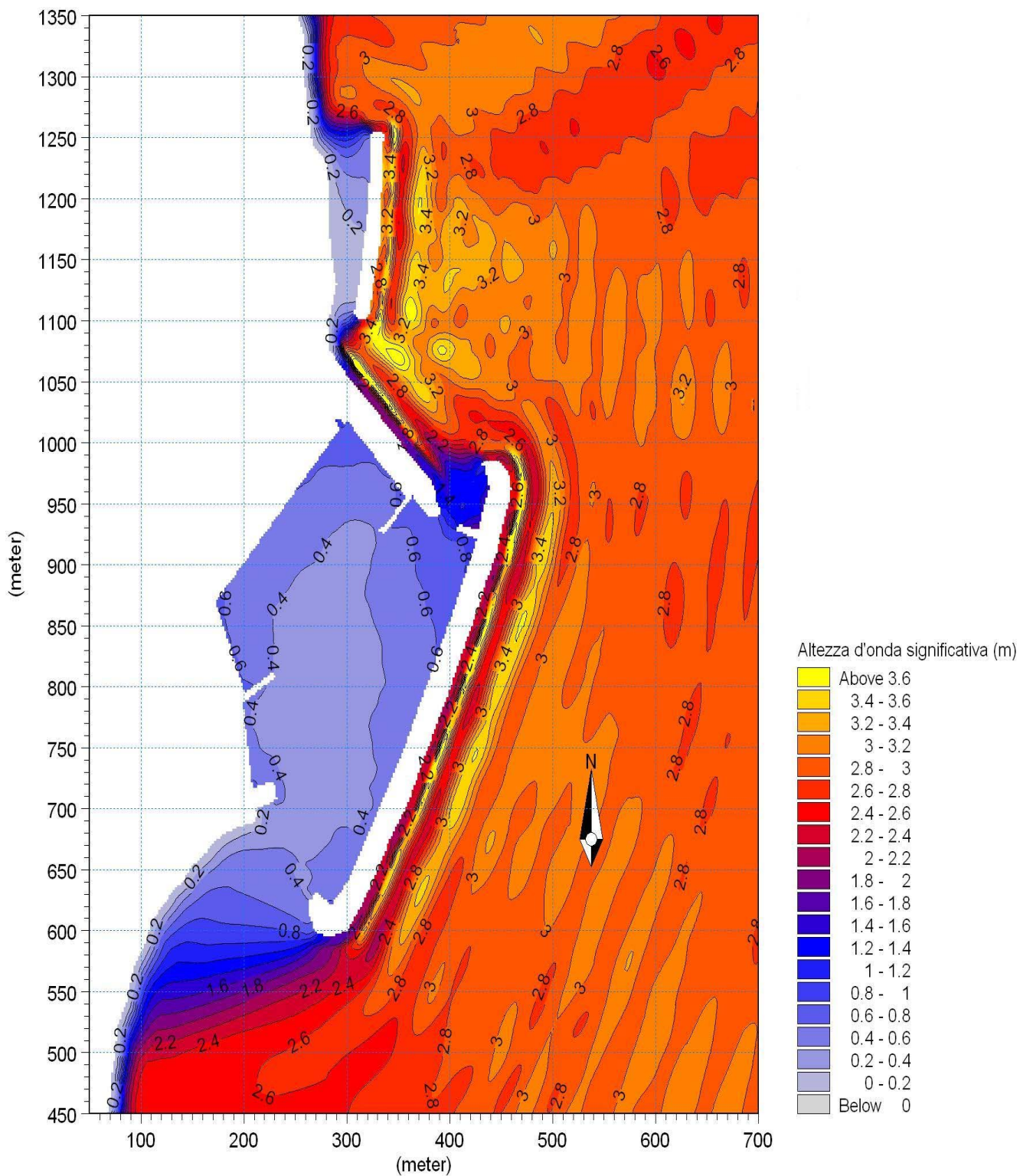


Figura 5.6 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione 0 - Mareggiata OSI



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

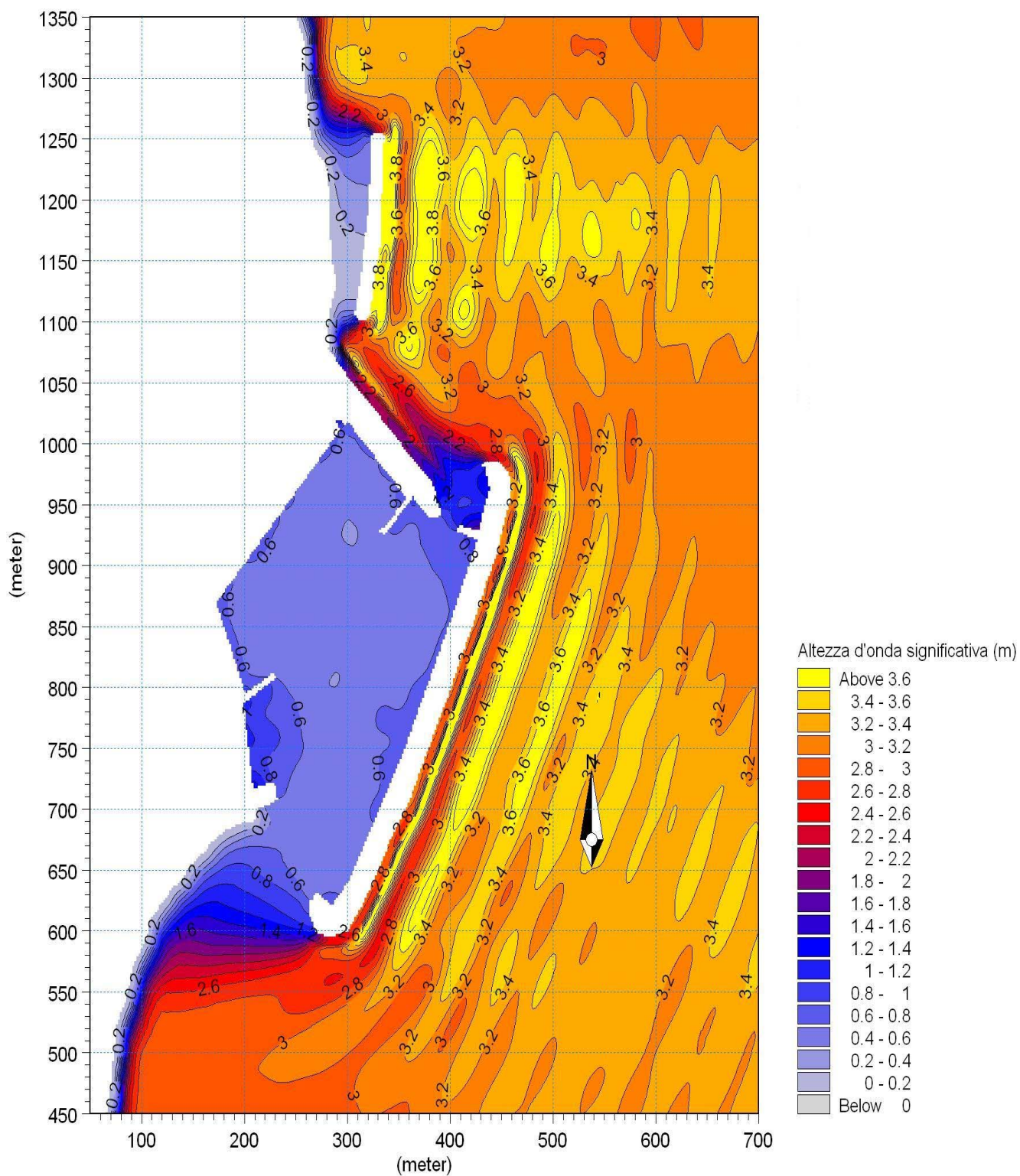


Figura 5.7 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione 0 - Mareggiata OS2

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

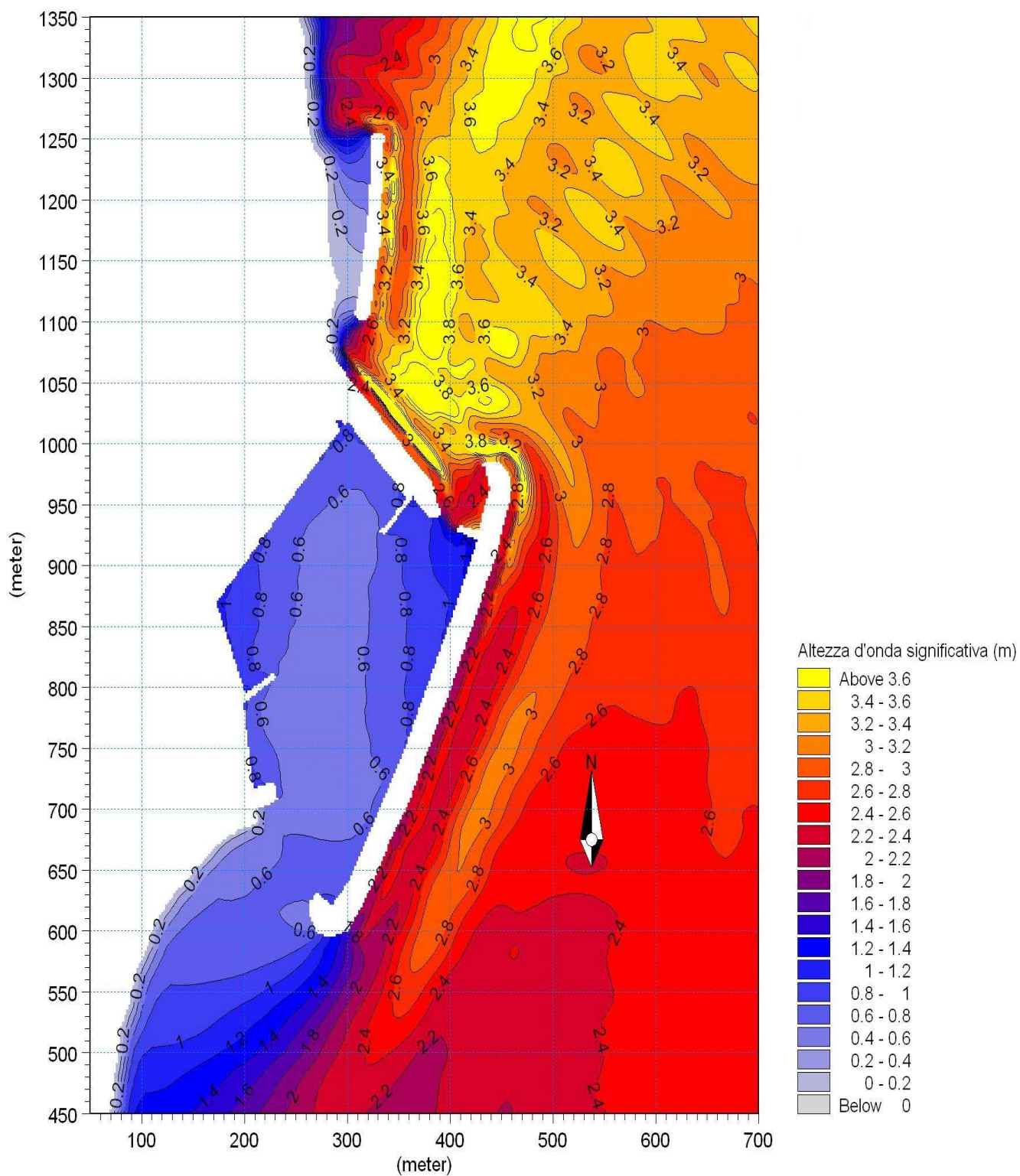


Figura 5.8 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione 0 - Mareggiata OS3



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

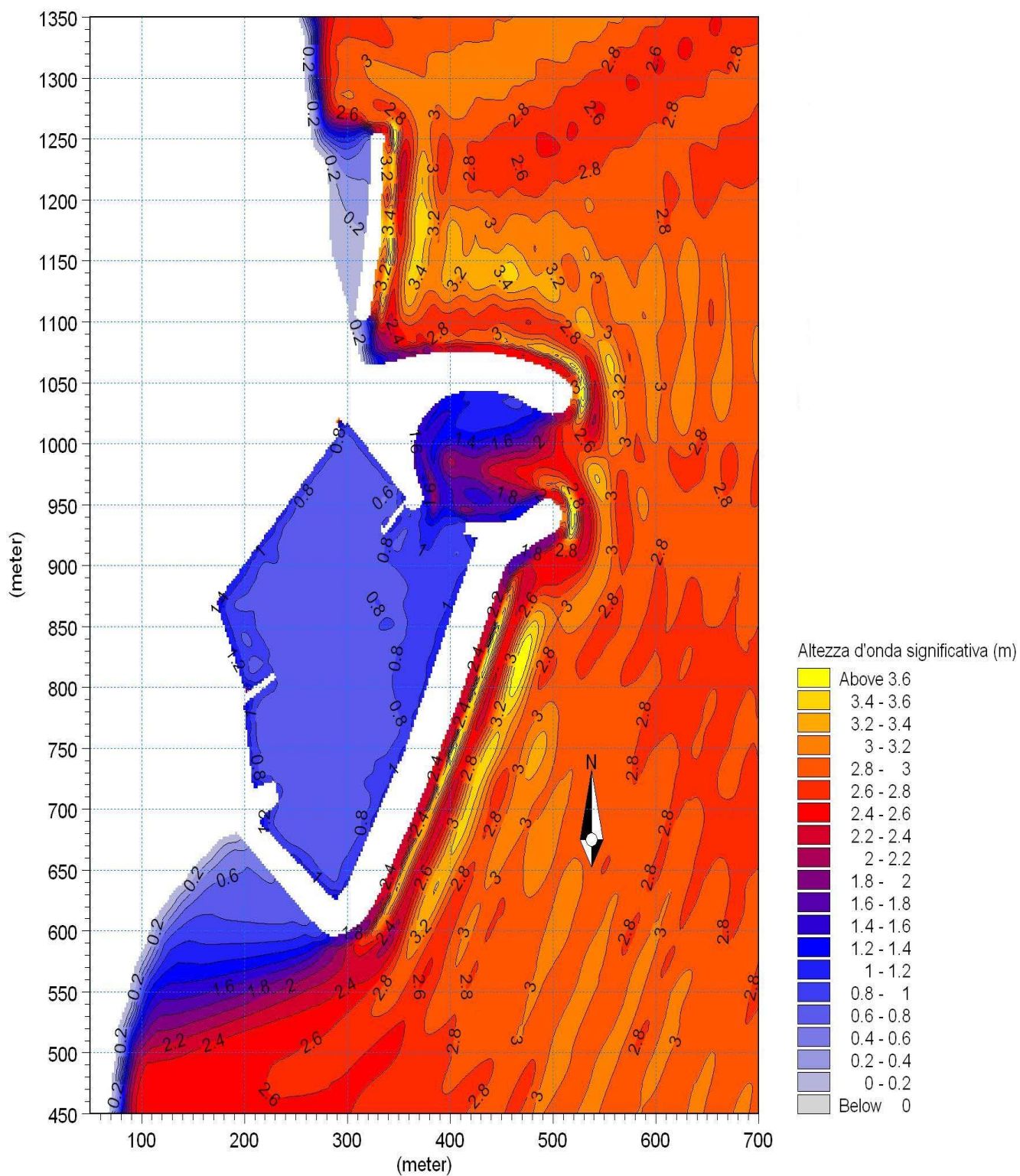


Figura 5.9 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione A - Mareggiata OSI

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

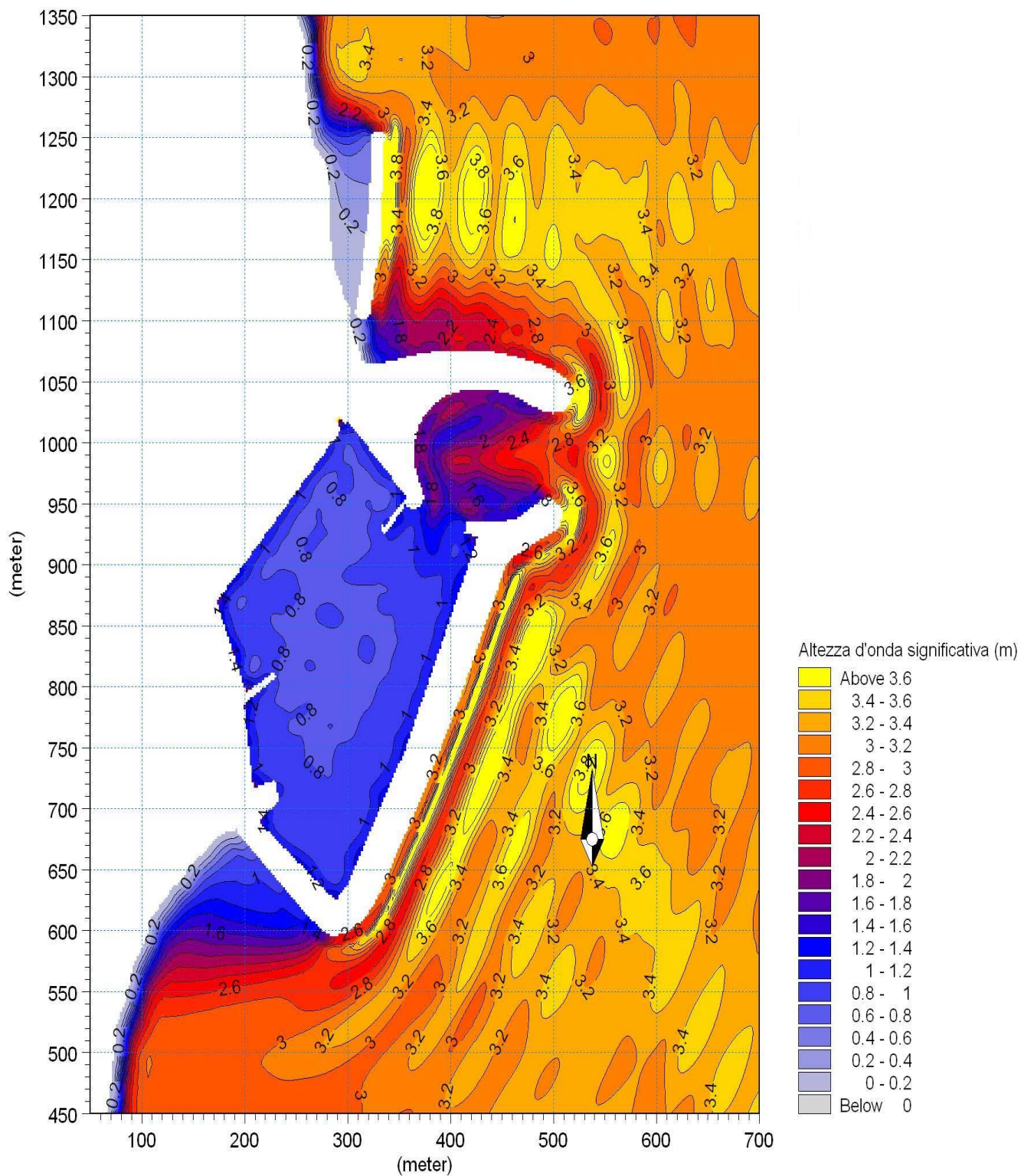


Figura 5.10 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione A - Mareggiata OS2



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

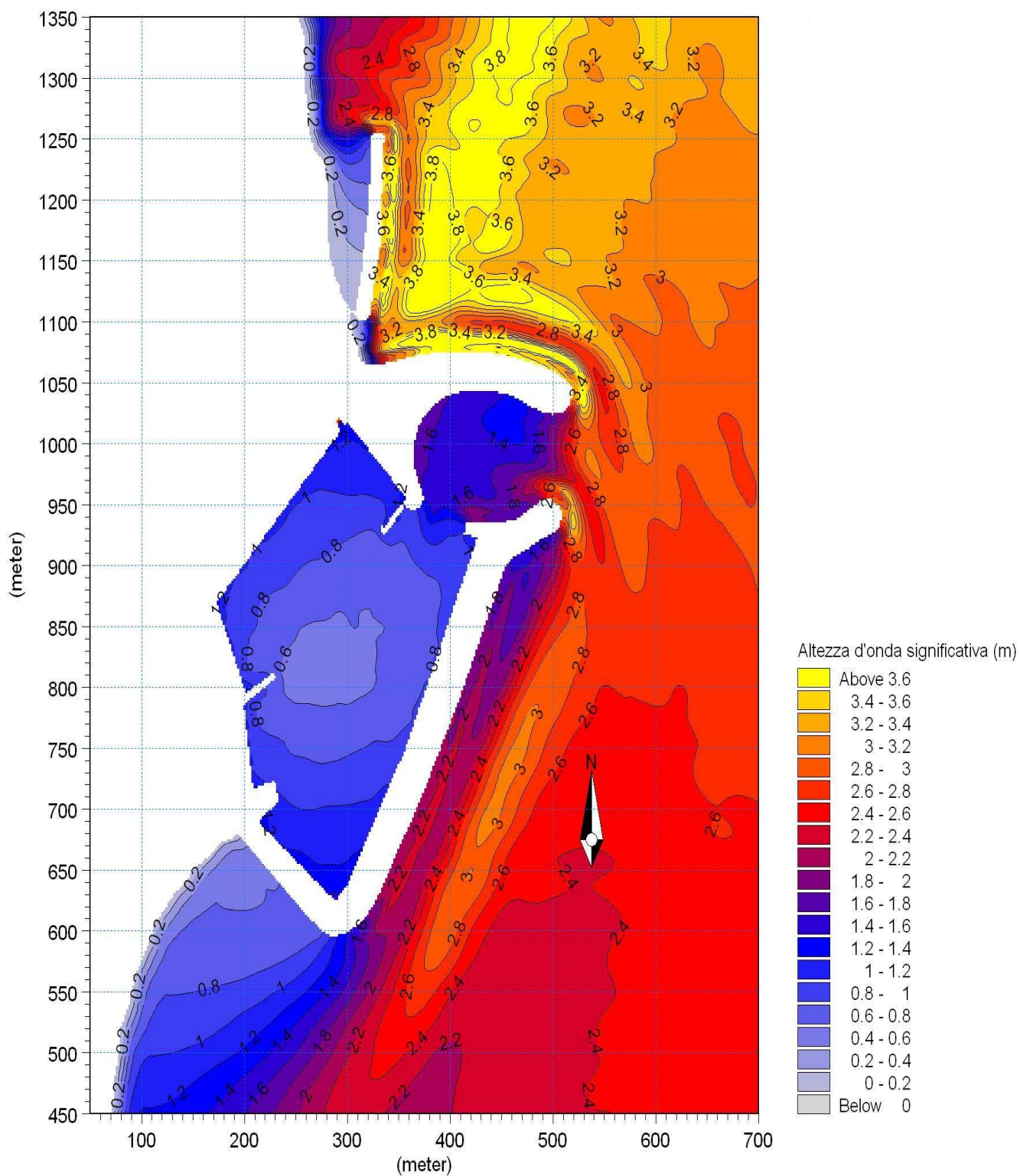


Figura 5.11 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione A - Mareggiata OS3

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

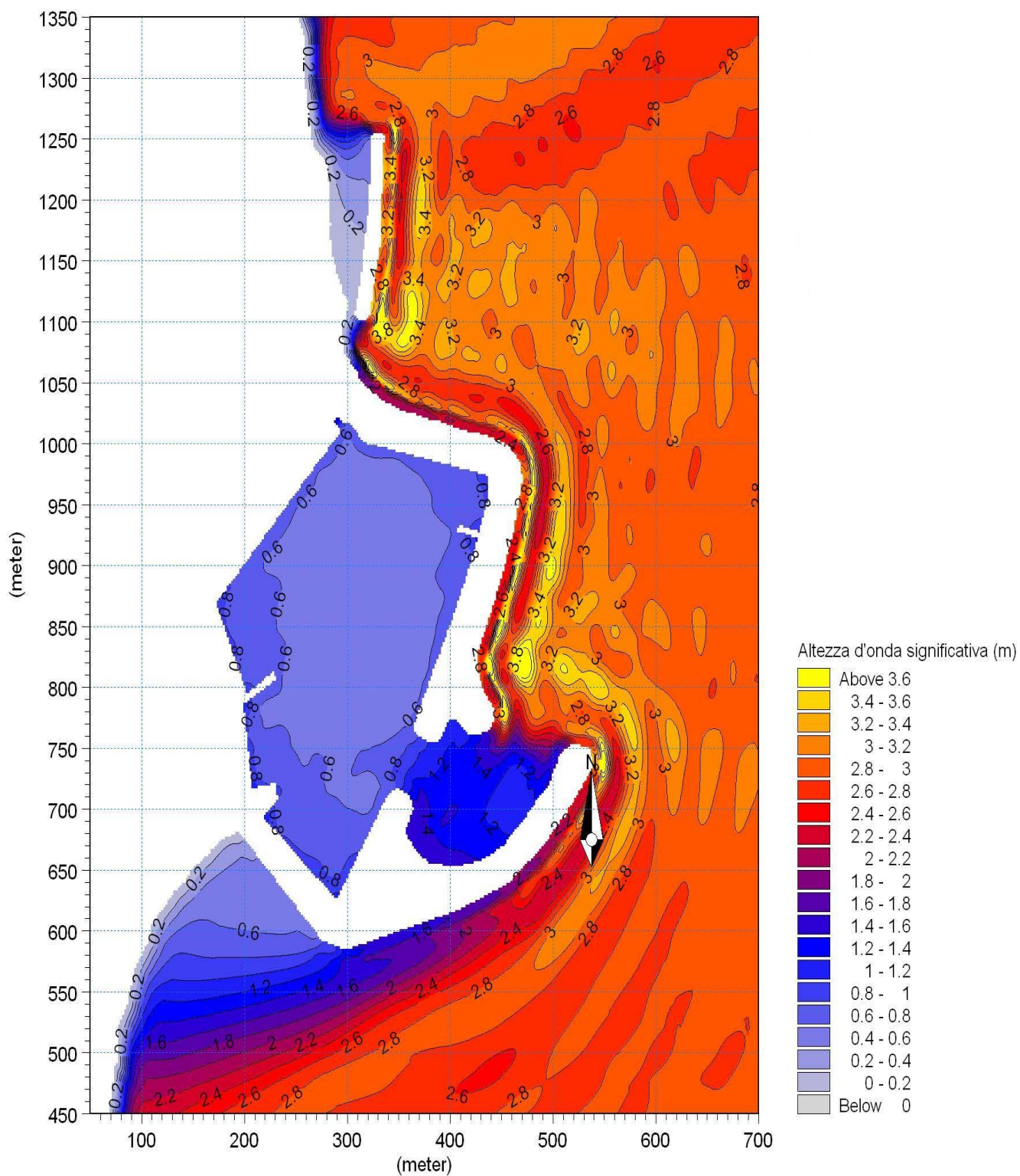


Figura 5.12 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione B - Mareggiata OSI



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

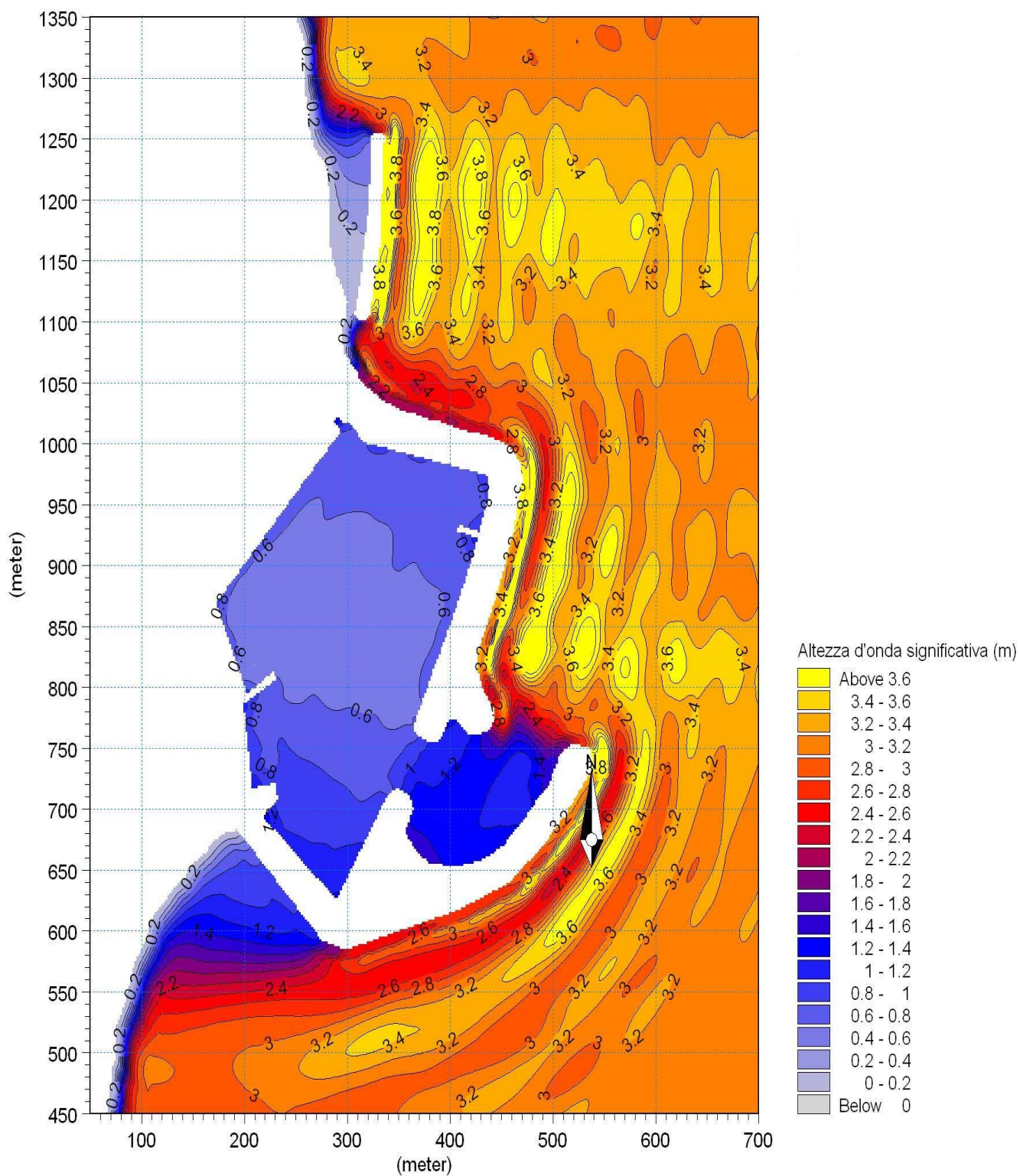


Figura 5.13 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione B - Mareggiata OS2

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

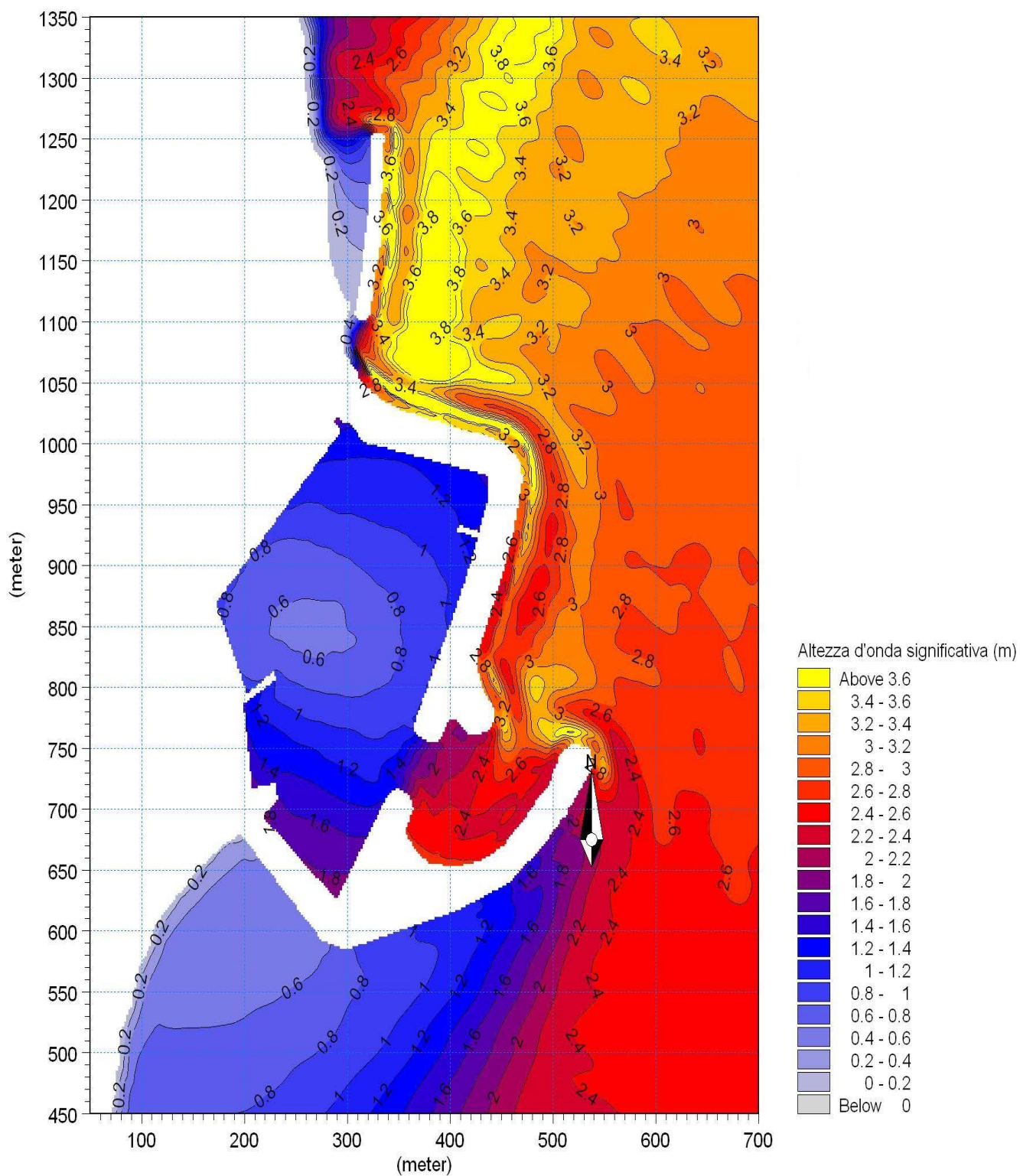


Figura 5.14 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione B - Mareggiata OS3



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

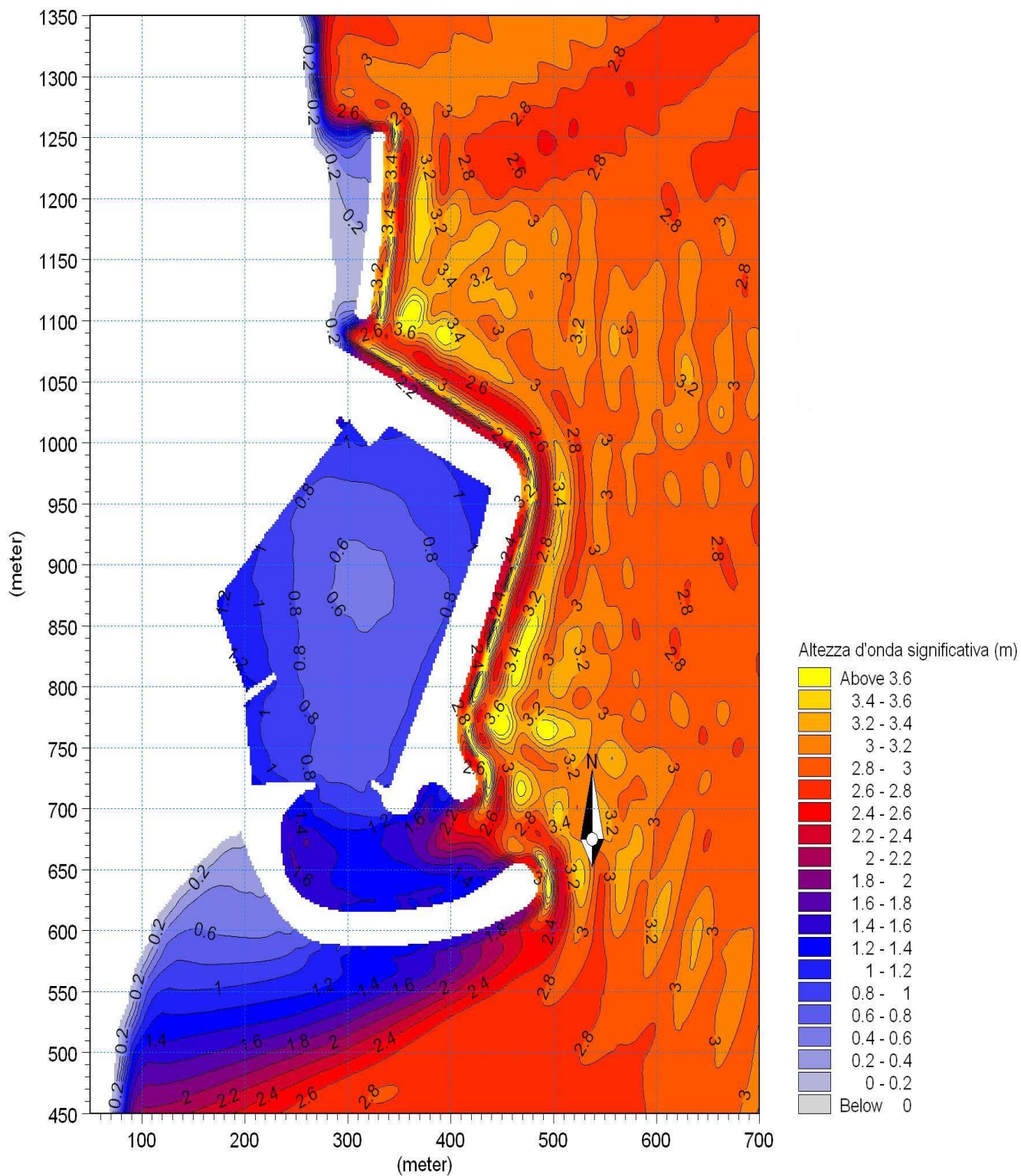


Figura 5.15 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione C - Mareggiata OSI

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

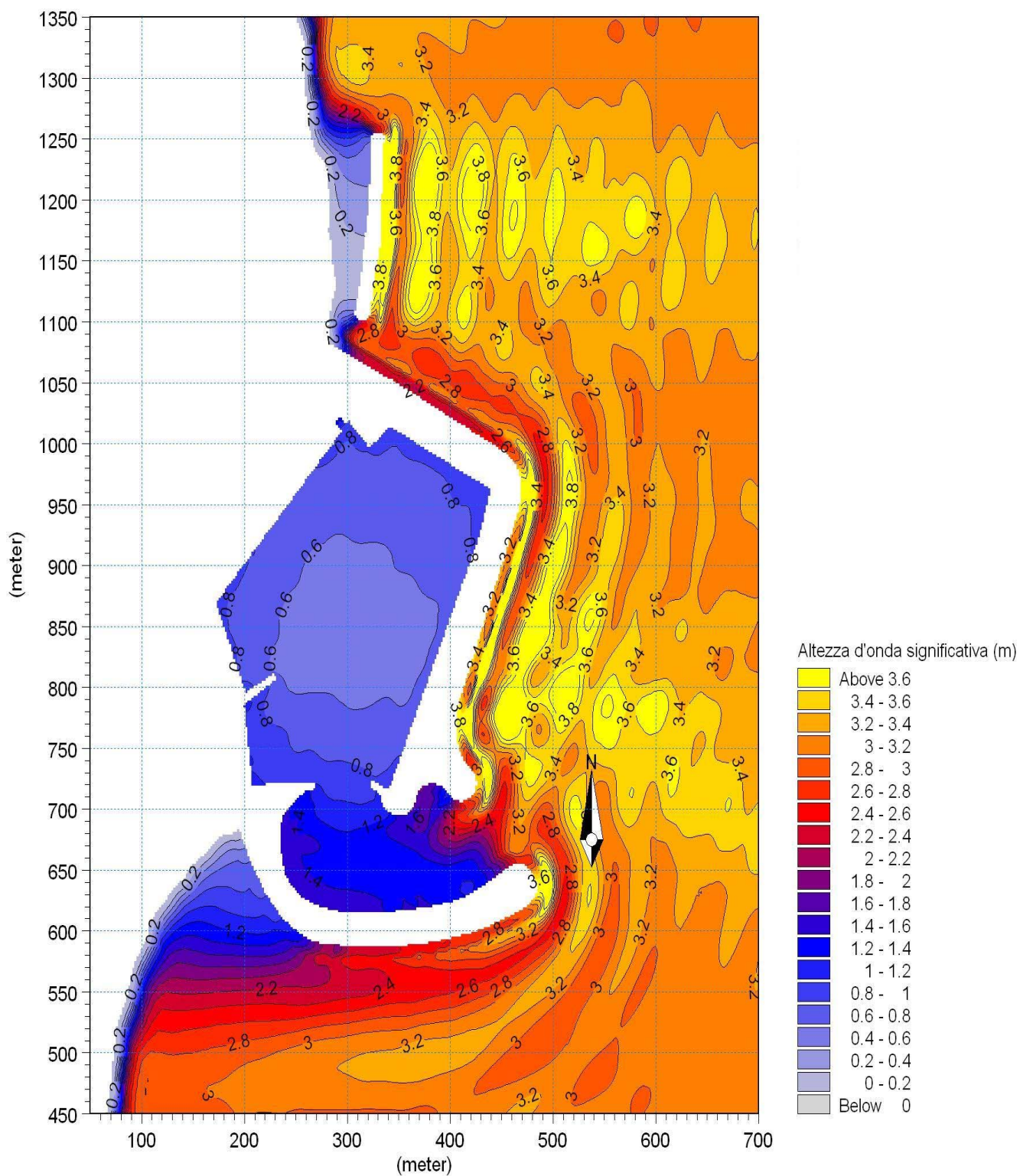


Figura 5.16 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione C - Mareggiata OS2



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

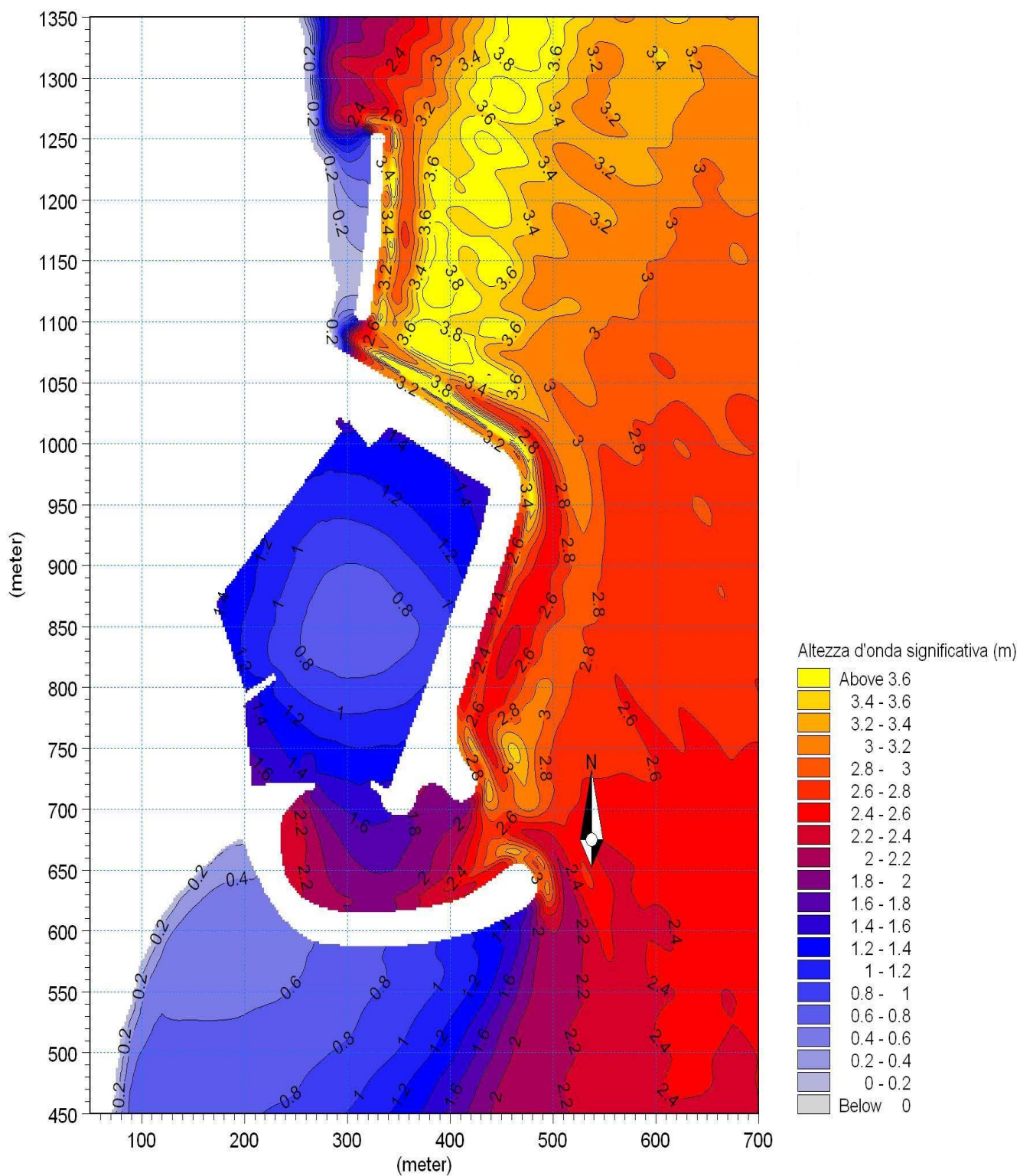


Figura 5.17 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione C - Mareggiata OS3

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

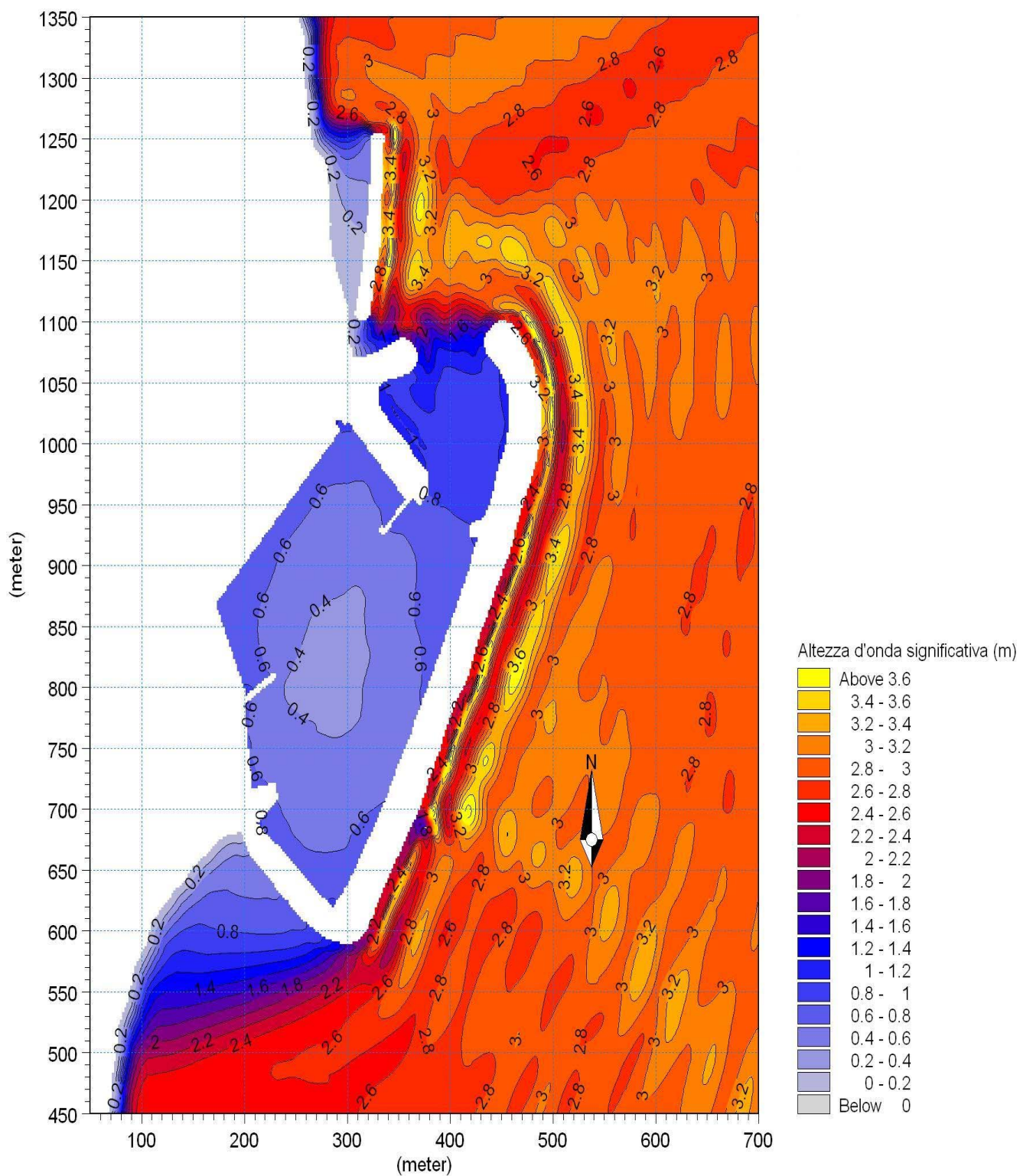


Figura 5.18 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione D - Mareggiata OSI



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

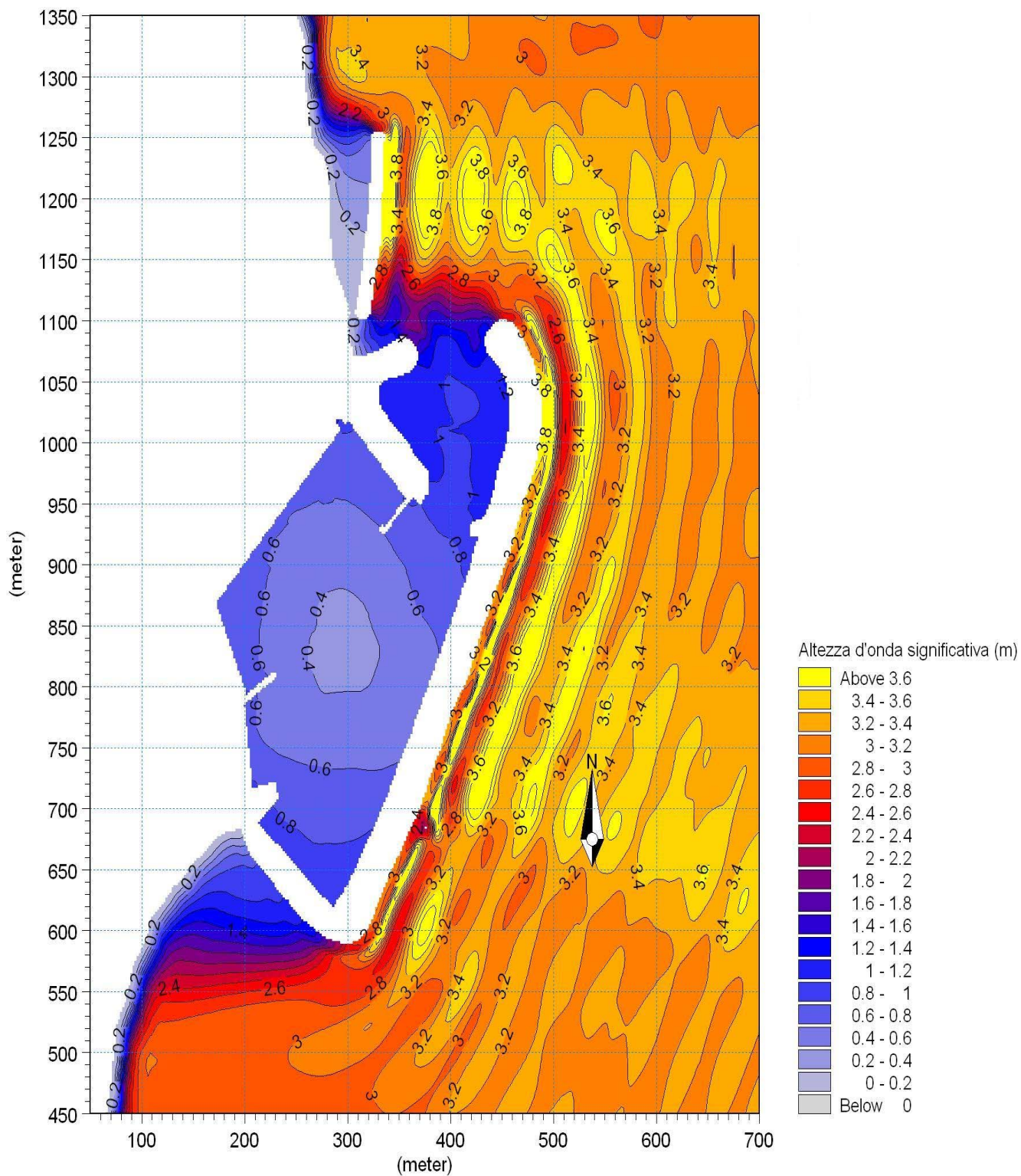


Figura 5.19 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione D - Mareggiata OS2

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

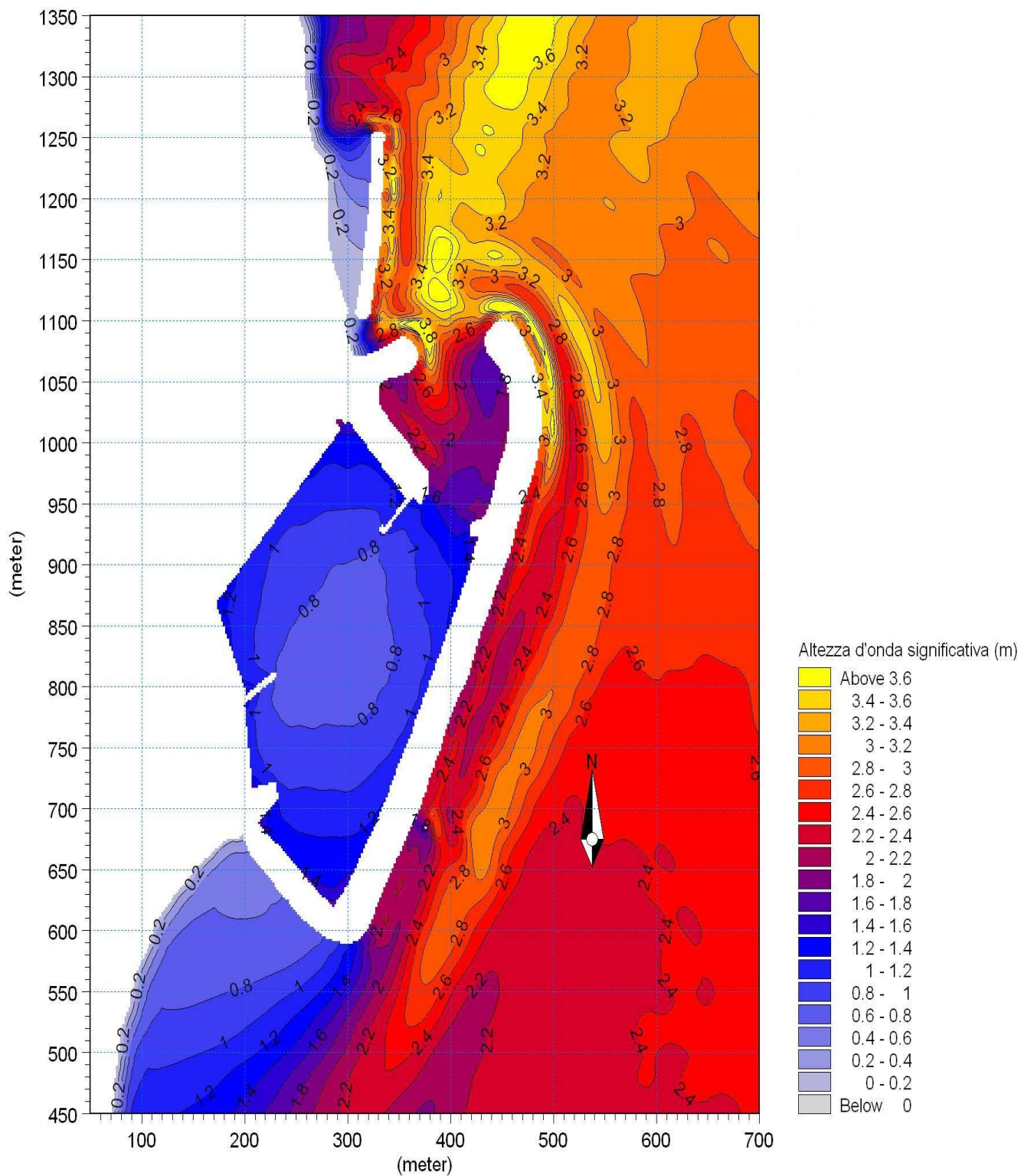


Figura 5.20 - Mappa dell'altezza significativa - Configurazione D - Mareggiata OS3



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

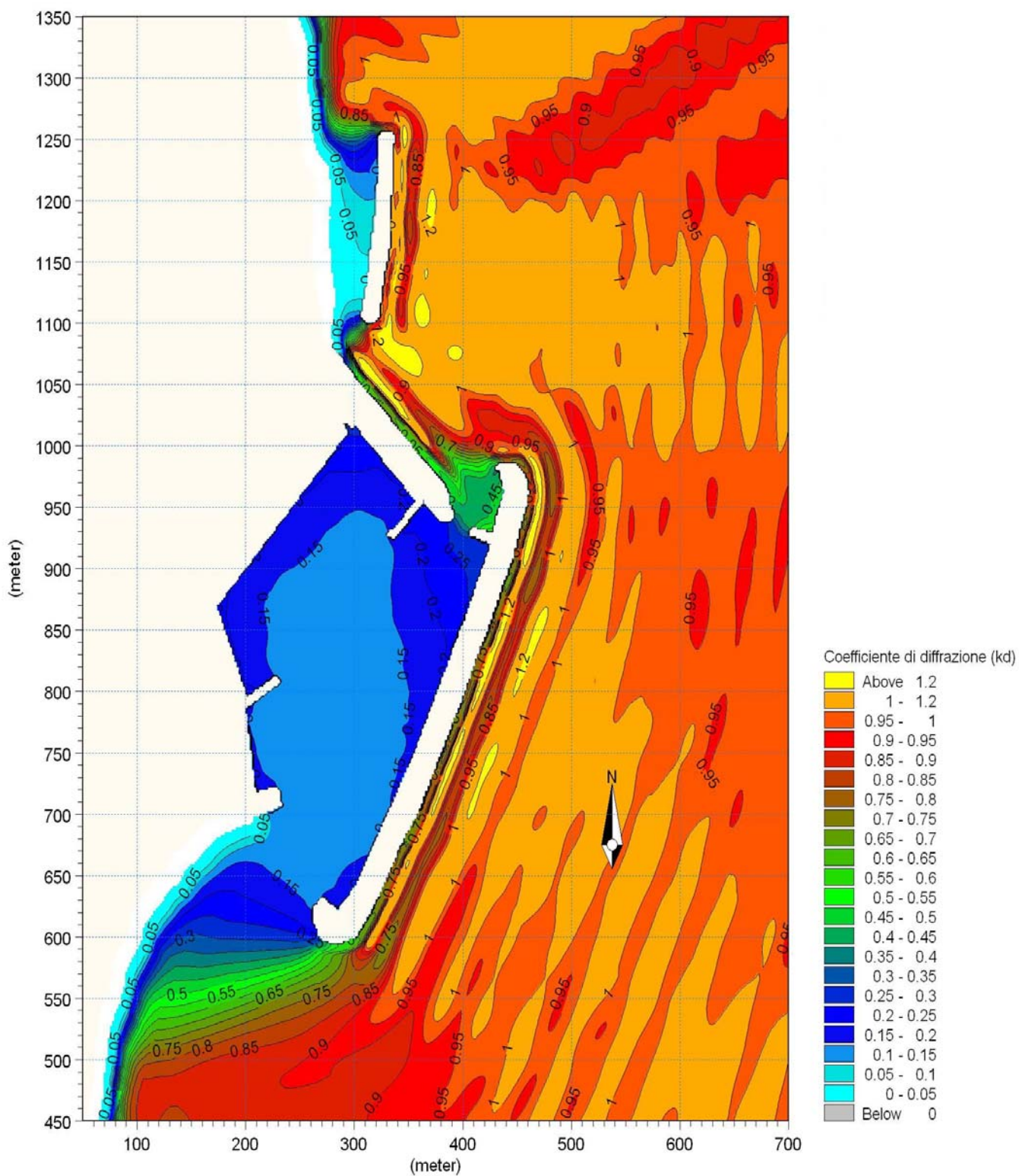


Figura 5.21 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione 0 - Mareggiata OS1

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

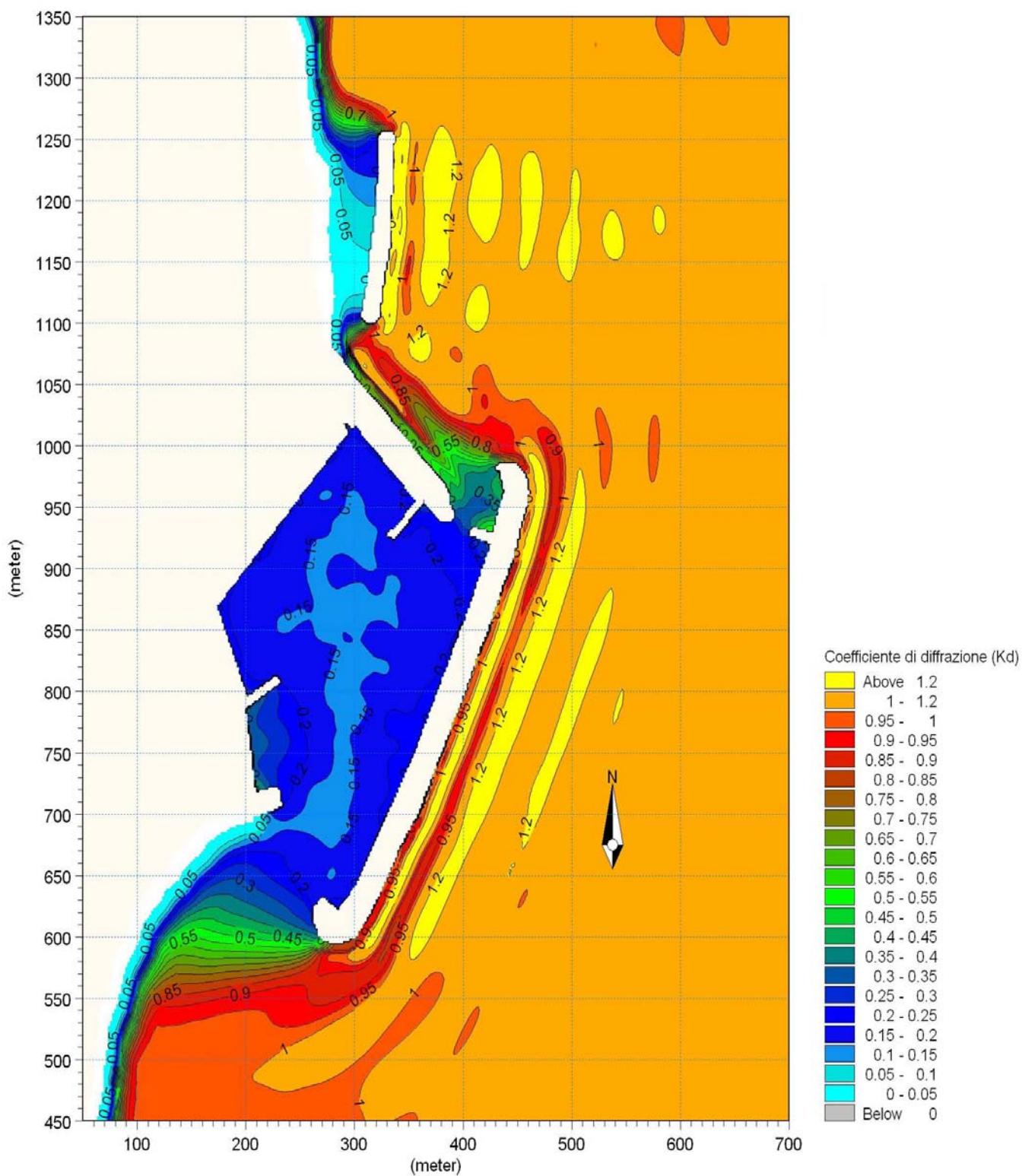


Figura 5.22 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione 0 - Mareggiata OS2



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

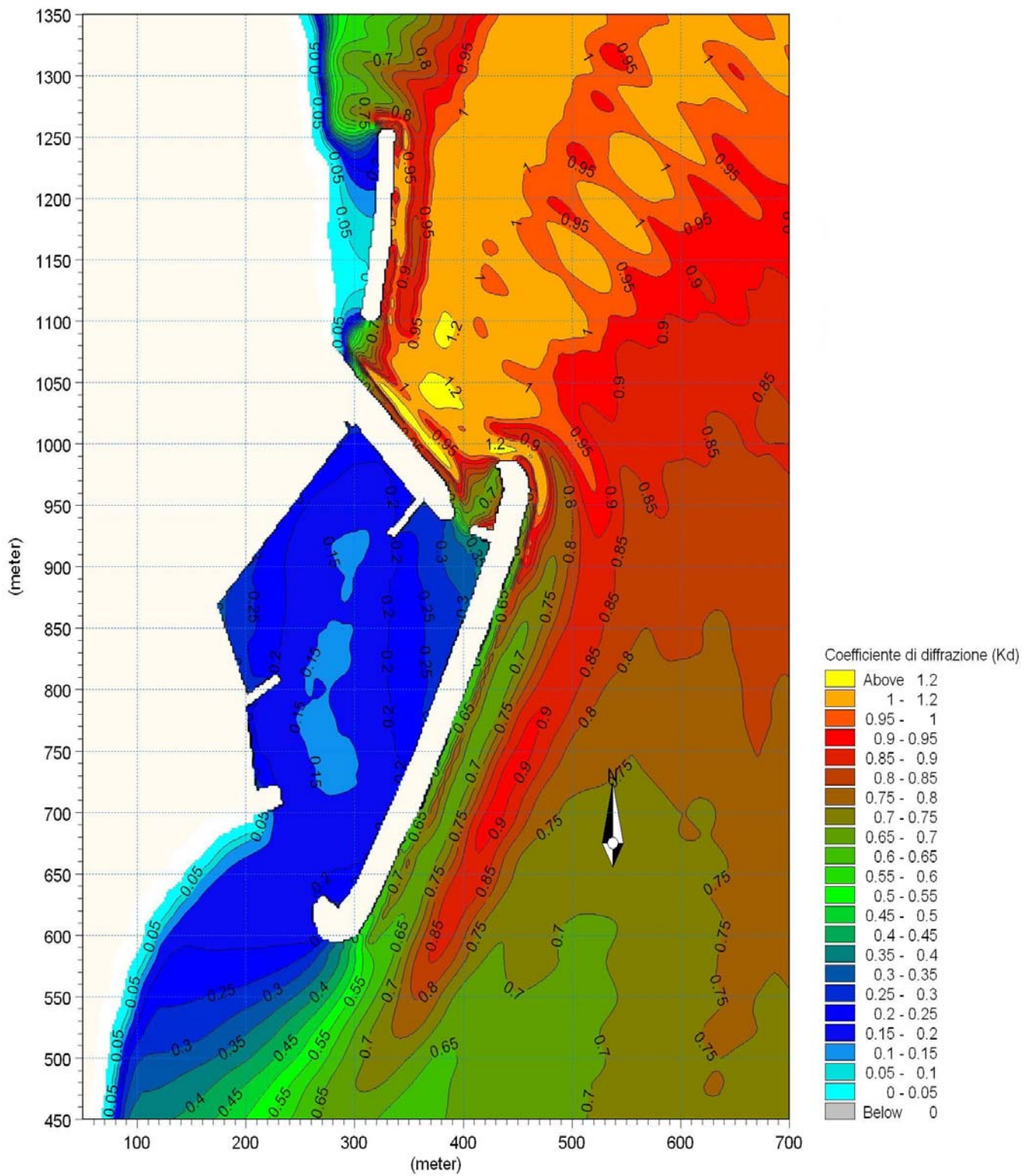


Figura 5.23 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione 0 - Mareggiata OS3

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

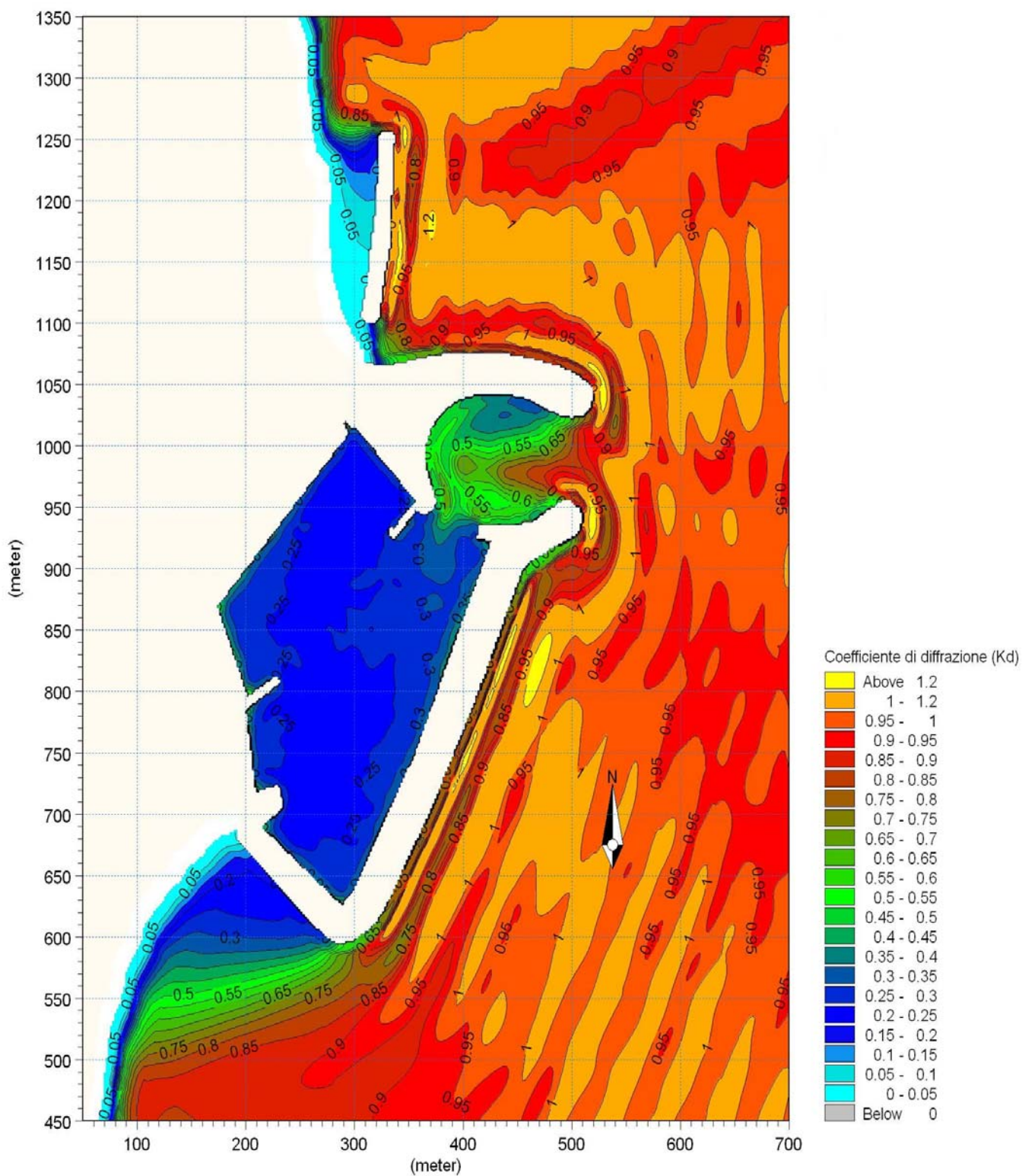


Figura 5.24 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione A - Mareggiata OSI



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

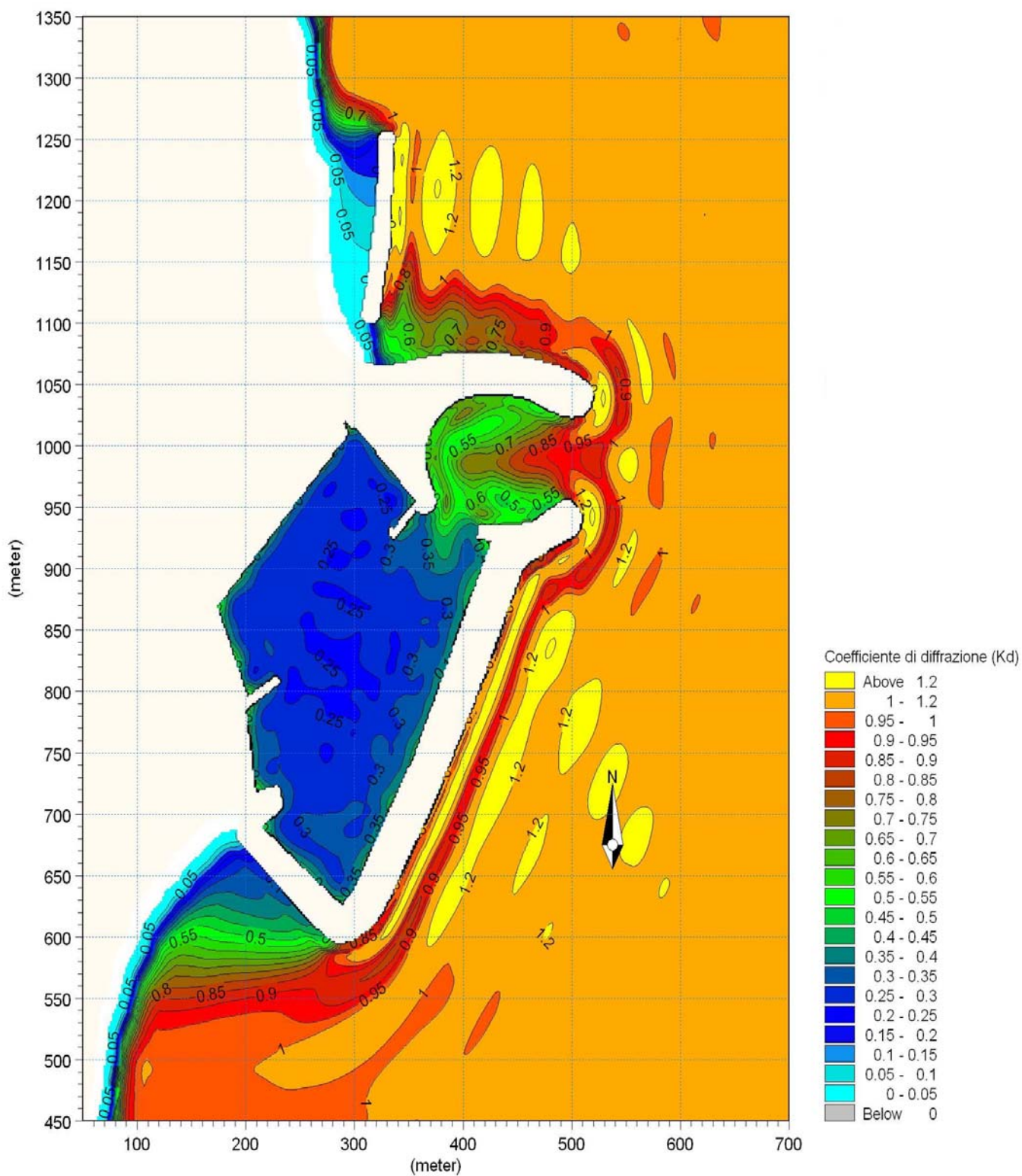


Figura 5.25 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione A - Mareggiata OS2

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

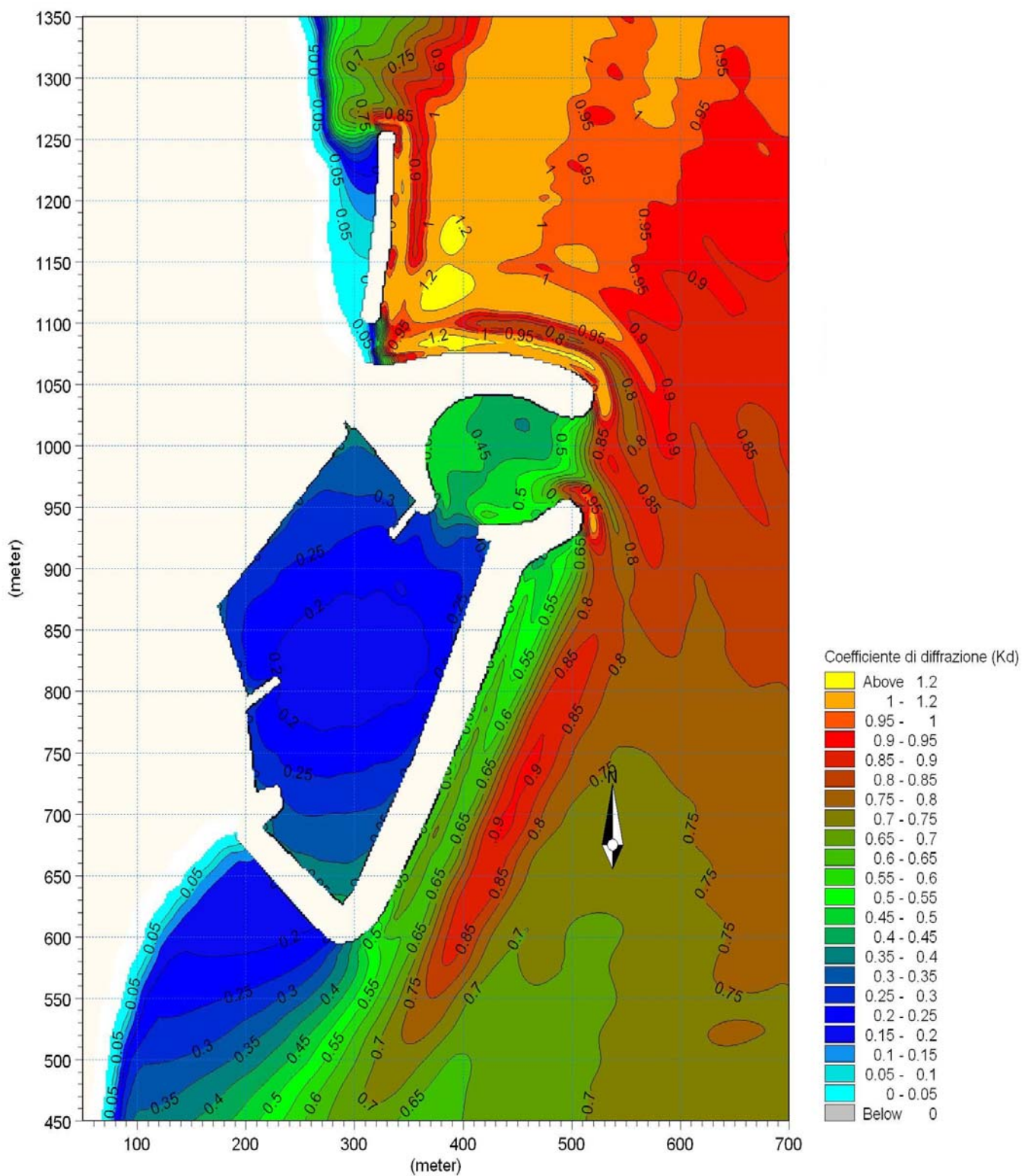


Figura 5.26 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione A - Mareggiata OS3



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

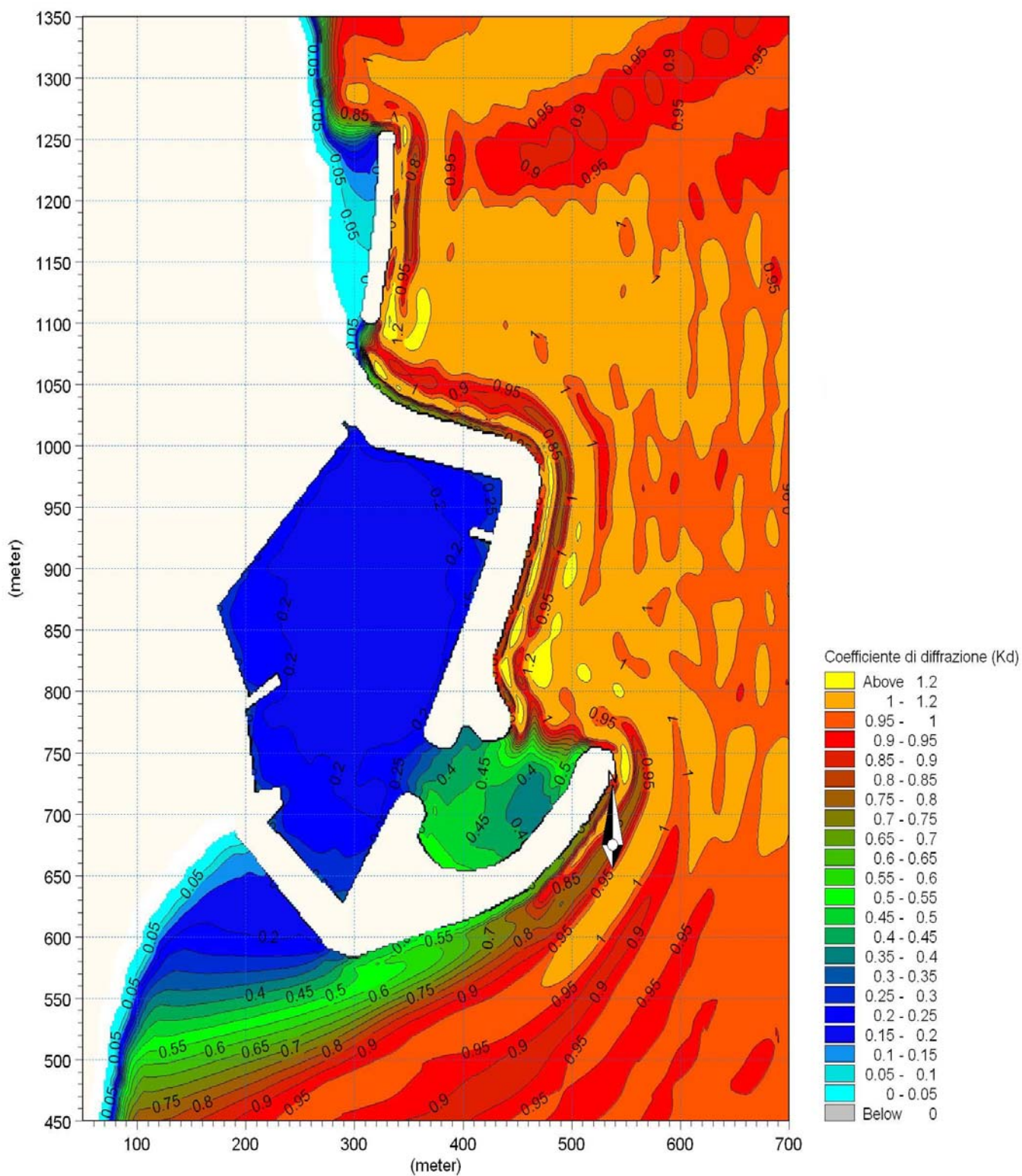


Figura 5.27 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione B - Mareggiata OSI

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

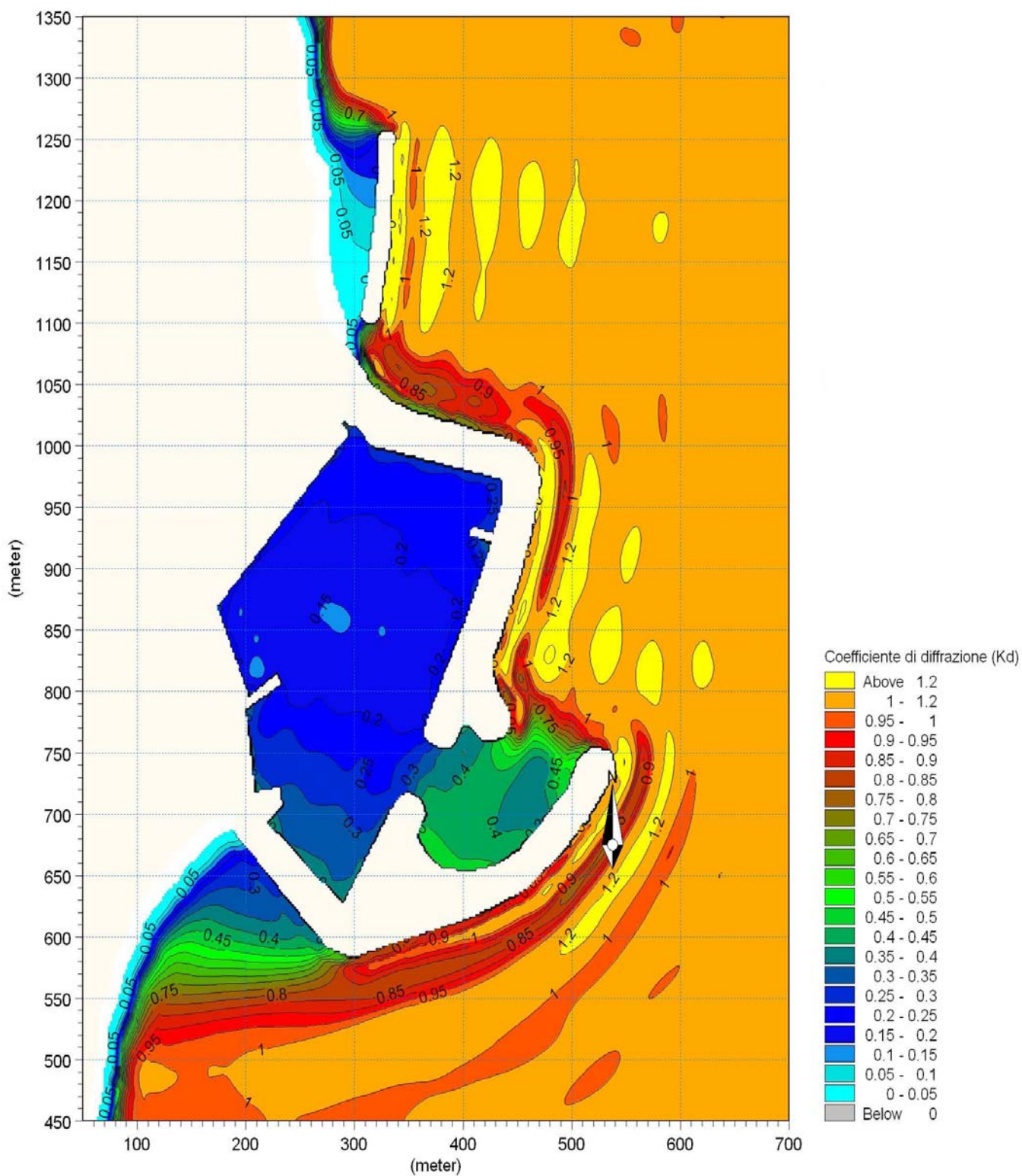


Figura 5.28 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione B - Mareggiata OS2



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

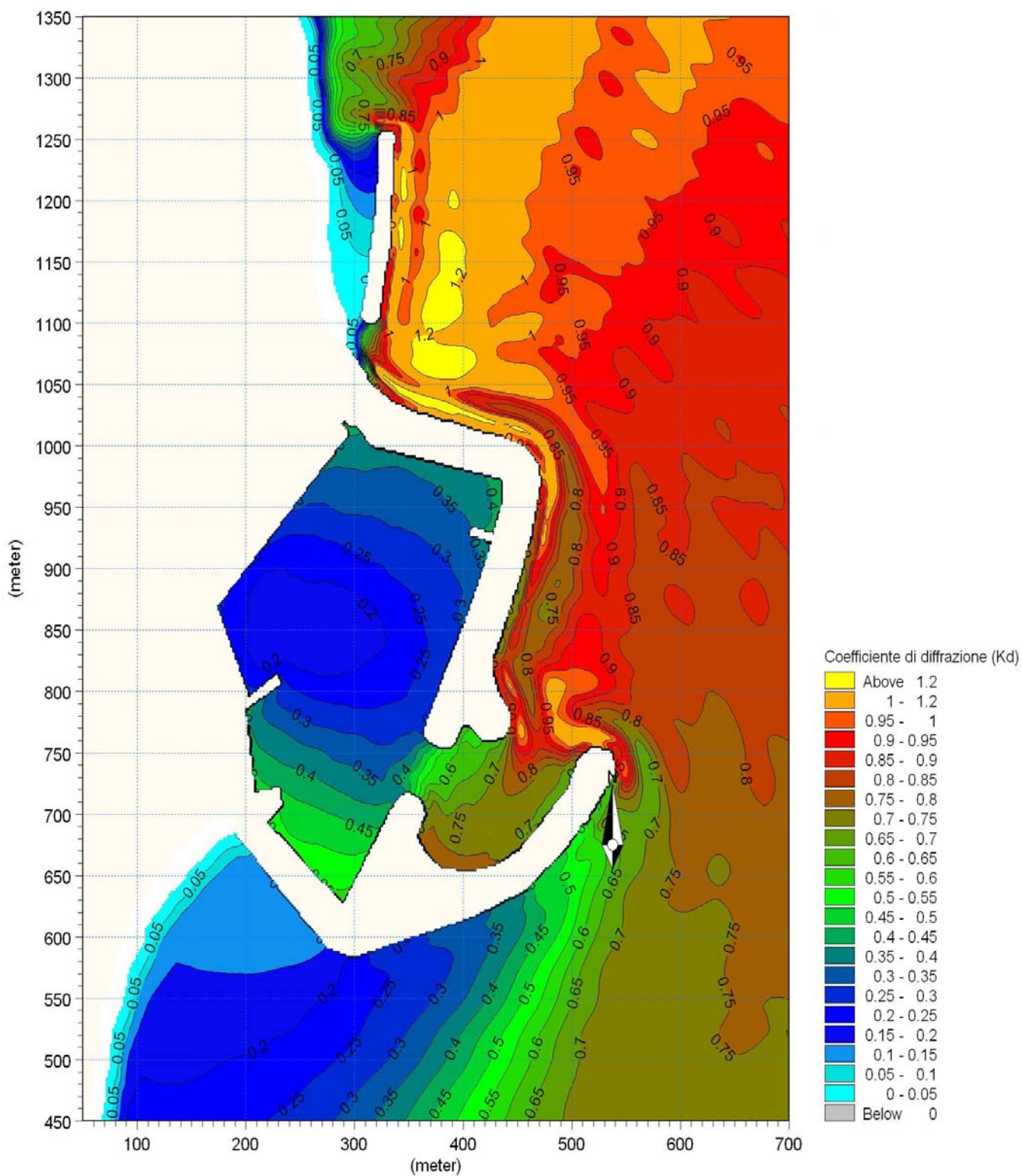


Figura 5.29 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione B - Mareggiata OS3

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

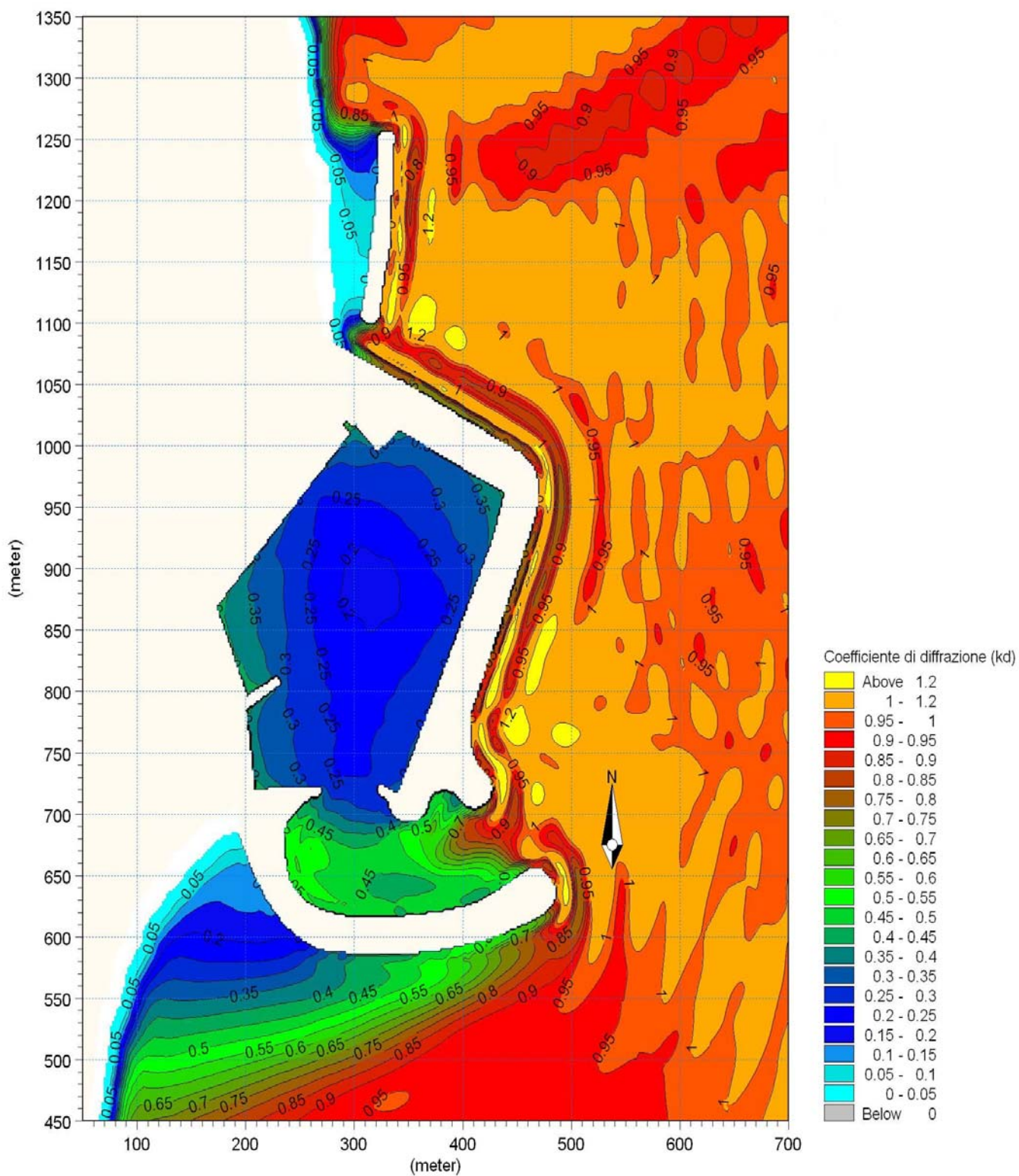


Figura 5.30 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione C - Mareggiata OSI



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

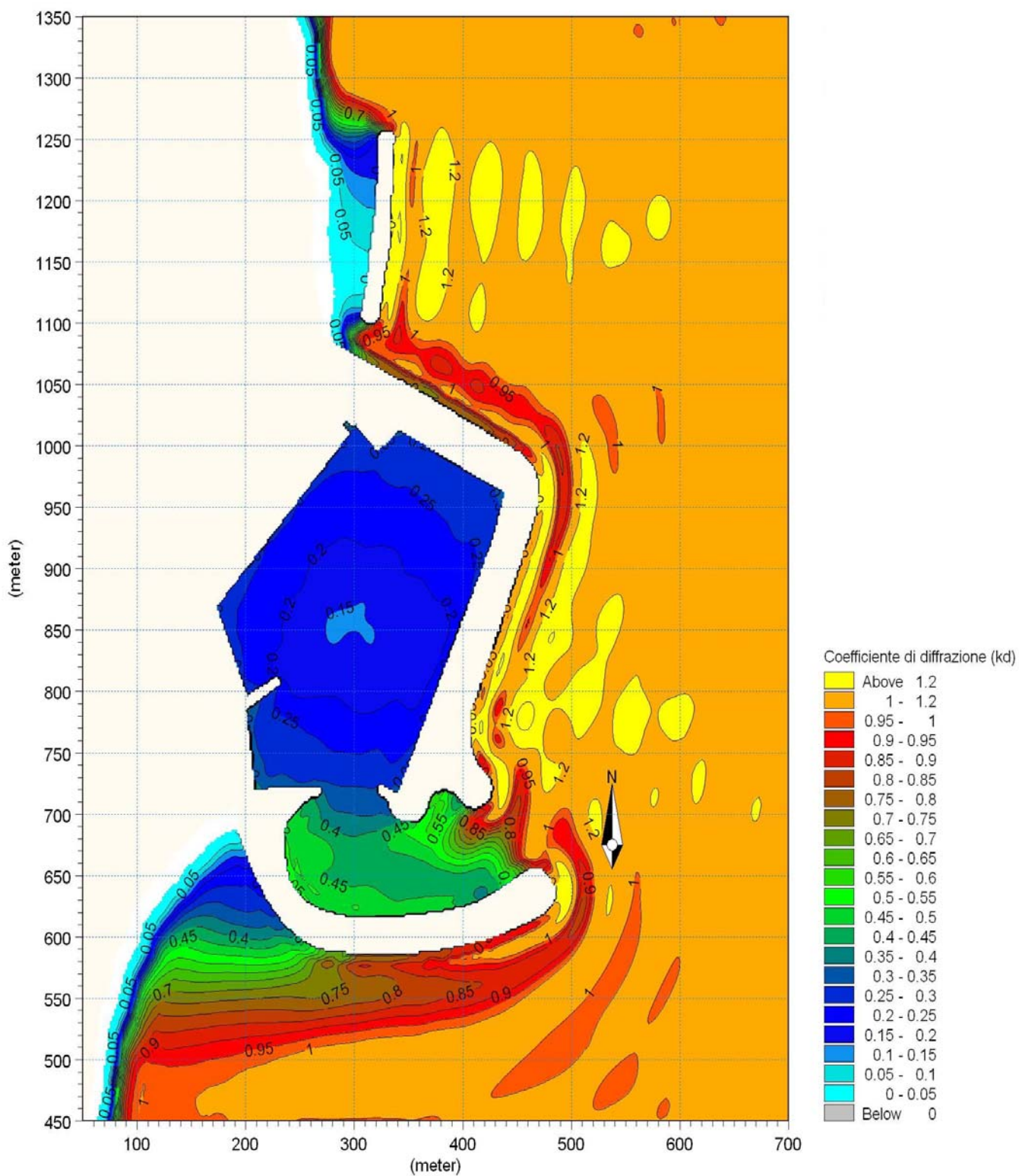


Figura 5.31 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione C - Mareggiata OS2

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

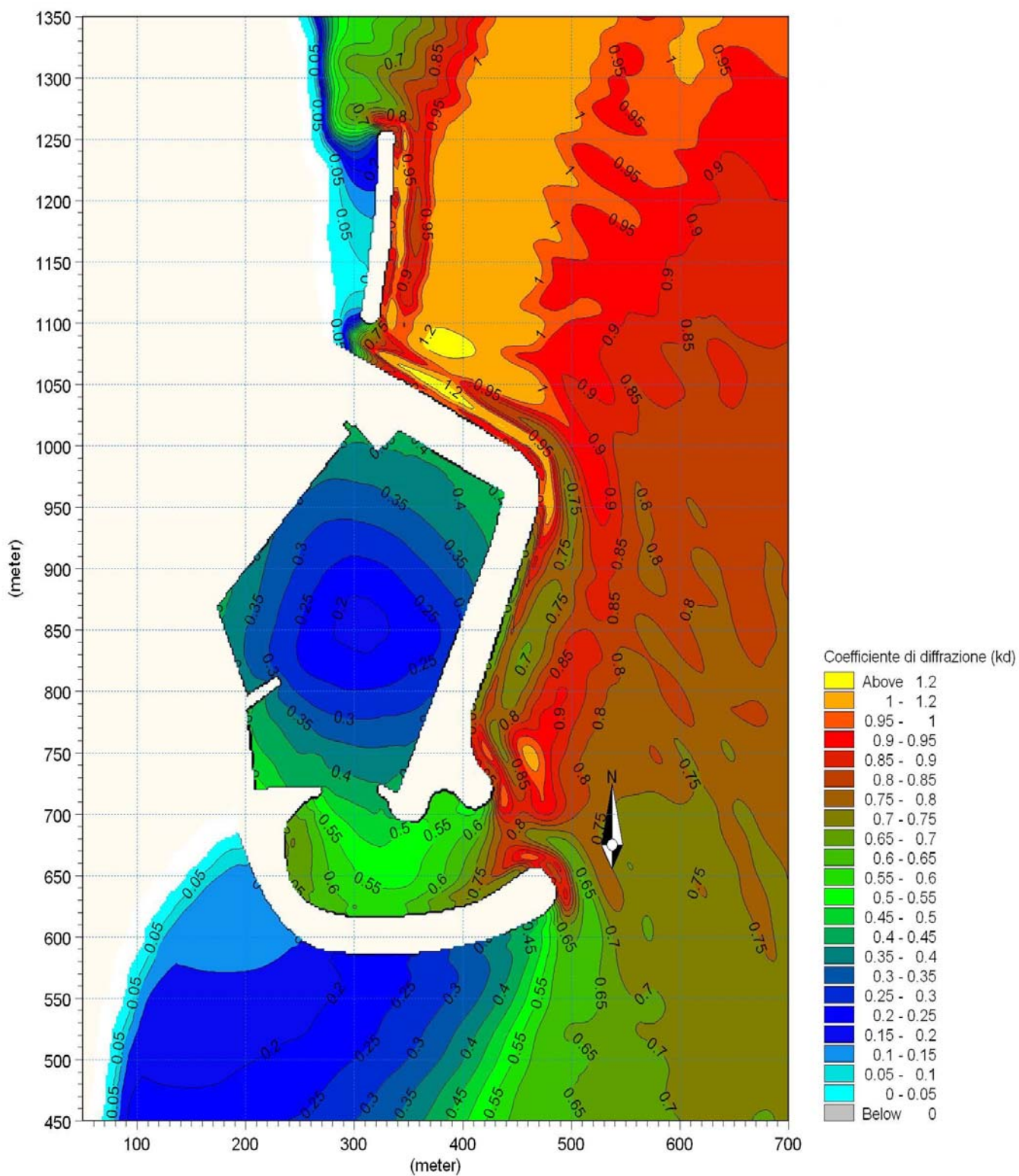


Figura 5.32 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione C - Mareggiata OS3



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

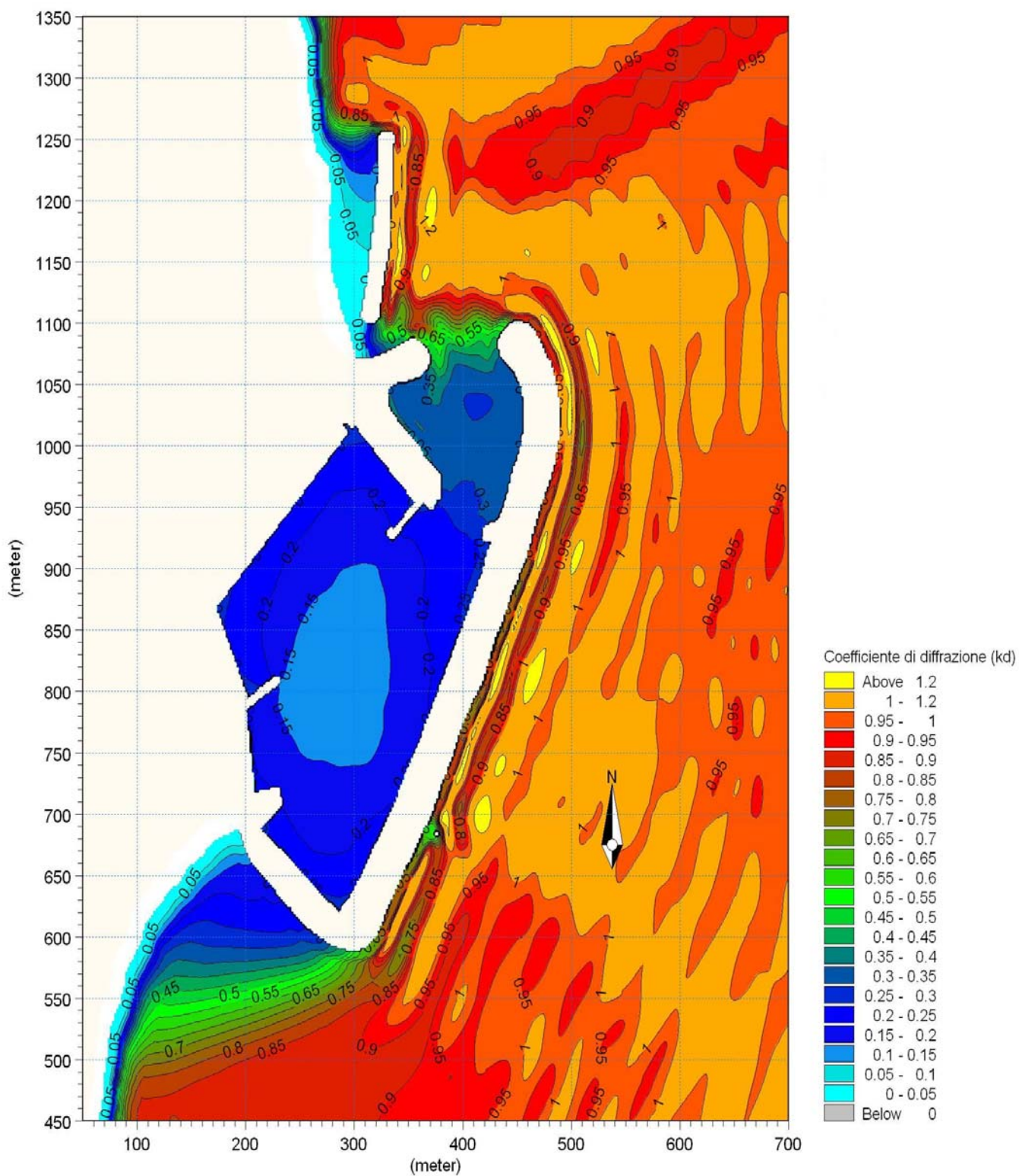


Figura 5.33 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione D - Mareggiata OSI

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

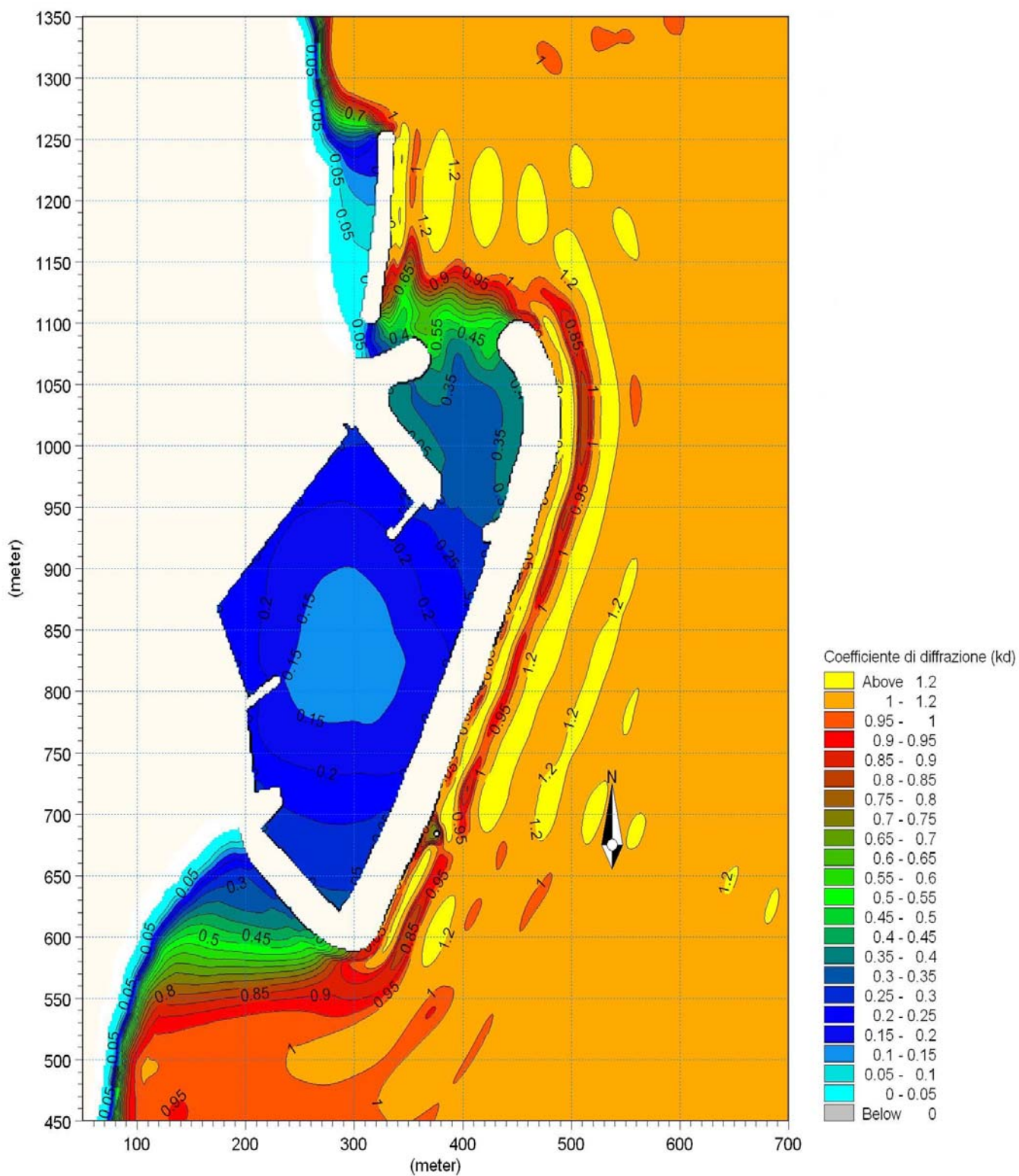


Figura 5.34 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione D - Mareggiata OS2



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

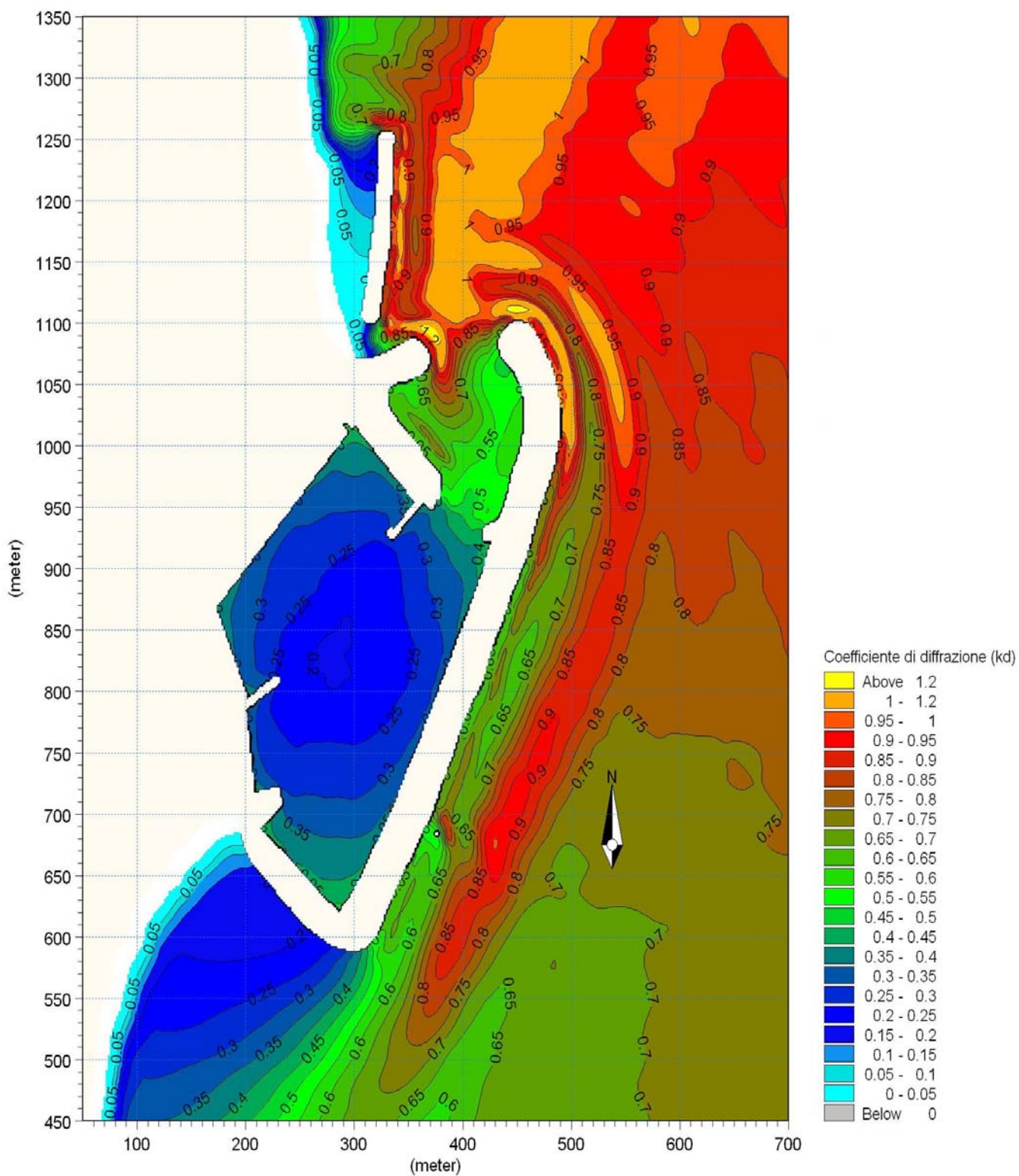


Figura 5.35 - Mappa del coefficiente di diffrazione - Configurazione D - Mareggiata OS3



#### 5.4) Analisi dei risultati

I risultati delle simulazioni numeriche effettuate sullo stato di fatto attuale e sulle soluzioni proposte per il porto di Numana vengono sintetizzati nei grafici seguenti. Per permettere un confronto rapido, al di là della mole di dati forniti dalle simulazioni, sono stati scelti, per ogni soluzione, 4 punti sonda (T1,T2,T3,T4) posizionati rispettivamente sull'imboccatura esterna, nel centro dell'avamposto, nel centro dell'imboccatura interna ed al centro del bacino portuale. Lo stato di fatto attuale presenta due imboccature, non ha avamposto ed i risultati sono inficiati dalle ridotte dimensioni soprattutto della imboccatura portuale settentrionale.

Nelle Figure 5.36 (a) e 5.36 (b) sono riportate le planimetrie delle soluzioni esaminate con il posizionamento dei punti di controllo.

Nei grafici da Figura 5.37 a Figura 5.39 per ogni punto sonda e per ognuna delle tre mareggiate esaminate sono riportati gli andamenti delle altezze significative in funzione del tempo di simulazione.

Alla fine dei diagrammi si raggiunge lo stato stazionario. In ogni grafico sono confrontati i risultati per le soluzioni planimetriche esaminate: 0 per lo stato di fatto attuale e A, B, C, D per i quattro casi studiati.

Nei grafici di Figura 5.40 gli stessi risultati sono rappresentati per ogni soluzione progettuale in modo da verificare, nei punti scelti, l'abbattimento del moto ondoso dall'esterno del porto alla darsena interna. In questi ultimi grafici è stato escluso lo stato di fatto attuale perché il confronto non è significativo non essendoci l'avamposto.

Le soluzioni proposte avendo aperture orientate in modo diverso hanno, naturalmente, comportamenti condizionati dalla direzione delle onde esaminate.

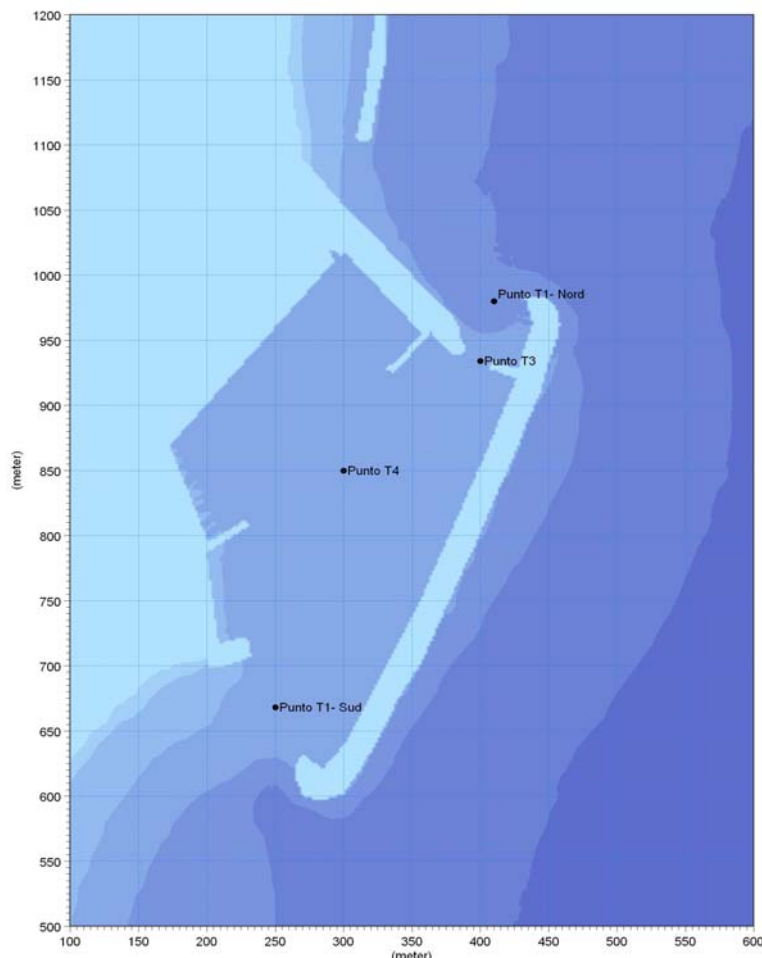


Figura 5.36 (a) - Ubicazione dei punti sonda per la configurazione attuale (0)

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

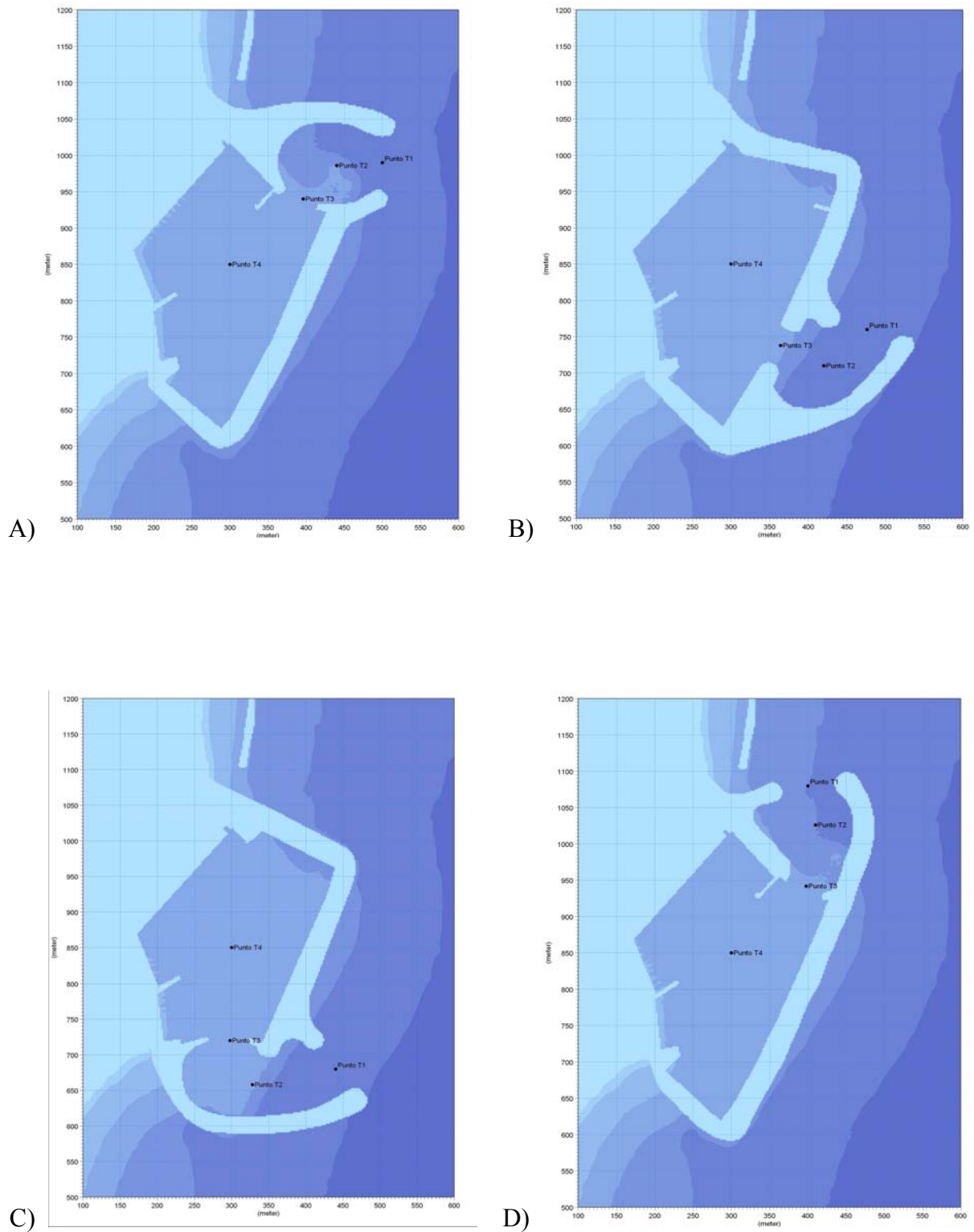


Figura 5.36 (b) - Ubicazione dei punti sonda per le configurazioni: A, B, C, D

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

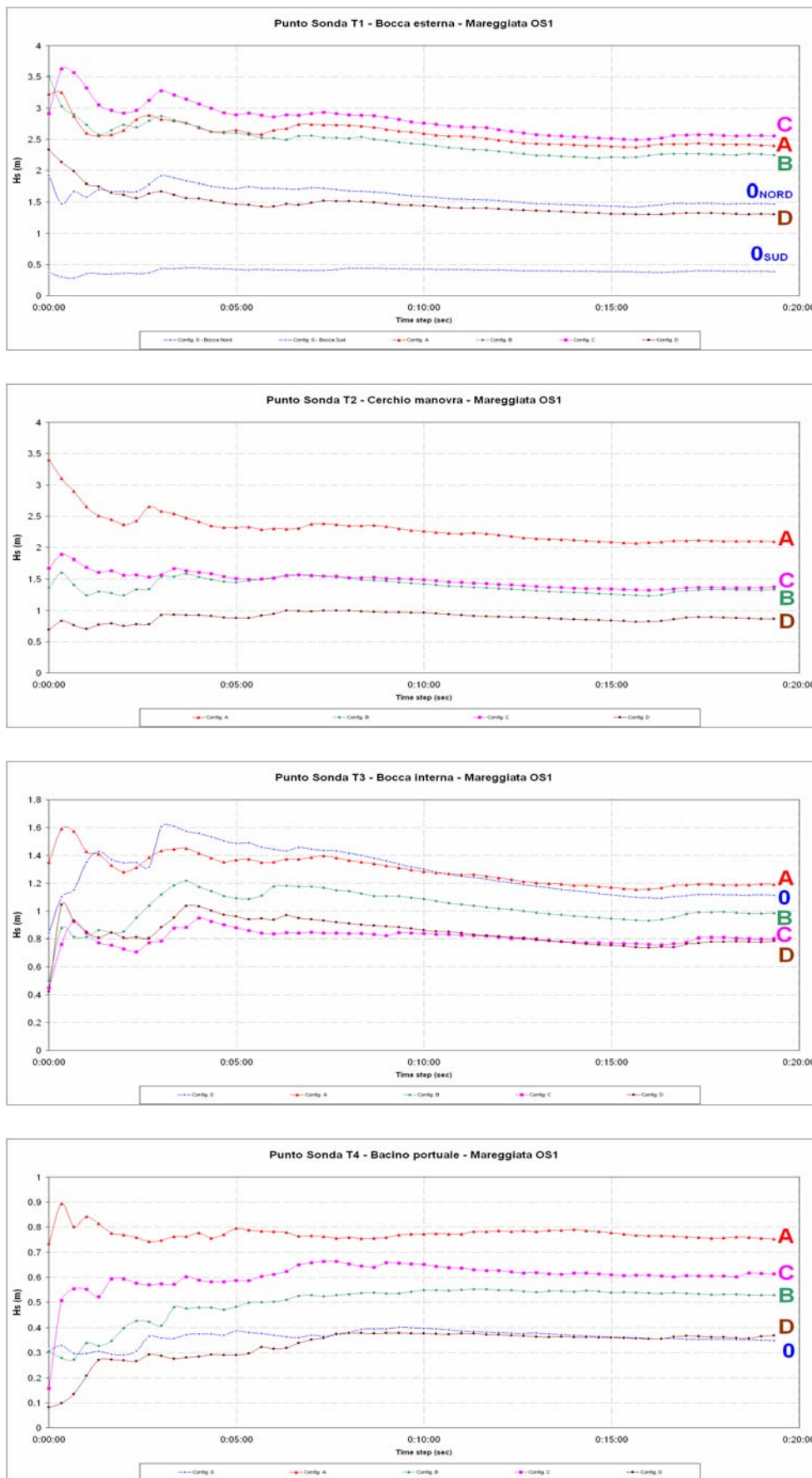


Figura 5.37 - Valutazione dell'altezza significativa nei punti sonda al variare del tempo di simulazione per le diverse configurazioni – Mareggiata OS1

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

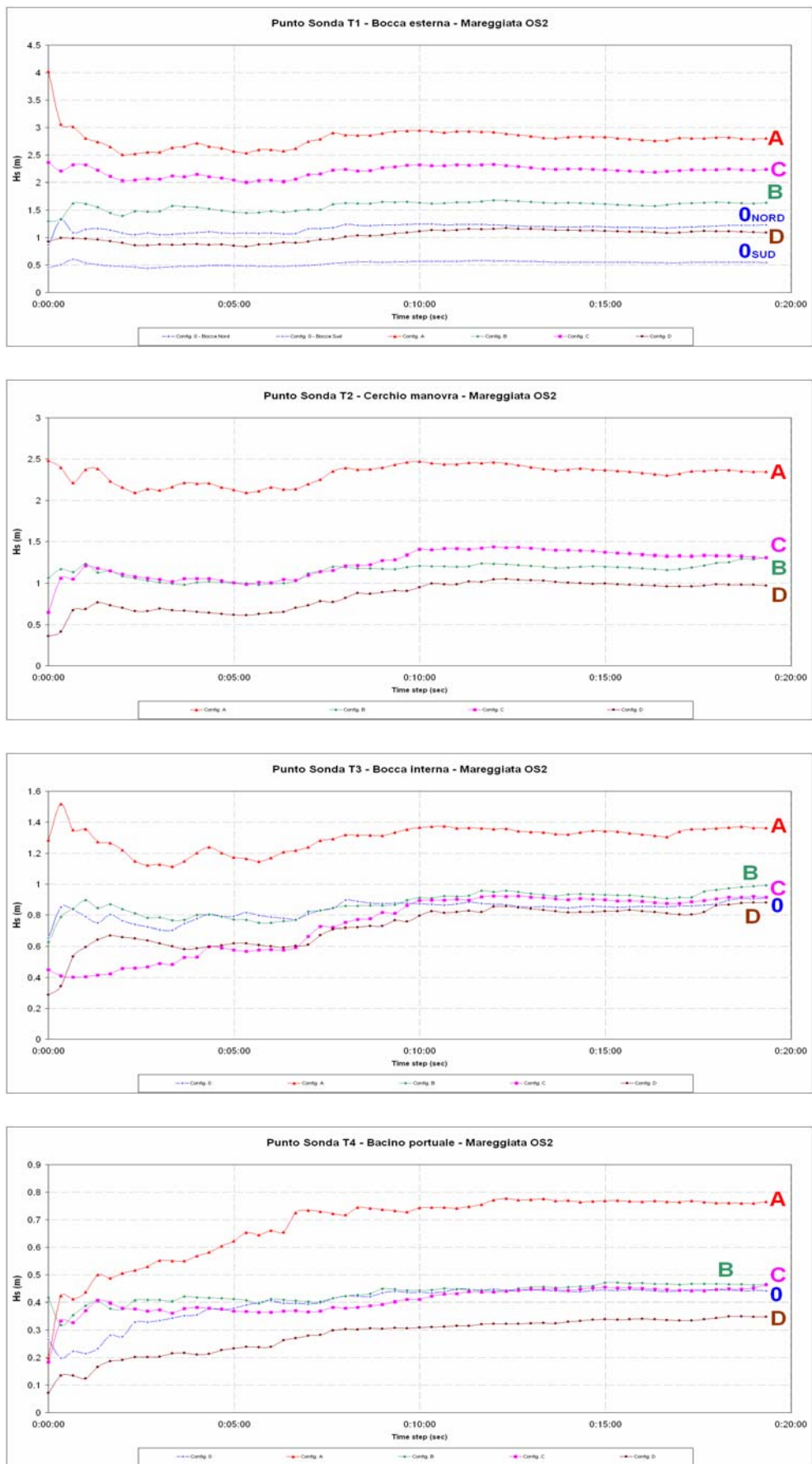


Figura 5.38 - Valutazione dell'altezza significativa nei punti sonda al variare del tempo di simulazione per le diverse configurazioni – Mareggiata OS2



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

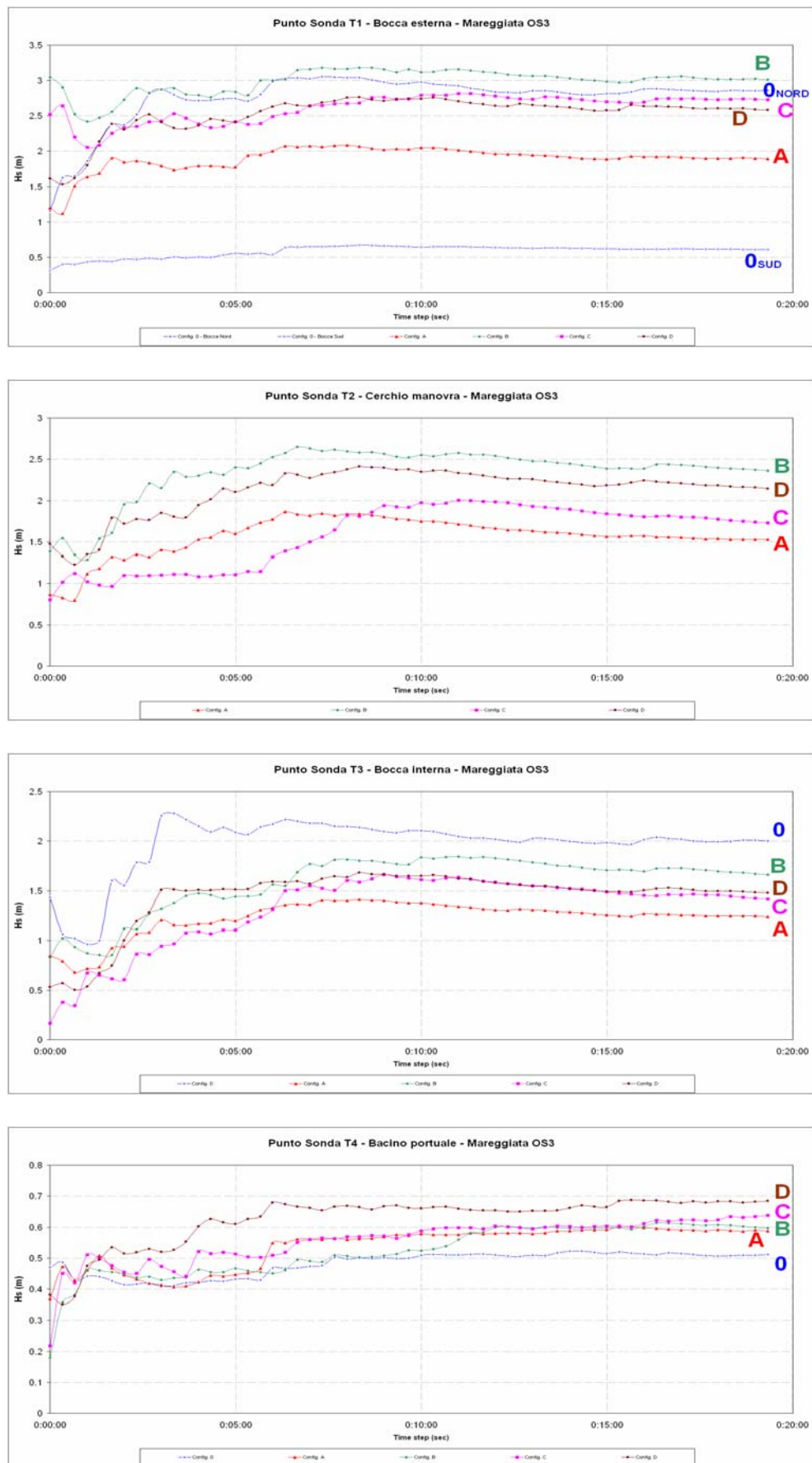


Figura 5.39 - Valutazione dell'altezza significativa nei punti sonda al variare del tempo di simulazione per le diverse configurazioni – Mareggiata OS3

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

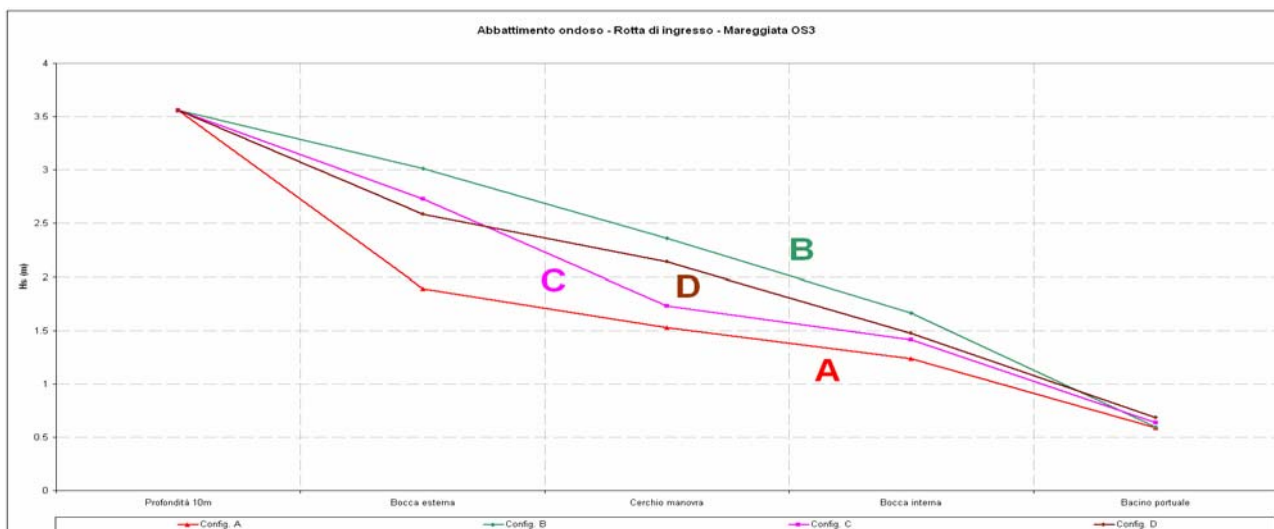
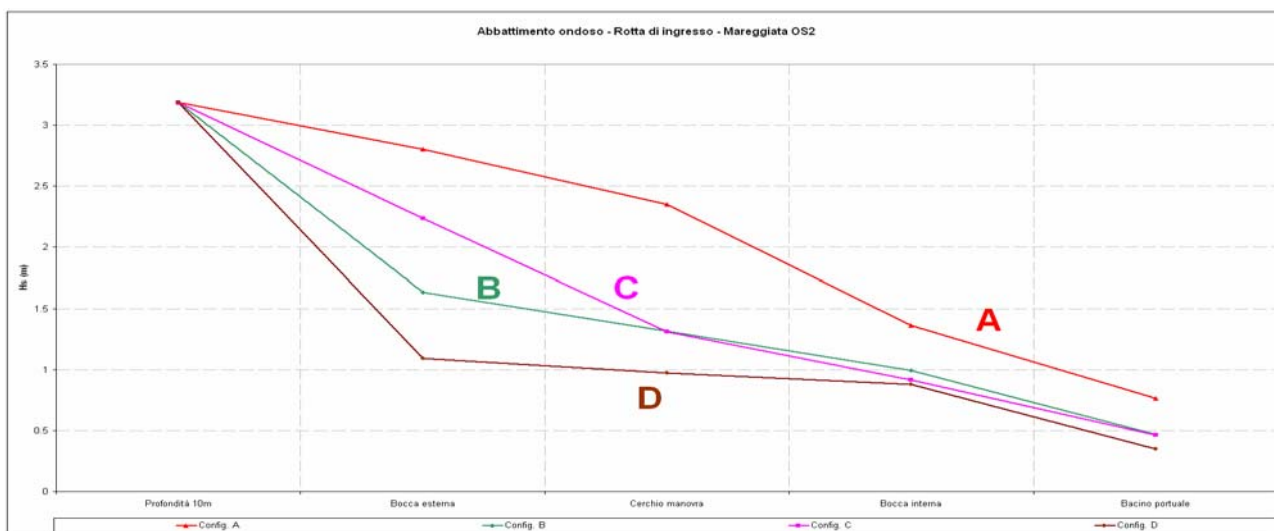
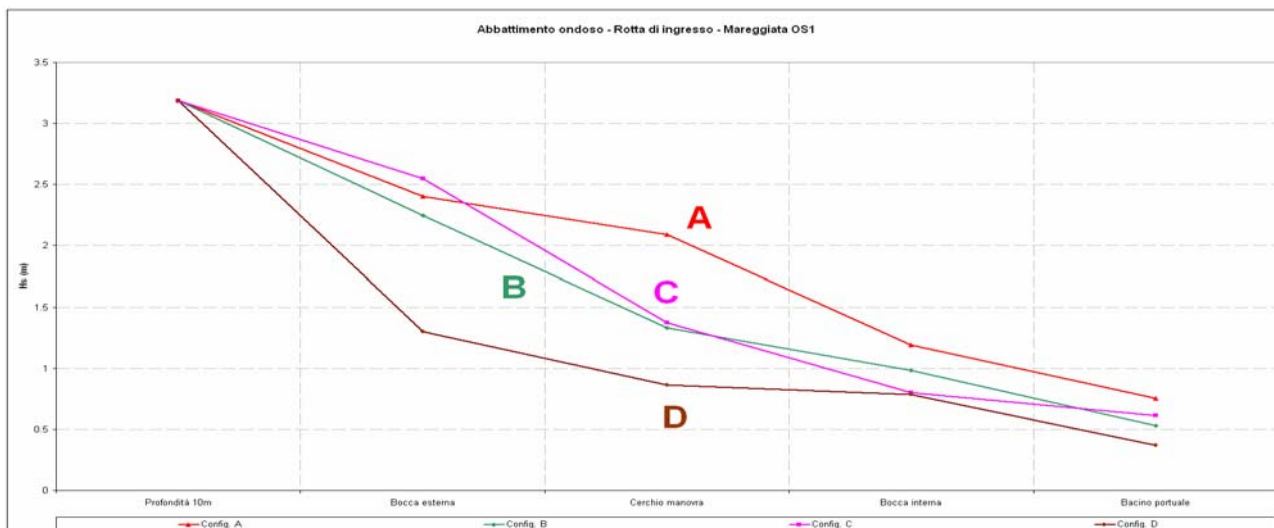


Figura 5.40 - Valutazione dell'abbattimento ondoso dall'esterno del porto alla darsena interna per le diverse mareggiate studiate

## 6) VERIFICA DELL'AGIBILITÀ DELLA ROTTA D'INGRESSO

### 6.1) Introduzione

Nel presente Capitolo è stata verificata l'agibilità della rotta d'ingresso in presenza delle opere foranee previste dalle configurazioni portuali proposte.

Tale verifica è stata effettuata tracciando per via grafica la possibile rotta di entrata in porto in condizioni ondose avverse ed individuando le dimensioni delle relative evoluzioni di manovra.

### 6.2) Tracciamento della rotta d'ingresso

Il tracciamento della rotta di ingresso al porto richiede innanzitutto la scelta della dimensione dell'imbarcazione tipica per cui studiare le caratteristiche della rotta. Nel caso in questione è stato scelto un natante da diporto di lunghezza  $30m$  ( $L = 30m$ ), che rappresenta la condizione più gravosa per le dimensioni delle evoluzioni di manovra che essa richiede.

Altra ipotesi fatta è che la barca abbia in avvicinamento una rotta rettilinea fino all'altezza del molo foraneo con un angolo minimo di  $15^\circ$  con la direzione dell'onda. Il procedimento grafico presuppone che, arrivati in prossimità del molo foraneo, l'imbarcazione inizi la virata, in condizioni di sicurezza, con un raggio minimo di curvatura pari a

$$R = 3L \quad \text{con tempesta} \quad (6.1)$$

$$R = 1.5L \quad \text{con tempo bello}$$

e la rotta non interferisca, al massimo sia tangente, con il cerchio avente raggio pari a minimo  $20m$  (tenendo conto che la semilunghezza della barca è  $r = \frac{L}{2} = 15m$ ) dalle strutture ed in particolare

dalle testate dei moli di difesa portuali.

Per quanto riguarda il caso in esame è stata tracciata la rotta d'ingresso per le tre direzioni di provenienza delle onde relative al picco delle mareggiate OS1, OS2, OS3 e per le quattro configurazioni portuali prese in esame A, B, C, D. Per tutti i casi sopra citati è stato possibile rispettare ampiamente i requisiti minimi che prevedevano una rotta con raggio minimo di virata in condizioni protette di  $R_{\min} = 90m$ , infatti per tutti i casi le manovre sono state eseguite con raggi di curvatura minimi addirittura di  $100m$ .

### 6.3) Delimitazione del cerchio di manovra

Tutte le configurazioni studiate prevedono nell'avamposto uno specchio acqueo contenente un cerchio di manovra di dimensioni adeguate. Il raggio del cerchio di manovra  $R_m$  può essere definito come

$$R_m = R \cdot \operatorname{tg} 30^\circ \quad (6.2)$$

essendo  $R$  il raggio della virata più stretta che può compiere l'imbarcazione (per le barche da diporto  $R = 1.5L$ ). A questo valore occorre aggiungere la mezza lunghezza della barca per considerare l'ingombro laterale, per cui il diametro complessivo della zona di ingombro della manovra è:

$$D_m = 2 \cdot (R_m + 0.5L) \quad (6.3)$$

Nel caso in esame tale condizione risulta ampiamente soddisfatta in quanto si è assunto come raggio del cerchio di evoluzione o manovra il valore minimo di  $53m$ .

Le Figure dalla 6.1 alla 6.12 riportano la sintesi dei risultati sopra illustrati.

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

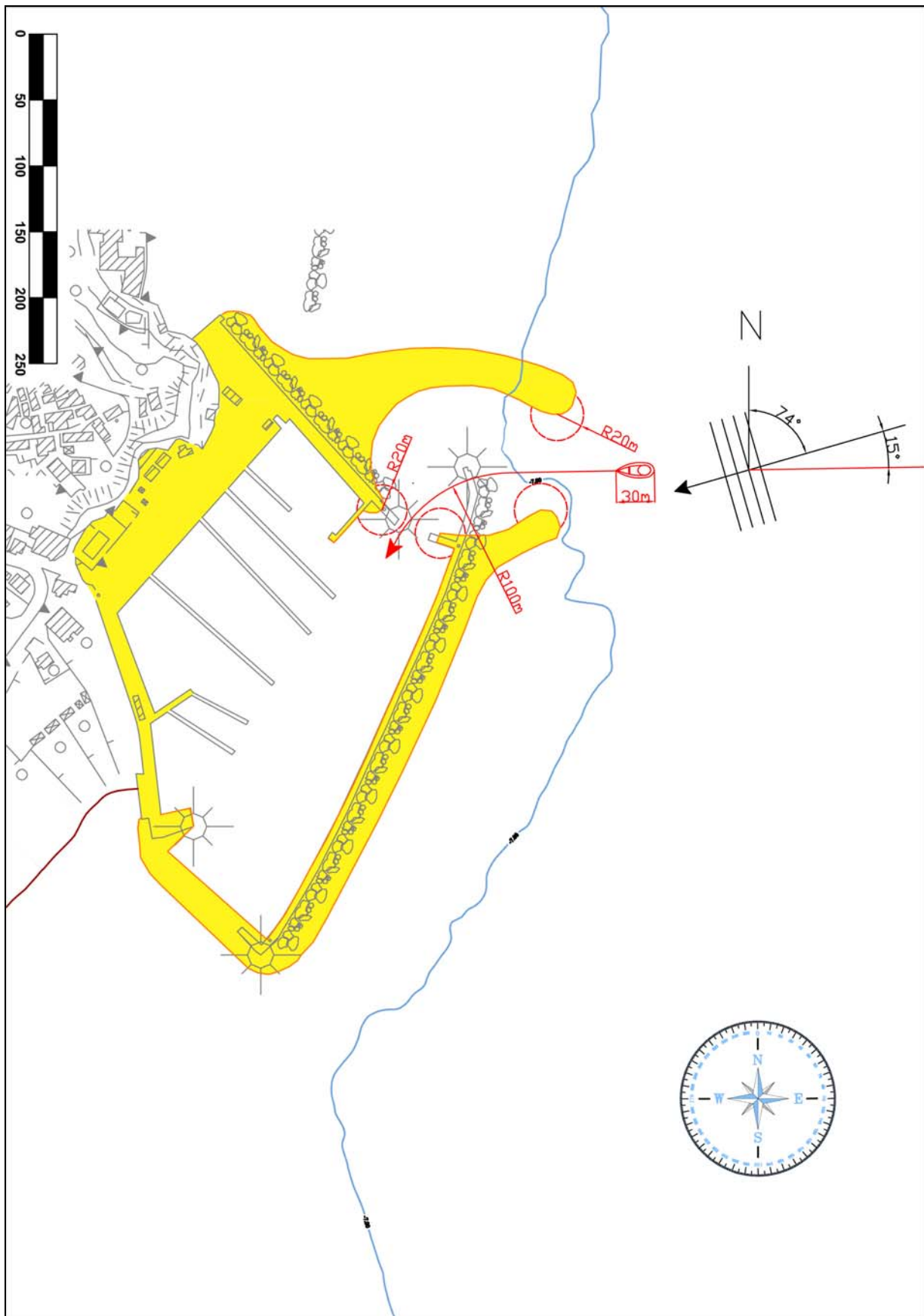


Figura 6.1 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione A - Mareggiata OSI



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

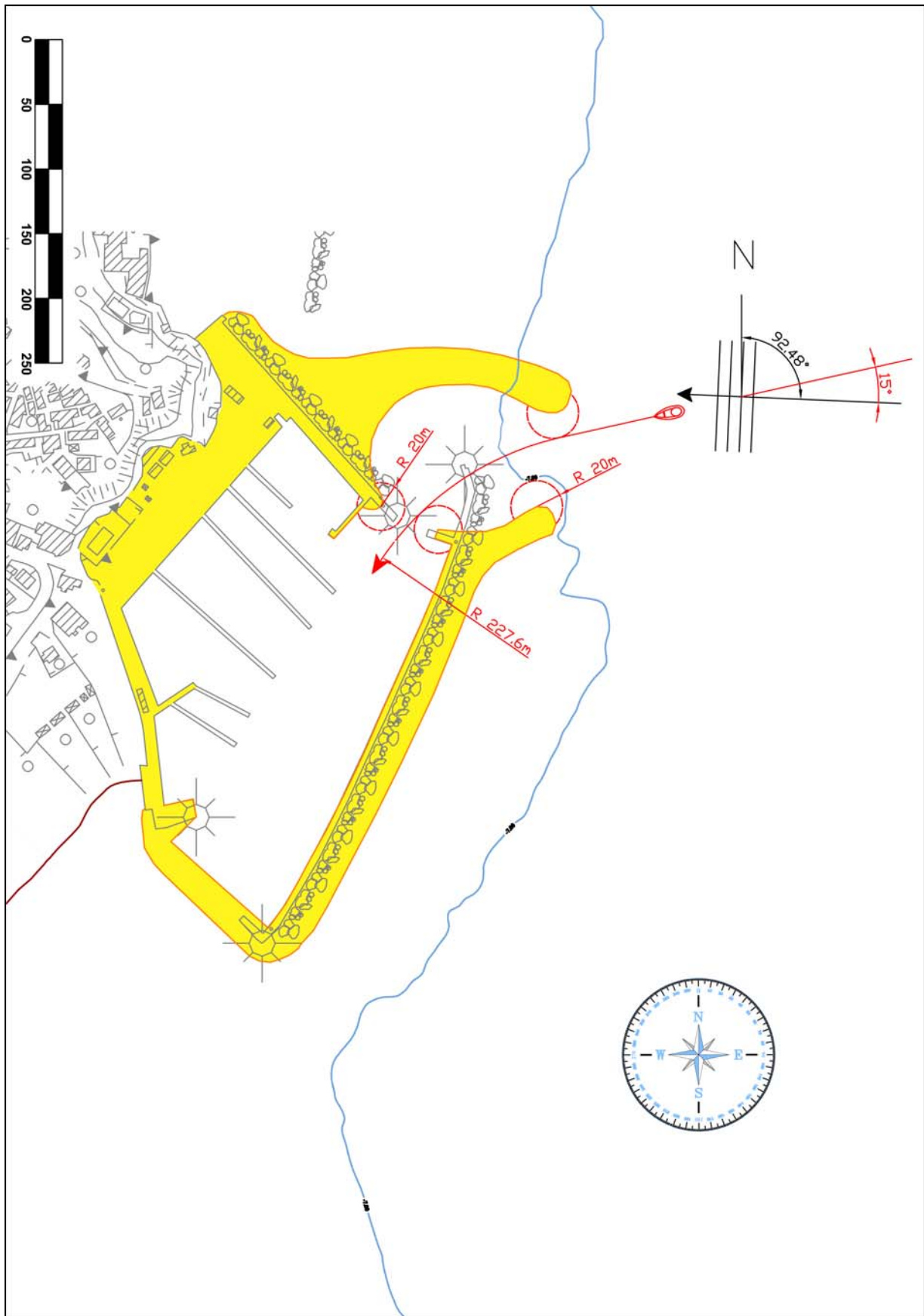


Figura 6.2 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione A - Mareggiata OS2

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

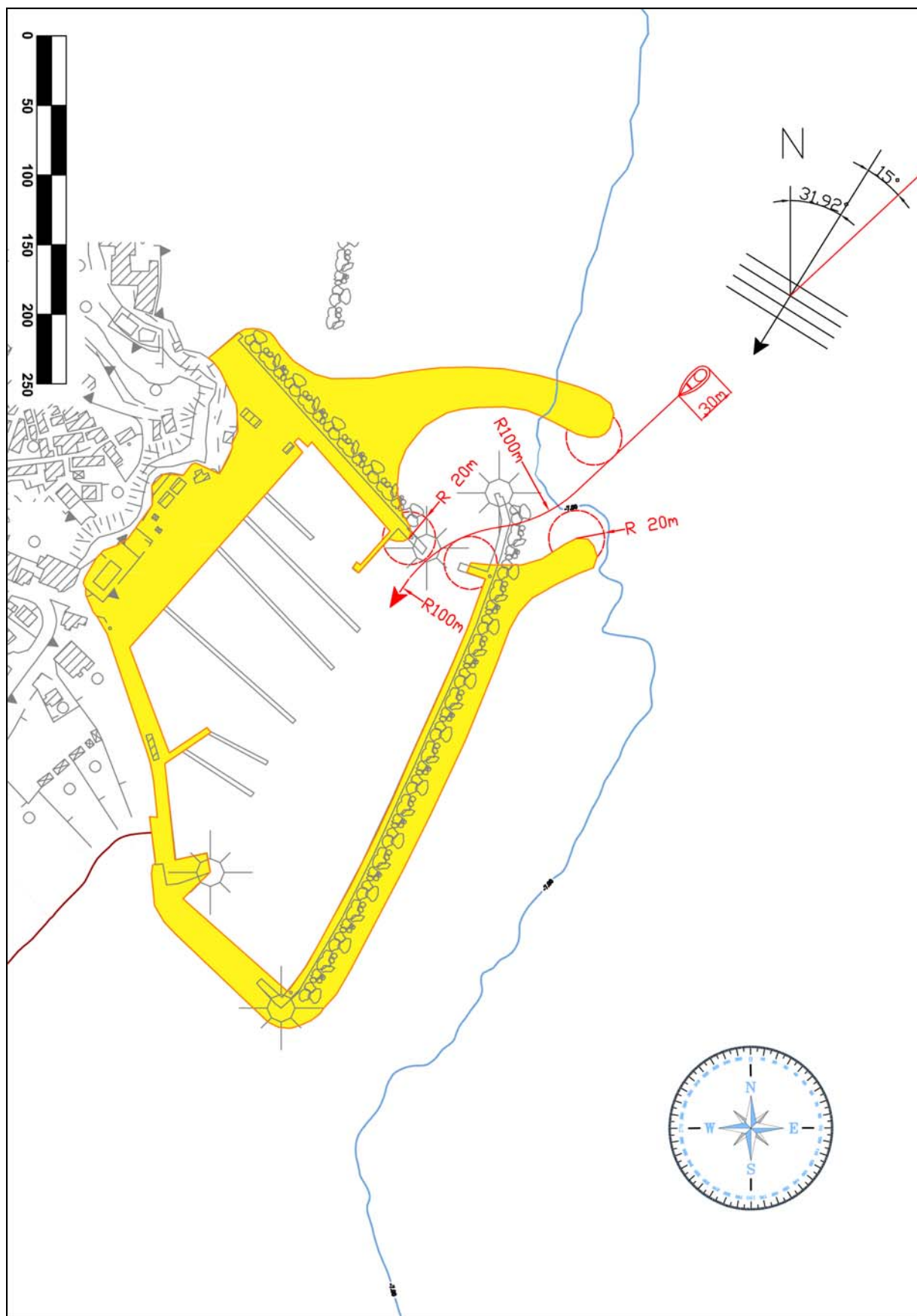


Figura 6.3 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione A - Mareggiata OS3

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

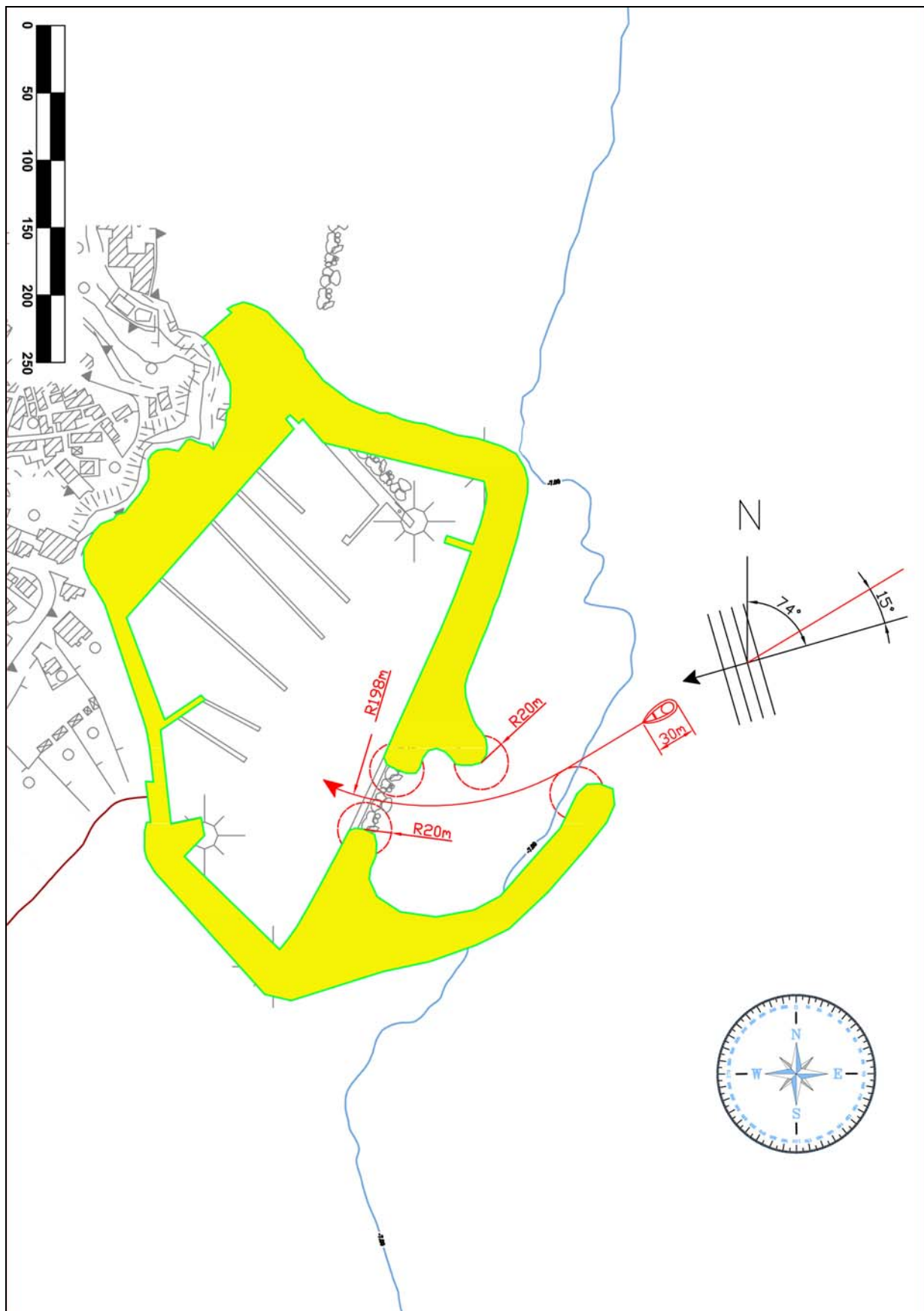


Figura 6.4 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione B - Mareggiata OSI

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

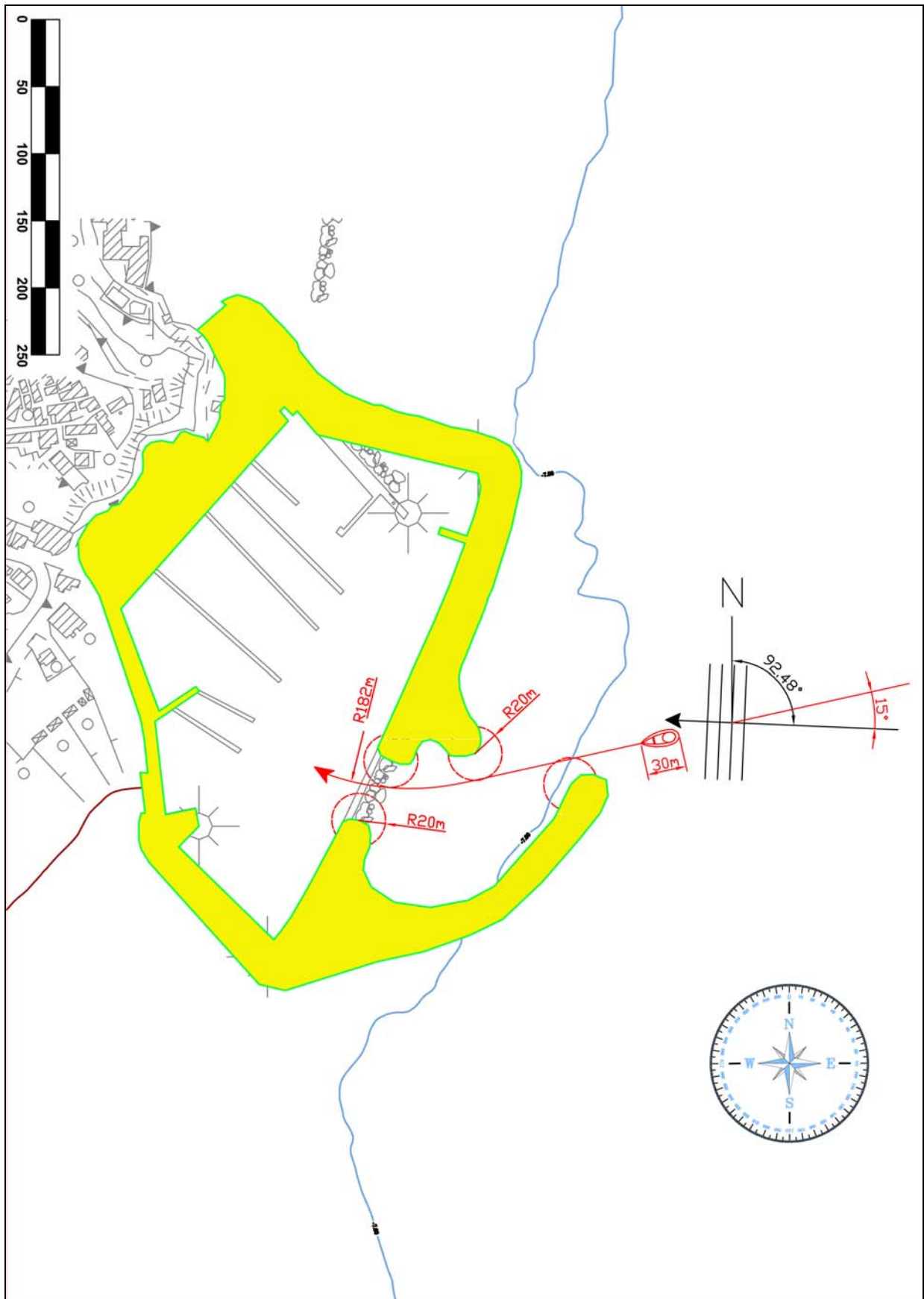


Figura 6.5 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione B - Mareggiata OS2





Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

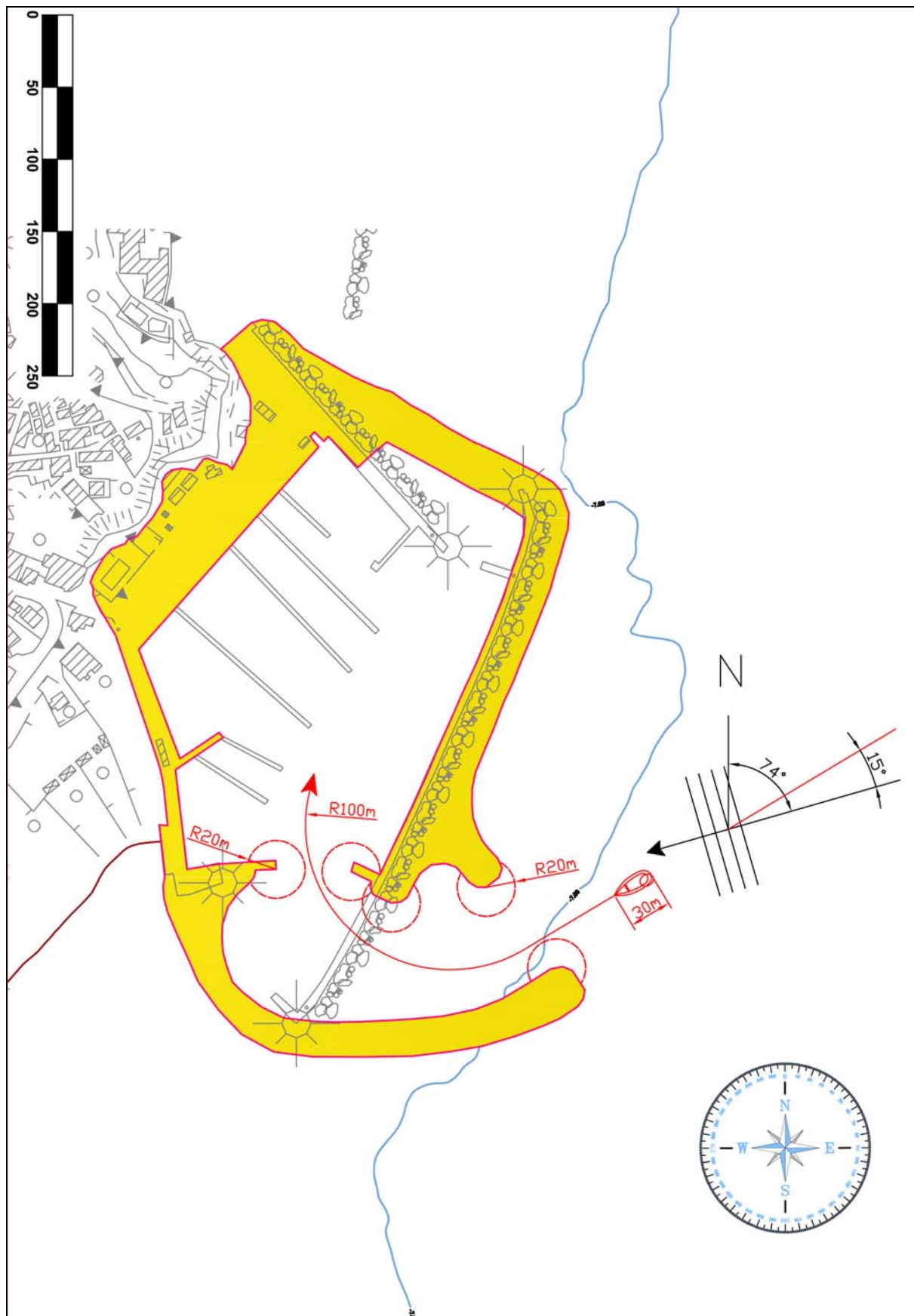


Figura 6.7 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione C - Mareggiata OSI

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

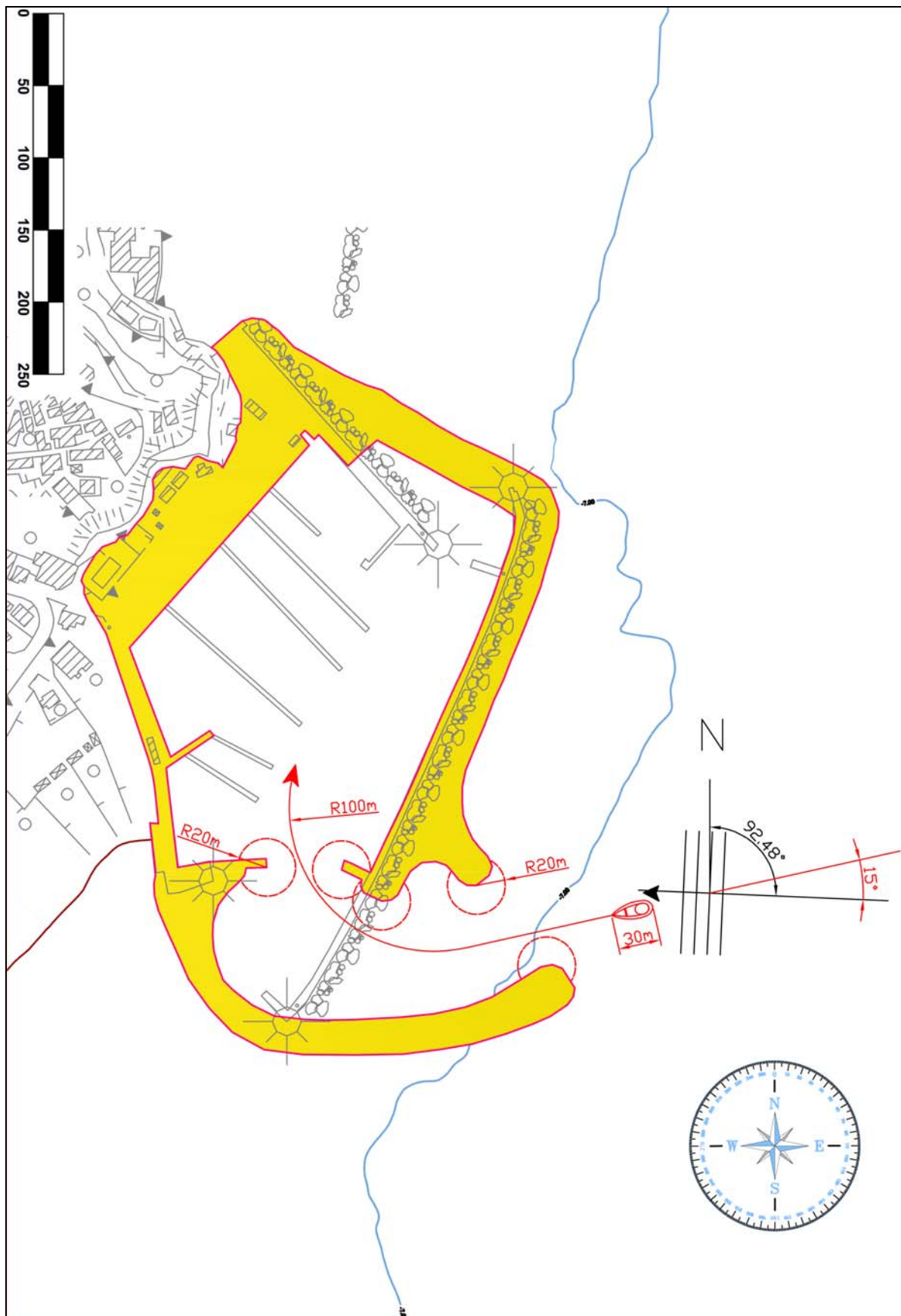


Figura 6.8 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione C - Mareggiata OS2

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

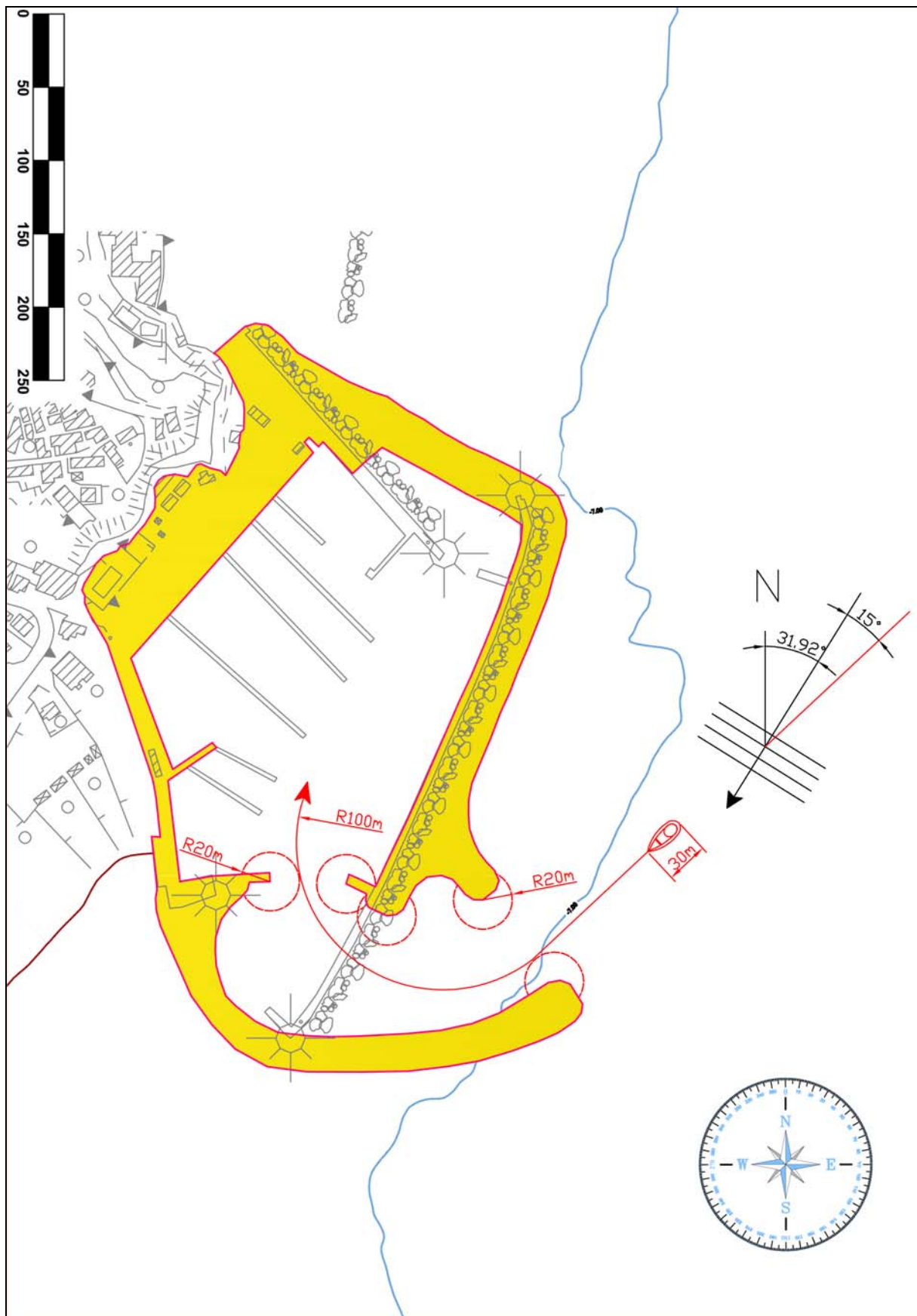


Figura 6.9 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione C - Mareggiata OS3



Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

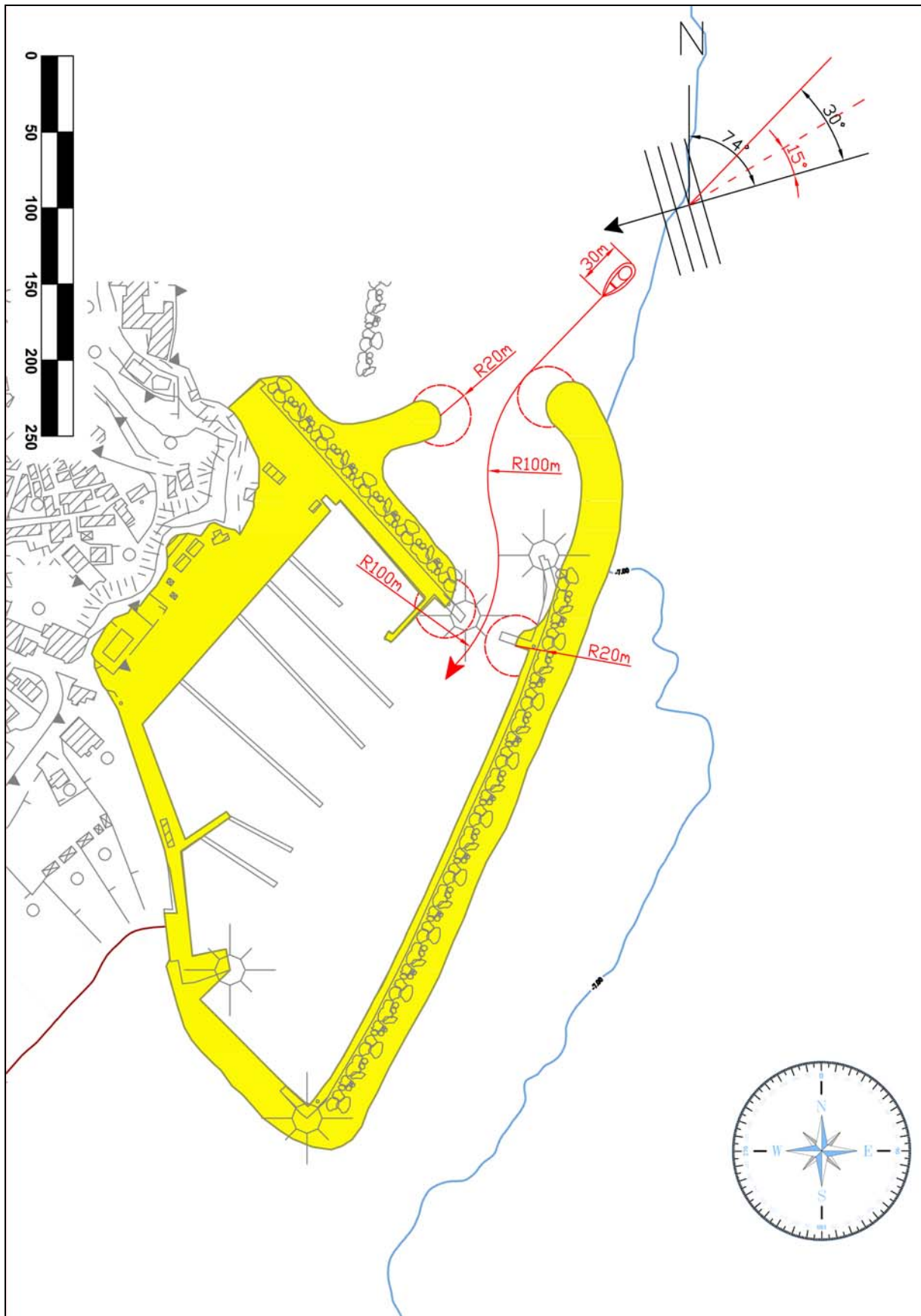


Figura 6.10 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione D - Mareggiata OS1

Convenzione di consulenza scientifica per lo studio, mediante modello matematico, di supporto alla individuazione della conformazione ottimale della nuova imboccatura del porto di Numana

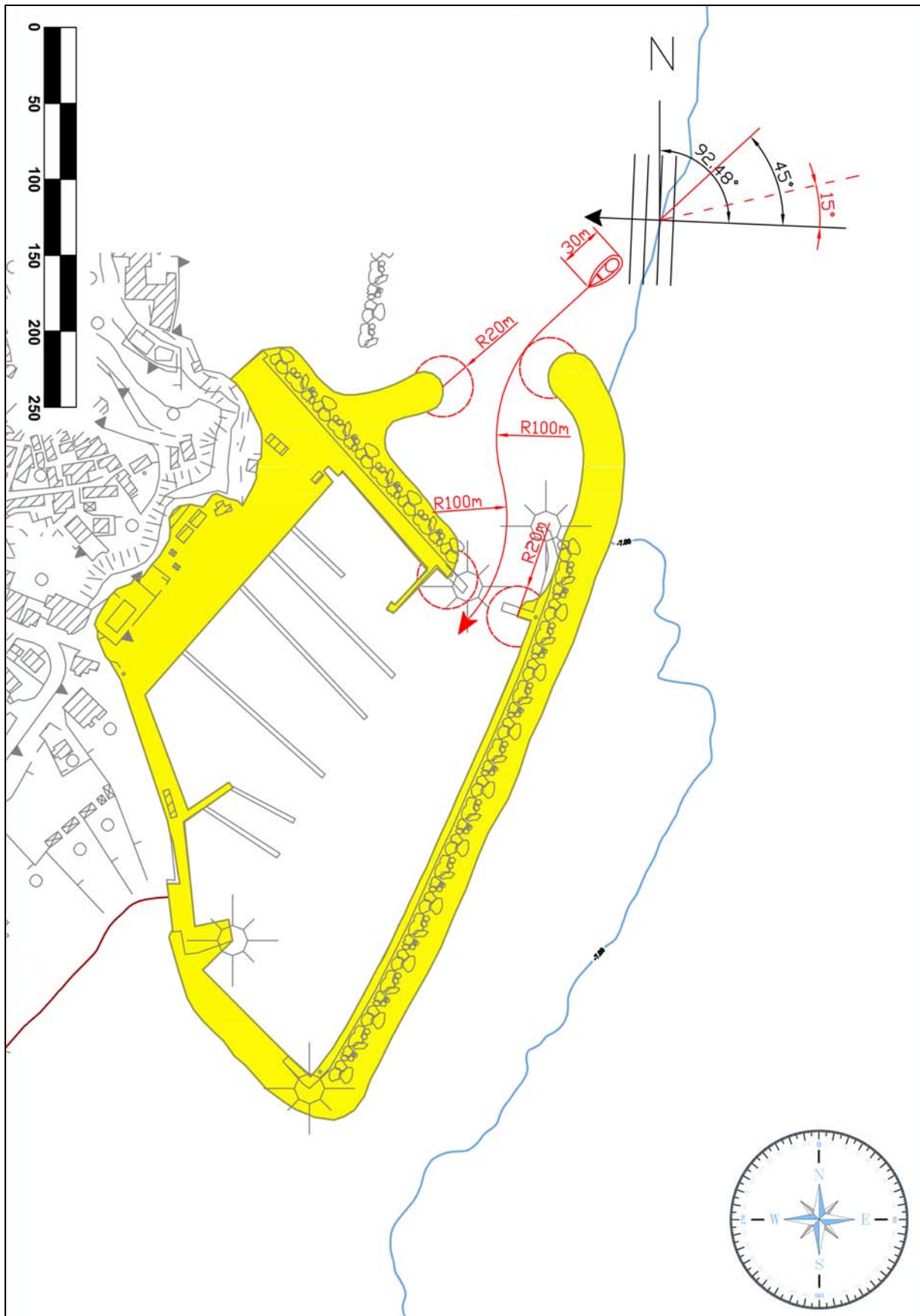


Figura 6.11 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione D - Mareggiata OS2

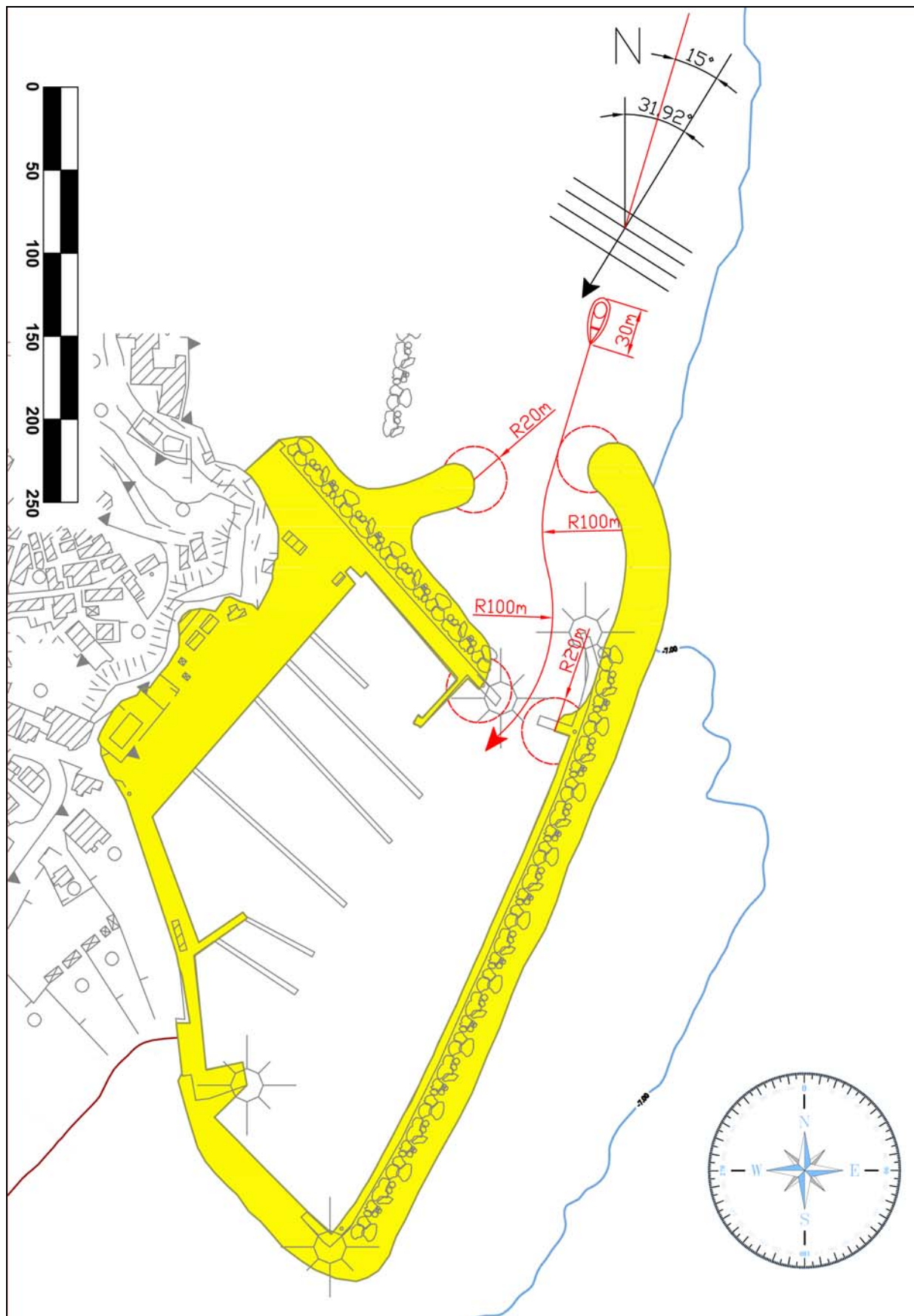


Figura 6.12 - Rotta d'ingresso al porto di Numana - Configurazione D - Mareggiata OS3

## **7) CONCLUSIONI**

Nel presente studio sono state analizzate 4 diverse configurazioni portuali con nuove soluzioni per l'avamposto e l'imboccatura del porto di Numana.

Le simulazioni numeriche e grafiche permettono di individuare le caratteristiche di funzionalità di ogni singola soluzione per quanto riguardano gli aspetti legati al grado di protezione del bacino interno, dall'agitazione ondosa, offerto dalle opere portuali e per quanto riguarda la navigabilità di accesso al porto in condizioni ondose avverse.