

Committente: Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Direzione Centrale Difesa dell'Ambiente, Energia e sviluppo Sostenibile
Servizio Geologico



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Esecuzione: Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Matematica Informatica e Geoscienze



Supporto per la parte di analisi meteomarina:



INTERVENTO DI RIQUALIFICAZIONE E DI DIFESA DELLA LINEA GEOMORFOLOGICA DELLA COSTA CHE SI ESTENDE LUNGO IL LITORALE DI BARCOLA A TRIESTE



ANALISI METEOMARINA E DELL'ASSETTO MORFOLOGICO- SEDIMENTOLOGICO DEL TRATTO COSTIERO

ESECUZIONE:

Prof. Giorgio Fontolan

Docente di Dinamica e Protezione dei Litorali /
Sedimentologia Applicata all'Ambiente Marino
Università degli Studi di Trieste

COLLABORAZIONE:

Ing. Massimo Tondello

Ordine ingegneri della provincia di Padova n. 2771
HS marine srl

RAPPORTO FINALE

Data: Febbraio 2024

INDICE

<u>1</u>	<u>PREMESSA</u>	<u>3</u>
<u>2</u>	<u>INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO</u>	<u>4</u>
2.1	FETCH GEOGRAFICI ED EFFICACI	6
<u>3</u>	<u>CLIMA METEOMARINO AL LARGO DEL PARAGGIO</u>	<u>8</u>
3.1	DATI DI MOTO ONDOSO	8
3.2	DATI ANEMOLOGICI NEL GOLFO DI TRIESTE	12
3.3	LIVELLI DI MAREA	13
<u>4</u>	<u>PROPAGAZIONE DEL CLIMA ONDOSO SOTTO COSTA</u>	<u>14</u>
4.1	DEFINIZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO	14
4.2	SETTAGGIO DEL MODELLO	16
<u>5</u>	<u>CLIMA ONDOSO SOTTO COSTA</u>	<u>17</u>
5.1	ANALISI STATISTICA DEGLI ESTREMI	20
<u>6</u>	<u>CIRCOLAZIONE DELLE ACQUE LUNGO LA FASCIA COSTIERA</u>	<u>24</u>
6.1	LA CIRCOLAZIONE NEL GOLFO DI TRIESTE	24
6.2	LA CIRCOLAZIONE LUNGO IL LITORALE DI BARCOLA	25
<u>7</u>	<u>FORZANTI EPISODICHE (MAREGGIATE)</u>	<u>30</u>
7.1	PGRA: PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI E SOGLIE DI INONDAZIONE	30
<u>8</u>	<u>FORZANTE LONG-TERM (INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE)</u>	<u>33</u>
<u>9</u>	<u>INQUADRAMENTO GEOLOGICO</u>	<u>35</u>
<u>10</u>	<u>ASSETTO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO DEI FONDALI</u>	<u>39</u>
10.1	MORFOLOGIA SOTTOCOSTIERA	39
10.2	SEDIMENTOLOGIA	41
<u>11</u>	<u>STRUTTURA DELLE COMUNITA' BENTONICHE</u>	<u>44</u>
11.1	IL DOMINIO BENTONICO LITORALE	44

11.2	I POPOLAMENTI BENTONICI DEL GOLFO DI TRIESTE E DELLA FASCIA COSTIERA DI BARCOLA	45
11.3	LE COMUNITÀ MACROZOOBENTONICHE MONITORATE	46
11.4	LE FANEROGAME MARINE	48
11.5	CONSIDERAZIONI SUGLI ASPETTI CRITICI LEGATI AI POSSIBILI IMPATTI GENERATI DAI LAVORI	48
12	<u>VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI EQUILIBRIO STATICO DELLA SPIAGGIA</u>	50
12.1	PARAMETRIZZAZIONE DEL SISTEMA PARABOLICO DELLE BAIE	50
12.2	VERIFICA DEL CONTROLLO STRUTTURALE PIÙ ADEGUATO	51
13	<u>IL MATERIALE SEDIMENTARIO</u>	53
14	<u>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</u>	54
15	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	54
16	<u>APPENDICE – DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO SWAN</u>	61
16.1	GENERALITÀ	61
16.2	DESCRIZIONE SINTETICA DEL MODELLO	61
16.3	GENERAZIONE DOVUTA AL VENTO	62
16.4	TERMINI DISSIPATIVI	63
16.5	INTERAZIONI NON LINEARI ONDA-ONDA	64
16.6	APPROCCIO NUMERICO	65
16.7	CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO	65

1 PREMESSA

La Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia – Direzione Centrale de Difesa dell’Ambiente, Energia e sviluppo Sostenibile ha richiesto alla scrivente Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Matematica Informatica e Geoscienze un supporto e collaborazione per l’analisi di alcuni aspetti inerenti all’intervento di riqualificazione e di difesa della linea geomorfologica della costa che si estende lungo il litorale di Barcola a Trieste. Nello specifico la richiesta riguarda l’inquadramento del contesto meteomarinario e dell’assetto morfologico e sedimentologico in relazione anche a possibili soluzioni difensive e ridisegno del lungomare di Barcola ai fini della difesa dagli eventi episodici di mareggiata, in previsione dell’innalzamento del livello marino.

Per l’esecuzione dell’analisi, lo scrivente ha provveduto ad aggiornare e generalizzare l’analogo studio meteomarinario svolto per conto del Comune di Trieste nel 2022 finalizzato alla progettazione della Bau Beach a Barcola, per il quale si è avvalso del supporto tecnico di HS marine S.r.l. Per gli aspetti morfologico-sedimentologici e del contesto biocenotico ha tratto le informazioni dalla letteratura o da studi e analisi pregressi, segnatamente dall’approfondito “*Studio di fattibilità dell’ampliamento del lungomare tra Barcola e il Bivio di Miramare (Trieste)*” svolto dal Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine dell’Università di Trieste nel 2000 sotto il coordinamento scientifico del Prof. Antonio Brambati, su commissione della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia.

Per definire nel dettaglio le condizioni meteomarine del paraggio sono stati acquisiti i dati di moto ondoso più aggiornati disponibili, ovvero la serie storica relativa agli ultimi 40 anni circa ricostruita da *wave hindcasting*, sulla base del modello sviluppato dal dipartimento DICCA dall’Università di Genova.

L’analisi meteomarina è così articolata:

- inquadramento geografico del paraggio e individuazione del settore principale di traversia;
- analisi dei dati meteomarini disponibili per il paraggio (clima ondoso al largo, regime delle maree e regime anemologico);
- costruzione del modello di calcolo (modello numerico spettrale) sulla base dei rilievi batimetrici disponibili e delle Carte Nautiche più aggiornate;
- propagazione sotto costa della serie storica delle mareggiate sulla base dei dati DICCA (inclusa la generazione da vento) all’interno del Golfo di Trieste,
- estrazione dei dati in corrispondenza di un punto baricentrico antistante l’area di interesse e definizione del clima ondoso locale;
- analisi statistica degli eventi estremi e definizione delle caratteristiche delle mareggiate estreme di progetto.

L’analisi dell’assetto morfologico e dei parametri di base per l’ipotesi di progetto che prevede la realizzazione di piccole baie è qui mutuata dallo studio fatto per la Bau Beach, basata su un rilievo topo-batimetrico di dettaglio, come base per la parametrizzazione dell’assetto di equilibrio statico della spiaggia artificiale addossata alle strutture distaccate, verificato mediante la curvatura parabolica della linea di riva causata dalla diffrazione delle onde sull’opera più aggettante a mare, secondo le relazioni di letteratura. Completano la relazione alcune indicazioni di massima sulle caratteristiche granulometriche del materiale da impiegare per costruire le spiagge, laddove previste.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 3 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO

L'area oggetto di analisi, collocata nel settore centrale del Golfo di Trieste, ricade nel territorio del Comune di Trieste, in località Barcola. Il tratto di litorale in cui è previsto l'intervento di riqualificazione e di difesa della linea geomorfologica della costa corrisponde al settore grossomodo rettilineo che si sviluppa per 3450 m da Sticco Mare a Nord-Ovest al porticciolo di Barcola a Sud-Est (Fig. 2.1 e Fig. 2.2). Si tratta di un litorale completamente antropizzato e privo di vere e proprie spiagge naturali.



Fig. 2.1 – Inquadramento geografico del paraggio

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 4 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

La conformazione della costa dell'Alto Adriatico, con particolare riferimento all'area del Golfo di Trieste, delimitato dai promontori di Grado (a Nord) e Punta Salvore (a Sud), determina la presenza di un settore di traversia sostanzialmente esposto alle sole mareggiate di Libeccio (Fig. 2.1). Il paraggio è protetto dai mari di Mezzogiorno e Maestrale grazie alla presenza dei promontori; le mareggiate provenienti dagli altri settori sono di fatto solamente quelle che si generano all'interno del Golfo di Trieste per azione del vento, con fetch relativamente limitati.



Fig. 2.2 – Dettaglio dell'area di intervento: foto aerea di Google Earth del 2018 (in alto) e rappresentazione schematica della strutturazione della costa (in basso)

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 5 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

2.1 Fetch geografici ed efficaci

I fetch geografici (ossia le cosiddette “lunghezze di mare libero”), determinati in funzione dell’esposizione del paraggio, sono graficamente rappresentati nella seguente Fig. 2.3.

Per quanto concerne invece la determinazione dei fetch efficaci, è stata utilizzata la procedura proposta nello “Shore Protection Manual” (CERC, 1984). La metodologia proposta consiste nel costruire, a partire dal punto di interesse, nove raggi con spaziatura 3° estesi fino ad incontrare la linea di riva. Il fetch efficace, per ciascuna direzione, risulta dalla media aritmetica delle 9 lunghezze dei raggi così tracciati. I risultati ottenuti da tale calcolo sono rappresentati graficamente nella seguente Fig. 2.4. Si può notare che i massimi fetch corrispondono alle mareggiate provenienti da Libeccio, per le quali il massimo fetch efficace è dell’ordine dei 110 km (circa 60 NM).

Va osservato tuttavia che il solo fetch, geografico o efficace, non risulta particolarmente significativo nel caso specifico perché la generazione e propagazione del moto ondoso è fortemente dipendente dalla presenza di estesi bassi fondali che, per dissipazione e rifrazione, attenuano il moto ondoso nel Golfo di Trieste, in particolare nella porzione più settentrionale.



Fig. 2.3 – Fetch geografici per il paraggio di Barcola

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 6 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	



Fig. 2.4 – Fetch efficaci per il paraggio di Barcola

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 7 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

3 CLIMA METEOMARINO AL LARGO DEL PARAGGIO

3.1 Dati di moto ondoso

I dati di moto ondoso utilizzati come input per il modello di propagazione derivano dai risultati di un programma di ricerca recentemente portato a termine dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università di Genova; i dati sono ottenuti per mezzo di un procedimento di "wave hindcasting" ad alta risoluzione (ricostruzione dello stato del mare sulla base di dati meteorologici, mediante l'utilizzo di modelli numerici). I dati (<http://www.dicca.unige.it>) sono ottenuti da una reanalisi delle condizioni meteomarine estesa da gennaio 1979 a dicembre 2020 (42 anni).

Il MetOcean group, operante all'interno del DICCA dell'Università di Genova ha sviluppato una reanalisi delle condizioni atmosferiche e di moto ondoso che generalmente va dal gennaio 1979 fino a dicembre 2020. La reanalisi dei dati meteorologici è stata sviluppata utilizzando il *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) del NCEP per il periodo dal gennaio 1979 al dicembre 2010 e il CFSv2 per il periodo dal gennaio 2011 a dicembre 2020. L'analisi *hindcast* è stata eseguita per tutto il bacino del Mediterraneo con una risoluzione di 0.1° forzando il modello, ampiamente validato, con i dati del CFSR, ricavati dal National Center for Environmental Prediction (NCEP, <http://cfs.ncep.noaa.gov>), disponibili con una risoluzione di 0.5°. L'analisi è stata eseguita utilizzando il modello di generazione WAVEWATCH III (WWIII), versione 3.14, operativo al DICCA, con una risoluzione media della griglia pari a 10 km. Per la generazione del moto ondoso attraverso il WWIII è stata impiegata la forzante atmosferica (vento) ricavata in forma di campi di vento a 10 m dal suolo, attraverso l'impiego del modello non idrostatico, sviluppato allo stato dell'arte, WRF-ARW versione 3.3.1 (Skamarock et al., 2008). Per il modello WRF è stato definito uno specifico dominio di calcolo costituito da 328x265 punti che copre il Mediterraneo occidentale e centrale con risoluzione orizzontale di 10 km.

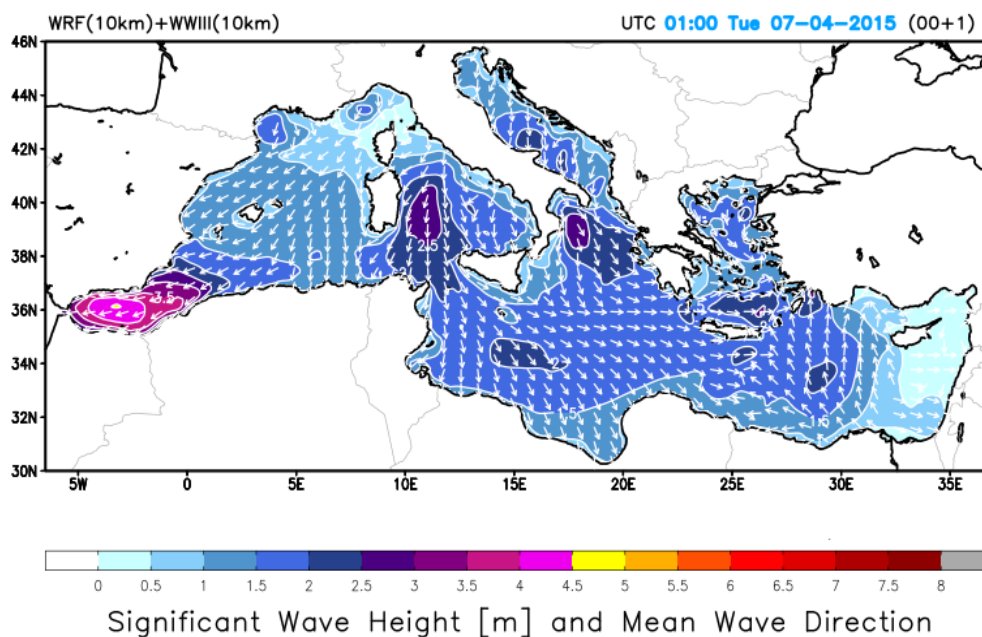


Fig. 3.1 – Dominio del modello di generazione tipo Wavewatch III per l'area del Mediterraneo

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 8 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Le condizioni iniziali e al contorno per le simulazioni atmosferiche con il modello WRF sono state ricavate dal database del CFSR che fornisce i dati con una risoluzione orizzontale di $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, su 37 livelli di pressione.

Il modello WAVEWATCH III™ (Tolman, 1997, 1999, 2009) utilizzato per la generazione del moto ondoso è un modello di terza generazione sviluppato al NOAA / NCEP sulla base del modello WAM (WAMDI Group, 1988, Komen et al., 1994). Si tratta di un ulteriore sviluppo del modello WAVEWATCH, sviluppato presso la Delft University of Technology (Tolman, 1989, 1991) e WAVEWATCH II, sviluppato alla NASA, Goddard Space Flight Center (Tolman, 1992). WAVEWATCH III™, però, si differenzia dai suoi predecessori in molti punti importanti, come le equazioni che governano la fisica, la struttura del modello, i metodi numerici e le parametrizzazioni fisiche. Inoltre, con il modello versione 3.14, WAVEWATCH III™ si sta evolvendo da un modello d'onda in un quadro generale di modellazione, che permette un facile sviluppo di approcci fisici e numerici aggiuntivi per la modellazione d'onda.

I dati di moto ondoso richiesti e forniti dall'Università di Genova si riferiscono ai due punti più prossimi alla costa del Friuli-Venezia Giulia, identificati dai codici 13_UNIGE e 6_UNIGE in Fig. 3.2. Nella medesima figura è indicata anche la posizione della boa multiparametrica dell'Istituto di Biologia Marina di Pirano (<http://www.nib.si/mbp/si/>) che è stata utilizzata per tarare il modello, confrontando i risultati della propagazione con i dati misurati in un caso reale (tempesta Vaia di ottobre 2018).

Il punto 13_UNIGE ha coordinate 13.4547°E , 45.57°N e si trova lungo l'allineamento tra Punta Salvore e la città di Grado, su un fondale di circa 20 m. Il punto 6_UNIGE ha coordinate 13.582°E , 45.66°N e si trova all'interno del Golfo, a circa 8 km a Sud di Punta Sdobba (Foce Isonzo), anch'esso su un fondale di circa 20 m.

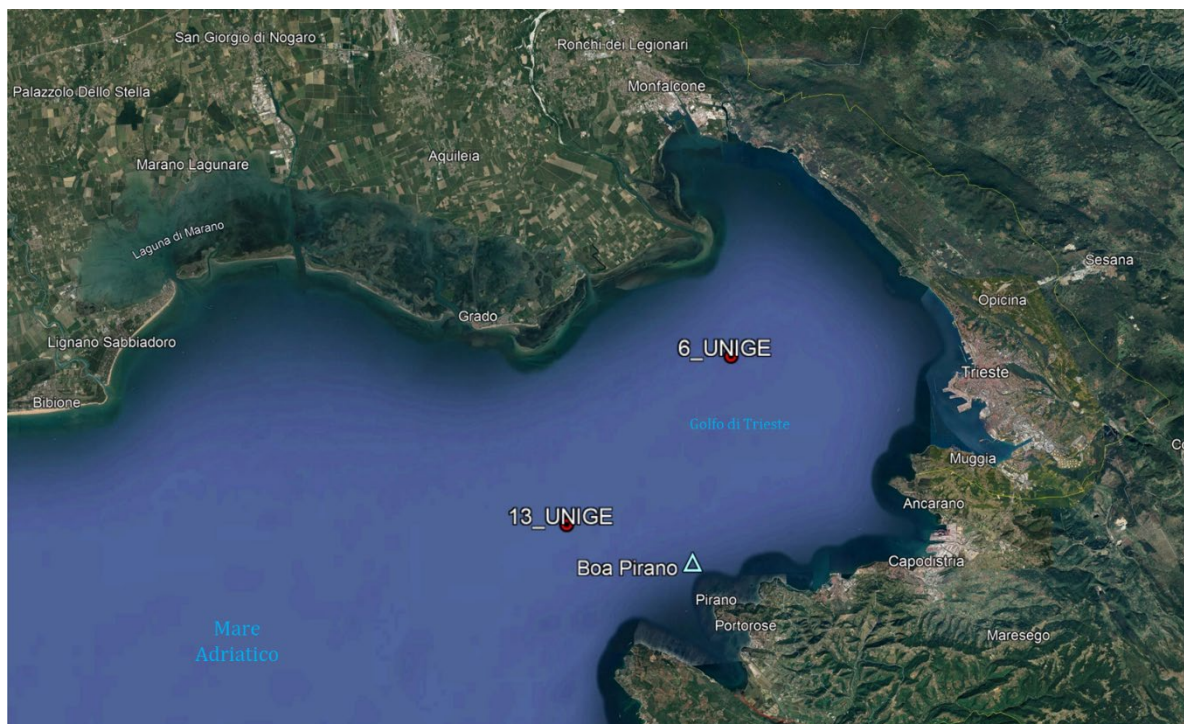


Fig. 3.2 – Posizione dei punti UNIGE e della Boa di Pirano nel Golfo di Trieste

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 9 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Le condizioni di moto ondoso fornite per i 2 punti appena descritti nell'intervallo di tempo che va dal 1979 al 2020 sono rappresentate dalle serie orarie di altezza significativa (H_s), periodo medio e di picco (T_m , T_p), direzione media e di picco (Dir_m , Dir_p), directional spreading, lunghezza d'onda media e di picco (L_m , L_p), componenti della velocità del vento a 10 m dalla superficie (u_w , v_w).

La serie temporale delle altezze d'onda significativa del punto 13_UNIGE è riportata in Fig. 3.3 e rappresenta la sequenza di onde che sono state effettivamente propagate verso le coste del Friuli-Venezia Giulia. Dalla figura emerge che nell'ultimo decennio sono concentrate 3 delle 4 mareggiate con onde superiori ai 4 m: a febbraio 2012 e febbraio 2015 con onde di Bora, ad ottobre 2018 con onde di Scirocco. L'elaborazione dei dati meteomarini ha consentito di definire da un punto di vista statistico il clima ondoso in corrispondenza del punto 13_UNIGE.

In Fig. 3.4 sono riportate alcune elaborazioni di sintesi del clima, che corrispondono rispettivamente alla rosa delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde). Da queste elaborazioni, si nota come i settori con le maggiori frequenze ed energie sono quelli di Bora e Mezzogiorno. Le altezze massime si registrano invece per il settore di Bora (4.5 m a $65^\circ N$) e Scirocco (circa 4.2 m a 165 e $175^\circ N$).

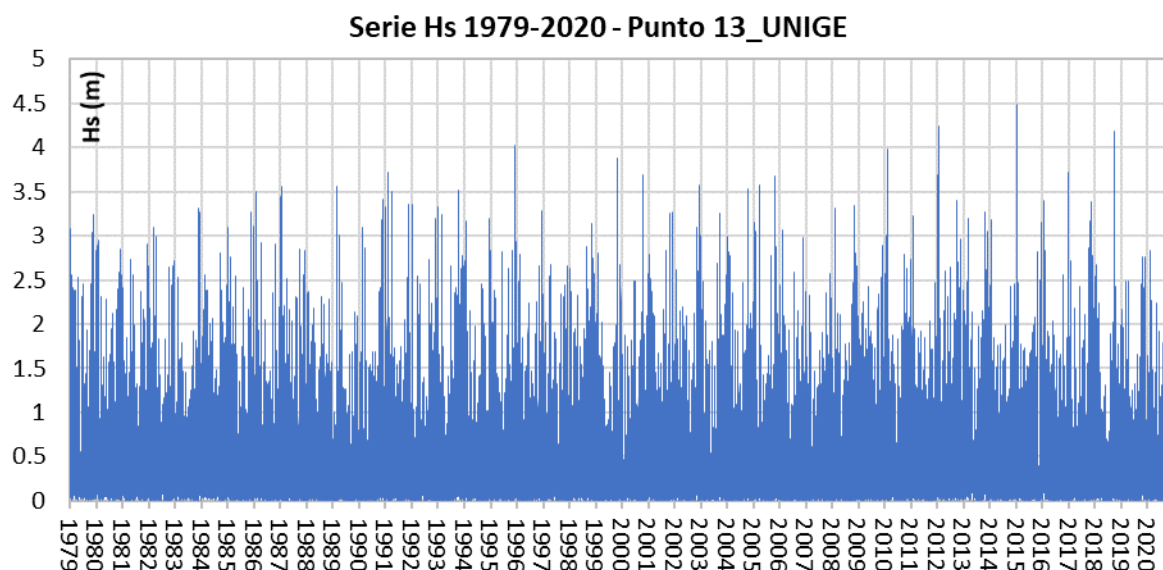


Fig. 3.3 – Serie oraria delle altezze H_s nel punto 13_UNIGE nel periodo 1979-2020

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 10 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

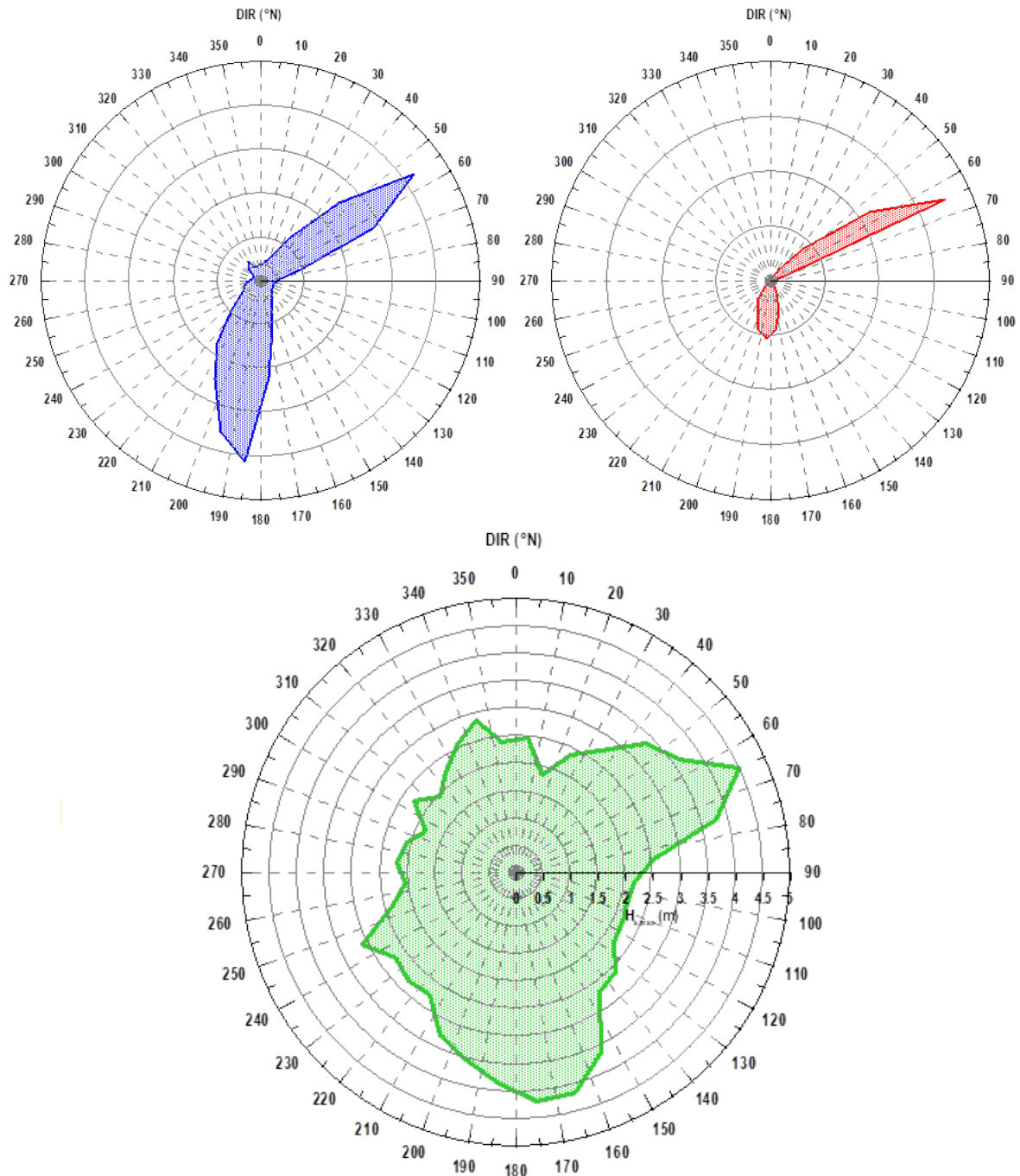


Fig. 3.4 – Rosa delle registrazioni (in blu), delle energie (rosso) e delle altezze massime (verde) nel punto 13_UNIGE

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 11 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

3.2 Dati anemologici nel Golfo di Trieste

Oltre alle caratteristiche del moto ondoso sono stati richiesti all'Università di Genova i dati di vento del punto 6_UNIGE (vedi precedente Fig. 3.2) che, trovandosi all'interno del Golfo di Trieste, è stato ritenuto maggiormente significativo per essere associato alla propagazione del clima ondoso all'interno del Golfo stesso (generazione da vento).

In Fig. 3.5 è rappresentata la rosa dei venti del punto in esame, da cui si evince che il vento prevalente è quello proveniente dal settore di Bora (in particolare lungo la direzione 75°N). La serie delle "registrazioni" dell'intensità del vento nel periodo 1979-2020, ovvero la sequenza di dati anemometrici effettivamente utilizzata nelle propagazioni, è invece rappresentata in Fig. 3.6.

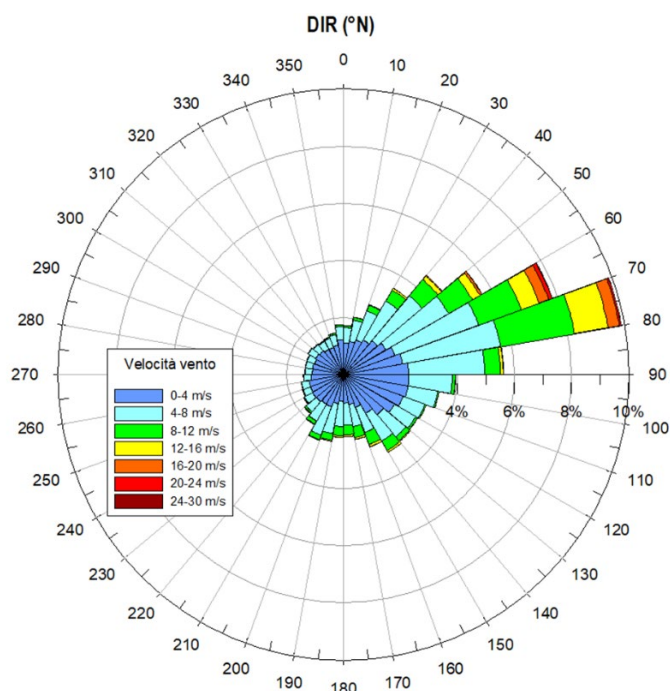


Fig. 3.5 – Rosa dei venti del punto 6_UNIGE

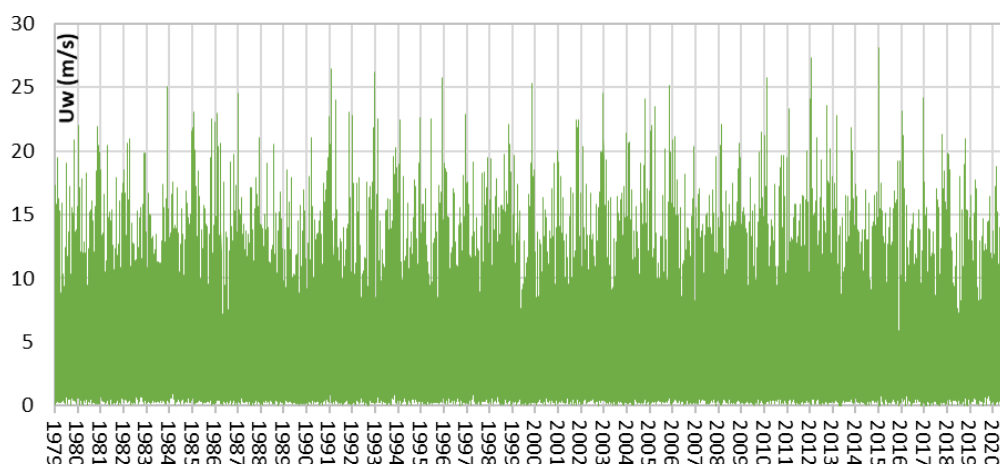


Fig. 3.6 – Serie delle velocità del vento nel punto 6_UNIGE nel periodo 1979-2020

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 12 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

3.3 Livelli di marea

I dati di marea utilizzati per descrivere le variazioni di livello all'interno del Golfo di Trieste sono stati reperiti presso ISPRA e scaricati dal sito www.venezia.isprambiente.it. Essi si riferiscono al mareografo di Venezia-Punta della Salute, di cui l'Istituto mette a disposizione i dati validati a partire dal 1924. La serie risulta essere tra le più complete del Nord Adriatico (i primi dati risalgono alla fine dell'Ottocento) e viene costantemente aggiornata e validata a cura dell'ente stesso.

Per ricostruire la serie completa dal gennaio 1979 al dicembre 2020 sono stati assemblati i dataset annuali reperibili dal sito ed è stata applicata una traslazione altimetrica di -23.5 cm per passare dal sistema di riferimento ZMPS (Venezia 1897) al sistema IGM della rete nazionale italiana (Genova 1942). I dati sono stati traslati anche temporalmente all'indietro di 1 ora, quantità all'incirca corrispondente al ritardo di propagazione tra il mare aperto e la posizione della stazione all'interno della Laguna di Venezia.

Dal 01/01/1979 al 01/01/1989 i dati disponibili sono rappresentati dagli estremali (massimi e minimi) di marea, con un passo temporale non costante e prossimo alle 6 ore. La ricostruzione della serie oraria in questo intervallo di tempo è avvenuta per interpolazione lineare tra il valore degli estremali.

Dal 01/01/1989 al 01/01/1993 i dati sono registrati a passo orario mentre successivamente al 1993 essi hanno una frequenza di un dato ogni 10 minuti.

In Fig. 3.7 è rappresentata la serie della marea, opportunamente elaborata, a Venezia-Punta della Salute nel periodo 1979-2020, con dati a passo orario. Il livello minimo è stato registrato il 06/02/1989 ed è pari a -1.115 m s.m.m. mentre il livello massimo è quello del 12/11/2019, pari a 1.615 m s.m.m..

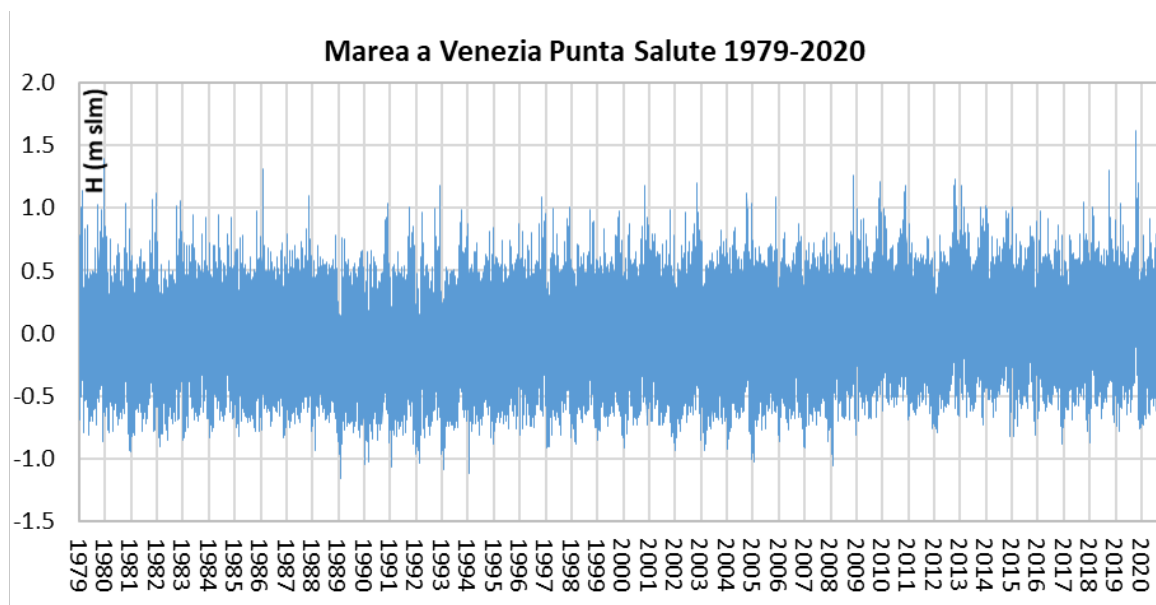


Fig. 3.7 – Serie della marea a Venezia Punta Salute nel periodo 1979-2020

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 13 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

4 PROPAGAZIONE DEL CLIMA ONDOSO SOTTO COSTA

4.1 Definizione della griglia di calcolo

La propagazione sotto costa della serie storica delle mareggiate sulla base dei dati DICCA (inclusa la generazione da vento) all'interno del Golfo di Trieste è stata condotta con il modello spettrale SWAN, descritto in appendice (cfr. paragrafo 9).

La griglia di calcolo del modello SWAN utilizzata per la propagazione del clima ondoso dal largo verso la costa del Friuli-Venezia Giulia è rappresentata in Fig. 4.1. La griglia è di tipo strutturato a maglia quadrata con lato a passo costante pari a 200 m; il reticolo è formato da 14305 nodi e 27884 celle e copre una superficie di circa 570 km². Lato mare la griglia si chiude lungo l'allineamento tra Punta Salvore e Grado, mentre lungo le coste essa si estende fino alla linea di costa. In questo modo il punto 13_UNIGE, per il quale si ha a disposizione la serie del clima ondoso, viene a cadere lungo il bordo offshore della griglia stessa, che si trova a circa 25 km dalla costa triestina. La scelta del passo della griglia deriva da una analisi di sensibilità volta a stabilire il miglior compromesso tra l'accuratezza dei risultati e l'onere computazionale richiesto dal calcolo.

La batimetria implementata nel modello è rappresentata nella successiva Fig. 4.2; dalla figura si evince che buona parte del Golfo è caratterizzato da quote batimetriche dell'ordine di -20 m s.m.m., con fondali a modesta acclività verso le coste di Grado e Monfalcone e, al contrario, pendenze molto più acclivi lungo le coste della penisola Istriana.



Fig. 4.1 – Griglia di calcolo del modello SWAN

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 14 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

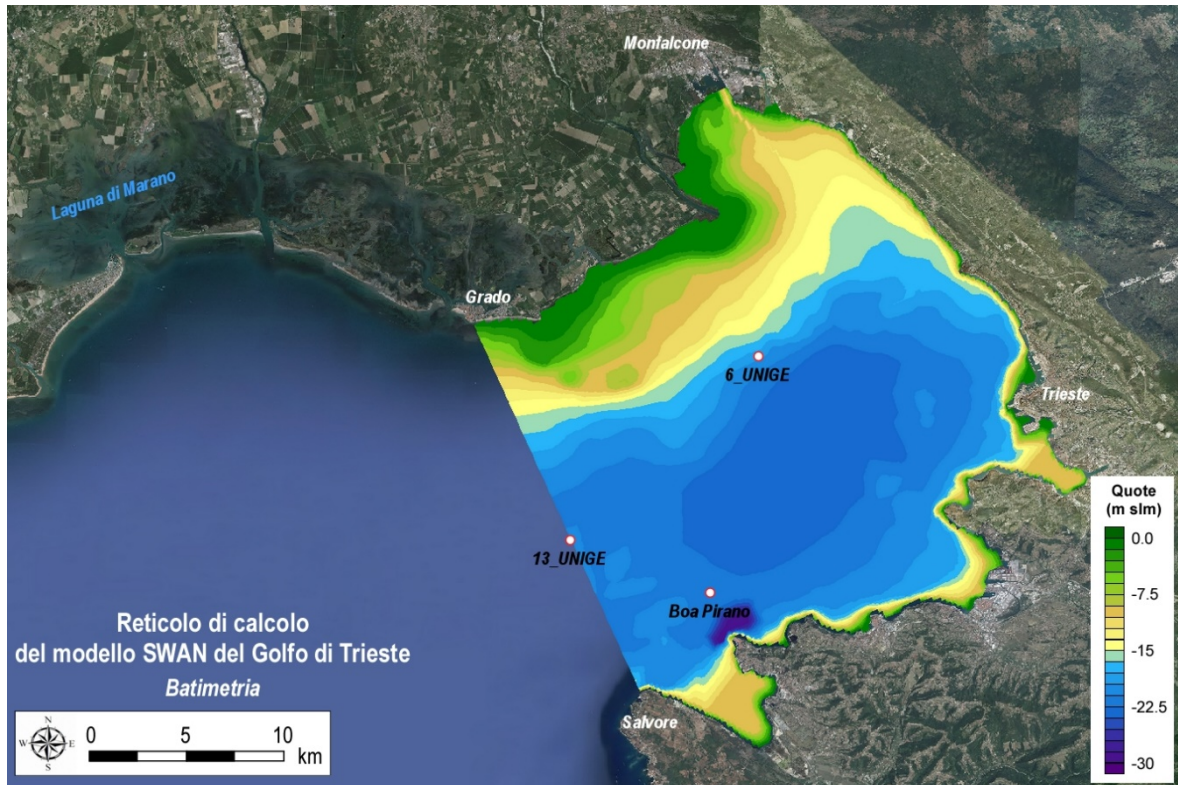


Fig. 4.2 – Batimetria del modello SWAN

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 15 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

4.2 Settaggio del modello

La simulazione della propagazione del clima ondoso con il modello SWAN, come già accennato, è avvenuta utilizzando come dati di input la serie oraria delle onde registrate nel punto 13_UNIGE (H_s , T_p , Dir_p e dir. spreading) applicate lungo il bordo in mare aperto del dominio di calcolo. Sulla griglia sono stati applicati, in modo uniforme, sia il vento registrato nel punto 6_UNIGE che i livelli di marea, con le rispettive serie orarie.

Per determinare la modalità di calcolo ottimale del modello, utilizzato nella versione SWAN 41.31AB, sono state condotte inizialmente una serie di simulazioni preliminari di "taratura". In particolare, sono state testate le modalità operative di simulazione "quasi stazionaria", "quasi non-stazionaria" e "non stazionaria". La scelta è ricaduta sulla modalità "non stazionaria", nella quale si descrive l'evoluzione nel tempo dei campi d'onda considerando all'interno dell'equazione di bilancio dell'azione d'onda anche il termine legato al tempo dN/dt (cfr. descrizione del codice di calcolo in appendice; par. 6).

Questa scelta ha comportato anche di dover determinare il passo ottimale di calcolo ed il numero di iterazioni necessarie per portare a termine ciascuno step di calcolo successivo. Anche in questo caso, come per la griglia di calcolo, è stato operato un compromesso tra l'accuratezza dei risultati e l'onere computazionale richiesto: il Δt di calcolo è assunto pari a 60 minuti mentre il numero massimo di iterazioni è pari a 4. La discretizzazione dello spettro del moto ondoso è di 36 settori nel dominio delle direzioni (settori da 10°) e di 48 bins nel dominio delle frequenze. La frequenza minima è stata assunta pari a 0.05 s^{-1} mentre quella massima è pari a 1 s^{-1} .

Lo spettro utilizzato per le onde è di tipo Jonswap con coefficiente di appuntamento di 3.3. I processi fisici attivati includono: processo generativo di 3^a generazione, frangimento per interazione col fondo (Battjes & Janssen, 1978), attrito sul fondo (Jonswap, 1973), whitecapping (Komen, 1984), rifrazione e shift in frequenza, quadruplette, generazione da vento, interazioni triadi non lineari (Eldeberky & Battjes, 1996). Lo schema numerico adottato è il BSBT (*backward space backward time*), consigliato nel caso di simulazioni non stazionarie.

Nella modellazione sono state inserite anche le dighe foranee del Porto di Trieste, modellate come ostacoli a quota costante pari a 2 m ed utilizzando per il coefficiente di trasmissione la formulazione di Goda et al. (1967); non è stata considerata la diffrazione.

I risultati sull'intera griglia di calcolo sono stati salvati a passo orario scegliendo come variabili di output le coordinate dei punti della griglia, l'altezza d'onda significativa, il periodo di picco, la direzione d'onda e il directional spreading.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 16 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

5 CLIMA ONDOSO SOTTO COSTA

Le simulazioni, descritte nel precedente paragrafo 4, hanno consentito di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo, **rendendo pertanto possibile estrarre la serie di dati di moto ondoso in un qualsiasi punto sotto costa.**

Per supportare la progettazione dell'area interessata dagli interventi, si è quindi proceduto con l'estrazione della serie di dati in un punto sotto costa (denominato punto P); **il punto P si trova a circa 700 m da costa su un fondale di circa -15 m s.m.m., in corrispondenza del punto di coordinate (2421740 E, 5059735 N) in posizione grossomodo baricentrica rispetto al tratto lineare di Barcola.** Le coordinate del punto di output del clima locale sono espresse nel sistema di riferimento Gauss Boaga Fuso Est.

Il clima locale è stato quindi ricostruito ordinando i risultati delle simulazioni per classi di altezza significativa e di direzione locale di provenienza (vedi successiva Tab. 5.1).

Di seguito, in Fig. 5.2, si riportano graficamente i risultati delle elaborazioni del clima locale; in particolare, sono rappresentate le rose delle registrazioni (in blu), delle energie (in rosso) e delle altezze massime (in verde). **Si può notare come gli eventi con percentuale di apparizione più elevata appartengano al settore di Libeccio (235°N); anche gli eventi caratterizzati da maggiore energia sono quelli compresi nel settore di Libeccio. Le mareggiate caratterizzate dai valori massimi di altezza significativa sono anch'esse provenienti da Libeccio (225°N): per queste mareggiate si raggiungono valori massimi di H_s di circa 2.3 m.** Per gli altri settori i valori massimi di altezza significativa sono invece nettamente inferiori.

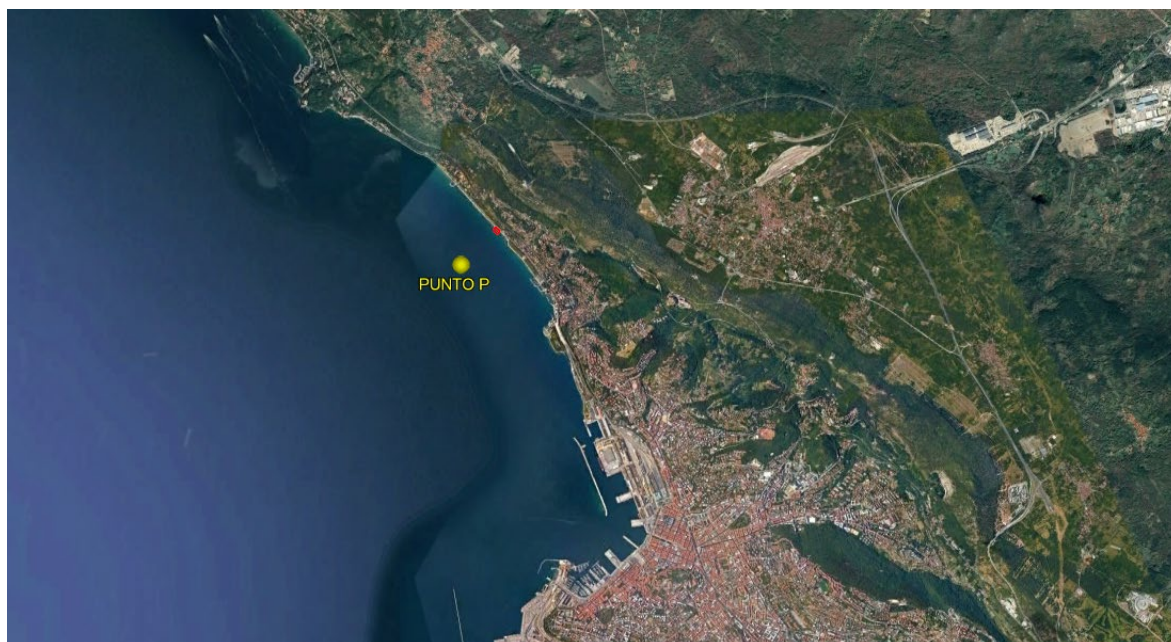


Fig. 5.1 – Ubicazione del punto di output del clima locale (punto P)

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 17 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

		Hs (m)				
DIR		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
(°N)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0	10	1703	0	0	0	0
10	20	2335	0	0	0	0
20	30	3138	0	0	0	0
30	40	4033	0	0	0	0
40	50	5069	1	0	0	0
50	60	6619	6	0	0	0
60	70	7831	38	0	0	0
70	80	13336	308	0	0	0
80	90	17795	50	0	0	0
90	100	9949	1	0	0	0
100	110	6308	1	0	0	0
110	120	4189	0	0	0	0
120	130	2929	0	0	0	0
130	140	2364	3	0	0	0
140	150	2267	5	0	0	0
150	160	2667	9	0	0	0
160	170	3109	53	0	0	0
170	180	7187	155	0	0	0
180	190	12463	536	9	0	0
190	200	15889	1508	138	2	0
200	210	17417	2735	255	9	0
210	220	21100	3868	623	40	0
220	230	29932	3484	700	109	9
230	240	48905	2890	485	101	1
240	250	30147	923	56	8	1
250	260	16009	193	21	5	0
260	270	11475	97	8	0	0
270	280	9794	79	6	0	0
280	290	9289	41	2	0	0
290	300	8856	41	0	0	0
300	310	6563	27	0	0	0
310	320	2671	4	0	0	0
320	330	1399	1	0	0	0
330	340	1180	3	0	0	0
340	350	1198	0	0	0	0
350	360	1421	0	0	0	0

Tab. 5.1 – RegISTRAZIONI ordinate per altezza significativa e direzione di provenienza (in parti per 368'184) - Punto locale P

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 18 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

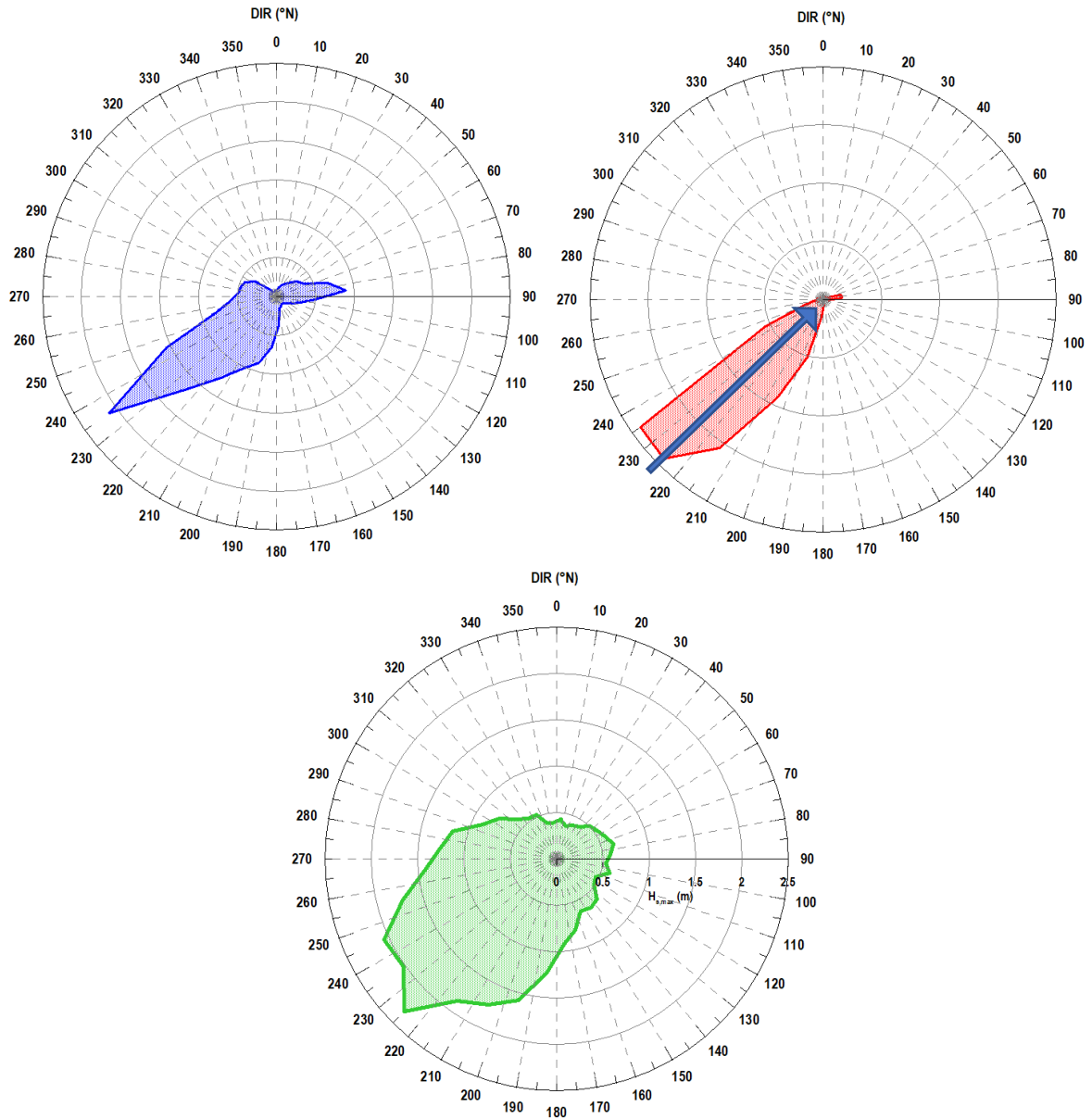


Fig. 5.2 – Rosa delle registrazioni (in blu), delle energie (rosso) e delle altezze massime (verde) nel punto P

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 19 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

5.1 Analisi statistica degli estremi

Per l'elaborazione degli eventi estremi si è fatto riferimento alla serie dei dati di moto ondoso propagata dal largo verso costa (nel punto P), che copre un periodo di oltre 40 anni (da gennaio 1979 a dicembre 2020). Di seguito in Tab. 5.2 vengono riportati gli eventi massimi annuali ricavati dalla serie di dati propagati nel punto P; si osserva che tutti gli eventi provengono dal settore di Libeccio con direzioni comprese tra 200° e 250°N. Nella successiva Fig. 5.4 si riporta graficamente la distribuzione degli eventi massimi annuali individuati in funzione della direzione di provenienza; nella rosa (con linea continua) è rappresentato anche l'involuppo dei valori massimi.

Utilizzando le altezze significative massime relative a ciascun anno di osservazione, è stata condotta una statistica degli eventi estremi nel punto P per il periodo da gennaio 1979 a dicembre 2020. Considerando che tutti gli eventi provengono dal medesimo settore (Libeccio), è stata eseguita un'analisi omnidirezionale. L'analisi statistica è stata condotta utilizzando il metodo di Gumbel; in Fig. 5.5 sono riportati i risultati delle elaborazioni. Al fine di associare a ciascun evento estremo (caratterizzato da una determinata altezza d'onda significativa) il corrispondente periodo di picco T_P , è stata eseguita un'analisi della correlazione tra periodo e altezza significativa, con riferimento a tutta la serie di dati trasposta nel punto P. È stata quindi ricavata una curva di interpolazione dei dati di altezza d'onda in funzione del periodo ($H_S - T_P$), del tipo $T_P = A+B \cdot H_S^{0.5}$ (Fig. 5.6). Nella successiva Tab. 5.3 si riportano i valori di altezza significativa ricavati dall'analisi statistica degli eventi estremi in funzione del tempo di ritorno; utilizzando le correlazioni ricavate dall'interpolazione rappresentata in Fig. 5.6, è stato possibile associare a ciascun evento estremo il corrispondente T_P .

Per tempi di ritorno di 25 e 50 anni (comunemente impiegati per il dimensionamento di opere di protezione in scogliera, quali difese radenti e pennelli), l'altezza d'onda di progetto (significativa spettrale) è dell'ordine di 2.3÷2.4 m, con associato un periodo di picco di 6.5÷6.7 s. Per la testata delle opere distaccate che possono essere ipotizzate (cfr. Fig. 5.3) a partire da una profondità di -5.0 m s.m.m., l'altezza d'onda non risulta limitata dal fondale. Il margine di incertezza nel dato DICCA, utilizzato come condizione al contorno, può arrivare al 20% (Lira-Loarca et al., 2022); si suggerisce quindi di tenerne conto nei dimensionamenti.

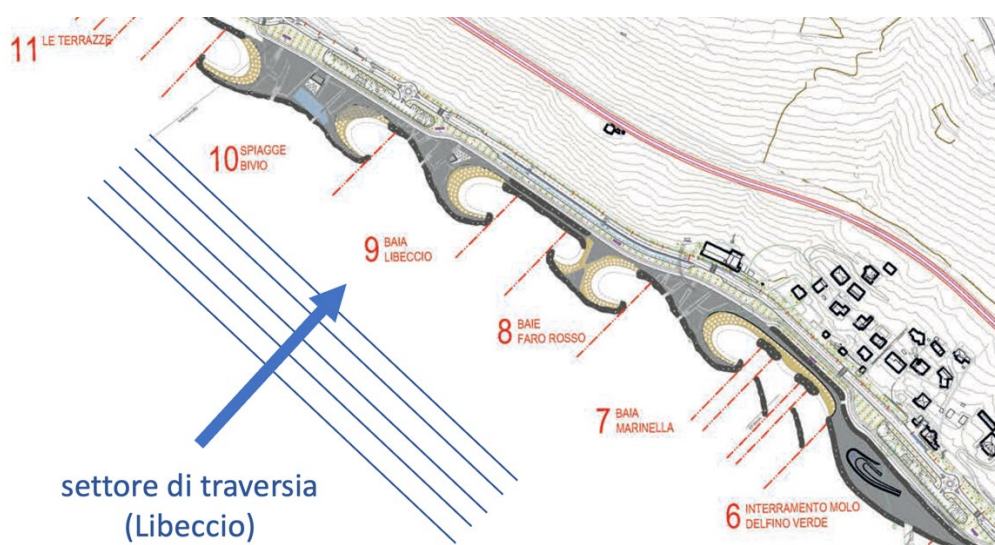


Fig. 5.3 – Schema di geometria delle onde di traversia su ipotetiche strutture distaccate

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 20 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Settore 0°-360°N						
Anno	Mese	Giorno	ora	Hs	Tp	DIR
1979	1	11	7	1.89	5.4	228.2
1980	2	1	5	1.83	5.1	222.3
1981	4	27	21	1.75	6.7	238.5
1982	10	14	8	1.77	5.2	223.0
1983	4	12	6	1.48	5.3	229.8
1984	9	23	21	1.99	5.6	228.2
1985	11	13	9	1.41	5.6	227.5
1986	12	20	0	1.72	6.0	251.5
1987	5	13	18	1.68	6.0	229.9
1988	9	2	15	1.51	5.0	227.5
1989	2	26	6	1.77	4.9	221.0
1990	11	3	10	1.98	6.1	233.8
1991	11	14	16	1.58	5.6	232.2
1992	9	1	6	1.98	6.0	232.2
1993	12	24	23	2.05	6.9	242.8
1994	9	15	19	2.02	6.2	231.9
1995	11	16	16	1.81	5.1	223.4
1996	11	20	11	1.79	5.4	232.4
1997	5	6	21	1.48	5.6	226.8
1998	1	19	11	1.67	5.2	224.6
1999	2	9	17	1.56	5.3	230.2
2000	7	11	14	1.79	5.1	226.3
2001	9	14	17	1.64	4.8	217.4
2002	10	18	0	1.66	5.6	231.8
2003	10	5	17	2.32	7.6	229.3
2004	10	16	17	1.44	5.3	238.9
2005	12	3	11	1.46	4.5	212.6
2006	12	9	10	1.46	4.4	214.4
2007	1	24	11	1.45	5.2	229.7
2008	10	30	4	1.80	5.6	231.3
2009	12	23	6	1.47	4.5	216.0
2010	11	8	18	1.59	5.6	230.9
2011	12	16	18	1.87	6.4	231.5
2012	6	12	21	1.88	6.0	236.6
2013	3	19	0	1.74	5.9	240.4
2014	2	9	11	1.62	4.8	227.9
2015	9	14	11	1.08	4.1	209.3
2016	1	11	16	2.12	5.6	227.1
2017	12	12	0	2.03	5.2	220.4
2018	10	29	22	1.58	4.4	199.9
2019	11	5	8	1.58	5.1	224.7
2020	12	28	12	1.59	8.1	213.1

Tab. 5.2 – Massimi annuali – Statistica omnidirezionale nel punto P

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 21 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

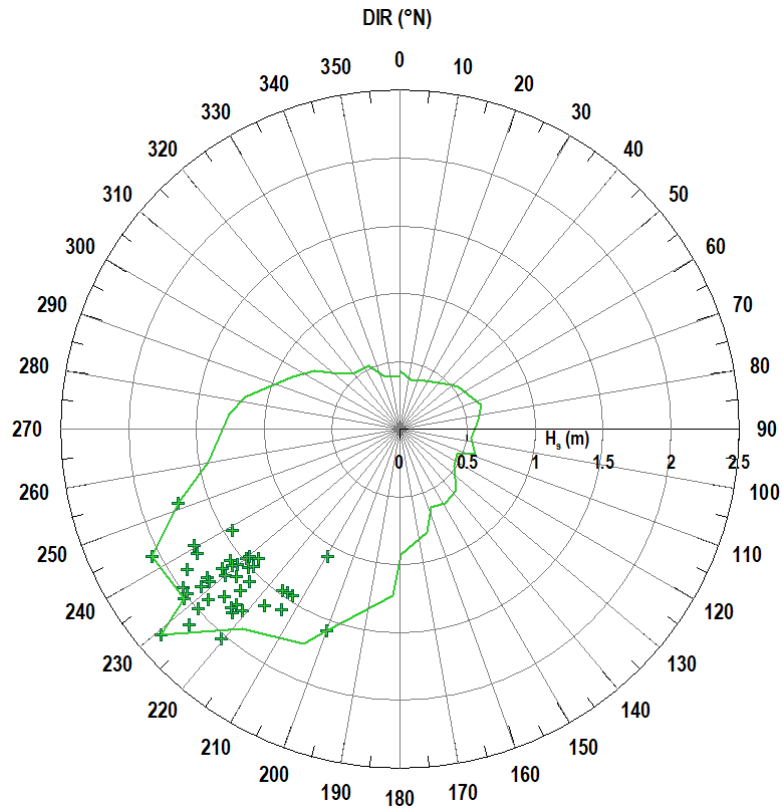


Fig. 5.4 – Distribuzione dei massimi annui considerati nell’analisi di Gumbel Statistica omnidirezionale nel punto P

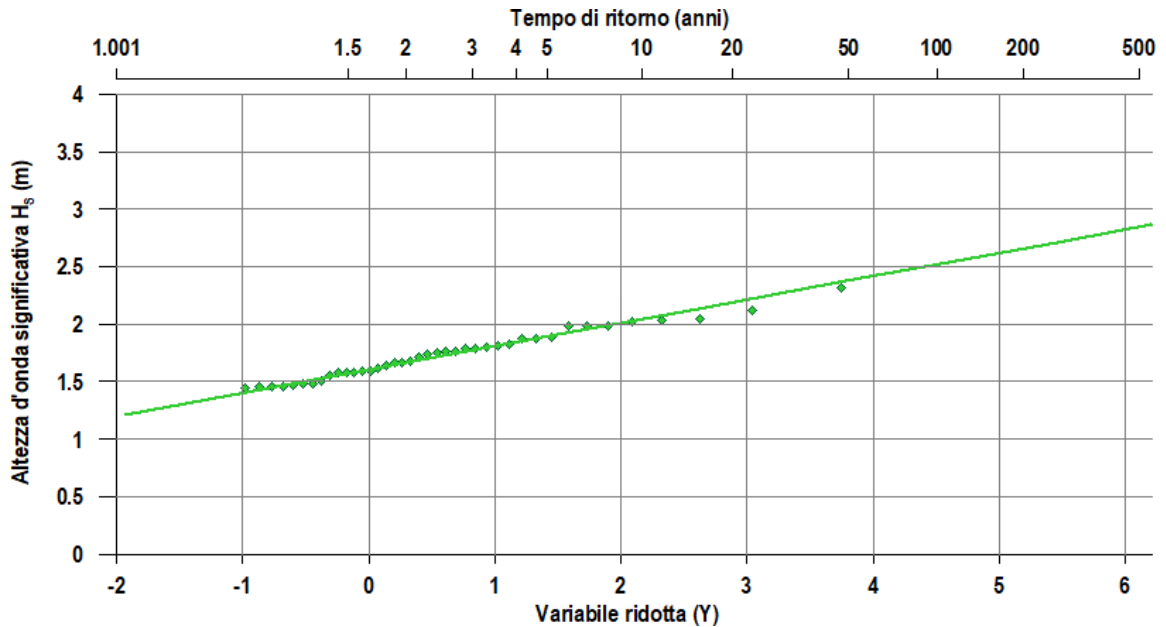


Fig. 5.5 – Elaborazione statistica degli eventi estremi (metodo di Gumbel) Statistica omnidirezionale nel punto P

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 22 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

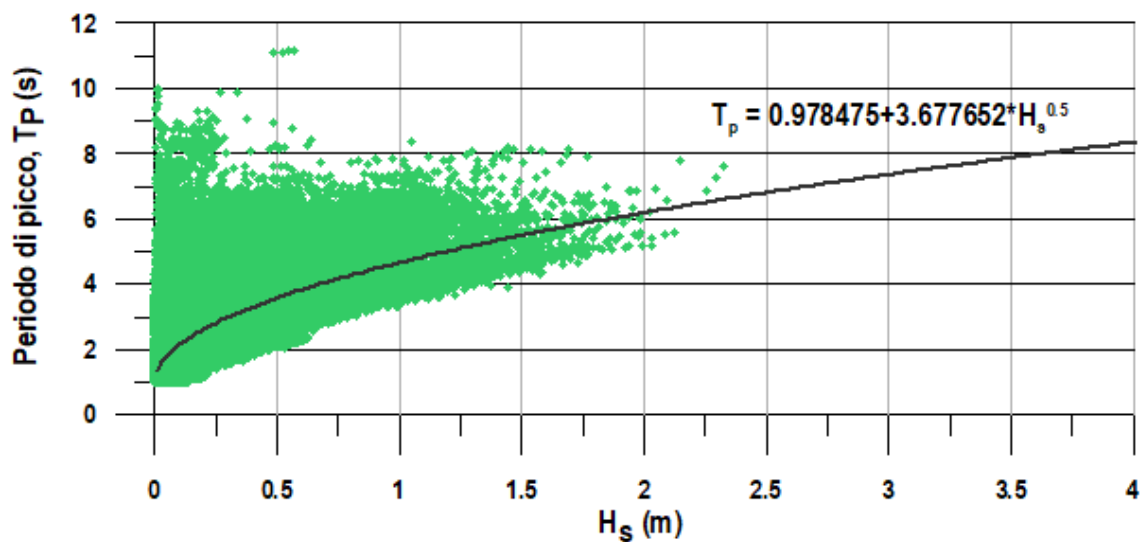


Fig. 5.6 – Correlazione altezza-periodi – Statistica omnidirezionale nel punto P

	STATISTICA OMNIDIREZIONALE	
TR (anni)	H_s (m)	T_p (s)
5	1.91	6.1
10	2.06	6.3
25	2.25	6.5
50	2.40	6.7
100	2.54	6.8

Tab. 5.3 – Risultati statistica degli estremi individuati per alcuni tempi di ritorno
Statistica omnidirezionale nel punto P

6 CIRCOLAZIONE DELLE ACQUE LUNGO LA FASCIA COSTIERA

6.1 La circolazione nel Golfo di Trieste

La circolazione delle acque nell'Alto Adriatico dipende principalmente dalle correnti di marea, ma è anche influenzata dalle correnti di gradiente, generate dalle condizioni termoline delle masse d'acqua di diversa origine presenti nel bacino, e da quelle di deriva innescate dall'azione dei venti.

Schematicamente, la circolazione ha un andamento antiorario, con un ramo ascendente lungo la costa orientale, caratterizzato da acque relativamente più salate, ed uno discendente lungo la costa occidentale, con acque più dolci e generalmente più leggere. Le velocità di corrente più elevate si manifestano in estate ed inverno, quando i gradienti di densità sono più elevati, determinando una generale prevalenza del flusso montante (orientale) in inverno, e quello discendente (occidentale) in estate (Colantoni et al., 1985).

Nel Golfo di Trieste la circolazione marina è caratterizzata dalla presenza di 2 strati: uno più superficiale fino a 5 m di profondità, altro più profondo (Stravisi e Battista, 1992). Quello di fondo si muove in senso antiorario con correnti deboli, dell'ordine di 5 cm/s circa. Lo strato superficiale è molto influenzato dal vento: il movimento avviene in senso orario in occasione di venti occidentali (brezze di mare), con velocità di 10 cm/s circa. Per effetto di venti orientali di debole intensità (brezze di terra) la velocità si riduce; in occasione, invece, dei venti orientali più intensi, il senso della circolazione si inverte. Infatti, allo spirare della Bora l'acqua del Golfo tende a circolare in senso antiorario su tutta la colonna, dalla superficie al fondo, e con velocità crescente in funzione della velocità del vento (Stravisi e Battista, 1992).

In generale, sottocosta le correnti sono modificate da una componente che tende a far fluire l'acqua parallelamente alla costa stessa, anche se non mancano locali complicazioni dovute alla morfologia costiera e alle opere portuali. A questo proposito Mosetti (1972) sottolinea l'importanza dell'influenza del vento nella circolazione delle acque nel Golfo, accorpando i venti in 2 gruppi:

- i venti provenienti dal 1° Quadrante (NNE, NE, ENE, E) determinano l'uscita delle acque dal Golfo (almeno in superficie). Fra questi il più importante è la Bora (da ENE) che provoca l'allontanamento, verso W o NW, delle acque superficiali. Ciò determina il conseguente richiamo di acque profonde esterne orientali e quindi, considerate le basse profondità e la generale omogeneità morfologica, contribuisce al ricambio di tutta la massa d'acqua presente nel golfo;
- tutti i restanti venti (del 11°, III° e IV° Quadrante) spostano l'acqua verso la costa.

In occasione dei venti Nord-orientali il ricambio delle acque può avvenire anche in tempi molto brevi (un giorno), mentre per i venti sciroccali il ricambio è molto più lento, della durata di diversi giorni.

Comunque, morfologie locali e lo stesso sommarsi di correnti di diversa origine, fanno sì che il movimento complessivo risulti nella realtà spesso estremamente complicato e variabile, tanto da non rendere facili le applicazioni delle regole generali. Inoltre, altri fattori possono influenzare drasticamente la circolazione delle acque come gli apporti delle acque dolci fluviali dell'Isonzo e, in misura molto più limitata, del Timavo. Infatti, in concomitanza delle maggiori piene del fiume Isonzo l'andamento della circolazione generale del golfo viene stravolto.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 24 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

6.2 La circolazione lungo il litorale di Barcola

Rilievi mediante croci di deriva sono stati eseguiti in prossimità della discarica di Barcola-Bovedo nell'arco di 3 giorni nell'Agosto 1992, in condizioni meteomarine diverse: in assenza di vento, con vento di Bora, con vento di Libeccio (Colizza et al., 1996). E ciò per verificare le misure fatte dall'Italposte nell'aprile 1989 che indicano che la corrente profonda (2,2 m dal fondo) si muove parallelamente alla costa, mentre la corrente superficiale (a -1 m di profondità) si dirige al largo, influenzata dalle condizioni climatiche.

E' risultato che in assenza di vento o in condizioni di vento di Bora le acque superficiali circolano da NW a SE con velocità medie di 7 cm/s. Il vento di Libeccio, invece, determina lo spostamento verso riva delle acque superficiali, anche se soggette alla componente di deriva in direzione NW; la velocità della corrente è piuttosto variabile a causa della irregolarità del vento e del moto ondoso incidente sulla costa.

In generale, gli andamenti della corrente sono costanti alla profondità di 1 m, nonostante le diverse condizioni meteomarine delle tre giornate, in direzione NW, parallelamente alla costa, con velocità pressoché costante di 8,5 cm/s, in condizioni di quiete, e leggermente inferiore, 6,0 cm/s in presenza di vento.

La corrente più profonda, misurata a 5 m di profondità con valori di velocità molto bassi (1-2 cm/s), in situazione di calma di vento tende ad allontanarsi dalla costa in direzione NW. In presenza dei venti di Bora e Libeccio la corrente tende ad avvicinarsi alla costa.

Quindi, le caratteristiche delle correnti marine rilevate nel 1992 in corrispondenza della discarica di Barcola-Bovedo possono essere così sintetizzate:

- le correnti, per quanto riguarda gli strati più profondi, sono influenzate dai venti del 1° Quadrante per effetto del richiamo di acque profonde, in risposta all'allontanamento delle acque superficiali che, solamente più al largo, risentono in maniera diretta dell'azione del vento;
- le correnti sono influenzate dai venti del III° Quadrante, sia in superficie per azione diretta del vento, sia in profondità dove si registra l'inversione della direzione della corrente rispetto a quella registrata in condizioni di quiete.

Numerose altre misure di corrente superficiale sono state eseguite nel 1992 lungo la Costiera triestina nelle 3 stazioni di Barcola, Cedas e Miramare (nel Parco Marino sono state effettuate anche su tutta la colonna d'acqua) in diverse condizioni di vento (Stravisi e Battista, 1992). I rilievi hanno permesso di determinare l'andamento della circolazione delle acque nella zona anche in relazione alle condizioni di vento e di marea.

La sintesi dei risultati, in funzione del vento agente al momento del rilievo, è riportata nella Tab. 6.1. Il significato delle sigle è: n = numero di misure effettuate, v = velocità media vettoriale della corrente in cm/s, ϑ = direzione risultante della corrente.

I dati evidenziano che le correnti, allo spirare dei venti da E, scorrono verso NW allontanandosi dalla costa, con velocità che tendono ad aumentare da Barcola verso Miramare. I venti da W provocano una circolazione delle acque quasi verso SE parallelamente alla costa.

La sintesi grafica dei risultati, con le direzioni e le velocità delle correnti in funzione del vento al

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 25 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

momento dei rilievi, è riportata nella Fig. 6.1. La figura è integrata con i dati di Brambati (2000) ricavati da misure effettuate presso il Cedas, e svolte specificatamente per lo studio propedeutico alla progettazione dell'ampliamento di Barcola, di cui si fa cenno nell'immediato prosieguo.

Vento	BARCOLA			CEDAS			MIRAMARE		
	<i>n</i>	<i>v</i>	<i>g</i>	<i>n</i>	<i>v</i>	<i>g</i>	<i>n</i>	<i>v</i>	<i>g</i>
E	77	6.3	298°	75	7.4	296°	85	8.5	275°
W	81	2.7	150°	78	2.3	142°	81	7.9	137°

Tab.6.1 – Sintesi delle misure di corrente effettuate sul lungomare di Barcola da Stravisi e Battista (1992)

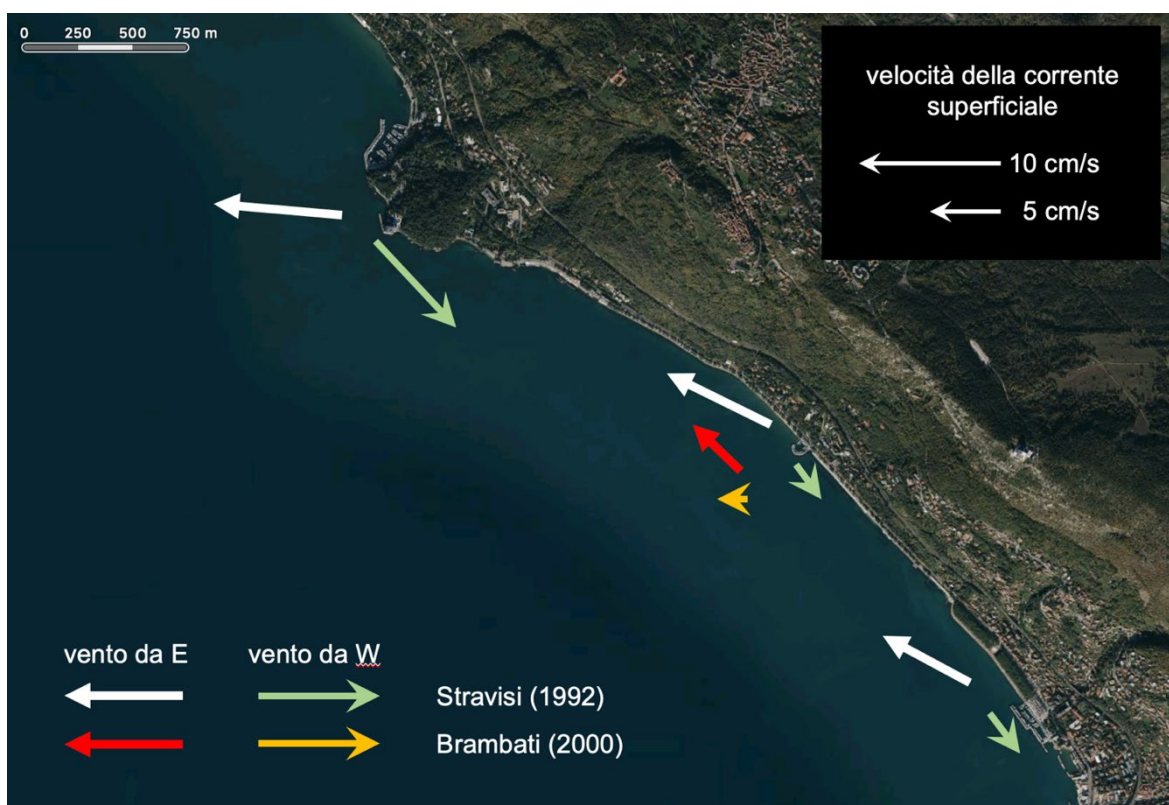


Fig. 6.1 – Schema di circolazione delle acque a causa del vento lungo il litorale di Barcola. I dati si riferiscono alle misure effettuate da Stravisi e Battista (1992) e Brambati (2000).

Le conclusioni più significative emerse dalle misure effettuate si possono riassumere come segue:

- La direzione prevalente di scorrimento è parallela alla linea di costa;
- La velocità media vettoriale in superficie presso la costa è di 2-3 cm/s verso W a Barcola e verso

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 26 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

WNW al Cedas, di 3 cm/s verso SW a Miramare.

- All'interno del Parco Marino, presso il Castello, la velocità media vettoriale è di 4 cm/s verso S nel primo metro di profondità, di 3 cm/s verso W nello strato sottostante sino al fondo.
- La corrente risulta correlata in maniera significativa con il vento. Infatti, anche se non mancano episodi caratterizzati da direzioni opposte, i venti orientali (brezze di terra e bora) producono correnti costiere superficiali di deriva medie vettoriali di 6-7 cm/s verso WNW a Barcola e al Cedas, di 9 cm/s verso W a Miramare; nel Parco Marino questi venti innescano correnti medie di 6-7 cm/s verso SW su tutta la colonna d'acqua. I venti occidentali (brezze di mare) determinano correnti costiere superficiali medie vettoriali di 2-3 cm/s verso SE a Barcola e al Cedas, di 8 cm/s verso SE a Miramare; nel Parco Marino producono correnti medie di 4 cm/s verso SSE nello strato superficiale di un metro, di 3 cm/s verso WNW nello strato sottostante sino al fondo.
- La corrente di marea astronomica superficiale costiera, tra Barcola e Miramare, è di 1 cm/s circa, e risulta pertanto difficilmente distinguibile nella circolazione generate.
- La velocità di scorrimento della corrente superficiale costiera, indipendentemente dalla sua direzione, aumenta in media da 7 cm/s a Barcola, 8 cm/s al Cedas a 14 cm/s a Miramare. Nel Parco Marino decresce con la profondità da 14 cm/s in superficie, a 8 cm/s a 16 m, con una media di 10 cm/s su tutta la colonna.

Nell'ambito dello studio effettuato da Brambati (2000) sono state effettuate 16 misure di corrente superficiale ricavate mediante l'impiego di croci di deriva nella parte centrale dell'area in esame (porticciolo di Cedas). In particolare, i rilievi sono stati eseguiti in 4 diverse giornate:

- il 21/8/1999 in condizioni di marea crescente con vento di Bora fino a 40 km/h;
- il 7/9/1999 in condizioni di marea crescente, con vento assente;
- il 10/9/1999 in condizioni di marea calante con vento da NNW fino a 10 km/h;
- il 17/9/1999 in condizioni di marea crescente con vento assente.

Nel primo giorno gli andamenti dei 4 lanci sono risultati piuttosto simili tra di loro, sia in termini di direzione che di velocità. Le velocità erano mediamente pari a 4 cm/s circa, con direzioni verso NW e, in pratica, parallele alla costa con una debole tendenza a portarsi verso il largo.

Nel secondo giorno, caratterizzato da condizioni di marea crescente e in assenza di vento, si è osservata nuovamente una discreta omogeneità nei percorsi dei 4 lanci. In questo caso la corrente si muoveva inizialmente verso WNW o W, per deviare poi in modo deciso verso SW; le velocità medie sono risultate dell'ordine di 1,5 cm/s.

Durante i rilievi del terzo giorno le croci dei primi 2 lanci hanno seguito una traiettoria di corrente che si sviluppava verso riva; la terza coppia di lanci, in presenza di vento da NNW, ha evidenziato una circolazione antioraria che si è esplicata in prossimità della riva, con un drastico cambio di direzione di 180° verso W. Le velocità medie sono dell'ordine di 1 cm/s.

Nell'ultimo giorno, in condizioni di assenza di vento e con marea crescente, l'andamento delle correnti rilevato è risultato subparallelo alla riva (direzione NW), con velocità medie di 1,5 cm/s.

In conclusione le misure effettuate in condizioni di marea crescente, in assenza di vento o con vento di Bora, hanno mostrato una corrente di andamento parallelo alla costa, di senso antiorario; le misure

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 27 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

effettuate sempre in condizioni di marea crescente, con venti del II° Quadrante, hanno mostrato una circolazione pressoché parallela alla costa orario o verso riva.

Come anticipato, il confronto di questi rilievi con quelli eseguiti da Stravisi (1992) è riportato in forma sintetica nella Fig. 6.1.

Ulteriori e conclusive informazioni sul regime delle correnti sono tratte dal Piano Regolatore del Porto di Trieste, PRPT (2014). Nel documento il tema è trattato attraverso simulazioni numeriche.

Per la trattazione modellistica l'analisi ha escluso l'azione del moto ondoso in quanto il Porto di Trieste, rispetto ad altre realtà portuali del Mediterraneo, ne è poco esposto. La particolare configurazione della costa limita, infatti, l'esposizione diretta al moto ondoso ad un settore non più ampio di 90°, compreso tra il 3° ed il 4° quadrante, dove il fetch geografico ha un'estensione che non supera le 70 miglia, con un valore medio di circa 30 miglia. Anche le onde da Scirocco (vento da Sud-Est), che nel Nord Adriatico sono in genere quelle più critiche per la stabilità delle opere, raggiungono il Porto di Trieste dopo aver subito una notevole attenuazione per rifrazione e diffrazione attorno all'Istria, determinando condizioni decisamente favorevoli per la funzionalità del porto.

Per la forzante marea è stata utilizzata una marea sinusoidale con periodo di 12 ore (semidiurno) ed escursione di 70 cm (± 35 cm s.l.m.m.), applicata al limite esterno del dominio di calcolo.

Per la forzante vento è stato deciso di non considerare le velocità massime dei venti caratteristici (es.: Bora), che producono forti correnti con una frequenza estremamente bassa, ma velocità che siano in grado di determinare un effetto che possa ripetersi con una frequenza significativa e, quindi, essere efficace come forzanti per un ricambio medio. Con riferimento alle condizioni anemometriche, considerando che le correnti indotte da vento diventano significative solo con velocità superiori a 5 m/s, si è ritenuto che gli scenari da considerare dovessero essere:

- vento da Nord-Est (Bora) con intensità di 8 m/s;
- vento da Sud-Est (Scirocco) con intensità di 6 m/s;
- vento da Nord-Ovest (Maestrale) con intensità di 6 m/s.

Per la forzante correnti marine, è stato possibile tener conto del fenomeno con il modello idrodinamico utilizzando la schematizzazione tridimensionale utilizzata che permette di riprodurre l'effetto del trascinarsi indotto dal vento sugli strati superficiali della colonna d'acqua. Le correnti nel Golfo di Trieste sono state studiate con modelli numerici e con misure dirette durante le campagne "Thalassia" (1951-1954) (Stravisi et al., 1981) e "Thalassia II" (1979-1984), oltre che alle misure eseguite lungo la costa triestina da Barcola a Miramare negli anni 1987 e 1988 e nelle acque della Riserva Marina di Miramare nel 1992 (Stravisi et al., 1992).

Dalle informazioni disponibili si ricava che le correnti marine nel Golfo di Trieste sono di debole intensità, e di norma inversamente proporzionali alla profondità del bacino; valori tipici per la velocità sono 10 cm/s nella parte centrale ed orientale e 40 cm/s sui bassifondi gradesi.

In generale, il Golfo di Trieste è influenzato dalle correnti che fluiscono verso Nord lungo la costa istriana inducendo una circolazione generale caratterizzata da un vortice ciclonico, che viene ogni giorno modulata dai venti locali (Querini et al., 2006).

Le correnti di marea sono poco efficienti al fine del ricambio nel Golfo, in quanto si limitano a spostare avanti e indietro di pochi chilometri, ogni sei ore, la stessa massa d'acqua con un effetto di trasporto complessivo trascurabile. La velocità della corrente di marea non supera i 2÷3 cm/s. E' stato, infatti,

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 28 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

calcolato per la corrente residua di marea una velocità di 1 cm/s, che corrisponde ad un ricambio totale dell'acqua del Golfo in circa 40 giorni.

Le correnti di maggiore interesse sono legate al vento: la brezza di mare produce una circolazione superficiale da Grado verso il Porto di Trieste; brezze di terra e venti orientali tendono invece a fermare e ad invertire questa circolazione. Lo strato di fondo (sotto i 13 m) è prevalentemente interessato da una debole corrente antioraria di origine meridionale (Stravisi, 2003).

Note le forzanti di cui sopra, nel PRPT (2014) sono stati adottati i seguenti scenari per la definizione delle caratteristiche di circolazione idrica:

- marea e calma di vento;
- marea + vento da Nord-Est;
- marea + vento da Nord-Ovest.
- marea + vento da Sud-Est;

Tutte le simulazioni idrodinamiche hanno avuto una durata di durata 5 giorni (10 cicli di marea), in modo tale di consentire il corretto l'avviamento del sistema. Le diverse condizioni di vento considerate sono state applicate uniformemente su tutto il dominio di calcolo per la durata di 24 h, nell'ultimo giorno di simulazione.

Qui di seguito viene riportata una sintesi dei risultati ottenuti, enfatizzando i dati in riferimento al lungomare di Barcola.

- marea e calma di vento

La marea considerata (± 35 cm s.l.m.m.) determina dei campi di velocità estremamente contenuti sia in fase di flusso che di riflusso. In assenza di vento, la circolazione è sostanzialmente monostrato, parallela alla costa, con valori di velocità della corrente molto bassi, quasi sempre al di sotto dei 2 cm/s. E' confermato che le sole correnti di marea non sono un motore di ricambio efficiente nell'area del Porto di Trieste.

- marea + vento da Nord-Est (Bora)

Rispetto allo scenario precedente è stata considerata come forzante aggiuntiva un vento da Nord-Est con intensità costante di 8 m/s, uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo per una durata pari a 24 ore. La presenza di questo campo di vento induce significative alterazioni al regime idrodinamico costiero generale: le velocità medie ed il sistema circolatorio costiero si modificano sostanzialmente rispetto all'andamento caratteristico dello scenario senza vento. Questo fatto non sorprende in quanto, come già riportato in precedenza, la circolazione idrodinamica nel Golfo di Trieste è fortemente influenzata dalle correnti di trascinamento dovute al vento.

Dall'analisi dei campi di moto medi sulla profondità, è possibile osservare una corrente parallela alla costa in direzione Nord-Nord Ovest, con intensità attorno a 2÷3 cm/s davanti a Barcola e di circa 5 cm/s davanti a Miramare.

- marea + vento da Nord-Ovest (Maestrale)

In questo scenario è stato considerato oltre alla marea anche un vento da Nord-Ovest con intensità costante di 6 m/s uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e della durata di 24 ore. Questo vento, rappresentativo delle brezze di mare che si presentano abbastanza frequentemente a Trieste ha, di fatto, un effetto modesto se si considera la distribuzione delle velocità mediate sulla

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 29 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

profondità. E' possibile osservare la formazione di una corrente lungo la linea di costa, con direzione parallela a quella del vento, sia in condizioni di flusso che di riflusso, con intensità di circa 5 cm/s davanti a Miramare e che raggiunge una velocità massima di 6÷7 cm/s davanti al terrapieno Barcola-Bovedo.

- marea + vento da Sud-Est (Scirocco)

In questo scenario è stato considerato, oltre alla marea, un vento da Sud-Est con intensità costante di 6 m/s uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo e costante per una durata di 24 ore. La presenza di questo campo di vento non induce significative alterazioni al regime idrodinamico generale dell'area portuale che rimane con valori di velocità della corrente quasi sempre al di sotto dei 2 cm/s. La circolazione costiera è generalmente allineata con la circolazione al largo e la direzione prevalente di scorrimento è orientata secondo il vento. Dall'analisi dei campi di moto medi sulla profondità, si osserva un flusso parallelo alla costa in direzione Nord-Nord Ovest che si mantiene con lo stesso verso in tutto il ciclo di marea e che raggiunge una velocità massima di 3÷4 cm/s di fronte al Porto Vecchio e di circa 6 cm/s davanti al terrapieno di Barcola-Bovedo.

I dati ottenuti dal modello, in estrema sintesi, confermano lo schema circolatorio già descritto sia in termini di valori della corrente superficiale che di direzione, con dominanza delle correnti in direzione NW in presenza di venti meridionali o di Bora. Le correnti hanno direzione contraria, cioè verso SE, in occasione di vento di Maestrale.

7 FORZANTI EPISODICHE (MAREGGIATE)

Nel presente capitolo viene trattato il tema del sovrizzo totale dell'acqua (H_{TOT}) associato agli eventi episodici, come una mareggiata o un'acqua alta eccezionale, che si manifesta in una certa area, in un intervallo temporale specifico, definito statisticamente tempo di ritorno. Senza complicare la trattazione si farà riferimento all'applicazione della Direttiva Alluvioni, modificata in Italia secondo il D. Lgs. 49/2010, sulla base del PGRA del distretto idrografico delle Alpi Orientali.

7.1 PGRA: Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni e soglie di inondazione

La mappatura della pericolosità di inondazione causata da eventi meteomarini rientra nell'ambito più generale della valutazione e gestione dei rischi alluvione, ai sensi della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2007, in seguito attuata in Italia con il D. Lgs del 23 febbraio 2010, n. 49. Gli obiettivi principali della Direttiva 2007/60/CE, sia per quanto riguarda l'alluvione legata ad un fenomeno di esondazione fluviale che per un evento di inondazione marina, rimangono invariati: il focus è finalizzato alla mitigazione delle potenziali conseguenze negative sull'ambiente, sulla salute umana, sulle attività economiche-turistiche e sul patrimonio culturale (Geoportale Nazionale, aggiornato al 2021).

La norma italiana recepisce dall'Europa l'obbligo di considerare le alluvioni a seguito di inondazioni marine delle zone costiere con l'art. 2 del D.Lgs 49/2010. Nell'art. 6, al punto 6 della direttiva 2007/60/CE, viene lasciata la possibilità di riferirsi solo ad eventi estremi subordinando tale possibilità

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 30 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

a una valutazione del livello di protezione. Tuttavia, alcune relazioni metodologiche nazionali sulle inondazioni costiere (p.e. Sardegna) vista la mancanza di una precisa definizione normativa del “livello di protezione adeguato” (Relazione Metodologica sulle inondazioni costiere, Sardegna 2018) hanno suggerito di non avvalersi di questa prerogativa. Viceversa, sulla base della pianificazione urbanistica territoriale e degli interventi della protezione civile, considerando ad esempio il Catalogo Mareggiate dell'Emilia Romagna (2013), regione con un contesto territoriale per certi aspetti simile a quello del Friuli Venezia Giulia, si è stabilito di verificare l'effetto di eventi meteomarini a basso tempo di ritorno.

I Piani di gestione del rischio di alluvione sono stati predisposti dalle Autorità di bacino distrettuali dei 5 distretti idrografici in cui è suddiviso il territorio nazionale. L'area del Nord Adriatico rientra nella giurisdizione del Distretto Idrografico delle Alpi Orientali, che ha redatto il suo Piano nel 2016 (PGRA, 2016), poi aggiornato nel 2021. In applicazione della Direttiva Alluvioni, il PGRA riporta la rappresentazione statistica dei valori di livello totale (H_{TOT}), per le probabilità di accadimento medie ed elevate, basata sulla caratterizzazione statistica dei livelli estremi di marea, secondo l'approccio sviluppato da Pirazzoli e Tomasin (2009).

Per il Distretto Idrografico delle Alpi Orientali i valori di riferimento per il computo dell' H_{TOT} , cioè dell'elevazione che la massa d'acqua marina può raggiungere lungo la linea di costa sono differenziati nei due settori: Zona 1: dalla foce dell'Adige al Tagliamento; Zona 2: dalla foce del Tagliamento a Trieste. I tempi di ritorno per un evento alluvionale considerati dalla Direttiva Alluvioni sono i seguenti:

- TR 30 anni = rappresenta un evento episodico con alta probabilità di accadimento (alta frequenza);
- TR 100 anni = rappresenta un evento con medio/bassa probabilità di accadimento (poco frequenti);
- TR 300 anni = evento con scarsa probabilità di accadimento (eventi estremi rari).

Di seguito vengono riportate le tabelle (Tab. 7.1 e Tab. 7.2) con i valori di riferimento per il livello totale di acqua raggiunto dall'evento episodico in funzione del tempo di ritorno.

<i>Zona 1: dalla foce dell'Adige al Tagliamento</i>			
	T_R = 30	T_R = 100	T_R = 300
L_{MM} + H_{ASTR} + H_{SURGE}	145 cm	155 cm	170 cm
H_{SET-UP} + H_{RUN-UP}	+ 40 cm per ogni scenario		
<i>Valori in cm sullo zero I.G.M</i>			

Tab. 7.1 - Valori di riferimento dell' H_{TOT} per la Zona 1 del Distretto Idrografico delle Alpi Orientali (PGRA, 2021).

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 31 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Zona 2: dalla foce del Tagliamento a Trieste			
	$T_R = 30$	$T_R = 100$	$T_R = 300$
$L_{MM} + H_{ASTR} + H_{SURGE}$	140 cm	160 cm	200 cm
$H_{SET-UP} + H_{RUN-UP}$	+ 40 cm per ogni scenario		
<i>Valori in cm sullo zero I.G.M</i>			

Tab. 7.2 - Valori di riferimento dell' H_{TOT} per la Zona 2 del Distretto Idrografico delle Alpi Orientali (PGRA, 2021).

Il livello massimo raggiunto (H_{TOT}) può essere in generale composto dalla somma di vari fattori:

$$H_{TOT} = L_{MM} + H_{ASTR} + H_{SURGE} + H_s + (H_{SET-UP} + H_{RUN-UP})$$

Dove (Fig. 7.1):

L_{MM} = livello medio mare;

H_{ASTR} = marea astronomica;

H_s = massima altezza dell'onda di sessa (incluso nell' H_{SURGE})

H_{SURGE} = rappresenta il contributo meteorologico (tide + surge) e non include la marea astronomica;

H_{SET-UP} = sovrizzo della superficie del mare sotto costa per effetto della frangenza delle onde;

H_{RUN-UP} = massimo livello di risalita sul profilo di costa (vale per superfici inclinate).

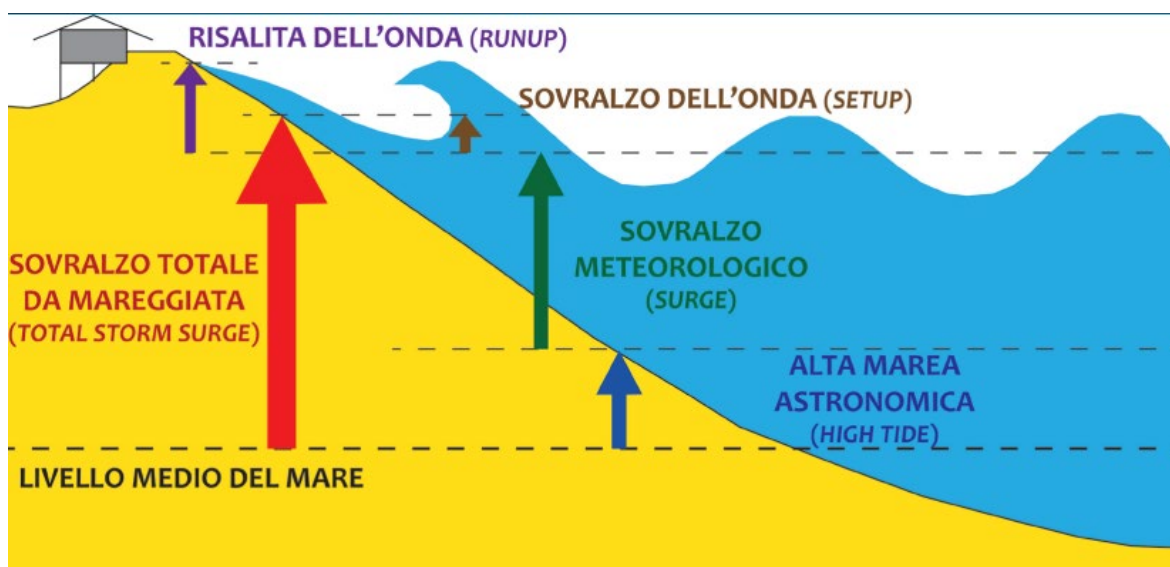


Fig. 7.1 – Schema che rappresenta le componenti che concorrono alla formazione del sovrizzo totale da mareggiata (H_{TOT}).

Per la zona 2, che include il territorio di Trieste, nello scenario con un evento episodico caratterizzato da tempo di ritorno pari a 30 anni, sommando i valori del livello medio mare, la marea astronomica, il fenomeno di surge causato dalle condizioni meteorologiche e il set up ondoso, si ha un sovrizzo totale di circa 180 cm (140 cm + 40 cm di set-up e run-up) e di conseguenza un potenziale annegamento di

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 32 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

tutti quei territori che si trovano al di sotto di questa soglia e che non sono protette da difese adeguate. Per eventi di media-bassa probabilità il valore soglia (TR= 100 anni) è pari a 200 cm. Gli stessi valori per i tre TR sono riportati nel PAIR, Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico dei bacini di interesse Regionale.

Probabilmente l'analisi svolta dall'autorità di Bacino per il PGRA del Distretto delle Alpi Orientali sovrastima lievemente il valore di H_{TOT} a causa della sommatoria in eccesso dei contributi di surge, di marea astronomica e di wave set-up, visto che l'elaborazione fatta dalla Regione Emilia Romagna in applicazione della Direttiva Alluvioni per i territori regionali porta, ad esempio, a valori di 15 cm inferiori per l'evento con TR = 100 anni ($H_{TOT} = 181$ cm), se confrontato con il dato riferito alla limitrofa Area 1.

Per tale ragione è ragionevole porre come valore di riferimento progettuale un sovrizzo intermedio tra il TR = 30 e il TR = 100 dell'area 2, ovvero $H_{TOT} = 190$ cm.

8 FORZANTE LONG-TERM (INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MARE)

Per la progettazione risulta fondamentale considerare lo scenario cautelativo più plausibile, al fine di tenere in considerazione l'attuale trend trasgressivo del livello marino e le dinamiche associate.

Il punto di partenza riguarda la serie storica del livello medio del mare misurato a Trieste. I dati raccolti dal CNR Ismar sono disponibili nel repository SEANOE (<https://doi.org/10.17882/62758>, Raicich, 2022).

La sintesi grafica della serie 1875-2021 è riportata in Fig. 8.1.

Il trend ultrasecolare, seppur discontinuo, presenta un innalzamento medio di 1,4 mm/anno, laddove il trend di innalzamento del livello del mare nel periodo 1990-2021 è risultato pari a 3,62 mm/anno. Proiettando il trend lineare dell'ultimo trentennio al 2100, l'innalzamento risultante sarebbe pari a 27,5 cm.

Tuttavia è risaputo che le proiezioni che si adottano si riferiscono usualmente all'Assessment Report (AR) fornito da IPCC (IPCC, 2021; 2022). E' oggi facilmente disponibile ottenere una proiezione riferita alle località mondiali attraverso un tool messo a disposizione dalla NASA (<https://sealevel.nasa.gov>) che fornisce il valore del livello del mare (che tiene anche conto dei movimenti verticali locali) a un dato anno rispetto agli scenari IPCC dell'AR6. Il valore è espresso rispetto alla baseline temporale 1995-2014 (valore mediano = 2006).

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 33 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

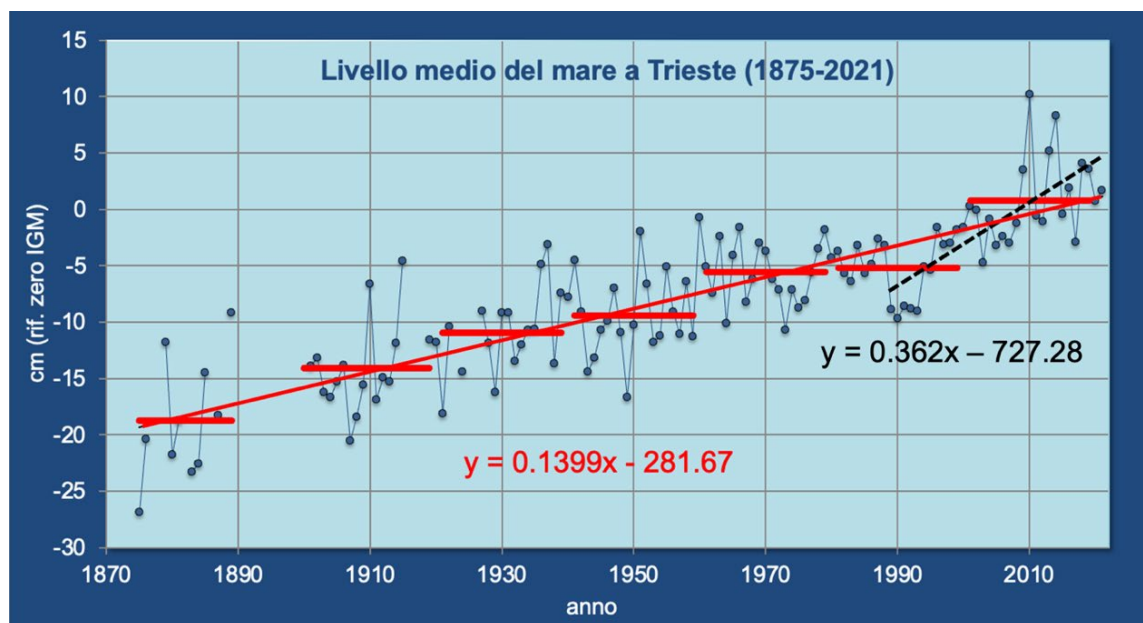


Fig. 8.1 – Serie temporale del livello del mare registrato presso il Molo Sartorio a Trieste (dati CNR-Ismar). In rosso le medie ventennali a cavallo dell’anno di riferimento in asse x. La retta in rosso è la tendenza di tutto il periodo (tasso di SLR = 1,4 mm/anno). In tratteggio la tendenza del trentennio 1990-2021 (tasso di SLR = 3,62 mm/anno).

L’output ottenuto per Trieste è riportato in Fig. 8.2. Nello specifico si è deciso di proiettare solamente lo scenario ottimistico SSP1-2.6 e quello pessimistico SSP5-8.5 (noto anche come *business-as-usual*) con i rispettivi range di confidenza. I valori mediani corrispondono, per il 2100, a 39 cm e 67 cm rispettivamente per gli scenari ottimistico e pessimistico. Ai fini della programmazione degli interventi si ritiene più verosimile adottare lo scenario pessimistico SSP5-8.5, poiché non è pensabile siano presto adottate e siano efficaci globalmente le misure di contenimento delle emissioni gas alteranti previste per lo scenario SSP1-2.6.

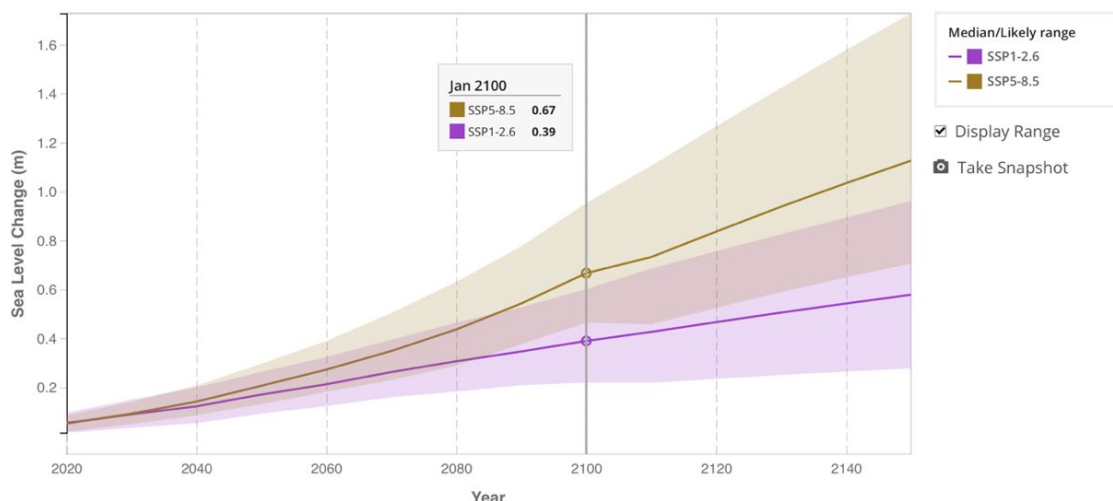


Fig. 8.2 – Scenari di previsione di SLR per Trieste, ottimistico SSP1-2.6 e pessimistico SSP5-8.5 estratti mediante utilizzo del tool NASA (<https://sealevel.nasa.gov>) con dati IPCC.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 34 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

La sintesi tra dati rilevati (CNR-Ismar) e scenari di previsione è riportata in Fig. 8.3. Per Trieste può essere accettata la componente tettonica impiegata nel tool NASA (0.01 mm/anno). Diversamente, stante ai dati misurati da Antonioli et al. (2017) nel caso di altre località costiere come Grado e Lignano, questa componente assumerebbe valori più elevati (0.03 mm/anno), tale da dover richiedere un lieve incremento (+2.9 cm) dei dati mediani delle due proiezioni al 2100.

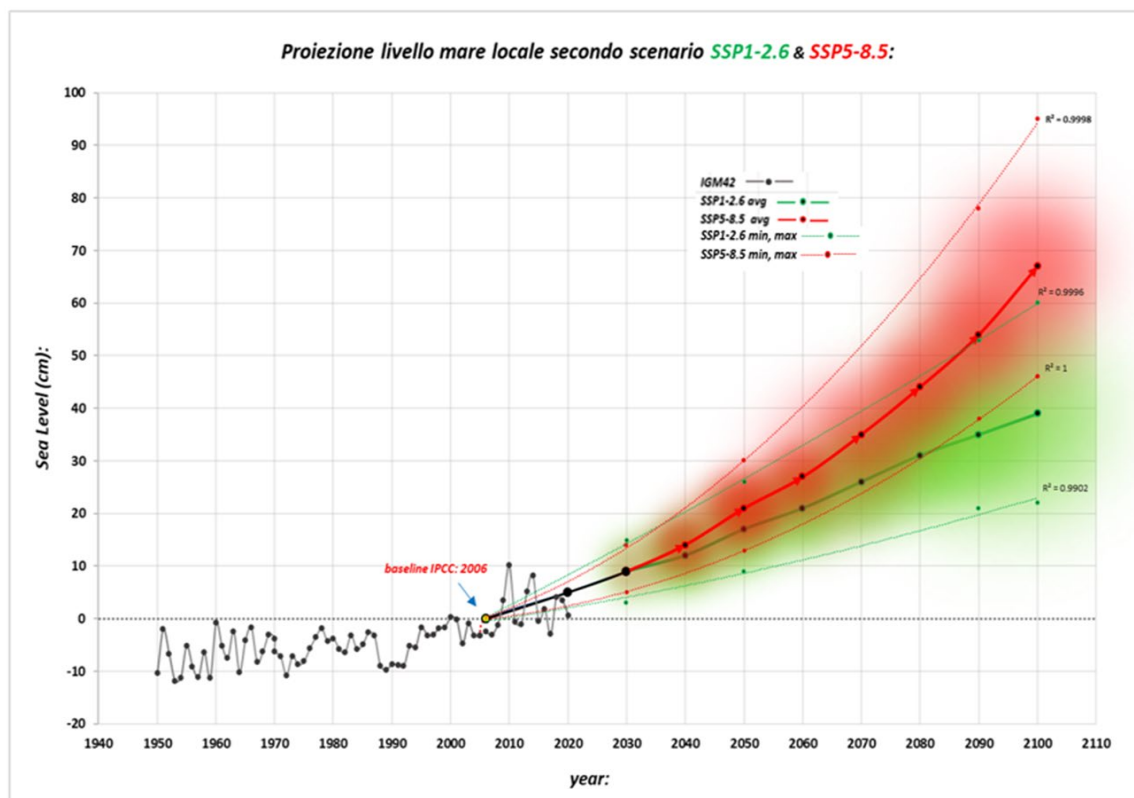


Fig. 8.3 – Quadro complessivo dei valori di innalzamento del livello del mare a Trieste (1950-2020) uniti agli scenari locali previsti dal tool NASA sulla base delle proiezioni IPCC con baseline 2006.

9 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il Lungomare di Barcola si sviluppa dal porticciolo omonimo al Castello di Miramare. Geograficamente e morfologicamente si trova all'interno del Golfo di Trieste, che è delimitato verso mare dalla linea che congiunge Grado-Punta Salvore. Con l'eccezione della costa settentrionale da Monfalcone a Grado, che è bassa e sabbiosa, le coste orientali e meridionali del Golfo di Trieste sono per lo più alte, costituite da calcari mesozoici o da litotipi arenaceo-marnosi eocenici (Flysch), con piccole spiagge ciottolose e ghiaiose posizionate sul terrazzo di abrasione.

La "Costiera Triestina" è interamente caratterizzata da rocce calcaree a strapiombo sul mare, dal promontorio di Duino fino a Marina di Aurisina. Alla base della falesia, costituita da roccia calcarea, il Flysch è presente solo in un piccolo lembo. Le spiagge naturali sono pochissime e poco estese.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 35 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Il Flysch è l'unico litotipo della costa da Miramare a Portorose in Istria. Si presenta con maggiore continuità e con affioramenti più consistenti anche alle quote alte della falesia. I calcari sono visibili solo in due sezioni, vicino al promontorio di Miramare e a nord dei Filtri di Aurisina. Fino a quest'ultimo luogo, la pendenza della costa è notevole (la falesia è quasi verticale) e le poche spiagge "a tasca" sono molto strette e costituite da ghiaie.

L'assetto originario della costa barcolana prima degli interventi che dalla seconda metà del XIX secolo l'hanno modificata anche sensibilmente, può essere ricostruito sulla base di diverse immagini di archivio, riprese dalla nutrita letteratura sulla fisionomia urbana di Trieste.

Nella seconda metà dell'800 l'abitato di Barcola si affacciava su una spiaggia che si estendeva dal porticciolo fino all'estremità settentrionale dell'attuale pineta. Sicuramente questa spiaggia di modesta estensione, ripida e ghiaioso-ciottolosa, trovava origine dagli apporti terrigeni dei due torrenti che defluiscono dal versante, a partire da 250 m di quota, al mare, uno vicino alla discarica di Barcola-Bovedo e l'altro vicino al porto. Procedendo verso Miramare la costa si presentava alta, con una falesia al piede, a testimoniare l'attività erosiva del mare (Fig. 9.1).

La strada di collegamento tra Barcola ed il castello (il futuro viale Miramare) fu inaugurata nel 1859, un anno prima del completamento del castello. Prima di quella data, solo un viottolo collegava il porto di Cedas con Barcola, successivamente allargato con materiale di riporto, ad occupare il terrazzo di abrasione intertidale, difeso al piede in modo discontinuo da rudimentali scogliere aderenti. Successivamente, in più fasi, la strada fu allargata ed abbellita con alberi. Risulta quindi chiaro che i successivi allargamenti del viale si sono impostati su sversamenti di materiali realizzati al piede della costa o su modesti lembi di spiaggia ciottolosa intertidale.

Per quanto riguarda il versante, a NE dell'area in esame il ciglione carsico, quasi a picco sul litorale, caratterizza con la sua aspra morfologia tutto il litorale di Barcola. Morfologicamente il versante, presenta pendenze dell'ordine di 20°-30° nella parte inferiore, cioè quella costituita da terreni flyschoidi, mentre una maggiore acclività, mediamente di 30°-40°, caratterizza la parte più alta, costituita da calcari. Pendenze sensibilmente inferiori, di norma < 10°, si osservano sul versante prossimo alla pineta e al porticciolo di Barcola, anche se l'acclività si accentua fino a 20°-30° immediatamente oltre la Strada del Friuli.

Alla base del versante, quasi al contatto con il mare, è presente il terrazzo d'abrasione su cui è stato impostata la carreggiata della S.S. n° 14. Qui le quote rispetto al l.m.m. variano da 3,2 m (giardini di Barcola) a 3,4 m (porticciolo Cedas), fino a arrivare a 4,3 m circa in corrispondenza del bivio con la Strada Costiera.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 36 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

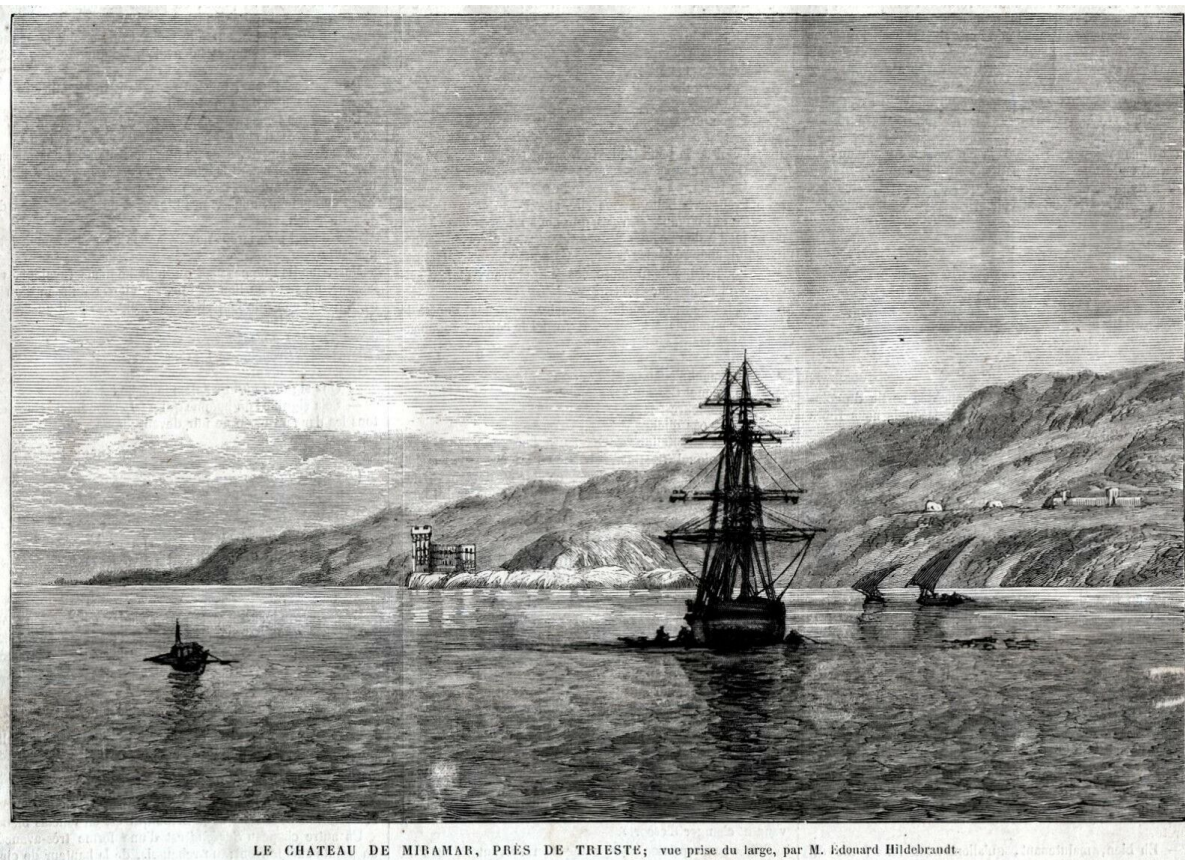


Fig. 9.1 - La costiera triestina con il castello di Miramare in una stampa del 1867, pochi anni dopo il completamento del castello (1856-1860).

Sotto il profilo geologico, tutta l'area è impostata sul sistema di contatto tettonico tra calcari e flysch (Fig. 9.2), con quest'ultima litologia che funge da substrato su cui poggiano tutti i sedimenti quaternari che coprono i fondali marini antistanti.

La facies prevalente è quella arenacea, costituita da arenarie di spessore medio superiore ai 30 cm, con interstratificazioni di pacchetti di lamine di marna di spessore centimetrico. Solamente fra il porticciolo del Cedas ed il bivio per Miramare affiora il Flysch in facies marnoso-arenacea. Qui le marne hanno una potenza compresa tra 10 e 50 cm, mentre gli strati di arenaria non superano i 20 cm. L'assetto giaciturale è in generale orientato a monte, con strati a reggipoggio, anche se il flysch tettonizzato varia molto anche in spazi ristretti, risultando talora in assetto verticale, a traverpoggio o con strati rovesciati, come quelli che affiorano tra il porticciolo del Cedas e il bivio per Miramare.

Secondo Romeo (2008) la successione stratigrafica quaternaria che poggia sul basamento flyschoidale è un insieme complesso di ambienti deposizionali marini e continentali, poiché ci troviamo all'estremità settentrionale del Mare Adriatico, ovvero ai margini del bacino, dove i fondali sono poco profondi e quindi in grado di conservare solamente le parti apicali di una sequenza stratigrafica marina.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 37 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

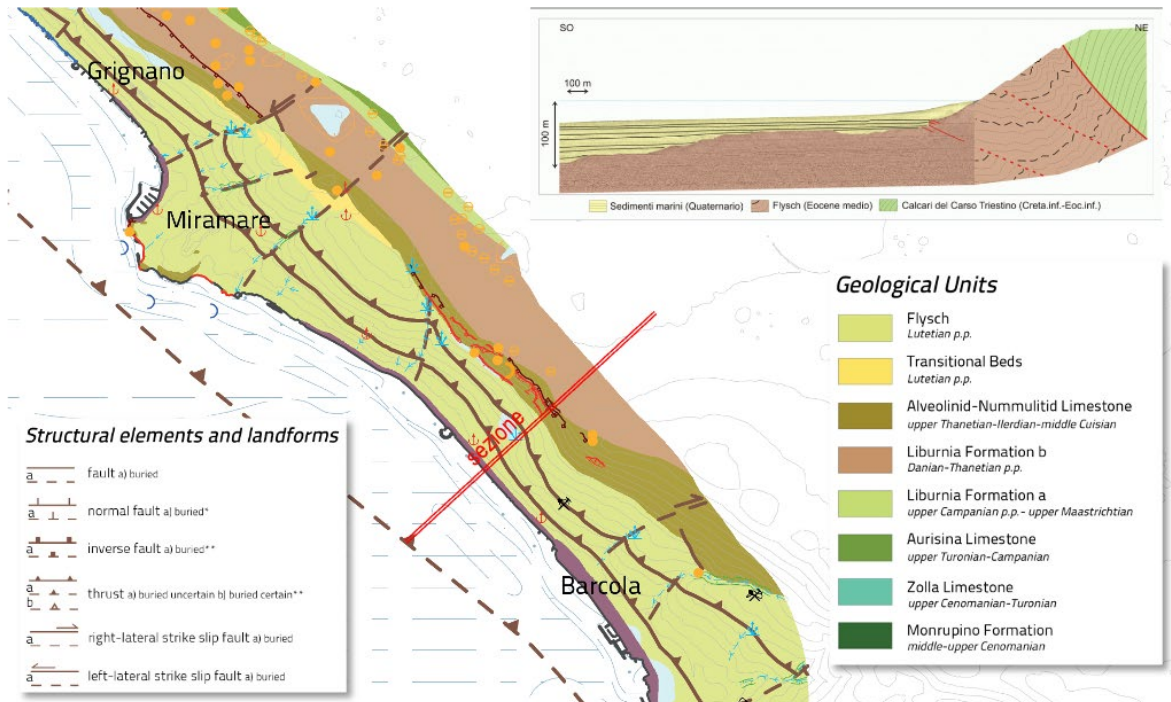


Fig. 9.2 - Mappa geologico-strutturale della costiera triestina (da Biolchi et al., 2016). La sezione (tratto in rosso, schema in alto a destra) è tratta da Romeo (2008).

In Fig. 9.3 viene proposto lo schema di dettaglio delle facies riconosciute nella sequenza quaternaria dei sedimenti che ricoprono il Flysch eocenico.

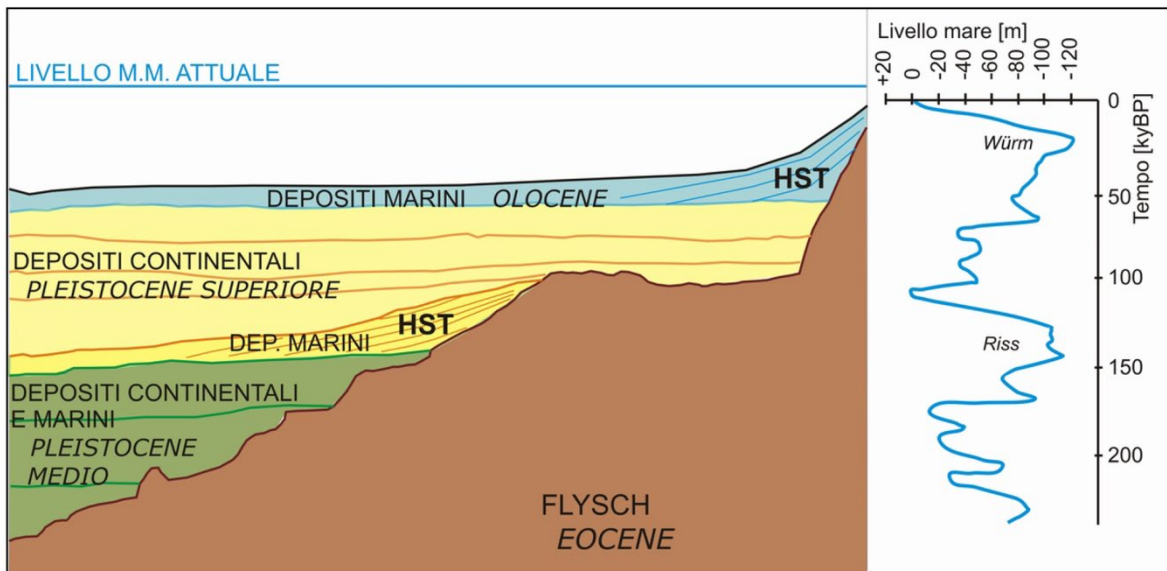


Fig. 9.3 – Schema dei rapporti stratigrafici con la curva eustatica relativo ai sedimenti della copertura quaternaria dell'area della costiera triestina, che comprende il lungomare di Barcola (da Romeo, 2008).

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 38 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Dall'alto verso il basso si riconoscono i depositi marini di stazionamento alto (HST dell'Olocene), mentre le facies immediatamente sottostanti sono depositi principalmente continentali, relativi alla fase di regressione durante i periodi glaciali. I depositi marini di stazionamento alto (HST inferiore) rappresentano invece la fase interglaciale tirreniana (MIS 5e, Pleistocene superiore) di 125.000 anni fa, cioè quella di massimo flooding prima dell'interglaciale odierno. Al di sotto – nuovamente - il ciclo regressivo del Pleistocene medio, dominato da facies continentali.

10 ASSETTO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO DEI FONDALI

10.1 Morfologia sottocostiera

I fondali del Golfo di Trieste sono relativamente poco profondi, con una tendenza generale all'approfondimento verso il largo. Questo è graduale nell'area più settentrionale, dove la morfologia è regolare e modellata da ampie conoidi di sedimenti fluviali, e più rapido nelle altre zone.

Partendo dalle osservazioni fatte da Brambati (2000), integrate con i rilievi svolti specificatamente lungo il tratto costiero in esame (Fig. 10.1), nell'area di Barcola il fondale tende ad approfondirsi verso il largo con pendenze diverse: più lievi nel settore mediano e maggiormente accentuate alle due estremità. Infatti, le acclività maggiori interessano i fondali antistanti il Porto di Barcola (5°, ovvero nel rapporto 1:11,5) e quelli a ridosso della costa rocciosa del Parco di Miramare (6°, cioè 1:9,6). Nel settore centrale, dove sono anche svolti dei rilievi di dettaglio per la progettazione della Bau Beach, la pendenza oscilla tra 1:13 e 1:17.

Le isobate 5 e 10 m sono di regola situate rispettivamente a circa 40-60 m e 110-130 m dalla costa. Fa eccezione la zona antistante il porticciolo Cedas, dove le pendenze sono minori e le isobate 5 e 10 m sono posizionate a 120 e a 180 m dalla riva.

In tal senso, quindi, se la progettazione del nuovo lungomare prevederà l'estensione dell'ambito ricreativo-difensivo verso mare fino a 50 m dall'attuale linea di riva, andrà tenuta in considerazione l'acclività dei fondali sui quali dovranno essere poste le basi per il posizionamento dei frangiflutti e delle massicciate di contenimento delle baie.

Un dettaglio dell'acclività in relazione alla topografia della fascia prossima alla costa può essere osservato grazie all'analisi svolta per la progettazione della Bau Beach.

L'assetto dei fondali riportato nell'area dell'intervento progettato (Fig. 10.2) evidenzia una acclività abbastanza uniforme, nell'ordine del rapporto tra profondità e distanza di 1:12 – 1:13. Minori pendenze si riscontrano nei fondali adiacenti al pennello in massi che determina il limite meridionale dell'area di intervento, sui quali sarà posizionata la nuova spiaggia. Caratteristica che in questo caso permette di limitare i volumi di sedimento da impiegare. I fondali in prossimità della testata del pennello progettato (a circa 30 m dalla riva), sulla quale sarà realizzata la curvatura frontale dell'opera, sono compresi tra -3.0 e -3.5 m.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 39 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

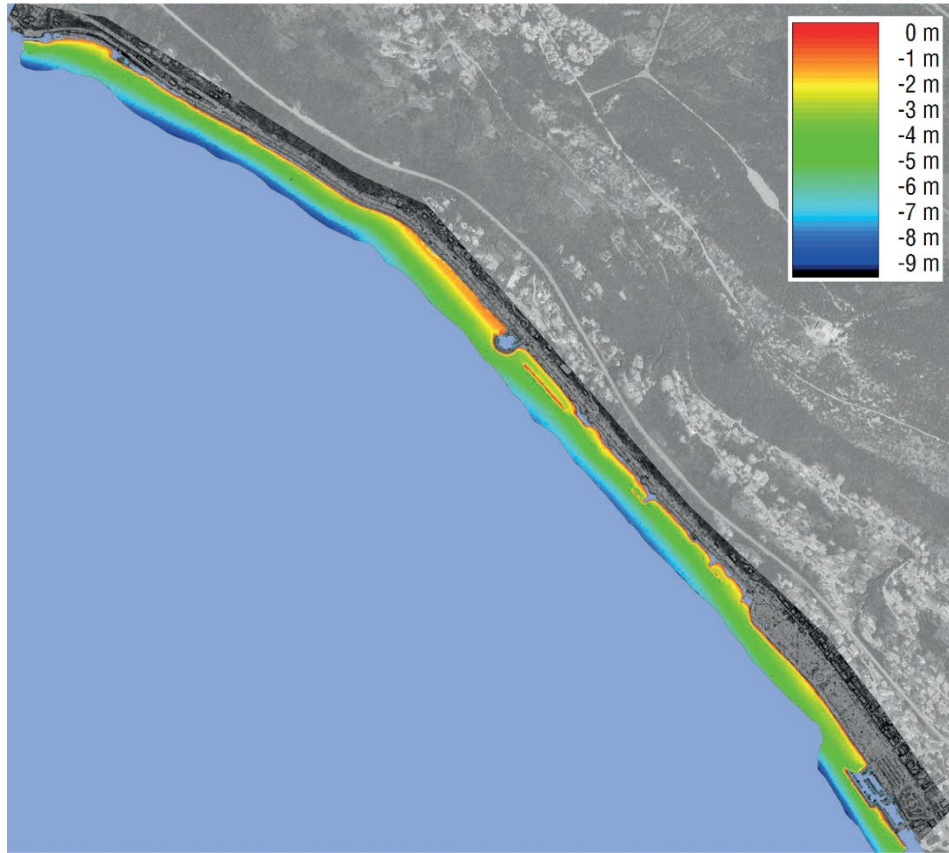


Fig. 10.1 – Assetto morfologico dei fondali desunto dai rilievi effettuati specificatamente per lo studio (profondità in metri sul l.m.m.)

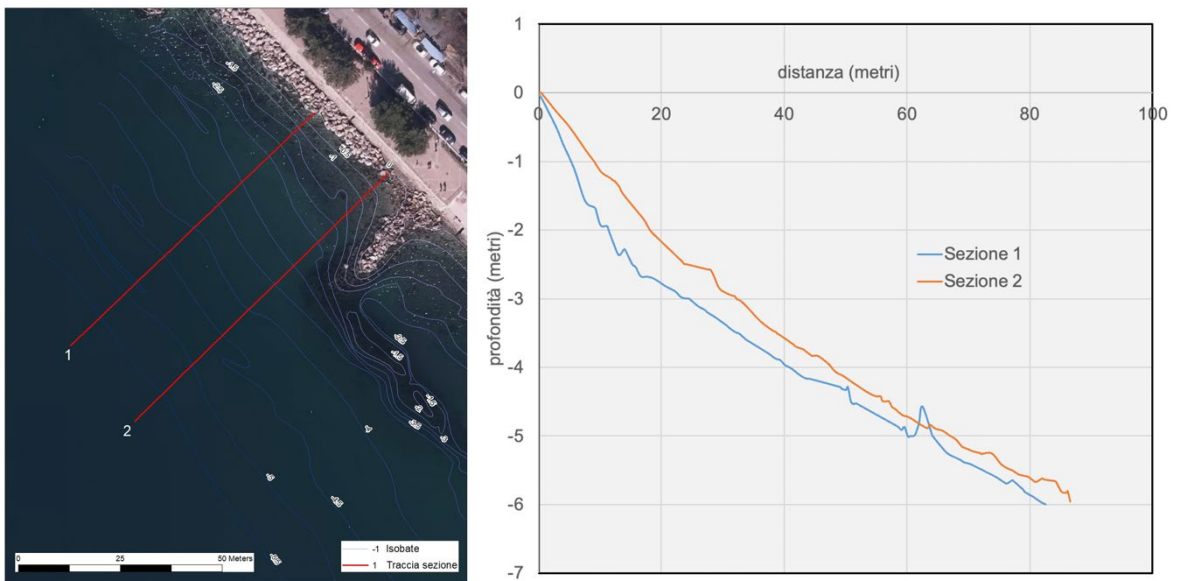


Fig. 10.2 – Esempio di gradiente batimetrico nell'area di Barcola (Bau Beach).

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 40 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

10.2 Sedimentologia

Dal punto di vista granulometrico i sedimenti dei fondali del Golfo di Trieste sono costituiti per lo più da sabbie e peliti (fanghi), mentre i clasti di dimensioni maggiori, ghiaie, ciottoli e massi, sono limitati invece alle ristrette aree sottostanti alle coste alte (detrito di falda e, se rimaneggiato, ghiaie marine), e alle foci dei corsi d'acqua (ghiaie fluviali).

In una stretta fascia a ridosso delle coste non rimaneggiate dall'opera dell'uomo si rinvencono materiali sciolti costituiti da ciottoli, ghiaie e sabbie in abbondante matrice limosa. Questi depositi grossolani sono presenti ai piedi della costa alta (per lo più arenacea, talvolta calcarea), su di un terrazzo di abrasione, in genere stretto ed irregolare: sono prodotti dall'azione erosiva sulle rocce costituenti la falesia da parte del moto ondoso e degli agenti atmosferici.

Le sabbie medio-fini e quelle pelitiche costituiscono i sedimenti predominanti da riva fino a circa 1,5 Km. Al largo i sedimenti sono via via più fini, passando da peliti sabbiose a peliti (Brambati & Catani, 1988).

Nell'area urbana, gli estesi interrimenti, hanno sepolto sia le morfologie terrazzate presenti in corrispondenza della costa alta, sia i detriti grossolani. La conseguenza più rilevante di questa nuova situazione morfologica è che i fondali risultano innaturalmente più profondi sottoriva e conseguentemente più fangosi.

Le informazioni specifiche sui sedimenti prossimi alla fascia sottocostiera di Barcola, sui quali sarà predisposta la strutturazione del sistema di opere di difesa e di corredo nel ridisegno compressivo del waterfront, sono tratte dal lavoro di Brambati (2000) e dalla sintesi svolta da Romeo (2008).

Nel lavoro di Brambati (2000) è stato eseguito uno specifico campionamento, attraverso la raccolta di 70 campioni che coprono tutta l'area fino a una distanza di poco inferiore a 500 da riva, dove i fondali raggiungono profondità anche superiori a 19 m (Fig. 10.3).



Fig. 10.3 – Il campionamento dei sedimenti di fondo eseguito da Brambati (2000).

L'elaborazione dei dati è stata svolta secondo la rappresentazione tessiturale di Nota (1954), data dalla notazione binaria sabbia-pelite (pelite= fango, ovvero il sedimento con dimensioni < 0.062 mm), che prevede la distinzione di 5 tipi tessiturali: sabbia, sabbia pelitica, pelite molto sabbiosa, pelite sabbiosa, pelite (con percentuali di pelite via via crescenti, nell'ordine pari a <5%, 5-30%, 30-70%, 70-95% e >95%).

La rielaborazione delle informazioni raccolte nel rapporto tecnico del 2000 ha permesso di ricavare la distribuzione delle litologie dell'area più sottocostiera, cioè quella interessata dal progetto, dove si addensano i sedimenti più grossolani, costituiti dalle sabbie e dalle sabbie pelitiche.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 41 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

In Fig. 10.4 è riportata la distribuzione dei contenuti di sabbia dei soli campioni con percentuale della componente maggiore o uguale a 70%, che include quindi le due categorie corrispondenti alle sabbie (con percentuale della componente >95%) e alle sabbie pelitiche, cioè i sedimenti con contenuti di sabbia compresi tra il 95% e il 70%. Non si esclude, sebbene nel report di Brambati non sia accennato, che i sedimenti più prossimi alla riva contenessero significativi contenuti di ghiaia, dato che la componente molto grossolana, anche di natura residuale, è ben presente nei bassi fondali prossimi a riva. D'altra parte, Romeo (2008) per la fascia compresa entro i 6-7 m di profondità segnala una tessitura mista ghiaia e sabbia pelitica.



Fig. 10.4 – Distribuzione dei contenuti di sabbia per i campioni con percentuali superiori o uguali al 70% (dati di Brambati, 2000). La linea tratteggiata in giallo separa il prisma sottocostiero di sabbie e sabbie pelitiche, dai sedimenti più fangosi posti al largo.

Importante comunque segnalare che la copertura di sabbia con contenuti molto elevati contraddistingue una fascia estesa mediamente 100 m dalla riva, soprattutto, come riportato da Brambati (2000), alle profondità per lo più comprese tra 1 e 4 m. Più al largo, anche se non sono state qui riportate, dominano le peliti sabbiose, soprattutto nell'area compresa tra i 150 e i 370 m circa dalla riva, a profondità comprese tra 12 e 19 m circa.

La gradualità verso i termini tessiturali più fini da riva verso il largo (sabbia pelitica, pelite molto sabbiosa, pelite sabbiosa e pelite) è di norma rispettata. Fa eccezione il profilo posto in corrispondenza della Marinella, nel quale sabbie pelitiche sono state rinvenute a profondità inferiori rispetto alle sabbie. I sedimenti più fini, rappresentati dalla pelite, si trovano nelle zone più lontane da riva, alle profondità superiori ai 16-17 m.

Considerato che Romeo (2008) disponeva di un dettaglio di rilievo dei fondali per la zona compresa tra il porticciolo del Cedas e Miramare, in Fig. 10.5 si propone un quadro sinottico delle informazioni sui sedimenti di fondo, che include anche le zone dove affiora roccia o è presente una matrice marcatamente ghiaiosa, così come segnalato dall'Autore.

Le considerazioni finali sull'assetto sedimentologico riportate nel report di Brambati del 2000 assumono ancor oggi una estrema rilevanza per gli aspetti di impatto potenziale della tipologia di interventi prospettati in questo studio. In prima istanza viene messo in evidenza che l'arco di litorale tra Miramare e l'aggetto morfologico di Barcola-Bovedo rappresenta una "unità fisiografica" specifica, del tutto separata dai litorali contermini. In questo senso l'evoluzione e la dinamica sedimentologica del sistema risultano del tutto indipendenti e non evidenziano alcuna interazione dinamica con le unità attigue. Conseguentemente, allo stato attuale sono del tutto trascurabili gli interscambi di sedimento

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 42 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

tra questa unità fisiografica e quelle contermini e tali si presume rimangano anche a valle di interventi difensivi o di ridisegno della costa con elementi che si sviluppino linearmente.



Fig. 10.5 – Elementi tessiturali dei sedimenti e caratteristiche di rilievo dei fondali antistanti la riviera di Barcola. La linea tratteggiata in giallo separa il prisma sottocostiero di ghiaie, sabbie e sabbie pelitiche, dai sedimenti più fangosi posti al largo.

Questo vale soprattutto per quei materiali che sono sollecitati dall'azione trattiva del moto ondoso, ovvero per le sabbie e le ghiaie. Infatti, l'analisi dell'incidenza del moto ondoso ha posto in evidenza che il mare dominante è il Libeccio, il quale agisce pressoché ortogonalmente alla costa, dando origine ad un trasporto sostanzialmente onshore-offshore nella zona centrale del litorale in esame, con trasporto tendenzialmente convergente verso il centro, a partire dalle due estremità del litorale, rappresentate dal promontorio di Miramare e dalla discarica di Barcola-Bovedo, che curvano leggermente, determinando una componente di deriva speculare e diretta nel settore centrale. I mari di Scirocco e di Bora attivano invece una circolazione debole e un potenziale trasporto lungo riva diretto verso Nord che non è in grado di superare comunque il promontorio di Miramare, anche per la scarsa disponibilità di sedimenti che si muovono in questa direzione, e limitatamente alle mareggiate più significative.

Brambati raccomanda di tener ben presente in sede di progettazione di tutti questi aspetti, unitamente alle caratteristiche del moto ondoso, oltre che per il disegno di portualità turistiche, anche e soprattutto per gli aspetti legati all'impiego di materiali sedimentari per realizzare spiagge artificiali a varia granulometria, le quali, beninteso, saranno impostate su fondali profondi almeno 2-3 m, se non superiori, almeno per quanto riguarda la curvatura esterna delle baie protette, che potrebbero incidere su una batimetria di circa 5 m. A questo proposito l'attenzione dovrà essere rivolta a contenere il trasporto lungo riva e verso mare dei sedimenti delle spiagge artificiali in progetto a vantaggio della stabilità, mediante preliminare verifica della stabilità statica secondo il principio di curvatura parabolica, di cui sarà dato cenno nel prosieguo. Lo stesso dicasi per evitare l'interrimento dei porticcioli turistici.

Per quanto riguarda il trasporto in sospensione, in considerazione dello schema circolatorio di cui si è dato cenno, il movimento delle masse d'acqua si attua nella generalità dei casi lungo la costa da SE a NW, cioè verso Miramare, salvo momenti eccezionali che comportano momentanee inversioni dovute alla combinazione maree-venti da W. Nella stessa direzione, quindi, si muove il particellato in sospensione, che tuttavia è del tutto scarso, per mancanza di sorgenti terrigene.

Anche di ciò si dovrà tenere ben conto durante i lavori evitando di versare a mare materiale a

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 43 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

granulometria fine (fanghi) alla luce della presenza a Miramare dell'omonimo parco.

11 STRUTTURA DELLE COMUNITA' BENTONICHE

Le informazioni sulla struttura delle comunità bentoniche sono ricavate integralmente dal puntuale specifico capitolo dedicato all'interno della relazione su Barcola redatta da Brambati (2000). I dati sul macrozoobenthos sono stati successivamente pubblicati da Aleffi & Bettoso (2001), da cui sono state tratte le parti più sintetiche e rilevanti. I popolamenti bentonici sono direttamente correlati alle caratteristiche del substrato oltre che ai parametri chimico-fisici delle acque. Per questo l'analisi sulle comunità assume una particolare importanza per valutare le modificazioni subite dall'ambiente marino a seguito di alterazioni legate sia a fenomeni naturali che a influenze di tipo antropico.

La caratterizzazione delle comunità bentoniche fornisce pertanto le conoscenze di base necessarie per poter valutare, in seguito, l'intensità di eventuali modificazioni ambientali. In questa fase si ritiene sufficiente fornire una base conoscitiva costruita con i dati di letteratura relativi alle biocenosi bentoniche del Golfo di Trieste, integrati dai dati specifici dell'indagine ad hoc effettuata nel 2000 nell'area in esame, pubblicati da Aleffi & Bettoso (2001).

11.1 Il dominio bentonico litorale

Il sistema bentonico litorale comprende tutti i fondali caratterizzati dalla presenza di organismi vegetali e per tale motivo è anche detto sistema fitale. Esso è suddiviso in 4 piani: il piano sopralitorale, mediolitorale, infralitorale e circolitorale. Un piano viene definito come lo spazio verticale del dominio bentonico dove le condizioni ecologiche, che dipendono dalla posizione rispetto al livello del mare, rimangono costanti o variano regolarmente tra due livelli critici che segnano i confini del piano. I diversi piani hanno popolamenti caratteristici e i loro confini sono messi in evidenza da un brusco cambiamento dei popolamenti bentonici (Ghirardelli, 1981). Questo modello di zonazione, proposto dalla scuola francese di Endoume, ad opera di Pérès & Picard (1964), prende in considerazione essenzialmente il ruolo della luce e dell'umettazione (per i piani più alti) nel determinare la distribuzione degli organismi.

il piano sopralitorale è quello più superficiale, in esso si localizzano gli organismi che esigono o sopportano emersioni quasi continue; la posizione del limite superiore di questo piano varia in funzione dell'idrodinamismo, da qualche decimetro, a qualche metro sopra il livello del mare.

Nel piano mediolitorale si localizzano gli organismi che esigono o sopportano immersioni e emersioni periodiche, questo piano corrisponde alla zona di oscillazione del livello del mare.

Il piano infralitorale è il piano dei vegetali fotofili che esigono o sono adattati ad elevate intensità luminose. Il suo limite superiore è rappresentato dal livello a partire dal quale i popolamenti sono sempre immersi o emergono soltanto in casi rarissimi e per breve tempo; il limite inferiore è segnato dalla scomparsa delle alghe fotofile e delle fanerogame marine. Tale profondità dipende dalla trasparenza delle acque e può variare, nel Mediterraneo, da pochi metri, in acque molto torbide, a più di 50 metri nelle acque particolarmente trasparenti: lungo la costiera triestina tale limite si aggira,

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 44 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

attualmente, attorno ai 5-6 metri di profondità. Il piano circalitorale si estende dall'estremo limite compatibile con la vita delle alghe fotofile e delle fanerogame, fino alla massima profondità compatibile con la vita delle alghe sciafile, pertanto anche in questo caso la profondità raggiunta da questa biocenosi varierà ampiamente in relazione alla trasparenza delle acque.

11.2 I popolamenti bentonici del Golfo di Trieste e della fascia costiera di Barcola

Nel Golfo di Trieste la presenza di maree di ampiezza superiore al metro, i considerevoli apporti di acque continentali e le elevate escursioni termiche annuali conferiscono alla struttura e all'evoluzione dei popolamenti bentonici caratteri del tutto particolari nell'ambito del Mediterraneo. La scarsa trasparenza dell'acqua e l'elevato tasso di sedimentazione e/o di rimobilizzazione dei fondali spostano verso l'alto il limite inferiore del piano infralitorale e delle comunità più superficiali del circalitorale; inoltre la ricchezza di apporti di materiali fini tende a bloccare l'evoluzione delle biocenosi infralitorali e circalitorali verso i rispettivi climax, che sono costituiti dalla prateria di Posidonia oceanica (HP) e dal Coralligeno (C) (Aleffi et al., 1996). Nell'area in esame, in cui la morfologia costiera è stata alterata da interventi antropici (Brambati e Catani, 1988), sono presenti alcune delle unità di popolamento del sistema bentonico litorale, in relazione ai tipi di substrato che si succedono dalla costa verso il largo. Di seguito vengono presi in esame i quattro piani del dominio bentonico litorale e le biocenosi ad essi corrispondenti.

Il piano sopralitorale è rappresentato dai substrati duri costituiti dalle scogliere frangiflutti che bordano gran parte della costa di Barcola e la zona in cui sono stati costruiti gli stabilimenti balneari: qui si ritrova la biocenosi della Roccia Sopralitorale (RS), caratterizzata dal crostaceo cirripede *Chthamalus depressus*, dal gasteropode *Littorina neritoides* e dall'isopode detritivoro *Ligia italica* (Specchi e Orel, 1968).

Nel mediolitorale, sempre su substrato duro, sono presenti due biocenosi: la biocenosi della Roccia Mediolitorale Superiore (RSM) caratterizzata dalle specie *Chthamalus montagui* (Lugnani, 1997/98) e *Chthamalus stellatus* e dall'alga verde *Enteromorpha compressa*; e la biocenosi della Roccia Mediolitorale Inferiore (RMI), che nel Golfo di Trieste presenta una associazione tipica costituita principalmente dal bivalve *Mytilus galloprovincialis*, dal gasteropode *Patella caerulea* e dall'alga bruna endemica ad affinità atlantica *Fucus virsoides*. Lungo la riviera di Barcola non è stata attualmente rilevata la presenza di *Fucus*, sono invece particolarmente abbondanti alcune alghe appartenenti al gruppo delle rodofee. Diversamente da quanto accade nel resto del Mediterraneo, dove *Mytilus* è localizzato in una fascia limitata, nel Golfo di Trieste la specie occupa tutto il piano mediolitorale inferiore e talvolta anche l'infralitorale (Orel, 1988).

I substrati duri infralitorali hanno, lungo la costa di Barcola, un'estensione alquanto limitata: sono costituiti infatti dai massi, di dimensioni variabili, localizzati nei primi metri dalla linea di riva, lungo la zona degli stabilimenti balneari. Su questi substrati sono presenti alcune specie appartenenti alla biocenosi delle Alghe fotofile (AF), quali *Paracentrotus lividus*, i gasteropodi *Nassarius incrassatus* e *Bittium reticulatus*, oltre ad alcuni antozoi. Lungo la restante fascia costiera l'infralitorale è caratterizzato da biocenosi di fondi molli, più in particolare nei primi metri di profondità si ritrova la biocenosi delle Sabbie Fini Superficiali (SFS), che annovera tra le specie caratteristiche molluschi bivalvi quali *Donax trunculus* e *Tellina tenuis*. Questa biocenosi è bordata, più in profondità, dalla biocenosi delle Sabbie Fini Ben Calibrate (SFBC), particolarmente ricca di molluschi bivalvi. In

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 45 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

situazioni di idrodinamismo via via più attenuato, queste due biocenosi vengono sostituite da quella delle Sabbie Fangose di Moda Calma (SFMC) la quale presenta, tra le specie caratteristiche, i molluschi *Loripes lacteus* e *Paphia aurea*, e il polichete *Phylo foetida*.

Per quanto riguarda il piano circalitorale, la biocenosi climax è la biocenosi del Coralligeno, legata a substrati duri, nettamente sciafila ed a dominanza vegetale. Questa biocenosi si trova in ambienti di due tipi: sia ai piedi di falesie sottomarine o su superfici rocciose emergenti da substrati mobili, sia in substrati duri realizzati per concrezionamento a partire dalla biocenosi del Detritico Costiero.

Nella parte occidentale dell'Alto Adriatico e nel Golfo di Trieste ambedue queste formazioni coralligene non riescono a consolidarsi in quanto non vi sono substrati solidi a profondità adeguata e non si può in genere formare un fondo duro da concrezionamento a causa dell'accentuata sedimentazione che non permette l'attecchimento di specie incrostanti. Per tale motivo i substrati mobili del piano circalitorale del Golfo di Trieste sono in prevalenza fangosi o fangoso detritici e ospitano rispettivamente la biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri (FTC), le cui specie caratteristiche sono i policheti *Sternaspis scutata*, *Maldane glebifex*, i molluschi *Thracia convexa*, *Abra nitida*, gli echinodermi *Labidoplax digitata*, *Trachythyone tergestina*, e la biocenosi del Detritico Fangoso (DF). in alcune zone come quelle dei fondali antistanti a costa tra i Filtri di Aurisina ed il porticciolo Cedas, la componente detritica si arricchisce, senza riuscire però a trasformarsi in una vera biocenosi del Detritico Costiero (Orel, 1988).

11.3 Le comunità macrozoobentoniche monitorate

Il monitoraggio eseguito lungo il litorale di Barcola è consistito nell'esecuzione di un doppio campionamento lungo tre transetti ortogonali a costa, in corrispondenza dei punti di prelievo dei sedimenti (Fig. 11.1).



Fig. 11.1 – Stazioni di campionamento per la determinazione delle comunità macrozoobentoniche (Aleffi & Bettoso, 2001).

Per ogni transetto la prima stazione è stata posta a 120 m dalla linea di riva a una profondità di circa 8-9 m, la seconda a circa 400 m, a 16 m di profondità.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 46 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Dall'esame dei campioni raccolti sono stati identificati un totale di 128 taxa corrispondenti a un totale di 1250 individui. Il gruppo maggiormente rappresentato è quello dei policheti (65 taxa), seguito dai molluschi (31 taxa) e dai crostacei (21 taxa), mentre altri gruppi quali echinodermi e sipunculidi sono scarsamente rappresentati (Fig. 19). Complessivamente si può notare che le tre stazioni più prossime alla riva, presentano un numero di specie e soprattutto di individui più elevato rispetto a quelle situate più al largo e a profondità maggiore.

La più alta diversità (71 taxa) e densità (1418 ind. m⁻²) si registra nella st. 55, situata in prossimità del Parco marino di Miramare, nella quale le specie più abbondanti sono i policheti *Lumbrineris latreilli* e *Praxillella lophosetosa*. La st. 13, al largo della pineta di Barcola, presenta, invece, il minor numero di taxa (29) e di individui (189 ind. m⁻²). I campioni possono essere distinti in due raggruppamenti, costituiti dalle stazioni costiere da un lato e da quelle più al largo dall'altro, confermando una differenza significativa nell'assetto bionomico dei due gruppi di stazioni. I valori degli indici di diversità (H) e di equitabilità (J), hanno messo in evidenza una certa omogeneità dell'area, non vi sono infatti marcate differenze negli indici delle sei stazioni considerate. L'unica eccezione riguarda la st. 35, in cui entrambi gli indici risultano inferiori, a causa della forte dominanza del bivalve *Lucinella divaricata*, che raggiunge i 290 ind. m⁻² corrispondente al 43% dell'intera comunità. Il minor numero di specie, rispetto alle stazioni poste alla stessa profondità, può essere legato ad un'elevata presenza di sedimento grossolano, in cui generalmente l'abbondanza è ridotta e su cui il tipo di benna utilizzato tende a campionare in maniera meno efficiente. Nel complesso i valori degli indici denotano una buona strutturazione delle comunità, legata sia ad un'elevata ricchezza specifica sia ad una buona equiripartizione degli individui tra le specie.

Dall'esame delle affinità biocenotiche, calcolate per ciascuna stazione, si rileva la prevalenza, sotto costa, delle biocenosi tipiche di sedimenti sabbiosi e sabbioso-fangosi, quali la biocenosi delle Sabbie Fini Ben Calibrate (SFBC) e la biocenosi delle Sabbie Fangose di Moda Calma (SFMC); la presenza di quest'ultima biocenosi veniva messa in relazione da Ghirardelli et al. (1975) al fatto che questa fascia più interna rimanesse un po' esclusa dal circuito generale delle correnti del Golfo di Trieste e alla presenza di apporti di materiali fini provenienti dagli scarichi lungo il litorale; per tale motivo si ipotizzava che, con l'entrata in funzione della condotta sottomarina vi potesse essere sottocosta la scomparsa di specie caratteristiche delle SFMC quali *Loripes lacteus* e *Paphia aurea*, a favore di quelle della biocenosi SFBC, specie che tuttavia sono ancora presenti nei sedimenti costieri.

La st. 35 presenta, tra quelle più vicine alla costa, il valore di affinità più elevato per la biocenosi delle Sabbie Fini Ben Calibrate, oltre ad essere l'unica stazione in cui è stato ritrovato il cefalocordato *Branchiostoma lanceolatum*, specie che occupa esclusivamente substrati sabbiosi, ricchi di frammenti conchigliari (Rossi e Orel, 1968). E' da sottolineare che i valori di affinità, talvolta elevati, per la biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri, nelle stazioni in cui il sedimento è prevalentemente sabbioso, sono connessi all'accumulo di sedimento fangoso all'interno delle valve vuote di *Ostrea edulis*, presente anche con alcuni individui vivi. Questi nuclei fangosi sono sufficientemente ampi da permettere l'insediamento di specie pelofile di piccole dimensioni, quali ad esempio *Abra nitida*, oltre ad alcuni policheti.

Tra le stazioni al largo, dove la componente pelitica supera il 90%, la st. 37 presenta la più alta affinità per le biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri e del Detritico Costiero. Nell'area in esame sono state ritrovate specie considerate indicatrici di instabilità del ritmo sedimentario, quali *Tellina distorta* e *Corbula gibba*. La prima risulta più abbondante a minore profondità, mentre *Corbula* è presente

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 47 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

soprattutto nelle stazioni più al largo.

Le comunità bentoniche dei fondi mobili lungo il litorale di Barcola appaiono complessivamente ben strutturate, in equilibrio rispetto alle condizioni ambientali e comunque non influenzate dalle moderate attività antropiche della zona. Tali comunità risultano particolarmente ricche di specie e di individui alle profondità minori. Nelle sabbie e sabbie fangose della fascia vicina alla costa si rilevano soprattutto specie caratteristiche della biocenosi delle Sabbie Fini Ben Calibrate e delle Sabbie Fangose di Moda Calma. Più al largo la componente fangosa aumenta assieme alla quantità di detrito organogeno, costituito in massima parte da resti conchigliari e tubi di policheti; per tali motivi questa zona risulta avere maggiore affinità per la biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri, con percentuali rilevanti delle biocenosi del Detritico Costiero e in minor misura del Detritico Fangoso, come accade nella maggior parte di fondi circolitorali del Golfo di Trieste.

11.4 Le fanerogame marine

Riportando la sintesi bibliografica svolta da Brambati (2000), ai primi del '900 le praterie di *Cymodocea nodosa* - la fanerogama a maggior copertura nel Golfo (Orel e Mottola de Nordis, 1980) - si estendevano fino a 14 metri di profondità su substrati fangosi e 18 m su quelli sabbiosi (Giaccone e Pignatti, 1967). Da rilievi effettuati negli anni '70 del secolo scorso, nella fascia costiera tra Barcola e Miramare, le praterie di *Cymodocea nodosa* erano presenti lungo una fascia continua da 1-2 m di profondità fino ai 5-6 m (Ghirardelli et al., 1975). Vi era stato quindi un considerevole spostamento verso la costa della distribuzione batimetrica di questa fanerogama, arretramento legato principalmente alla riduzione della trasparenza delle acque del Golfo di Trieste, a causa dell'aumento delle sostanze in sospensione (Bressan, 1988).

Brambati (2000) segnala che alla data della ricognizione del rapporto si è notata un'ulteriore riduzione degli areali di *C. nodosa* lungo la riviera di Barcola: dai rilievi eseguiti tra la pineta di Barcola e la zona in prossimità del bivio per Miramare, infatti, la specie è risultata occupare delle aree molto limitate. Con riferimento alla planimetria di campionamento (cfr. Fig. 7.3) la fanerogama fu rilevata tra la st. 10 e la st. 11 e davanti agli stabilimenti balneari, a circa 6 m di profondità. Un'altra area è stata rilevata in prossimità del Cedas tra le stazioni 34 e 35 a 4,5 m di profondità, e tra le stazioni 42 e 43. Informazioni, quest'ultime, che confermerebbero la persistenza della pianta – seppur diffusa discontinuamente in questa zona, stante il rilievo svolto da Romeo (2008) che ne segnala la presenza, qui riportata in Fig. 7.5.

Sarà quindi inevitabile, a monte della progettazione definitiva, eseguire una ricognizione dell'area per mappare e definire con precisione gli areali in cui è eventualmente presente la fanerogama.

11.5 Considerazioni sugli aspetti critici legati ai possibili impatti generati dai lavori

In termini di valutazione di impatto, il complesso dell'ecosistema acquatico della zona in esame, ed in particolare modo le comunità bentoniche, potranno inevitabilmente risentire dei lavori per il ridisegno del litorale di Barcola, soprattutto nell'eventualità di un aumento della torbidità dell'acqua causata dai lavori e dalla movimentazione dei materiali. Infatti, un aumento del particolato sospeso, con conseguente riduzione della trasparenza e diminuzione della radiazione luminosa disponibile per la

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 48 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

fotosintesi, provoca una limitazione dello sviluppo del fitoplancton e quindi influisce anche sui livelli superiori della catena trofica. Considerato il fatto che a queste latitudini circa il 60% delle specie bentoniche presentano larve pelagiche (Crema et al, 1983), i popolamenti bentonici potranno, di conseguenza, essere influenzati anche dalle variazioni dell'ambiente pelagico sovrastante.

Per quanto riguarda il fondo, a una riduzione o scomparsa della macrofauna, al termine dei lavori segue normalmente una rapida ricolonizzazione del nuovo substrato, con specie a crescita rapida e alto tasso riproduttivo. Il recupero dell'intera comunità si verifica quando la sua struttura ritorna simile a quella delle zone circostanti non influenzate e tale recupero viene raggiunto dopo un periodo che può variare da 6 mesi a 2 anni in relazione alle caratteristiche ambientali della zona (Flint, 1979; Bonvicini Pagliai et al., 1985; Hily, 1983; Hurme e Pullen 1988, Harvey et al., 1998). In particolare, per la zona di Barcola, si può prevedere la scomparsa dei popolamenti tipici dei fondi sabbiosi presenti nei primi metri dalla riva, in quanto essi verranno completamente ricoperti o rimodellati a seguito della riconfigurazione del litorale fino a circa 50 m dall'attuale linea di costa. Anche gli organismi presenti sulle rocce frangifiutti scompariranno, ma in seguito essi potranno ricolonizzare le nuove strutture che verranno costruite, se le condizioni ambientali – com'è plausibile - rimarranno sostanzialmente simili a quelle originali.

Per quanto riguarda i fondali situati nella zona oltre i 50 m, costituiti da sedimenti prevalentemente fangosi, si potranno notare alcune modificazioni delle comunità bentoniche nel caso di un eventuale aumento del tasso di sedimentazione dovuto alla dispersione di materiali e alla generazione di polveri nella movimentazione del materiale lapideo. A seguito di un forte aumento della torbidità è probabile che le rare praterie a fanerogame, si riducano drasticamente; dovranno pertanto essere messe in atto tutte le dovute cautele per contenere gli impatti potenziali.

Sui substrati molli si potranno osservare situazioni diverse, a seconda della quantità e qualità del materiale sedimentato: una situazione di stress non molto intensa comporterà una diminuzione delle specie caratteristiche e un aumento di quelle ad ampia ripartizione ecologica (Zenetos et al., 1991). Con l'arricchimento della componente pelitica si potrà avere una rarefazione di specie legate alla presenza di sabbie, più a meno commiste a fango, e contestuale aumento di specie vasicole; nel caso estremo in cui si verificasse una moria degli organismi di fondo, a causa di un eccessivo interrimento, si avrà dapprima l'insediamento di poche specie opportuniste, ad elevato tasso riproduttivo e successivamente la colonizzazione di altre specie, per immigrazione di adulti dalle aree vicine e per insediamento larvale.

Ad ogni modo è da considerare il fatto che molti invertebrati marini tollerano livelli elevati di materiale in sospensione: alti livelli di seston riducono l'efficienza di filtrazione degli organismi sospensivori, ma influenzano in modo minore i depositivori (Probert, 1981). Inoltre vari autori (Nicholas et al., 1978; Peterson, 1985) hanno evidenziato che in alcuni casi le comunità di fondi mobili possono sopravvivere a un interrimento di circa 5-10 cm.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 49 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

12 VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI EQUILIBRIO STATICO DELLA SPIAGGIA

Poiché è stato assodato che l'area di progetto è esposta alle ondate di Libeccio, per contenere il riporto di ciottoli che va a formare le spiagge progettate entro le piccole baie a controllo strutturale e per evitare eventuali dispersioni del sedimento in occasione delle mareggiate, è necessario ricorrere a strutture di difesa costituite da frangiflutti distaccati paralleli a riva od obliqui sagomati a sigmoide con terminazione a forma di uncino. Il dimensionamento e forma sono legati alla caratteristica delle onde che incidono trasversalmente alla costa, di subire diffrazione e di curvare i fronti a partire dalle terminazioni a uncino, conferendo alla linea di riva di progetto una forma di equilibrio, secondo una configurazione parabolica.

La verifica di questo assetto viene fatta testando la forma parabolica che si viene a formare a seguito della diversa posizione del punto di diffrazione, come di seguito esposto.

12.1 Parametrizzazione del sistema parabolico delle baie

Il concetto di un modello di equilibrio per spiagge crenulate o di tipo promontorio-baia è stato introdotto da Krumbein (1944), seguito da Silvester (1960) e Yasso (1965). Sono stati infine Silvester e Hsu (1993) a ricondurre l'azione di controllo esercitata da un promontorio alla conseguente forma di equilibrio di una spiaggia di tipo parabolico. Questi ultimi hanno interpretato questo collegamento come il naturale funzionamento del sistema spiaggia, dandogli una finalità preferenziale di protezione della costa.

La forma di equilibrio della linea di riva di una spiaggia promontorio-baia si raggiunge grazie all'azione di protezione dalle onde offerta da un ostacolo che le diffrange, come un promontorio o una struttura aggettante, anche artificiale. Le onde, impossibilitate a proseguire il proprio percorso a tergo della struttura, subiscono diffrazione, ovvero propagano la propria energia estendendo i fronti secondo una rotazione che avviene a partire dalla sorgente di diffrazione puntiforme, costituita dal punto strutturale più esposto. Per la verifica geometrica del processo è necessario imporre una direzione d'onda predominante, che verrà poi utilizzata nell'elaborazione di Hsu et al. (1987, 1989a, 1989b, 1989c), Hsu ed Evans (1989) e Silvester e Hsu (1991, 1993) del modello della forma parabolica.

Per quest'ultimo è il punto di diffrazione che viene preso come fuoco della parabola. Per definire la forma sono necessari tre coefficienti (Silvester e Hsu 1991, 1993) che sono funzione dell'angolo che l'onda forma con la linea di controllo. La linea di controllo viene definita come la linea che si estende dal punto di diffrazione fino ad un punto di riferimento in corrispondenza del quale la linea di riva comincia a mantenere un'orientazione piuttosto costante e parallela alla direzione delle creste delle onde incidenti (Fig. 12.1).

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 50 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

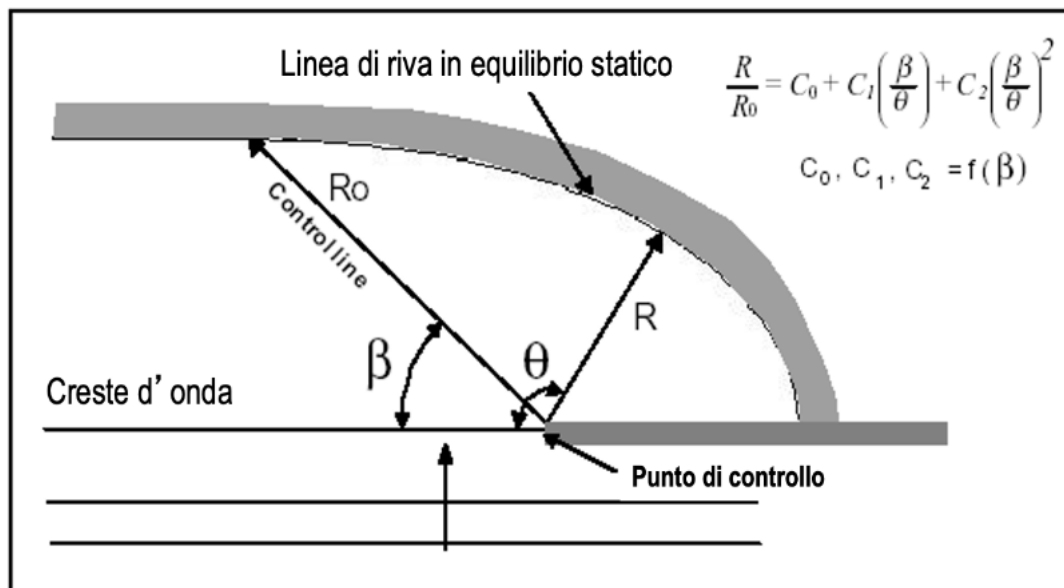


Fig. 12.1 – Parametrizzazione della configurazione parabolica causata da un punto di controllo strutturale

Il modello è espresso matematicamente dalla seguente equazione che permette di definire, in coordinate polari, la porzione della linea di costa che risulta parabolica:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad \text{dove}$$

R = distanza del punto di controllo da un punto P lungo la curva con valori di $\theta > \beta$

R₀ = distanza tra punto di controllo e punto in cui la spiaggia diviene asintotica, cioè non più curva come una parabola. La retta tracciata è detta linea di controllo

β = angolo definito dalla linea di controllo e la direzione delle creste d'onda

θ = angolo compreso tra R e la direzione delle creste d'onda.

C₀, C₁, C₂ = coefficienti determinati come funzione di β

Se $\beta = \theta$ allora $C_0 + C_1 + C_2 = 1$. L'angolo β controlla la forma della parabola mentre R₀ ne controlla le dimensioni.

Su questo assunto, si può applicare il modello considerando una struttura aggettante e distaccata da riva, supponendo le due direzioni di Libeccio entro le quali sono confinati i più frequenti casi estremi, ovvero 225° e 230° (cfr. Fig. 5.2).

12.2 Verifica del controllo strutturale più adeguato

Il modello parabolico è stato applicato su un disegno che prevede la realizzazione di un frangiflutti distaccato posto a circa **60-70 m circa** dalla linea di costa, con un riempimento di sedimento a tergo a formare una doppia baia speculare (tombolo) o una baia singola a mezzaluna (Fig. 12.2). La spiaggia artificiale in ciottoli che costituisce la parte ricreativa delle baie, viene accomodata sul fondale esistente

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 51 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

a formare una superficie curva di ampiezza che può variare da 5 a 20 m circa. La verifica riguarda la stabilità della forma curva, per effetto del controllo strutturale della terminazione del frangiflutto, con chiusura uncinata.

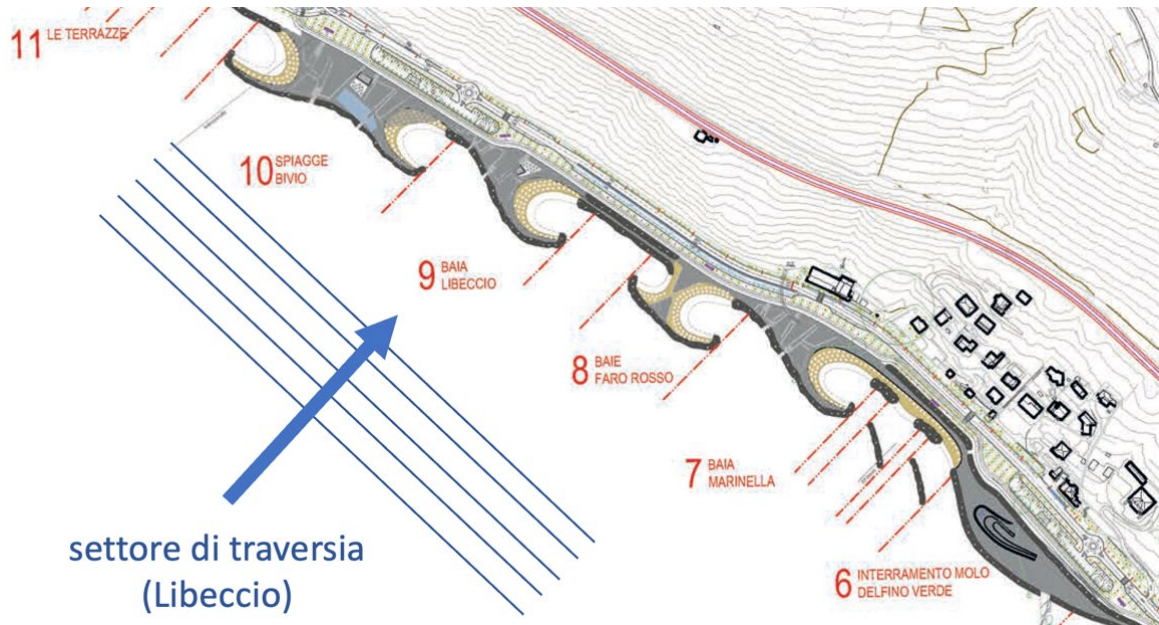


Fig. 12.1 – Disegno del sistema a baie artificiali con strutture di corrido (frangiflutti)

Partendo da questa configurazione è stato applicato il modello parabolico per verificare l'assetto della linea di riva in equilibrio statico a seconda della diversa direzione dei mari di traversia di Libeccio, che sono quelli che predispongono il controllo strutturale dell'area di Barcola (Fig. 12.3).

Come si può notare, considerando la traversia modale (225°) la curvatura di disegno della baia è perfettamente all'interno dell'estensione massima della rotazione parabolica di equilibrio, costituita dalla linea a tratteggio blu. Parimenti, i mari ruotati di 5° verso N (330°) risultano ancor più conservativi. Nell'applicazione non si è tenuto conto della chiusura ad uncino della protezione a mare: pertanto è plausibile supporre che la terminazione della linea di equilibrio ruoti ulteriormente fino a congiungersi con la terminazione stessa.

In sintesi, le configurazioni a baia, con la difesa strutturale così come proposta, sono perfettamente conservative e tali da mantenere stabile il riporto sedimentario che andrà a costruire le piccole spiagge a tasca, per le quali è comunque richiesto materiale di granulometria idonea, in grado di sopportare la massime sollecitazioni causate dalle mareggiate più estreme.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 52 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

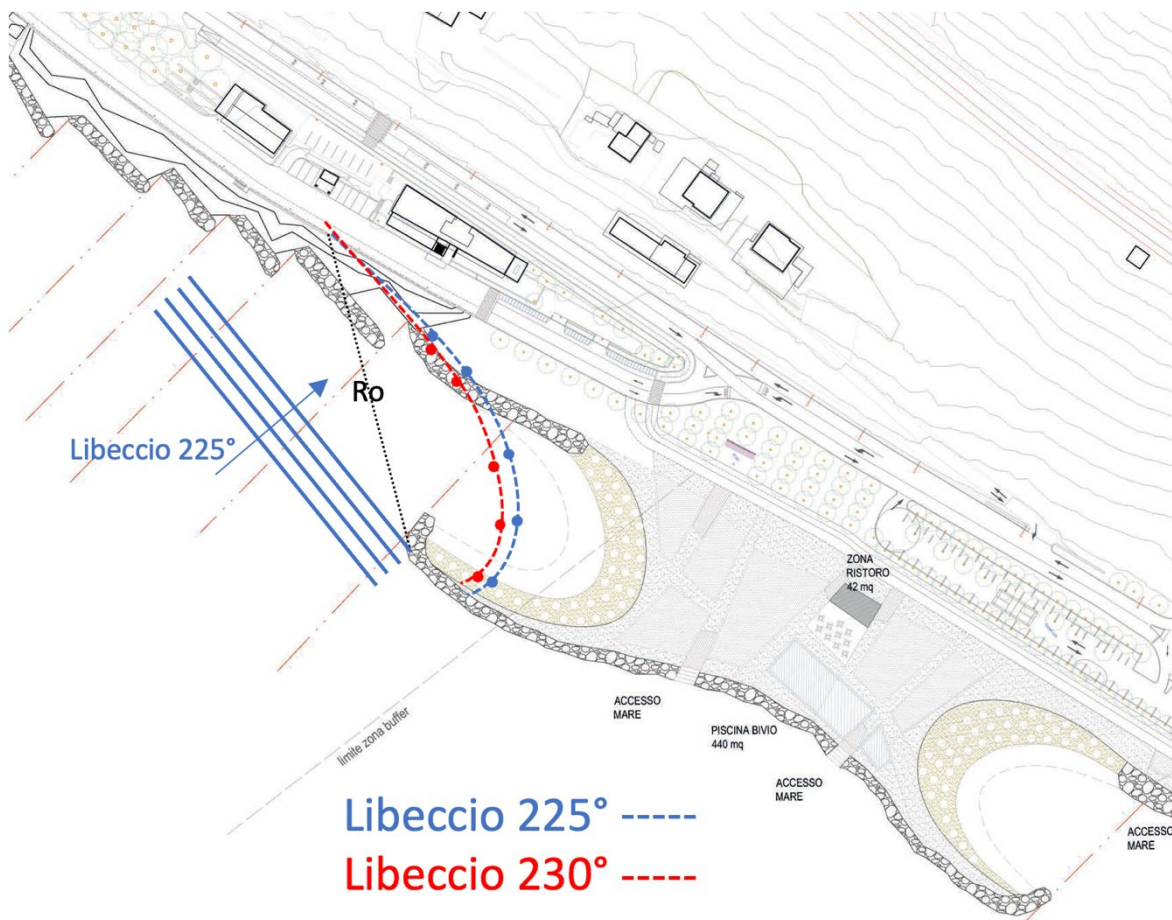


Fig. 12.2 – Test di configurazione parabolica per le due direzioni di Libeccio più frequenti.

13 IL MATERIALE SEDIMENTARIO

Per la realizzazione delle nuove spiagge addossate alle baie protette da scogliere, si consiglia di utilizzare materiale ghiaioso arrotondato (ciottoli fluviali) di composizione analoga al materiale naturalmente presente nei depositi di piede falesia naturale della costiera triestina, costituiti perlopiù da clasti di natura carbonatica e/o flyschoidi. Poiché i ciottoli arenacei flyschoidi sono di più difficile reperibilità, è sufficiente anche l'impiego delle sole litologie carbonatiche.

La pezzatura dei ciottoli può essere anche mista, nell'intervallo dimensionale compreso tra 2 e 6-8 cm al massimo, a garanzia di un calpestio agevole e per ridurre il disagio causato dalle maggiori dimensioni.

In generale le spiagge in ciottoli sono molto conservative, specie nei casi come quello in esame in cui gli effetti delle ondatazioni sono piuttosto limitati. L'uso di un fuso granulometrico nel campo della ghiaia ha il vantaggio di favorire la migrazione (conservazione) del sedimento verso terra, per l'effetto della componente onshore del moto ondoso, associata alla cresta dell'onda, che in acque basse ha una velocità orbitale superiore a quella del cavo, con componente di deriva opposta.

Si sconsiglia l'impiego di granulometrie inferiori a 1 cm.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 53 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

14 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Si ritiene opportuno, come schema di sintesi, riportare qui di seguito i valori di rilievo in relazione alle forzanti fisiche di cui tener conto in fase di progettazione:

1. Per tempi di ritorno di 25 e 50 anni (comunemente impiegati per il dimensionamento di opere di protezione in scogliera, quali difese radenti e pennelli), l'altezza d'onda di progetto (significativa spettrale) è dell'ordine di $2.3 \div 2.4$ m, con associato un periodo di picco di $6.5 \div 6.7$ s. Per la testata delle opere distaccate che possono essere ipotizzate a partire da una profondità di -5.0 m s.m.m., l'altezza d'onda non risulta limitata dal fondale. Il margine di incertezza del valore ottenuto può arrivare al 20%. Si suggerisce quindi di tenerne conto nei dimensionamenti, associando un valore cautelativo di $H_{max} = 2.8$ m.
2. L'escursione media di marea per Trieste risulta pari a 76 cm. Può essere, per semplificazione, considerata pari l'oscillazione in positivo e negativo di alta e bassa marea, ovvero ± 38 cm.
3. L'escursione di marea sizigiale massima può essere assunta pari a 120 cm. Anche in questo caso, per semplificazione, si può considerare pari l'oscillazione in positivo e negativo di alta e bassa marea, ovvero ± 60 cm.
4. Il valore di sovrizzo di mareggiata, che tiene conto di tutte le componenti, inclusa la marea astronomica, surge meteorologico e gli effetti di dinamica ondosa sottomarina (set-up), viene mutuato dal Piano di Gestione Rischio di Alluvioni (PGRA, 2021). Per il caso in esame si può assumere un valore medio tra i tempi di ritorno 30 e 100 anni, ovvero $H_{TOT} = 190$ cm.
5. Un valore cautelativo da considerare come scenario di innalzamento del livello del mare non dovrebbe essere inferiore a 50 cm. Si consiglia di utilizzare lo scenario IPCC SSP5-8.5 che per Trieste assume il valore mediano di +67 cm per l'anno 2100.

15 BIBLIOGRAFIA

- Aleffi, F., Bettoso, N., 2001: Il macrozoobenthos del litorale di Barcola (Golfo di Trieste, Nord Adriatico). *Hydrores* 21: 7-15.
- Aleffi F., Della Seta G., Goriup F., Landri P. e Orel G., 1996: Fattori climatici ed edafici e popolamenti bentonici dell'Adriatico Settentrionale e del Golfo di Trieste. In: *Evoluzione dello stato trofico in Adriatico: analisi degli interventi attuati e future linee di intervento*. Marina di Ravenna, 28-29 settembre 1995, 81-99.
- Alves, J.-H.G.M., Banner, M.L., 2003: Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography* 33, 1274–1298.
- Arcilla, A.S., J.A. Roelvink, B.A. O'Connor, A.J.H.M. Reniers and J.A. Jimenez, 1994: The Delta flume '93 experiment, *Proc. Coastal Dynamics Conf.* '94, 488-502.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 54 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

- Autorità Portuale di Trieste, 2014: Piano Regolatore del Porto di Trieste. Studio Ambientale Integrato – Quadro di Riferimento Ambientale, volume II. Rapporto Tecnico a cura di: Technital & AcquaTecno, 289 pp.
- Autorità Sistema Portuale del Mare Adriatico Orientale - Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2019: Piano Regolatore Portuale del Porto di Monfalcone. Variante Localizzata. Rapporto Tecnico a cura di: Modimar, SJS Engineering, Archest., Elaborato P.5.1.1 Studio Meteomarino, 79 pp.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16 th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 569-587
- Battjes, J.A. and M.J.F. Stive, 1985: Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, J. Geophys. Res., 90, No. C5, 9159-9167
- Battjes, J.A. and S. Beji, 1992: Breaking waves propagating over a shoal, Proc. 23 rd Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 42-50
- Beji, S. and J.A. Battjes 1993: Experimental investigation of wave propagation over a bar, Coastal Engineering, 19, 151-162
- Bertotti, L and L. Cavaleri, 1994: Accuracy of wind and wave evaluation in coastal regions, Proc. 24 th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 57-67
- Biolchi, S., Furlani, S., Covelli, S., Busetto, M., Cucchi F., 2016: Morphoneotectonics and lithology of the eastern sector of the Gulf of Trieste (NE Italy), Journal of Maps, 12:5, 936-946.
- Bonvicini Pagliai, A.M., Cognetti Varriale, A.M., Crema, R., Curini Galletti, M. and Zunarelli Vandini, R., 1985: Environmental impact of extensive dredging in a coastal marine area. Mar. Poll. Bull., 16(12), 483-488.
- Brambati, A., 2000: Studio di fattibilità dell'ampliamento del lungomare tra Barcola e il bivio di Miramare (Trieste). Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia – Direzione Regionale della viabilità e dei Trasporti. Rapporto Tecnico, 114 pp. + Allegati.
- Brambati, A. and Catani, G., 1988: Le coste e i fondali del Golfo di Trieste dall'Isonzo a Punta Sottile: aspetti geologici, sedimentologici e geotecnici. Hydrores, Anno V, n°6, 13-28, Trieste.
- Brambati, A. and Venzo, G.A., 1967: Recent sedimentations in the Northern Adriatic sea between Venice and Trieste. St. Trent. Sc. Nat., Sez A, Vol. XLV, n°2, 202-274.
- Brambati A., Catani G. and Marocco R., 1982: Il litorale sabbioso del Friuli-Venezia Giulia: trasporto, dispersione e deposizione dei sedimenti della spiaggia sottomarina. Boll. Soc. Adriat. di Sc., Vol. LXV, 1-32, Trieste.
- Brambati A., Ciabatti M., Fanzutti GP., Marabini F., and Marocco R., 1983: A new sedimentological textural map of the Northern and central Adriatic sea. Bollettino di Oceanologia Teorica ed Appl., Vol. I, n°4, 267-271.
- Brambati A., 1987: Studio sedimentologico e marittimo-costiero dei litorali del Friuli-Venezia Giulia Regione aut. Friuli-Venezia giulia, Dir. Reg. dei Lav. Pubbl., Servizio dell'Idraulica. Trieste, 67 pp.
- Cavaleri, L. and P. Malanotte-Rizzoli, 1981: Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. J. Geophys. Res., 86, No. C11, 10,961-10,973
- CERC, 1984: Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Techn. Rep. No. 4, Vol. I
- Chetta, C., 1992: Discarica di Barcola-Bovedo: analisi dell'impatto sui sedimenti dei fondali. Tesi di laurea in Sedimentologia, Università degli Studi di Trieste, Relatore A. Brambati.
- Colizza E., Fontolan G., Brambati A., 1996: Impact of coastal disposal site for inert wastes on the physical marine environment, Barcola-Bovedo, Trieste, Italy. Environmental Geology, 27, 270-285.
- Collins, J.I., 1972: Prediction of shallow water spectra, J. Geophys. Res., 77, No. 15, 2693-2707
- Crema R., Bonvicini Pagliai A.M., Cognetti Varriale AM., Morselli I. and Zunarelli Vandini R., 1983:

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 55 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

- Ruolo delle comunità macrobentoniche nel monitoraggio biologico dell'ambiente costiero. Atti del Convegno Eutrofizzazione dell'Adriatico - Ricerche e linee di intervento, Bologna 18-20 maggio 1983.
- Eldeberky, Y., 1996: Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands
- Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1995: Parameterization of triad interactions in wave energy models, Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, 140-148
- Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1996: Spectral modelling of wave breaking: Application to Boussinesq equations, J. Geophys. Res., 101, No. C1, 1253-1264
- Flint, R.W., 1979: Responses of freshwater benthos to open lake dredged spoils disposal in Lake Erie. Journal of Great Lakes Research, 5, 264-275.
- Folk R.L. & Ward W.C., 1957: Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 27, n°1, 3-26.
- Ghirardelli, E., 1981: La vita nelle acque. Il Nostro Universo, UTET, Torino: 610 pp.
- Ghirardelli E., Orel G. and Giaccone G., 1975: Esperienze sullo scarico a mare di Trieste. Metodologie e ricerche per la valutazione degli effetti sul bentos. Ingegneria ambientale, 4, 413-418.
- Giaccone G. and Pignatti A., 1967: Studi sulla produttività primaria del fitobentos nel Golfo di Trieste - II: la vegetazione del Golfo di Trieste. Nova Thalassia, 3 (2), 1-28.
- Giorgetti F., Mosetti F. and Macchi G., 1968: Caratteristiche morfologiche, fisiche e chimiche del fondo marino del Golfo di Trieste nell'area compresa entro la congiungente Punta Grossa-Bocche di Primero. Boll. Soc. Adriatica delle Sc., Trieste, Vol. LVI, n°1, 3-21.
- Goda, Y., H. Takeda and Y. Moriya, 1967: Laboratory investigation of wave transmission over breakwaters, Rep. port and Harbour Res. Inst., 13 (from Seelig, 1979)
- Harvey M., Gauthier D. e Munro J., 1998: Temporal changes in the composition and abundance of the macrobenthic invertebrate communities at dredged material disposal sites in the Anse a Beauvils, Baie des Chaleurs, Eastern Canada. Mar. Poll. Bull., 36(1), 41-55.
- Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8
- Hasselmann, K., 1974: On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, Bound.-layer Meteor., 6, 1-2, 107-127
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J.H. Allender and T.P. Barnett, 1985: Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models, J. Phys. Oceanogr., 15, 11, 1378-1
- Hily C., 1983: Macrozoobenthic recolonization after dredging in a sandy mud area of the bay of Brest enriched by organic matter. Oceanol. Acta, n° sp., 113-120.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N. and Herbers, T.H.C., 1989: A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. Coastal Engineering, 13 (1): 23-54.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N. and Ris, R.C., 1993: A spectral wave model for the coastal zone. 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28 1993, New York: pp. 630-641.
- Hsu, J.R.C. and Evans, C., 1989: Parabolic bay shapes and applications. Proc. of the Institution of Civil Engrs., 87 (2): 557-570.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 56 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

- Hsu, J.R.C., Silvester, R., and Xia, Y.M., 1987: New characteristics of equilibrium shaped bays. Proc. 8th Australasian Conf. on Coastal and Ocean Eng., ASCE, 140-144.
- Hsu, J.R.C., Silvester, R., and Xia, Y.M., 1989a: Static equilibrium bays: new relationships. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 115 (3): 285-298.
- Hsu, J.R.C., Silvester, R., Xia, Y.M., 1989b: Applications of headland control. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., 115 (3): 299-310.
- Hsu, J.R.C., Silvester, R., Xia, Y.M., 1989c: Generalities on static equilibrium bays. Coastal Eng., 12 (4): 353-369.
- Hurme A.K. and Pullen E.J., 1988: Biological effects of marine sand mining and fill placement for beach replenishment: lessons for other uses. In: (Duane D.B. ed.) Marine sand and gravel mining. Part.2., vol.7, 2, 123-136.
- Hydrores Sas, Ricerche Ambientali, 1989: Indagine preliminare sulla correntometria marina nell'avamposto di Trieste presso Barcola. Estratto da: Italposte, 1989.
- Italposte, 1989: Studio di interramenti a mare in Comune di Trieste per lo smaltimento dei materiali inerti. Comune di Trieste.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- IPCC AR6 Sea Level Projection Tool. 2021 Available online: https://sealevel.nasa.gov/data_tools/17.
- Janssen, P.A.E.M., 1991: Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, J. Phys. Oceanogr., 21, 1631-1642
- Kahma, K.K. and C.J. Calkoen, 1992: Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves, J. Phys. Oceanogr., 22, 1389-1405
- Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann, 1984: On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, J. Phys. Oceanogr., 14, 1271-1285
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen, 1994: Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge University Press, 532 p.
- Krumbein, W.C., 1944: Shore processes and beach characteristics. Beach Erosion Board, Tech. Memo. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. No. 3.
- Lira-Loarca A., Cáceres-Euse A., De-Leo F., Besio G., 2022: Wave modeling with unstructured mesh for hindcast, forecast and wave hazard applications in the Mediterranean Sea. Applied Ocean Research 122 (2022) 103118.
- Lugnani, E.: 1997/98 - Dinamica di popolazioni di Chithamalidae (Crustacea, Cirripedia) nel Golfo di Trieste. Tesi di laurea in Scienze Naturali, Università degli Studi di Trieste.
- Macchi G., 1968: Sulla composizione chimica dei sedimenti recenti nel Golfo di Trieste. Boll. Soc. Adriat. Sc. Nat., Vol LVI, Trieste, 22-41.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 57 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

- Madsen, O.S., Y.-K. Poon and H.C. Graber, 1988: Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 492-504
- Marocco R., 1989: Lineamenti geomorfologici della costa e dei fondali del Golfo di Trieste e considerazioni sulla loro evoluzione tardo-Quaternaria. Int. J. Spel. 18, 3-4, 87-110.
- Mastenbroek, C., G. Burgers, and P.A.E.M. Janssen, 1993: The dynamical coupling of a wave model in a storm surge model through the atmospheric boundary layer, J. Phys. Oceanogr., 23, 1856-1866.
- Mei, C.C., 1983: The applied dynamics of ocean surface waves, Wiley, New York, 740 p.
- Miles, J.W., 1957: On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3, 185-204
- Morelli C. & Mosetti F., 1968: Rilievo sismico continuo nel Golfo di Trieste Bollettino della Soc. Adriatica di Sc., Trieste, Vol. LVI n°1, 42-57.
- Mosetti F., 1972: Alcune ricerche sulle correnti nel Golfo di Trieste. Estr. Rivista italiana di Geofisica; Boll. dell'Associaz. Geofisica Italiana, Vol. XXI, n°1/2, 33-38.
- Mosetti F., 1988: Condizioni idrologiche della costiera triestina. Hydrores, Anno V, n°6, 29-38.
- Nelson, R.C., 1987: Design wave heights on very mild slopes: An experimental study, Civil. Eng. Trans., Inst. Eng. Aust., 29, 157-161
- Nicholas J.A., Rowe G.T., Clifford C.H., Young R.A., 1978: In situ experiments on the burial of marine invertebrates. Journal of Sedimentary Petrology, 48, 419-425.
- Onofri R., 1982: Caratteristiche geolitologiche e geomeccaniche del Flysch nella Provincia di Trieste. Studi Trentini di Scienze Naturali Vol. 59, 77- 103. Trento.
- Orel G., 1988: Aspetti della bionomia bentonica e della pesca del Golfo di Trieste con particolare riferimento ai fondali prospicienti il promontorio di Miramare. Hydrores, 6, 57-70.
- Orel G. and Mottola de Nordis M., 1990: The Gulf of Trieste – benthic ecosystem. Die obere Adria. Tagungsband des Symposium vom 27, April 1990, Graz.
- Orel G., Marocco R., Vio E., Del Piero D. and Della Seta G., 1987: Sedimenti e biocenosi bentoniche tra la foce del Po ed il Golfo di Trieste (Alto Adriatico). Bull. Ecol., 18 (2), 229-241.
- Pellicciari B., 1981: indagine idrogeologica sul territorio comunale di Muggia. Studio Argeo. 1981. Trieste.
- Pérés J.M., Picard J., 1964: Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Méditerranée. Rec. Trav. St. Mar. End., 31 (47), 5-137.
- Peterson C.H., 1985: Patterns of lagoonal bivalve mortality after heavy sedimentation and their paleoecological significance. Paleobiology, 11(2), 139-153.
- PGRA, 2016. Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), Distretto Idrografico delle Alpi Orientali, 2016. Relazione di Piano + Allegati.
- PGRA, 2021. Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni, 2021; Aggiornamento e revisione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni; Relazione Generale + Allegato I: Elementi tecnici di riferimento nell'impostazione del Piano; Distretto delle Alpi Orientali. Autorità di Bacino distrettuale delle Alpi Orientali. <https://sigma.distrettoalpiorientali.it/portal/index.php/direttiva-alluvioni/>
- Piano di Gestione dei bacini idrografici delle Alpi Orientali, 2010. 14 Bacino del Levante: Capitolo 1 - Descrizione generale delle caratteristiche del bacino idrografico. http://www.alpiorientali.it/documenti/list_doc/pub/PdP_doc/14_PG_levante_2010_02_24.pdf.
- Pirazzoli P.A., Tomasin A., 2009: Extreme sea levels on Adriatic coasts: a comparison on estimation methods. Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Tomo CLXVII (2008-2009) – Classe scienze matematiche, fisiche e naturali, pp. 53-82.
- Phillips, O.M., 1957: On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., 2, 417-445.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 58 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

- Pierson Jr., W.J. and L. Moskowitz, 1964: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, J. Geophys. Res., 69, 24, 5181-5190.
- Probert P.K., 1981: Changes in the benthic community of chine clay waste deposits in Mevagissey Bay following a reduction of discharges. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 61, 789-804.
- Querin, S., Crise, A., Deponte, D. and Solidoro, C., 2006: Numerical study of the role of wind forcing and freshwater buoyancy input on the circulation in a shallow embayment (Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea). Journal of Geophysical Research 111: doi: 10.1029/2006JC003611.
- Ris, R.C., 1999. Model convergence of SWAN in the Westerschelde estuary. WL|Delft Hydraulics, Report H3496.
- Romeo, R., 2008: Studio geofisico integrato ad alta risoluzione dei depositi marini e della struttura del substrato della riviera di Miramare (Golfo di Trieste). Tesi di dottorato, Dottorato di ricerca in Scienze Ambientali (Ambiente Fisico Marino Costiero), XX Ciclo, Università degli Studi di Trieste, 197 pp.
- Rossi S., Orel G., 1968: Nota preliminare sulle sabbie ad anfiosso da Punta Sdobba a Chioggia. Boll. Soc. Adriatica Sc. 56 (2), 234-242.
- Rossi S., Masetti F., Cescon B., 1968: Morfologia e natura del Golfo di Trieste Boll. della Soc. Adriatica di Scienze, Trieste, Val. LVI, n°2.
- Ruessink, B.G., D.J.R. Walstra and H.N. Southgate, 2003: Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches, Coastal Engineering, 48, 139-149
- Silvester, R., 1960: Stabilization of sedimentary coastlines. Nature, 188: 467-469.
- Silvester, R., and Hsu, J.R.C., 1991: New and old ideas in coastal sedimentation. Review in Aquatic Sciences, 4(4): 375-410.
- Silvester, R. and Hsu, J.R.C., 1993: Coastal stabilization: innovative concepts, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 578 pp.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D68S4MVH
- Snyder, R.L., Dobson, F.W., Elliott, J.A. and R.B. Long, 1981: Array measurement of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves, J. Fluid Mech., 102, 1-59
- Tolman, H. L., 1989: The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft Univ. of Techn., ISSN 0169-6548, Rep. no. 89-2, 72 pp.
- Specchi M. and Orel G., 1968: I popolamenti dei fondi e delle rive del Vallone di Muggia presso Trieste. Boll. Soc. Adriatica Sc., 56 (1), 137-161.
- Stravisi F., 1978: Circolazione nell'Adriatico Settentrionale per effetto della Bora. Atti del 2° Congresso della Ass. it. di Oceanologia e Limnologia, Genova 29-30 Novembre 1976.
- Stravisi F., 1983: Some characteristics of the circulation in the Gulf of Trieste. Thalassia Jugoslavica 19 (1-4), 355-363.
- Stravisi F., 1987: Observations of the surface currents in the Gulf of Trieste. Paper presented at the UNEP Workshop Jelly-fish Blooms in the Mediterranean Sea, Trieste, 1987.
- Stravisi F., 1992: Caratteristiche meteorologiche e marine del Porto di Trieste. Università degli Studi di Trieste - Dipartimento di Fisica Teorica. Rapporto Interno LC 92/2, 10 pp.
- Stravisi F., Battista G., 1992: Correntometria costiera nel Golfo di Trieste. Università degli Studi di Trieste - Dipartimento di Fisica Teorica. Rapporto Interno LC 92/4, 54 pp.
- Stravisi F., Pieri G., Berger P. - 1981 - Golfo di Trieste: risultati delle misure correntometriche 1951-

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 59 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

1954. Boll. della Soc. Adriat. di Scienze, vol. LXV, 23-35.
- Tempesta M., Treleani R., Ceschia C., Orel G., 1996: Proposta di mappatura dei fondi mobili della riserva marina di Miramare tramite lo studio del macrozoobenthos. *Hydrores*, 14, 57-62.
- Tolman, H. L., 1991: A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr.* 21, 782-797
- Tolman, H. L., 1992: Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1095-1111.
- Tolman, H. L., 1997: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151, 97 pp.
- Tolman, H. L., 1999: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.
- Tolman, H. L., 2009: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp.+ Appendices
- WAMDI Group, 1988: The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.
- Wesseling, P., 1992: An introduction to multigrid methods, John Wiley and Sons, Chichester.
- Westhuysen Van der, A.J., 2007: Advances in the spectral modelling of wind waves in the nearshore, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands
- Whitham, G.B., 1974: Linear and nonlinear waves, Wiley, New York, 636 p.
- Wu, J., 1982: Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, *J. Geophys. Res.*, 87, C12, 9704-9706
- Yan, L. 1987: An improved wind input source term for third generation ocean wave modelling, Scientific report WR-No 87-8, De Bilt, The Netherlands
- Yasso, W.E., 1965: Plan geometry of headland-bay beaches. *J. Geol.*, 73: 702-714.
- Zenetos A., Bei F., Nicolaidou A.: 1991: Erratic occurrence of benthic fauna in a shallow Mediterranean area: an indirect effect of manmade disturbance. *Mar. Poll. Bull.*, 22(12), 618-622.
- Zijlema, M., G.Ph. van Vledder and L.H. Holthuijsen, 2012: Bottom friction and wind drag for wave models. *Coastal Engineering*, 65, 19-26.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 60 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

16 APPENDICE – DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO SWAN

16.1 Generalità

Il modello SWAN, acronimo di Simulating WAve Nearshore, è un modello spettrale di terza generazione (Holthuijsen et al., 1993; Ris, 1999) che consente di ottenere stime realistiche dei parametri del moto ondoso in aree costiere, laghi ed estuari, a partire da condizioni assegnate di morfologia del fondo, vento e correnti.

È il successore del modello stazionario di seconda generazione HISWA (Holthuijsen et al., 1989), ed ha il grande vantaggio, rispetto a HISWA, di essere incondizionatamente stabile (schema totalmente implicito) e di descrivere i processi fisici in esso rappresentati con formulazioni allo stato dell'arte.

Il software è liberamente disponibile in rete e open source secondo i termini della GNU General Public License (<http://swanmodel.sourceforge.net/>). Si tratta di un software molto noto, sviluppato dall'Università di Delft a partire dal 1999, che è diffusamente impiegato da enti governativi, istituti di ricerca e società di consulenza in tutto il mondo e di cui è stata ampiamente dimostrata la validità e l'affidabilità sulla base di risultati ottenuti in svariate condizioni di applicazione, sia in laboratorio che in campo.

In particolare, le procedure implementate in SWAN consentono di descrivere i seguenti processi: rifrazione dovuta alle variazioni spaziali del fondale e alle correnti, shoaling dovuto al fondo e alle correnti, effetti di "blocking" e riflessione dovuti alle correnti, trasmissione/riflessione per la presenza di ostacoli. Esse consentono anche di simulare la diffrazione, adottando un approccio semplificato che fornisce risultati qualitativamente accettabili anche se non è adatto per descrivere accuratamente il fenomeno all'interno di porti o nell'intorno di ostacoli riflettenti.

Sono considerate le seguenti azioni generative e dissipative: generazione da vento, dissipazione per whitecapping, dissipazione per frangimento indotto dal fondale, dissipazione per attrito sul fondo, interazioni onda-onda, sia in acque profonde che basse.

Nella attuale versione (SWAN Cycle III v.41.31) il modello può essere utilizzato in condizioni stazionarie o non stazionarie. Può essere applicato sia a griglie di calcolo di tipo strutturato che non strutturato. Nel primo caso la griglia è composta da celle quadrilatera di tipo rettilineo o curvilineo, e può essere annidata in altre griglie per ottenere diversi livelli di risoluzione nel dominio di calcolo. Nel secondo caso la griglia è composta da elementi triangolari che possono essere di diversa forma e dimensione e quindi consentono di variare il grado di risoluzione nelle diverse aree del dominio senza ricorrere al "nesting".

16.2 Descrizione sintetica del modello

Le informazioni sullo stato della superficie del mare sono contenute nello spettro della densità di energia $E(\sigma, \theta)$, che sostanzialmente ripartisce l'energia del moto ondoso nel dominio delle frequenze σ e delle direzioni di propagazione θ (intese come direzione normale alle creste d'onda di ogni componente dello spettro).

Il modello SWAN, al pari della maggior parte degli altri modelli di moto ondoso, calcola l'evoluzione della densità d'azione d'onda $N(\sigma, \theta)$ nello spazio x e nel tempo t . La densità di azione è definita come $N = E/\sigma$ e, a differenza della densità di energia E , si conserva durante la propagazione anche

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 61 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

in presenza di correnti (Whitham, 1974).

L'evoluzione della densità di azione d'onda N è governata dall'equazione di conservazione (Mei, 1983, Komen et al., 1994):

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

Nell'equazione precedente il primo termine a primo membro indica la variazione nel tempo della densità di azione d'onda. Il secondo termine indica la propagazione dell'energia dell'onda nello spazio bidimensionale identificato dal vettore \vec{x} , essendo \vec{U} la velocità della corrente (assunta uniforme sulla verticale) e $\vec{c}_g = \partial \sigma / \partial \vec{k}$ la velocità di gruppo espressa in base alla relazione di dispersione $\sigma^2 = g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)$ dove \vec{k} è il vettore numero d'onda e d la profondità. Il terzo termine rappresenta l'effetto dello sfasamento della frequenza dovuta a variazioni di profondità e alle correnti. Il quarto termine rappresenta la rifrazione indotta dalle variazioni di profondità e dalle correnti. I termini c_{σ} e c_{θ} indicano le celerità di propagazione nel dominio spettrale (σ, θ). Il secondo membro dell'equazione contiene la quantità S_{tot} che è il termine sorgente/assorbente che rappresenta tutti i processi fisici che generano, dissipano o ridistribuiscono l'energia del moto ondoso.

In generale, in acque poco profonde, il termine S_{tot} è scomponibile in sei contributi:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}$$

che indicano, rispettivamente, la generazione dovuta al vento, il trasferimento non lineare di energia attraverso interazioni a tre e quattro onde, il decadimento dovuto a whitecapping, attrito sul fondo e frangimento indotto dal fondale.

16.3 Generazione dovuta al vento

Il trasferimento dell'energia del vento alle onde è descrivibile a mezzo della combinazione di una componente di risonanza (Phillips, 1957) e di una componente di feed-back (Miles, 1957). Nel primo caso l'input generativo, legato al meccanismo di trasferimento di energia dalle onde di pressione (del vento) alle onde di superficie, contribuisce agli stadi iniziali della crescita dell'onda e varia linearmente con il tempo.

Nel secondo caso, quando un'onda è stata ormai generata dal meccanismo di risonanza, essa distorce il profilo del vento al di sopra della superficie. Questo determina una "sovrapressione" sul lato sopravento della cresta dell'onda e una "depressione" sul lato sottovento. Ne consegue che dall'oscillazione della superficie, deriva una corrispondente oscillazione della pressione con conseguente trasferimento di energia all'onda. Questo trasferimento di energia è proporzionale all'energia stessa dell'onda, cosicché la sua crescita aumenta all'aumentare della sua altezza, configurandosi come una componente di crescita esponenziale nel tempo.

Sulla base dei suddetti due meccanismi generativi, la crescita dell'onda dovuta al vento è descritta in SWAN dall'equazione:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta)$$

In cui A e B dipendono da direzione e frequenza dell'onda e da direzione e velocità del vento.

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 62 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

L'espressione per il termine A è quella proposta da Cavaleri e Malanotte-Rizzoli (1981) corretta da Tolman (1992). Per il termine B , in SWAN sono possibili due opzioni. La prima è derivata da una precedente versione del modello WAM III ciclo (the WAMDI Group, 1988), ed è basata sui lavori di Snyder (1981) e Komen et al. (1984), in funzione della velocità di attrito U_* . Il coefficiente di drag per correlare U_* alla velocità del vento a 10 m di altezza (U_{10}) è tratto dai lavori di Wu (1982) e Zijlema et al. (2012). La seconda opzione per il termine B è derivata dal modello WAM IV ciclo (Komen et al., 1994). Essa è dovuta a Janssen (1991) e tiene conto esplicitamente dell'interazione tra il vento e le onde considerando gli effetti dello strato di interfaccia atmosferico e la dimensione caratteristica delle rugosità della superficie del mare. In SWAN il corrispondente set di equazioni è risolto (così come nel modello WAM) mediante la procedura iterativa proposta da Mastenbroek et al. (1993).

16.4 Termini dissipativi

La componente di dissipazione di energia è rappresentata, come si è detto, dalla somma di tre contributi: il whitecapping $S_{ds,w}$, l'attrito sul fondo $S_{ds,b}$ e il frangimento indotto dalla profondità del fondale $S_{ds,br}$.

Il whitecapping è principalmente controllato dalla ripidità dell'onda. Negli attuali modelli di terza generazione, le formulazioni del whitecapping sono generalmente basate sul modello proposto da Hasselmann (1974), modificato dal WAMDI group (1988). Secondo tale approccio l'equazione che governa il whitecapping è la seguente:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{\bar{k}} E(\sigma, \theta)$$

in cui Γ è un coefficiente dipendente dalla ripidità dell'onda, k è il numero d'onda e $\bar{\sigma}$ e \bar{k} rappresentano una frequenza media e un numero d'onda medio (cfr. the WAMDI Group, 1988). Il valore di Γ può essere stimato con la formulazione di Komen et al. (1984) valida per condizioni di mare completamente sviluppato. Poiché SWAN prevede due formulazioni per la generazione da vento, sono possibili conseguentemente due modi per calcolare Γ . Il primo segue l'approccio proposto da Komen et al. (1984) utilizzato anche nel modello WAM III ciclo. Il secondo segue un adattamento di tale espressione basato sul lavoro di Janssen (1991), utilizzato nel modello WAM IV ciclo.

SWAN prevede anche la possibilità di calcolare il whitecapping secondo la formulazione alternativa proposta da Van der Westhuysen (2007), basata a sua volta sul lavoro di Alves and Banner (2003). Questa formulazione correla le dissipazioni per whitecapping alle interazioni non lineari nel gruppo d'onde, e quindi il termine dissipativo dipende da quantità che sono locali nello spettro delle frequenze, invece che distribuite su tutto lo spettro come nella formulazione di Komen (1984). In SWAN è possibile l'uso di un adattamento della formulazione di Van der Westhuysen (2007) che prevede però che il termine di generazione da vento sia calcolato secondo l'espressione proposta da Yan (1987).

La dissipazione per attrito si sviluppa per interazione tra le onde superficiali ed il fondo in acque poco profonde, e dipende da numerosi fattori tra i quali l'attrito vero e proprio nello strato turbolento sul fondo, il movimento del materiale di fondo, la percolazione in fondali porosi, e la dispersione sulle irregolarità del fondo. Per mari delle piattaforme continentali con fondali sabbiosi il fattore preponderante è l'attrito sul fondo (Bertotti e Cavaleri (1984)), ed in SWAN tale componente è calcolata secondo la formulazione generale:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 k d} E(\sigma, \theta)$$

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 63 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

in cui C_b è un coefficiente di attrito. Le formulazioni implementate in SWAN per il calcolo di tale coefficiente sono: il modello empirico JONSWAP di Hasselmann et al. (1973), il modello di attrito di Collins (1972) e il modello di viscosità turbolenta di Madsen et al. (1988). SWAN non tiene conto invece dell'effetto della corrente sulla dissipazione di energia del moto ondoso per attrito sul fondo. Per quanto riguarda la dissipazione per frangimento, SWAN calcola la dissipazione totale, cioè integrata su tutto il dominio dello spettro, seguendo un approccio che si basa sul modello proposto da Battjes and Janssen, 1978. Il modello di Battjes and Janssen è stato sviluppato in termini spettrali da Eldeberky and Battjes (1995) e porta ad un'espressione che, includendo le direzioni, è del tipo:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

in cui E_{tot} è l'energia totale dell'onda e $D_{tot} < 0$ è la componente dissipativa dell'energia totale dovuta al frangimento secondo il modello di Battjes and Janssen, 1978. Il valore di D_{tot} dipende sostanzialmente dal parametro di frangimento $\gamma = H_{max}$ in cui H_{max} è il valore massimo possibile dell'altezza della singola onda in corrispondenza della profondità d . SWAN prevede l'opzione di un parametro di frangimento γ sia costante che variabile, rendendo possibile in quest'ultimo caso la calibrazione di ulteriori parametri che riproducano la formulazione di Nelson (1987) e di Ruessink et al. (2003), per tener conto della pendenza del fondale o della ripidità dell'onda al largo. Il valore costante suggerito in SWAN è $\gamma = 0.73$, che corrisponde al valore medio valutato sulla base del dataset di Battjes and Stive (1985).

16.5 Interazioni non lineari onda-onda

Il significato fisico delle interazioni onda-onda è dato dal fatto che le componenti dell'onda in risonanza tra loro scambiano energia, ridistribuendola nello spettro. In acque profonde e intermedie risultano importanti le interazioni a quattro onde (le cosiddette "quadruplette") mentre in acque basse assumono maggiore importanza le interazioni a tre onde (le "triplette").

In acque profonde le quadruplette trasferiscono energia dalla frequenza di picco verso le frequenze inferiori (riducendo così la frequenza di picco) e verso le frequenze superiori (dove l'energia è dissipata dal whitecapping). In acque basse, l'effetto delle triplette è quello di trasferire energia dalle frequenze più basse alle frequenze più alte, generando spesso armoniche di frequenza più elevata (Beji and Battjes, 1993).

Il calcolo delle quadruplette è computazionalmente molto oneroso e, in SWAN, è effettuato in modo semplificato utilizzando il metodo "Discrete Interaction Approximation" (DIA) di Hasselmann et al. (1985), che è risultato essere molto efficace nel descrivere le caratteristiche generali dell'evoluzione di uno spettro d'onda (Komen et al. (1994).

Il calcolo delle triplette avviene invece con il metodo "Lumped Triad Approximation" (LTA) proposto da Eldeberky (1996), che rappresenta un'evoluzione del metodo "Discrete Triad Approximation" (DTA), proposto da Battjes and Beji (1992) e Arcilla et al. (1994).

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 64 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

16.6 Approccio numerico

La risoluzione dell'equazione di conservazione dell'azione d'onda avviene in SWAN con il metodo delle differenze finite. La discretizzazione nel tempo è ottenuta con il metodo implicito di Eulero, che garantisce incondizionata stabilità alla soluzione numerica. La discretizzazione nello spazio geografico avviene con uno schema "upwind" del primo ordine, con specifici accorgimenti per limitare la diffusione numerica, ad esempio legata alla rifrazione per effetto della batimetria o delle correnti. La discretizzazione nello spazio spettrale (σ, θ) è ottenuta invece con uno schema alle differenze del secondo ordine, con specifici accorgimenti per controllare le oscillazioni numeriche che si possono sviluppare in presenza di forti gradienti della densità di azione sia nello spazio delle direzioni che in quello delle frequenze. Il sistema lineare risultante è risolto con un metodo iterativo del tipo Gauss-Seidel (Wesseling, 1992).

La risoluzione di una simulazione stazionaria è ottenuta in SWAN con un processo iterativo, che può essere visto come una simulazione variabile nel tempo che adotta uno pseudo time-step ed è prolungata fino al raggiungimento di condizioni di regime. Il criterio di convergenza utilizzato si basa sulle variazioni dell'altezza d'onda significativa.

A differenza della maggior parte dei modelli di moto ondoso spettrali di terza generazione, il metodo numerico adottato in SWAN è incondizionatamente stabile, cioè non è subordinato al rispetto di criteri di stabilità CFL. Il solutore si basa sulla tecnica iterativa Gauss-Seidel a quattro direzioni (di tipo simmetrico), che tipicamente risulta essere molto efficace per griglie regolari. Inoltre, tale metodo è particolarmente robusto ed adatto ad applicazioni pratiche in ambiti costiere poco profondi, dal momento che la risoluzione della mesh e il time step di calcolo sono mutuamente indipendenti.

Il modello SWAN può essere eseguito in calcolo parallelo su cluster di computer a memoria distribuita, utilizzando lo standard MPI. Su singole macchine con processori multi-core, l'accelerazione computazionale può essere ottenuta utilizzando l'opzione di multithreading che adotta lo standard OpenMP.

16.7 Condizioni iniziali e al contorno

In SWAN le componenti dell'onda incidente sul contorno aperto sopraflutto devono essere specificate mediante uno spettro bi-dimensionale (discretizzato in frequenza e direzione). Sono disponibili diverse opzioni:

- Uno spettro parametrico uni-dimensionale in frequenza di cui è specificata la distribuzione direzionale, ad esempio uno spettro di tipo Jonswap.
- Uno spettro discretizzato uni-dimensionale in frequenza, di cui è specificata la distribuzione direzionale. Questa condizione è spesso desunta da misure in sito.
- Uno spettro discretizzato bi-dimensionale. Questa condizione è generalmente ottenuta da altre simulazioni con SWAN o con altri modelli (es. WAM e WAVEWATCH III)

Per lo spettro parametrico unidimensionale sono previste le formulazioni Pierson-Moskowitz (Pierson and Moskowitz, 1964), Jonswap (Hasselmann et al., 1973) e una distribuzione di tipo Gaussiano.

In caso di simulazioni non stazionarie, gli spettri iniziali sono calcolati sulla base delle velocità del vento locali utilizzando la curva di crescita in acque profonde proposta da Kahma e Calkoen (1992), limitata a valori di altezza significativa e frequenza di picco in base alle valutazioni di Pierson and

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 65 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	

Moskowitz (1964). Il passo spaziale della griglia, medio sul dominio di calcolo, è utilizzato come fetch per il calcolo dell'effetto del vento locale. La forma dello spettro è quella Jonswap di default, per la quale si assume una distribuzione direzionale del tipo $\cos^2(\theta)$ centrata attorno alla direzione locale del vento.

In una simulazione stazionaria, il primo stato del processo iterativo è per default determinato con una simulazione SWAN in modalità di seconda generazione.

È comunque possibile ottenere la condizione iniziale per una simulazione non stazionaria a partire da una precedente simulazione (stazionaria o non stazionaria).

REDATTO: GF	COMMESSA: BARCOLA GRANDA – PROGETTO CO.RE	REVISIONE: REV01	Pagina 66 di 66
VERIFICATO: GF	FILE: MIGE relazione Barcola Granda Progetto CoRe rev01.docx	DATA: Febbraio 2024	