

PROGETTO

# SVILUPPO PROGETTO

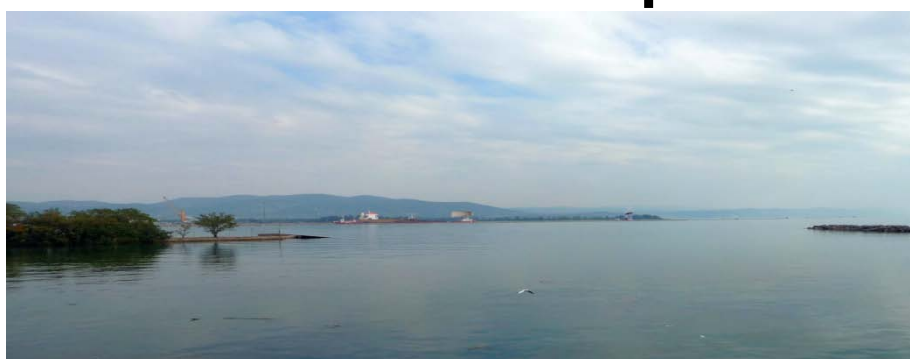
## TERMINALE GNL NEL PORTO DI MONFALCONE

UBICAZIONE

**MONFALCONE, ITALIA**

PROPONENTE

## SMART GAS S.p.A



UNITA' FUNZIONALE

### DOCUMENTI PER AUTORIZZAZIONE

TITOLO DOCUMENTO

### STUDIO METEOMARINO



CONSULENZA

*consulting, design, operation & maintenance engineering*

30/06/2014	EMISSIONE PER APPROVAZIONE	<i>Eloana Judina</i> EDI	<i>Elmestor</i> ETE <i>Maria Trillo</i> MTI <i>Andrea Sala</i> ALS	<i>Peter Kohn</i> PRA	<i>Eric J. P. L.</i> EP
26/03/2014	EMISSIONE PER COMMENTI	EDI/MFI	ETE/MTI/ALS	PRA	EP
DATA	DESCRIZIONE	ESEGUITO	CONTROLL.	APPROVATO	SOTT.

DATA	SCALA	CODIFICA INTERNA	DOC. N.				REV	FG
30/06/2014		<b>14-007-H4</b>	<b>14</b>	<b>007</b>	<b>MNG</b>	<b>R</b>	<b>001</b>	<b>1</b>



## INDICE

	<u>Pagina</u>
<b>LISTA DELLE TABELLE</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DELLE FIGURE</b>	<b>IV</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>2 AREA DI STUDIO</b>	<b>3</b>
<b>3 DATI DISPONIBILI</b>	<b>4</b>
3.1 DATI DI VENTO	4
3.2 DATI DI ONDE	4
3.3 DATI DI LIVELLO DEL MARE	5
3.4 DATI DI CORRENTE	5
<b>4 CRITERI METODOLOGICI</b>	<b>6</b>
4.1 STIMA DEI VALORI ESTREMI	6
4.2 ANALISI DEI DATI DI VENTO	7
4.2.1 Durata del Vento	7
4.2.2 Valori Estremi	8
4.3 MODELLAZIONE DI MOTO ONDOSI	8
4.3.1 Implementazione dei Modelli Spettrali per il Moto Ondoso	8
4.3.2 Verifica dei Risultati	9
4.3.3 Relazioni fra le Grandezze Caratteristiche del Moto Ondoso	10
4.3.4 Clima del Moto Ondoso	11
4.3.5 Valori Estremi	12
4.4 MODELLAZIONE IDRODINAMICA	12
4.4.1 Implementazione dei Modelli Idrodinamici	12
4.4.2 Analisi del Livello del Mare	13
4.4.3 Analisi della Corrente	13
4.4.4 Corrente da Vento e da Slope	14
4.4.5 Corrente di Marea	15
4.4.6 Valori estremi di Corrente	15
4.4.7 Profilo Verticale di Corrente	15
<b>5 REGIME ANEMOLOGICO</b>	<b>17</b>
5.1 CONDIZIONI TIPICHE	17
5.2 CONDIZIONI ESTREME	20
<b>6 MOTO ONDOSI</b>	<b>22</b>
6.1 CLIMA DEL MOTO ONDOSI	22
6.2 VALORI ESTREMI	25
<b>7 LIVELLO DEL MARE</b>	<b>45</b>
7.1 CONDIZIONI TIPICHE	45
7.2 VALORI ESTREMI	47
<b>8 CORRENTE</b>	<b>48</b>
8.1 CIRCOLAZIONE GENERALE	48
8.2 IL REGIME DELLE CORRENTI NEL GOLFO DI TRIESTE	50

8.3	CONDIZIONI TIPICHE E VALORI ESTREMI IN PROSSIMITÀ DEL PORTO DI MONFALCONE	53
8.3.1	Condizioni Tipiche	53
8.3.2	Valori Estremi	56
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>61</b>

## **RIFERIMENTI**

**APPENDICE A: MODELLO SWAN**  
**APPENDICE B: MODELLO HYDRO 2D**

## LISTA DELLE TABELLE

<b><u>Tabella No.</u></b>	<b><u>Pagina</u></b>
Tabella 4.1: Caratteristiche degli Schemi di Innesto del Modello di Moto Ondoso	9
Tabella 4.2: Caratteristiche degli Schemi di Innesto del Modello HYDRO 2D	13
Tabella 5.1: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza – Annuale	17
Tabella 5.2: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Inverno	18
Tabella 5.3: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Primavera	18
Tabella 5.4: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Estate	19
Tabella 5.5: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Autunno	19
Tabella 5.6: Valori Estremi della Velocità del Vento (m/s) per Direzione di Provenienza	21
Tabella 6.1: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda $H_s$ per Direzione di Provenienza – Annuale	22
Tabella 6.2: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda $H_s$ per Direzione di Provenienza – Inverno	23
Tabella 6.3: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda $H_s$ per Direzione di Provenienza – Primavera	23
Tabella 6.4: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda $H_s$ per Direzione di Provenienza – Estate	24
Tabella 6.5: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda $H_s$ per Direzione di Provenienza – Autunno	24
Tabella 6.6: Valori Estremi del Moto Ondoso al Largo del Golfo di Trieste: Punto O	25
Tabella 6.7: Valori Estremi del Moto Ondoso in Prossimità del Porto di Monfalcone: Punto A	25
Tabella 7.1: Principali Costanti Armoniche Della Marea a Trieste	45
Tabella 7.2: Valori Massimi e Minimi Annuali, Rispetto al Livello Medio Mare, Registrati a Trieste (Fonte: Istituto Talassografico di Trieste e ISPRA)	46
Tabella 7.3: Valori Estremi del Livello Del Mare (Riferiti Al Livello Medio) Stimati dai Valori Massimi e Minimi Annuali Rilevati dall'Istituto Talassografico Di Trieste dal 1944 al 1979 e dall'ISPRA dal 1988 al 2010	47
Tabella 7.4: Valori Estremi del Livello del Mare (Riferiti Al Livello Medio) Stimati Mediante Modello Idrodinamico Applicato alla Marea e ai Venti Estremi	47
Tabella 8.1: Stazione A - Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 6 m di Profondità per Direzione di Propagazione	51
Tabella 8.2: Stazione A- Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 17 m di Profondità per Direzione di Propagazione	51
Tabella 8.3: Stazione B - Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 5 m di Profondità per Direzione di Propagazione	52
Tabella 8.4: Stazione B - Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 10 m di Profondità per Direzione di Propagazione	52
Tabella 8.5: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente Superficiale Indotta dal vento per Direzione di Propagazione	54
Tabella 8.6: Valori Estremi di Corrente in Prossimità del Porto di Monfalcone	57

## LISTA DELLE FIGURE

<b><u>Figura No.</u></b>	<b><u>Pagina</u></b>
Figura 2.1: Area di Studio	3
Figura 2.2: Fetch efficace calcolato presso il Porto di Monfalcone	3
Figura 3.1: Posizione dei Punti di Misura e di Output dei Modelli	4
Figura 4.1: Schemi di Innesto del Modello di Moto Ondoso nel Mar Adriatico	9
Figura 4.2: Distribuzione Omnidirezionale di Altezza d'Onda Misurate Presso la Boa OGS (Biennio 2001-2003) e Ricostruite (Biennio 1994-1996)	10
Figura 4.3: Schemi di Innesto del Modello HYDRO 2D nel Mar Adriatico	12
Figura 5.1: Rosa dei Venti Annuale	17
Figura 5.2: Rose dei Venti Stagionali	20
Figura 6.1: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 120°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno	27
Figura 6.2: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 150°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno	28
Figura 6.3: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 180°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno	29
Figura 6.4: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 210°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno	30
Figura 6.5: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 240°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno	31
Figura 6.6: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 270°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno	32
Figura 6.7: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 120°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni	33
Figura 6.8: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 150°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni	34
Figura 6.9: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 180°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni	35
Figura 6.10: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 210°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni	36
Figura 6.11: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 240°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni	37
Figura 6.12: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 270°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni	38
Figura 6.13: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 120°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni	39
Figura 6.14: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 150°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni	40
Figura 6.15: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 180°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni	41
Figura 6.16: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 210°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni	42

## LISTA DELLE FIGURE (Continuazione)

<b><u>Figura No.</u></b>	<b><u>Pagina</u></b>
Figura 6.17: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 240°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni	43
Figura 6.18: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 270°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni	44
Figura 7.1: Oscillazione di Livello Indotta dal Vento Annuale Proveniente da 30°N	46
Figura 8.1: Schema della Circolazione Generale del Mar Adriatico (Mosetti, 1984)	49
Figura 8.2: Esempio di Calibrazione del Modello HYDRO 2D nel Mar Adriatico: Confronto tra i Livelli Misurati e Ricostruiti in Diversi Punti	50
Figura 8.3: Rosa della Corrente Superficiale Indotta dal Vento	54
Figura 8.4: Esempio di Elevazione del Livello sul l.m.m. e del Campo Idrodinamico Indotto dalla Marea in Fase Crescente	55
Figura 8.5: Esempio di Elevazione del Livello sul l.m.m. e del Campo Idrodinamico Indotto dalla Marea in Fase Calante	56
Figura 8.6: Periodo di Ritorno 1 Anno: Esempio di Campo Idrodinamico Indotto dal Vento Estremo	58
Figura 8.7: Periodo di Ritorno 10 Anni: Esempio di Campo Idrodinamico Indotto dal Vento Estremo	59
Figura 8.8: Periodo di Ritorno 100 Anni: Esempio di Campo Idrodinamico Indotto dal Vento Estremo	60





## SVILUPPO PROGETTO TERMINALE GNL NEL PORTO DI MONFALCONE STUDIO METEOMARINO

### 1 INTRODUZIONE

La società SMART GAS S.p.A. (società di scopo che raccoglie grandi consumatori regionali del Friuli Venezia Giulia) intende realizzare all'interno dell'area industriale del porto di Monfalcone un terminale per la ricezione, rigassificazione e distribuzione di Gas Naturale Liquefatto (GNL) di piccola taglia con lo scopo di aumentare la capacità di importazione del GNL in Italia, contribuendo alla diversificazione delle fonti energetiche e consentendo inoltre ai grandi consumatori regionali di stipulare contratti per la fornitura di gas a costi competitivi.

Tale progetto prevede l'implementazione di una filiera per il trasporto del Gas Naturale Liquido (GNL) a mezzo di navi metaniere sino al terminale di ricezione per lo stoccaggio, la rigassificazione del prodotto e la successiva immissione nella rete di trasporto nazionale. Il progetto prevede inoltre la possibilità di distribuire direttamente il GNL mediante l'utilizzo di navi (mini LNG tankers), autobotti e ferrocisterne.

Il Terminale avrà una capacità di rigassificazione di 800 milioni di Sm<sup>3</sup>/anno di gas naturale; inoltre, il progetto prevede la possibilità di stoccare e distribuire GNL liquido per ulteriori 1.33 MSm<sup>3</sup>/anno.

La capacità di stoccaggio di GNL è pari a 170,000 m<sup>3</sup>; l'approvvigionamento dei quantitativi richiesti sarà garantito attraverso l'arrivo di navi metaniere di capacità massima fino a 125,000 m<sup>3</sup>.

Il progetto prevede la realizzazione degli interventi infrastrutturali e impiantistici necessari a:

- consentire l'attracco delle navi metaniere e il trasferimento del prodotto liquido (GNL) dalle stesse ai serbatoi di stoccaggio attraverso tubazioni criogeniche;
- permettere lo stoccaggio, la rigassificazione e la misura del GNL prima della sua immissione in rete;
- distribuire il GNL attraverso operazioni di bunkering su imbarcazione ("terminal to ship"), camion ("terminal to truck") e rotaia ("terminal to rail").

Il progetto prevede, in particolare, l'esecuzione di dragaggi per l'approfondimento del canale di accesso e del bacino di evoluzione del Porto di Monfalcone fino alla profondità, al fine di consentire l'arrivo, l'ormeggio, la scarica del GNL e la ripartenza delle navi gasiere di capacità massima fino a 125,000 m<sup>3</sup>.

A tal fine, si è proceduto preliminarmente allo sviluppo della progettazione a valutare le condizioni meteomarine tipiche ed estreme caratteristiche dell'area, con l'obiettivo di garantire condizioni idonee al transito e allo stazionamento, in condizioni di sicurezza, delle navi gasiere.

L'obiettivo del presente studio è quello di definire le condizioni tipiche ed estreme dei parametri meteomarini in prossimità del terminale di rigassificazione GNL Monfalcone. Le condizioni meteomarine sono uno degli input fondamentali per svolgere una corretta progettazione delle opere civili (i.e. banchine) ed una corretta analisi della logistica e dell'ormeggio delle navi gasiere dirette al nuovo terminal GNL. Per tale ragione le caratteristiche locali di vento, moto ondoso, oscillazione di livello e di corrente devono essere definite con adeguato livello di dettaglio.

I dati di base sono stati reperiti negli archivi D'Appolonia e sono stati validati, elaborati ed interpretati al fine di caratterizzare compiutamente il sito di interesse.

Nello studio si è fatto ricorso a modellistica numerica necessaria per simulare la generazione-propagazione delle onde all'interno del Golfo di Trieste e le condizioni idrodinamiche (livello e corrente) che caratterizzano le acque in prossimità del porto di Monfalcone. Il moto ondoso estremo è stato poi ricostruito nell'area prossima al canale di entrata al porto di Monfalcone mediante il modello SWAN i cui dettagli sono riportati in Appendice A.

Le variazioni di livello sono decisamente consistenti nell'area a causa della sovrapposizione di vari termini forzanti quali la marea, il vento, i gradienti barici e le sesse. Al fine di ben definire e quantificare le oscillazioni di livello marino e le correnti nell'area di studio, utili ad una corretta scelta delle navi gasiere utilizzabili, è stato utilizzato il modello HYDRO 2D (dettagli in Appendice B) più volte calibrato e verificato nel mare Adriatico.

La presente relazione, dopo aver elencato e commentato i dati disponibili, fornisce una descrizione dettagliata della metodologia utilizzata. Successivamente vengono presentati e discussi i risultati ottenuti, finalizzati alla definizione delle condizioni tipiche ed estreme nell'area di studio.

## 2 AREA DI STUDIO

L'area di studio, ubicata nel Golfo di Trieste, è mostrata in Figura 2.1. L'esposizione dell'area viene mostrata mediante il grafico relativo al fetch efficace in Figura 2.2. Il settore di traversia principale va da 125°N a 174°N ed è caratterizzato da un fetch di circa 20 km.



Figura 2.1: Area di Studio

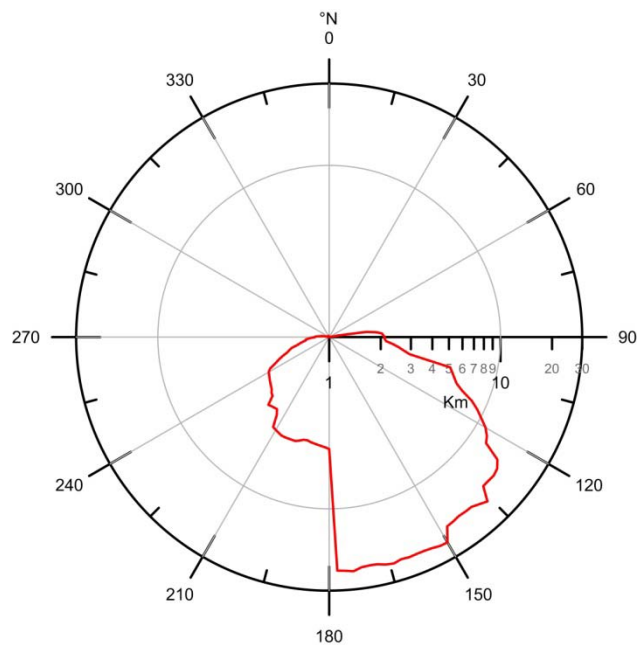


Figura 2.2: Fetch efficace calcolato presso il Porto di Monfalcone

### 3 DATI DISPONIBILI

Nel seguito vengono presentati e analizzati i dati disponibili, riportati per chiarezza in Figura 3.1.



**Figura 3.1: Posizione dei Punti di Misura e di Output dei Modelli**

#### 3.1 DATI DI VENTO

Le misure di vento sono state rilevate dalla stazione della Rete Mareografica Nazionale (RMN), ubicata presso il Molo della Lega Navale all'interno del Porto di Trieste. Il palo meteorologico è ubicato alle coordinate  $45^{\circ} 38' 57.81''$  N,  $13^{\circ} 45' 28.58''$  E.

Per quanto riguarda i dati di vento, sono disponibili i dati orari della velocità e direzione del vento calcolati come media vettoriale degli ultimi 10 minuti di ogni ora, riferiti a 10 m s.l.m dal 1/9/1998 al 15/11/2013.

I dati di vento si riferiscono alla zona di Trieste, in una zona dove la convergenza del vento può creare amplificazioni e di conseguenza, rispetto all'area di studio, i dati di vento misurati a Trieste devono essere considerati cautelativi.

#### 3.2 DATI DI ONDE

Sono disponibili le seguenti misure di moto ondoso:

- statistiche di moto ondoso derivanti da misure effettuate dall'OGS di Trieste fuori dal golfo di Trieste, in un punto di coordinate  $45^{\circ}34'00''$  N e  $13^{\circ}15'00''$  E su un fondale di 16 m. Il periodo di misura va dal 7/3/2001 al 6/11/2003, per un totale di circa 32 mesi. Queste misure sono state utilizzate per validare il modello.

- serie temporale di moto ondoso registrata sulla piattaforma Agip Ada. La piattaforma Ada fa parte della rete di monitoraggio delle piattaforme Agip nell'Alto Adriatico installata nel 1992. Ubicata alle coordinate 45°10'57" N e 12°35'28" E su di una profondità d'acqua di 24.5 m, la piattaforma Ada ha rilevato dati nel periodo 1993-2001. La piattaforma è una monotubolare sulla quale è stata realizzata una struttura dotata di sensori per la misura del vento, pressione atmosferica e moto ondoso e contenente il sistema di acquisizione-trasmissione dei dati rilevati. Gli strumenti sono pertanto completamente esposti alle condizioni meteomarine senza essere affetti da possibili schermature dovute alla presenza della struttura. I dati acquisiti sono stati verificati e validati da DEAM, ora Unit GEO4 di D'Appolonia, sia nel merito dell'attendibilità fisica di ciascun sensore, sia mediante confronto con i dati rilevati, nel corso della stessa perturbazione, dalle altre piattaforme Agip. I dati misurati presso la piattaforma Ada rappresentano dunque un punto di misura ideale per la definizione delle condizioni meteomarine offshore da utilizzare in input per la successiva modellazione.

### **3.3 DATI DI LIVELLO DEL MARE**

I dati di livello disponibili sono:

- serie temporale di livello misurata dal 1988 al 2010 dalla stazione della Rete Mareografica Nazionale (RMN), ubicata presso il Molo della Lega Navale all'interno del Porto di Trieste;
- statistiche di livello marino misurate a Trieste dall'Istituto Talassografico per il periodo dal 1944 al 1979.

### **3.4 DATI DI CORRENTE**

Nell'area di studio sono disponibili statistiche derivate da misure di corrente locali rilevate presso due diverse stazioni:

- stazione A, ubicata alle coordinate 45°37.00'N e 13°42.85' E su di un fondale di 21 m; le quote di misura sono due: 6 m (periodo di registrazione va dal 18/10/1984 al 12/8/1985) e 17 m dalla superficie (periodo di registrazione va dal 18/10/1984 al 30/8/1985);
- stazione B, ubicata alle coordinate 45°40.80'N e 13°34.00' E su di un fondale di 14 m; le quote di misura sono due: 5 m (periodo di registrazione va dal 5/6/1985 al 13/8/1985) e 10 m dalla superficie (periodo di registrazione va dal 5/6/1985 al 14/8/1985).

## 4 CRITERI METODOLOGICI

La metodologia applicata nel presente studio consiste in un'analisi finalizzata alla definizione del clima meteomarinario e di valori estremi che assicurino la rappresentatività climatica dei dati. Infatti i dati meteomarini debbono essere rappresentativi dei fenomeni meteorologici che possono avvenire in periodi di tempo molto lunghi (Borgman and Resio, 1977\*) e quindi essere rappresentativi del clima medio a lungo termine e delle sue variabilità annuali e stagionali (Resio, 1978). Per minimizzare l'incertezza statistica associata alla stima dei valori estremi, incertezza ovviamente non eliminabile nell'extrapolare fenomeni stocastici, è necessario disporre di lunghe serie di misure meteorologiche e oceanografiche.

Viene di seguito indicata schematicamente la procedura di studio:

- validazione della serie temporale originale di vento;
- validazione della serie temporale originale di moto ondoso;
- schematizzazione geometrica della batimetria;
- elaborazioni statistiche dei dati di vento e moto ondoso;
- stima del clima di moto ondoso a costa mediante modello semplificato;
- propagazione dei valori estremi di moto ondoso a costa mediante modello spettrale;
- analisi delle variazioni del livello marino mediante modello idrodinamico;
- analisi del regime delle correnti con modello idrodinamico.

### 4.1 STIMA DEI VALORI ESTREMI

Nell'ambito dell'ingegneria costiera, la definizione dei parametri meteomarini di progetto è basata sulla stima dei valori estremi di una grandezza (vento, moto ondoso, livello del mare, corrente), cioè di valori che abbiano associato un rischio di superamento nelle varie fasi di posa in opera e vita operativa delle strutture in progetto.

La stima degli estremi comporta la definizione dei parametri caratteristici della distribuzione statistica dei valori rilevati, caratteristiche a priori ignote sia per quanto riguarda la forma funzionale che per quanto riguarda i parametri della distribuzione che descrive tale forma funzionale.

A posteriori la scelta può essere giustificata con i metodi di analisi di "bontà del fitting" tra la distribuzione dedotta dai dati misurati e distribuzioni di probabilità che, negli anni, sono state successivamente proposte ed utilizzate. La consuetudine ha portato poi ad una certa standardizzazione nell'uso di tali distribuzioni teoriche: in tal senso la stima dei valori estremi di vento, onde e correnti viene effettuata con la distribuzione di Weibull o, più raramente, con quella di Gumbel, quest'ultima utilizzata soprattutto quando siano disponibili solo i massimi rilevati.

La teoria dei valori estremi fornisce dunque stime della probabilità che si verifichino, in un certo periodo temporale, valori estremi di un determinato parametro.

---

\* Vedi lista referenze alla fine del testo.

Dato un insieme N di valori estremi di una grandezza, sia F(x) la distribuzione estrema che meglio si adatta ad essi (il ragionamento è comunque indipendente dal tipo di distribuzione considerato).

Il periodo di ritorno T(x) dell'evento x è definito come il numero di anni entro i quali x viene superato mediamente una volta. Allora T(x) è collegato a F(x) da:

$$T(x) = \frac{1}{[1 - F(x)]\lambda} \quad 4.1$$

dove  $\lambda$  è il numero medio di eventi annui.

La probabilità che il superamento di x avvenga entro un anno è  $1/T(x)$ , la probabilità di non superamento è  $[1 - 1/T(x)]$ , e quindi la probabilità che x non sia superato entro t anni è data da:

$$P^-(x) = \left[1 - \frac{1}{T(x)}\right]^t \quad 4.2$$

(Si indica con P- la probabilità di non-superamento, con P+ quella di superamento. E' evidente che  $P^- + P^+ = 1$ ).

Con l'esclusione dei più bassi valori di T, la [4.2] è sostituibile con ottima precisione (Gumbel, 1958) con:

$$P^-(x) = e^{-\frac{t}{T(x)}} \quad 4.3$$

E' evidente che per applicare la [4.3] è necessario conoscere T(x), e quindi F(x).

Per  $t=T$  si ottiene  $P=63.2\%$ : tale valore è dunque la probabilità media o "rischio medio" associato ad x nel tempo T.

Per  $t < T$  tale rischio è ovviamente ridotto: ad es. per  $t=30$  anni e  $T=100$  anni la probabilità di superamento è del 25.9% e così via.

In questo studio sono stati stimati i valori estremi per i periodi di ritorno di 1, 10 e 100 anni.

## 4.2 ANALISI DEI DATI DI VENTO

I dati anemologici disponibili provengono da misure locali riferite alla quota di 10 m rispetto al l.m.m. e a valori di 10' campionati ogni ora.

### 4.2.1 Durata del Vento

Nel caso fossero necessarie durate diverse, le rispettive velocità possono essere calcolate mediante la relazione suggerita dallo "Shore Protection Manual" (CERC, 1984):

$$\frac{W_t}{W_{3600}} = 1.277 + 0.296 \tanh\left(0.9 \log_{10}\left(\frac{45}{t}\right)\right) \text{ per } 1 < t < 3600\text{s} \quad 4.4$$

dove  $W_t$  è la velocità del vento di durata  $t$  e  $W_{3600}$  è la velocità di durata 1 ora.

#### 4.2.2 Valori Estremi

I valori estremi sono stati calcolati applicando la funzione probabilistica di Weibull:

$$P(w > W) = 1 - \exp[-(w/\alpha)^\beta] \quad 4.5$$

dove  $w$  è la variabile (velocità del vento),  $\alpha$  e  $\beta$  sono i parametri della distribuzione calcolati mediante la tecnica di best-fit ai minimi quadrati.

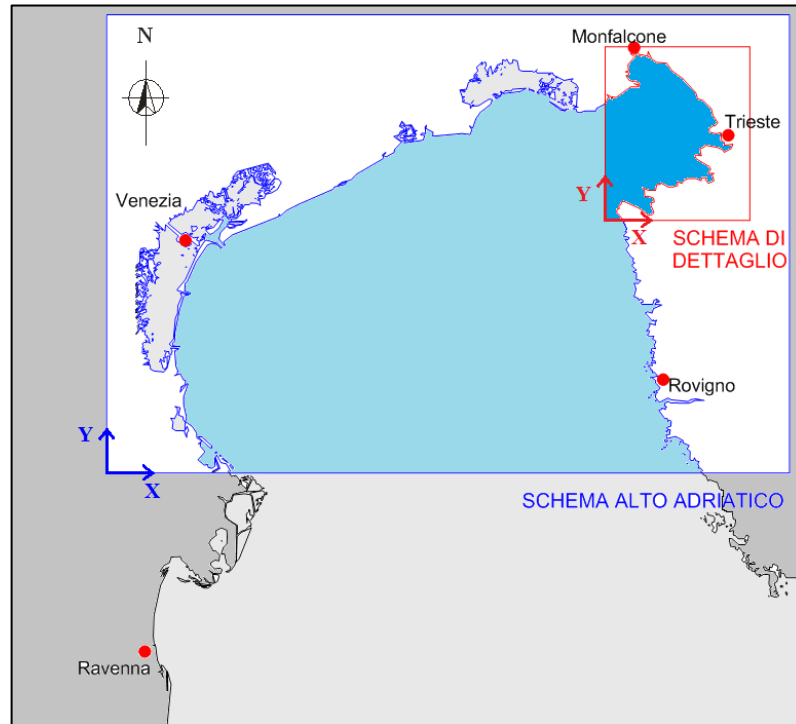
### 4.3 MODELLAZIONE DI MOTO ONDOSO

#### 4.3.1 Implementazione dei Modelli Spettrali per il Moto Ondoso

Il modello spettrale SWAN per la propagazione del moto ondoso in acque costiere è stato implementato sull'area riportata in Figura 4.1 (rettangolo rosso), schematizzata con una griglia a maglie equispaziate di circa 100 m.

Due diversi livelli di innesto sono stati utilizzati nella modellazione del moto ondoso. In particolare lo schema di dettaglio è stato innestato su di uno schema dell'Alto Adriatico, caratterizzato da maglie equispaziate di circa 1.5 km.





**Figura 4.1: Schemi di Innesto del Modello di Moto Ondoso nel Mar Adriatico**

Le caratteristiche degli schemi di calcolo utilizzati nei due diversi modelli sono riportate in Tabella 4.1.

**Tabella 4.1: Caratteristiche degli Schemi di Innesto del Modello di Moto Ondoso**

Schema	Delta X (m)	Delta Y (m)	Rotazione Asse X (°N)	Nx	Ny
ALTO ADRIATICO	1500	1500	90	90	57
DETTAGLIO	100	100	90	274	359

Nx e Ny sono rispettivamente il numero di maglie lungo l'asse x e il numero di maglie lungo l'asse y.

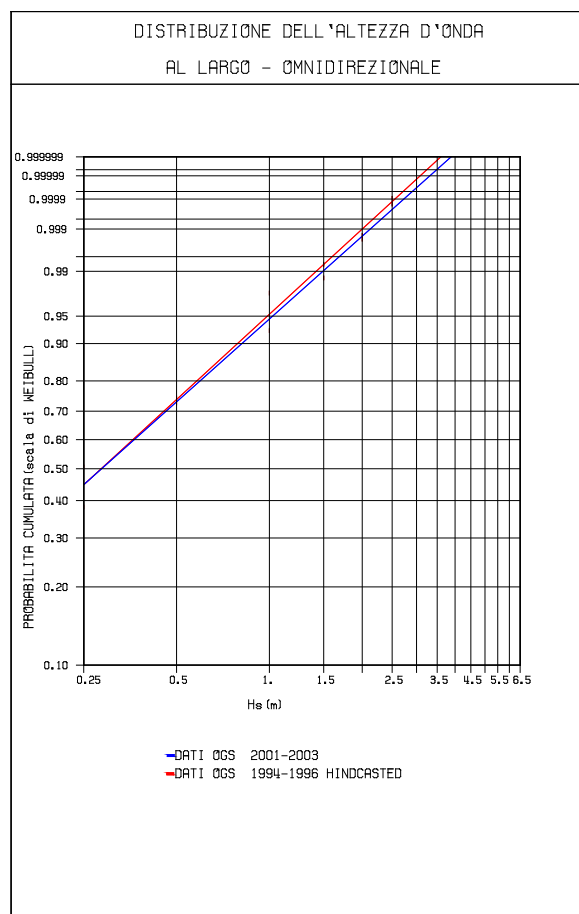
Data la mancanza di una serie continua di campi di vento a grande scala ricostruiti nel periodo di misura di Ada (1993-2001), si è preferito utilizzare il modello SWAN per la propagazione della serie temporale misurata presso Ada nell'area di studio. Essendo disponibile su Ada anche un anemometro, il modello SWAN è stato forzato assumendo presso il punto di misura caratteristiche del vento analoghe a quelle rilevate dall'anemometro della piattaforma. La batimetria è stata desunta dalle carte nautiche disponibili.

#### 4.3.2 Verifica dei Risultati

Non essendo disponibili presso il sito di progetto misure di moto ondoso per la validazione dei modelli, allo scopo di verificare i risultati della simulazione è stata ricostruita la serie

temporale anche nel punto di coordinate corrispondente all'ubicazione della boa ondometrica direzionale OGS (vedi Figura 3.1) per la quale sono disponibili i dati di moto ondoso misurati nel periodo dal 7/03/2001 al 6/11/2003. Pur non trattandosi di periodi di misura coincidenti, è auspicabile attendersi una analogia tra le distribuzioni direzionali e omnidirezionali dei valori di altezza d'onda misurati e ricostruiti.

In Figura 4.2 è riportato, a titolo di esempio, il confronto tra la distribuzione omnidirezionale misurata e quella ricostruita nel biennio 1994-1996: le due distribuzioni sono praticamente coincidenti (così come tutti gli altri bienni che si possono isolare tra il 1993 e il 2000), il che indica che la serie ricostruita realizza una buona rappresentatività del clima tipico dell'area ed è ragionevole assumere, quindi, che la sequenza degli eventi simulati sull'intero dominio di calcolo sia altrettanto rappresentativa.



**Figura 4.2: Distribuzione Omnidirezionale di Altezza d'Onda Misurate Presso la Boa OGS (Biennio 2001-2003) e Ricostruite (Biennio 1994-1996)**

#### 4.3.3 Relazioni fra le Grandezze Caratteristiche del Moto Ondoso

Oltre all'altezza d'onda significativa, può essere utile conoscere anche i valori dell'altezza d'onda massima  $H_{max}$ , che può essere calcolata secondo la relazione:

$$H_{max} = 1.87 H_s \quad 4.6$$

Tale relazione deriva dal considerare valida la distribuzione teorica di Rayleigh (Goda, 2000). Ovviamente la natura “random” dell’onda massima è tale che records di onde individuali caratterizzati dallo stesso valore di  $H_s$  possono contenere valori di  $H_{max}$  differenti. La stima deterministica dei valori di  $H_{max}$  da treni d’onde individuali è quindi impossibile.

Si utilizza allora la distribuzione di Rayleigh per stimare il valore più probabile di  $H_{max}$  contenuto in un record, valore dato da:

$$(H_{max} / H_s) = 0.706 \sqrt{\ln N} \quad 4.7$$

dove  $N$  è il numero di onde individuali considerate.

La casualità delle onde massime può indurre incertezze nell’ingegneria delle strutture; per evitare tale fatto è d’uso, nella progettazione off-shore, stimare un valore di  $H_{max}$  sulla base sia della durata di un particolare stato di mare che sul numero di onde singole.

Poiché il valore estremo di  $H_s$  è in generale quello rappresentativo di uno stato di mare di durata 3 ore, il corrispondente valore di  $H_{max}$  deve essere rappresentativo della stessa durata: assumendo che, nel corso delle perturbazioni il periodo medio sia di 9-10 s, il numero di onde in 3 ore sarà dell’ordine di 1000. Con tale numero si ottiene appunto la relazione [4.6].

Per quanto concerne il periodo, i dati disponibili si riferiscono al periodo significativo che viene calcolato come media dei periodi associati alle altezze con cui viene calcolata l’altezza d’onda significativa. Per associare ad  $H_s$  il valore di  $T_s$ , si può fare uso della nota relazione:

$$H_s = 0.06 T_s^2 \quad 4.8$$

tipica del “mare da vento” al largo, cioè delle condizioni di interesse ingegneristico, ricavata dall’analisi di numerosi dati rilevati nel Canale di Sicilia (Grancini et al, 1979), e successivamente adottata dal CNR (C.N.R., 1984) e poi verificata su misure effettuate in vari punti del Mediterraneo.

#### 4.3.4 Clima del Moto Ondoso

Non esistendo misure locali il clima di moto ondoso nei pressi del porto di Monfalcone, punto A in Figura 3.1, è stato ricostruito utilizzando la metodologia semplificata suggerita dallo “Shore Protection Manual” (CERC, 1984) per le aree in cui il campo di moto ondoso è fortemente dipendente dal regime dei venti locali:

$$H_{m0} = 0.01616 U_a F^{0.5} \quad 4.9$$

dove  $U_a$  è il vento efficace (m/s) ottenuto considerando gli effetti di attrito del vento sulla superficie del mare e  $F$  è il fetch su cui soffia il vento in km. Il vento efficace  $U_a$  può essere valutato dalla seguente relazione:

$$U_a = 0.71 U^{1.23} \quad 4.10$$

in cui  $U$  è il vento (m/s) misurato a 10 m sul l.m.m.

#### 4.3.5 Valori Estremi

Per ciascuna delle distribuzioni direzionali all'interno del settore di traversia principale sono stati calcolati i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  della funzione probabilistica di Weibull:

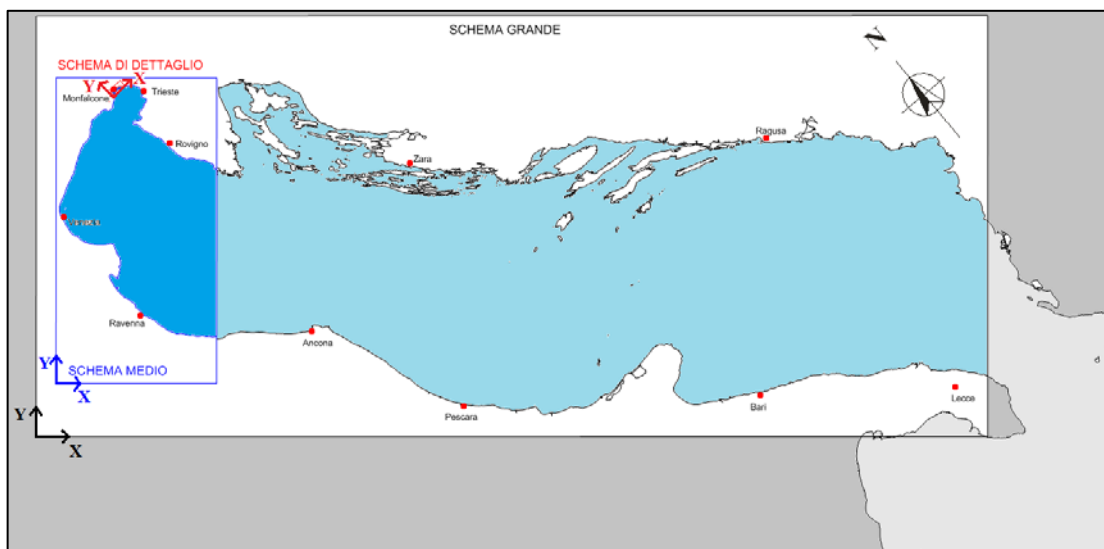
$$P(H>h) = 1 - \exp[-(h/\alpha)^\beta] \quad 4.11$$

dove  $h$  è la variabile (altezza d'onda),  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri della distribuzione calcolati mediante la tecnica di best-fit ai minimi quadrati e quindi valutati i valori estremi per differenti periodi di ritorno.

### 4.4 MODELLAZIONE IDRODINAMICA

#### 4.4.1 Implementazione dei Modelli Idrodinamici

Tre livelli di innesto sono stati utilizzati al fine di descrivere in modo ottimale le oscillazioni di livello e il regime delle correnti in prossimità del Porto di Monfalcone. In Figura 4.3 vengono mostrati i domini di calcolo dei diversi schemi utilizzati, mentre le caratteristiche di ciascuno schema sono sintetizzate in Tabella 4.2.



**Figura 4.3: Schemi di Innesto del Modello HYDRO 2D nel Mar Adriatico**

Lo schema di dettaglio è stato scelto al fine di modellare e riprodurre in maniera ottimale la dinamica delle correnti e della superficie libera del mare indotta dalla fenomenologia locale. Al tempo stesso la tecnica di innesto utilizzata ha permesso di tenere adeguatamente conto nelle simulazioni delle caratteristiche fenomenologiche tipiche di tutto il bacino del Mar Adriatico.

**Tabella 4.2: Caratteristiche degli Schemi di Innesto del Modello HYDRO 2D**

Schema	Delta X (m)	Delta Y (m)	Rotazione Asse X (°N)	Nx	Ny
<b>GRANDE</b>	7500	7500	130	112	36
<b>MEDIO</b>	500	500	130	277	526
<b>DETTAGLIO</b>	20	20	90	629	279

Si ricorda, come già evidenziato, che il modello HYDRO 2D del Mar Adriatico è stato più volte calibrato e verificato sulle misure disponibili.

I risultati delle simulazioni idrodinamiche sono utilizzati al fine di analizzare sia le oscillazioni di livello che le variazioni di corrente in prossimità del Porto di Monfalcone.

#### 4.4.2 Analisi del Livello del Mare

La genesi delle variazioni del livello marino è piuttosto complessa, poiché molteplici sono i fenomeni che possono generare o modificare il movimento delle masse d'acqua. Possiamo pensare al livello come una semplice sovrapposizione di più vettori del tipo:

$$V = \sum \eta_i \quad 4.12$$

Nel caso specifico tutti i tipi di fenomeni possono essere fatti derivare da due gruppi completamente diversi di cause, ed essere di conseguenza raggruppati in due categorie fondamentali:

- la componente deterministica dovuta all'oscillazione di marea;
- la componente non deterministica o stocastica dovuta ad altri fenomeni.

L'elevazione del livello può quindi essere considerata, ad ogni istante, il risultato della sovrapposizione lineare di due parti fra loro indipendenti:

$$\eta(t) = \eta_T(t) + \eta_s(t) \quad 4.13$$

La parte deterministica è costituita dall'oscillazione di marea. La parte stocastica, denominata in generale "storm surge", è dovuta essenzialmente al vento e ai gradienti barici.

#### 4.4.3 Analisi della Corrente

Il regime dinamico può essere ricostruito a partire dai dati di vento e di marea. Analogamente a quanto descritto per il livello del mare, la corrente totale può essere rappresentata come una sovrapposizione di vettori del tipo:

$$V = \sum V_i \quad 4.14$$

Questa rappresentazione, che presuppone la linearità e l'indipendenza dei differenti fenomeni, non è ovviamente rigorosa: essa tuttavia rappresenta un mezzo valido, sufficientemente attendibile e ragionevolmente approssimato, per impostare lo studio delle correnti marine. Nel caso specifico, i tipi di corrente possono essere fatti derivare da due

gruppi completamente diversi di cause, ed essere di conseguenza raggruppati in due categorie fondamentali:

la componente deterministica della corrente;

la componente non deterministica o stocastica della corrente.

Ad un dato istante il valore  $V(t)$  della corrente, supponendo trascurabili i termini d'interazione, può quindi essere considerato il risultato della sovrapposizione lineare di due parti fra loro indipendenti:

$$V(t) = V_T(t) + V_s(t) \quad 4.15$$

La parte deterministica è costituita dalla corrente di marea.

La parte stocastica  $V_s$  è a sua volta esprimibile come somma di due termini:

$$V_s(t) = V_{wind}(t) + V_{slope}(t) \quad 4.16$$

vale a dire le componenti dovute al vento e quelle da "slope", dovute alla presenza della costa.

#### 4.4.4 Corrente da Vento e da Slope

La distribuzione delle correnti per direzione può dunque essere ricostruita a partire dalla distribuzione del vento per direzione e tenendo presente l'orientazione della costa, la profondità dell'acqua e la distanza dalla costa.

Il calcolo viene effettuato nell'ipotesi di condizioni stazionarie, eguagliando le componenti normali alla costa del trasporto dovuto alla corrente generata dal vento  $S$  e della corrente da "slope"  $M$ :

$$S_p = M_p \quad 4.17$$

Le componenti del trasporto dovuto allo stress del vento, nel sistema di riferimento avente l'asse  $y$  diretto come il vento, sono:

$$S_x = \frac{\varepsilon \sigma D_E^2}{2\pi^2 V} \left[ \frac{\cosh A + \cos A - 2 \cosh \frac{A}{2} \cos \frac{A}{2}}{\cosh A + \cos A} \right] \quad 4.18$$
$$S_y = \frac{\varepsilon \sigma D_E^2}{\pi^2 V} \left[ \frac{\sinh \frac{A}{2} \sin \frac{A}{2}}{\cosh A + \cos A} \right]$$

con  $A = s d \sqrt{2}$

mentre le componenti del trasporto dovuto alla pendenza della superficie, nel sistema di riferimento avente l'asse  $y$  diretto nella direzione della pendenza superficiale, sono:

$$M_x = \frac{g s \rho B d}{f} \left[ B - \frac{\sinh B + \sin B}{\cosh B + \cos B} \right] \quad 4.19$$

$$M_y = \frac{g s \rho B d}{f} \left[ \frac{\sinh B - \sin B}{\cosh B + \cos B} \right]$$

con  $B = D_s/2\pi d$

dove  $\varepsilon$  è lo stress del vento,  $s$  la pendenza della superficie del mare,  $D_E$  la profondità di Ekman,  $D_s$  è la profondità di influenza dell'attrito sul fondo,  $V$  il coefficiente di viscosità turbolenta,  $d$  la profondità dell'acqua,  $f$  il parametro di Coriolis,  $\rho$  la densità dell'acqua. Dall'equazione precedente viene ricavata la pendenza della superficie del mare nell'ipotesi che  $D_E = D_s$ .

Si procede quindi al calcolo dei valori, alle diverse profondità, delle componenti della corrente dovute al solo stress del vento e di quelle dovute al gradiente di pressione determinato dalla pendenza della superficie del mare.

I due contributi vengono quindi sommati vettorialmente per ottenere la corrente totale alle diverse profondità ed il suo valore medio sulla verticale.

#### 4.4.5 Corrente di Marea

La corrente di marea può essere calcolata, in prima approssimazione, come:

$$\partial u / \partial t = g \partial \eta / \partial x \quad 4.20$$

dove  $\eta$  rappresenta il valore istantaneo del livello di marea e la derivata va calcolata come differenza dei valori istantanei tra stazioni vicine. La velocità risultante  $u$  è il valore medio tra le due stazioni, integrato sulla verticale.

Si è tuttavia preferito ricostruire la corrente di marea mediante il modello idrodinamico HYDRO 2D, la cui descrizione è riportata in Appendice B, in modo da valutare nei dettagli l'andamento spaziale e temporale.

#### 4.4.6 Valori estremi di Corrente

I valori estremi sono stati calcolati applicando il modello idrodinamico ai venti estremi relativi ai vari periodi di ritorno, e alla marea: in tal modo, per ogni direzione di interesse (30°N, 60°N, 90°N, 150°N e 270°N), sono stati definiti i corrispondenti valori estremi della corrente.

#### 4.4.7 Profilo Verticale di Corrente

La definizione di un profilo di velocità tipico valido in tutte le condizioni non è certo possibile in generale, in quanto l'andamento verticale del campo di velocità è strettamente legato alle caratteristiche circolatorie generali dell'area in esame, alla stagione considerata, alla presenza o meno di stratificazioni del campo di densità, alle continue variazioni dovute all'oscillazione di marea, a fenomeni transienti quali le perturbazioni meteorologiche, fenomeni a piccola scala, etc.

Di conseguenza andrebbe valutato un profilo tipico, o meglio un insieme di profili tipici, per ogni profondità e per ogni mese.

Poiché, come verrà descritto nel seguito, localmente il sistema è essenzialmente barotropico, ci si limita quindi a prendere in esame un profilo verticale di tipo barotropico, caratterizzato

cioè da omogeneità verticale del campo di densità (tale situazione corrisponde, ai fini pratici, alla condizione più energetica).

Si è pertanto ipotizzato che il profilo verticale di corrente sia del tipo "power profile", caratterizzato cioè da una relazione del tipo:

$$\frac{V_{z1}}{V_{z2}} = \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^{1/n} \quad 4.21$$

dove  $V_{(z1)}$  è la velocità di corrente al livello  $z_1$  e  $V_{(z2)}$  è la velocità di corrente al livello  $z_2$ , ed  $n$  un valore desumibile dai dati sperimentali. Considerando la velocità media sulla verticale, la [4.21] può essere espressa anche come:

$$V_z = V_m [(n+1)/n] [z/d]^{1/n} \quad 4.22$$

dove  $d$  è la profondità dell'acqua e  $z$  una generica quota (il sistema di riferimento verticale è tale da avere  $z=d$  sul fondo e  $z=0$  in superficie). Il coefficiente  $n$ , per acque basse o intermedie (<100 m) assume in generale valori variabili da 4 a 7. Nel presente lavoro è stato adottato il valore  $n = 4$ .



## 5 REGIME ANEMOLOGICO

Nel seguito vengono presentati e analizzati i dati di vento.

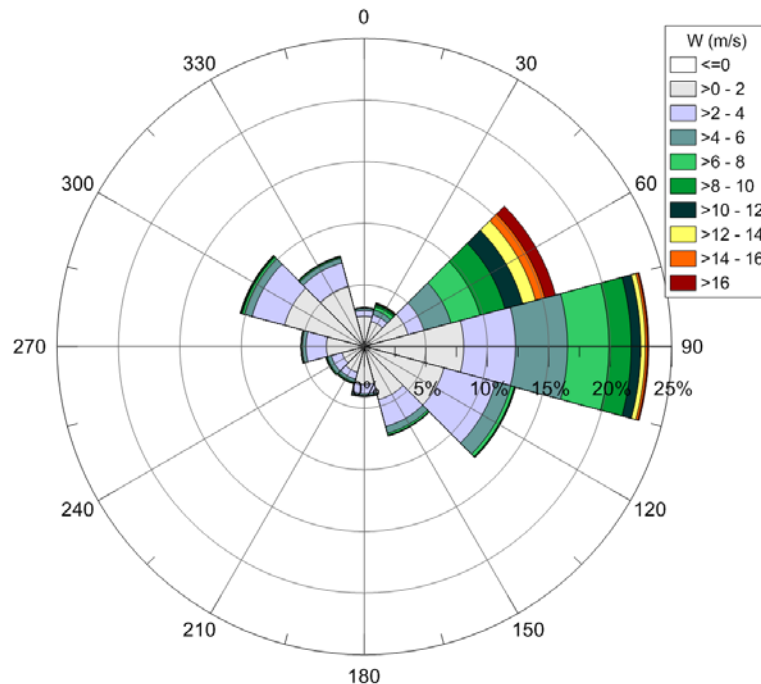
### 5.1 CONDIZIONI TIPICHE

In Tabella 5.1 viene presentata la distribuzione della frequenza percentuale per classi di velocità del vento (m/s) e direzione di provenienza misurati dalla stazione RMN di Trieste. La tabella è riferita al regime medio annuale. La Figura 5.1 mostra la rosa dei venti.

**Tabella 5.1: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza – Annuale**

Dir (°N)	W (m/s) - ANNUALE																		TOT.
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	
0	2.33	0.49	0.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0									3.09
30	1.94	0.57	0.43	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			0.0	0.0					3.58
60	3.30	1.40	2.39	2.5	2.1	1.5	1.1	0.8	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.3
90	7.44	4.35	4.40	3.5	1.8	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0				23.0
120	6.54	4.58	1.33	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						0.0				12.8
150	4.25	2.36	0.58	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0			0.0								7.42
180	2.90	0.75	0.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0										3.93
210	1.99	0.60	0.26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0									3.02
240	1.74	0.95	0.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0										3.18
270	2.98	1.74	0.32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0								5.16
300	6.74	2.87	0.67	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0									10.6
330	5.05	2.06	0.40	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0									7.70
TO	47.2	22.7	11.4	7.4	4.6	2.6	1.6	1.0	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.

Nota: 0.00 si riferisce a percentuali minori di 0.01



**Figura 5.1: Rosa dei Venti Annuale**

Dall'analisi dei dati riportati in Tabella 5.1, si osserva che il settore principale di provenienza del vento è quello da Bora (60°N) e da Levante (90°N) con circa 39% degli eventi, mentre lo Scirocco (120° e 150°N) è presente nel 20% circa degli eventi e il Maestrale (300° e 330°N) nel 18% circa.

Per quanto riguarda l'intensità, nel 88 % circa degli eventi la velocità è inferiore a 8 m/s, nel 96% inferiore a 12 m/s e per oltre il 99.4% dei casi si mantiene al di sotto della soglia di 18 m/s. In termini di ore, mediamente nel corso dell'anno il numero di ore in cui la velocità del vento è maggiore di 18 m/s è pari a circa 50.

In Tabella 5.2-Tabella 5.5 vengono mostrate le distribuzioni stagionali della frequenza percentuale per classi di velocità del vento (m/s) e direzione di provenienza (°N). La Figura 5.2 mostra le rose dei venti stagionali.

**Tabella 5.2: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Inverno**

Dir (°N)	W (m/s) - INVERNO																		TOT.	
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	3		3
0	2.02	0.37	0.25	0.0	0.0	0.0			0.0											2.70
30	1.74	0.61	0.49	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0										3.62
60	3.18	1.22	2.20	2.6	2.4	1.9	1.6	1.6	1.1	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			19.0
90	7.57	4.13	4.74	4.5	2.6	1.3	0.6	0.3	0.0	0.0					0.0					26.0
120	6.79	3.54	1.44	0.3	0.0	0.0														12.2
150	4.51	1.35	0.45	0.1	0.0		0.0	0.0												6.47
180	3.68	0.45	0.14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											4.40
210	3.34	0.61	0.17	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0		0.0										4.45
240	2.60	0.53	0.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											3.45
270	3.28	0.60	0.12	0.0			0.0	0.0												4.05
300	5.77	1.48	0.53	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0										8.51
330	3.84	0.97	0.16	0.0	0.0	0.0	0.0			0.0										5.10
TOT.	48.3	15.8	10.8	8.6	5.8	3.7	2.5	2.1	1.2	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			100.

Nota: 0.00 si riferisce a percentuali minori di 0.01

**Tabella 5.3: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Primavera**

Dir (°N)	W (m/s) - PRIMAVERA																		TOT.	
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	3	3		3
0	3.19	0.65	0.20	0.0	0.0	0.0		0.0												4.12
30	2.37	0.62	0.45	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				0.0							4.17
60	3.22	1.49	2.44	2.6	2.1	1.3	1.0	0.7	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				15.9
90	6.19	3.64	3.47	2.6	1.3	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0							18.8
120	5.10	4.48	1.10	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0												11.2
150	3.60	2.57	0.64	0.1	0.0	0.0	0.0													7.07
180	2.60	0.93	0.27	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0											3.92
210	1.86	0.65	0.28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0												2.93
240	2.07	1.08	0.41	0.0	0.0	0.0	0.0													3.69
270	3.61	1.69	0.40	0.0	0.0	0.0														5.78
300	8.10	2.81	0.68	0.1	0.0	0.0		0.0												11.8
330	6.69	2.83	0.64	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											10.3
TOT.	48.6	23.4	10.9	6.7	4.1	2.1	1.7	1.0	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				100.

Nota: 0.00 si riferisce a percentuali minori di 0.01

**Tabella 5.4: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Estate**

Dir (°N)	W (m/s) - ESTATE																	TOT.		
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	28	30	3	3		3	3
0	2.66	0.60	0.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0								3.55
30	2.22	0.55	0.41	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				0.0						3.68
60	3.23	1.36	2.41	2.2	1.7	1.1	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0			0.0					13.12
90	7.41	4.47	4.25	2.6	1.1	0.3	0.1	0.0	0.0											20.55
120	5.36	4.38	0.93	0.1	0.0	0.0		0.0	0.0						0.0					10.85
150	4.03	2.48	0.43	0.0	0.0	0.0	0.0				0.0									7.06
180	2.46	0.84	0.16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0												3.52
210	1.32	0.53	0.26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0											2.22
240	1.25	1.24	0.57	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0												3.26
270	2.78	3.33	0.61	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			0.0								7.06
300	8.34	5.08	1.12	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0											15.00
330	6.08	3.16	0.61	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			0.0								10.13
TOT.	47.1	28.0	11.9	6.2	3.4	1.8	0.8	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0					100.0

Nota: 0.00 si riferisce a percentuali minori di 0.01

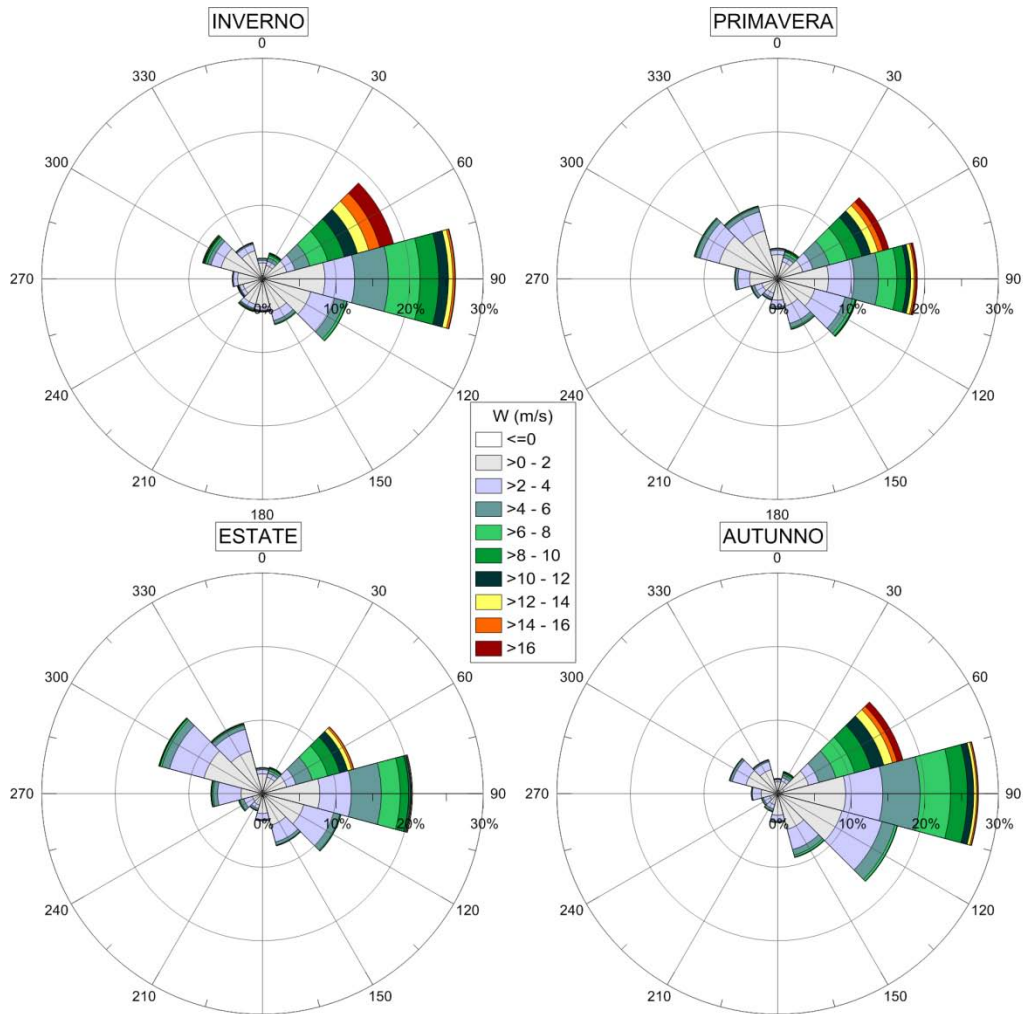
**Tabella 5.5: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità del Vento per Direzione di Provenienza - Autunno**

Dir (°N)	W (m/s) - AUTUNNO																	TOT.		
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34		36	3
0	1.42	0.32	0.09	0.0	0.0	0.0		0.0		0.0										1.91
30	1.41	0.51	0.36	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0										2.82
60	3.59	1.51	2.50	2.7	2.3	1.8	1.2	0.6	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		17.4
90	8.62	5.17	5.21	4.2	2.3	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0							27.1
120	9.00	5.88	1.88	0.3	0.0	0.0														17.1
150	4.90	2.97	0.80	0.2	0.1	0.0														9.04
180	2.90	0.78	0.19	0.0	0.0															3.93
210	1.52	0.62	0.31	0.1	0.0	0.0		0.0												2.59
240	1.09	0.92	0.23	0.0	0.0			0.0												2.31
270	2.25	1.24	0.12	0.0	0.0	0.0														3.65
300	4.60	2.00	0.33	0.0	0.0	0.0	0.0													7.04
330	3.45	1.18	0.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0												4.93
TO	44.7	23.1	12.2	8.2	5.1	2.9	1.7	0.9	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		100.

Nota: 0.00 si riferisce a percentuali minori di 0.01

Dall'analisi delle tabelle, si nota che, gli eventi di Bora e Levante sono più frequenti e più intensi in inverno e autunno (frequenti circa nel 45% dei casi) mentre calano in primavera ed estate (circa il 34-35%). Per quanto concerne gli eventi di Scirocco la frequenza si mantiene più o meno costante in inverno primavera ed estate (18-19%) mentre aumenta in autunno (26%). La frequenza degli eventi di Maestrale è più elevata in primavera ed estate (22-25%) mentre in autunno e inverno rimane intorno al 11-13%.

Per quanto riguarda l'intensità, la frequenza degli eventi con intensità inferiore a 8 m/s è 84% in inverno, l'88-90% in autunno-primavera e il 93% in estate.



**Figura 5.2: Rose dei Venti Stagionali**

## 5.2 CONDIZIONI ESTREME

Attraverso l'applicazione della funzione estrema di Weibull sono stati stimati i valori estremi direzionali.

I risultati sono riportati nella Tabella 5.6: per completezza d'informazione sono stati riportati, i valori medi sui 10 minuti, il valore medio su 1 minuto e la raffica (valore medio sui 3 s), calcolati mediante la relazione [4.5].

I dati di vento si riferiscono alla zona di Trieste in una zona dove la convergenza del vento può creare amplificazioni e di conseguenza, i valori estremi di vento devono essere considerati cautelativi rispetto all'area di studio.

In Tabella 5.6 è stata inoltre fatta distinzione tra i settori di di Bora e Levante rispetto a i restanti settori direzionali.

**Tabella 5.6: Valori Estremi della Velocità del Vento (m/s) per Direzione di Provenienza**

DIR (°N)	PERIODO DI RITORNO								
	1 ANNO			10 ANNI			100 ANNI		
	10'	1'	3"	10'	1'	3"	10'	1'	3"
0	11.3	13.4	16.3	17.7	20.9	25.4	24.6	29.1	35.3
30	17.4	20.7	25.1	23.5	27.8	33.7	29.3	34.7	42.1
60	28.7	34.0	41.3	34.3	40.7	49.3	39.2	46.5	56.4
90	21.5	25.4	30.8	26.0	30.8	37.3	30.2	35.8	43.4
120	12.2	14.5	17.6	16.0	19.0	23.0	19.7	23.3	28.3
150	11.7	13.8	16.8	16.1	19.1	23.2	20.7	24.5	29.7
180	11.7	13.8	16.8	17.6	20.8	25.3	23.9	28.3	34.3
210	12.8	15.2	18.4	18.7	22.1	26.9	24.7	29.3	35.6
240	11.9	14.1	17.1	16.8	19.8	24.1	21.6	25.6	31.0
270	12.0	14.2	17.2	17.9	21.2	25.7	24.2	28.6	34.7
300	14.1	16.7	20.3	19.2	22.7	27.6	24.4	28.9	35.0
330	13.3	15.8	19.1	18.9	22.3	27.1	24.6	29.2	35.4
SETTORI BORA E LEVANTE	28.7	34.0	41.3	34.4	40.7	49.4	39.6	46.9	56.9
ALTRI SETTORI	16.6	19.7	23.9	21.1	25.0	30.4	25.6	30.3	36.8

## 6 MOTO ONDOSO

Nel presente capitolo viene dato ampio spazio alle caratteristiche tipiche ed estreme del moto ondoso nell'area di studio.

### 6.1 CLIMA DEL MOTO ONDOSO

Le distribuzioni percentuali annuali e stagionali di moto ondoso per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza in prossimità dell'imboccatura del porto di Monfalcone, punto A in Figura 3.1, sono riportate nelle Tabella 6.1-Tabella 6.5. Il clima ondoso è stato calcolato mediante modellistica semplificata come descritto nel capitolo 4.3.

E' evidente che per effetto dell'ubicazione del Porto di Monfalcone, protetto dal moto ondoso proveniente al largo dai settori 210°N-270°N, il clima ondoso annuale è caratterizzato da onde più alte per i settori direzionali 120°-150°N-180°N, settori direzionali ai quali corrispondono i fetch maggiori, vedi Figura 2.2. Dai dati riportati in Tabella 6.1, si osserva che 99% delle altezze sono inferiori a 0.5 m.

Nel corso delle stagioni le percentuali di altezza d'onda significativa inferiori a 0.5 m rimangono pressoché simili al valore annuale. La stagione caratterizzata dal clima ondoso più energetico è l'inverno.

**Tabella 6.1: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda  $H_s$  per Direzione di Provenienza – Annuale**

Dir. (°N)	Hs (m)					TOT.
	0.5	1	1.5	2	2.5	
0	3.09					3.09
30	3.58					3.58
60	16.29	0.05				16.34
90	23.03	0.04				23.07
120	12.78	0.08	0.00			12.86
150	7.25	0.15	0.01			7.41
180	3.91	0.03	0.01			3.95
210	3.00	0.02				3.02
240	3.18	0.00				3.18
270	5.16					5.16
300	10.64					10.64
330	7.70					7.70
TOT.	99.61	0.37	0.02			100.00

Nota: 0.00 si riferisce a percentuali minori di 0.01

**Tabella 6.2: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda  $H_s$  per Direzione di Provenienza – Inverno**

Dir. (°N)	Hs (m)					TOT.
	0.5	1	1.5	2	2.5	
0	2.70					2.70
30	3.62					3.62
60	18.97	0.04				19.01
90	26.02	0.01				26.03
120	12.18	0.03				12.21
150	6.36	0.08	0.02			6.46
180	4.32	0.06	0.03			4.41
210	4.41	0.04				4.45
240	3.44	0.01				3.45
270	4.05					4.05
300	8.51					8.51
330	5.10					5.10
TOT.	99.68	0.27	0.05			100.00

**Tabella 6.3: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda  $H_s$  per Direzione di Provenienza – Primavera**

Dir. (°N)	Hs (m)					TOT.
	0.5	1	1.5	2	2.5	
0	4.12					4.12
30	4.17					4.17
60	15.92	0.05				15.97
90	18.76	0.13				18.89
120	11.08	0.18	0.01			11.27
150	6.87	0.19	0.01			7.07
180	3.89	0.03				3.92
210	2.89	0.04				2.93
240	3.69					3.69
270	5.78					5.78
300	11.80					11.80
330	10.39					10.39
TOT.	99.36	0.62	0.02			100.00

**Tabella 6.4: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda  $H_s$  per Direzione di Provenienza – Estate**

Dir. (°N)	Hs (m)					TOT.
	0.5	1	1.5	2	2.5	
0	3.55					3.55
30	3.68					3.68
60	13.12					13.12
90	20.54	0.01				20.55
120	10.82	0.04	0.01			10.87
150	6.97	0.07	0.01			7.05
180	3.49	0.02				3.51
210	2.20	0.01				2.21
240	3.26					3.26
270	7.05					7.05
300	15.00					15.00
330	10.15					10.15
TOT.	99.83	0.15	0.02			100.00

**Tabella 6.5: Distribuzione a costa della Frequenza (%) dell'Altezza d' Onda  $H_s$  per Direzione di Provenienza – Autunno**

Dir. (°N)	Hs (m)					TOT.
	0.5	1	1.5	2	2.5	
0	1.91					1.91
30	2.82					2.82
60	17.35	0.1				17.45
90	27.12	0.03				27.15
120	17.12	0.06				17.18
150	8.78	0.27				9.05
180	3.91	0.02				3.93
210	2.58					2.58
240	2.31					2.31
270	3.65					3.65
300	7.04					7.04
330	4.93					4.93
TOT.	99.52	0.48				100.00



## 6.2 VALORI ESTREMI

I valori estremi dell'altezza d'onda calcolati al largo del Golfo di Trieste nel punto O mostrato in Figura 3.1, sono riportati in Tabella 6.6, mentre i corrispondenti valori estremi estratti in prossimità del porto di Monfalcone, punto A in Figura 3.1, sono riportati in Tabella 6.7 per i periodi di ritorno di 1,10 e 100 anni. I valori estremi sono stati calcolati mediante l'utilizzo del modello numerico spettrale di terza generazione SWAN applicato alla batimetria locale. La descrizione del modello è riportata in dettaglio nell'Appendice A. Sono state propagate a costa le onde generate dal vento e/o provenienti dalle direzioni che penetrano maggiormente nel Golfo di Monfalcone (120°-150°-180°-210°-240° e 270°N). Il periodo di picco  $T_p$  associato alle onde estreme è quello che risulta dal modello numerico, mentre il periodo significativo  $T_s$  è quello calcolato al largo (i.e. punto O) mediante la relazione [4.8].

**Tabella 6.6: Valori Estremi del Moto Ondoso al Largo del Golfo di Trieste: Punto O**

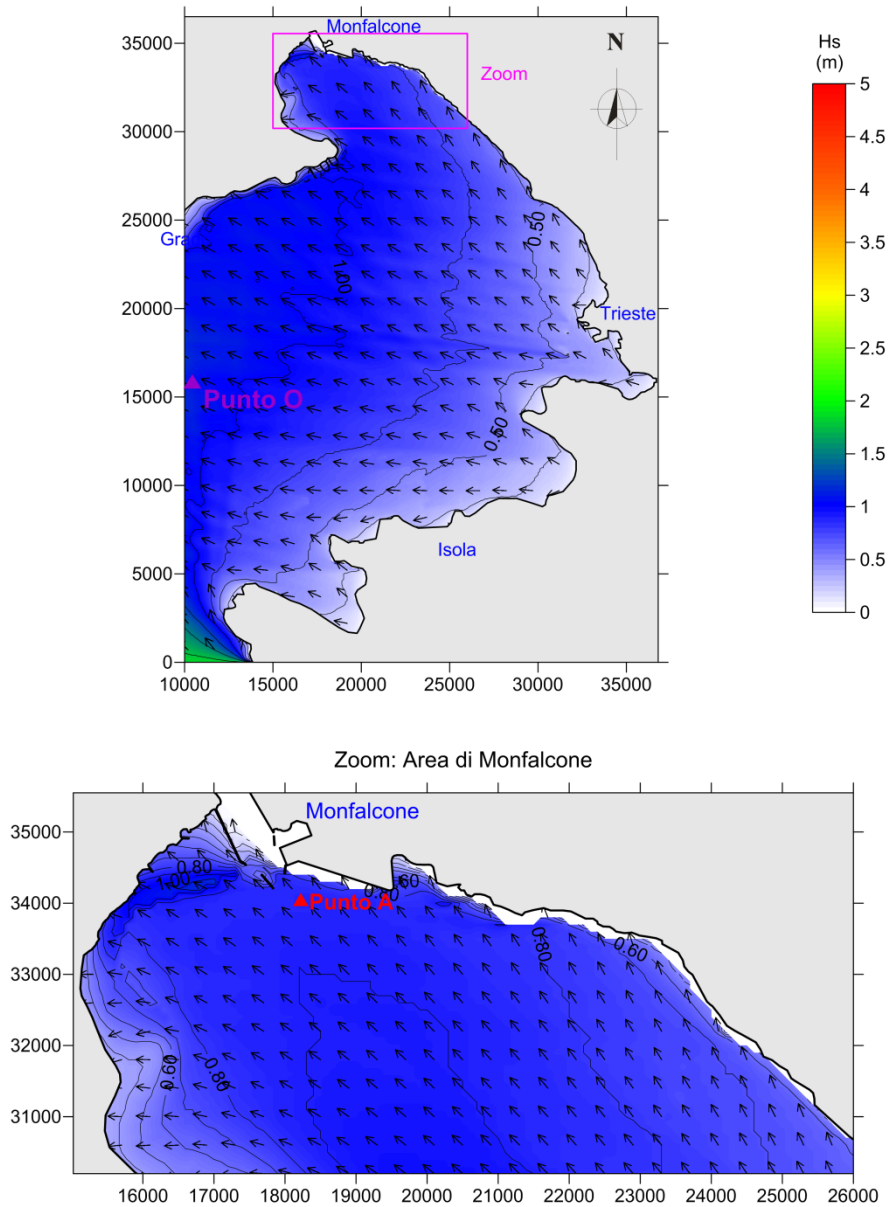
Dir. di provenienza al largo (°N)	Periodo di ritorno 1 anno			Periodo di ritorno 10 anni			Periodo di ritorno 100 anni		
	Hs (m)	Ts (s)	Tp (s)	Hs (m)	Ts (s)	Tp (s)	Hs (m)	Ts (s)	Tp (s)
120	1.11	4.3	3.7	1.61	5.2	4.5	2.03	5.8	6.2
150	1.36	4.8	5.6	2.09	5.9	6.6	2.57	6.5	7.7
180	1.65	5.2	5.8	2.61	6.6	6.7	3.14	7.2	7.9
210	2.10	5.9	6.2	2.80	6.8	7.1	3.40	7.5	7.9
240	1.90	5.6	5.9	2.70	6.7	7.0	3.40	7.5	7.9
270	1.30	4.7	4.9	1.90	5.6	5.9	2.50	6.5	6.7

**Tabella 6.7: Valori Estremi del Moto Ondoso in Prossimità del Porto di Monfalcone: Punto A**

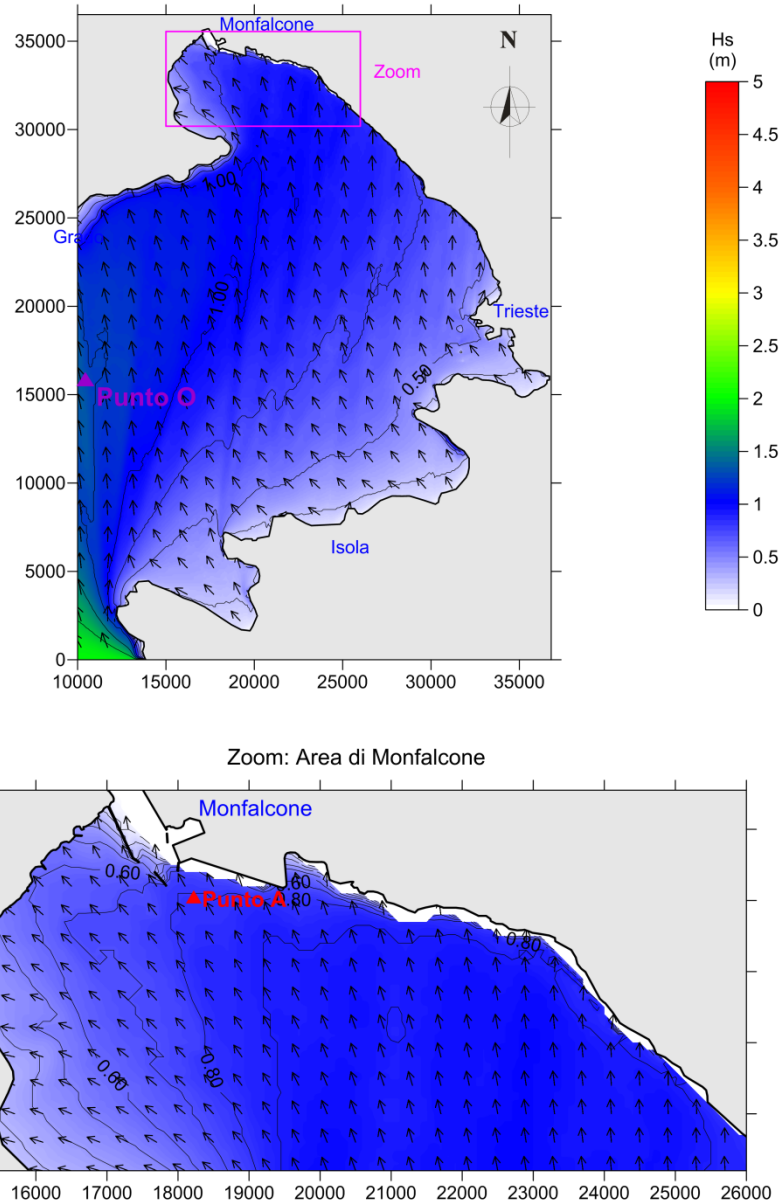
Dir. di provenienza al largo (°N)	Periodo di ritorno 1 anno				Periodo di ritorno 10 anni				Periodo di ritorno 100 anni			
	Dir. a costa (°N)	Hs (m)	Ts (s)	Tp (s)	Dir. a costa (°N)	Hs (m)	Ts (s)	Tp (s)	Dir. a costa (°N)	Hs (m)	Ts (s)	Tp (s)
120	137	0.87	4.3	3.5	124	1.59	5.2	6.7	125	1.86	5.8	6.6
150	149	0.81	4.8	3.6	149	1.13	5.9	4.3	148	1.44	6.5	5.2
180	158	0.80	5.2	3.6	157	1.30	6.6	4.7	157	1.75	7.2	6.0
210	173	0.68	5.9	6.2	169	0.70	6.8	6.8	167	0.77	7.5	8.1
240	214	0.56	5.6	5.5	202	0.69	6.7	6.8	188	0.72	7.5	8.2
270	261	0.42	4.7	2.2	256	0.52	5.6	5.5	243	0.53	6.5	6.8

Esempi dei risultati ottenuti sono mostrati nelle Figura 6.1-Figura 6.16. Per ogni direzione di provenienza al largo è mostrato il campo di moto ondoso mediante la stessa scala cromatica e la presenza di isolinee. Le frecce indicano la direzione di propagazione del moto ondoso.

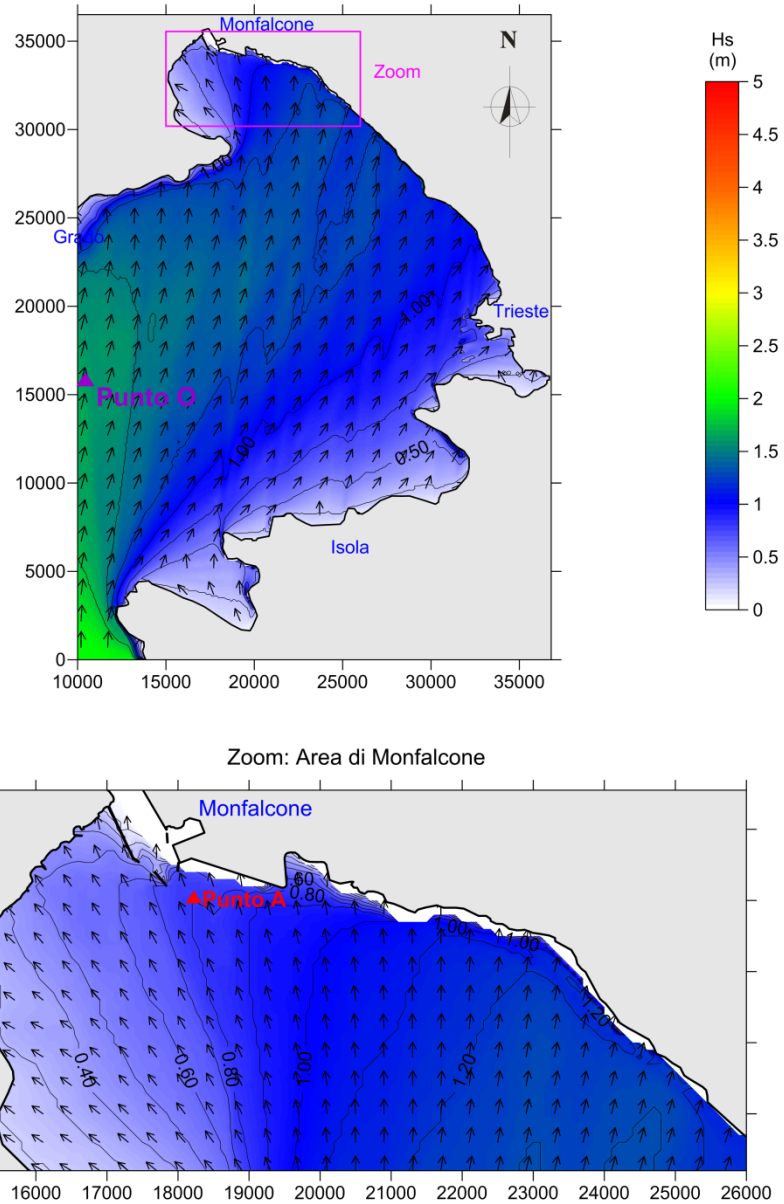
Dalle figure si osserva come il moto ondoso in prossimità del porto di Monfalcone sia caratterizzato da altezze d'onda molto ridotte rispetto alle condizioni che si verificano al largo per effetto della schermatura locale e delle basse profondità che caratterizzano la batimetria locale. Le altezze d'onda maggiori si verificano in corrispondenza degli eventi ondosi generati localmente, nel Golfo di Trieste, dai venti più intensi provenienti da  $120^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{N}$  e  $180^{\circ}\text{N}$ . Il moto ondoso proveniente dall'Alto Adriatico dai settori direzionali al largo  $210^{\circ}\text{N}$ ,  $240^{\circ}\text{N}$  e  $270^{\circ}\text{N}$  risulta invece dar luogo, in prossimità del Porto di Monfalcone, ad un campo di moto ondoso caratterizzato da altezze d'onda di minore altezza.



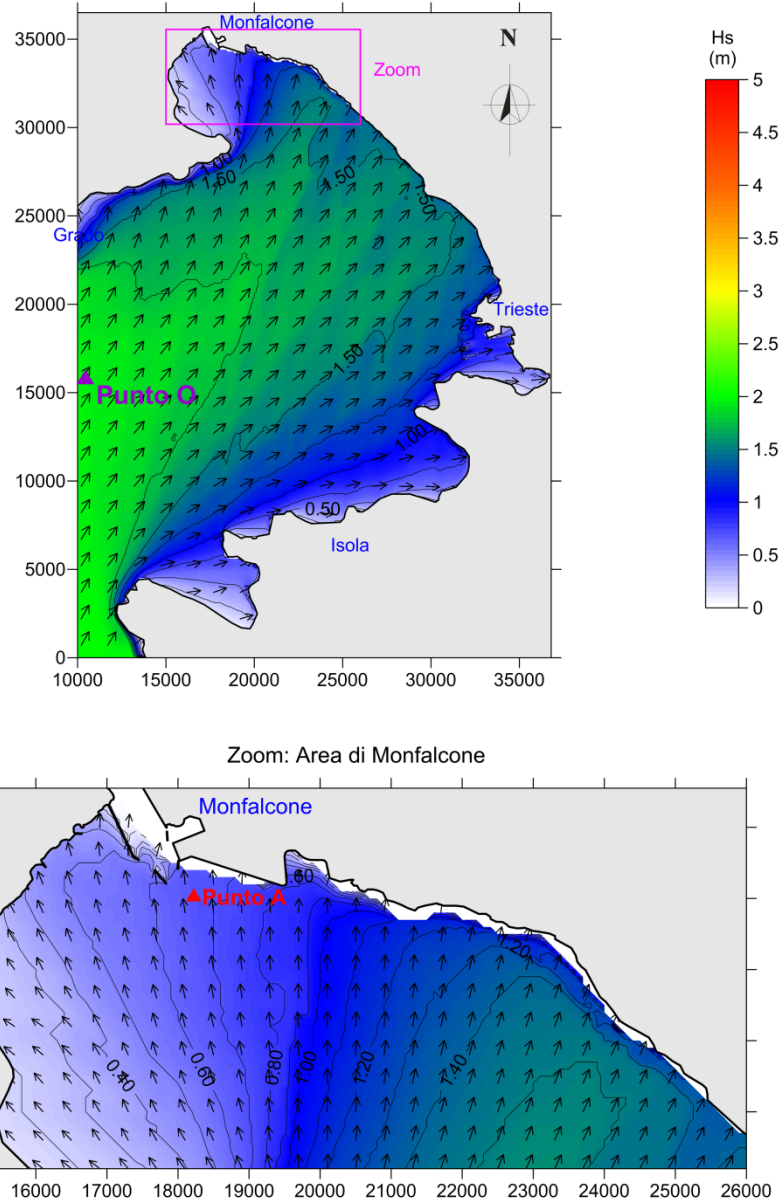
**Figura 6.1: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 120°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno**



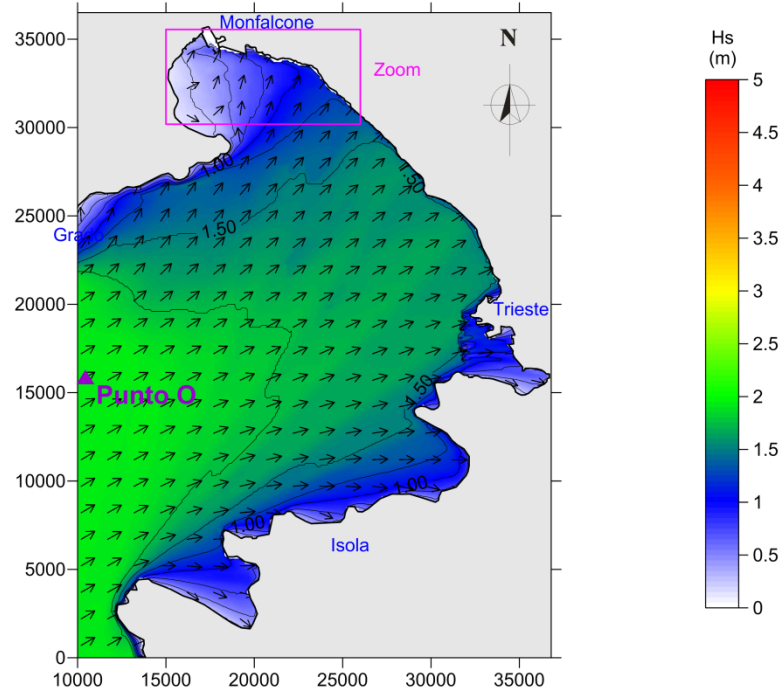
**Figura 6.2: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 150°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno**



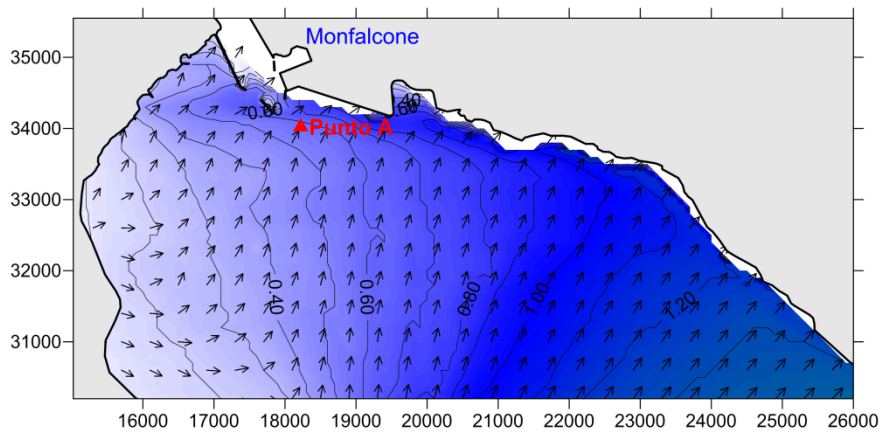
**Figura 6.3: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 180°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno**



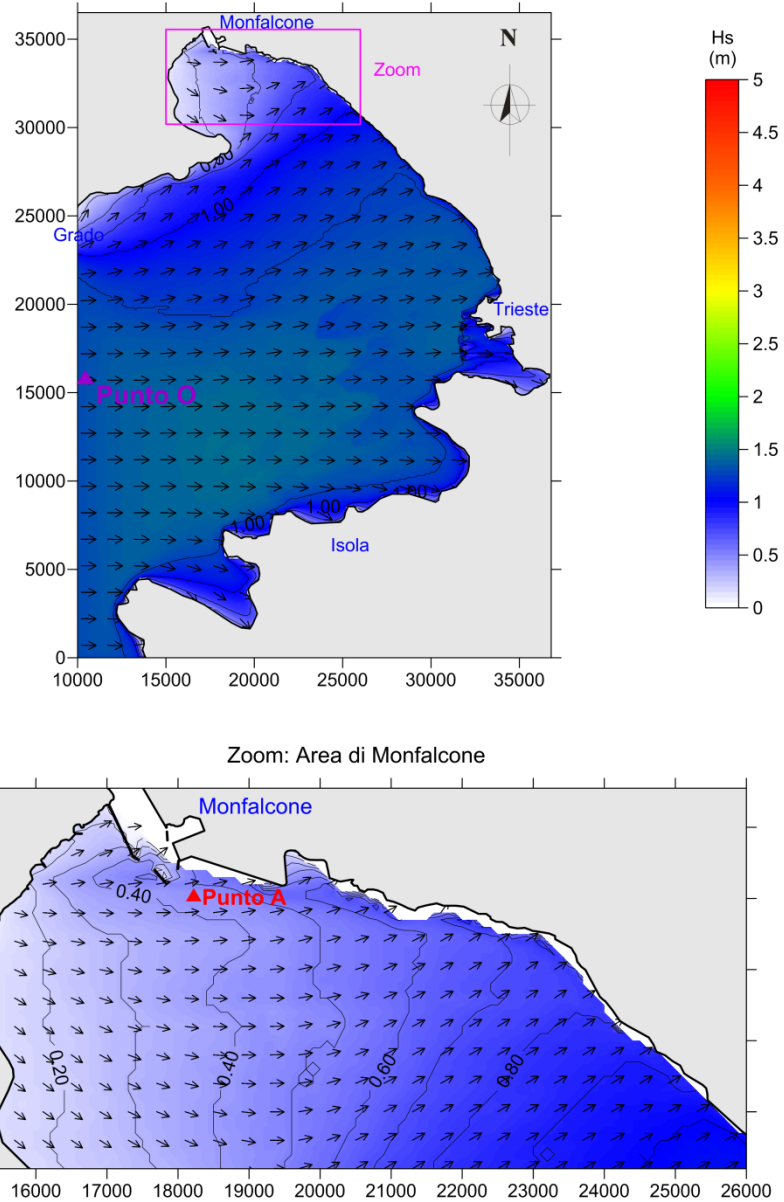
**Figura 6.4: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 210°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno**



Zoom: Area di Monfalcone

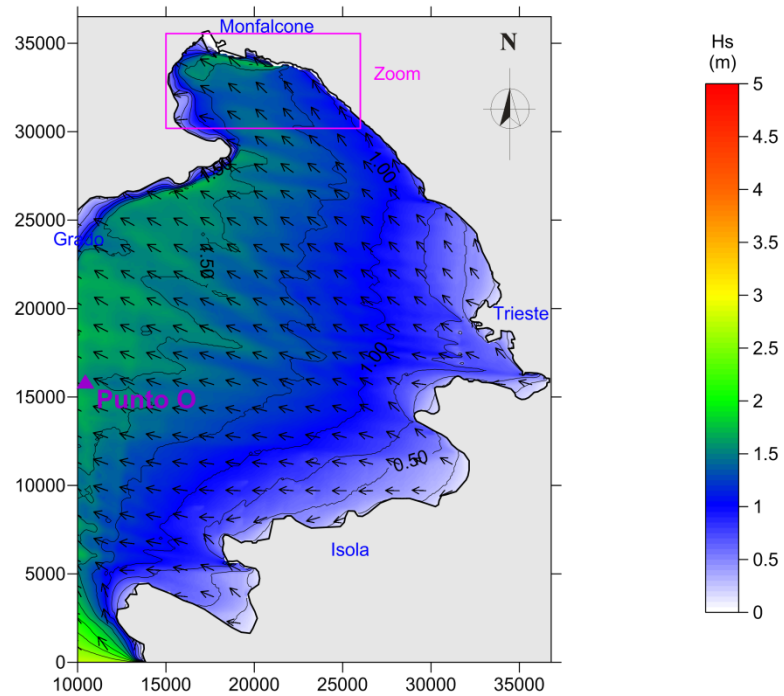


**Figura 6.5: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 240°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno**

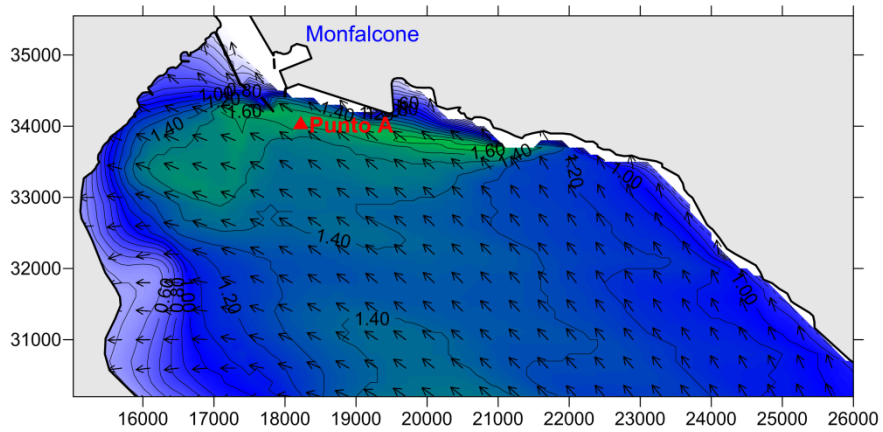


**Figura 6.6: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 270°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 1 Anno**

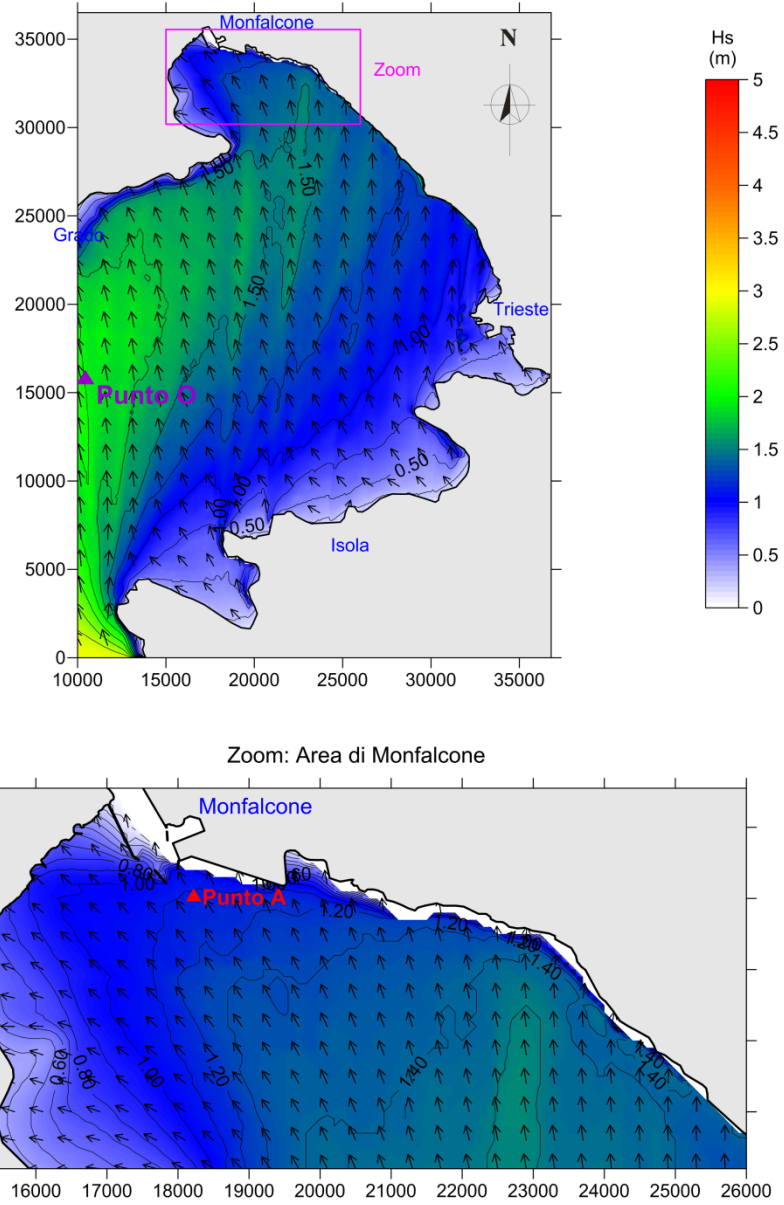




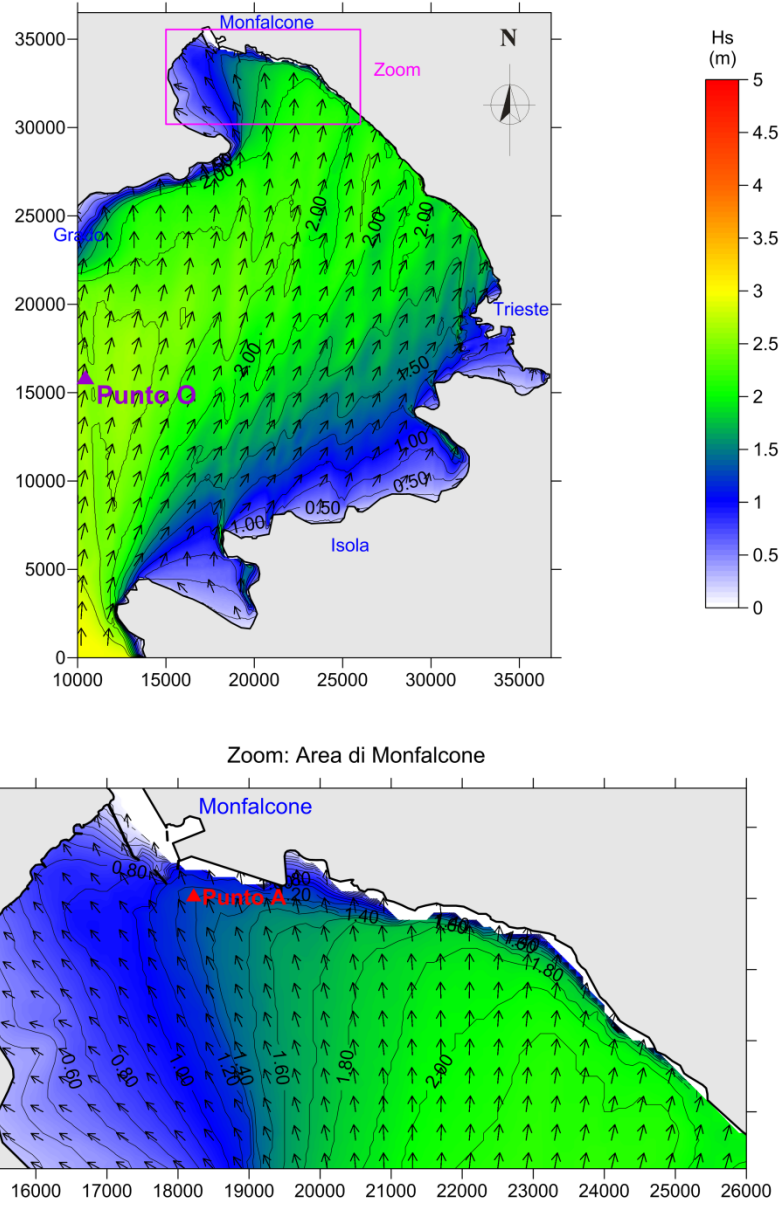
Zoom: Area di Monfalcone



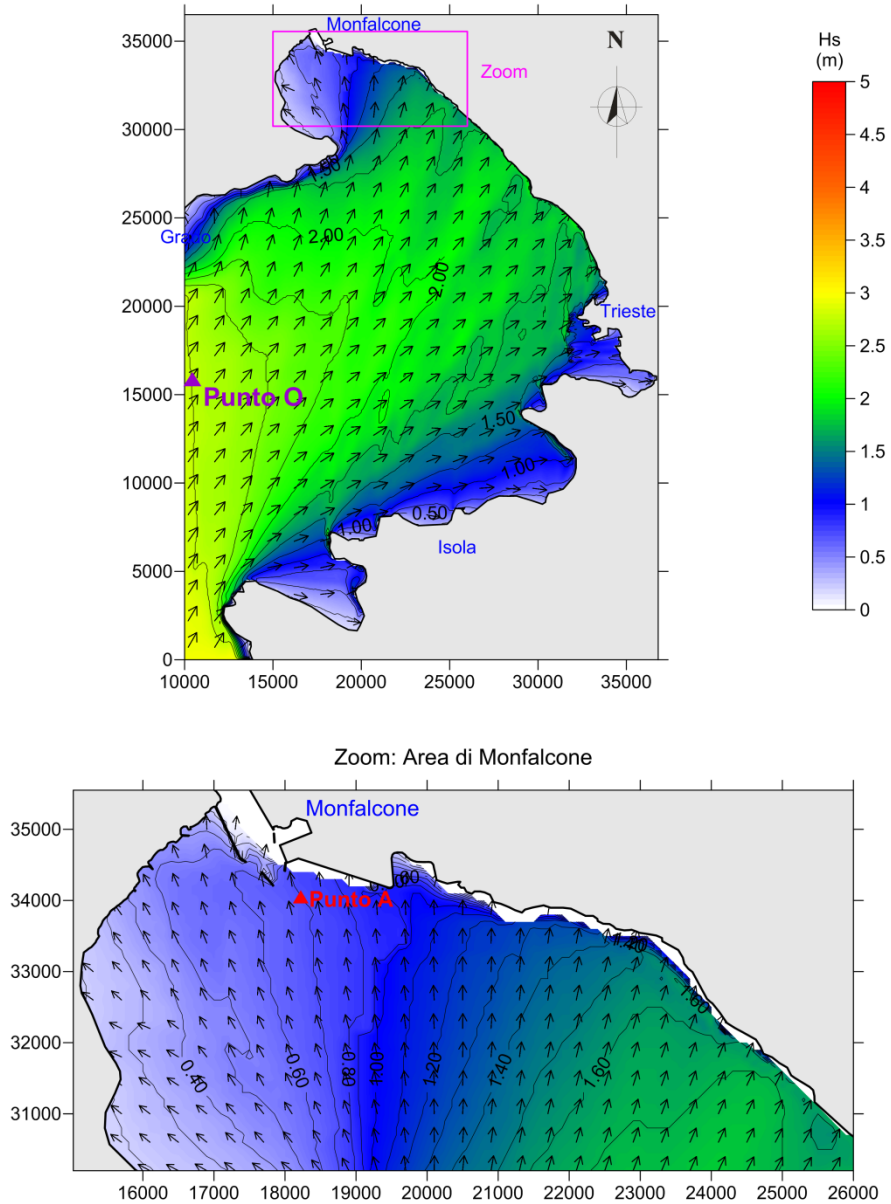
**Figura 6.7: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 120°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni**



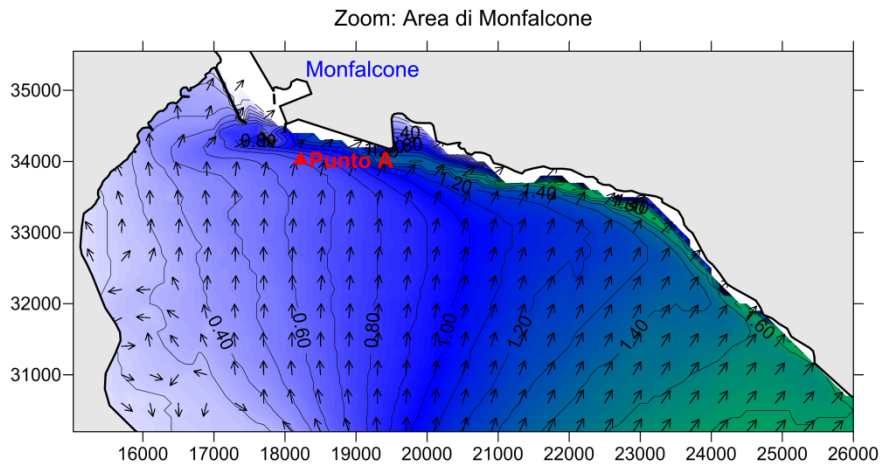
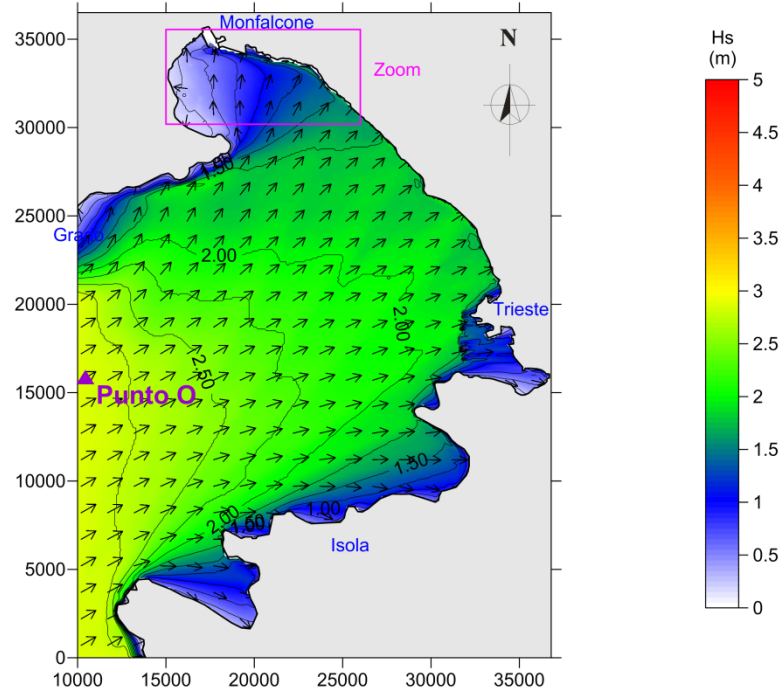
**Figura 6.8: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 150°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni**



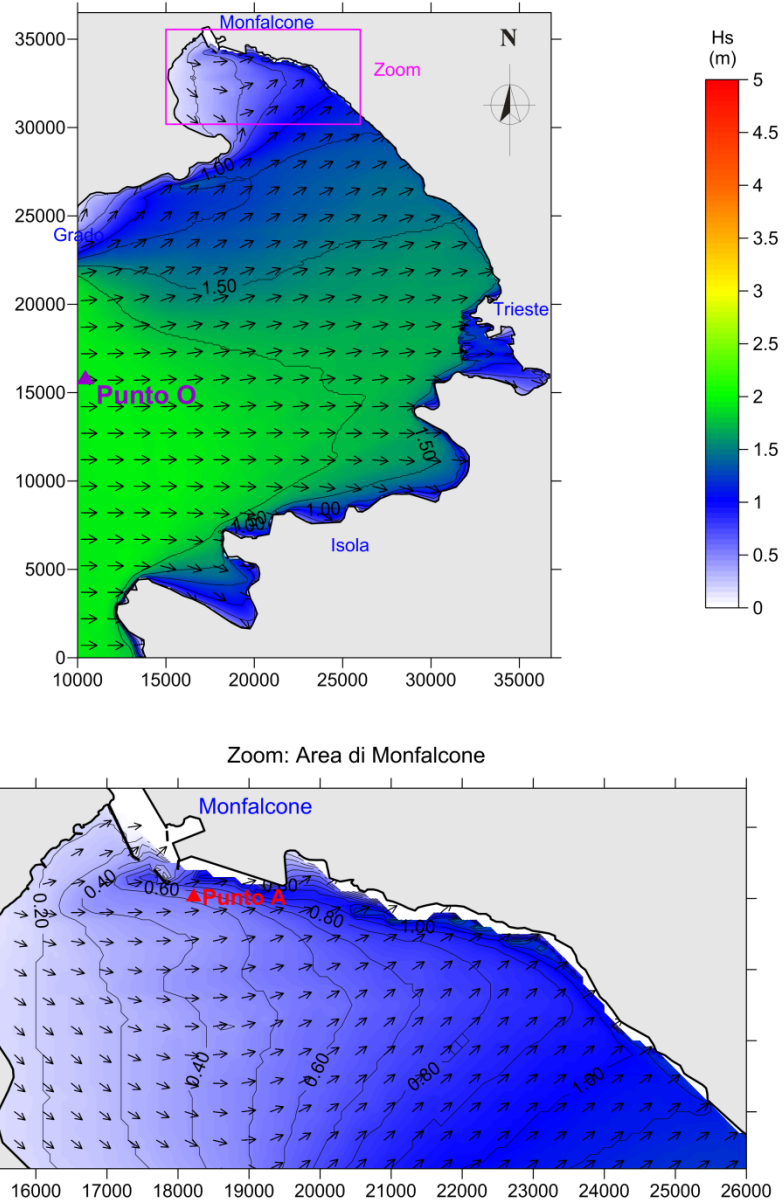
**Figura 6.9: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 180°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni**



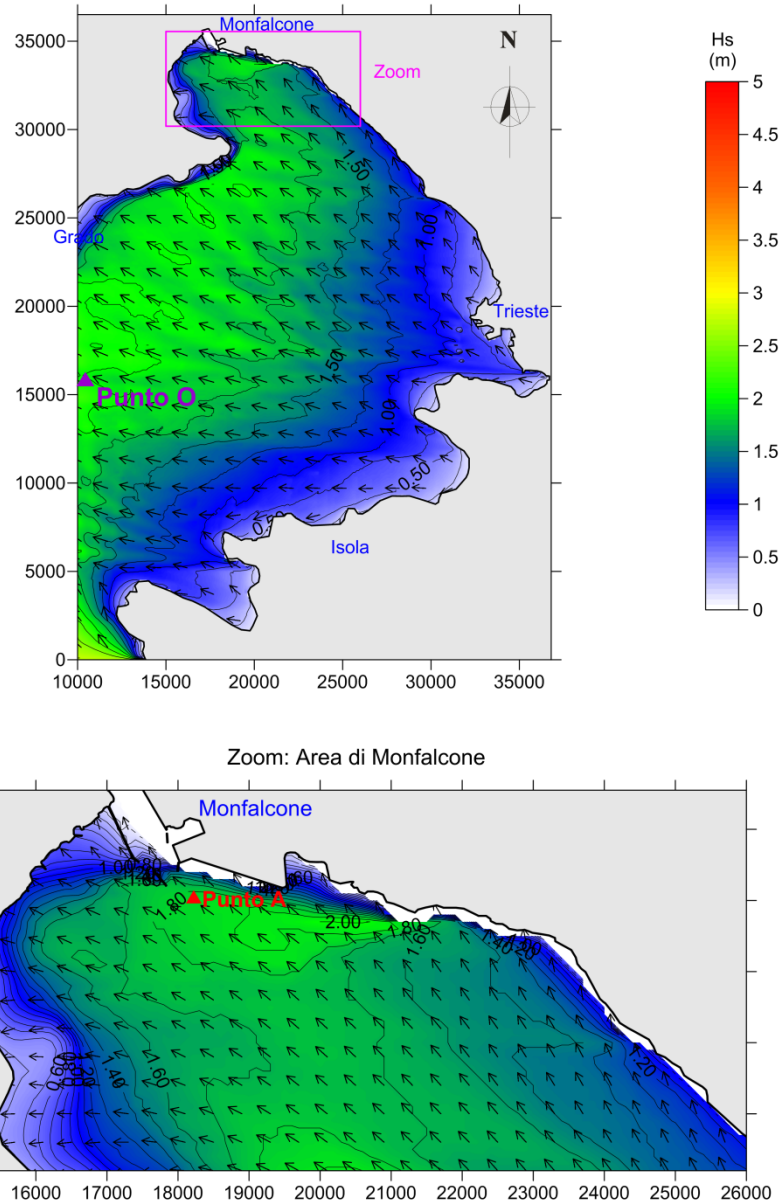
**Figura 6.10: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 210°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni**



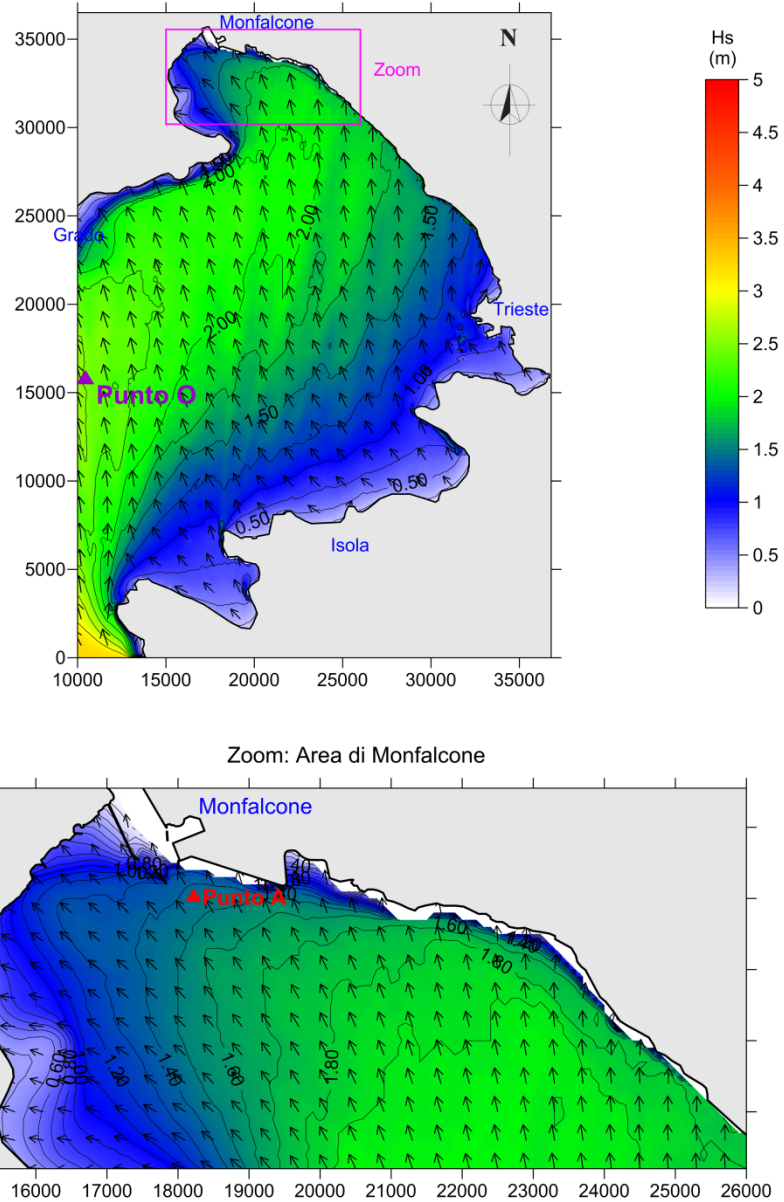
**Figura 6.11: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 240°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni**



**Figura 6.12: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 270°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 10 Anni**

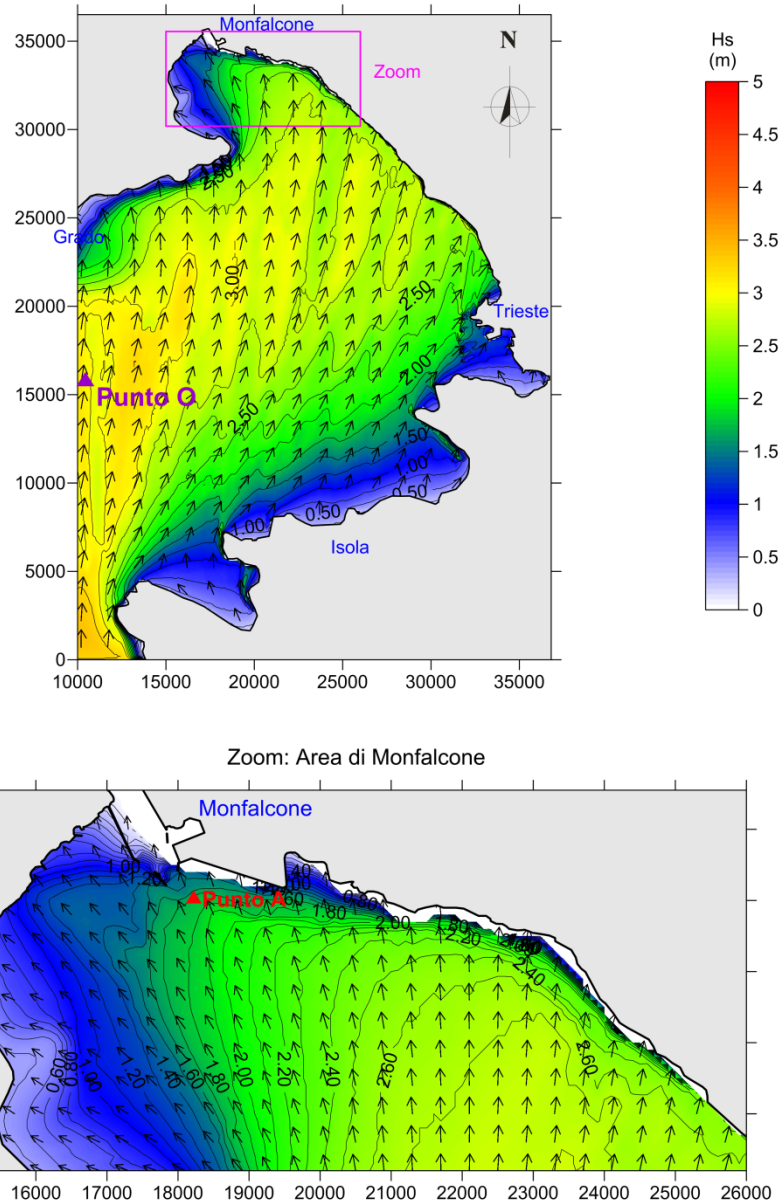


**Figura 6.13: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 120°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni**

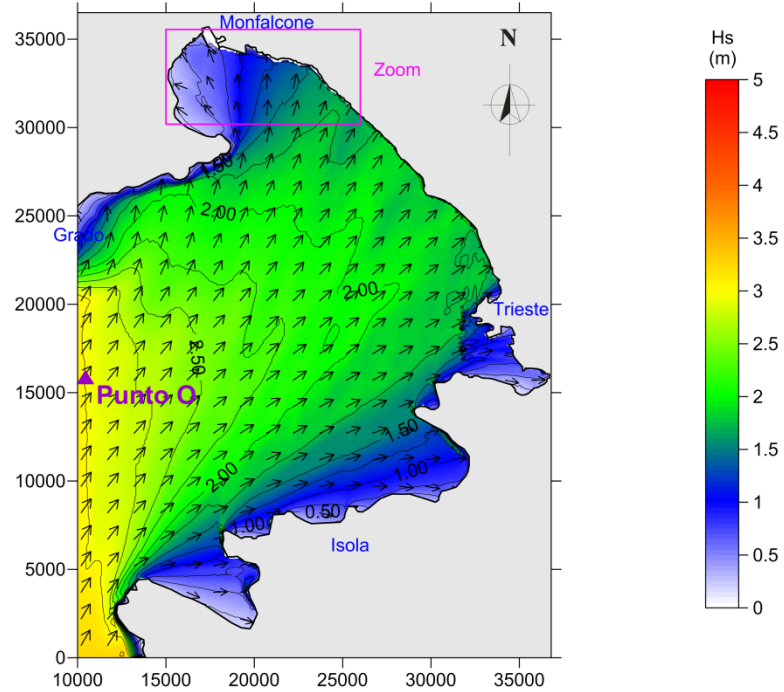


**Figura 6.14: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 150°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni**

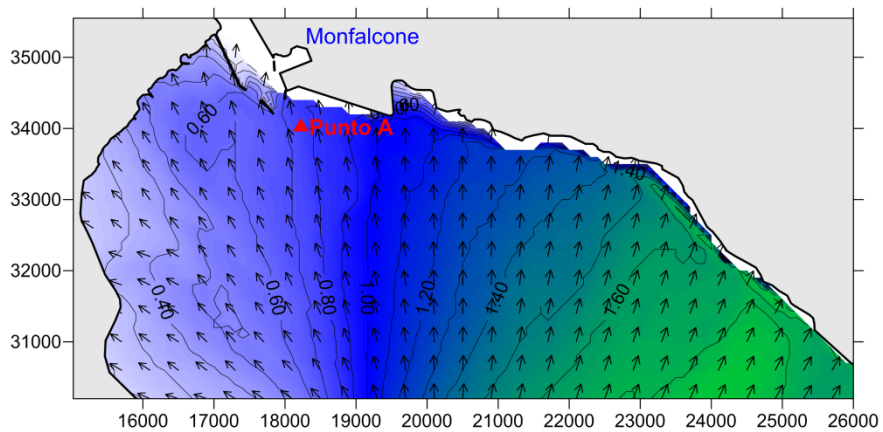




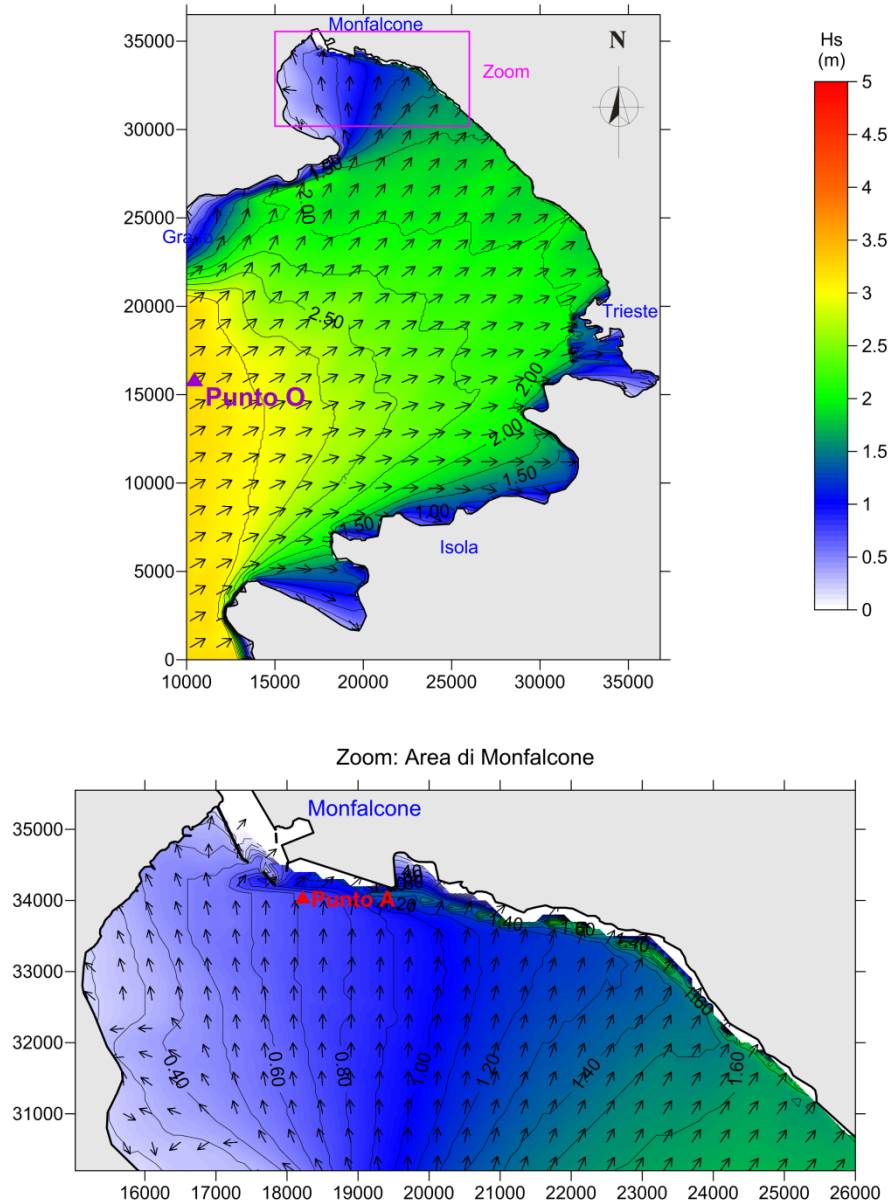
**Figura 6.15: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 180°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni**



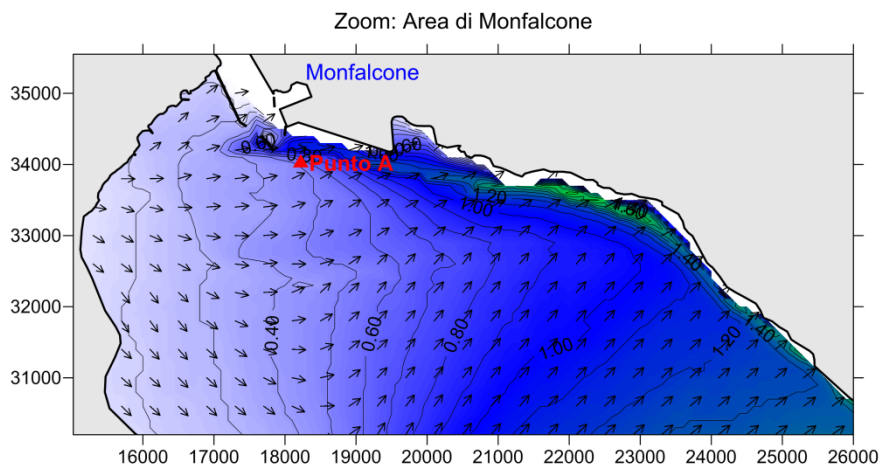
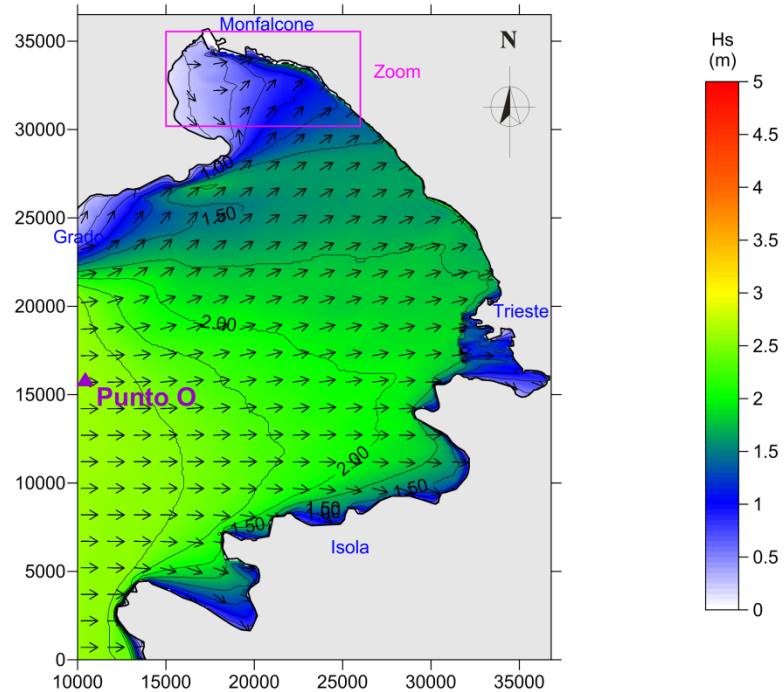
Zoom: Area di Monfalcone



**Figura 6.16: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 210°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni**



**Figura 6.17: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 240°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni**



**Figura 6.18: Propagazione dei Valori Estremi di Onde da 270°N nell'Area di Studio – Periodo di Ritorno: 100 Anni**

## 7 LIVELLO DEL MARE

Nel presente capitolo vengono analizzate le variazioni di livello marino. Si sottolinea che tutti i valori sono riferiti al livello medio mare (l.m.m.).

### 7.1 CONDIZIONI TIPICHE

Non esistono dati di livello nei pressi dell'area di studio. Si è pertanto cercato di stimarne le caratteristiche tipiche ed estreme sia sulla base dei dati misurati nella stazione di Trieste, sia attraverso simulazioni modellistiche, applicando il modello idrodinamico descritto nella sezione 4.4.

Nel Golfo di Trieste il contributo della marea è dovuto essenzialmente a 7 componenti armoniche riportate in Tabella 7.1.

**Tabella 7.1: Principali Costanti Armoniche Della Marea a Trieste**

COMPONENTE	AMPIEZZA (cm)	FASE (°)
O1	5.3	60.8
P1	6.0	67.3
K1	18.0	71.3
N2	4.5	275.7
M2	26.7	277.0
S2	15.9	284.9
K2	4.8	280.2

I valori massimi e minimi che si ottengono da tali costanti armoniche sono dell'ordine di 80 cm.

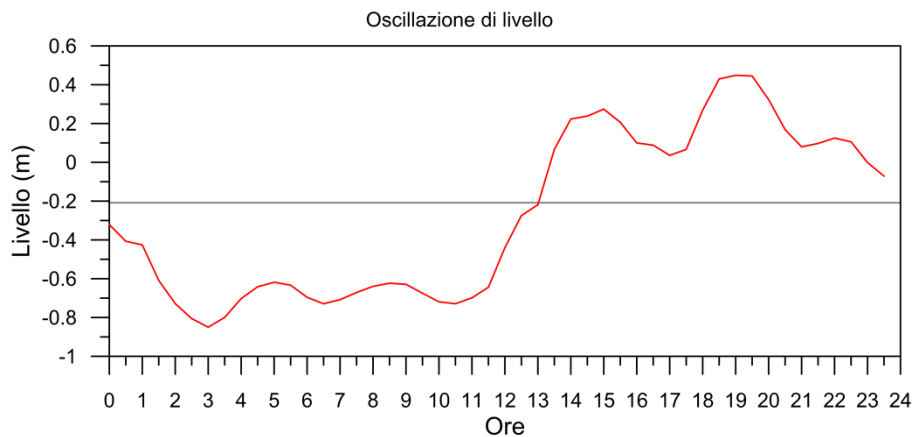
Informazioni sui valori massimi e minimi del livello registrati a Trieste dall'Istituto Talassografico per gli anni dal 1944 al 1979 e dall'Ispra (per la Rete Mareografica Italiana) per gli anni dal 1988 al 2010 indicano un livello minimo di -129 cm e un massimo di 199 cm rispetto al livello medio mare, vedi Tabella 7.2.

Tali valori sono il contributo di vari termini forzanti: la marea, lo storm surge dovuto a vento e gradienti barici, e le sesse.

Dall'analisi degli output del modello idrodinamico è stato possibile individuare le sesse tipiche dell'area di studio. E' noto infatti che la sessa fondamentale dell'Adriatico ha un periodo di circa 21.5 ore e si verifica in corrispondenza dei venti da scirocco, ma non sono assolutamente trascurabili le sesse trasversali che si sviluppano tra il Golfo di Venezia e il Golfo di Trieste, caratterizzate da un periodo di circa 3.5 ore e quelle locali all'interno del Golfo di Monfalcone che hanno periodi di circa 1 ora. In Figura 7.1 viene riportata a titolo di esempio la serie temporale di livello simulata per effetto del vento annuale proveniente da 30°N, in cui è ben evidente l'oscillazione dovuta alle sesse.

**Tabella 7.2: Valori Massimi e Minimi Annuali, Rispetto al Livello Medio Mare, Registrati a Trieste (Fonte: Istituto Talassografico di Trieste e ISPRA)**

ANNO	Max LIVELLO (cm)	Min LIVELLO (cm)	ANNO	Max LIVELLO (cm)	Min LIVELLO (cm)
1944	98	-102	1978	107	-96
1945	104	-96	1979	141	-94
1946	108	-114	1980	-	-
1947	124	-93	1981	-	-
1948	134	-101	1982	-	-
1949	106	-109	1983	-	-
1950	98	-100	1984	-	-
1951	141	-91	1985	-	-
1952	98	-114	1986	-	-
1953	96	-110	1987	-	-
1954	116	-95	1988	53	-108
1955	103	-89	1989	71	-129
1956	90	-101	1990	-	-
1957	96	-104	1991	87	-75
1958	106	-104	1992	65	-84
1959	129	-105	1993	57	-101
1960	117	-103	1994	82	-108
1961	122	-89	1995	94	-89
1962	98	-95	1996	103	-80
1963	106	-100	1997	116	-93
1964	102	-105	1998	96	-89
1965	124	-116	1999	105	-95
1966	133	-91	2000	98	-90
1967	115	-103	2001	98	-81
1968	128	-98	2002	118	-82
1969	199	-96	2003	98	-95
1970	117	-91	2004	122	-85
1971	98	-98	2005	103	-104
1972	116	-105	2006	102	-90
1973	96	-97	2007	107	-87
1974	94	-109	2008	141	-102
1975	121	-100	2009	116	-94
1976	113	-105	2010	101	-78
1977	112	-93			



**Figura 7.1: Oscillazione di Livello Indotta dal Vento Annuale Proveniente da 30°N**

## 7.2 VALORI ESTREMI

In assenza di serie temporali di livello, i valori estremi possono essere stimati in due modi differenti:

- dai massimi e minimi annuali riportati in Tabella 7.2;
- dal contributo dei vari termini forzanti simulati dal modello idrodinamico.

Nel primo caso è stata applicata la funzione estrema di Gumbel alla distribuzione dei massimi e minimi annuali: i risultati sono mostrati nella Tabella 7.3.

Nei calcoli non è stato considerato il valore di 199 cm misurato nel 1996, perché completamente fuori dal range di valori (corrisponde cioè ad un valore estremo avente un periodo di ritorno eccedente il periodo di misura).

Nel secondo caso sono stati calcolati i valori massimi di elevazione indotti dal vento estremo per le direzioni principali in prossimità del Porto di Monfalcone, punto A in Figura 3.1. I valori che si ottengono sono riportati in Tabella 7.4 in cui si sono suddivisi i valori tra quelli deterministici della marea e quelli dovuti all'effetto combinato di vento e sesse.

Si ritiene opportuno esprimere alcune considerazioni sui valori stimati: sommando i valori di marea a quelli dovuti alle altre cause, si ottengono, per il periodo di ritorno di 100 anni, valori di 245 cm, decisamente superiori a quelli stimati dalla serie del Talassografico. Anche se la somma è cautelativa (meglio sarebbe effettuare la probabilità congiunta, ma mancano i dati per questo calcolo), questo valore derivante dall'applicazione del modello è quasi coincidente con il valore massimo misurato (199 cm): si suggerisce pertanto di assumere un valore di almeno 2.0 m come risulta dalle simulazioni numeriche per il valore estremo massimo centenario.

**Tabella 7.3: Valori Estremi del Livello Del Mare (Riferiti Al Livello Medio) Stimati dai Valori Massimi e Minimi Annuali Rilevati dall'Istituto Talassografico Di Trieste dal 1944 al 1979 e dall'ISPRA dal 1988 al 2010**

LIVELLO (cm)	PERIODO DI RITORNO (anni)		
	1	10	100
MASSIMI	78	133	174*
MINIMI	-84	-111	-132

\* stimati trascurando il valore di 199 cm

**Tabella 7.4: Valori Estremi del Livello del Mare (Riferiti Al Livello Medio) Stimati Mediante Modello Idrodinamico Applicato alla Marea e ai Venti Estremi**

LIVELLO (cm)	MAREA (cm)	PERIODO DI RITORNO (anni)		
		1	10	100
MASSIMI	44	134	198	201
MINIMI	-54	-100	-131	-163

## **8 CORRENTE**

Nel presente capitolo vengono evidenziati gli aspetti principali della circolazione nell'area in esame, preceduti da una sintetica descrizione della circolazione generale dell'Adriatico, che deve essere ovviamente tenuta in considerazione nel definire il regime delle correnti locali.

### **8.1 CIRCOLAZIONE GENERALE**

Il campo di corrente in Adriatico è principalmente dovuto alla combinazione della componente di marea, generata dall'oscillazione del livello marino dovuto alla marea astronomica, della componente di gradiente, dovuta allo spostamento di masse d'acqua di caratteristiche differenti, e della componente da vento, indotta dal passaggio di perturbazioni atmosferiche, cui fanno seguito oscillazioni smorzate del bacino (sesse) fino a che la condizione di equilibrio viene raggiunta. Notevole è anche la presenza delle correnti inerziali.

Inoltre si assiste a una variabilità stagionale per cui, da un sistema omogeneo (barotropico) presente nei mesi invernali, si passa ad un sistema stratificato (baroclinico) in estate, con caratteristiche del tutto differenti.

Per quanto riguarda gli spostamenti legati alle diverse caratteristiche delle masse d'acqua, la circolazione dell'Adriatico è dominata da un nucleo di acqua salata e densa che tende a risalire nell'Adriatico dallo Ionio attraverso il Canale di Otranto. Il richiamo di quest'acqua è causato dalla presenza di acqua poco salata e poco densa nell'Alto Adriatico.

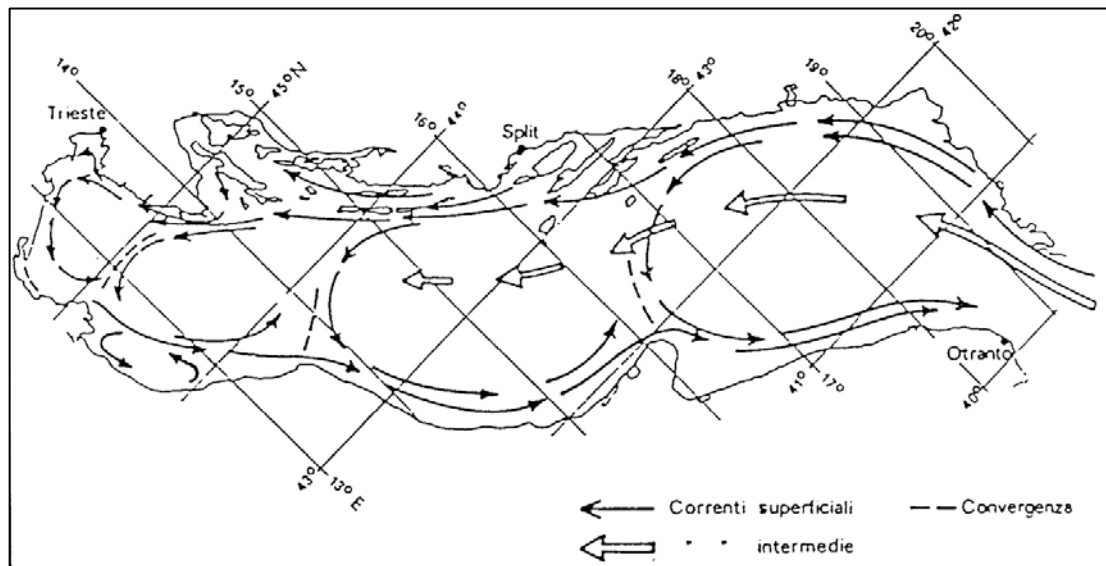
Il movimento a grande scala delle masse d'acqua in questo bacino presenta due periodicità tipiche, una stagionale, dipendente dalle differenti condizioni climatiche, e una a lungo termine, dominata dall'influsso di acqua ionica in Adriatico. Tale processo è forzato da variazioni climatiche a grande scala.

Il dislivello generato dalle diverse condizioni di densità determina la circolazione fondamentale di questo mare, con il concorso anche della forza di Coriolis causata dalla rotazione terrestre. A causa dei maggiori apporti di acqua dolce che si hanno nel bacino settentrionale, è sempre presente un pendio della superficie libera del mare principalmente in senso NO-SE. Altri pendii esistono tra le zone costiere, in cui le acque sono generalmente meno dense, ed il largo.

Il senso principale della corrente è dunque in uscita per le acque superficiali cui necessariamente consegue, per l'equilibrio, l'entrata delle acque intermedie.

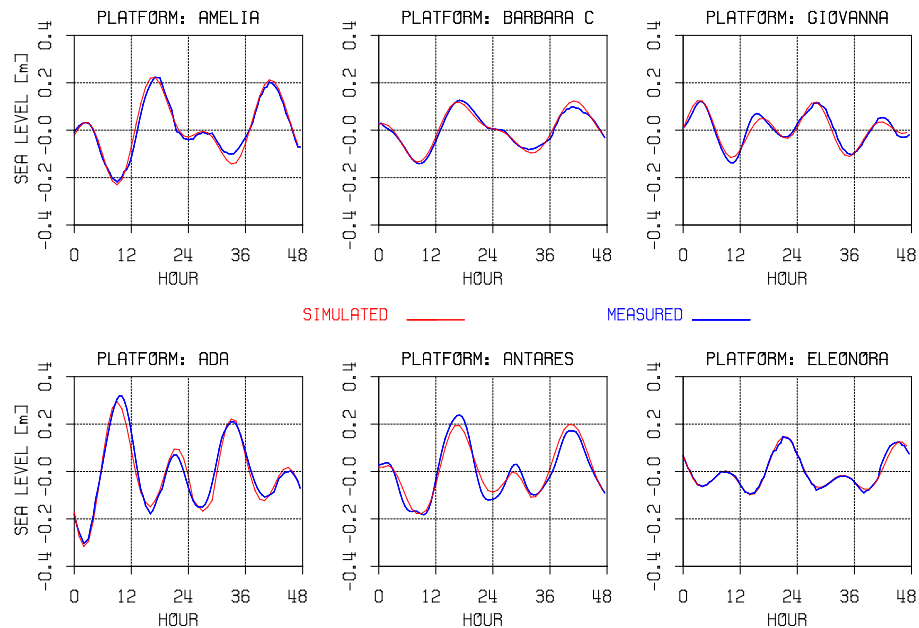
L'azione della forza di Coriolis fa sì che le acque uscenti fluiscano lungo le coste italiane e le acque entranti lungo le coste orientali. Flusso e deflusso non sono ovviamente costanti nel tempo: le forti variazioni di densità tra estate e inverno causano variazioni anche vistose del regime delle correnti. Inoltre gli apporti superficiali di acqua dolce sono tali da determinare acque costiere più sollevate di quelle al largo, tanto che vengono favorite circuitazioni tra corrente ascendente orientale e corrente discendente occidentale, rami che girano da Est a Ovest in corrispondenza del Po, del Conero e del Gargano, vedi Figura 8.1.





**Figura 8.1: Schema della Circolazione Generale del Mar Adriatico (Mosetti, 1984)**

Mediante il modello idrodinamico HYDRO 2D disponibile in D'Appolonia, implementato con le caratteristiche tipiche del Mar Adriatico, in cui si alternano periodi (inverno) di omogeneità verticale del campo di massa a periodi (estate) di stratificazione delle acque, è possibile simulare sia le condizioni barotropiche che quelle barocliniche. Come termini forzanti, oltre alla densità dell'acqua, il modello assume in input il campo barico, il campo di vento e l'oscillazione di marea.



**Figura 8.2: Esempio di Calibrazione del Modello HYDRO 2D nel Mar Adriatico: Confronto tra i Livelli Misurati e Ricostruiti in Diversi Punti**

Il modello idrodinamico è accoppiato ad un modello di vento che fornisce i valori di pressione atmosferica, velocità e direzione del vento necessari in input all'idrodinamico; entrambi sono interfacciati ad un database contenente molti dati rilevati in varie stazioni di misura e possono quindi venire inizializzati sulla base dei dati misurati. Il modello è stato calibrato e più volte verificato: esempi della calibrazione effettuata sono mostrati in Figura 8.2.

## 8.2 IL REGIME DELLE CORRENTI NEL GOLFO DI TRIESTE

Il Golfo di Trieste risente ovviamente delle caratteristiche circolatorie dell'Adriatico: l'afflusso di masse d'acqua più salate induce una circolazione antioraria che si sviluppa principalmente negli strati di fondo, essendo la superficie interessata dagli apporti di acqua dolce provenienti dai fiumi. Gli apporti fluviali determinano infatti dei gradienti orizzontali di densità, per lo più localizzati in prossimità delle foci dei fiumi, che danno origine a gradienti di pressione che generano una debole circolazione ciclonica in superficie.

Le correnti di marea sono in generale di modesta entità, anche se non trascurabili.

E' tuttavia il vento il termine forzante principale sia direttamente, attraverso il trascinamento delle masse d'acqua dovuto allo "stress" del vento sulla superficie marina, sia indirettamente, attraverso l'accumulo di acqua lungo costa e la conseguente corrente indotta dalle variazioni di livello del mare.

Le misure OGS, disponibili nelle due stazioni A e B descritte nella sezione 3.4 e riportate in Figura 3.1 su di un fondale rispettivamente di 21 m e 14 m, possono risultare utilizzabili al fine di quantificare il regime delle correnti nella parte più interna del golfo.

Nelle Tabella 8.1-Tabella 8.4 viene riportata la distribuzione della frequenza percentuale della velocità di corrente per direzione di propagazione.

**Tabella 8.1: Stazione A - Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 6 m di Profondità per Direzione di Propagazione**

DIR (°N)	V(cm/s)												TOT
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
0	6.59	3.72	1.29	0.48	0.07	0.02	0.02	0.02					12.19
30	9.85	4.63	3.14	1.83	0.92	0.25	0.18	0.18	0.04				20.93
60	9.41	2.64	1.27	0.60	0.11	0.05	0.02	0.02			0.04		14.15
90	4.92	1.07	0.44	0.09	0.02	0.00							6.54
120	2.85	0.53	0.18	0.04	0.00	0.00							3.59
150	3.51	0.63	0.09	0.00	0.00	0.00							4.23
180	3.56	0.86	0.35	0.16	0.04	0.00							4.97
210	3.31	1.30	0.51	0.33	0.28	0.11	0.09	0.09					5.94
240	3.44	0.79	0.30	0.37	0.02	0.02							4.93
270	4.76	0.78	0.23	0.09	0.04	0.02							5.90
300	5.99	1.18	0.56	0.14	0.11	0.05	0.02	0.02					8.07
330	5.66	1.97	0.70	0.21	0.02								8.56
TOT	63.83	20.12	9.06	4.33	1.60	0.51	0.32	0.16	0.04		0.04		100.00

**Tabella 8.2: Stazione A- Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 17 m di Profondità per Direzione di Propagazione**

DIR (°N)	V(cm/s)												TOT
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
0	12.37	2.31	0.90	0.25		0.02							15.84
30	11.15	4.29	1.74	1.03	0.76	0.13							19.11
60	8.59	4.45	1.95	0.48	0.29	0.04							15.79
90	6.22	1.89	0.25	0.11									8.47
120	2.75	0.36	0.06	0.00									3.17
150	3.02	0.13	0.00	0.00									3.15
180	4.64	1.03	0.19	0.04									5.90
210	2.27	1.01	0.23	0.04	0.02								3.57
240	3.94	0.69	0.19	0.10									4.71
270	5.59	0.76	0.46	0.11									6.93
300	4.54	0.65	0.34	0.10	0.02								5.65
330	6.55	0.92	0.23	0.02									7.71
TOT	71.43	18.50	6.53	2.27	1.09	0.19							100.00

L'esame delle Tabella 8.1-Tabella 8.2 evidenzia che, nella Stazione A, ubicata nella parte SE del golfo, la corrente fluisce verso N-NE-E nel 54% (stato superficiale) e nel 59% (stato di fondo) degli eventi: il sistema sembra dunque caratterizzato da una notevole barotropicità con correnti che fluiscono in verso antiorario su tutta la colonna d'acqua. I valori massimi sono 55 e 30 cm/s per lo stato superficiale e di fondo rispettivamente. L'84 % (stato superficiale) e il 90% (stato di fondo) degli eventi mostrano velocità inferiori o uguali a 10

cm/s e solamente nel 2.7% e 1.3% dei casi rispettivamente le correnti sono superiori a 20 cm/s.

**Tabella 8.3: Stazione B - Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 5 m di Profondità per Direzione di Propagazione**

DIR (°N)	V(cm/s)												TOT
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
0	2.35	1.99	0.24										4.58
30	5.36	4.22	1.27	0.06									10.90
60	4.28	4.94	2.29	0.12	0.24								11.87
90	3.98	4.76	1.51	0.48	0.18								10.90
120	3.13	1.51	1.75	0.36	0.12								6.87
150	2.11	0.72	0.24	0.06									3.13
180	2.95	0.54	0.06										3.55
210	3.37	1.20	0.84	0.12		0.06							5.60
240	4.58	4.34	3.13	1.99	0.24	0.18	0.24		0.06	0.12			14.88
270	4.64	4.76	1.75	0.04	0.84	0.36	0.30	0.18		0.12			13.49
300	4.82	3.73	1.02	0.42	0.18	0.06	0.18						10.42
330	2.29	1.27	0.18	0.06									3.80
TOT	43.86	33.98	14.28	4.22	1.81	0.66	0.72	0.18	0.06	0.24			100.00

**Tabella 8.4: Stazione B - Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente a 10 m di Profondità per Direzione di Propagazione**

DIR (°N)	V(cm/s)												TOT
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
0	2.93	2.21	0.72										5.85
30	3.58	2.87	1.13	0.18									7.76
60	3.70	4.48	2.21	0.30	0.06								10.76
90	3.88	2.03	0.72	0.36	0.18								7.16
120	1.73	1.07	0.24	0.12									3.16
150	1.25	0.66	0.48	0.12									2.51
180	1.85	1.85	0.90	0.18									4.78
210	3.04	5.75	3.10	0.78	0.18	0.06	0.06						12.96
240	5.61	7.88	5.67	1.67	0.54	0.12	0.30	0.06					21.85
270	4.78	3.28	2.27	1.07	0.18								11.58
300	3.64	1.73	0.66	0.48									6.51
330	3.10	1.25	0.66	0.12									5.13
TOT	39.10	35.04	18.75	5.37	1.13	0.18	0.36	0.06					100.00

Diversa la situazione nella Stazione B, ubicata nella parte NO del golfo: l'esame delle Tabella 8.3-Tabella 8.4 evidenzia che la corrente fluisce principalmente verso O-SO nel 39% (strato superficiale) e nel 46% (strato di fondo) degli eventi, verso NE-E rispettivamente nel 34% e nel 26% dei casi. Da notare che le misure si riferiscono però solo alla stagione estiva. I valori massimi sono 55 e 40 cm/s per lo strato superficiale e di fondo rispettivamente. Il 78 % (strato superficiale) e il 74% (strato di fondo) degli eventi mostrano

velocità inferiori o uguali a 10 cm/s; nel 3.7% e 1.7% dei casi rispettivamente le correnti sono superiori a 20 cm/s.

### **8.3 CONDIZIONI TIPICHE E VALORI ESTREMI IN PROSSIMITÀ DEL PORTO DI MONFALCONE**

Per quantificare le caratteristiche della corrente in prossimità del porto di Monfalcone si è fatto uso di un modello analitico e del modello numerico HYDRO 2D i cui dettagli sono descritti in Appendice B.

Per quanto riguarda il modello numerico, come già descritto nel capitolo 4.4, sono stati utilizzati tre livelli di innesto al fine di descrivere in maniera ottimale le oscillazioni di livello e il regime delle correnti in prossimità del Porto di Monfalcone.

Il modello analitico è stato applicato per la ricostruzione della corrente superficiale indotta dal vento tipico, mentre HYDRO 2D è stato applicato per simulare:

- l'andamento della marea e le correnti indotte per un mese tipico;
- le correnti indotte dai venti estremi.

#### **8.3.1 Condizioni Tipiche**

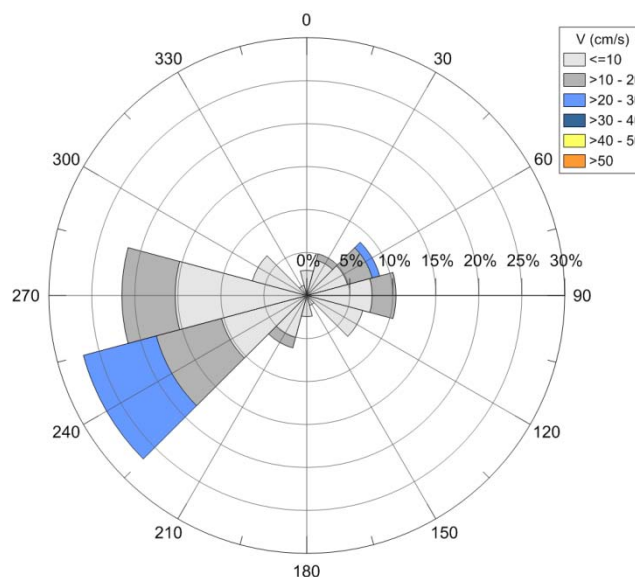
Al fine di quantificare la corrente tipica in prossimità dell'area di studio si è proceduto con l'analisi separata dei principali termini forzanti: il vento e la marea.

In particolare, il regime tipico della corrente superficiale indotta dal vento nei pressi del Porto di Monfalcone è stato ricostruito mediante l'uso di un modello analitico, applicando la procedura descritta nella sezione 4.4.4. Il modello è stato implementato con i dati di vento misurati presso il Porto di Trieste ed ha permesso di ricostruire la distribuzione direzionale della corrente per direzione di propagazione in un punto di calcolo appositamente selezionato nei fondali antistanti il porto di Monfalcone e rappresentativo delle caratteristiche batimetriche locali (orientazione e profondità).

La distribuzione direzionale della corrente è presentata in Tabella 8.5 e in Figura 8.3. I dati evidenziano come la corrente fluisca principalmente verso 240°N-270°N (48% circa degli eventi) e verso 60°N-90°N (19% circa degli eventi), quindi parallelamente al piano batimetrico locale. I valori massimi sono dell'ordine dei 30 cm/s mentre il 90% circa degli eventi è inferiore a 20 cm/s. A causa dell'elevata variabilità spaziale dell'orientazione del piano batimetrico nel golfo di Monfalcone, la distribuzione della corrente in punti limitrofi a quello prescelto può variare in termini direzionali rispetto a quella qui presentata, mentre non si prevedono significative variazioni in termini di intensità.

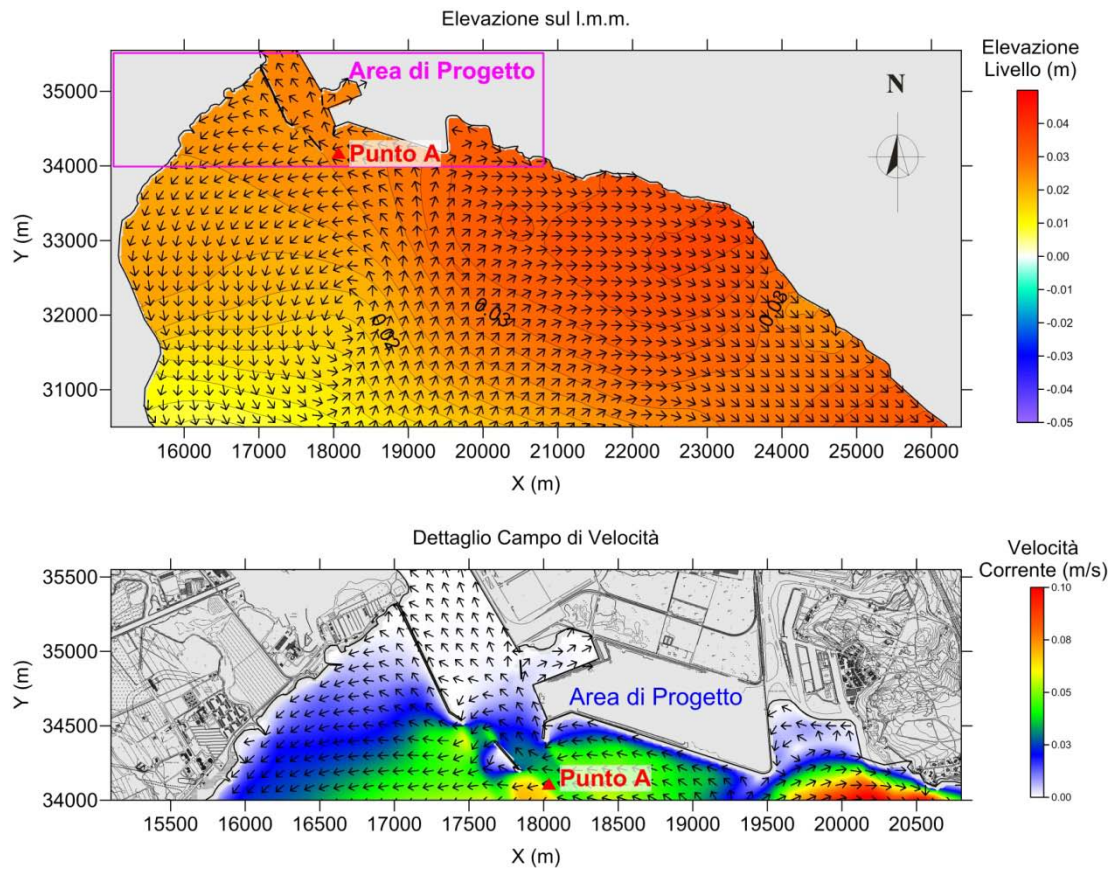
**Tabella 8.5: Distribuzione della Frequenza (%) della Velocità di Corrente Superficiale Indotta dal vento per Direzione di Propagazione**

DIR (°N)	V(cm/s)						TOT
	10	20	30	40	50	60	
0	2.94						2.94
30	4.25	0.78					5.03
60	4.89	2.98	0.90				8.77
90	7.59	2.78					10.37
120	6.73						6.73
150	1.19						1.19
180	2.46						2.46
210	5.05	1.26					6.31
240	10.28	7.85	8.77				26.90
270	15.32	6.20					21.52
300	6.55						6.55
330	1.23						1.23
TOT	68.48	21.85	9.67				100.00

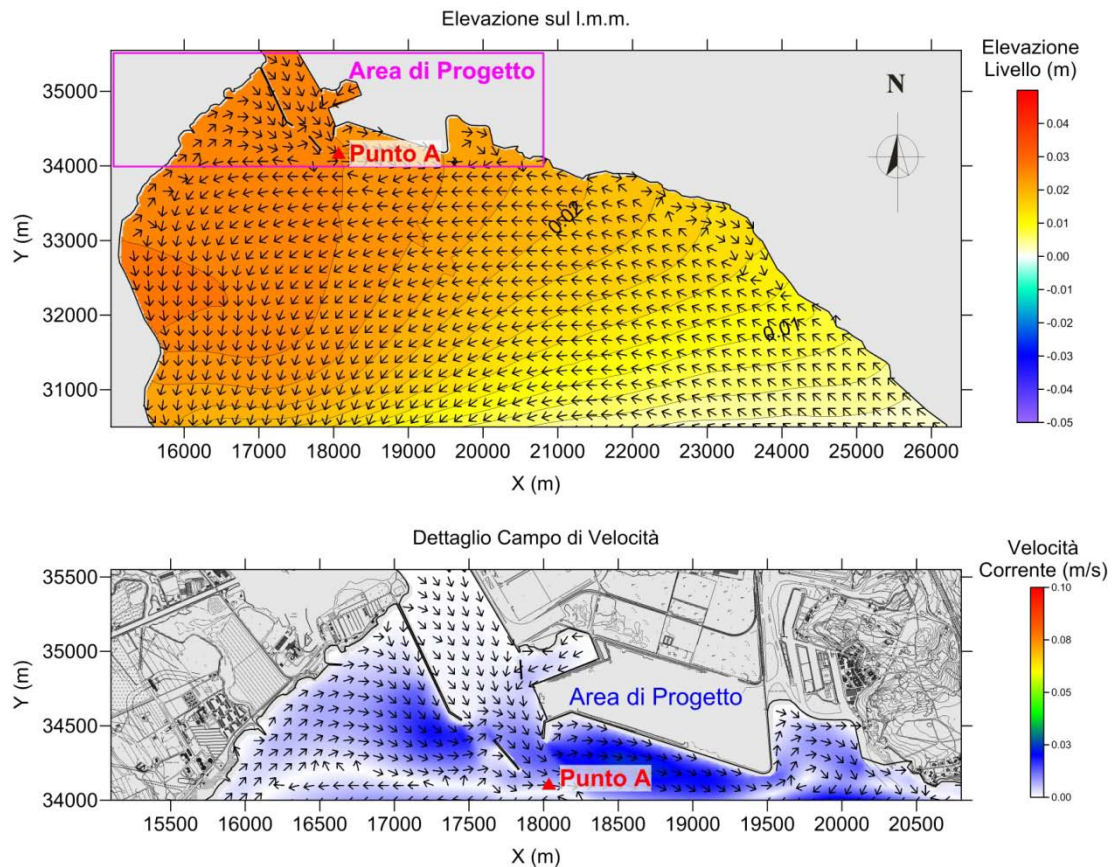


**Figura 8.3: Rosa della Corrente Superficiale Indotta dal Vento**

Per quanto riguarda la corrente indotta dalla marea, alcuni esempi grafici dei risultati ottenuti con il modello HYDRO 2D in prossimità del Porto di Monfalcone sono riportati in Figura 8.4 e Figura 8.5 rispettivamente per la fase di marea crescente e per la fase di marea calante. In entrambe le figure la direzione di propagazione della corrente è rappresentata mediante le frecce, mentre la scala cromatica individua l'elevazione di livello rispetto al livello medio mare (immagine nel pannello superiore) e l'intensità il valore medio sulla verticale dell'intensità della corrente (immagine nel pannello inferiore). Le isolinee rappresentano il valore di livello, espresso in metri, dovuto alla marea.



**Figura 8.4: Esempio di Elevazione del Livello sul I.m.m. e del Campo Idrodinamico Indotto dalla Marea in Fase Crescente**



**Figura 8.5: Esempio di Elevazione del Livello sul I.m.m. e del Campo Idrodinamico Indotto dalla Marea in Fase Calante**

### 8.3.2 Valori Estremi

I valori estremi della corrente da vento sono stati stimati dall'applicazione del modello idrodinamico ai venti estremi.

Per ogni periodo di ritorno (i.e. 1, 10 e 100 anni) e per ogni direzione considerata (i.e. 30°N, 60°N, 90°N, 150°N e 270°N), è stato prima applicato il modello a grande scala dell'Adriatico e successivamente quello di dettaglio del nord Adriatico, innestato sul precedente.

In input sono stati forniti i valori dei venti estremi riportati in Tabella 5.6 secondo la seguente procedura:

- per un intervallo di 24 ore il vento è stato fatto crescere fino al valore del picco;
- il valore di picco è stato mantenuto costante per 12 ore;
- successivamente il vento è stato interrotto e si è lasciato libero il bacino di oscillare per altre 12 ore.

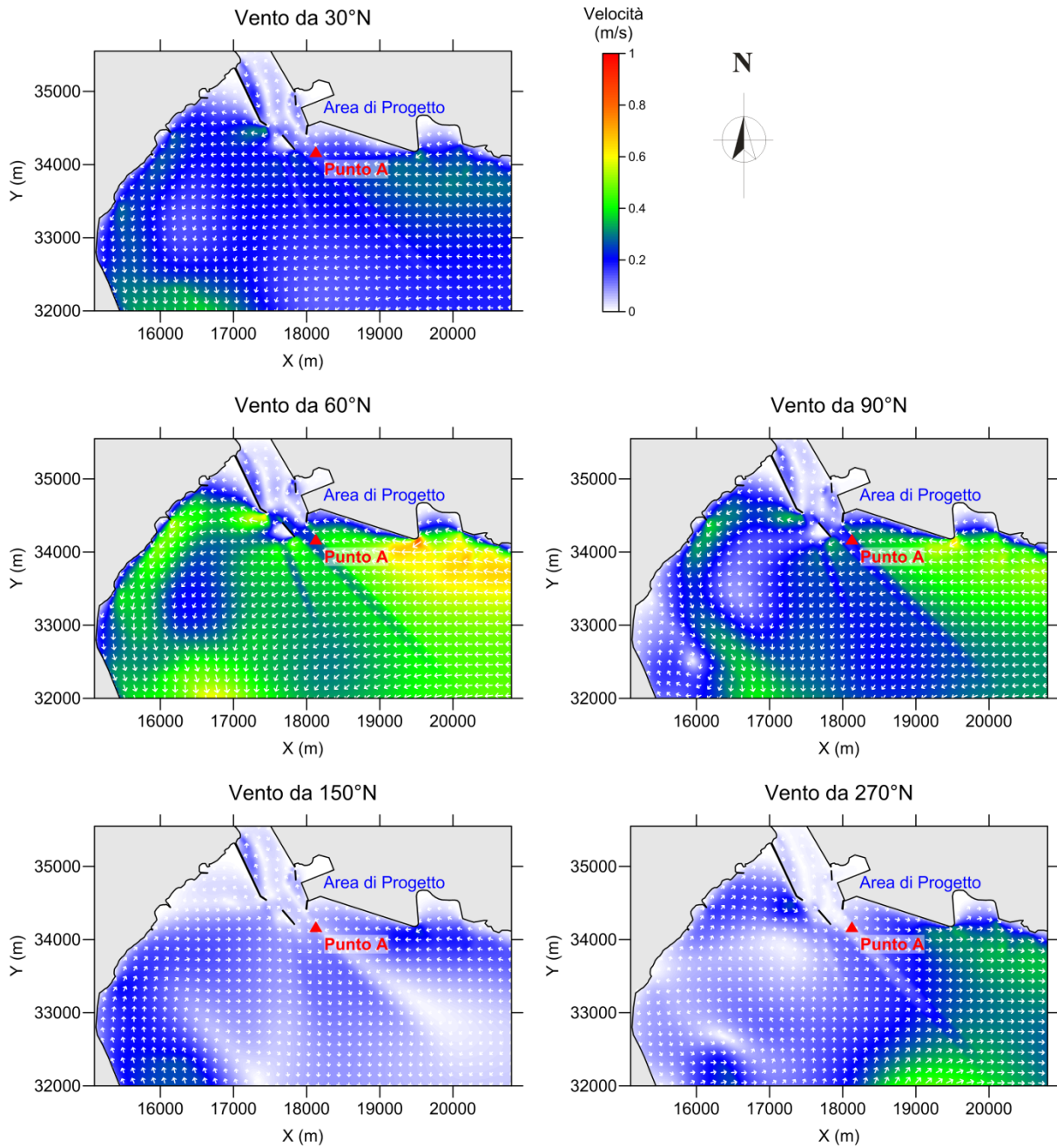
In tal modo ci si è assicurati di simulare anche le correnti più intense che, a seconda dei casi, della direzione e delle sesse indotte, possono verificarsi dopo che l'effetto del vento è terminato.



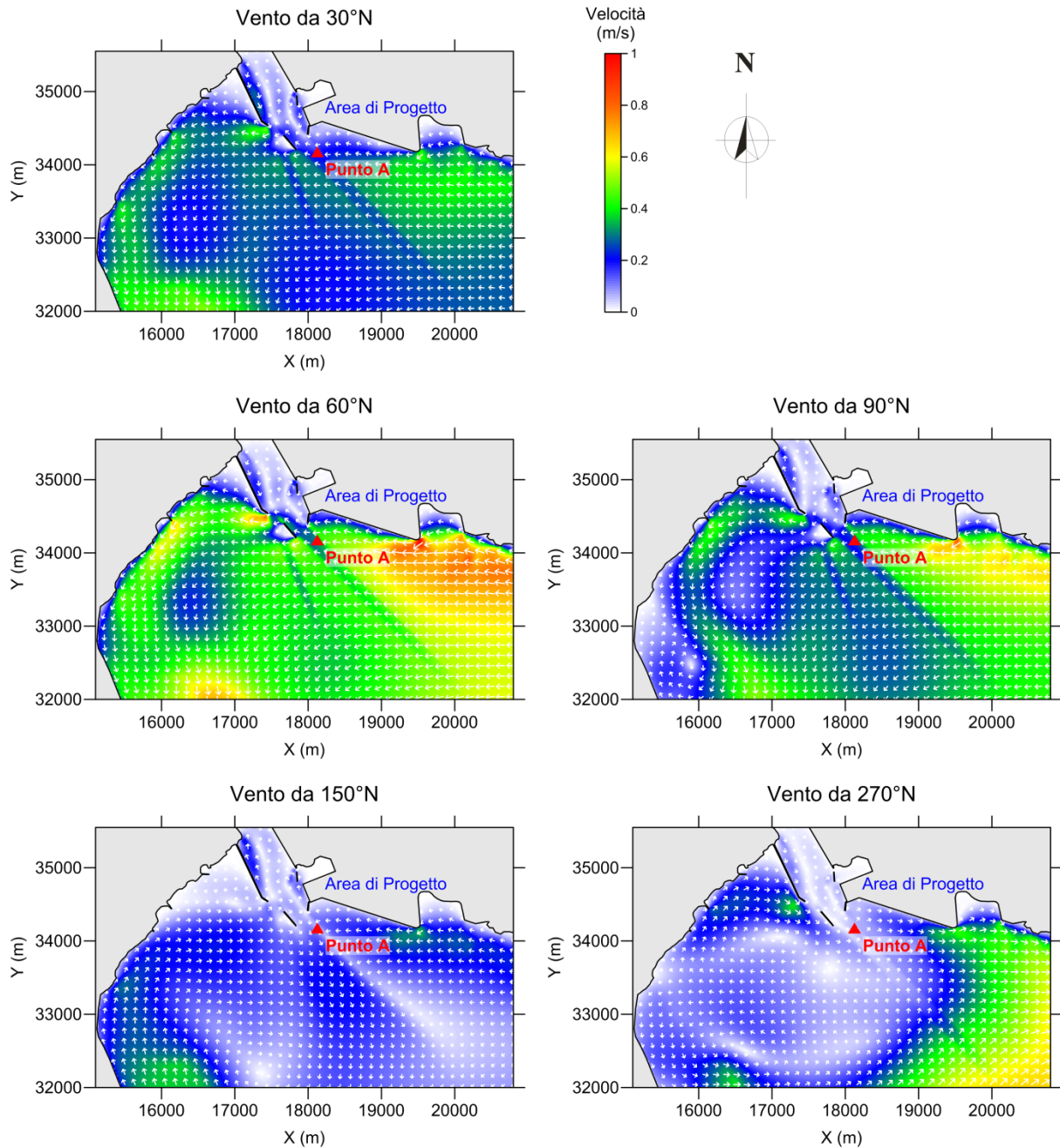
I valori estremi della corrente estratti in prossimità del porto di Monfalcone nel punto A sono riassunti in Tabella 8.6. Nella Figura 8.6-Figura 8.8 sono presentati esempi dei campi idrodinamici simulati per i differenti periodi di ritorno. Le frecce indicano la direzione di propagazione della corrente mentre la scala cromatica l'intensità della corrente.

**Tabella 8.6: Valori Estremi di Corrente in Prossimità del Porto di Monfalcone**

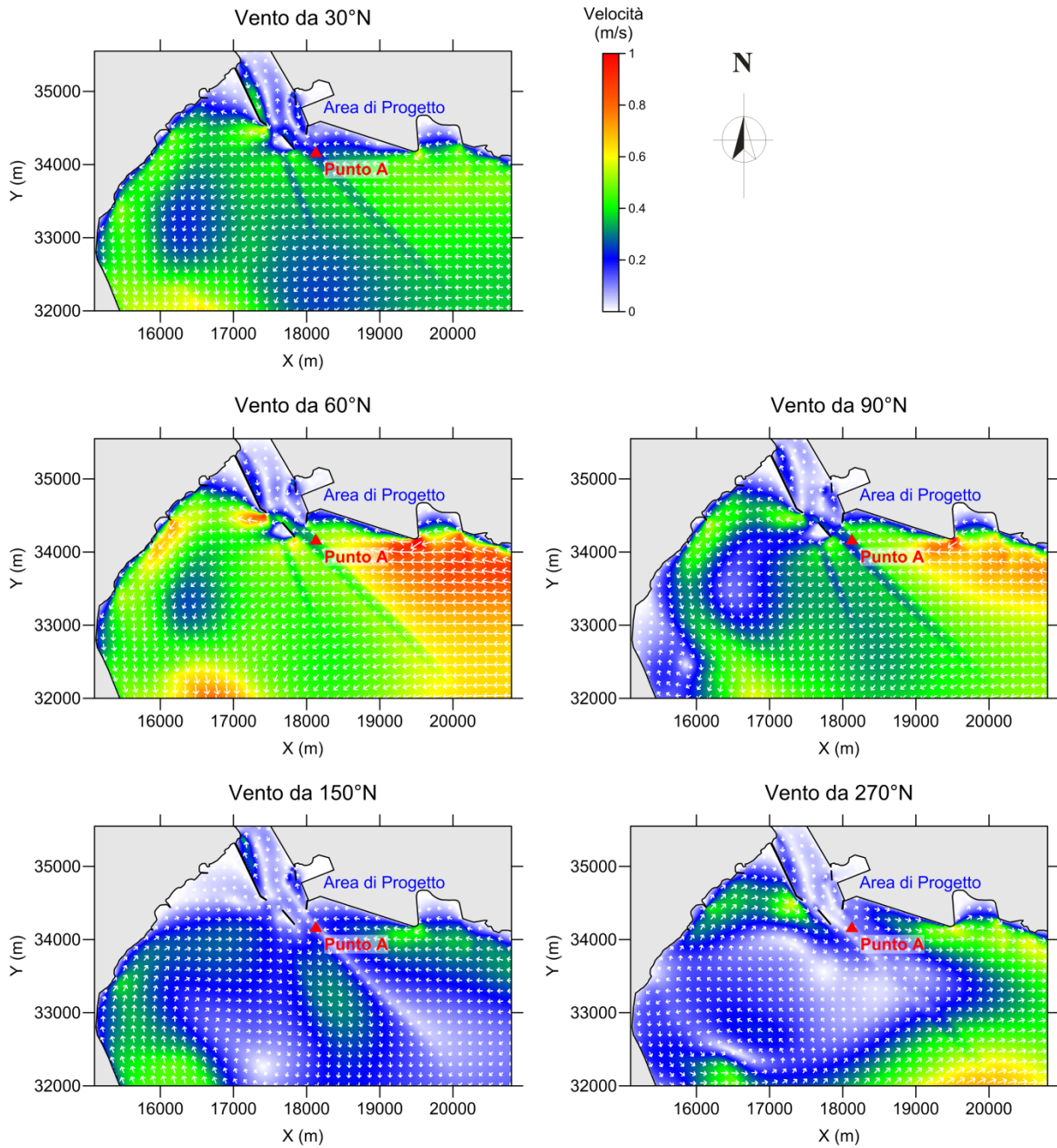
	Marea	Periodo di Ritorno (anni)		
		1	10	100
Valore corrente media sulla profondità (m/s)	0.09	0.38	0.41	0.55
Valore corrente a 1 m dalla superficie (m/s)		0.47	0.50	0.68



**Figura 8.6: Periodo di Ritorno 1 Anno: Esempio di Campo Idrodinamico Indotto dal Vento Estremo**



**Figura 8.7: Periodo di Ritorno 10 Anni: Esempio di Campo Idrodinamico Indotto dal Vento Estremo**



**Figura 8.8: Periodo di Ritorno 100 Anni: Esempio di Campo Idrodinamico Indotto dal Vento Estremo**

## 9 CONCLUSIONI

Il presente studio è stato elaborato al fine di definire le condizioni tipiche ed estreme dei parametri meteomarini in prossimità del terminale di rigassificazione GNL Monfalcone. Le condizioni meteomarine sono uno degli input fondamentali per svolgere una corretta progettazione delle opere civili (i.e. banchine) ed una corretta analisi della logistica e dell'ormeggio delle navi gasiere dirette al nuovo terminal GNL. Per tale ragione sono state definite con adeguato livello di dettaglio le caratteristiche locali di vento, moto ondoso, oscillazione di livello e di corrente in prossimità del porto di Monfalcone.

I dati di base sono stati reperiti negli archivi D'Appolonia e sono stati validati, elaborati ed interpretati al fine di caratterizzare compiutamente il sito di interesse.

Molto spazio è stato dedicato alla simulazione dei fenomeni mediante modellistica numerica, in particolare alla definizione accurata delle condizioni di moto ondoso e delle sue variabilità. Poiché misure di moto ondoso non sono disponibili nell'area in esame, è stato necessario "ricostruire" la serie temporale di moto ondoso, mediante trasposizione dei dati nel lungo termine disponibili nel Golfo di Venezia, applicando un modello spettrale di terza generazione verificato localmente sulla base di misure nel breve termine.

Nello studio si è fatto ricorso anche a un modello idrodinamico, più volte calibrato e verificato nel Mar Adriatico, sia per la valutazione delle variazioni di livello marino che per la quantificazione delle correnti estreme locali. Le variazioni di livello sono infatti decisamente consistenti nell'area a causa della sovrapposizione di vari termini forzanti quali la marea, il vento, i gradienti barici e le sesse: variazioni di 1 m del livello possono considerarsi tipiche dell'area. Infine, le correnti in prossimità del porto di Monfalcone risultano in generale non particolarmente intense ma non per questo trascurabili.

EDI/ETE/MTI/ALS/PRA/EP:fc b

## RIFERIMENTI

- Borgman L.E. and D. T. Resio, 1977, "Extremal Prediction in Wave Climatology", Ports 77 Conf., Long beach, Vol. 1, 394-412.
- CERC, 1984, "Shore Protection Manual", U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Department of the Army Corps of Engineers.
- C.N.R., 1984, "STONE, Statistica delle Onde Estreme - Mar Tirreno", Padova, Italy.
- Goda, Y., 2000, "Random Seas and Design of Maritime Structures", World Scientific.
- Grancini G.F., L. Iovenitti and G. De Filippi, 1979, "Analisi del Moto Ondoso nel Canale di Sicilia", CETENA, Genova, Italy.
- Gumbel, E. J., 1958, "Statistics of Extremes", Columbia Univ. Press, New York.
- Mosetti, F., 1984, "Caratteristiche Fondamentali dell'Idrologia dell'Adriatico Settentrionale", Boll. Oceanol. Teor. Appl, 2,2,169-194.
- Resio D.T., 1978, "Some Aspects of Extreme Wave Prediction related to Climatic Variations", Proc. 1st Offsh. Tech.Conf., Houston, Texas, vol.3, 1967-1980.

**APPENDICE A**  
**MODELLO SWAN**





## APPENDICE A MODELLO SWAN

La propagazione delle onde estreme a costa viene simulata mediante il ben noto modello “SWAN”, che rappresenta lo stato dell’arte.

SWAN (Simulating Waves Nearshore) è un modello numerico che produce stime realistiche dei parametri delle onde in aree costiere, a partire da condizioni definite al largo, tenuto conto delle condizioni del vento, delle correnti e delle caratteristiche del fondale.

L’entità dei diversi fenomeni è calcolata a partire dalla batimetria reale dell’area oggetto di studio.

SWAN è un modello spettrale di terza generazione, che tiene conto dei seguenti processi:

- rifrazione dovuta a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- “shoaling” dovuto a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- attrito e rifrazione indotti da correnti contrarie;
- trasmissione o dissipazione dovuti alla presenza di ostacoli (ad esempio barriere frangiflutti).

In SWAN sono formulati i seguenti processi di generazione e dissipazione:

- vento;
- “white-capping”;
- frangimento;
- attrito al fondo;
- interazioni non-lineari onda-onda.

SWAN differisce dagli altri modelli analoghi e dai suoi predecessori per i seguenti aspetti principali:

- è un modello spettrale (è, quindi, possibile selezionare il profilo spettrale da definire per le condizioni al contorno così come la funzione di “spreading” direzionale);
- considera la generazione di onde da vento anche in acque basse;
- considera l’interazione onda-corrente anche in acque basse.

Grazie ai tre punti sopra enunciati, SWAN definisce con maggiore completezza la dissipazione dell’energia rispetto ad altri modelli che tengono conto solo dell’attrito al fondo.

### A.1 FORMULAZIONE GENERALE

SWAN descrive le onde mediante lo spettro bidimensionale di densità di azione d’onda, anche in condizioni in cui prevalgono fenomeni non lineari (ad esempio nella “surf-zone”). Anche in condizioni fortemente non lineari, infatti, è possibile stimare con ragionevole accuratezza la distribuzione spettrale al secondo ordine.

SWAN utilizza lo spettro di densità di azione  $N(k, \theta)$  anziché lo spettro di densità di energia  $E(k, \theta)$  perché, in presenza di correnti, la densità di azione si conserva mentre la densità di energia non si conserva.

La densità di azione è uguale al rapporto tra la densità di energia e la frequenza relativa  $\sigma$ :

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma.$$

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa  $\sigma$  (misurata rispetto ad un sistema di riferimento che si muove con la velocità di propagazione dell'azione d'onda) e la direzione dell'onda  $\theta$  (direzione perpendicolare alla cresta di ciascuna componente spettrale).

L'evoluzione dello spettro viene descritta mediante l'equazione di bilancio dell'azione spettrale, di seguito riportata, rispetto ad un sistema di coordinate cartesiane (Hasselmann *et al.*, 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad [1]$$

primo termine a sinistra rappresenta il gradiente locale di densità di azione, il secondo ed il terzo termine rappresentano la propagazione di densità di azione nello spazio geografico.

Il quarto termine rappresenta lo spostamento della frequenza relativa dovuto alle variazioni di profondità e corrente, mentre il quinto termine rappresenta la rifrazione indotta dalla corrente e dalle variazioni di profondità.

Le velocità di propagazione ( $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ ) all'interno del modello sono definite mediante la teoria lineare.

Il termine  $S (=S(\theta, \sigma))$  a destra dell'espressione [1] è il termine sorgente espresso come densità di energia, ed è costituito dagli effetti di generazione, dissipazione, e interazioni non-lineari onda-onda.

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

## A.2 PARAMETRI PRINCIPALI

In SWAN le principali grandezze sono così definite:

Altezza d'onda significativa:  $H_s$  ( in m):

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

dove  $E$  è la densità spettrale della varianza,  $\omega$  la frequenza determinata dallo shift in frequenza della relazione di dispersione.

Periodo medio d'onda:  $T_{m01}$  (in s):

$$T_{m01} = 2\pi \left( \frac{\iint \omega E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{-1} = 2\pi \left( \frac{\iint \omega E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right)^{-1}$$

Periodo medio d'onda:  $T_{m02}$  (in s):

$$T_{m02} = 2\pi \left( \frac{\iint \omega^2 E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right)^{-1/2} = 2\pi \left( \frac{\iint \omega^2 E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{-1/2}$$

Direzione media dell'onda: Dir (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica), come convenzionalmente definita (Kuik *et al*, 1988).

$$Dir = \arctan \left[ \frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right]$$

Direzione del picco d'onda: PDir (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica):

$$PDir = E(\theta) = \int E(\sigma, \theta) d\sigma = \int E(\omega, \theta) d\omega$$

Velocità orbitale "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo:  $U_{rms}$  (in m/s)

$$U_{rms} = \langle U^2 \rangle^{1/2}$$

Velocità orbitale massima "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo:  $U_{bot}$  (in m/s)

$$U_{bot} = \sqrt{2} U_{rms}$$

### A.3 SCHEMATIZZAZIONE

L'area di studio viene discretizzata mediante un reticolo di maglie quadrate o rettangolari e ad ogni maglia viene assegnata la corrispondente profondità del fondale.

Il modello non ha particolari problemi nella risoluzione spaziale: possono così essere effettuate simulazioni della propagazione dell'onda a costa considerando reticoli di estremo dettaglio o reticoli a vasta scala.

E' inoltre possibile effettuare, ove necessario, l'innesto ("nesting") di uno o più reticoli dettagliati su uno a vasta scala, garantendo in questo modo condizioni ai contorni oggettive dei modelli di dettaglio.

### A.4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Andorka Gal, J.H., L.H. Holthuijsen, J.C.M. de Jong and A.T.M.M. Kieftenburg, 1998, Wave transformation near a quasi-1D coast, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 150-160
- [2] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1996, The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, pp. 668-676
- [3] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, A nonstationary, parametric coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 99-107
- [4] Booij, N., L.H. Holthuijsen, N. Doorn and A.T.M.M. Kieftenburg, 1997, Diffraction in a spectral wave model, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 243-255
- [5] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, Numerical wave propagation on a curvilinear grid, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 286-294
- [6] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1998, Shallow water wave modelling, Oceanology International 98, The Global Ocean, Brighton, Conference Proceedings, 3, 483-491

- [7] Booij, N., L.H. Holthuijsen and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing the second-generation HISWA wave model with the third-generation SWAN wave model, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 215-222
- [8] Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J.Geoph.Research*, 104, C4, 7649-7666
- [9] Cavaleri, L. and L.H. Holthuijsen, 1998, Wave modelling in the WISE group, *Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engng.*, Copenhagen, 498-508
- [10] Gorman, R.M. and C.G. Neilson, 1999, Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary, *Coastal Engineering*, 36, 197-217
- [11] Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H., 1973, Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, 12, A8
- [12] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993, A spectral wave model for the coastal zone, *Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641
- [13] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R. Padilla-Hernandez, 1997, A curvi-linear, third-generation coastal wave model, *Conf. Coastal Dynamics '97*, Plymouth, 128-136
- [14] Holthuijsen, L.H., N. Booij, R. Ris, J.H. Andorka Gal and J.C.M. de Jong, 1997, A verification of the third-generation wave model "SWAN" along the southern North Sea coast, *Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97*, ASCE, 49-63
- [15] Holthuijsen, L.H., R.C. Ris and N. Booij, 1998, A verification of the third-generation wave model SWAN, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 223-230
- [16] Holthuijsen, L.H., N. Booij and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing 1st-, 2nd - and 3rd-generation coastal wave modelling, *26th Int. Conf. Coastal Engng.*, Copenhagen, 140-149
- [17] Kuik, A.J., van Vledder, G.Ph. and Holthuijsen, L.H., 1988, A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1020-1034
- [18] Padilla-Hernandez, R., P. Osuna, J. Monbaliu and L. Holthuijsen, 1998, Intercomparing third-generation wave model nesting, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 102-112
- [19] Ris, R.C., L.H. Holthuijsen and N. Booij, 1994, A spectral model for waves in the near shore zone, *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engng*, Kobe, Oct. 1994, Japan, pp. 68-78
- [20] Ris, R.C. and L.H. Holthuijsen, 1997, Modelling of current induced wave-blocking in a spectral wave model, *8th International Biennial Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas*, J. Dronkers and M.B.A.M. Scheffers (eds.), The Hague, 139-144
- [21] Ris, R.C., N. Booij and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification, *J.Geoph.Research*, 104, C4,7667-7681

- [22] Wood, D.J., M. Muttray and H. Oumeraci, 2000, The SWAN model used to study wave evolution in a flume, Coastal Engineering, accepted for publication.



**APPENDICE B**  
**MODELLO HYDRO 2D**





## APPENDICE B MODELLO HYDRO 2D

### B.1 EQUAZIONI

Il modello è basato sulle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, mediate sulla verticale.

Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial(uh)}{\partial x} - \frac{\partial v h}{\partial y} \quad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - g \frac{u|\bar{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h} \tau_x \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - g \frac{v|\bar{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h} \tau_y \quad [3]$$

dove:

h: profondità riferita al livello medio del mare;

$\eta$ : elevazione della superficie libera;

u,v: componenti della velocità orizzontale mediate sulla verticale.

$$v = \frac{1}{h} \int_{-h}^{\eta} v(z) dz \quad u = \frac{1}{h} \int_{-h}^{\eta} u(z) dz \quad [4]$$

f: parametro di Coriolis;

$C_0$ : coefficiente di scabrezza del fondo;

$\tau_x, \tau_y$ : componenti dello stress superficiale del vento, legate alla velocità del vento W dalle relazioni

$$\tau_y = \rho_{aria} C_D W_y |\bar{W}| \quad \tau_x = \rho_{aria} C_D W_x |\bar{W}| \quad [5]$$

dove  $C_D$  è il coefficiente d'attrito e  $\rho_{aria}$  la densità dell'aria.

$C_D$  viene calcolato in funzione dell'intensità del vento W per includere l'incremento dello stress in presenza di moto ondoso che aumenta la scabrosità effettiva della superficie, secondo Hsu:

$$C_D = [36.4 - 5 \ln(W)]^2$$

Il coefficiente di Chezy è calcolato secondo la seguente espressione:

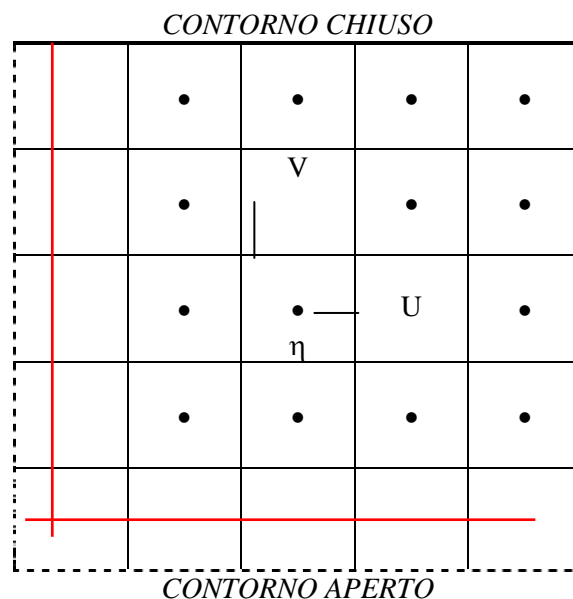
$$C = 18 \log(12 H/C_0) \quad [6]$$

dove  $C_0$  è la rugosità del fondo.

## B.2 IL METODO DI INTEGRAZIONE

Per l'integrazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto è stato adottato uno schema numerico alle differenze finite di tipo esplicito.

Lo schema opera su di un reticolo regolare a maglie quadrate o rettangolari di tipo “traslato” nel quale, cioè, l'elevazione della superficie libera e le componenti della velocità sono definite in punti diversi della maglia, secondo lo schema indicato nella seguente figura.



Anche nel tempo la rappresentazione è di tipo “traslato”, in quanto l'elevazione della superficie libera è definita al tempo  $n-1/2$ ,  $n+1/2$ ,  $n+3/2$ , ..., mentre le componenti della velocità sono definite al tempo  $n$ ,  $n+1$ ,  $n+2$ , ...

L'integrazione del sistema di equazioni viene effettuata in due passi: dapprima viene integrata l'equazione di conservazione della massa e viene calcolata l'elevazione della superficie libera al tempo  $n+1/2$  a partire dai valori di  $\eta$  al tempo  $n-1/2$  e di  $u$  e  $v$  al tempo  $n$ , successivamente vengono integrate le equazioni di conservazione della quantità di moto calcolando i valori di  $u$  e  $v$  al tempo  $n$  a partire dai valori al tempo  $n-1$  e dai nuovi valori  $\eta$  al tempo  $n+1/2$ .

Questa procedura è necessaria per garantire la stabilità della soluzione numerica.

Nelle equazioni della conservazione della quantità di moto i termini non lineari di tipo avvertivo vengono schematizzati mediante uno schema “upwind”, mentre i termini di attrito sono calcolati mediante uno schema di tipo semi-implicito, allo scopo di migliorare la stabilità della soluzione.

A causa della natura esplicita dello schema numerico adottato, il passo temporale  $D_t$  e le dimensioni spaziali  $D_x$  e  $D_y$  devono comunque soddisfare il criterio di stabilità di Courant-Levy:

$$D_t \leq \frac{\max(D_x, D_y)}{\sqrt{2}(|\vec{v}|) + \sqrt{gh}} \quad [7]$$

Per l'integrazione del sistema di equazioni debbono essere assegnate opportune condizioni iniziali e al contorno.

Nelle acque basse l'effetto accentuato dell'attrito determina il rapido attenuarsi delle perturbazioni del moto, per cui l'influenza delle condizioni iniziali tende a divenire trascurabile e dopo breve tempo si stabilisce una condizione di regime dipendente dall'equilibrio tra le condizioni al contorno ed i termini forzanti.

Ciò semplifica notevolmente il problema della determinazione delle condizioni iniziali per le quali in generale viene assunto uno stato di quiete:

$$\eta, u, v = 0 \quad \text{per } t=0 \quad [8]$$

Per quanto riguarda le condizioni al contorno vengono effettuate le seguenti assunzioni:

- ai contorni chiusi (terra) viene imposto l'annullamento delle componenti normali della velocità ( $u_n$ ) e della derivata normale al contorno della componente longitudinale della velocità ( $u_l$ ):

$$u_n = 0 \quad \frac{\partial u_l}{\partial n} = 0 \quad \text{per } t \geq 0 \quad [9]$$

- ai contorni aperti si impone la continuità del flusso e si assegna il valore dell'elevazione  $\eta$  ad ogni passo temporale.

Il modello è pertanto forzato sia dallo stress superficiale del vento che dalla assegnazione del valore del livello ai contorni aperti (ad esempio per moti di marea).

### B.3 PARAMETRI DI INPUT

Per l'applicazione del modello sono necessari i seguenti dati di input:

- geometria del bacino;
- profondità in ogni maglia del reticolo;
- rugosità del fondo in ogni maglia;
- condizioni iniziali di  $u$ ,  $v$  e  $\eta$  in ogni maglia;
- condizioni ai contorni aperti ad ogni passo di integrazione  $\delta t$ ;
- oscillazione di marea;
- vento superficiale (direzione ed intensità) ad ogni passo di integrazione  $\delta t$  e per ogni maglia.

### B.4 CARATTERISTICHE DELL'OUTPUT

Come risultato dell'integrazione numerica, il modello fornisce, ad intervalli prefissati, il valore di  $U$ ,  $V$  e  $\eta$  in ciascuna maglia del bacino.

E' inoltre possibile ottenere una rappresentazione grafica dell'andamento del campo di corrente e dell'elevazione della superficie libera.

## B.5 CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Il modello precedentemente descritto è correntemente utilizzato dalla ns. società per studi di settore in varie aree mondiali. Ove risultavano disponibili misure di corrente e/o di livello del mare il modello è stato calibrato con ottimi risultati (Puletti *et al*, 2001).

Per verificare l'adeguatezza del modello alle caratteristiche idrodinamiche dell'Adriatico, sono stati effettuati tre tipi principali di calibrazione:

1. il primo tipo è finalizzato ad evidenziare i modi di oscillazione.

Invece di lasciar oscillare il modello del bacino privo dei termini forzanti, l'estremo aperto del bacino è stato forzato con una serie di periodi simulanti varie onde che inducono oscillazioni all'interno del bacino stesso.

Tale sistema è ritenuto migliore rispetto al ricavare semplicemente le onde libere, perchè in quest'ultima maniera la risposta può solo ridursi a qualche oscillazione (la fondamentale e qualche armonica) ed i periodi risultanti possono venir notevolmente alterati dalla geometria del bacino.

Il sistema adottato è quindi simile alla spettroscopia ottica delle sostanze: si determina lo spettro di assorbimento/emissione avendo energizzato con "luce bianca": questo è, in pratica, il significato dell'introduzione di una serie di onde all'estremo aperto.

Naturalmente le onde sono tutte della stessa ampiezza (3 cm) e non si dà importanza alla fase, che è posta uguale e zero.

La risposta del bacino è allora fisicamente quella che si verificherebbe quando onde del periodo assegnato penetrano nel Canale di Otranto;

2. una volta verificato che il modello si comporti effettivamente come l'Adriatico, filtrando o esaltando onde di particolari frequenze, la seconda tipologia di calibrazione consiste nel fornire in input, una per volta, le varie componenti di marea e verificare, tramite confronto con i dati costieri ed i dati rilevati sulle piattaforme (serie armonica), che ampiezza e fase dell'oscillazione ottenuta dal modello sia in accordo con il dato sperimentale.

Dopo essersi assicurati dell'attendibilità dei risultati, viene fornita, in input al modello, la marea totale, somma delle varie componenti e di nuovo verificata l'adeguatezza dei risultati con i dati sperimentali;

3. dopo essersi accertati che il livello venga simulato con ragionevole accuratezza in tutto il bacino, è stato infine verificato, attraverso il confronto con i dati correntometrici che le velocità calcolate dal modello sono adeguate. Dopo alcuni ritocchi dei coefficienti di attrito, i risultati sono apparsi ottimali.

## **B.6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- [1] RAMMING H. G., 1972: "Reproduction of physical processes in coastal areas", Proc. of 13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver, Vol. 3;
- [2] HSU S.A., 1986: "A mechanism for the increase of wind stress (drag) coefficient with wind speed over water surfaces: a parametric model", J. of Phys. Oceanography, 16, 144-150;
- [3] HANSEN W., 1962: " Hydrodynamical methods applied to oceanographic problems", Proc. of the Symposium on Mathematical Hydrodynamical Methods of Physical Oceanography, Institut fur Meerskunde der Universitat, Hamburg;
- [4] REID R.O. e BODINE B.R., 1968: "A Numerical model for storm surges in Galverston Bay", Journal of the Waterways Harbours and Coastal Division, ASCE, Vol. 102, n. WW1;
- [5] ALLENDER, J.H., DITMARS, J.D., HARRISON, W. and PADDOCK, R.A. 1978: " Comparison of model and observed nearshore circulation", Proc. of 16th International Conference on Coastal Engineering, Hamburg;
- [6] LIU, P. and LENNON, G.P., 1978: " Finite Element Modelling of Nearshore Currents", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 104, WW2.
- [7] BIRKEMEIER, W.A. and DALRYMPLE; R.A., 1976: " Nearshore Water Circulation Induced by Wind and Waves", Proc. of the Symposium on Modelling Technique, ASCE;
- [8] PULETTI M., DE FILIPPI G., MENEGUZZO M., 2001 – An integrated modelling system to study and forecast the marine pollution in the Adriatic Sea – OMC 2001, Ravenna, Italy