



**ISPRA**

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

# **IMPLEMENTAZIONE DI MODELLI NUMERICI PER L'ANALISI DEI PROBLEMI DELLA FASCIA COSTIERA PROSPICIENTE LA RISERVA NATURALE DELLA SENTINA**

*(Comune di S. Benedetto del Tronto - AP)*

## ***FASE B***



**ISPRA- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca sull'Ambiente**  
**Dipartimento Tutela Delle Acque Interne e Marine**  
**Servizio Difesa delle Coste - *Settore Ingegneria Costiera***

Redatto da:

*Approvato Il Dirigente*

*Antonello Bruschi, Francesco Lalli, Rodolfo Lama, Luca Liberti,  
Stefania Mandrone, Valeria Pesarino*

## INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. CARATTERIZZAZIONE TERRITORIALE .....	5
2.1 La Riserva Naturale Sentina .....	5
2.1.1 Istituzione della Riserva Naturale Sentina .....	6
2.1.2 Uso del suolo.....	7
2.1.3 Vegetazione .....	7
2.1.4 Fauna .....	8
2.1.5 Delibera Regionale n. 156 .....	9
2.2 Caratteristiche dell'ambiente fluviale e marino costiero.....	11
3. STUDIO DELLE FORZANTI E DELLE CARATTERISTICHE FISICHE .....	14
3.1 Clima ondoso .....	14
3.2 Propagazione del moto ondoso a riva.....	16
3.3 Calcolo della profondità di chiusura .....	16
3.4 Indagini granulometriche.....	17
3.5 Analisi storica della linea di riva.....	21
3.6 Analisi del flusso di energia associato al moto ondoso .....	22
4. PROPOSTE DI INTERVENTO.....	24
4.1 Procedura di selezione della tipologia di intervento.....	24
4.1.1 Metodo di Kobayashi et al. ....	24
4.1.2 Meccanismi di protezione di un litorale (ICCE - 1992) .....	28
4.1.3 Confronto dei risultati .....	31
4.2 Ripascimento .....	32
4.2.1 Coefficiente di overfill .....	32
4.2.2 Coefficiente di ripascimento.....	33
4.2.3 Calcolo del volume di ripascimento .....	34
4.3 Ripascimento protetto.....	38
4.3.1 I° ipotesi di intervento: ripascimento protetto da un sistema di barriere sommerse .....	38
4.3.2 II° ipotesi di intervento: ripascimento protetto da un sistema di Pennelli.....	42
5. ANALISI DELLE POSSIBILI SOLUZIONI DI INTERVENTO .....	44
5.1 Applicazione di un modello di morfodinamica costiera: GENESIS .....	44
5.1.1 Taratura del Modello Genesis .....	44
5.1.1.1 Scelta delle linee di costa storiche .....	44
5.1.1.2 Creazione del file di onde.....	44
5.1.1.3 Condizioni al contorno .....	44
5.1.1.4 Inserimento delle opere di difesa .....	45
5.1.1.5 Inserimento dei parametri sedimentologici e caratteristiche della spiaggia .....	45
5.1.2 Scenari di simulazione .....	45
5.1.3 Risultati delle simulazioni .....	46
5.2 Calcolo delle superfici e dei volumi degli interventi ipotizzati e computo metrico .....	52
5.3 Analisi dell'idrodinamica costiera: applicazione del modello DELFT.....	56
5.3.1 Studio idrodinamico e di trasporto solido in condizioni meteo-marine estreme .....	56
5.3.2 Definizione del dominio di calcolo .....	57
5.3.3 Scelta delle mareggiate di riferimento .....	59
5.3.4 Risultati delle simulazioni .....	64
6. CONCLUSIONI.....	74
1.	

## INTRODUZIONE

Il presente studio è finalizzato all'individuazione di un'ipotesi preliminare di massima per interventi di difesa della costa nel tratto di litorale marchigiano prospiciente la Riserva Naturale Sentina.

La Riserva, di particolare pregio naturalistico, istituita nel mese di Dicembre 2004 è soggetta a gravi problemi di erosione (**Figura 1**) che compromettono l'equilibrio della duna (1,7 km di duna piatta) e della vegetazione e fauna ad essa legata.



**Figura 1 – Erosione: foto del tratto di litorale antistante la Riserva Naturale Sentina (giugno 2009)**

Il tratto di litorale antistante la Riserva Naturale Sentina si estende nel territorio comunale di S. Benedetto del Tronto (AP) dalla Foce armata che delimita la sponda marchigiana della Foce del fiume Tronto, fino allo sbocco del Fosso collettore posto a circa 1,5 km più a Nord. Tale litorale, prevalentemente basso e sabbioso, confina sia a Nord che a Sud con tratti di costa protetti che contribuiscono ad accrescere l'attività erosiva del moto ondoso, nel tratto oggetto di studio, quantificabile in circa 100 m di arretramento medio della linea di riva, nel corso degli ultimi cinquant'anni (vedi par.3.5).

Il presente lavoro si articola nei seguenti studi:

- a. Caratterizzazione territoriale;
- b. Valutazione del clima ondoso a largo utilizzando i dati rilevati alla Boa RON di Ortona;
- c. Propagazione del moto ondoso a costa e valutazione del flusso di energia ad esso associato;
- d. Evoluzione della linea di costa dal 1894 al 2008;
- e. Indagini granulometriche su sedimenti di spiaggia emersa e sommersa (rilievi ICRAM – Settembre 2007).

- f. Indagini delle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche della spiaggia (Rilievi UNICAM- 18 Dicembre 2008);
- g. Studio delle ipotesi di intervento di difesa del tratto di litorale in esame con impiego del modello Genesis per una previsione a 30 anni dell'evoluzione della linea di riva;
- h. Utilizzo del modello Delft3D finalizzato allo studio degli effetti di alcune mareggiate significative per differenti intensità e direzioni di provenienza.
- i. Dimensionamento preliminare delle opere di progetto e stima dei costi delle ipotesi di intervento.

## 2. CARATTERIZZAZIONE TERRITORIALE

### 2.1 La Riserva Naturale Sentina

La Riserva Naturale Sentina è stata istituita con la Delibera del Consiglio Regionale n. 156 del 14/12/2004 ed è gestita dal Comune di San Benedetto del Tronto attraverso un apposito Comitato di Indirizzo. La Riserva (**Figura 2**) che ha una superficie di 177,5 ha e ricade nell'unità fisiografica (cod. di riferimento Regione Marche) compresa tra il Porto di S. Benedetto del Tronto ed il Fiume Tronto, si estende per un tratto di costa di circa 1,7 km all'interno della zona alluvionale ed è formata da un cordone sabbioso con morfologia di duna piatta, dietro la quale si rinvengono piccoli spazi di ambienti umidi salmastri ed una vasta pianura delimitata ad Ovest dalla linea ferroviaria.

Dal punto di vista geo-morfologico, non può essere disgiunta da quella immediatamente a Sud del Tronto, con la quale costituisce un complesso costiero di grande valenza storico-geografica unitaria fin dall'antichità.

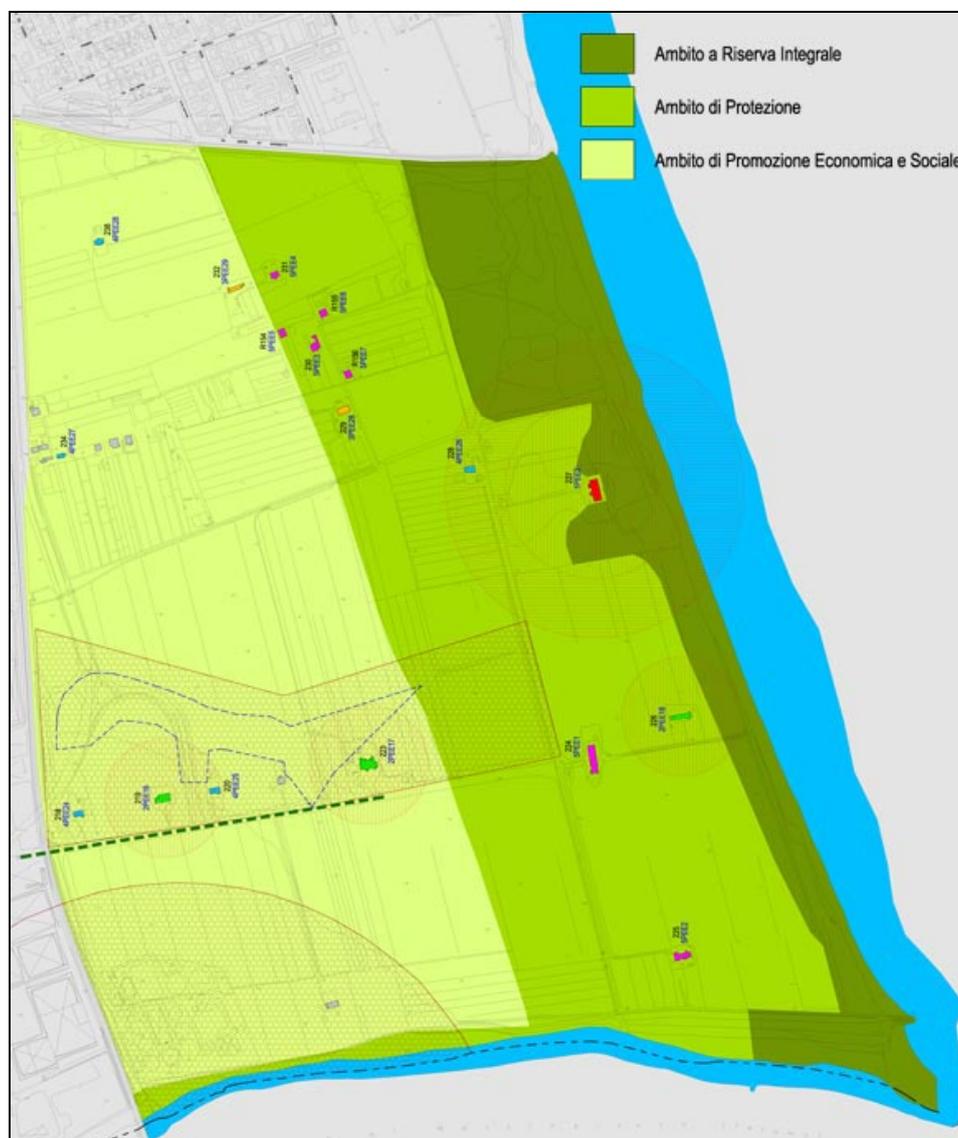
L'area in esame presenta un'alternanza di porzioni di territorio a più spiccato valore naturalistico con altre maggiormente condizionate dalle attività antropiche.



**Figura 2 - Inquadramento dell'area di studio.**

### 2.1.1 Istituzione della Riserva Naturale Sentina

La Riserva Naturale Sentina è stata istituita ai sensi dell'articolo 11, comma 2, della L.R. 15/1994 (Delib n. 156 del Consiglio Regionale delle Marche 14 DICEMBRE 2004, n. 212). Con riferimento all'Art. 2 della Delibera Regionale n. 156 è specificato che la Riserva in oggetto è suddivisa in tre ambiti (**Figura 3**):



**Figura 3 – Zonizzazione della Riserva Naturale Sentina**

- una *Zona di Protezione Integrale* degli ambiti naturali più fragili;
- una *Zona di Tutela* con lo scopo di mitigare gli impatti su habitat e specie;
- un' *Area di Promozione Economica e Sociale* delle attività antropiche.

Inoltre, una parte del territorio della Riserva (121 ha) è stato definito *Zona a Protezione Speciale (ZPS)* ai sensi della Direttiva Uccelli 79/409/CEE e un'altra parte (90 ha) *Sito di Interesse Comunitario (SIC)* ai sensi della Direttiva Habitat 92/43/CEE.

Il litorale antistante la Riserva rappresenta nell'area uno dei pochi tratti sabbiosi non protetto da opere di difesa costiera ed è una zona umida importante dal punto di vista ambientale per la sosta dell'avifauna migratoria.

### 2.1.2 Uso del suolo

L'area della Riserva Naturale è occupata per la quasi totalità da territorio agricolo caratterizzato dalla presenza di tipiche case rurali.

Il regime generalmente adottato nella zona è di tipo arativo a carattere intensivo: vite, olivo e seminativo nelle aree collinari; colture orticole, *Zea mays* e vivai nelle strette valli fluviali; piccoli impianti di ibridi di pioppo per pasta di cellulosa presso alcuni corsi d'acqua.

La definizione delle categorie di copertura è basata sul sistema di classificazione del *Corine Land Cover* ed in particolare:

1. aree agricole non irrigate a prevalenza di colture erbacee;
2. aree agricole non irrigate a prevalenza di colture arboree;
3. aree agricole a struttura complessa non irrigate (compresenza di colture erbacee differenti e colture permanenti);
4. aree agricole irrigabili su suoli alluvionali di fondovalle (colture erbacee, orticoltura, vivai e colture arboree);
5. aree marginali non produttive a prevalenza di vegetazione spontanea (fasi di transizione cespuglieto – bosco e vegetazione ripariali);
6. corpi d'acqua artificiali;
7. aree urbanizzate e pertinenze.

### 2.1.3 Vegetazione

La flora che si rinviene nella Riserva non presenta specie tali da poterle ritenere in assoluto rare in quanto la maggior parte è ampiamente distribuita nel Mediterraneo, alcune anche lungo le coste atlantiche. La particolarità di questa flora è rappresentata dalla presenza di alcune specie che hanno avuto difficoltà a riprodursi in altri siti della costa adriatica, a causa della forte antropizzazione subita dai delicati ambienti dunali e retrodunali.

La conservazione risulta prioritaria per quelle specie vegetali inserite nella scheda descrittiva del SIC (Natura 2000): *Agropyron pectinatum*; *Artemisia caerulescens*; *Limonium vulgare*; *Oenanthe lachenalii*; *Rorippa palustris* var. *Pupilla*; *Salicornia patula*.

#### – Vegetazione coltivi abbandonati

Tra le aree coltivate e quelle di recente abbandono, la vegetazione a *Elytrigia atherica*, talvolta con *Glycyrrhiza glabra*, occupa le zone incolte e di transizione. Il *Limonium serotinum*, attualmente estinto dalla zona, si rinviene tra la vegetazione *Elytrigia athericae-Artemisietum coerulescentis*, che rappresenta aspetti prativi a debole alofilia sviluppatasi in posizioni depresse rispetto alle formazioni precedenti.

L'aggruppamento a *Spergularia marina* e *Polypogon monspeliensis* è situato nelle aree di recente abbandono dalle attività agricole, sopra substrati sabbioso-limosi e parzialmente inondati nel periodo invernale. La vegetazione ad *Inula viscosa* comprende le associazioni di vegetazione postcoltura sui terreni più sabbiosi e più elevati dell'area della Sentina come *l'Inulo viscosae-Agropyron repentis*.

#### – Vegetazione terreni retrodunali

E' rappresentata dalla vegetazione subnitrofila a *Halimione portulacoides* che si sviluppa sui substrati limoso-argillosi, al margine delle zone depresse occupate dalla vegetazione a *Salicornia patula*: una vegetazione terofitica, aperta e pioniera, che si sviluppa sui substrati sabbioso-limosi ricoperti d'acqua durante l'inverno e che si screpolano nella stagione calda a seguito delle forti

evaporazioni. Quindi, sul terreno si deposita il sale contenuto nell'acqua per cui le piante che vi si sviluppano presentano un notevole grado di alofilia.

La vegetazione a *Cripsis aculeata*, terofitica, alonitrofila, con caratteristiche pioniere, si sviluppa su substrato leggermente convesso o pianeggiante formando un tappeto denso.

La vegetazione a *Salsola soda* terofitica e alonitrofila si sviluppa su consistenti depositi di resti organici trasportati dal mare.

La prateria a *Puccinellia distans* si sviluppa sul substrato sabbioso-limoso con una crosta di sale in superficie; di questa vegetazione si rilevano due varianti legate alla micro-morfologia del substrato: la prima, che è indicata da *Salicornia patula* e da *Suaeda maritima*, si sviluppa in aree leggermente depresse e con consistente accumulo di sali, la seconda è invece legata a substrati più elevati e con scarsa presenza di sali.

Nelle zone retrodunali maggiormente depresse e pertanto inondate per lungo tempo da acque con elevata concentrazione di sali si formano densi tappeti in cui *Aeluropus litoralis* domina nettamente. Nelle piccole depressioni retrodunali si rinvengono densi popolamenti a *Juncus maritimus*. In una sola zona è stato possibile rinvenire la vegetazione a *Carex divisa* alla quale si uniscono poche piante con scarso significato fitosociologico.

#### – Vegetazione acque salmastre

È caratterizzata dalla presenza della tipica vegetazione a *Ruppia maritima* che si sviluppa in piccoli specchi d'acqua salmastra.

#### – Vegetazione psammofila

La vegetazione psammofila o delle sabbie, per la sua specializzazione in funzione dell'ambiente in cui si sviluppa, che è quello degli ecosistemi litorali ed in particolare quelli dunali dove innumerevoli fattori esercitano un'azione limitante per tutte le forme di vita, è rappresentata dalla vegetazione a *Cakile maritima*, presente nel primo tratto di spiaggia emersa dove si rinvengono i resti organici depositati dal mare. Vi è, inoltre, la vegetazione della duna a *Elymus farctus*, presente sui primi cumuli di sabbia (dune embrionali) a diretto contatto con le praterie a *Spartina juncea*, presenti nelle depressioni immediatamente dietro la duna.

#### – Vegetazione palustre

La vegetazione dei canneti salmastri a *Scirpus compactus* si sviluppa su isolotti alla foce del fiume Tronto, nei canali e in depressioni della zona retrodunale, sempre comunque in ambiente fortemente salmastro. La vegetazione dei canneti d'acqua dolce a *Phragmites australis* è la vegetazione cosmopolita a cannuccia d'acqua che colonizza i fossi e i terreni argillosi allagati nel periodo invernale. Essa è ampiamente diffusa lungo le rive del fiume Tronto e in prossimità della foce si presenta anche in una variante a *Scirpus tabernaemontani*.

### **2.1.4 Fauna**

Nel territorio della Riserva Naturale risultano presenti 143 specie di uccelli (32 sono incluse nell'Allegato I della Direttiva "Uccelli") e 70 rientrano negli elenchi delle Specie di Interesse Conservazionistico in Europa (SPEC); 14 specie di mammiferi; 5 specie di rettili; 3 specie di anfibi, 6 specie di pesci (considerando solo quelli d'acqua dolce); per un totale di 171 specie (compresi gli uccelli migratori e non nidificanti).

Una presenza faunistica estremamente importante è rappresentata dal rospo smeraldino (*Bufo viridis*), che risulta molto raro nel resto del territorio regionale. Le specie animali che sono state inserite nella scheda descrittiva del SIC e della ZPS (Natura 2000), per le quali la conservazione risulta prioritaria, sono:

– *Mammiferi*

Dall'esame della bibliografia esistente e dagli studi effettuati si è riscontrata la presenza delle seguenti specie di mammiferi: Riccio europeo (*Erinaceus europaeus*), Talpa (*Talpa caeca*), Toporagno comune (*Sorex araneus*), Toporagno nano (*Sorex minutus*), Mustiolo (*Suncus etruscus*), Crocidura minore (*Crocidura suaveolens*), Pipistrello nano (*Pipistrellus pipistrellus*), Pipistrello albolimbato (*Pipistrellus kuhlii*), Surmolotto (*Rattus norvegicus*), Topolino delle case (*Mus domesticus*), Ratto nero (*Rattus rattus*), Topo selvatico (*Apodemus sylvaticus*), Arvicola del Savi (*Microtus savii*), Volpe (*Vulpes vulpes*).

Specie faunistiche censite, di notevole importanza ecologica in quanto situate alla base di molte catene alimentari, sono quelle appartenenti ai rettili ed agli anfibi.

– *Rettili*

Ramarro (*Lacerta bilineata*), Lucertola muraiola (*Podarcis muralis*), Lucertola campestre (*Podarcis sicula*), Biacco (*Coluber viridiflavus*), Biscia dal collare (*Natrix natrix*).

– *Anfibi*

Rospo comune (*Bufo bufo*), Rospo Smeraldino (*Bufo viridis*), Rana verde (*Rana hispanica*).  
Biscia dal collare nel canale Consortile

– *Uccelli*

Si può affermare che l'area della Riserva Naturale Sentina rappresenta una delle località più importanti lungo la costa adriatica marchigiana per la sosta e la migrazione di moltissime specie di uccelli, molte delle quali di notevole interesse comunitario e conservazionistico. Durante le tre campagne d'inanellamento effettuate nel 1997/98 sono state complessivamente censite, come già accennato, 143 specie di uccelli. 133 specie sono esclusivamente migratrici e le rimanenti 10 specie (7%) sono invece stanziali non migratrici. Delle 32 specie di interesse comunitario 29 specie risultano migratrici, di cui 3 specie sono svernanti ed una sola specie (*Calandrella*) risulta invece nidificante. Tre specie sono accidentali e una di queste (*Averla isabelliana*) è la 6° segnalazione italiana. Delle 70 specie di interesse conservazionistico soltanto 9 specie sono anche nidificanti, mentre nella maggior parte dei casi si tratta di specie migratrici.

Nel corso della campagna d'inanellamento sono state catturate 41 specie: Succiacapre, Martin pescatore, Cappellaccia, Rondine, Topino, Prispolone, Cutrettola, Averla piccola, Cannaiola, Cannaiola verdognola, Cannareccione, Forapaglie, Forapaglie castagnolo, Usignolo di fiume, Beccamoschino, Occhiocotto, Capinera, Bigiarella, Beccafico, Lui piccolo, Lui grosso, Saltimpalo, Stiaccino, Codirosso, Pettirosso, Merlo, Tordo bottaccio, Pendolino, Cinciallegra, Scricciolo, Strillozzo, Zigolo nero, Migliarino di palude, Fringuello, Cardellino, Verdone, Verzellino, Passera d'Italia, Passera mattugia, Passera sarda.

### **2.1.5 Delibera Regionale n. 156**

– *Le norme di salvaguardia (art. 6)*

1. Nel territorio della Riserva Naturale sono vietate le attività e le opere che possono compromettere la salvaguardia del paesaggio e degli ambienti naturali con particolare riguardo alla flora, alla fauna protetta e ai rispettivi habitat.

2. *In tutto il territorio della Riserva* è vietato:

- a) alterare con qualsiasi mezzo, diretto o indiretto, le caratteristiche chimiche e biologiche delle acque;
- b) modificare il regime delle acque, la morfologia e la struttura dell'alveo dei corsi d'acqua;

c) l'accumulo, lo smaltimento, lo scarico e l'abbandono di qualsiasi tipo di materiali e di rifiuti solidi o liquidi e, in genere, l'immissione di qualsiasi sostanza che possa modificare le caratteristiche dell'ambiente terrestre e acquatico;

d) aprire e coltivare cave;

e) estrarre inerti dal fiume;

...

h) occultare peculiarità geologiche e paleontologiche;

i) cacciare, catturare, raccogliere e danneggiare esemplari di specie animali e vegetali selvatiche ed ogni attività che possa costituire pericolo o turbamento per esse, ivi compresa l'immissione di specie estranee, ad eccezione di eventuali reintroduzioni che si rendessero necessarie od opportune per il ripristino di equilibri perduti; è consentito il prelievo di specie animali e la raccolta di specie vegetali esclusivamente per scopi scientifici e per attività di educazione ambientale previa autorizzazione del soggetto gestore che, qualora avvenga nell'area floristica istituita ai sensi della l.r. 30 dicembre 1974, n. 52 (Provvedimenti per la tutela degli ambienti naturali) (Laghetti di Porto d'Ascoli), acquisisce l'assenso della Regione;

...

p) alterare l'assetto geomorfologico di insieme;

...

4. Negli ambiti di protezione e di promozione economica e sociale, in deroga alle prescrizioni di cui al comma 2, sono consentiti, previa autorizzazione del soggetto gestore:

...

b) limitati interventi di manutenzione per la regimazione delle acque;

...

e) gli interventi relativi a programmi e progetti di recupero di cui all'articolo 57 delle norme tecniche di attuazione del PPAR solo qualora volti al recupero degli ambienti umidi o che contemplino la reintroduzione di *Saccharum ravennae*, *Plantago cornuti* e *Limonium vulgare subsp. Serotinum*; per l'attuazione di detti programmi e progetti possono essere consentiti limitati movimenti di terra indispensabili per il buon esito dell'intervento.

- *Piano d'assetto e regolamento (art. 7)*

Il piano, attraverso l'analisi e la valutazione dello stato del territorio della riserva e di un suo significativo intorno, individua gli obiettivi ambientali e socio-economici da perseguire, avendo cura di individuare, previa acquisizione delle conoscenze ecologiche della riserva, programmi gestionali volti a realizzare prioritariamente:

a) nell'ambito di riserva integrale: il ripristino degli originari specchi d'acqua salmastra/dolce, la ricostituzione di sistemi arborei ed arbustivi, la rimozione di rifiuti solidi abbandonati;

b) negli ambiti di protezione e di promozione economica e sociale: interventi di riqualificazione ambientale, di restauro botanico-vegetazionale e di restauro conservativo sugli edifici rurali in genere ed in particolare di quelli aventi pregio architettonico;

c) gli interventi volti al recupero degli ambienti umidi o che contemplino la reintroduzione di *Saccharum ravennae*, *Plantago cornuti* e *Limonium vulgare subsp. Serotinum*;

d) monitoraggio della qualità delle acque di falda in relazione al carico di inquinanti presenti nel tratto terminale del fiume Tronto;

e) controllo della qualità delle acque reflue del depuratore comunale di San Benedetto del Tronto ed abbattimento degli inquinanti attraverso l'eventuale impianto di fitodepurazione.

...

*Il piano di gestione della Riserva è sottoposto alla Valutazione di Incidenza, prevista ai sensi dell'articolo 5 del d.p.r. 357/1997; esso, ottemperando alle disposizioni di cui all'articolo 4, comma 2, del d.p.r. 357/1997, ha valore anche di piano di gestione dei siti della rete ecologica europea Natura 2000 ricompresi all'interno della riserva, il n. IT5340001 - Litorale di Porto d'Ascoli e il n.IT5340022 - Litorale di Porto d'Ascoli (La Sentina).*

- *Misure di incentivazione (art.8)*

1. Nel territorio della Riserva sono incentivati, anche attraverso la predisposizione di specifici progetti:
  - a) la realizzazione, nei fondi agricoli, di interventi finalizzati alla creazione di corridoi ecologici con massima priorità per quelli di piantumazione, lungo le strade, le scarpate ed i corsi d'acqua, tramite la messa a dimora di idonee essenze arboree e/o arbustive;
  - b) il ricorso a tecniche agricole a basso impatto ambientale;
  - c) il recupero degli habitat, il risanamento ambientale di aree degradate ed il ripristino delle condizioni naturali del fiume Tronto, mediante ricorso alle tecniche dell'ingegneria naturalistica ed attraverso la messa a dimora di essenze arboree e arbustive onde favorire l'isolamento acusticovisivo delle aree;
  - d) le produzioni biologiche;
  - e) il ripristino dei casolari rurali da adibire a centri visita, a centri studi o ad agriturismi;
  - f) le ricerche scientifiche tese ad ampliare le conoscenze sulle caratteristiche ecologiche della riserva;
  - g) l'applicazione di tecniche sperimentali di gestione ecosostenibile del territorio.

## 2.2 Caratteristiche dell'ambiente fluviale e marino costiero

Le valli dei corsi d'acqua principali (F. Aso, T. Esino; T. Menocchia, T. Albula, T. Ragnola, F. Tronto) si sviluppano in direzione prevalente Ovest - Est con alvei moderatamente ampi formando piane alluvionali nei primi due casi, e con valli incise negli altri. Tra queste si sviluppa un esteso reticolo idrografico i cui versanti sono diffusamente interessati da fenomeni calanchivi rappresentati da una fitta rete di vallecole incise e separate da strette creste e ripidi versanti argillosi e sabbiosi, generalmente privi di vegetazione.

Il *Fiume Tronto*, in cui ricade l'area in esame, nasce dalle pendici occidentali del M. Gorzano (Monti della Laga) e sfocia in mare presso Martinsicuro. Il suo bacino, che comprende terreni prevalentemente impermeabili, è orientato circa in direzione Sud-Nord nell'alto tratto, per poi ruotare fino alla direzione Ovest-Est. L'area della Riserva è inoltre caratterizzata dalla presenza del *Fosso Sentina*. La tabella che segue (**Tabella 1** *Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.*) riassume alcuni dati dei corsi d'acqua descritti:

Corso d'acqua	Lunghezza asta (km)	Superficie bacino (km <sup>2</sup> )	Quota media (m s.l.m.)	Pendenza media (%)
<b>Fiume Tronto</b>	115	1192	784	1,74
<b>Fosso Sentina</b>	3,54	5,18	60	-

**Tabella 1 - Fiume Tronto e fosso Sentina: caratteristiche morfologiche.**

In seguito ad eventi antropici, il fiume Tronto attualmente trasporta quasi esclusivamente materiale pelitico in sospensione (limi ed argille), piuttosto fine e non sufficiente a bilanciare la tendenza all'erosione del paraggio.

### 2.2.1. *Qualità delle acque fluviali del fiume Tronto*

Per una conoscenza dello *stato di qualità delle acque superficiali del fiume Tronto (Tabella 2***Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.***), si riportano i risultati delle attività di monitoraggio estratti dal Rapporto sullo Stato dell'Ambiente dell'ARTA Abruzzo (2005).*

Bacino	Corso d'acqua	I.B.E	LIM	SECA	STATO AMBIENTALE
TRONTO	Castellano	2	2	Classe 2	BUONO
	Tronto	3	3	Classe 3	SUFFICIENTE

**Tabella 2 – Valori degli indici di qualità ambientale per il fiume Tronto (RSA dell'ARTA Abruzzo - 2005)**

I valori delle Classi dei tre indici riportati nella tabella testimoniano che il corso d'acqua si presenta come un ambiente, sia dal punto di vista biologico, sia dal punto di vista delle caratteristiche chimiche, avente un buono e/o sufficiente stato di qualità ecologica.

### 2.2.2. *Qualità delle acque marino-costiere*

Nell'ambito dell'individuazione di un intervento preliminare di difesa costiera è opportuno conoscere lo stato di qualità delle acque di balneazione nel tratto di litorale oggetto di studio che può essere influenzato dall'intervento. A tale scopo, nel seguito sono riportati i dati estratti dal Rapporto sullo Stato dell'Ambiente dell'ARPAM relativi all'attività di monitoraggio eseguita negli anni 1999-2003 (**Figura 4**). Si tratta di valori dell'indice di eutrofizzazione "TRIX" che sono risultati compresi tra 3.8 e 4.0, caratterizzando come buono e/o elevato lo stato di qualità delle acque marino-costiere in oggetto.

Si rende noto che oggi la Normativa vigente richiede ulteriori parametri di qualità delle acque (*DLgs n.152/2006*) e qualità delle acque di balneazione (*Allegato I- Decreto legislativo 30 maggio 2008, n.116*), ma ai fini del nostro studio si possono ritenere sufficienti i soli dati del'RSA dell'ARPAM (1999-2003) in nostro possesso.

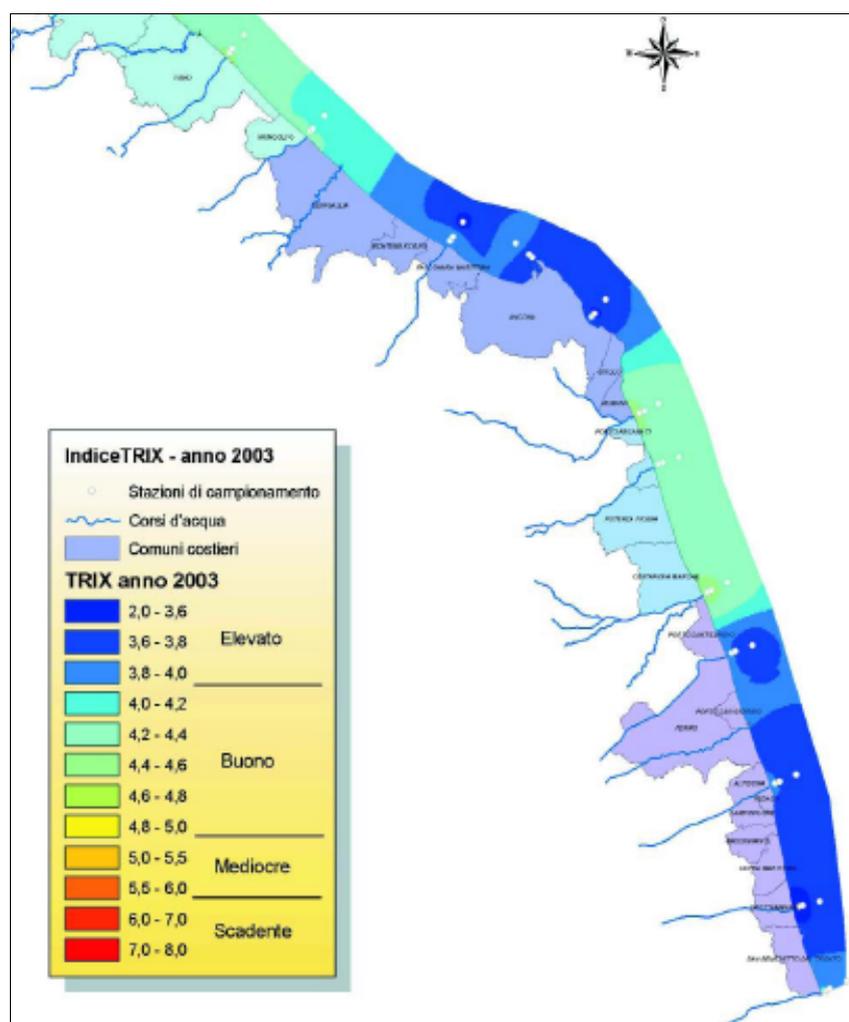


Figura 4 - Valori di TRIX riportati nel RSA dell'ARPAM relativamente all'attività di monitoraggio eseguita negli anni 1999-2003.

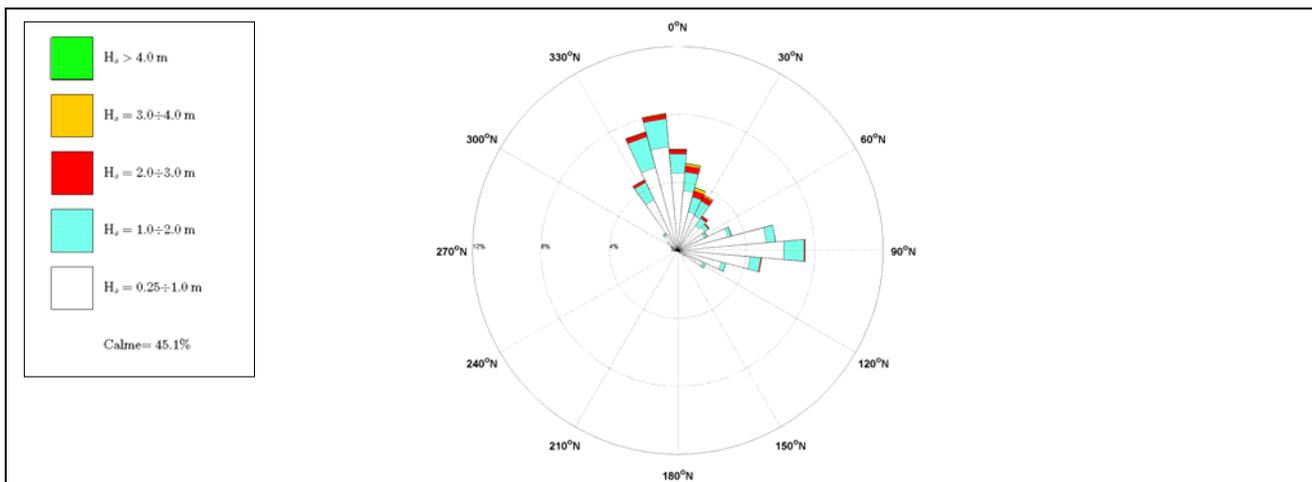
### 3. STUDIO DELLE FORZANTI E DELLE CARATTERISTICHE FISICHE

#### 3.1 Clima ondoso

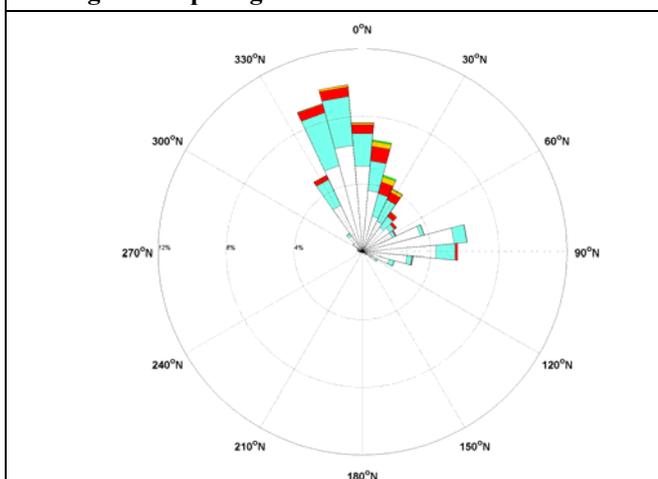
Lo studio del clima ondoso a largo del tratto di costa in esame è stato effettuato utilizzando i dati ondametrici rilevati alla boa di Ortona, come descritto nel Rapporto Tecnico “Fase A-Analisi dei dati” (ALLEGATO 1). Nel Rapporto Tecnico è stato spiegato che, sebbene vi siano altri strumenti di misura più vicini alla zona in esame, quali la boa a largo di Giulianova (della Regione Abruzzo), le serie di dati ad essa associate coprono un periodo temporale insufficiente per potere essere utilizzate. Inoltre, si è visto che la tecnica di *trasposizione delle misure ondametriche*, rilevate dalla boa di Ortona a largo del paraggio considerato, genera un clima ondoso molto simile a quello rilevato dalla boa stessa. Pertanto, per evitare un’ulteriore approssimazione, sono stati utilizzati esclusivamente i dati registrati dalla boa di Ortona. I dati, misurati secondo diverse cadenze temporali (180 o 30 minuti a seconda dell’altezza d’onda significativa misurata e dell’anno di misura), sono stati uniformati tutti al campionamento triorario negli orari 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 (GMT). Sebbene questa scelta determini una perdita di risoluzione, soprattutto per gli anni più recenti in cui sono sempre disponibili dati a cadenza semioraria, essa è giustificata dalla necessità di ottenere un serie statisticamente omogenea con una durata temporale quanto più estesa possibile.

Il clima ondoso (**Figura 10**)**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.****Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si caratterizza con due direzioni prevalenti di provenienza: da Nord tra i 330°N e i 10°N e da Est tra i 70°N e i 110°N.

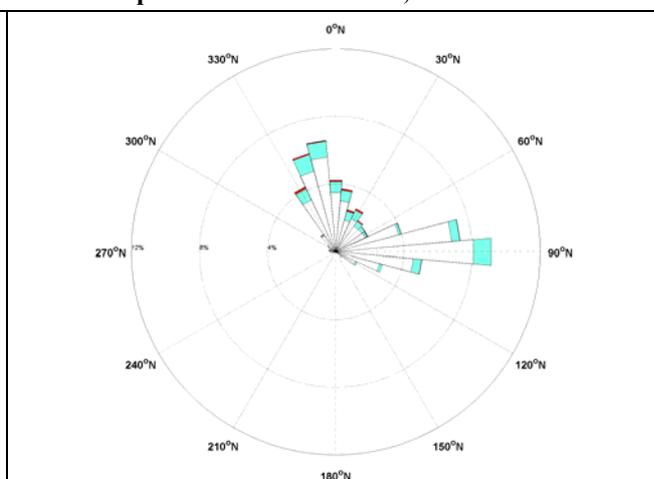
La componente da Nord mostra una maggiore frequenza ed anche una maggiore intensità degli eventi. Queste due componenti sono presenti in tutte le distribuzioni stagionali, sebbene in primavera ed autunno sia la componente da Est a mostrare la frequenza prevalente.



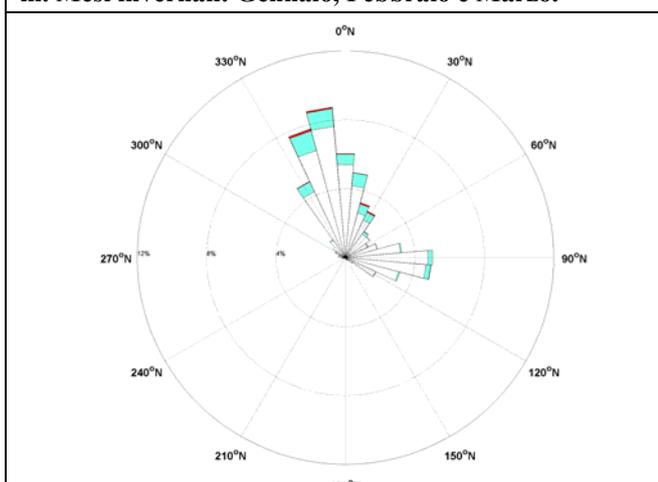
**Figura 5: Distribuzione direzionale delle onde registrate dalla boa di Ortona dal 1 Luglio 1989 al 23 Aprile 2007. L'istogramma per ogni direzione è dato dalla somma dei contributi per fasce di altezza di 0,5 m.**



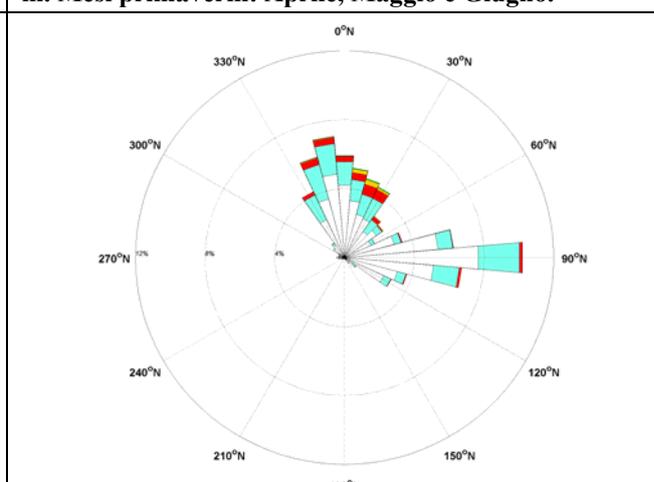
**Figura 6: Distribuzione direzionale delle onde registrate dalla boa di Ortona dal 1 Luglio 1989 al 23 Aprile 2007. L'istogramma per ogni direzione è dato dalla somma dei contributi per fasce di altezza di 0,5 m. Mesi invernali: Gennaio, Febbraio e Marzo.**



**Figura 7: Distribuzione direzionale delle onde registrate dalla boa di Ortona dal 1 Luglio 1989 al 23 Aprile 2007. L'istogramma per ogni direzione è dato dalla somma dei contributi per fasce di altezza di 0,5 m. Mesi primaverili: Aprile, Maggio e Giugno.**



**Figura 8: Distribuzione direzionale delle onde registrate dalla boa di Ortona dal 1 Luglio 1989 al 23 Aprile 2007. L'istogramma per ogni direzione è dato dalla somma dei contributi per fasce di altezza di 0,5 m. Mesi estivi: Luglio, Agosto e Settembre.**



**Figura 9: Distribuzione direzionale delle onde registrate dalla boa di Ortona dal 1 Luglio 1989 al 23 Aprile 2007. L'istogramma per ogni direzione è dato dalla somma dei contributi per fasce di altezza di 0,5 m. Mesi autunnali: Ottobre, Novembre e Dicembre.**

**Figura 10 – Grafici di distribuzione direzionale del moto ondoso**

### 3.2 Propagazione del moto ondoso a riva

La propagazione del moto ondoso a costa è stata effettuata tramite un semplice modello, basato sulla teoria lineare del moto ondoso, che prende in considerazione i soli effetti di Shoaling e Rifrazione nell'approssimazione di un fondale con pendenza lentamente variabile (Robert M. Sorensen – Springer 2006). L'applicazione del modello ha fornito le caratteristiche del moto ondoso a costa in corrispondenza della batimetrica -10 m (**Figura 11** **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Dall'analisi della figura si evince come, nell'avvicinarsi alla riva, l'effetto della rifrazione determina una rotazione della direzione di propagazione delle onde, creando una distribuzione direzionale più stretta. Sostanzialmente tutta la componente del clima ondoso a largo da Nord ruota verso la direzione 30°N. Nel processo di rotazione le onde tendono a perdere energia e ciò porta ad una diminuzione dei valori di altezza d'onda significativa. Al contrario le onde che a largo hanno una direzione di propagazione più vicina all'ortogonalità con la linea di riva (onde provenienti da circa 70 °N) e che quindi subiscono meno l'effetto della rifrazione, tendono ad amplificare leggermente la propria altezza per via dell'effetto di Shoaling legato alla diminuzione della profondità del fondale. Il risultato mostra come la componente più energetica del clima ondoso a costa sia quella proveniente dai settori tra i 60 °N e i 30 °N, ossia da Nord-Est. Si evidenzia inoltre una seconda componente, meno energetica ma comunque ben distinguibile, proveniente dal settore direzionale Est compreso tra i 70 °N e i 100 °N.

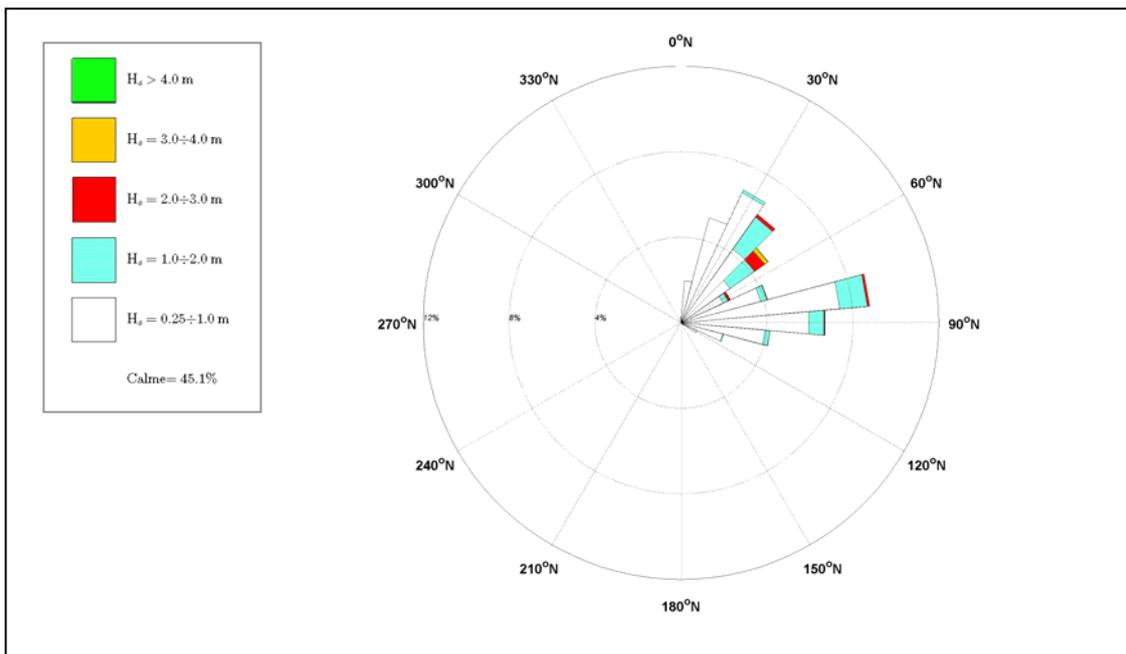


Figura 11 – Distribuzione del moto ondoso a costa.

### 3.3 Calcolo della profondità di chiusura

Si definisce DoC (*Depth of Closure*) *profondità di chiusura*, la profondità oltre la quale non si verifica alcun cambiamento batimetrico significativo del fondale né alcun trasporto di sedimenti significativo per un dato o caratteristico intervallo di tempo. Generalmente si considera la DoC annuale, ossia la DoC associata ad un periodo temporale di un anno.

Il calcolo di tale profondità è stato effettuato utilizzando formula di Hallermeier (1978,1981):

$$DoC = 2.28H_{m0\_12} - 68.5 \left( \frac{H_{m0\_12}^2}{gT_{p\_12}^2} \right) \quad (1)$$

dove:

$H_{m0\_12}$  è l'altezza d'onda significativa al largo con frequenza di accadimento pari a 12 ore/anno;

$T_{p\_12}$  è il periodo di picco corrispondente all'onda con frequenza di accadimento pari a 12 ore/anno;

$g$  è la accelerazione di gravità.

In particolare, il calcolo della DoC è stato ottenuto utilizzando i dati di  $H_{m0\_12}$  e i corrispondenti  $T_{p\_12}$  relativi al clima ondoso registrato dalla boa di Ortona a partire dal luglio 1989 a giugno 2005. Stimando per ogni anno la percentuale di dati mancanti ed eliminando dal calcolo del valore medio i valori relativi agli anni in cui i dati mancanti superano il 30% dei dati totali, si è ottenuto un valore medio per la **DoC** pari a **7,57 m (Tabella 3)**.

Anno		$H_{0\_12}$	$T_{p\_12}$	DoC	% Dati Mancanti	DoC annuale
lug-89	giu-90	3,3	7,1	6,02	3	7,57
lug-90	giu-91	3,9	7,7	7,10	9	
lug-91	giu-92	4,8	10,0	9,34	6	
lug-92	giu-93	4,1	8,3	7,64	7	
lug-93	giu-94	4,4	9,1	8,40	9	
lug-94	giu-95	4,7	9,1	8,85	9	
lug-95	giu-96	3,4	7,7	6,39	3	
lug-96	giu-97	4,6	9,1	8,70	1	
lug-97	giu-98	4,3	10,0	8,51	2	
lug-98	giu-99	4,0	8,3	7,50	6	
lug-99	giu-00	3,8	7,7	6,96	19	
lug-00	giu-01	3,2	6,7	5,70	22	
lug-01	giu-02	3,9	8,3	7,35	21	
lug-02	giu-03	3,2	7,7	6,09	33	
lug-03	giu-04	2,5	7,1	4,83	36	
lug-04	giu-05	2,9	8,3	5,76	52	
lug-05	giu-06	3,0	7,7	5,78	61	

**Tabella 3 – Calcolo della profondità di chiusura.**

### 3.4 Indagini granulometriche

Nel presente paragrafo si riportano i risultati relativi alle indagini mineralogiche e granulometriche eseguite dall'ICRAM (settembre 2007) (**ALLEGATO 2**) in collaborazione con L' APAT, e quelle eseguite dall'UNICAM (Dicembre 2008) (**ALLEGATO 3**).

#### 3.4.1 Risultati delle indagini ICRAM

L'ICRAM ha eseguito indagini granulometriche relative ad un numero di 15 campioni di sedimento di spiaggia emersa e sommersa prelevati nei fondali antistanti il centro abitato di S. Benedetto del Tronto **Figura 12**.

L'attività analitica per la determinazione delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti è stata suddivisa in tre fasi:

- Fase 1: preparazione e pretrattamento
- Fase 2: separazione della frazione sabbiosa da quella pelitica.

- Fase 3: analisi delle frazioni ottenute.

I dati ricavati dall'analisi al *granulometro laser* (frazione fine) e dalla *setacciatura* (frazione grossolana) sono stati elaborati ed integrati al fine di discriminare le percentuali di sabbia, limo ed argilla che ha permesso la loro classificazione secondo Shepard (1954, modificato) e Nota (1958).



**Figura 12 – Stazioni di campionamento per le analisi granulometriche effettuate (Immagine di Google Earth).**

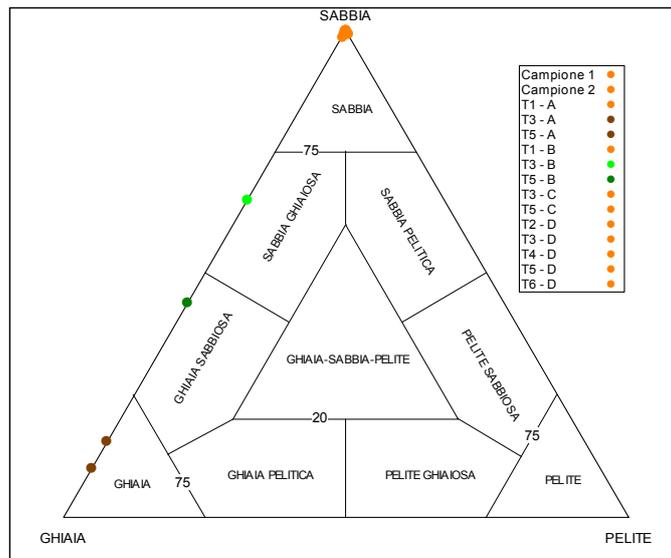
Si riportano di seguito i risultati granulometrici e mineralogici dei 15 campioni analizzati (**Tabella 4a**). I sedimenti vengono definiti utilizzando sia la classificazione di Shepard (1954) modificata che quella di Nota (1958).

Sigla stazione	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Classificazione di Shepard modificata	Classificazione di Nota
Campione 1		99,3	0,7*		<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
Campione 2		99,2	0,8*		<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T1 A		99,9	0,1*		<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T3 A	84,7	15,3			<i>Ghiaia</i>	<i>Sabbia</i>
T5 A	89,9	10,1			<i>Ghiaia</i>	<i>Sabbia</i>
T1 B		100,0			<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T3 B	34,9	65,1			<i>Sabbia ghiaiosa</i>	<i>Sabbia</i>
T5 B	56,1	43,9			<i>Ghiaia sabbiosa</i>	<i>Sabbia</i>
T3 C	0,2	99,8			<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T5 C		100,0			<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T2 D		100,0			<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T3 D	0,8	99,1	0,1*		<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T4 D		100,0			<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T5 D		100,0			<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>
T6 D	1,4	98,5	0,1*		<i>Sabbia</i>	<i>Sabbia</i>

\* = limo + argilla

**Tabella 4a - Risultati delle analisi granulometriche e relative classificazioni di Shepard (1954) modificato e Nota (1958).**

Dai risultati delle indagini granulometriche riportati in **Tabella 4a** si evince che la maggior parte dei campioni analizzati mostra una *predominante composizione sabbiosa*, con frequenze sempre superiori al 98%; la ghiaia prevale solo nei campioni T3A, T5A e T5B, mentre la pelite è generalmente assente ad eccezione di qualche campione, dove al massimo raggiunge lo 0,8%. È opportuno notare che la presenza di ghiaia in punti discontinui dell'unità fisografica può essere una conseguenza degli interventi di salpamento e/o rifiorimento delle opere già esistenti, osservati durante gli avvenuti sopralluoghi. In **Figura 13** sono stati riportati i risultati utilizzando il triangolo di Shepard modificato. La tipologia di sedimento più rappresentata risulta essere quella della *Sabbia*; due campioni risultano classificabili come *Ghiaia*, uno come *Ghiaia sabbiosa* ed uno come *Sabbia ghiaiosa*.



**Figura 13 - Diagramma di Shepard e distribuzione dei sedimenti**

L'analisi al microscopio ottico ha evidenziato una composizione mineralogica nel complesso omogenea e costituita prevalentemente da granuli di quarzo, calcite, feldspati e frammenti litici calcarei; subordinatamente si rinvencono lamelle di miche (biotite e muscovite) e granati, particolarmente frequenti nelle frazioni più fini del sedimento delle stazioni sommerse e di battigia.

La frazione ghiaiosa è costituita in prevalenza da ciottoli calcarei, talora fossiliferi, appiattiti e ben smussati; subordinatamente si rinvencono calcari selciferi, selci, breccie e arenarie.



**Figura 14 – Immagine al microscopio ottico della frazione ghiaiosa**

Sono state inoltre costruite le curve di distribuzione granulometrica, in particolare, l'istogramma di frequenza semplice e la curva di frequenza cumulata ed i principali parametri statistici (Folk e Ward, 1957) riportati nell'**ALLEGATO 1** da cui, nei grafici delle *Curve Cumulative*, sono stati estratti e riassunti i valori del  $D_{50}$  dei 15 campioni (**Tabella 4b**).

<b>Sigla stazione</b>	<b>Diametro (mm)</b>
Campione 1	0,161
Campione 2	0,161
T1 A	0,213
T3 A	Ghiaia
T5 A	Ghiaia
T1 B	0,213
T3 B	Sabbia Ghiaiosa
T5 B	Ghiaia Sabbiosa
T3 C	0,427
T5 C	0,302
T2 D	0,213
T3 D	0,302
T4 D	0,302
T5 D	0,302
T6 D	0,427

**Tabella 4b - Valori del  $D_{50}$  in mm dei campioni prelevati.**

In generale, si osserva che i campioni prelevati sulla spiaggia emersa (D-C) sono costituiti quasi esclusivamente da sabbia medio-fine avente  $D_{50}$  pari ad un valore medio di circa 0,3 mm, mentre, in quelli prelevati sulla spiaggia sommersa (B-A) prevale la frazione ghiaiosa.

È necessario, ricordare che l'area d'indagine è influenzata dalla presenza di materiale avente granulometria più grossolana rispetto a quello originaria a causa della recente realizzazione di interventi di salpamento e/o rifiorimento delle opere già esistenti nel tratto di litorale contiguo. Si ritiene quindi corretto credere, sulla base anche dei sopralluoghi effettuati che il  $D_{50}$  delle sabbie in esame sia inferiore al valore ottenuto dalle analisi.

### **3.4.2 Indagini svolte dall'UNICAM (Dicembre 2008)**

L'UNICAM ha effettuato i prelievi di campioni di sedimento nella spiaggia sommersa ed emersa del tratto di litorale antistante la Riserva Sentina ed ha svolto l'analisi degli stessi presso i propri laboratori.

Sono state seguite 7 direttrici all'incirca perpendicolari alla linea di costa (*"Carta delle granulometrie dei sedimenti della spiaggia sommersa"* – **ALLEGATO 3**), corrispondenti a transetti numerati in ordine crescente dall'1 al 7 procedendo da Nord verso Sud, lungo i quali sono stati prelevati i campioni. In particolare, sulla la spiaggia emersa sono stati campionati i sedimenti presenti lungo la battigia ed a distanza di 1, 2, 5, 10 m; mentre sulla spiaggia sommersa sono stati campionati i sedimenti in corrispondenza delle isobate -1, -2,-3,-5,-7,-10.

Ai nostri fini, nella tabella seguente si riportano i valori dei  $D_{50}$  dei campioni prelevati lungo i transetti a partire da 1m di distanza dalla linea di battigia fino alla batimetrica -7m.

Profondità del campione	D <sub>50</sub>						
	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
1	0,891	0,881	0,951	0,864	0,470	0,405	
Battigia	0,801	0,555	0,845	0,587	0,466	0,391	0,478
-1	11,862	9,777	4,691	4,393	0,386	0,371	
-2	5,889	8,134	2,871	0,457	0,442	0,392	0,339
-3	3,351	3,171	0,792	0,197	0,171	0,210	0,132
-5	0,164	0,162	0,124	0,132	0,147	0,133	0,105
-7	0,120	0,123	0,125	0,132	0,145	0,146	0,131

**Tabella 4c - Valori dei D<sub>50</sub> dei campioni prelevati lungo i transetti a partire da 1m di distanza dalla linea di battigia fino alla batimetrica -7.**

Dalla seguente analisi emerge che nei campioni prelevati dai transetti tracciati più a Nord si riscontrano sedimenti grossolani a granulometria variabile, prevalentemente sabbie grossolane e ghiaie, la cui presenza come già detto può essere giustificata dal materiale utilizzato per attività di salpamento e/o rifiorimento delle scogliere nel tratto a Nord contiguo al litorale in esame.

Al contrario i sedimenti prossimi alla foce del F. Tronto sono granulometricamente più fini.

Sulla base di queste considerazioni, si assume per le sabbie naturali della spiaggia in esame un valore medio come D<sub>50</sub> corrispondente a circa 0,2 mm che verrà implementato nel modello morfodinamico (**CAPITOLO 5**).

### 3.5 Analisi storica della linea di riva

L'analisi storiografica della linea di riva è stata eseguita utilizzando le seguenti linee di costa fornite dalla Regione Marche e il rilievo della linea di costa effettuato dall'Università degli Studi di Camerino:

- linea di costa dalla cartografia IGM 1894 (scala 1:50000)
- linea di costa dalla cartografia IGM 1948 (scala 1:25000)
- linea di costa dalla cartografia IGM 1985 (scala 1:25000)
- rilievo della linea di costa eseguito dalla Regione Marche 1999
- rilievo della linea di costa eseguito dall'UNICAM nel 2008

In particolare, in ambiente Autodesk Map 3D 2005, sono state importate e sovrapposte le linee di costa e l'unità fisiografica scelta è stata suddivisa in settori tracciando 27 transetti trasversali distanti 250 m l'uno dall'altro, (**ALLEGATO 4**). In tal modo è stato possibile valutare, rispetto ad una linea di riferimento approssimativamente parallela alla linea di costa, il trend evolutivo (1894-1999) per l'intero tratto di litorale compreso tra il Porto di S. Benedetto e il fiume Tronto (**ALLEGATO 5**) e il trend evolutivo (1894-2008) per il litorale antistante la Riserva Sentina (**ALLEGATO 6**).

In seguito alla consegna del rilievo della linea di costa eseguito nel 2008 dall'UNICAM, è stata osservata, nel tratto di dettaglio, un'erosione media pari a circa 30 m tra il 1999 e il 2008 che, confrontata con quella media pari a 20 metri osservata nel periodo tra il 1985 -1999, evidenzia un notevole aumento del trend erosivo di questi ultimi anni.

In particolare, in termini di volume di spiaggia emersa, si osserva, nel periodo 1999-2008, per il tratto di litorale di dettaglio, una perdita media annua stimata pari a circa 45.000 m<sup>3</sup>.

### 3.6 Analisi del flusso di energia associato al moto ondoso

Un'indicazione sulla direzione prevalente del trasporto solido litoraneo può essere ottenuta dall'analisi della direzione prevalente del flusso di energia associato al moto ondoso nella zona dei frangenti. Il flusso di energia di un'onda rappresenta il tasso di energia trasmesso nella direzione di propagazione dell'onda attraverso un piano verticale perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda stessa. Il valore medio del flusso di energia ( $P$ ) per unità di lunghezza della cresta dell'onda è dato da:

$$\vec{P} = E\vec{C}_g \quad (2)$$

essendo  $E$  l'energia media dell'onda per unità di superficie definita come:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (3)$$

e  $C_g$  la velocità di gruppo che in acque basse può essere espressa come:

$$C_g = \sqrt{gh} \quad (4)$$

con  $h$  profondità del fondale.

I dati di onda da utilizzare nel calcolo sono stati ricavati dall'applicazione del modello SWAN per la propagazione a costa del moto ondoso, prendendo quindi in considerazione i valori di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione di propagazione dell'onda ad una profondità di 10 m. In **Figura 15** sono riportati, lungo il litorale dell'unità fisiografica, i valori annuali medi del flusso energetico in W/m suddiviso in classi di intensità.

Si evidenzia come per il calcolo del clima ondoso a costa si sia utilizzato un modello differente per la propagazione del moto ondoso. Ciò è dovuto al fatto che la complessità computazionale richiesta dal modello SWAN per la propagazione a riva di 15 anni di dati di onde ogni 3 ore è eccessiva. Pertanto per poterlo applicare è necessario seguire una procedura statistica che si basa su una classificazione delle onde per classi di direzione, altezza significativa e periodo di picco. Scegliendo quindi un'onda rappresentativa per ognuna di queste classi, si procede col propagare a riva, tramite il modello SWAN, solo l'onda rappresentativa. Successivamente viene ricostruita la distribuzione statistica del moto ondoso a costa associando la numerosità campionaria di ogni classe a largo, alla classe a costa in cui ricade l'onda rappresentativa a seguito del processo di propagazione. Pertanto per l'analisi del clima ondoso e per la definizione della forzante ondosa da utilizzare nel modello morfodinamico (Modello GENESIS descritto al *paragrafo 5.1*) si è preferito applicare un modello più semplice, ma in grado di propagare a riva ogni singola onda, mentre si è utilizzato il modello SWAN per avere una visione d'insieme del flusso di energia associato al moto ondoso su tutto il paraggio.

I risultati per il flusso di energia sono perfettamente in accordo con quanto mostrato dalla climatologia del moto ondoso a costa. La **Figura 15** mostra infatti che la risultante energetica è diretta da Nord-Est verso Sud-Ovest. La variabilità dell'intensità del flusso energetico lungo la batimetrica -10 m è dovuta agli effetti di concentrazione e dispersione dell'energia ondosa legate alle variazioni del fondale. In particolare, si ha una concentrazione di energia in presenza di dossi sul fondale poiché la rifrazione tende a far convergere le onde creando un effetto lente. Al contrario in presenza di buche o avvallamenti si ha l'effetto opposto.

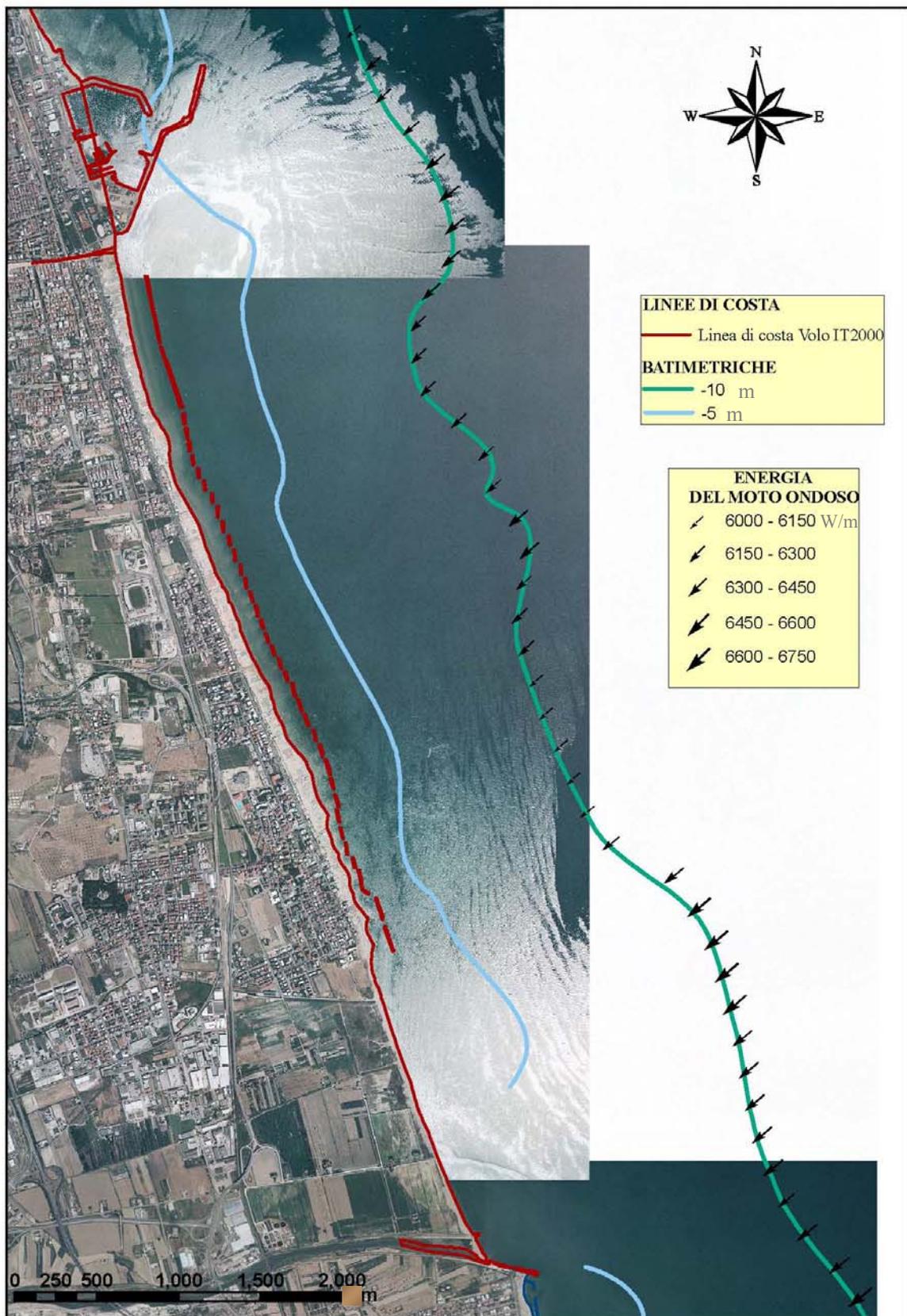


Figura 15 – Valori annuali medi del flusso energetico associato al moto ondoso

## 4. PROPOSTE DI INTERVENTO

Come è noto, qualsiasi opera realizzata lungo la costa costituisce un ostacolo al propagarsi del moto ondoso e al conseguente trasporto solido, e pertanto, interagendo con essi può dar luogo ad effetti di vario genere, causando alterazioni del litorale in zone limitrofe a quella di intervento. È necessario, quindi, pensare agli interventi non come a opere singole ma come parte integrante di un sistema di difesa, che consenta di assicurare, per quanto possibile, l'integrità dell'intera fascia litoranea.

Gli interventi artificiali operati nel tempo, contrastanti con il libero estrinsecarsi dei fenomeni naturali, difficilmente costituiscono soluzioni al problema della difesa litoranea, contribuendo, al più, al mero spostamento tra zone contigue delle situazioni di squilibrio.

In materia di difesa litoranea, valgono i seguenti principi generali:

1. l'intervento dell'uomo volto ad agevolare le forze naturali di ripascimento di un ambito costiero non può essere spinto nel senso del totale assorbimento dei "rifornimenti" di materiali da aree limitrofe (che ne rimarrebbero conseguentemente danneggiate);
2. l'individuazione dell'intervento ottimale deve essere raggiunto attraverso una gradualità esecutiva ed una elasticità di progettazione che consenta di valutare le soluzioni di maggiore efficacia.

Una condizione essenziale per la corretta progettazione di un intervento, è rappresentata da uno studio della linea di costa in assenza dell'opera da realizzare, con particolare riguardo alla simulazione dell'evoluzione morfologica.

A tale scopo è stato utilizzato il modello Genesis per simulare l'evoluzione della linea di costa in circa 30 anni (2009 – 2039) in assenza di interventi (**CAPITOLO 6**).

### 4.1 Procedura di selezione della tipologia di intervento.

La scelta della tipologia di intervento richiede da un lato una valutazione dei processi morfologici che interessano la zona e l'elaborazione di ipotesi sugli sviluppi futuri; dall'altro una individuazione dei diversi interessi coinvolti nell'intervento (es. conservazione dell'ambiente, paesaggio, convenienza socio-economica dell'operazione...). La compatibilità tra questi interessi e i provvedimenti per ridurre il tasso di erosione della spiaggia porta alla scelta dell'intervento.

I fattori determinanti nella scelta di un intervento di difesa costiera, sono:

- la salvaguardia immediata del territorio;
- il regime dei trasporti di sedimenti;
- il livello della marea e del set-up dinamico e meteorologico;
- la morfologia del paraggio;
- la finalità dell'intervento protettivo.

#### 4.1.1 Metodo di Kobayashi et al.

Un *primo step* per la selezione della tipologia di intervento nel tratto di litorale oggetto del nostro studio consiste nel utilizzare lo schema [Kobayashi et al. modificato] riportato in **Tabella 5a** per fornire una prima indicazione sul grado di idoneità di ciascun tipo di intervento.

Caratteristiche del paraggio															
Tipo di intervento	Tempistica			Trasporto litoraneo					Marea		Instabilità morfologica			Moto ondoso	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
<i>Pennelli</i>	*	1	2	0	*	3	2	3	1	2	2	1	3	2	1
<i>Frangiflutti foranei</i>	2	2	2	2	3	+	2	*	2	1	2	1	0	0	3
<i>Difese aderenti</i>	3	+	*	*	*	0	*	*	1	2	*	1	*	1	2
<i>Ripascimenti</i>	1	1	2	3	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	1
<i>Conservazione e dune</i>	1	2	2	1	2	0	2	0	2	2	0	2	2	1	2

**Tabella 5a - Quadro schematico per la scelta del tipo di opera per difese di spiaggia.**

Il significato delle lettere è il seguente:

- Tempistica:
  - a) *Emergenza*: il pericolo per le persone e le cose è tale che l'intervento deve essere iniziato immediatamente (entro 15 giorni), anche in assenza di un formale progetto;
  - b) *Urgenza*: la situazione comporta che vi sia il tempo per eseguire una programmazione ed eseguire parte delle indagini necessarie alla corretta progettazione;
  - c) *Tempestività*: tale da avere il tempo per eseguire tutte le indagini necessarie, senza correre il rischio di giungere troppo tardi.
- Regime del trasporto litoraneo:
  - d) trasporto litoraneo longitudinale di piccola entità rispetto ai movimenti trasversali;
  - e) deriva litoranea (trasporto netto) assente o insignificante rispetto ai trasporti lordi;
  - f) deriva litoranea modesta ma ben definita;
  - g) trasporti litoranei importanti ma con deriva mal definita;
  - h) trasporti litoranei importanti e deriva ben definita.
- Marea:
  - i) limitata escursione di marea
  - j) elevata escursione di marea
- Instabilità morfologica:

Per quanto riguarda l'instabilità morfologica del paraggio, legata alle dimensioni spaziali delle grandi forme caratterizzanti la riva ed alla altezza della spiaggia attiva, ed alla erodibilità della costa, si distinguono le seguenti classi:

  - k) instabilità insignificante (ad es. falesie);
  - l) instabilità modesta; ad es. spiagge sottili di grande estensione e *poket beach*;
  - m) instabilità importante (ad esempio cuspidi focali e piccole unità fisiografiche con forti trasporti).
- Moto ondoso
  - n) moderato: mareggiate con altezza d'onda significativa inferiore a 2 m;
  - o) significativo: mareggiate con altezza significativa superiore a 2 m.

I numeri e gli asterischi (+,\*) riportati nelle **Tabelle 5a e 5b** individuano il grado di idoneità dell'intervento nell'area di studio ed in particolare:

- 3 = soluzione consigliabile;
- 2 = soluzione idonea;
- 1 = soluzione accettabile;
- + = soluzione idonea o accettabile per qualche forma del tipo, inefficiente per altre;
- 0 = soluzione inefficiente;
- \* = soluzione sconsigliabile.

Applicando il *Metodo di Kobayashi* modificato al tratto di litorale oggetto di studio e considerato che, la situazione ha carattere d'*Urgenza*; il *trasporto litoraneo è consistente*; l'*escursione di marea è limitata*; l'*instabilità morfologica è significativa*; si evidenziano in giallo nella precedente **Tabella 5a** le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche del paraggio																
Tipo di intervento	Tempistica			Trasporto litoraneo					Marea		Instabilità morfologica			Moto ondoso		Grado di idoneità
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	Totale
<i>Pennelli</i>	*	1	2	0	*	3	2	3	1	2	2	1	3	2	1	8
<i>Frangiflutti foranei</i>	2	2	2	2	3	+	2	*	2	1	2	1	0	0	3	9
<i>Difese aderenti</i>	3	+	*	*	*	0	*	*	1	2	*	1	*	1	2	3+ (**)
<i>Ripascimenti</i>	1	1	2	3	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	1	8
<i>Conservazione dune</i>	1	2	2	1	2	0	2	0	2	2	0	2	2	1	2	10

**Tabella 5b – Schema di Kobayashi in cui sono state evidenziate le colonne corrispondenti al caso in esame (*Litorale Sentina*).**

In base ai risultati relativi al *grado di idoneità* (**Tabella 5b**) dell'intervento di difesa per il litorale Sentina possiamo schematizzare le seguenti considerazioni:

- l'intervento di difesa con *pennelli* raggiunge un grado di idoneità pari a 8 ed è particolarmente consigliato in caso di instabilità morfologica importante;
- l'intervento di difesa con frangiflutti foranei raggiunge un grado di idoneità pari a 9 ed è particolarmente consigliato in caso di moto ondoso significativo;
- l'intervento di difesa con *muri di sponda* raggiunge un grado di idoneità pari a 3 ed è in genere sconsigliato per trasporto litoraneo importante e per la stabilità della spiaggia;
- l'intervento di difesa con *ripascimento artificiale* raggiunge un grado di idoneità pari a 8 ed è consigliato quando l'instabilità morfologica è importante e su piccola scala dove l'escursione di marea è modesta.
- un intervento di conservazione della duna raggiunge un grado di idoneità pari a 10 ed è sempre indicato se combinato con le altre tipologie d'intervento.

In questo *primo step* possiamo affermare che il sistema di frangiflutti foranei può essere considerato l'intervento di difesa più idoneo al tratto di litorale antistante la Riserva Naturale

Sentina. Oltre a ciò, è possibile valutare anche l'ipotesi di una combinazione dei frangiflutti foranei con ripascimenti artificiali. In tal modo, dalla combinazione dei due interventi, si accresce l'efficienza dell'difesa litoranea e si riducono gli oneri di manutenzione dell'intervento del solo ripascimento.

Inoltre, anche la soluzione di intervento di difesa con pennelli (visto il grado di idoneità pari ad 8) viene presa in considerazione e sarà implementata nel modello morfodinamico Genesis (CAPITOLO 5)

Un *secondo step* nella *procedura di selezione della tipologia di intervento* consiste nell'utilizzare la matrice di Kobayashi et al. (1985) in cui vengono messi in relazione gli elementi caratteristici delle opere di difesa con gli effetti sull'ambiente:

ELEMENTI CARATTERISTICI DELLE OPERE DI DIFESA		VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'OPERA							
		Preservazione ambiente naturale	Spazio per lo sviluppo della fauna marina	Spazio per attività turistiche	Difesa della costa	Effetti sul ricambio idrico	Effetti sul paesaggio	Controllo eventi disastrosi	
ELEMENTI DELLA SEZIONE TRASVERSALE DELL'OPERA	Profilo naturale della spiaggia sommersa		●	●	●	●	●	●	●
	Opera sommersa e staccata dalla riva		●	●	●	●	●	●	●
	Opera sommersa e radicata alla riva		●	●	●	●	●	●	●
	Opera emergente e staccata dalla riva		●	●	●	●	●	●	●
	Opere che si protendono dalla riva verso il mare		●	●	●	●	●	●	●
ELEMENTI PLANIMETRICI DEL SISTEMA DI PROTEZIONE	Opere parallele alla linea di riva		●	●	●	●	●	●	●
	Opere parallele alla riva e ad esse collegate		●	●	●	●	●	●	●

efficace e fattibile     
 moderatamente efficace ma fattibile     
 poco efficace e non fattibile

**Figura 16 - Procedura di selezione della tipologia di intervento derivata da Kobayashi et al. (1985) in cui vengono messi in relazione gli interventi di difesa con gli effetti sull'ambiente.**

Premesso che, lo studio interessa un'area di Riserva Naturale, viene esclusa un'ipotesi di intervento rappresentata da un sistema di scogliere emerse. Inoltre, dalle precedenti considerazioni effettuate allo *step 1* e dall'analisi della **Figura 16** si osserva che, nell'ipotesi di un intervento di scogliere sommerse distaccate dalla riva, si ha:

- una fattibile preservazione dell’ambiente;
- uno spazio fattibile per consentire lo sviluppo della fauna marina;
- uno sviluppo efficace delle attività turistiche;
- una fattibile difesa della costa (rispetto alle opere emerse);
- un fattibile ricambio idrico;
- non ha effetti di deturpamento sul paesaggio;
- un fattibile controllo da eventi disastrosi.

Invece, nell’ipotesi, di un intervento di pennelli, si ha:

- una efficace e fattibile preservazione dell’ambiente;
- un fattibile spazio per lo sviluppo della fauna marina;
- un fattibile spazio per le attività turistiche;
- una poco efficace e non fattibile difesa della costa;
- un efficace e fattibile ricambio idrico;
- non ha effetti di deturpamento sul paesaggio;
- moderatamente efficace ma fattibile controllo sugli eventi disastrosi.

Quindi, l’ipotesi, raggiunta allo *step 1*, di intervento di ripascimento protetto da un sistema di barriere sommerse può rappresentare il giusto compromesso tra difesa della costa e preservazione dell’ambiente. Inoltre, anche l’intervento di ripascimento protetto da un sistema di pennelli ha carattere di compatibilità ambientale e per tal motivo verrà considerato, nei prossimi capitoli dello studio, come alternativa possibile al ripascimento protetto da scogliere sommerse.

#### **4.1.2 Meccanismi di protezione di un litorale (ICCE - 1992)**

Al fine di individuare la tipologia d’intervento più idonea alla protezione del tratto di litorale oggetto del nostro studio riportiamo nel seguito un ulteriore schema guida per la scelta di un intervento di difesa (ICCE 1992). In tal modo sarà possibile confrontare i risultati che si otterranno con quelli raggiunti con l’applicazione del metodo *Kobayashi*.

In generale, è noto che le soluzioni possibili per un intervento di difesa costiera sono:

- |                                     |                                                 |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <i>A) Ripascimento</i>              | <i>C1) Pennelli semisommersi</i>                |
| <i>B1) Scogliera sommersa</i>       | <i>C2) Pennelli corti emersi</i>                |
| <i>B2) Scogliera foranea emersa</i> | <i>C3) Pennelli lunghi emersi</i>               |
| <i>B3) Isole foranee sommerse</i>   | <i>D1) Celle con pennelli a T semi sommersi</i> |
| <i>B4) Isole foranee emerse</i>     | <i>D2) Celle con pennelli a T emersi</i>        |

Naturalmente, è possibile considerare, per un unico intervento di difesa anche combinazioni di diverse tipologie.

Al fine di comparare le diverse tipologie devono essere considerati i seguenti aspetti:

- *Meccanismo di protezione del litorale;*
- *Elementi che condizionano l’efficienza delle tipologie considerate;*
- *Effetti dovuti alla realizzazione degli interventi secondo le tipologie considerate.*

Per ciascun aspetto sono state effettuate le valutazioni opportunamente sintetizzate nel seguito.

□ Meccanismo di protezione del litorale

L'individuazione dei meccanismi che consentono la protezione del litorale è necessaria per effettuare le successive valutazioni sugli elementi che condizionano l'efficienza dell'intervento, inoltre, permette di considerare come soluzioni alternative quelle basate sul medesimo principio (Tabella 6).

MECCANISMO DI PROTEZIONE DEL LITORALE				TIPOLOGIA										
				A	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	D1	D2	
Riduzione delle onde incidenti per frangimento	Diretto					1°		2°					1°	
	Indotto				2°		2°					2°		
Ampliamento della spiaggia	Apporto positivo			1°										
	Riduzione dell'asporto	Trasversale			1°	2°							2°	2°
		Longitudinal e alla spiaggia	Spiaggia emersa						1°					
			Spiaggia sommersa esposta a maggiore azione ondosa					1°	1°		1°		1°	1°
			Intera spiaggia				2°					1°		

1° Meccanismo primario  
2° Meccanismo secondario

**Tabella 6 – Schema meccanismo di protezione di un litorale.**

Evidenziando in giallo le colonne relative agli interventi valutati nel nostro studio si osserva che:

- l'intervento di *ripascimento* consente una protezione primaria mediante un ampliamento della spiaggia con apporto positivo di materiale.
- l'intervento di *scogliere sommerse* consente una protezione secondaria mediante una riduzione indotta delle onde incidenti per frangimento e una stabilizzazione della spiaggia per riduzione dell'apporto di materiale in direzione trasversale.
- l'intervento di *pennelli emersi* consente una protezione primaria che induce la stabilizzazione per riduzione dell'apporto di materiale in direzione longitudinale.

□ Elementi che condizionano l'efficienza delle tipologie considerate

L'efficienza di ciascuna delle tipologie considerate è condizionata da elementi che caratterizzano il litorale.

In **Tabella 7** sono stati attribuiti dei segni più e meno agli elementi che rendono la tipologia considerata più o meno efficiente al fine di ricostituire una spiaggia emersa. Tali elementi sono:

- entità del trasporto solido longitudinale;
- inclinazione della risultante dell'energia dei moti ondosi rispetto alla normale alla linea di costa con soglia tra il valore superiore ed inferiore intorno ai 10°;

- elevate variazioni del livello del mare corrispondenti ad oscillazioni normalmente superiori ad 1 m e valori estremi superiori a 2 m;
- mantenimento continuo dell'intervento con attività di monitoraggio annuale ed un intervento di mantenimento ogni 3-5 anni.

ELEMENTI CHE CONDIZIONANO L'EFFICIENZA DEGLI INTERVENTI		TIPOLOGIA									
		A	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	D1	D2
Entità del trasporto solido longitudinale	Alta	--	-		-	-	-				
	Bassa			+				+	++		
Inclinazione della risultante energetica dei moti ondosi rispetto alla normale alla costa	Alta	--	-		--	+	--	-			
	Bassa	++	++	+			++	++			
Elevata variazione del livello del mare			-		-		-			-	
Mantenimento continuo dell'intervento		+									
+ Debolmente condizionata positivamente		- Debolmente condizionata negativamente									
++ Fortemente condizionata positivamente		-- Fortemente condizionata negativamente									

**Tabella 7 – Schema degli elementi che condizionano l'efficienza delle tipologie considerate**

Evidenziando in giallo le colonne relative agli interventi valutati e agli elementi caratterizzanti l'area d'interesse, si osserva che:

- un alto trasporto solido longitudinale condiziona negativamente l'efficienza di un intervento di ripascimento o di scogliere sommerse, diversamente condiziona positivamente l'efficienza di un intervento di pennelli;
- una bassa inclinazione della risultante energetica dei moti ondosi rispetto alla normale alla costa, condiziona positivamente e fortemente l'efficienza di un intervento sia di ripascimento, sia di scogliere sommerse sia di pennelli corti emersi.
- nell'area di studio non si ha una elevata variazione del livello del mare;
- un'attività continua di mantenimento condiziona positivamente un intervento di ripascimento.

□ Effetti dovuti alla realizzazione degli interventi secondo le tipologie considerate

Per valutare la migliore tipologia da adottare per la difesa di un litorale è necessario considerare, oltre all'efficienza della protezione anche gli effetti indotti dall'intervento.

Sono stati, quindi, considerati gli effetti sulle strutture poste a tergo della battigia, gli effetti sul litorale e la visibilità delle opere.

EFFETTI DOVUTI ALLA REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI SECONDO LE TIPOLOGIE CONSIDERATE			TIPOLOGIA									
			A	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	D1	D2
Su strutture poste a tergo della battigia	Protezione diretta	Elevata	x		x						x	x
		Bassa				x	x			x		
	Protezione indiretta	Elevata										
		Bassa		x		x		x	x	x		
Sul litorale	Accrescimento	Elevata	x									
		Bassa		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Interruzione del trasporto solido longitudinale	Elevata			x					x	x	x
		Bassa			x	x	x	x	x			
Visibilità delle opere		Elevata			x					x	x	x
		Bassa					x	x	x			

**Tabella 8 – Schema degli effetti degli interventi**

Evidenziando in giallo le colonne relative agli interventi valutati nel nostro studio si osserva che:

- un intervento di ripascimento fornisce un incremento della spiaggia ed una protezione diretta piuttosto elevata. Si ricorda, che la manutenzione di tale intervento richiede una costante periodicità di rifornimenti di sabbia;
- un intervento di scogliere sommerse determina una stabilizzazione della spiaggia ed una protezione indiretta inferiore all'intervento precedente, ma se si considera tale intervento accoppiato al precedente, si ottiene un contributo alla difesa litoranea pari alla somma dei singoli contributi. Inoltre, le scogliere consentono di ridurre gli oneri di manutenzione del ripascimento stesso.
- un intervento con pennelli determina un accrescimento ed una protezione della spiaggia simile a quella descritta al punto precedente per le sole scogliere sommerse. In tale caso, però, si evidenzia che, l'intervento ha un impatto visivo significativo sul paesaggio.

#### **4.1.3 Confronto dei risultati**

Lo studio delle procedure di selezione delle tipologie di intervento di difesa della costa (riportate nei precedenti paragrafi 4.1.1 e 4.1.2) ha portato ad affermare che per il tratto di litorale oggetto del nostro studio, la soluzione di difesa più idonea è rappresentata da un ripascimento protetto da barriere sommerse. Tale intervento infatti, fornisce un immediato accrescimento della spiaggia, una protezione diretta con riduzione dell'energia dell'onda al frangimento, una riduzione degli oneri di manutenzione del ripascimento stesso ed una fattibile compatibilità ambientale.

Inoltre, anche la soluzione di ripascimento protetto da un sistema di pennelli mostra caratteristiche di fattibilità ed efficacia significativa, in quanto: consente una stabilizzazione della spiaggia per riduzione del trasporto di materiale in direzione longitudinale e presenta una buona compatibilità con alcuni aspetti ambientali quali il ricambio idrico e lo spazio per lo sviluppo della fauna marina.

Pertanto, anche questa alternativa di difesa, sebbene mostri caratteristiche d'efficienza inferiori rispetto alla protezione diretta del litorale, verrà ulteriormente esaminata nel prosieguo.

## 4.2 Ripascimento

L'intervento di ripascimento di un litorale, come è noto, consiste nel versamento di un determinato volume di sedimenti di idonea granulometria, composizione mineralogica e colore, allo scopo di spostare verso mare la linea di costa, laddove l'ampiezza della spiaggia risulta inadeguata a causa di una tendenza erosiva in atto.

Il materiale per il ripascimento generalmente si dispone all'inizio secondo un profilo più ripido di quello di equilibrio (ovvero, di quello che gli competerebbe in base alla propria granulometria) creando una perturbazione della linea di riva. Il modellamento del ripascimento artificiale avviene sia in direzione longitudinale attraverso un meccanismo di spandimento laterale, sia in direzione trasversale.

I principali fattori da cui dipendono i meccanismi di modellamento longitudinale e trasversale sono l'altezza d'onda al frangimento, il diametro medio del sedimento da versare, l'estensione del ripascimento, i coefficienti di *overfill* e di *ripascimento*.

In effetti, la scelta del materiale di riporto per un ripascimento artificiale costituisce un'operazione delicata che richiede il rispetto di alcune condizioni derivanti dal confronto tra la granulometria del materiale di riporto e quella del materiale originario.

Infatti, nell'ipotesi che il materiale di riporto abbia la stessa granulometria del materiale originario (o che sia leggermente più grossolano), il volume di progetto potrà essere calcolato considerando trascurabili le perdite di materiale di riporto dovute a diversità di comportamento sotto l'azione del moto ondoso (processi di rimozione e di selezione dei sedimenti).

L'utilizzo di materiale più fine comporterà invece, sotto l'azione del moto ondoso, la perdita di quantità anche considerevoli di sedimenti di cui si dovrà tener conto maggiorando adeguatamente i quantitativi di apporto calcolati nell'ipotesi di uniformità di caratteristiche tra materiale di ripascimento e materiale originario.

### 4.2.1 Coefficiente di overfill

Il coefficiente di overfill RA, calcolato da James (1975), viene riportato in **Figura 17**, nella quale sono indicate le seguenti grandezze:

RA = numero stimato di metri cubi di materiale richiesto per produrre un metro cubo di materiale di spiaggia quando la spiaggia è in condizioni compatibili con il materiale originario;

$\sigma_\phi$  = deviazione standard della distribuzione granulometrica del campione in unità  $\phi$ :

$$\sigma_\phi = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{2} \quad (5)$$

$M_\phi$  = diametro medio della distribuzione granulometrica del campione in unità  $\phi$ :

$$M_\phi = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16}}{2} \quad (6)$$

dove:

$\phi$  = scala di phi, misura alternativa alla dimensione del sedimento [ $\phi = \log_2(D)$ ].

$\Phi_{84}$  = 84<sup>th</sup> percentile in unità phi

$\Phi_{16} = 16^{\text{th}}$  percentile in unità phi

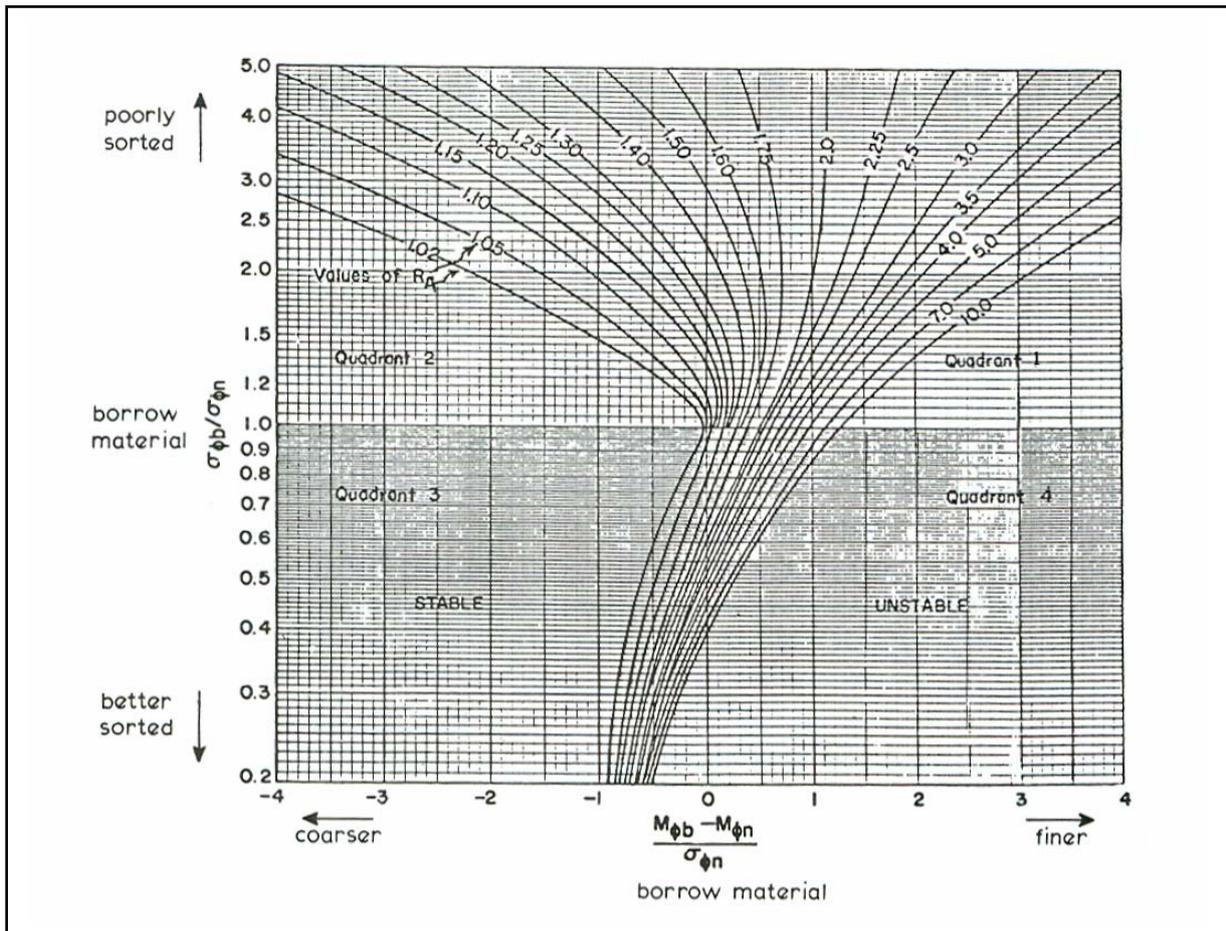


Figura 17 – Coefficiente di *overfill* RA

#### 4.2.2 Coefficiente di ripascimento

Un secondo coefficiente, che interessa la durata a lungo termine del ripascimento, riguarda l'incremento della frequenza degli apporti di sedimento rispetto al caso di invarianza del sedimento di riporto rispetto a quello nativo.

Infatti, la diversa dimensione dei sedimenti implica un diverso tempo di residenza del materiale nella zona interessata dal ripascimento. Tale coefficiente, indicato con RJ, è deducibile dal grafico riportato in **Figura 18** e rappresenta l'incremento della frequenza di ripascimento rispetto alla condizione di invarianza del sedimento di riporto rispetto a quello di origine.

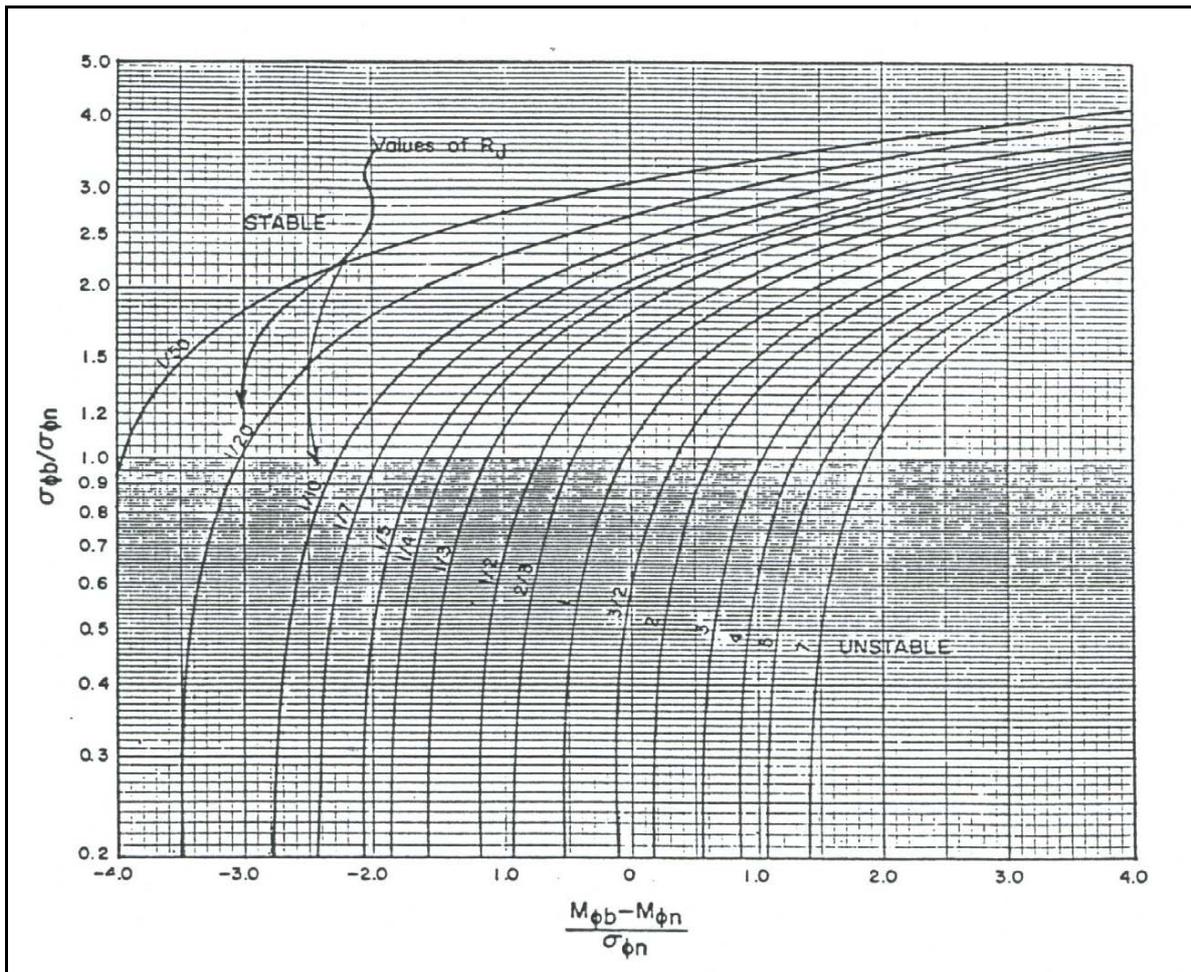


Figura 18 – Isolinee del fattore di ripascimento  $R_J$

#### 4.2.3 Calcolo del volume di ripascimento

Per determinare il volume di materiale necessario al ripascimento di una spiaggia è possibile utilizzare il metodo sviluppato da Dean (1991).

Bruun (1954) sviluppò un'equazione per la determinazione del profilo d'equilibrio della spiaggia dallo studio di spiagge lungo la costa del Mar Danese del Nord e lungo la costa della California e propose una legge semplice per relazionare la profondità dell'acqua  $h$  alla distanza off-shore (verso mare)  $x$ :

$$h = Ax^m \quad (7)$$

dove:

$A$  = parametro dimensionale (la sua dimensione dipende da quella dell'esponente  $m$ ), detto fattore di forma che dipende dalle caratteristiche di stabilità del materiale di fondo.

$$m = 2/3$$

La semplice legge ipotizzata da Bruun fu supportata da Dean (1977) che mostrò come il coefficiente di forma potesse essere rapportato alla velocità di caduta del sedimento dalla legge seguente:

$$A = 0,067w^{0,44} \quad (8)$$

Questo fattore di forma  $A$  fu relazionato al diametro dei sedimenti utilizzando le equazioni sviluppate da Hallermeier (1981):

$$w = 14 D^{1,1} \quad (9)$$

dove:

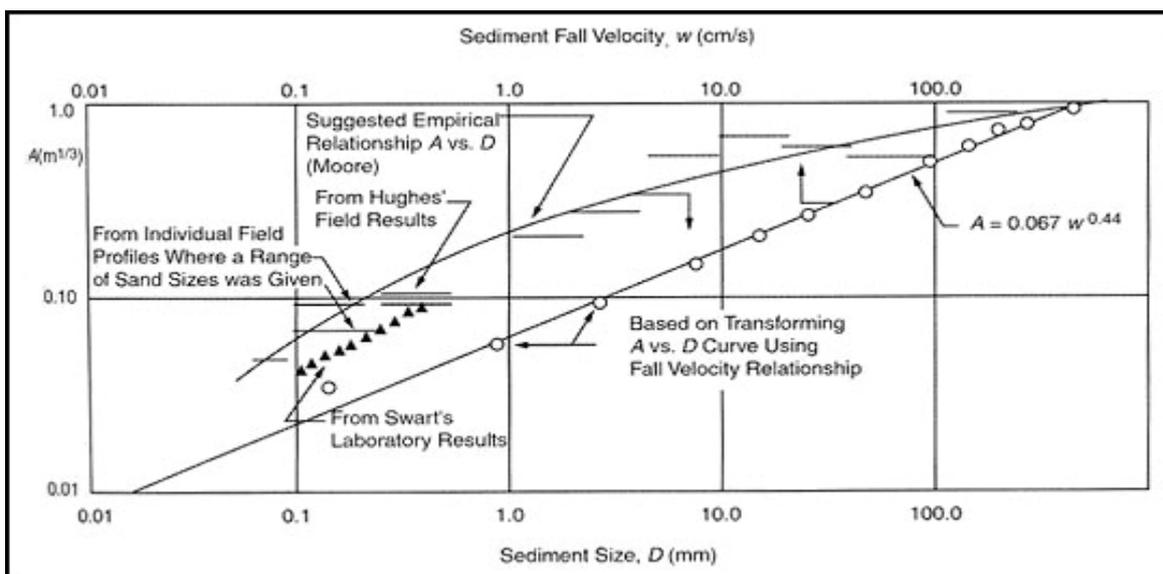
$w$  è espressa in  $cm/sec$

$D$  è il diametro medio dei sedimenti espresso in  $mm$ .

Il fattore di forma  $A$  può quindi essere espresso in funzione del diametro medio  $D$  delle particelle, dalla seguente:

$$A = 0,21D^{0,48} \quad (10)$$

Nella figura seguente viene illustrata la relazione tra  $A$ ,  $w$  e  $D$ :



**Figura 19 – Relazione tra il fattore di forma  $A$  il diametro medio dei granuli  $D$  e la velocità di sedimentazione  $w$  (Dean, 1987 e Moore, 1982).**

Il *Coastal Engineering Manual* mostra che, se si indica con  $B$  l'altezza della berma e con  $H$  la profondità di chiusura, allora l'avanzamento della spiaggia pari ad una distanza  $Y$ , mantenendo invariato il profilo e fino alla profondità di chiusura, richiede un volume  $V$  di ripascimento dato da:

$$V = (B+H) Y \quad (11)$$

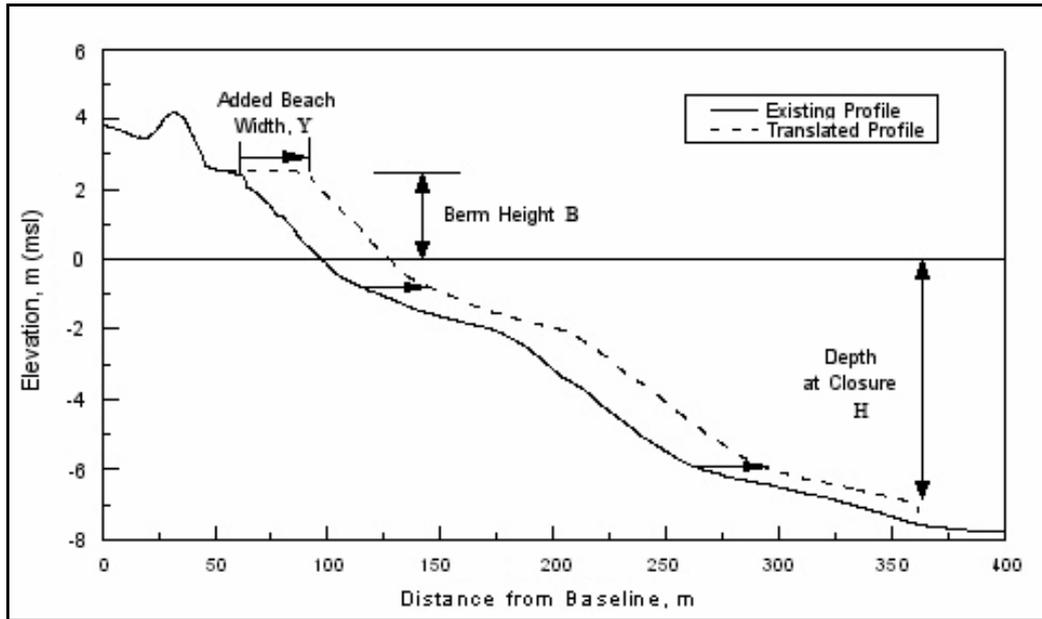


Figura 20 – Volume di sedimento per unità di lunghezza di spiaggia.

Dean (1991) definisce tre tipi base di profili di ripascimento:

- “*Intersecting profile*” dove il profilo conseguente al ripascimento interseca il profilo originario;
- “*Non-intersecting profile*” dove il profilo del ripascimento non interseca il profilo originario prima della profondità di chiusura;
- “*Submerged profile*” dove dopo l’equilibrio non c’è spiaggia emersa.

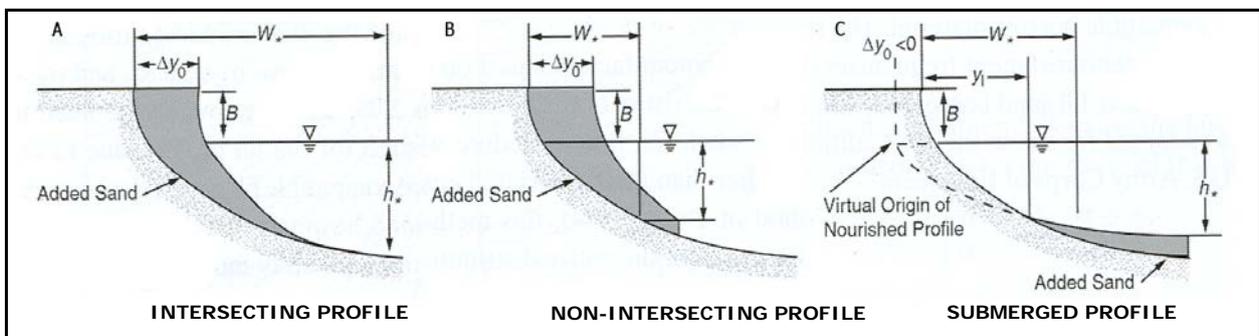


Figura 21 – Tipi base di profili di ripascimento (Dean 1991)

Dean mostra che un profilo è “*Intersecting*” o “*Non-intersecting*” secondo che si verifica:

$$Y = \left(\frac{A_N}{H}\right)^{3/2} + \left(\frac{A_N}{A_F}\right)^{3/2} < 1, \text{ Intersecting Profiles} \quad (12)$$

$$Y = \left(\frac{A_N}{H}\right)^{3/2} + \left(\frac{A_N}{A_F}\right)^{3/2} > 1, \text{ Non-intersecting Profiles} \quad (13)$$

dove:

$A_N$  = valore di A riferito al sedimento originario

$A_F$  = valore di A riferito al sedimento di ripascimento

I volumi (per unità di lunghezza) di materiale da ripascimento per un profilo “non – intersecting” e un profilo “intersecting” sono dati rispettivamente dalle seguenti equazioni:

$$V = YB + \frac{3}{5} H^{5/2} \left[ \left[ \frac{Y}{H^{3/2}} + \left( \frac{1}{A_F} \right)^{3/2} \right]^{5/3} A_N - \left( \frac{1}{A_F} \right)^{3/2} \right] \quad (14)$$

$$V = BY + \frac{\frac{3}{5} A_N Y^{5/3}}{\left[ 1 - \left( \frac{A_N}{A_F} \right)^{3/2} \right]^{2/3}} \quad (15)$$

Ipotizzando due possibili avanzamenti della linea di riva del *Litorale Sentina* per un'estensione di circa 1,700 km, rispettivamente di circa 30 m e 60 m e applicando le equazioni [14 -15], sono stati calcolati in **Tabella 9** i diversi volumi di materiale necessari per il ripascimento, corrispondenti a diversi valori di diametro medio dei granuli di ripascimento.

$D_N$ (mm)	$D_F$ (mm)	B (m)	Y (m)	H (m)	$A_N$	$A_F$	$Y_p$	$Y_p \leq 1$ $V_1$ Intersecting (m <sup>3</sup> )	$Y_p > 1$ $V_N$ Non-intersecting (m <sup>3</sup> )	V per unità di lunghezza ≈ 1,700m
0,20	0,15	1,3	30	7,57	0,097	0,084	1,232	0,00	873,30	<b>1.484.604</b>
0,20	0,20	1,3	30	7,57	0,097	0,097	1,001	0,00	269,38	<b>457.942</b>
0,20	0,25	1,3	30	7,57	0,097	0,108	0,853	99,13	0,00	<b>168.516</b>
0,20	0,15	1,3	60	7,57	0,097	0,084	1,232	0,00	1182,16	<b>2.009.677</b>
0,20	0,20	1,3	60	7,57	0,097	0,097	1,001	0,00	545,25	<b>926.925</b>
0,20	0,25	1,3	60	7,57	0,097	0,108	0,853	268,89	0,00	<b>457.115</b>

$D_N$  = diametro medio del sedimento *originario* espresso in mm.

$D_F$  = diametro medio del sedimento *di ripascimento* espresso in mm.

B = altezza della berma

Y = lunghezza dell'avanzamento della spiaggia

H = profondità di chiusura

$Y_p \leq 1$  = “*Intersecting profile*” profilo conseguente al ripascimento interseca il profilo originario;

$Y_p > 1$  = “*Non-intersecting profile*” il profilo del ripascimento non interseca il profilo originario prima di H

**Tabella 9 – Calcolo del volume di materiale per il ripascimento.**

In particolare, risultando il diametro medio del sedimento originario  $D_N$  pari a circa 0,2 mm, se si ipotizza un valore medio del diametro dei granuli di ripascimento  $D_F$  almeno pari a circa 0,2 mm, allora applicando la [14] il volume di materiale necessario al ripascimento della spiaggia in esame, per avanzamenti di 30 m e 60 m, dovrà essere rispettivamente paria a circa 460.000 m<sup>3</sup> e 930.000 m<sup>3</sup>.

Si osserva che il calcolo del volume di ripascimento per il raggiungimento del profilo di equilibrio di Dean, si riferisce al caso in cui il ripascimento non sia protetto (da un sistema di scogliere o di pennelli). Di conseguenza, in presenza di opere situate ad una profondità media, inferiore alla profondità di chiusura, la quantità di ripascimento necessaria a determinare un avanzamento della linea di riva di 30 e 60 m sarà inferiore a quella in **Tabella 9**.

### 4.3 Ripascimento protetto

#### 4.3.1 I<sup>a</sup> ipotesi di intervento: ripascimento protetto da un sistema di barriere sommerse

Un'ipotesi di intervento di difesa nel tratto di litorale in esame, ovvero antistante la Riserva Naturale Sentina può essere rappresentata da un ripascimento protetto (Allegati 7-8) da una serie di *scogliere sommerse* che presentino le seguenti caratteristiche:

- disposte in maniera parallela alla linea di riva ad una profondità di circa -3,2 m (in continuità con l'allineamento delle opere esistenti);
- ciascuna lunga 260 m;
- distanti l'una dall'altra 30 m;
- aventi sommergezza 0,5 m rispetto al l.m.m.,
- con pendenza lato mare e lato terra pari a 2:1

Supposto che le opere in progetto vengano poste ad una profondità di 3,2 sul l.m.m., il volume di ripascimento necessario all'avanzamento della spiaggia di 30 e 60 m è stato stimato, in base alla geometria assunta dal grafico del profilo di equilibrio di Dean, rispettivamente pari a 190.000 e 380.000 m<sup>3</sup>, sulla base dello schema seguente:

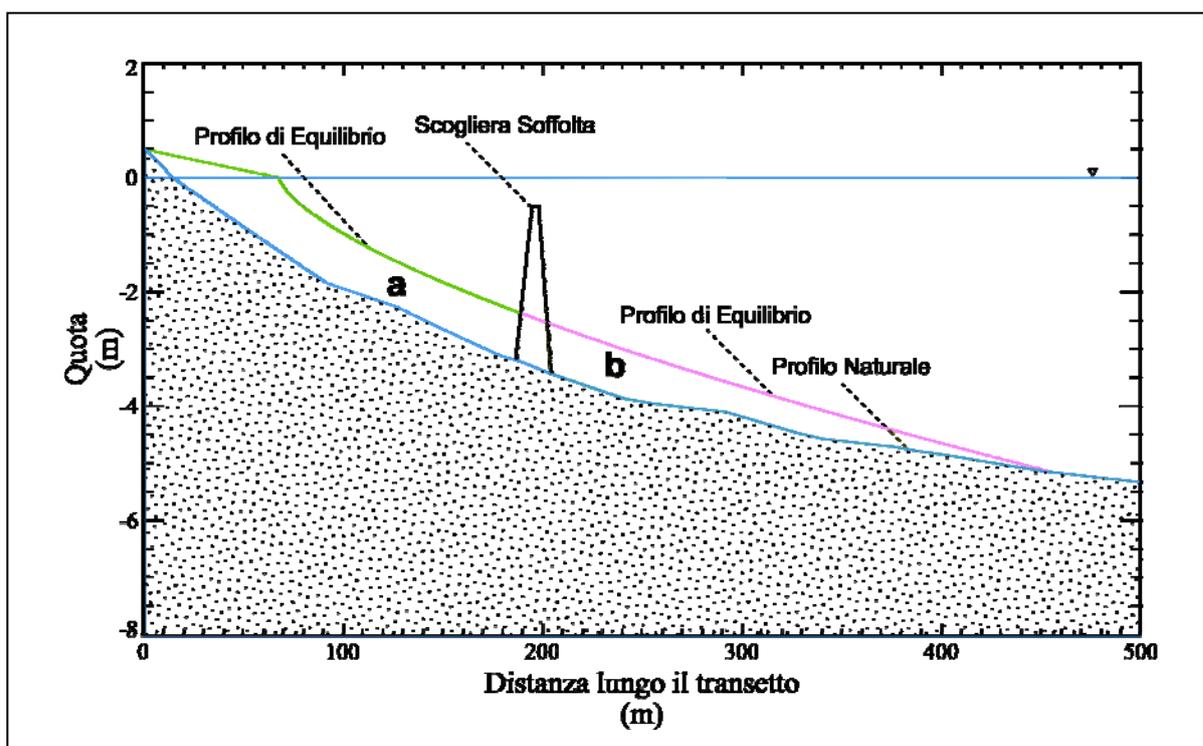


Figura 22 – Schema del profilo di equilibrio di Dean

Nella **Figura 22** viene evidenziato il profilo naturale (in blu) lungo un transetto ortogonale alla costa in corrispondenza del centro della 4<sup>a</sup> barriera da nord.

Su questo profilo è stato sovrapposto il profilo di Dean fino ad incontrare il profilo naturale (linea verde e rossa). Successivamente è stato evidenziato in giallo il volume (b) di ripascimento che non viene posto in opera: quello che si trova al disotto del profilo di Dean, dopo che il profilo stesso ha intersecato la massicciata dell'opera. Il volume effettivamente messo in opera è rappresentato dall'area indicata come (a).

Una *stima del dimensionamento della mantellata* di tali opere potrà essere effettuata se si assume che l'*altezza dell'onda di progetto* sia pari all'*altezza d'onda limite al frangimento*  $H_b$  definita da J. W. Kamphuis (1991) nella seguente equazione:

$$H_b = 0,56 * e^{3,5*m} d_b \quad (16)$$

dove:

$d_b$  = la profondità di frangimento

$m$  = pendenza del fondale

La determinazione di  $d_b$  viene effettuata in funzione della massima profondità al piede della scogliera e del sovrizzo del livello del mare.

Considerando la dolce acclività dei fondali del litorale in esame si ipotizza di realizzare le scogliere ad una *profondità di circa 3,2 m* e si tiene conto del contributo di *sovrizzo del livello del mare in condizioni estreme* dato da:

$$S = S_T + S_B + S_W \quad (17)$$

dove:

$S_T$  = sovrizzo del livello del mare dovuto alla marea astronomica

$S_B$  = sovrizzo dovuto all'effetto barico inverso

$S_W$  = sovrizzo del livello del mare dovuto all'azione del vento

Dunque, utilizzando per il caso in esame, i dati osservati dal mareografo di Ortona nel periodo 1998-2007 (APAT) si stima un sovrizzo del livello del mare, in condizioni estreme, pari a:

$$S = 60\text{cm} + 28\text{cm} + 30\text{cm} = 1,18 \text{ m} \quad (18)$$

che sommato alla profondità di 3,2 m determina una profondità complessiva di 4,38 m.

Inoltre, si osserva che, le onde, con altezza significativa  $H_s \geq 4,1\text{m}$  (APAT), per tempi di ritorno  $T = 50$  anni, frangono più a largo di  $d_b = 4,38$  m. Dunque, l'assunto secondo cui l'altezza dell'onda di progetto sia pari all'altezza limite al frangimento  $H_b$  viene, in tal modo, giustificato.

Sostituendo  $m = 0,01$  e  $d_b = 4,38$  nella equazione (16) si ottiene  $H_b = 2,62$  m.

Supponendo trascurabili gli effetti dell'opera sul processo di frangimento, è possibile valutare la distanza  $x_p$  percorsa dal frangente. Per tale distanza, nota la pendenza  $m$  del fondale, può essere adottata la seguente espressione che interpola numerosi risultati sperimentali (Galvin, 1969):

$$x_p = \tau_p H_b = (4,0 - 9,25m) H_b \quad (19)$$

dove:

$\tau_p$  = distanza di *plunging* dimensionale (**Figura 23**)

$m$  = pendenza del fondale

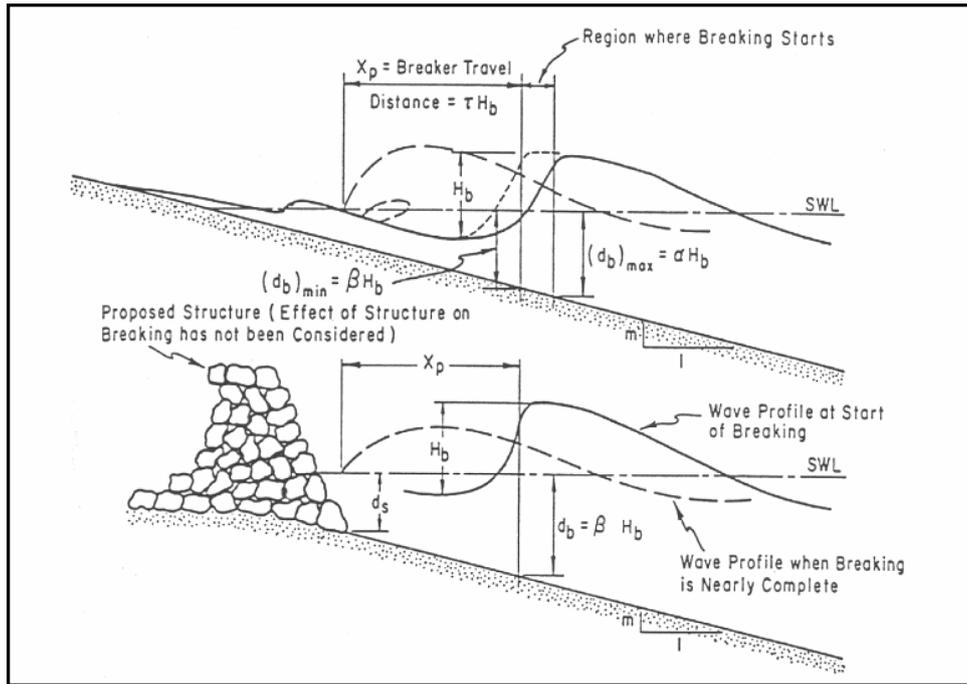
$H_b$  = altezza onda al frangimento  $H_b$

Sostituendo il valore di  $m = 0,01$  nell'equazione (19) si ottiene:

$$x_p = 3,91 * H_b \quad (20)$$

e nell'equazione (16) si ottiene:

$$H_b = 0,58 d_b \quad (21)$$



**Figura 23 – Distanza percorsa dal frangente  $x_p$**

Si ottiene  $x_p = 10,2$  m, da cui si calcola un incremento di profondità  $\Delta d_b$  dal piede della scogliera pari a:

$$\Delta d_b = x_p * m = 0,06 \approx 0,1 \text{ m} \quad (22)$$

Quindi, tenendo conto dell'incremento di profondità  $\Delta d_b$  e del set up del livello del mare in condizioni estreme,  $d_b$  ed  $H_b$  diventano rispettivamente:

$$d_b' = 3,2 \text{ m} + 1,18 \text{ m} + 0,1 \text{ m} = 4,39 \text{ m} \quad (23)$$

$$H_b' = 0,58 * 4,39 \text{ m} = 2,55 \text{ m} \quad (24)$$

La determinazione del peso dei massi naturali costituenti la mantellata delle scogliere può essere determinata per mezzo della formula di Van der Meer (Ferrante, 1994):

$$\frac{H_b'}{\Delta D_{n50}} = 6.2 p^{0.18} (S_d / \sqrt{N})^{0.2} \xi_m^{-0.5} \quad (\text{frangimento di tipo "plunging"}) \quad (25)$$

$$\frac{H_b'}{\Delta D_{n50}} = 1.0 p^{0.13} (S_d / \sqrt{N})^{0.2} \xi_m^p \sqrt{\cot \alpha} \quad (\text{frangimento di tipo "surging"}) \quad (26)$$

in cui:

$H_b'$  = altezza dell'onda frangente al piede dell'opera;

$\Delta = (\rho_r / \rho_w) - 1$  = densità di massa relativa, dove rispettivamente  $\rho_r$  e  $\rho_w$  sono il peso specifico della mantellata e dell'acqua di mare;

$D_{n50} = (M_{50} / \rho_r)^{1/3}$  = diametro nominale, dove,  $M_{50}$  è il peso dei massi della mantellata;

$p$  = parametro di permeabilità;

$S_d$  = grado di danneggiamento ammesso sulla struttura;

$N$  = numero di onde (durata della mareggiata);

$\alpha$  = pendenza della mantellata lato terra;

$\xi_m = tg \alpha / \sqrt{s_m}$  = numero di Irribarren;

$s_m$  = ripidità dell'onda di largo

Il numero di Irribarren va confrontato con il suo valore critico  $\xi_c$  dato da:

$$\xi_c = \left( 6,2 \cdot p^{0,31} \cdot \sqrt{\tan \alpha} \right)^{\frac{1}{p+0,5}} \quad (27)$$

se  $\xi_m$  è minore di  $\xi_c$  il frangimento è di tipo "plunging", altrimenti è di tipo "surging".

Il parametro di permeabilità  $p$  è stato tenuto entro i limiti  $0,10 \leq p \leq 0,60$  ed, in particolare, posto pari a 0,5.

Il danno, dato dal rapporto tra l'area  $A_e$  della porzione di mantellata interessata dal dislocamento e il quadrato del diametro nominale  $D_{n50}$  dei massi, ovvero:

$$S_d = A_e / D_{n50}^2 \quad (28)$$

è stato valutato pari a 2%.

La durata della mareggiata viene definita attraverso il numero di onde  $N$  pari a 3000. La ripidità  $s_m$  dell'onda di largo è data dalla seguente:

$$s_m = 2\pi H_s / gT^2 \quad (29)$$

ed è, quindi, calcolata pari a 0,029.

Dallo studio delle scogliere già esistenti nel tratto di litorale a nord della Riserva Sentina una e sulla base delle analisi morfologiche effettuate è stata considerata una pendenza  $\alpha$  pari a 30°.

Quindi, entrando nell'eq. (25) con i parametri sopra calcolati, si ottengono in **Errore**. **L'origine riferimento non è stata trovata.** i valori di  $D_{n50}$  e  $M_{50}$ :

Hb' (m)	p	$\alpha$ (°)	$\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	N	S <sub>d</sub> (%)	tan $\alpha$	T (s)	s <sub>m</sub>	$\xi_m$	$\xi_c$	$\Delta$	Dn <sub>50</sub> (m) (plunging)	M <sub>50</sub> (ton)
2,55	0,50	30	2.600	1.030	3.000	2,00	0,6	7,493	0,029	3,387	3,800	1,524	1,09	3,36

Hb' = altezza d'onda p = permeabilità $\alpha$ = pendenza della mantellata $\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> ) = peso specifico della mantellata $\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> ) = peso specifico dell'acqua N = numero di onde S <sub>d</sub> (%) = percentuale di danno	T = periodo d'onda S <sub>m</sub> = ripidità $\xi_m$ = Numero di Irribarren $\xi_c$ = valore critico del numero di Irribarren $\Delta = (\rho_r/\rho_w) - 1$ Dn <sub>50</sub> = diametro nominale del masso naturale M <sub>50</sub> = peso del masso naturale
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Tabella 10 – Parametri di progetto di scogliere sommerse tipo, per l'intervento di ripascimento protetto.**

Si suggerisce, a vantaggio di sicurezza, l'utilizzo di massi di III categoria del peso di 4,0 t e D<sub>n50</sub> = 1,15 m, in conformità alle scogliere già esistenti sul litorale protetto.

L'ipotesi di difesa con ripascimento protetto da un sistema di scogliere sommerse è riportato in planimetria nell'ALLEGATO 7 e la sezione della scogliera tipo è riportata nell'ALLEGATO 8. Tale sistema di difesa è stato simulato utilizzando il modello Genesis per poter analizzare l'evoluzione della linea di costa nel tratto in esame nei prossimi 30 anni in presenza delle opere.

#### 4.3.2 II° ipotesi di intervento: ripascimento protetto da un sistema di Pennelli

Una seconda ipotesi di intervento nel tratto di litorale oggetto di studio è rappresentata da un sistema di difesa trasversale alla linea di costa costituito da 17 pennelli distanti l'uno dall'altro 100 m e lunghi ognuno circa 100 m, posizionati (ALLEGATO 9) nel modo seguente:

- Si identifica la direzione del flusso netto di energia associato al moto ondoso;
- Si traccia la normale alla direzione sopra individuata intercettante la costa nel punto scelto per la posizione del primo pennello;
- si posiziona il secondo pennello ad una distanza dal primo pari alla distanza di progetto scelta (100 m). La lunghezza del secondo pennello sarà data dalla distanza tra la costa e il punto di intersezione tra la perpendicolare alla costa e la perpendicolare del flusso netto di energia precedentemente tracciata.
- Si ripete la procedura fino alla copertura dell'intero tratto di litorale in esame.

Una stima del dimensionamento della mantellata di tali opere trasversali potrà essere effettuata se si assume che l'altezza dell'onda di progetto H<sub>sb</sub>, definita dall'equazione (16) [J. W. Kamphuis (1991)], sia pari a 1,86 m,

essendo:

d<sub>b</sub> (profondità alla testata del pennello) = -2 m

m (pendenza del fondale) = 0,01 m

S (sopralzo del livello del mare in condizioni estreme) ≈ 1,20 m

Sostituendo questo valore nella formula di Hudson:

$$M = \frac{\rho_r H_{sb}^3}{S_d \left( \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot g \alpha} \quad (30)$$

dove:

- $S_d$  = grado di danneggiamento ammesso sulla struttura;
- $\rho_r$  e  $\rho_w$  sono il peso specifico della mantellata e dell'acqua di mare;
- $\alpha$  = pendenza della mantellata

si ottiene il valore M del peso dei massi naturali che deve avere la mantellata, pari a 2,46t. Si tratta di massi appartenenti alla II° categoria compresi tra 2 -3 t. da cui si ricava che il  $D_{n50} \approx 1$  m.

Il disegno delle sezioni tipo di un pennello è riportato nell'**ALLEGATO 10**.

Altezza d'onda di progetto (Kamphuis)				Peso del masso della mantellata (Hudson)							
db	m	Hsb		$\alpha$	$\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	$S_d$ (%)	M (ton)	$M_{50}$ (ton)	$D_{50}$ m	
3,2	0,01	1,79	0,035	27	2,60	1,03	2,00	2,46	2,50	0,99	
$\alpha$ = pendenza della mantellata											
$m$ = pendenza del fondale											
$H_{sb}$ = altezza d'onda di progetto											
$\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> ) = peso specifico della mantellata											
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> ) = peso specifico dell'acqua											
$d_b$ = profondità di progetto che tiene conto dell'incremento dovuto alle variazioni del l.m.m. in condizioni estreme											
$S_d$ (%) = percentuale di danno											

**Tabella 11 -Calcolo del peso dei massi della mantellata**

L'ipotesi di difesa con ripascimento protetto da un sistema di pennelli è riportato in planimetria nell'**ALLEGATO 9** e le sezioni dei pennelli tipo sono riportate nell'**ALLEGATO 10**. Anche tale sistema di difesa è stato simulato utilizzando il modello Genesis per poter analizzare l'evoluzione della linea di costa nel tratto in esame nei prossimi 30 anni in presenza delle opere e poter confrontare i risultati ottenuti dalle diverse ipotesi di intervento simulate.

## 5. ANALISI DELLE POSSIBILI SOLUZIONI DI INTERVENTO

### 5.1 Applicazione di un modello di morfodinamica costiera: GENESIS

#### 5.1.1 Taratura del Modello Genesis

##### 5.1.1.1. Scelta delle linee di costa storiche

Nel modello Genesis, inizialmente, sulla base dei soli dati disponibili relativi ai rilievi della linea di costa forniti dalla Regione Marche (1894-1999), è stato importato, il set di dati in coordinate Gauss-Boaga per il periodo tra il 1985 e il 1999. Tale scelta è stata giustificata dalla necessità di eseguire la calibrazione del modello per un periodo in cui fosse minimo il numero di interventi sulle opere di difesa costiera.

Per la calibrazione del modello, quindi, in un primo momento è stata importata la linea di costa del 1985 e scelta la linea di costa del 1999 come riferimento in base al quale tarare i parametri per far coincidere i risultati della simulazione con questa linea (*Reference Line*). In un secondo momento, con la consegna del rilievo della linea di costa del 2008 e la conseguente valutazione di un aumento significativo del trend erosivo di questi ultimi anni (*vedi paragrafo 3.5*) si è ritenuto opportuno eseguire una ulteriore calibrazione del modello importando la linea di costa del 1999 come linea di partenza ed utilizzando la linea del 2008 come *Reference Line*.

In tutte le simulazioni la *risoluzione del grigliato computazionale è stata posta pari a 25 m*.

##### 5.1.1.2. Creazione del file di onde

A partire dalla serie di dati triorari della boa di Ortona propagati a costa in corrispondenza della batimetrica -10 m. dal luglio 1989 al luglio 2006, è stato creato un anno virtuale di dati ondometrici che riporta in sintesi l'insieme delle proprietà statistiche della serie. In tal modo, nell'applicazione del modello Genesis, è stato possibile riprodurre gli effetti del moto ondoso su un periodo di tempo generico (multiplo di 1 anno).

L'anno sintetico è stato realizzato utilizzando l'intera serie di misure (ignorando i dati non registrati) e concentrando gli eventi, in un singolo anno. A tal fine è stato necessario ridurre l'intervallo temporale tra una misura e l'altra da 3 ore a 12 minuti. Inoltre, per ottenere una serie temporale della durata esatta di un anno, è stato ripetuto due volte il periodo di misure dal mese di luglio 1989 al mese di giugno 1990.

Il file sintetico così creato è stato implementato nel Genesis tramite l'applicativo WWL Data.

Il *time step* impostato pari a 12 minuti garantisce la stabilità numerica.

##### 5.1.1.3. Condizioni al contorno

In un primo momento è stata implementata nel modello l'intera unità fisiografica dal Porto di S. Benedetto del Tronto a Nord alla foce del Fiume Tronto a Sud.

La presenza del Porto è stata simulata tramite l'inserimento di un pennello di lunghezza equivalente a quella delle strutture portuali (775 m) e il molo Nord della foce del Fiume Tronto imponendo la presenza del pennello (30 m di lunghezza).

L'analisi dei risultati di questa simulazione ha mostrato che in un periodo di poche decine di anni la dinamica del litorale antistante la Riserva Sentina non risente e non influenza la tendenza evolutiva del tratto di litorale settentrionale dell'unità fisiografica. Pertanto si è scelto di limitare il

litorale oggetto della simulazione al tratto che va dal molo Nord della foce del fiume fino alla settima barriera parallela oltre il limite Nord della Riserva Sentina.

Nella nuova configurazione del modello la condizione al contorno Sud è lasciata invariata rispetto alla simulazione precedente.

La condizione al limite nord è stata posta in modo tale da impedire un apporto di materiale dall'esterno. Tale condizione è stata realizzata tramite l'introduzione di un pennello fittizio sporgente circa 20 m per limitare il sedimento in uscita e impedire il passaggio di sedimento in ingresso.

È stata impostata come *Regional contour line*, la linea di costa rilevata nel 2008 (UNICAM) mentre il valore di smoothing, tramite "media mobile" della linea dei frangenti, è stato posto pari a 11.

#### 5.1.1.4. Inserimento delle opere di difesa

Sono state inserite le opere sulla base di dati planimetrici forniti dalla Regione Marche e di dati ottenuti da recenti sopralluoghi tecnici.

È stata scelta la formula d'Angremond, per la determinazione dei coefficienti di trasmissione  $K_t$  delle scogliere emerse esistenti e la formula di Ahrens [36] per le scogliere sommerse.

#### 5.1.1.5. Inserimento dei parametri sedimentologici e caratteristiche della spiaggia

I parametri di input inseriti nel modello sono:

- il  $D_{50}$  è stato posto a 0,2 mm ed è stato fatto variare tra 0,175 e 0,4 mm. Tali valori, che evidenziano una *sabbia medio fine*, sono stati scelti in seguito ai risultati delle analisi granulometriche ICRAM e UNICAM effettuate su sedimenti di spiaggia emersa e sommersa, come media di insieme del sedimento presente dalla linea di battigia fino alla batimetrica -1 m.
- *Profondità di chiusura* posta pari a 7,57 m (*paragrafo 3.3*)
- *Altezza della berma* posta a 1,3 m a seguito del sopralluogo tecnico.
- Il valore di  $K_1$  posto pari a 0,13.
- Il valore di  $K_2$ , posto pari a 0,0.

#### 5.1.2 Scenari di simulazione

Per la previsione dell'evoluzione della linea di riva, nel tratto di litorale oggetto di studio, per gli anni futuri (2038) sono stati simulati nel modello GENESIS i seguenti scenari:

Scenario 0: caso attuale in cui non viene rimossa la barriera di protezione dell'ex condotta fognaria fino all'anno 2038;

Scenario 1: caso attuale in cui viene rimossa la barriera di protezione della ex condotta fognaria;

Scenario 2: ripascimento di 30 m (*paragrafo 4.2*);

Scenario 3: ripascimento di 60 m (*paragrafo 4.2*);

Scenario 4: ripascimento di 30 m protetto da un sistema di scogliere sommerse (*paragrafo 4.3.1*);

Scenario 5: ripascimento di 60 m protetto da un sistema di scogliere sommerse (*paragrafo 4.3.1*);

Scenario 6: ripascimento di 30 m protetto da un sistema di pennelli (100 m) (*paragrafo 4.3.2*);

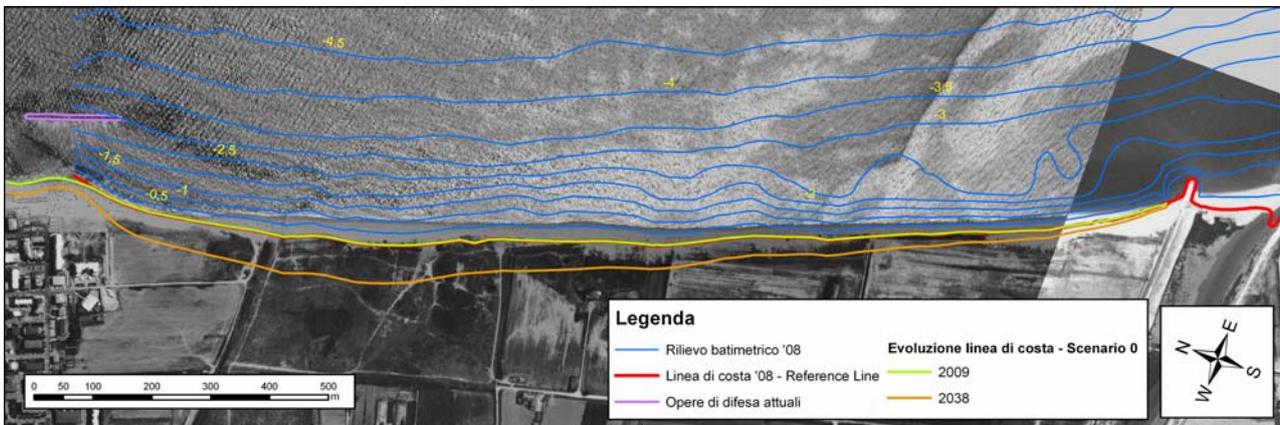
Scenario 7: ripascimento di 60 m protetto da un sistema di pennelli (100 m) (*paragrafo 4.3.2*)

Scenario 8: sistema di scogliere sommerse (*paragrafo 4.3.1*);

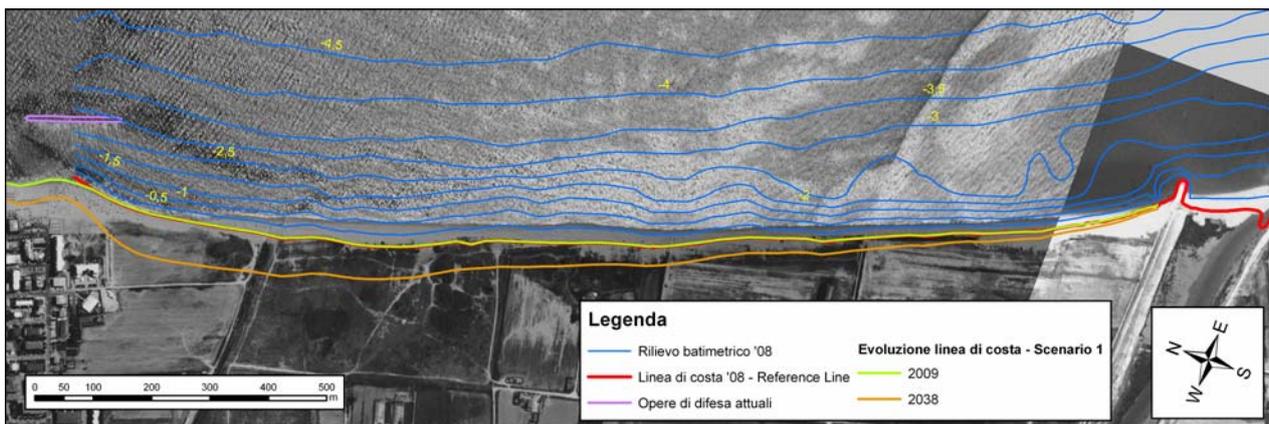
Scenario 9: un sistema di scogliere sommerse con sommergenza -1m;

### 5.1.3 Risultati delle simulazioni

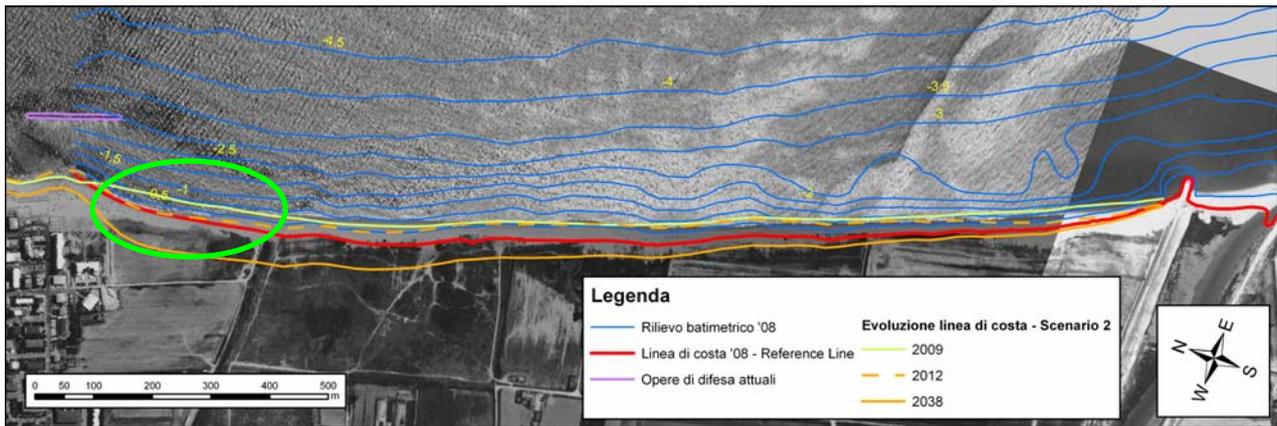
Nelle figure seguenti sono riportati i risultati dei predetti scenari:



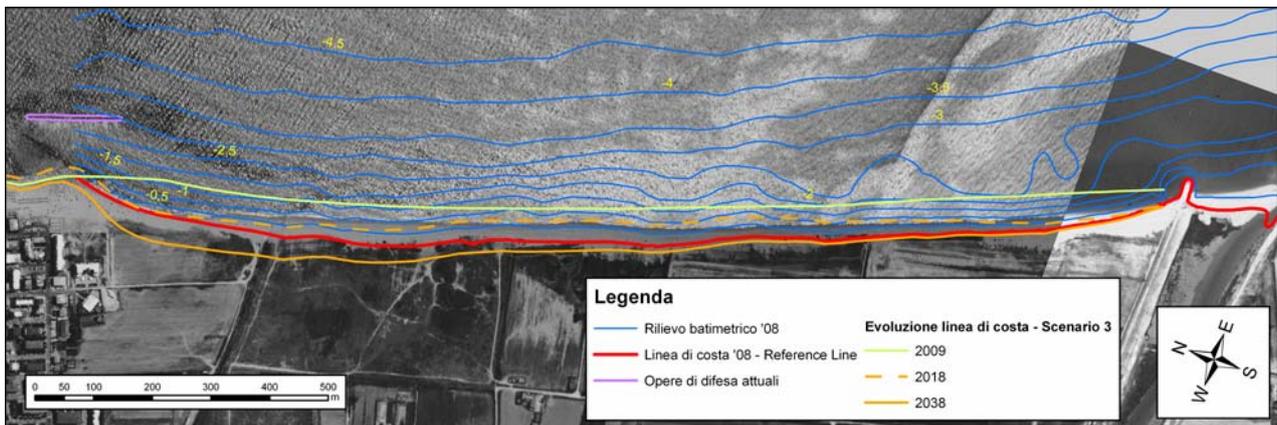
**Figura 24 – SCENARIO 0: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038 nel caso in cui non venga realizzato alcun intervento di difesa e non venga rimossa la barriera a protezione dell'ex condotta fognaria.**



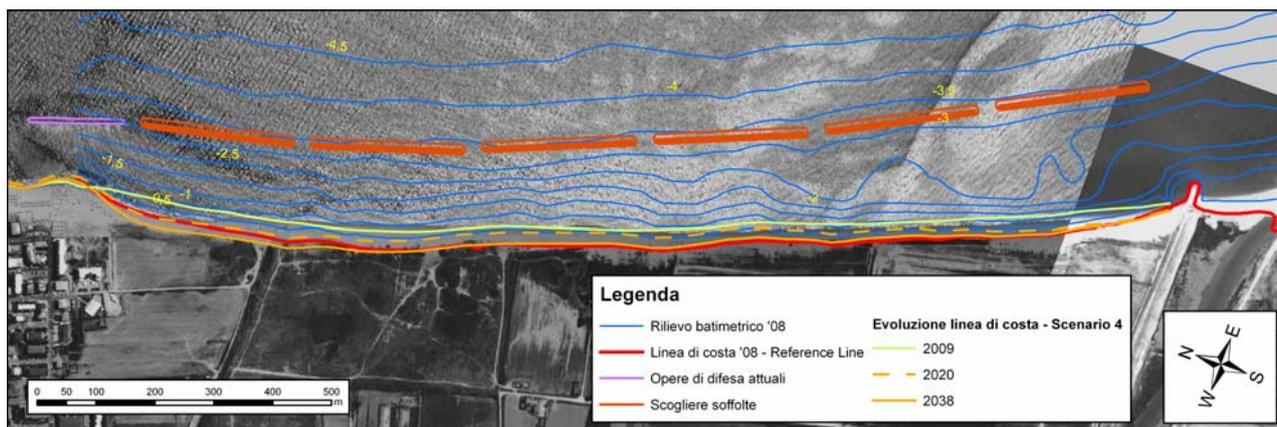
**Figura 25 – SCENARIO 1: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui non venga realizzato alcun intervento di difesa e venga completamente rimossa la barriera a protezione dell'ex condotta fognaria.**



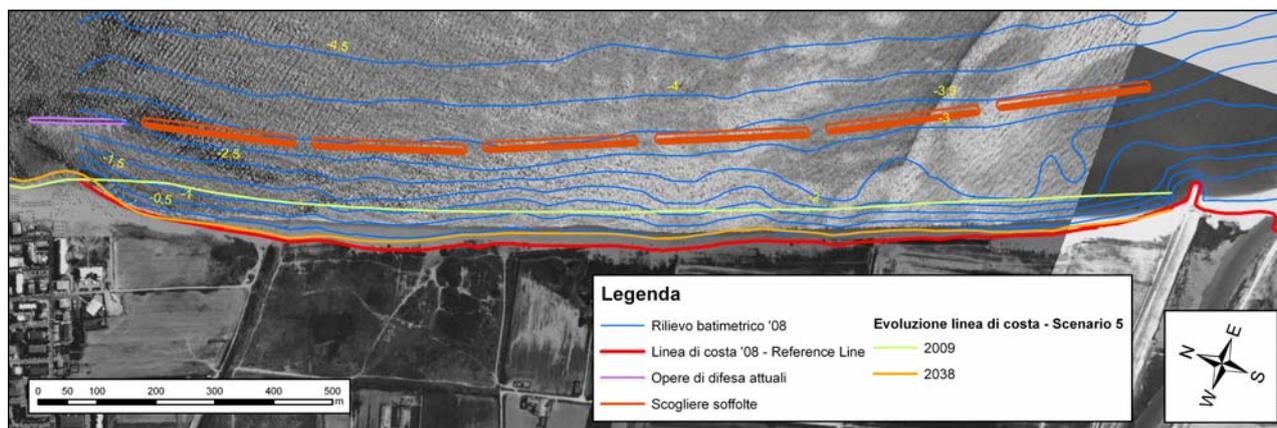
**Figura 26 – SCENARIO 2: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un ripascimento di 30 m (paragrafo 4.2).**



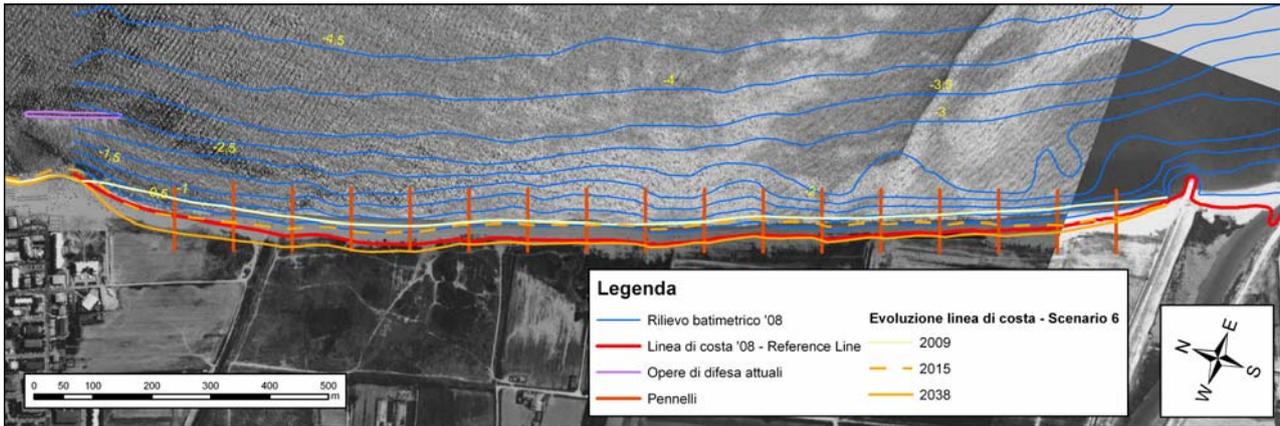
**Figura 27 – SCENARIO 3: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un ripascimento di 60 m (paragrafo 4.2)**



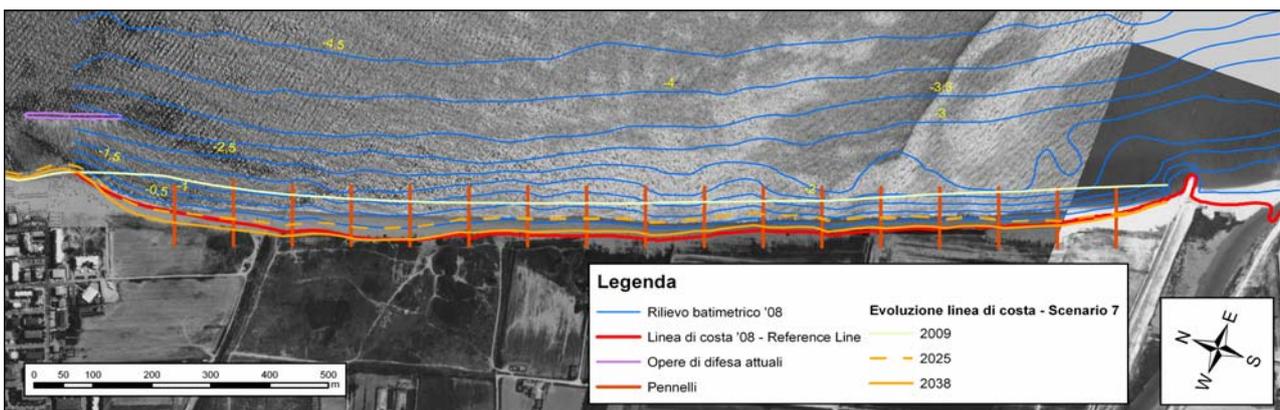
**Figura 28 – SCENARIO 4: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un ripascimento di 30 m protetto da un sistema di scogliere sommerse.**



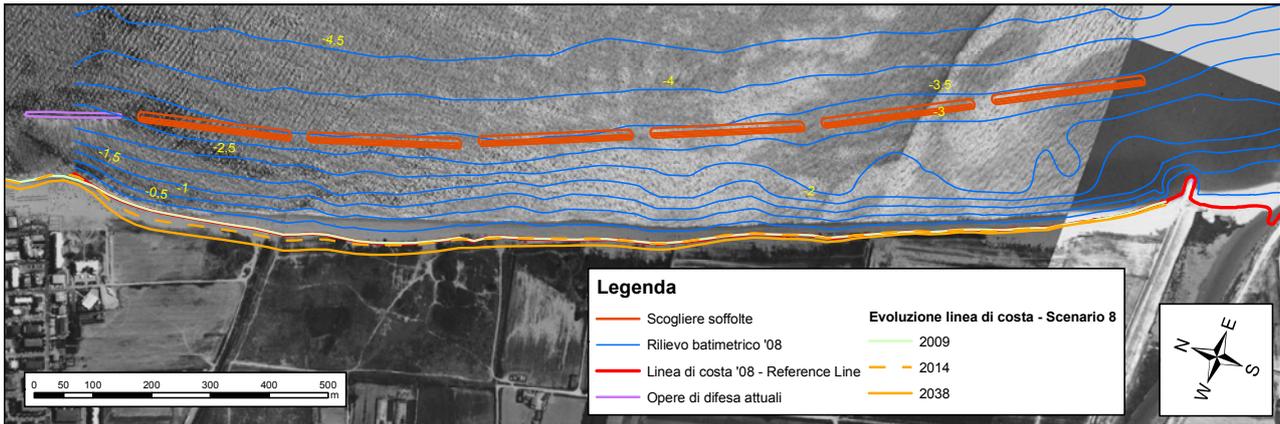
**Figura 29 – SCENARIO 5: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un ripascimento di 60 m protetto da un sistema di scogliere sommerse.**



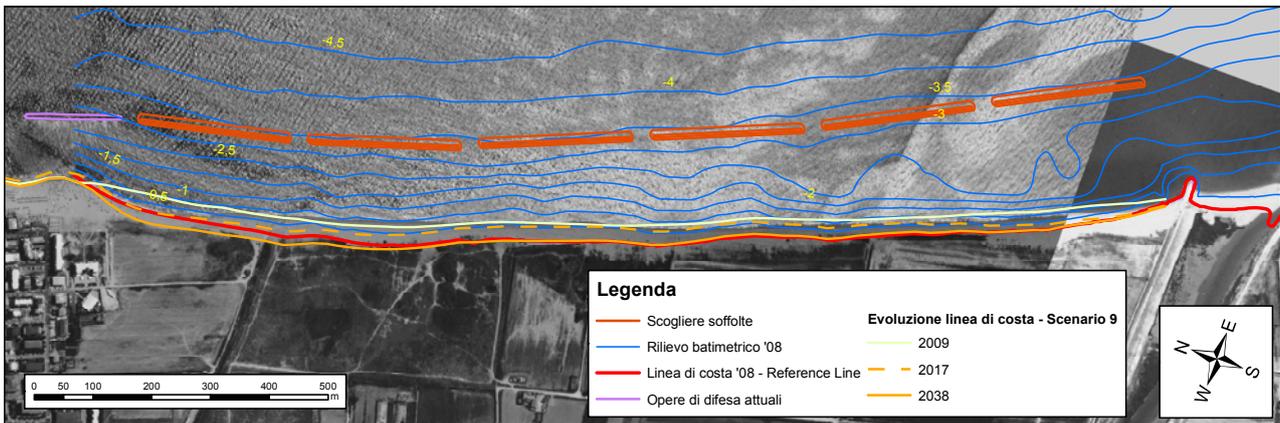
**Figura 30 – SCENARIO 6: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un ripascimento di 30 m protetto da un sistema di pennelli.**



**Figura 31 – SCENARIO 7: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un ripascimento di 60 m protetto da un sistema di pennelli.**



**Figura 32 – SCENARIO 8: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un sistema di scogliere sommerse.**



**Figura 33 – SCENARIO 9: Risultato della simulazione del modello Genesis nel 2038, nel caso in cui venga realizzato un ripascimento di 30 m protetto da un sistema di scogliere sommerse aventi sommergezza -1m.**

I risultati riportati nelle **Figure 24-33**, spingono alle seguenti osservazioni:

- Scenario 0: se non si interviene con un opera di difesa del litorale, il modello prevede tra 30 anni un arretramento max della linea di riva di circa 60 m;
- Scenario 1: se non si interviene con un opera di difesa del litorale e si effettua una rimozione completa della barriera a protezione della ex condotta fognaria, il modello prevede tra 30 anni un arretramento max. della linea di riva di circa 70 m;
- Scenario 2: se si realizza un ripascimento per un avanzamento di 30 m della linea di riva, i risultati del modello rilevano tra 30 anni un arretramento max. della linea di riva di circa 60 m e già nel 2012, per l' "area critica", ovvero, l'area a maggior rischio di erosione (cerchiata in verde in **Figura 26**), un ritorno alla linea attuale 2009 (reference line);
- Scenario 3: se si realizza un ripascimento per un avanzamento di 60 m della linea di riva, i risultati del modello rilevano tra 30 anni un arretramento massimo della linea di riva di circa 40 m e già nel 2018, per l' "area critica", un ritorno alla linea attuale;
- Scenario 4: se si realizza un ripascimento di 30 m protetto da un sistema di barriere sommerse il modello prevede nel 2020, per l' "area critica" un ritorno alla linea attuale (2009) e dopo 30 anni un'erosione max di 15 m per l' "area critica" e un ritorno alla linea di costa attuale per tutto il tratto di costa restante;
- Scenario 5: se si realizza un ripascimento di 60 m protetto da un sistema di barriere sommerse si osserva tra 30 anni un ritorno alla linea di costa attuale per l'intero tratto di litorale in esame.
- Scenario 6: se si realizza un ripascimento di 30 m protetto da un sistema di pennelli, il modello prevede nel 2015, per l' "area critica" un ritorno alla linea attuale (2009) e dopo 30 anni un'erosione max. di 20m per l' "area critica" e un erosione di lieve entità rispetto alla linea di costa attuale per tutto il tratto di costa restante;
- Scenario 7: se si realizza un ripascimento di 60 m protetto da un sistema di pennelli, il modello prevede nel 2025, per l' "area critica" un ritorno alla linea attuale (2009) e dopo 30 anni un'erosione max. di 10 m per l' "area critica" e un ritorno alla linea di costa attuale per il tratto di costa restante;
- Scenario 8: se si realizza un intervento di difesa della costa costituito dal solo sistema di barriere sommerse (senza ripascimento), il modello prevede nel 2014, per l'"area critica" un'erosione max. di 15m e dopo 30 anni un'erosione max. di 30 m per l'"area critica" e un'erosione di lieve entità rispetto alla linea di costa attuale per tutto il tratto di costa restante;
- Scenario 9: se si realizza un intervento di ripascimento di 30 m protetto da un sistema di scogliere sommerse aventi sommergezza -1 m (differentemente dai casi precedenti in cui la sommergezza era stata posta a -0,5 m), si osserva nel 2017 per l'"area critica" un ritorno alla linea di costa attuale e dopo 30 anni un'erosione max di 20 m per l'"area critica" e un ritorno alla linea di costa attuale per tutto il tratto di costa restante.

In relazione ai risultati ottenuti, è opportuno ricordare che, la barriera sommersa a protezione della ex condotta fognaria è stata simulata nel modello come continua, ovvero, senza varchi. La suddetta condizione è stata assunta come tale, in quanto, non si è a conoscenza dello stato di persistenza o deterioramento della stessa.

## 5.2 Calcolo delle superfici e dei volumi degli interventi ipotizzati e computo metrico

In questo paragrafo si riporta una stima di massima delle quantità e dei costi del materiale necessario alla realizzazione degli interventi di difesa.

In particolare, per il calcolo del materiale di ripascimento si rimanda alla analisi effettuata nei precedenti *paragrafi e sottoparagrafi* 4.2 ; 4.2.3 e 4.3. in cui è stato stimato il volume di ripascimento necessario ad un avanzamento della spiaggia di 30 e 60 m è rispettivamente pari a 190.000 m<sup>3</sup> e 380.000 m<sup>3</sup>.

Per il calcolo del materiale necessario alla realizzazione degli interventi di scogliere sommerse e pennelli emersi si fa' riferimento agli **ALLEGATI 8 e 10** che riportano le sezioni tipo in scala 1:100. Il calcolo delle superfici e dei volumi delle sezioni suddette viene riportato nel seguito:

### A. SCOGLIERE SOMMERSE

#### – *Scavo subacqueo*

$$\text{Superficie} = [(19,4 + 17,4)/2 * 0,5] = 9,20 \text{ m}^2$$

$$\text{Lunghezza} = 260 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = 9,20 * 260 = 2392 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume totale} = 2.392 * 6 = 14.352 \text{ m}^3$$

#### – *Massi naturali III° Categoria*

$$\text{Superficie} = [(4,6 + 15,4)/2] * 2,7 = 27 \text{ m}^2$$

$$\text{Lunghezza} = 260 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = 27 * 260 = 7.020 \text{ m}^3$$

Considerando un peso specifico di 2600 kg/mc ed una porosità del 35% si ha che il peso dei massi per opera singola è pari a:

$$P = 11.863 \text{ t}$$

e il peso totale dei massi è:

$$P_{tot} = 11.863 * 6 = 71.183 \text{ t}$$

#### – *Membrana geotessile*

$$\text{Superficie} = 20 * 260 = 5.200 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie totale} = 5200 * 6 = 31200 \text{ m}^2$$

#### – *Tout venant*

$$\text{Superficie} = [(19,4 + 17,4)/2 * 0,5] = 9,20 \text{ m}^2$$

$$\text{Lunghezza} = 260 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = 9,20 * 260 = 2.392 \text{ m}^3$$

$$V_{tot} = (2.392 * 6) = 14.352 \text{ m}^3$$

## B. PENNELLI

### – Scavo subacqueo

Per il calcolo dell'escavo subacqueo si è fatto riferimento alla superficie della sezione media B-B:

$$\text{Superficie sezione B-B} = [(14,84+12,84)/2]*0,5 = 6,92 \text{ m}^2$$

$$\text{Lunghezza} = 100 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = 6,92*100 = 692 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume totale} = 692 * 17 = 11.764 \text{ m}^3$$

### – Massi naturali I° Categoria (50-1000kg)

$$\text{Superficie A-A} = [(4+6)/2]*0,5 = 2,50 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie A'-A'} = [(4+7)/2]*0,66 = 3,63 \text{ m}^2$$

$$\text{Lunghezza} = 8,60 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = [(2,50 + 3,63)/2]*8,60 = 26,36 \text{ m}^3$$

Considerando un peso specifico di 2.600 kg/mc ed una porosità del 20% si ha che il peso dei massi di I° Categoria per opera singola è pari a:

$$P = 54,83 \text{ t}$$

e il peso totale dei massi è:

$$P_{tot} = 54,83 * 17 = 932 \text{ t}$$

### – Massi naturali II° Categoria (1-2t)

$$\text{Superficie A'-A'} = 3,63 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie B-B} = [(4+10,84)/2]*1,71 = 12,69 \text{ m}^2$$

$$\text{Lunghezza} = 40 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = [(3,63+12,69)/2]*40 = 326,36 \text{ m}^3$$

Considerando un peso specifico di 2600 kg/mc ed una porosità del 25% si ha che il peso dei massi di II° Categoria (1-2t) per opera singola è pari a:

$$P = 636,41 \text{ t}$$

e il peso totale dei massi è:

$$P_{tot} = 636,41 * 17 = 10.819 \text{ t}$$

### – Massi naturali II° Categoria (2-3t)

$$\text{Superficie B-B} = 12,69 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie C-C} = [(4+12)/2]*2 = 16 \text{ m}^2$$

$$\text{Lunghezza} = 51,40 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = [(12,69+16)/2]*51,40 = 737,29 \text{ m}^3$$

Considerando un peso specifico di 2.600 kg/m<sup>3</sup> ed una porosità del 30% si ha che il peso dei massi di II° Categoria (2-3t) per opera singola è pari a:

$$P = 1.341,86 \text{ t}$$

e il peso totale dei massi è:

$$P_{tot} = 1.341,86 * 17 = 22.812 \text{ t}$$

– **Membrana geotessile**

$$\text{Superficie} = 14,84 * 100 = 1.484 \text{ m}^2$$
$$\text{Superficie totale} = 1484 * 17 = 25.228 \text{ m}^2$$

– **Tout venant**

$$\text{Superficie} = [(14,84 + 12,84) / 2] * 0,5 = 6,92 \text{ m}^2$$
$$\text{Lunghezza} = 100 \text{ m}$$
$$\text{Volume} = 6,92 * 100 = 692 \text{ m}^3$$
$$V_{tot} = (692 * 17) = 11.764 \text{ m}^3$$

In **Tabella 12** è stata eseguita una stima di massima dei costi necessari agli interventi considerati sia in funzione delle quantità di materiale calcolate che in riferimento ai costi previsti dal Prezzario Generale delle Opere Pubbliche della Regione Marche. In particolare sono stati stimati per tipologia di intervento i seguenti costi totali:

– Ripascimento protetto da scogliere sommerse:

- per un avanzamento di 30 m della linea di riva  $\approx 5.000.000 \text{ €}$
- per un avanzamento di 60 m della linea di riva  $\approx 7.000.000 \text{ €}$

– Ripascimento protetto da pennelli emersi:

- per un avanzamento di 30 m della linea di riva  $\approx 3.500.000 \text{ €}$
- per un avanzamento di 60 m della linea di riva  $\approx 5.500.000 \text{ €}$

Qualora fosse necessario ripartire i costi nel tempo per la realizzazione di un intervento di ripascimento protetto, si può considerare l'ipotesi di intervenire, inizialmente, con la realizzazione del solo sistema di barriere sommerse, seguito nel periodo immediatamente successivo dal versamento di materiale di ripascimento.

CALCOLO DELLE SUPERFICI E DEI VOLUMI										COMPUTO METRICO				
TIPO DI MATERIALE		AREA SEZIONE mq	LUNGHEZZA ml	VOLUME mc	POROSITA'%	VOLUME REALE mc	PESO SPECIFICO kg/mc	Quantità per opera singola	n. OPERE	QUANTITA'	UNITA' MISURA	COSTO UNIT. €	COSTO TOT.	
RIPASCIMENTO	Fornitura di sabbia per ripascimento 30m sabbia D <sub>n50</sub> =0,20mm DI MATERIALE DRAGATO										190.000	mc	10,00	<b>1.900.000</b>
	Fornitura di sabbia per ripascimento 60m sabbia D <sub>n50</sub> =0,20mm DI MATERIALE DRAGATO										380.000	mc	10,00	<b>3.800.000</b>
SCOGLIERE SOMMERSE	SCAVO SUBACQUEO	9,20	260,00	2392,00				2392,00	6,00	14.352	mc	10,66	152.992	
	Massi naturali III categ (3-4 t)	27,00	260,00	7020,00	35,00	4563,00	2600,00	11863,80	6,00	71.183	t	31,17	2.218.768	
	Membrana geotessile	5200,00							5200,00	6,00	31.200	mq	9,98	311.376
	Fornitura trasporto e posa in opera di tout-venant (5-50 Kg.)	9,20	260,00	2392,00				2392,00	6,00	14.352	mc	26,14	375.161	
	<b>TOTALE SCOGLIERE</b>												<b>3.058.297</b>	
<b>TOTALE SCOGLIERE+RIPASCIMENTO 30M</b>													<b>4.958.297</b>	
<b>TOTALE SCOGLIERE+RIPASCIMENTO 60M</b>													<b>6.858.297</b>	
PENNELLI	SCAVO SUBACQUEO	6,92	100,00	692,00				692,00	17,00	11.764	mc	10,66	125.404	
	Massi naturali I categ (50-1000Kg)	A-A 2,50	A'-A' 3,63	8,60	26,36	20,00	21,09	2600,00	54,83	17,00	932	t	29,68	27.663
	Massi naturali II categ (1-2 t)	A'-A' 3,63	B-B' 12,69	40,00	326,36	25,00	244,77	2600,00	636,41	17,00	10.819	t	30,22	326.949
	Massi naturali II categ (2-3 t)	B-B' 12,69	C-C' 16,00	51,40	737,29	30,00	516,10	2600,00	1341,86	17,00	22.812	t	30,22	689.368
	Membrana geotessile	1484								17,00	25.228	mq	9,98	251.775
	Fornitura trasporto e posa in opera di tout-venant (5-50 Kg.)	6,92	100,00	692,00				692,00	17,00	11.764	mc	19,83	233.280	
	<b>TOTALE PENNELLI</b>												<b>1.654.440</b>	
<b>TOTALE PENNELLI + RIPASCIMENTO 30m</b>													<b>3.554.440</b>	
<b>TOTALE PENNELLI + RIPASCIMENTO 60m</b>													<b>5.454.440</b>	

Tabella 12 – Calcolo delle superfici e dei volumi degli interventi ipotizzati e computo metrico.

## 5.3 Analisi dell'idrodinamica costiera: applicazione del modello DELFT

### 5.3.1. Studio idrodinamico e di trasporto solido in condizioni meteo-marine estreme

Il modello a una linea GENESIS, il cui impiego nel presente studio è stato illustrato nella sezione 5.1, rappresenta uno strumento estremamente efficace per la valutazione delle tendenze evolutive di lungo periodo della linea di costa. Tuttavia, le ipotesi alla base della formulazione del GENESIS fanno sì che alcuni fenomeni fisici non possano essere descritti dal modello. In particolare, le variazioni a breve termine della morfologia della spiaggia dovuti ad eventi meteo-marini estremi non possono venire simulati. In conseguenza di mareggiate si osserva generalmente una variazione del profilo altimetrico trasversale della spiaggia con uno scostamento dal profilo di equilibrio. Normalmente, il profilo della spiaggia si modifica mostrando, ad esempio, una maggiore ripidità verso costa e, in alcuni casi, si osserva la formazione di barre longitudinali poste ad una certa distanza dalla linea di riva. Queste variazioni tendono a scomparire in condizioni normali riportando il profilo di spiaggia nelle condizioni di equilibrio. Un'ulteriore limitazione del modello GENESIS è quella di considerare unicamente la movimentazione della sabbia ad opera delle correnti litoranee in direzione parallela alla linea di costa, senza tenere conto di eventuali migrazioni di materiale verso il largo.

Al fine di effettuare una valutazione di massima del comportamento degli interventi progettuali proposti sono state realizzate simulazioni idrodinamiche e di trasporto solido di breve periodo considerando scenari corrispondenti a condizioni meteo-marine estreme simulando il moto ondoso, le correnti indotte e l'evoluzione del fondale in relazione ai fenomeni di erosione e deposizione del materiale di fondo. Le simulazioni sono state eseguite impiegando la suite di modelli Delft3D che permette di calcolare i campi di moto bidimensionali o tridimensionali in funzione delle forzanti esterne imposte. In generale, le correnti osservabili nella fascia costiera sono determinate dall'azione congiunta delle maree, del vento, delle immissioni fluviali e del moto ondoso e risentono della circolazione marina di grande scala. Nell'ambito del presente studio, vista l'influenza preponderante delle azioni determinate dal moto ondoso si è tenuto conto solo di quest'ultima forzante trascurando sia l'influenza delle maree e delle correnti di larga scala, sia l'azione del vento. E' stata altresì considerata la presenza di un flusso fluviale in corrispondenza della foce del fiume Tronto con una portata costante di  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Le simulazioni sono state condotte considerando la configurazione di progetto verosimilmente più idonea a garantire la difesa del litorale che prevede la realizzazione di un ripascimento di 60 m protetto da scogliere sommerse descritto nella sezione 4.3.1. Non sono state effettuate simulazioni con ripascimento di 30 m considerando che, almeno sul breve termine, lo scenario con ripascimento a 60 m presenta le condizioni più critiche data la minore distanza che intercorre tra le opere di difesa e la linea di riva.

Le simulazioni così predisposte prevedono l'esecuzione in cascata di tre modelli:

- modello d'onda SWAN
- modello idrodinamico
- modello morfologico

Il funzionamento della cascata di modelli può essere brevemente riassunto come segue:

- 1) Il modello d'onda simula la propagazione delle onde all'interno del dominio di calcolo a partire dai valori imposti ai contorni esterni, tenendo conto, in funzione della morfologia del dominio di calcolo, degli effetti di rifrazione, shoaling, frangimento, dissipazione, interazioni non lineari, spreading direzionale e, in maniera approssimativa, della rifrazione.
- 2) I risultati del modello d'onda vengono utilizzati dal modello idrodinamico per calcolare le

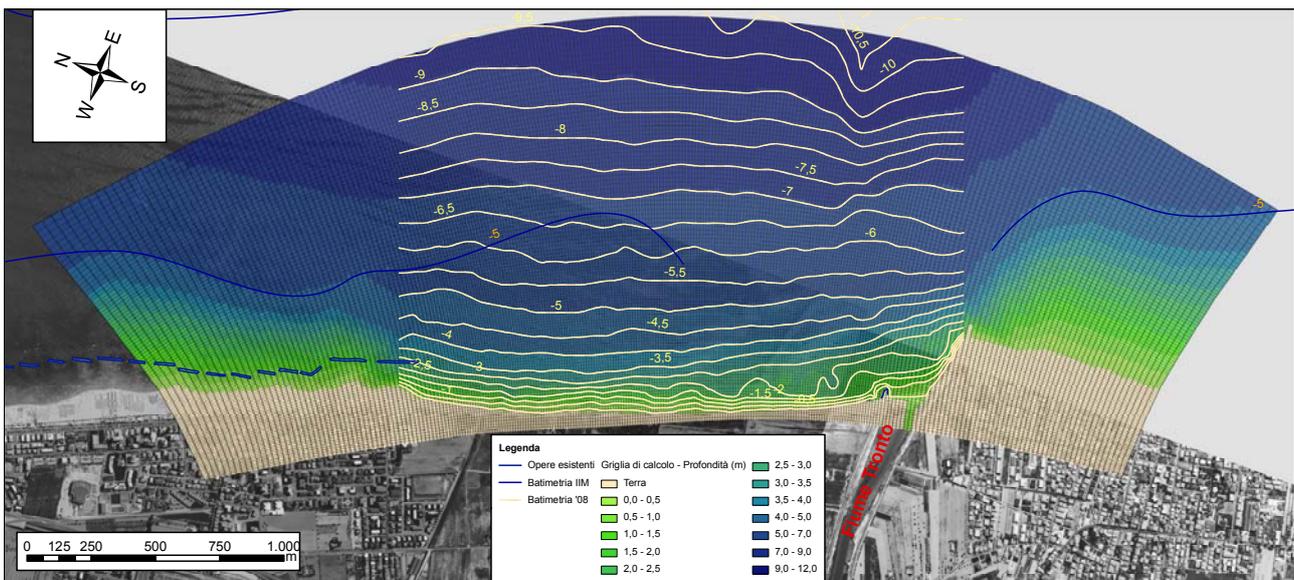
- correnti indotte dal moto ondoso e dalle altre forzanti.
- 3) Il modello morfologico utilizza i dati provenienti dal modello idrodinamico per simulare l'evoluzione del fondo marino determinata dai processi di risospensione, trasporto e deposizione dei sedimenti in funzione dello sforzo indotto dalle onde e dalle correnti.
  - 4) La morfologia del fondale modificata, viene impiegata nelle successive simulazioni del modello d'onda e del modello idrodinamico.

### 5.3.2. Definizione del dominio di calcolo

La selezione del dominio di calcolo incluso nel modello e della risoluzione spaziale è stata eseguita in modo da:

- minimizzare gli effetti di bordo dovuti alla presenza di contorni aperti sul lato Nord, Sud ed Est;
- descrivere in modo sufficientemente accurato la geometria del sistema e i processi fisici
- garantire tempi di calcolo ragionevoli.

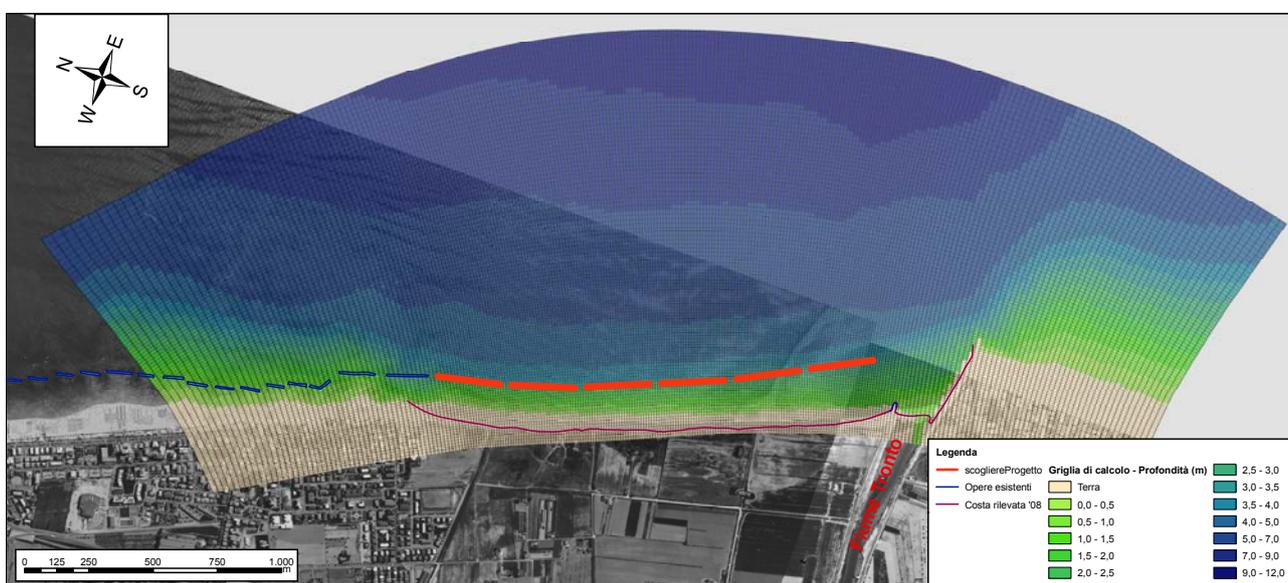
L'area inclusa nel modello si estende lungo costa per circa 3600 m e per 1600 m verso il largo fino ad una profondità di circa 10 m, ed è stata discretizzata mediante una griglia curvilinea ortogonale composta di 108 elementi in direzione ortogonale alla costa e 270 elementi in direzione parallela (**Figura 34**) con una risoluzione massima, nella zona centrale sotto costa, di circa 10 m sia in direzione parallela alla costa che in direzione ortogonale ad essa. La batimetria delle celle è stata definita nella zona centrale del dominio interpolando opportunamente i valori ottenuti durante la campagna di misura UNICAM - 2008. Nelle estremità Nord e Sud del dominio di calcolo, dove non erano disponibili misurazioni recenti, è stata impiegata una combinazione di valori estrapolati dall'area più interna e di batimetrie fornite dall'Istituto Idrografico della Marina Militare.



**Figura 34 - Schema del dominio di calcolo e confronto tra la batimetria attuale e quella inserita nel modello con le operazioni di interpolazione.**

La batimetria esistente è stata successivamente modificata per tenere conto delle condizioni di progetto che prevedono la realizzazione di ripascimenti protetti da barriere sommerse per un'estensione di 30 e 60 metri verso il largo. È stata pertanto sovrapposto alla batimetria esistente un profilo ideale ottenuto attraverso la formula di Dean (*paragrafo 4.2.3*). Il profilo ideale è stato esteso verso il largo, a partire dalla linea di riva definita dal ripascimento fino ad incontrare il fondo marino attuale o, alternativamente, le massicciate delle opere sommerse di difesa.

Alle estremità Nord e Sud della zona di ripascimento è stata effettuata una interpolazione al fine di garantire un raccordo graduale alla batimetria esistente. In **Figura 34** viene mostrata la batimetria modificata con il ripascimento di 60 m. Per quanto concerne le caratteristiche dei sedimenti introdotti nel modello morfodinamico, in analogia con le impostazioni utilizzate nel modello GENESIS, è stata presa in considerazione un'unica tipologia di sedimento non coesivo con diametro  $D_{50}$  pari a 0,2 mm, ipotizzando che il fiume Tronto non dia significativi apporti di sedimento nell'area di studio.



**Figura 35 - Dominio di calcolo con batimetria nelle condizioni di progetto con ripascimento di 60 m e scogliere sommerse.**

Sebbene la risoluzione spaziale del modello sia elevata, essa non consente di rappresentare la geometria delle opere di difesa in termini di variazione della quota di fondo. Le dimensioni previste delle barriere sommerse, con circa 4 m di ampiezza al coronamento, sono infatti troppo piccole in confronto a quelle delle celle di calcolo. Per tenere conto dell'influenza delle opere sulla circolazione idrodinamica si è pertanto utilizzata una funzionalità specifica del modello Delft 3D che consente di inserire degli ostacoli con dimensioni inferiori a quelle delle celle di calcolo. Tali ostacoli sebbene non vadano a modificare l'andamento della batimetria, impongono dei vincoli alla propagazione delle onde e all'andamento delle correnti in loro prossimità. La versione del pacchetto Delft 3D utilizzata per il presente studio, consente di schematizzare correttamente le barriere sommerse come ostacoli di sotto-griglia, unicamente all'interno del modello d'onda SWAN. Per il modello idrodinamico è stato necessario schematizzare le barriere sommerse come "barriere sottili" le quali definiscono degli ostacoli impermeabili al flusso idrico. Tale assunzione non è pienamente corretta dal punto di vista fisico in quanto le barriere sommerse permettono un flusso di acque al

disopra della quota del coronamento. Le approssimazioni effettuate risultano comunque giustificate dal tipo di applicazione del modello che assume un carattere qualitativo anche per la mancanza di dati sperimentali sui quali effettuare calibrazioni e validazioni dei risultati ottenuti.

### 5.3.3. Scelta delle mareggiate di riferimento

Al fine di selezionare le mareggiate da utilizzare per effettuare le simulazioni idrodinamiche e di trasporto solido è stata eseguita un'analisi statistica sulla serie dei dati di moto ondoso ottenuti dalla propagazione della serie storiche della boa di Ortona della Rete Ondametrica Nazionale nella zona di studio mediante il modello semplificato descritto nel *paragrafo 3.2*.

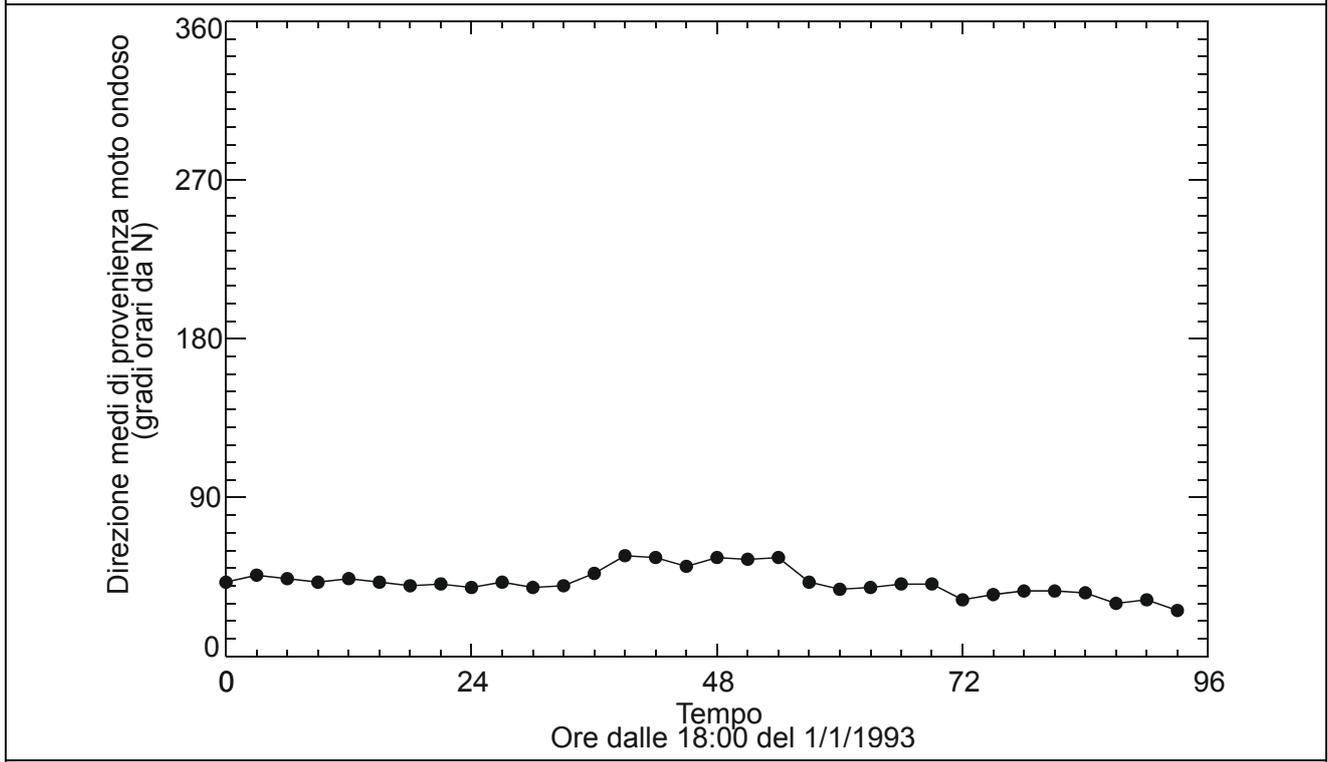
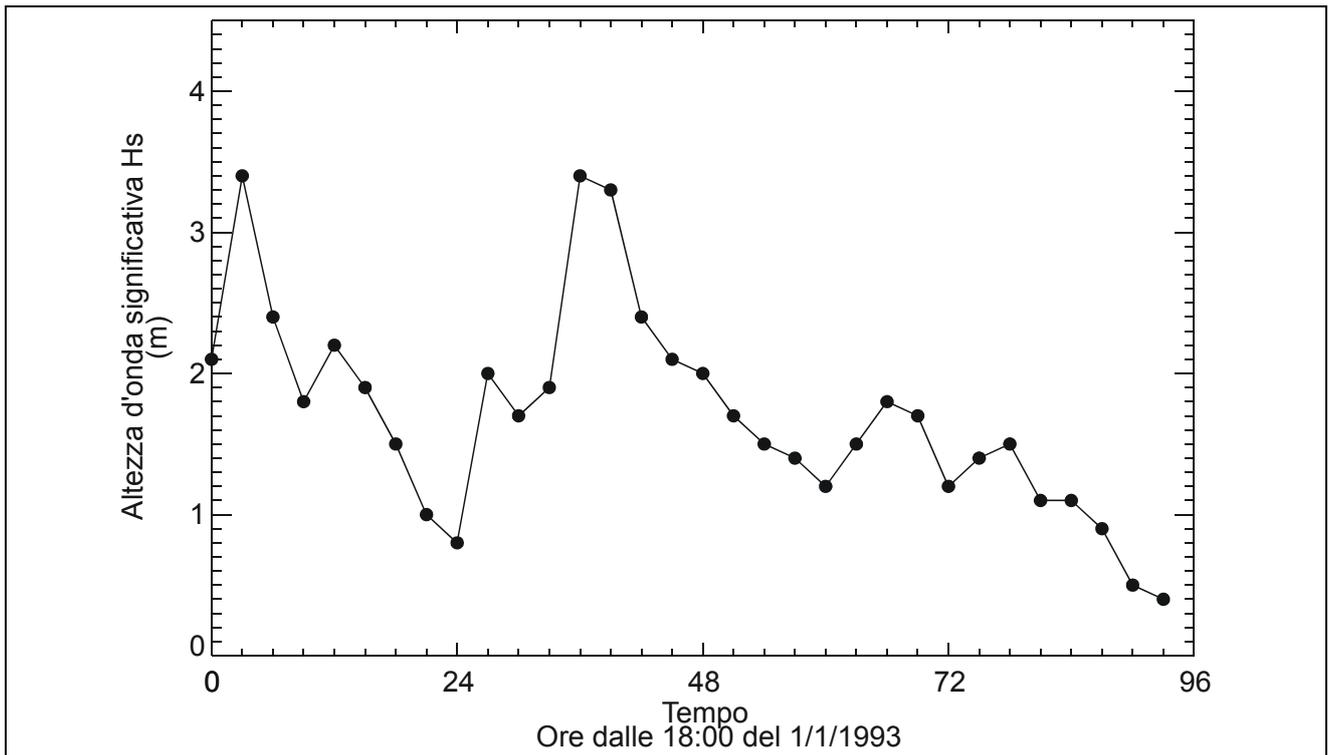
L'analisi effettuata è basata sulla metodologia POT (Peak Over Threshold) che identifica i singoli eventi in base al superamento di un soglia prestabilita da parte del valore di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ). L'evento così identificato termina quando il valore di  $H_s$  scende al disotto della soglia.

Una volta identificati i singoli eventi, si effettua un'analisi statistica ipotizzando che ad ogni settore direzionale corrisponda una specifica distribuzione di probabilità degli eventi estremi, e che i singoli eventi siano indipendenti tra loro. Dall'analisi delle mareggiate sono stati individuati due settori principali da cui provengono la maggior parte degli eventi significativi: il settore compreso tra i 35° e i 65° Nord e il settore compreso tra 65° e 95° Nord. Una volta ripartiti gli eventi tra i due settori si è proceduto a definire la distribuzione di probabilità associata ad ogni settore attraverso il fitting di una distribuzione *Pareto-generalizzata* alle altezze d'onda massime registrate in ogni evento. Nota la distribuzione di probabilità dell'altezza d'onda significativa, è possibile ottenere l'altezza d'onda significativa associata ad un dato tempo di ritorno  $T_r$ .

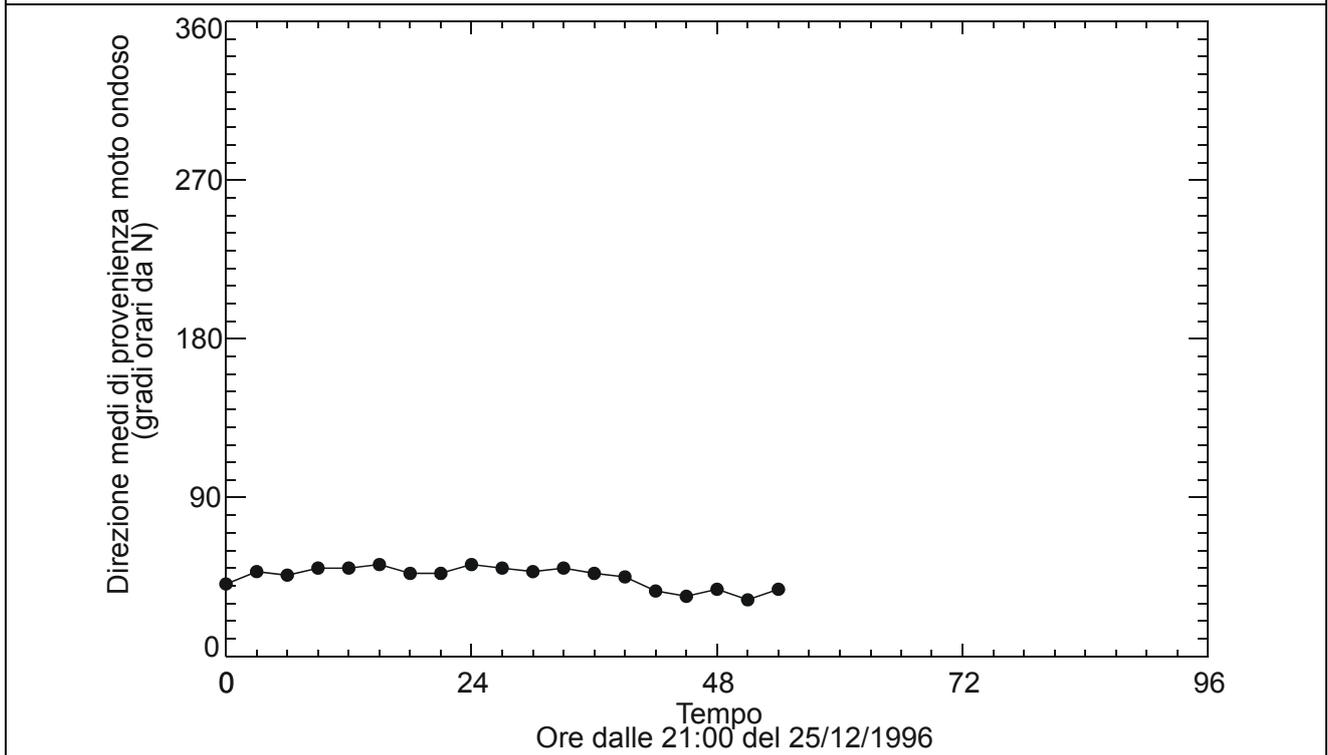
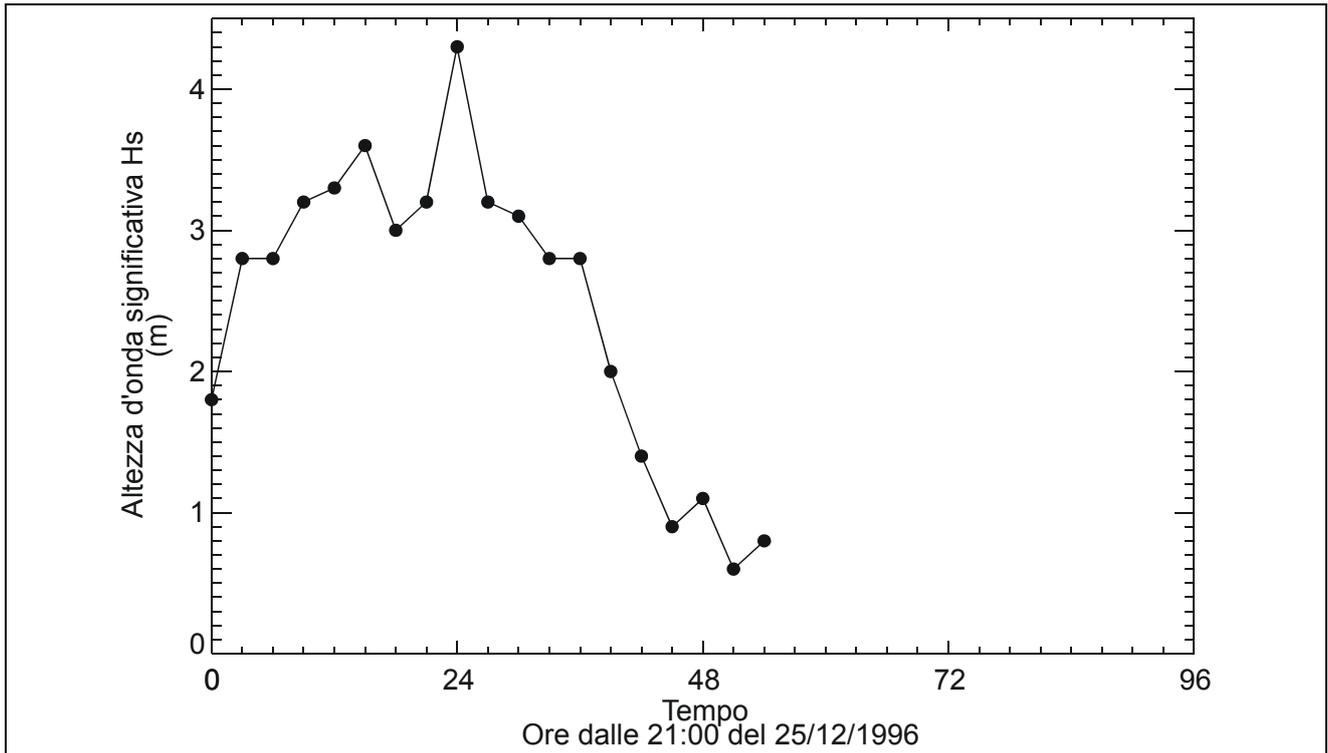
Per il presente studio si è scelto di selezionare per ogni settore direzionale due eventi caratterizzati da tempi di ritorno di 5 e 50 anni. Dovendo simulare degli eventi reali, sono state selezionate mareggiate effettivamente avvenute caratterizzate da altezze massime associate ai tempi di ritorno considerati. Tuttavia, per il settore compreso tra i 65° e i 95° N non è stato possibile individuare mareggiate reali con tempo di ritorno superiore ai 15 anni, e pertanto, è stata utilizzata proprio la mareggiata reale caratterizzata da tale tempo di ritorno. Nella Tabella 13 vengono riportati le caratteristiche delle quattro mareggiate selezionate. Nelle **Figure 35, 36, 37, 38** viene mostrato l'andamento temporale dell'altezza d'onda significativa e della direzione media di provenienza per i quattro eventi considerati.

Evento	Direzione di provenienza (° N)	Tempo di ritorno (anni)	Max altezza d'onda $H_s$ (m)	Data inizio	Data fine
1	35-65 NE	5	3,4	01/01/1993 18:00	05/01/1993 15:00
2	35-65 NE	50	4,3	25/12/1996 21:00	28/12/1996 03:00
3	65-95 E	5	3,0	08/12/1990 09:00	12/12/1990 06:00
4	65-95 E	15	3,5	06/11/1999 09:00	09/11/1999 15:00

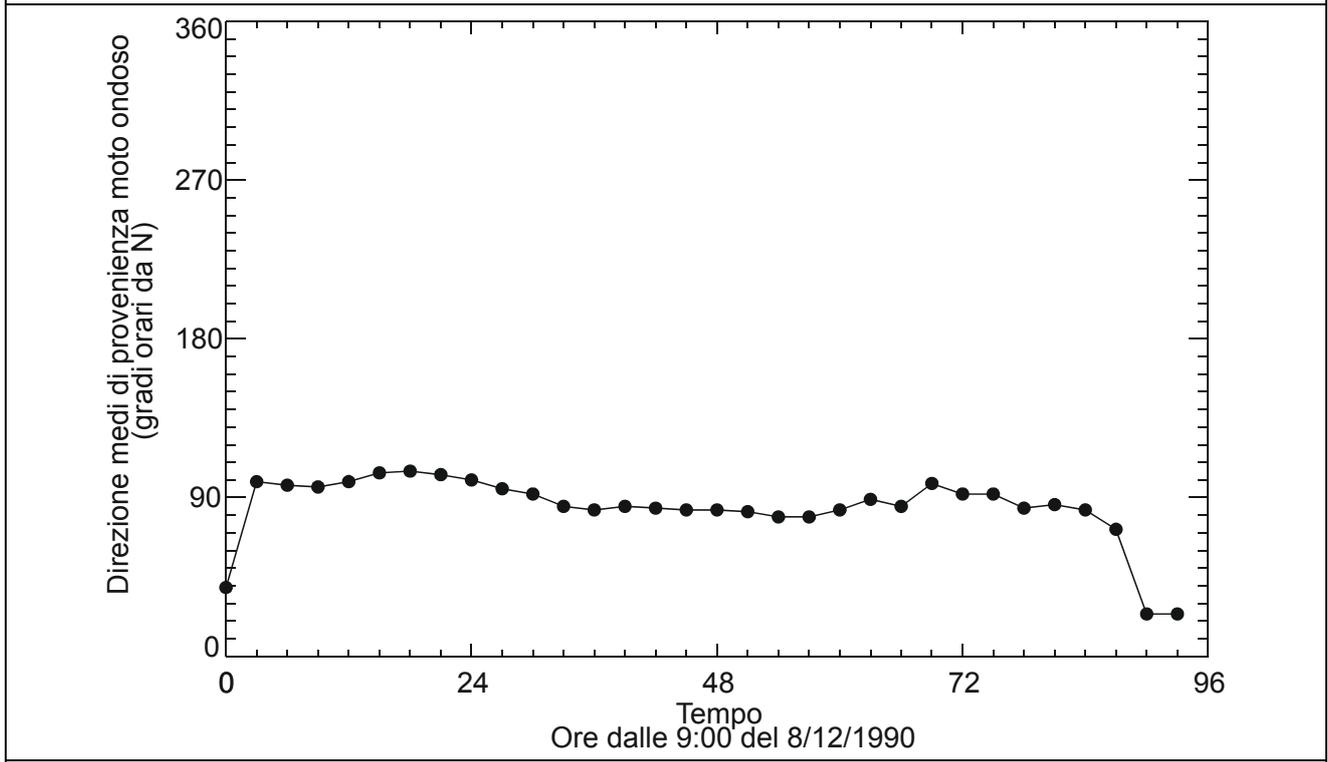
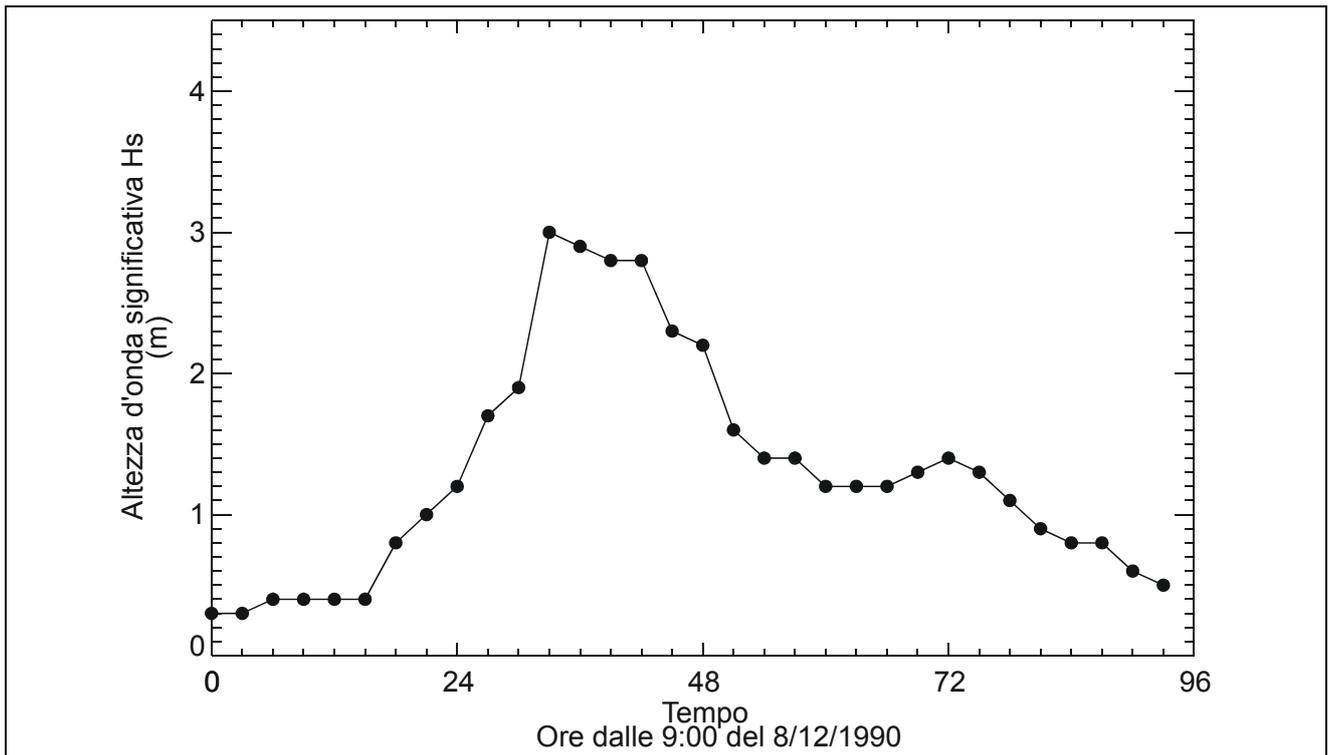
**Tabella 13 - Elenco delle mareggiate simulate.**



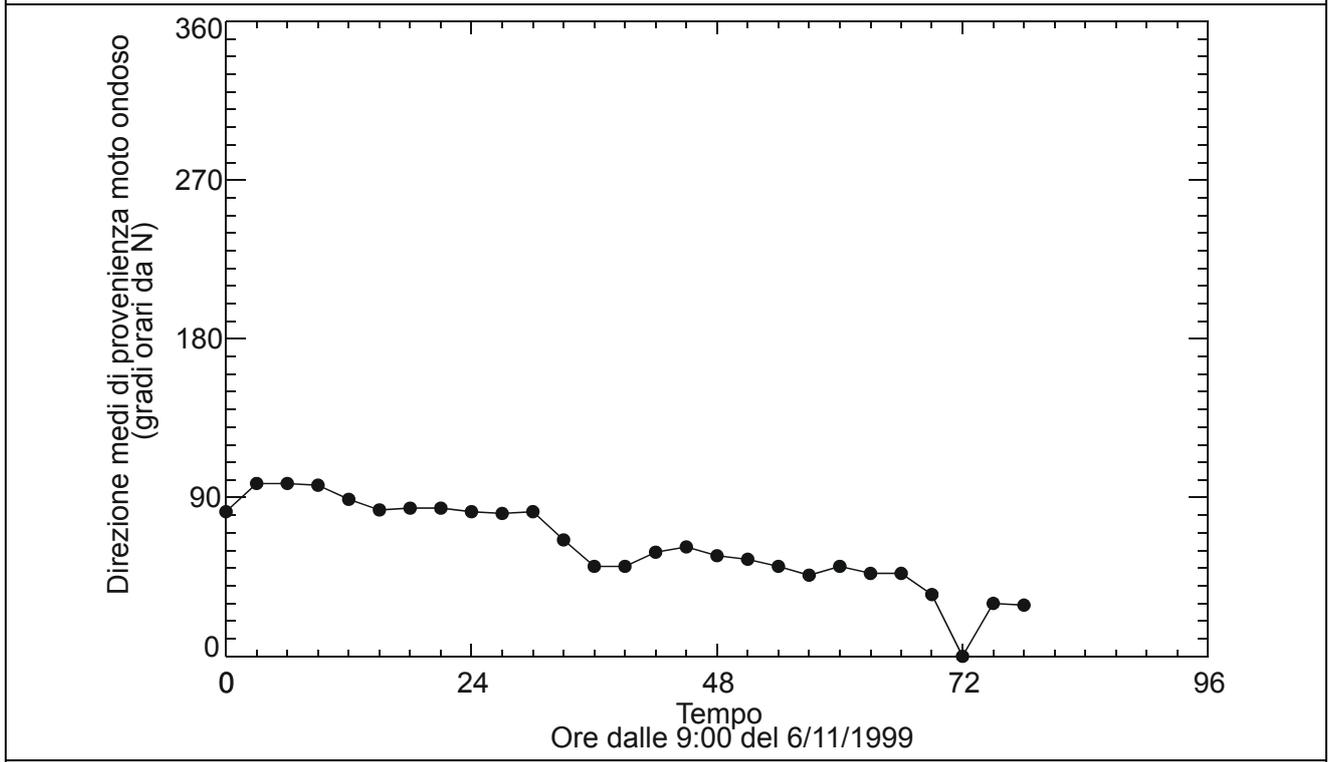
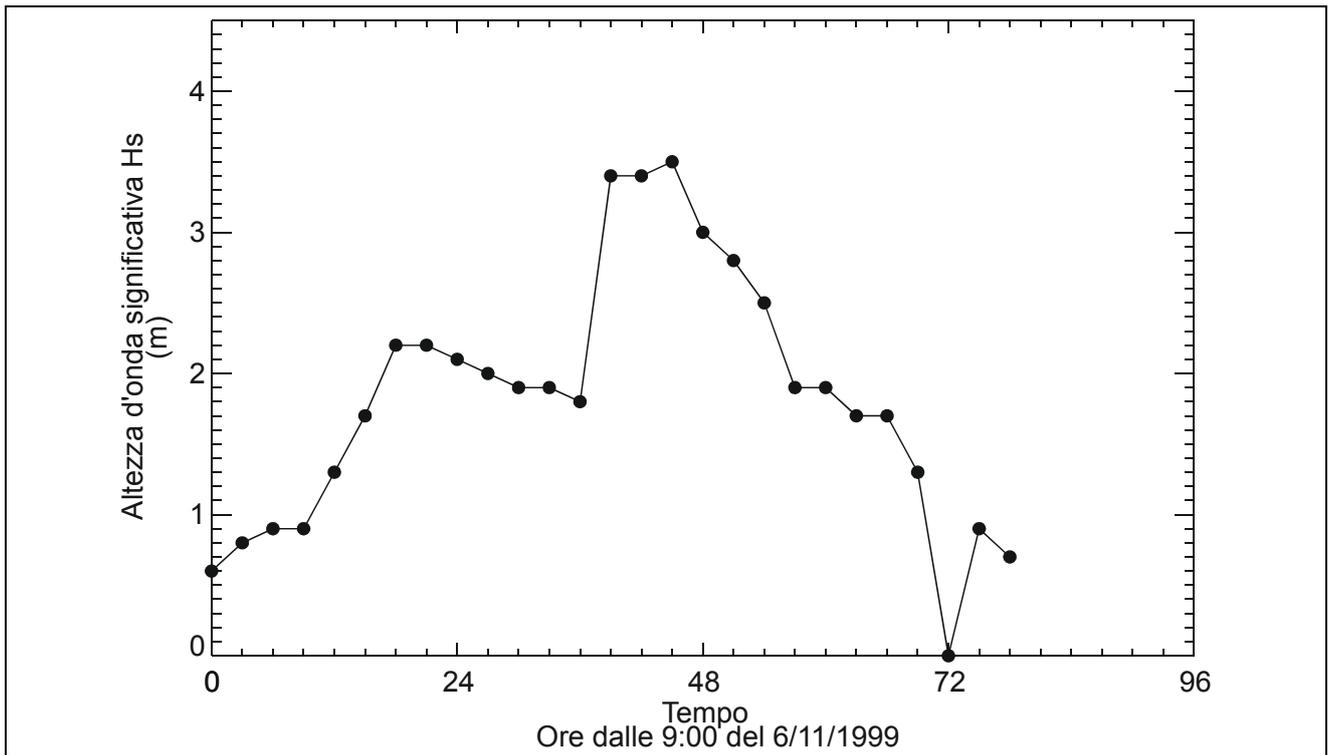
**Figura 36 - Serie temporale dei valori di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per l'evento 1.  $T_r = 5$  anni, settore di provenienza  $35^\circ - 65^\circ$  N.**



**Figura 37 - Serie temporale dei valori di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per l'evento 2.  $T_r = 50$  anni, settore di provenienza  $35^\circ - 65^\circ$  N.**



**Figura 38 - Serie temporale dei valori di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per l'evento 3.  $T_r = 5$  anni, settore di provenienza  $65^\circ - 95^\circ$  N.**

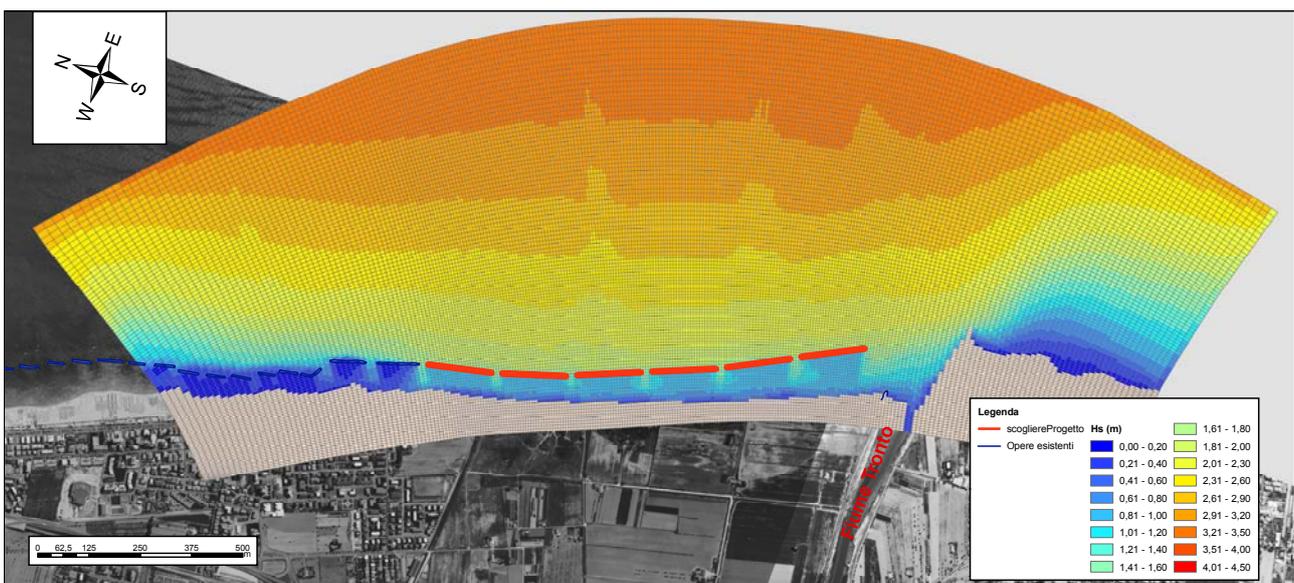


**Figura 39 - Serie temporale dei valori di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per l'evento 4.**

### 5.3.4. Risultati delle simulazioni

Sono state effettuate quattro simulazioni, una per ogni mareggiata di riferimento partendo da condizioni di quiete. Il modello idrodinamico è stato impostato in modalità barotropica dal momento che i fenomeni fisici indagati hanno, alla scala relativa alla risoluzione del modello, caratteristiche eminentemente bidimensionali. I campi di moto idrodinamici sono infatti generati essenzialmente dall'azione delle onde al frangimento che determina un trasferimento di quantità di moto al fluido attraverso il meccanismo del radiation-stress il quale rappresenta un effetto a carattere bidimensionale. Gli effetti tridimensionali di galleggiamento che normalmente si osservano allo sbocco dei fiumi hanno, nelle condizioni studiate, effetti limitati, anche a causa del mescolamento determinato dalle correnti litoranee di notevole intensità che si vengono a creare per azione del moto ondoso. L'azione della corrente dovuta all'immissione del Tronto è comunque trascurabile ai fini dello studio del trasporto solido sia perché si è trascurato l'apporto di sedimenti da parte del fiume sia per la preponderanza delle azioni dovute al moto ondoso rispetto a quelle indotte dal getto fluviale.

In tutte le simulazioni eseguite si è osservato che l'intensità del moto ondoso è efficacemente ridotta dalla presenza delle barriere sommerse come viene mostrato nelle **Figure, 40, 41, 42, 43** che rappresentano la distribuzione dell'altezza significativa d'onda  $H_s$  nel momento di maggiore intensità della mareggiata.



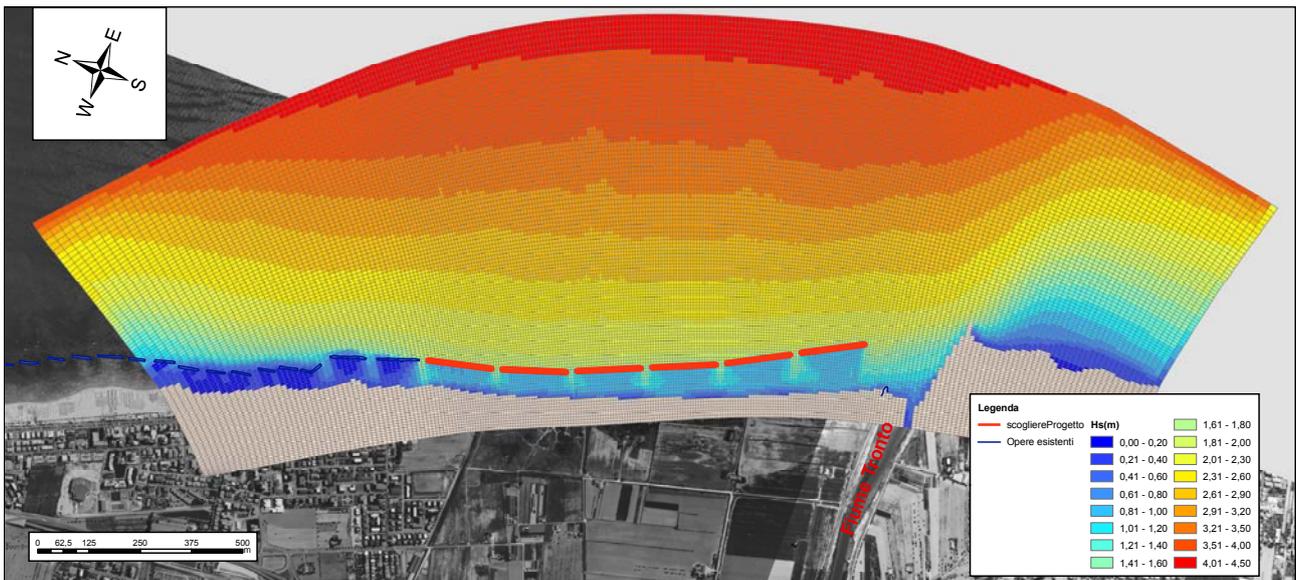


Figura 41 - Distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  simulata dal modello SWAN per l'evento 2 nel momento di maggiore intensità della mareggiata alle 21:00 del 26 dicembre 1996 ( $H_s = 4,3$  m).

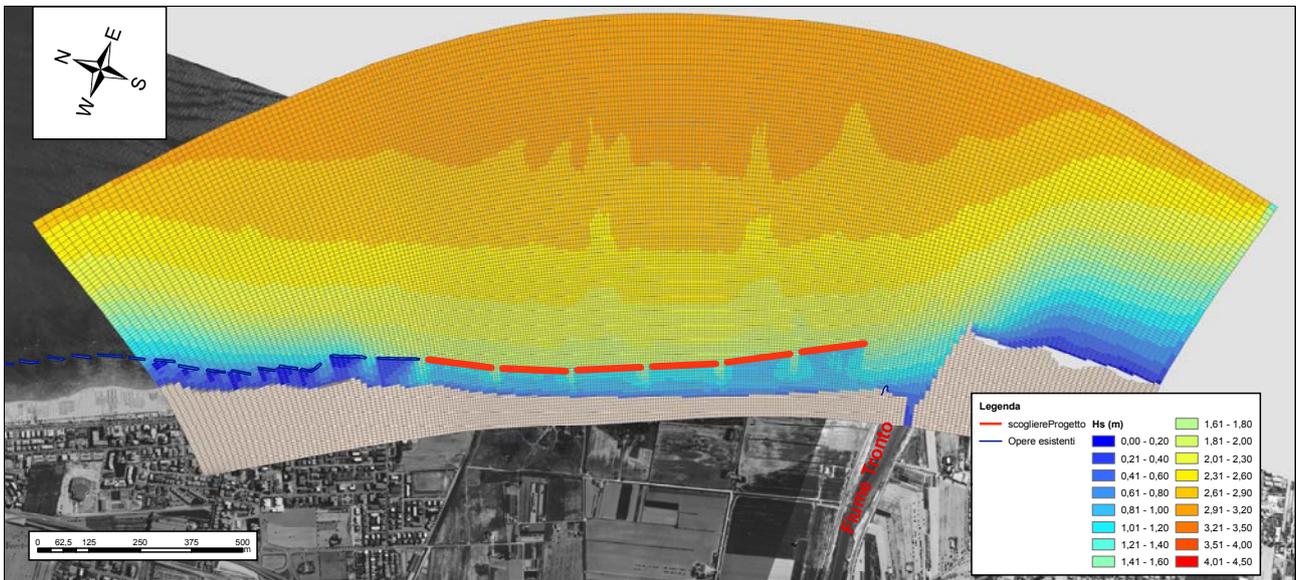
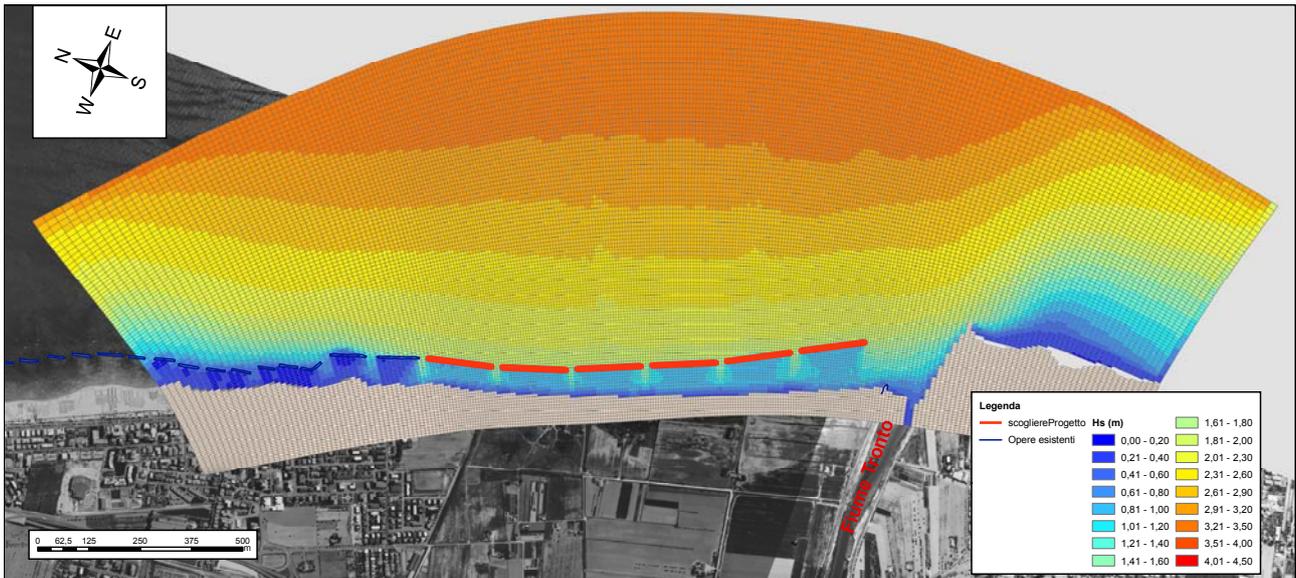
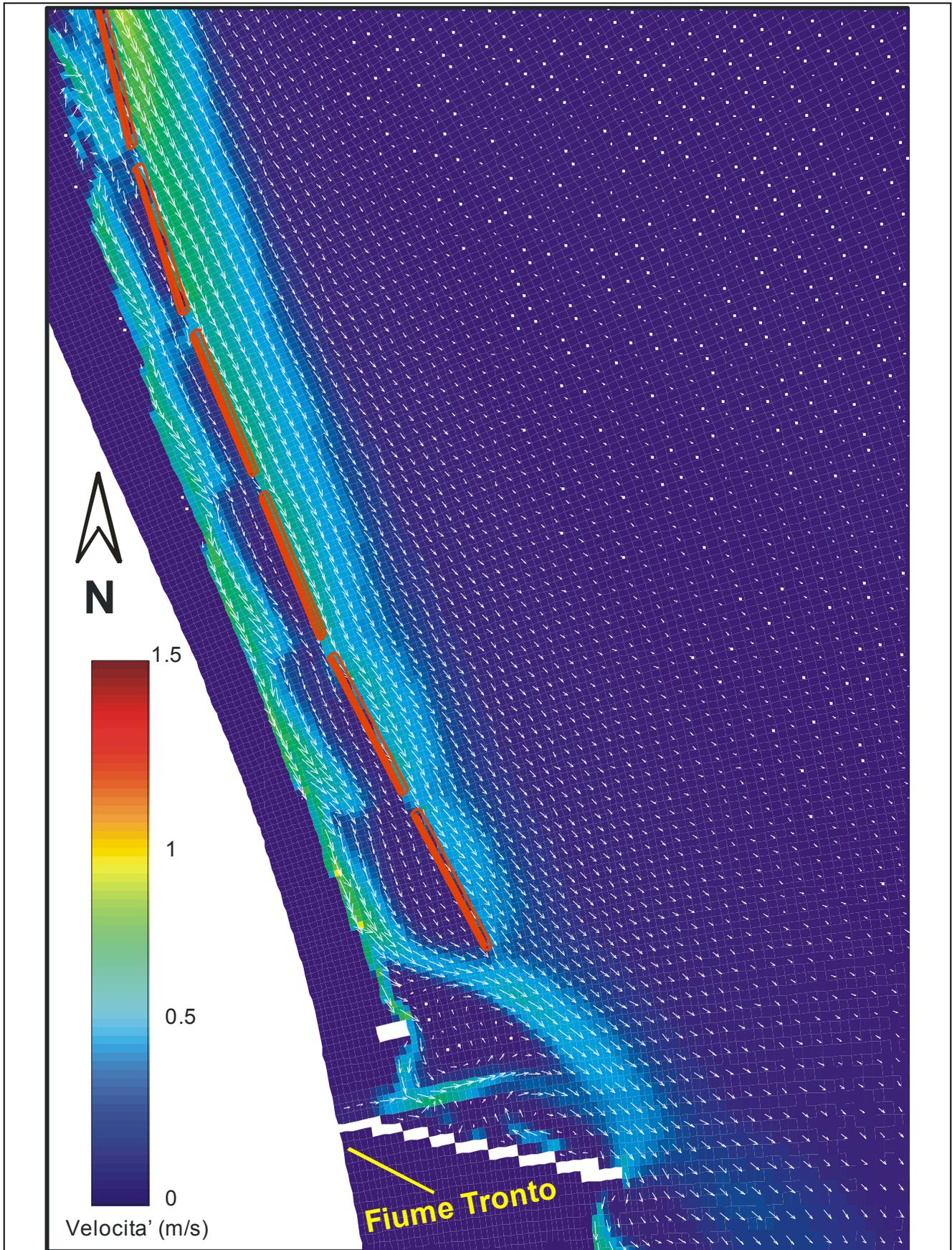


Figura 42 - Distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  simulata dal modello SWAN per l'evento 3 nel momento di maggiore intensità della mareggiata alle 18:00 del 9 dicembre 1990 ( $H_s = 3,0$  m).



**Figura 43 - Distribuzione spaziale dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  simulata dal modello SWAN per l'evento 4 nel momento di maggiore intensità della mareggiata alle 6:00 del 8 novembre 1999 ( $H_s = 3,5$  m).**

L'azione del moto ondoso determina l'instaurarsi di correnti litoranee caratterizzate da intensità dell'ordine degli 0,5 m/s nella zona compresa tra le barriere sommerse e la linea di costa. Tali correnti sono dirette essenzialmente da Nord verso Sud nei casi in cui la mareggiata proviene dal settore compreso tra i 35° e i 65° N, mentre risultano dirette in direzione opposta per le mareggiate provenienti dal settore compreso tra i 65° e i 95° N. In tutti i casi esaminati, in corrispondenza dei varchi tra le opere di difesa, si osservano correnti di ritorno dirette verso il largo caratterizzate da intensità significative. In prossimità della riva i campi di moto assumono un andamento più complesso in funzione delle interazioni del flusso col fondale che va evolvendosi in seguito ai processi di erosione e deposizione.



**Figura 44 - Campo di moto simulato dal modulo idrodinamico per l'evento 1 nel momento di maggiore intensità della mareggiata alle 6:00 del 3 gennaio 1993 ( $H_s = 3,4$  m).**

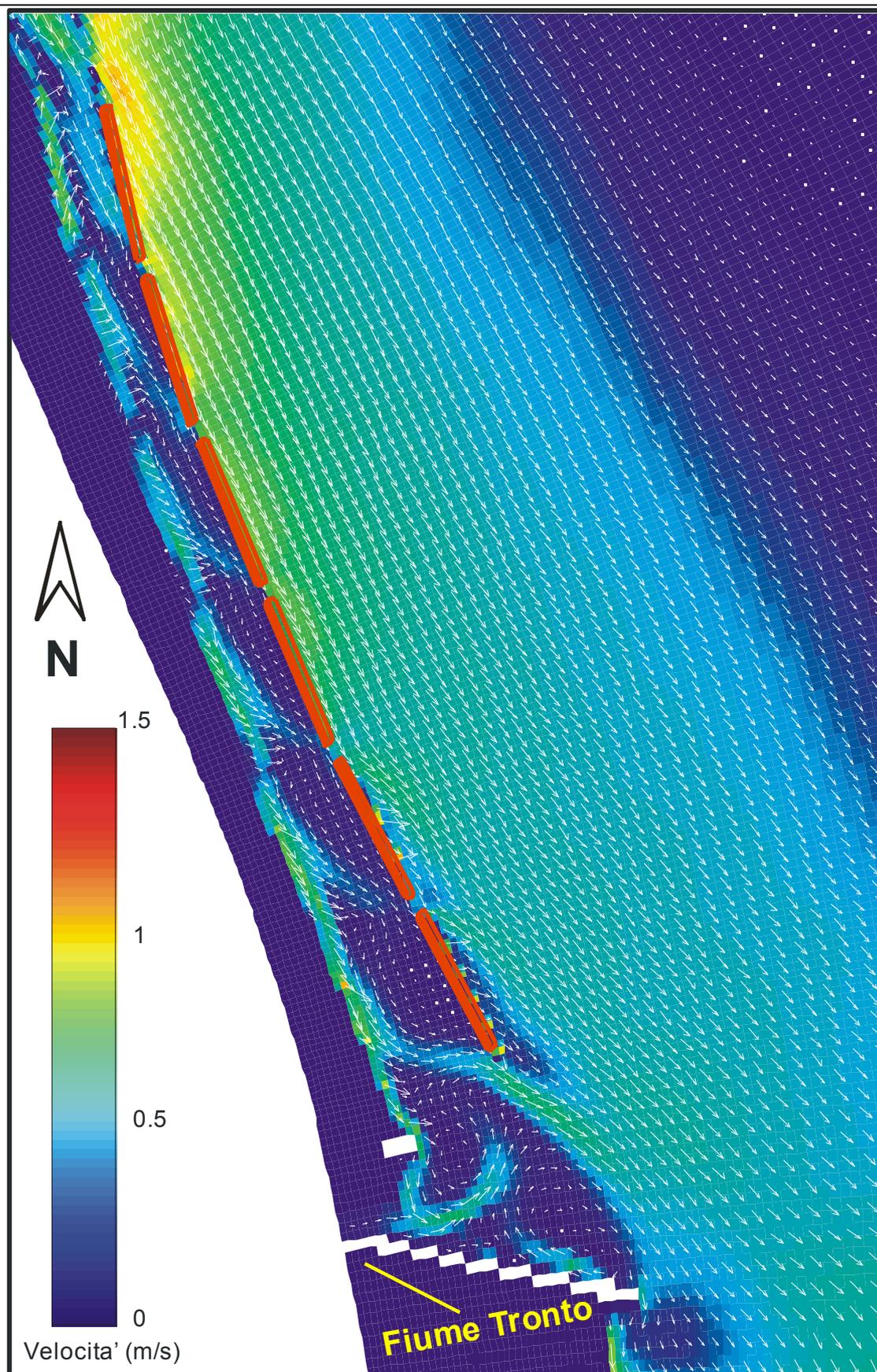


Figura 45 - Campo di moto simulato dal modulo idrodinamico per l'evento 2 nel momento di maggiore intensità della mareggiata alle 21:00 del 26 dicembre 1996 ( $H_s = 4,3$  m).

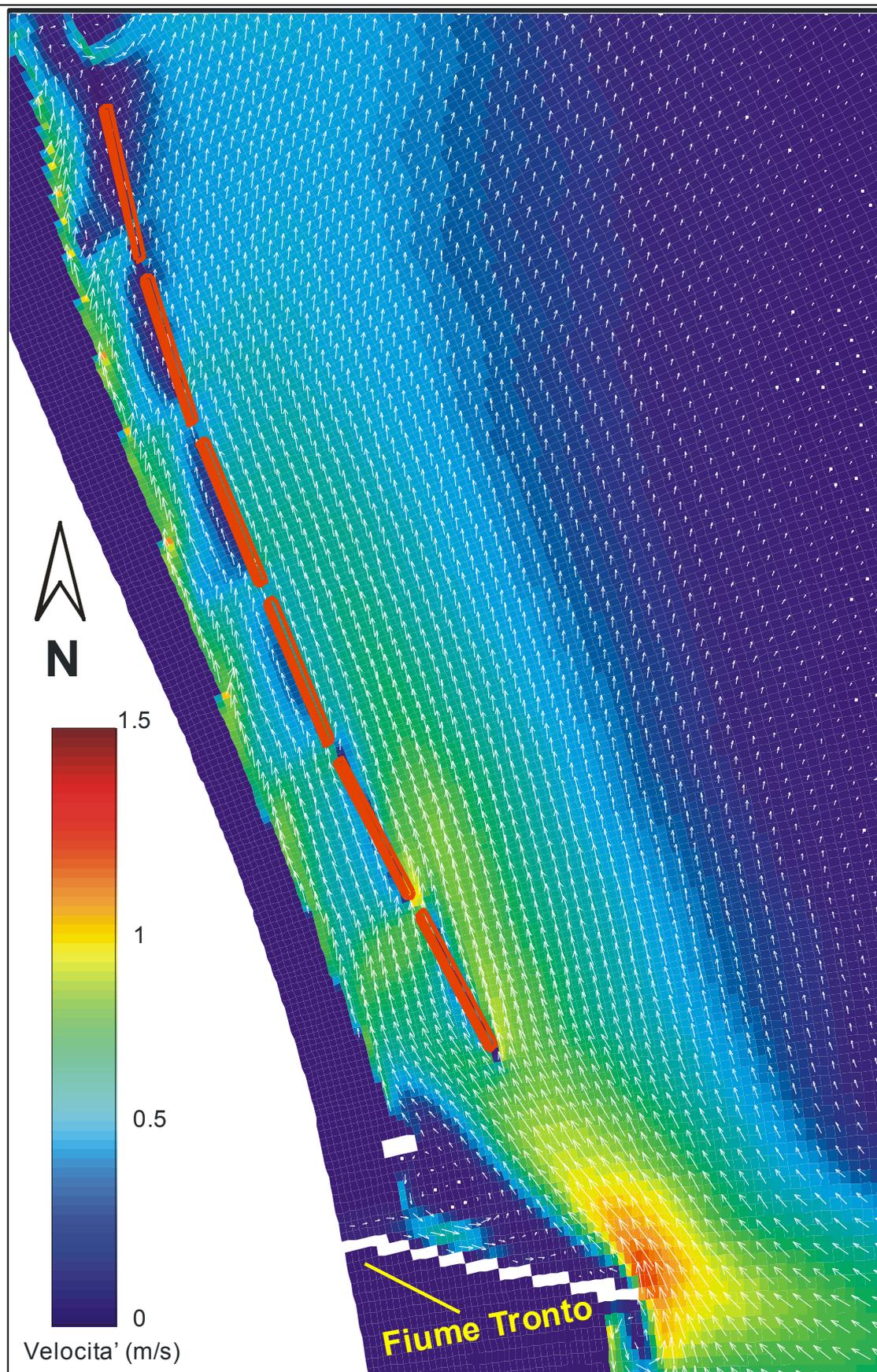


Figura 46 - Campo di moto simulato dal modulo idrodinamico per l'evento 3 nel momento di maggiore intensità della mareggiata alle 18:00 del 9 dicembre 1990 ( $H_s = 3,0$  m).

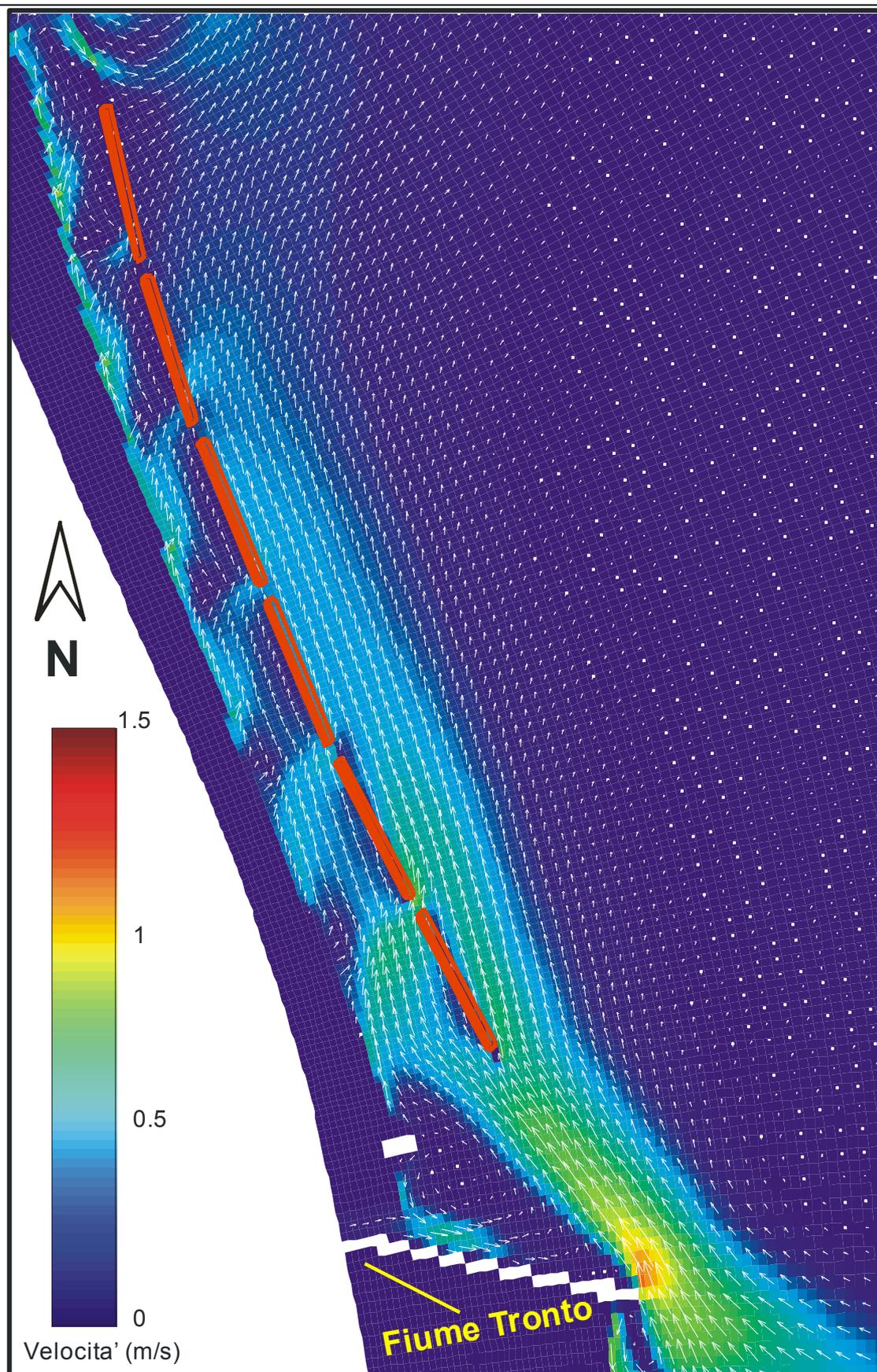
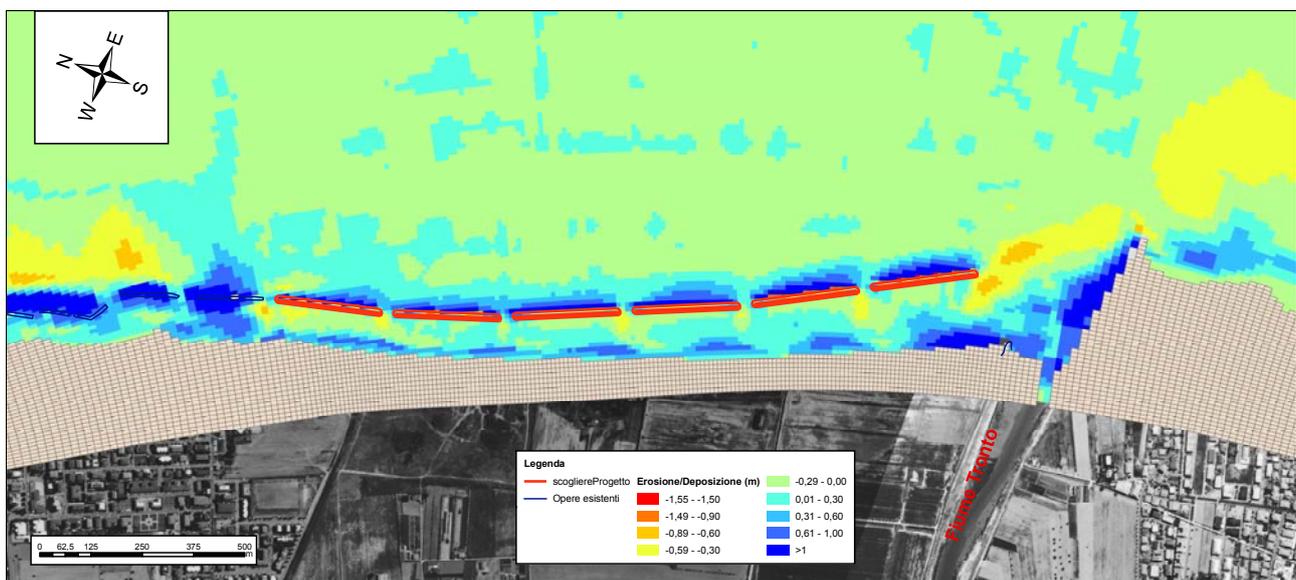


Figura 47 - Campo di moto simulato dal modulo idrodinamico per l'evento 4 nel momento di maggiore intensità della mareggiata alle 6:00 del 8 novembre 1999 ( $H_s = 3,5$  m).

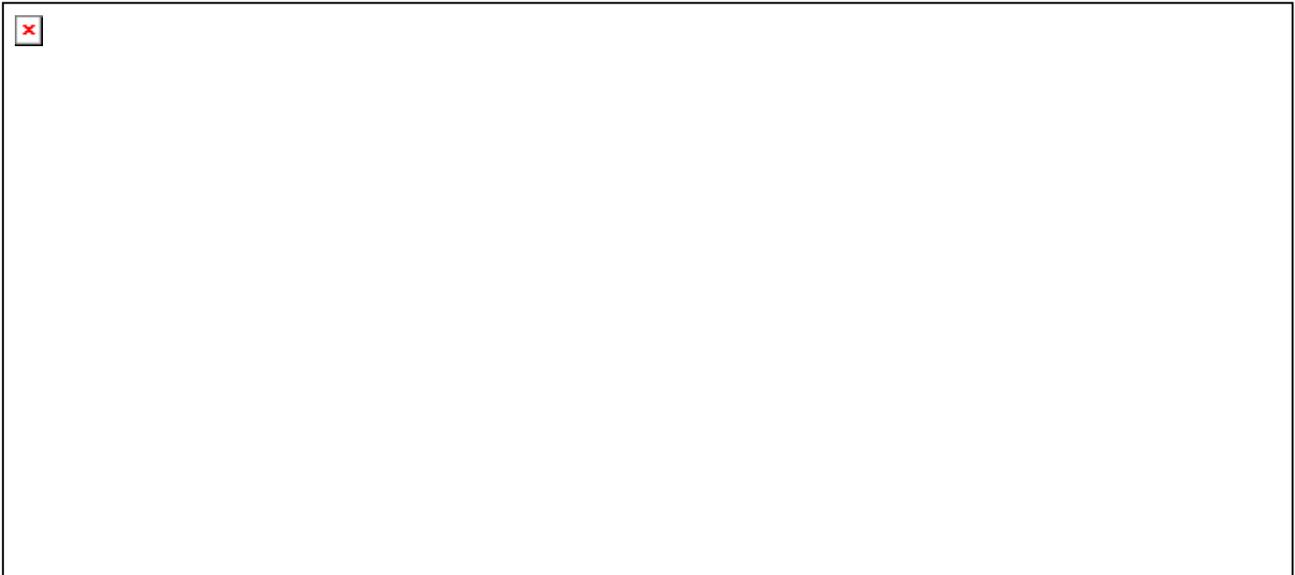
Durante tutte le mareggiate si osservano variazioni significative della quota del fondo (**Figure 48, 49, 50, 51**). Lungo la riva si vengono a formare depositi di materiale in corrispondenza della zona centrale delle barriere che tendono ad assumere la caratteristica forma lobata che si osserva in presenza di opere di difesa longitudinali. Nella zona prossima alle barriere sommerse, dalla parte della riva, si determina un'erosione del fondo che assume valori significativi in corrispondenza dei varchi esistenti tra le opere. Nella zona posta immediatamente a ridosso delle barriere verso il largo si osserva un'intensa deposizione di materiale che sembra, almeno per la sua entità, poco realistica, e che potrebbe essere determinata dall'impiego di una schematizzazione non pienamente corretta per il comportamento idraulico opere di difesa come già illustrato nel *paragrafo 5.2.2*.

L'area compresa tra la foce del Tronto e la prima barriera soffolta verso Nord è caratterizzata da una notevole deposizione sia in corrispondenza del pennello posto immediatamente a Nord della foce stessa sia a ridosso della foce armata presente in destra idraulica. Nella zona più a largo si osserva invece una forte erosione che assume i suoi valori più elevati per le mareggiate provenienti dal settore compreso tra 35° e 65° Nord. Tale fenomeno può essere spiegato dall'azione del getto fluviale che tende a schiacciare la corrente litoranea verso la prima barriera aumentandone la velocità.

La presenza di intensi fenomeni di erosione e deposizione nell'area della foce suggerisce che durante la fase progettuale di un eventuale intervento, particolare cura venga riposta nel dimensionamento e collocazione delle barriere e nello studio della loro interazione con le opere esistenti e la corrente fluviale, al fine di minimizzare effetti che potrebbero alterare il normale deflusso delle acque del fiume.



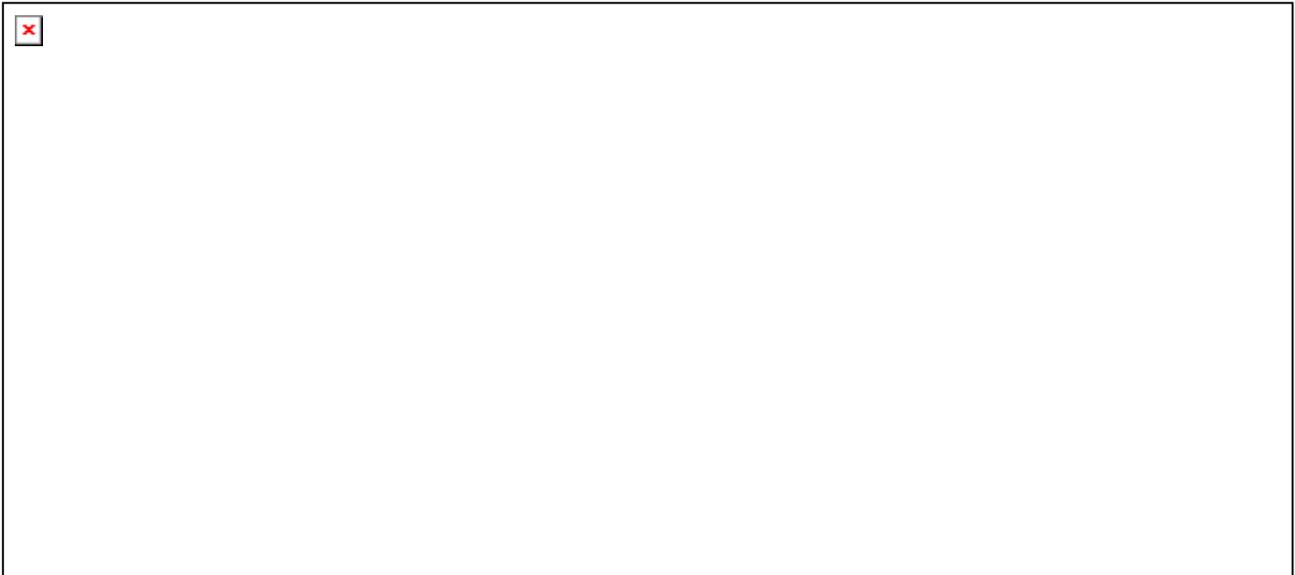
**Figura 48 - Variazione della quota del fondo durante l'evento 1.**



**Figura 49 - Variazione della quota del fondo durante l'evento 2.**



**Figura 50 - Variazione della quota del fondo durante l'evento 3.**



**Figura 51 - Variazione della quota del fondo durante l'evento 4.**

## 6. CONCLUSIONI

I risultati dello studio consentono di pervenire alle seguenti osservazioni:

1. nel corso degli ultimi anni, la rimozione di parte della barriera a protezione dell'ex condotta fognaria, eseguita dagli Enti Locali, in seguito a mareggiate significative, ha ulteriormente compromesso i processi erosivi del litorale in oggetto;
2. i processi di erosione nel tratto di litorale antistante la Riserva Naturale Sentina possono essere fronteggiati con un intervento di ripascimento di 30 m protetto da un sistema di 6 scogliere sommerse. Tale intervento, secondo i calcoli svolti nei *paragrafi 4.2 e 4.3.1*, per una granulometria della sabbia con  $D_{50}$  pari a circa 0,20 mm, richiede un versamento di circa 190.000 m<sup>3</sup> di sabbia e necessita di una manutenzione attenta con una periodicità almeno decennale per garantire il mantenimento della linea di costa attuale (2009). In questo studio, non sono state valutate eventuali cave di prestito autorizzate al prelievo di materiale idoneo al ripascimento, pertanto è stata considerata una granulometria del sedimento analoga a quella attualmente presente.
3. un intervento di ripascimento di 60 m protetto da un sistema di 6 scogliere sommerse risulta essere più efficace, rispetto all'intervento descritto al punto 2. Esso richiede, (*paragrafi 4.2 e 4.3.1*) un versamento di circa 380.000 m<sup>3</sup> di sabbia e necessita di una manutenzione attenta con una periodicità quindicennale per il mantenimento della linea di costa attuale (2009).
4. un ripascimento per un avanzamento di 60 m della linea di riva, protetto da un sistema di pennelli (*paragrafo 4.3.2*) rappresenta una soluzione di difesa del litorale, che, qualora non venga alimentato negli anni, determinerà fenomeni di erosione significativi, nell' "area critica" e tra circa 15 anni il ritorno alla linea di costa attuale (2009).
5. un intervento di ripascimento di 30 m protetto da un sistema di scogliere sommerse aventi sommergezza -1 m potrebbe determinare per l'area critica un ritorno alla linea di costa attuale nel 2017, ovvero, circa tre anni prima del caso in cui si realizzi lo stesso intervento ma con scogliere sommerse aventi sommergezza pari a -0,5 m
6. Qualora fosse necessario ripartire i costi nel tempo per la realizzazione di un intervento di ripascimento protetto, si può considerare l'ipotesi di intervenire, inizialmente, con la realizzazione del solo sistema di barriere sommerse (come descritto al *paragrafo 4.3.1*) seguito, nel periodo immediatamente successivo, dalla realizzazione del ripascimento di sabbia (*paragrafo 4.2*).
7. In prospettiva futura, un'ulteriore ipotesi di intervento che potrebbe essere integrata con quelle prese in considerazione in questo studio, consiste in un intervento di ripristino o consolidamento della duna. Si tratta di un intervento che solo di recente, è stato impiegato sui litorali italiani evidenziando una crescente sensibilità ambientale in cui la messa in opera di un'adeguata copertura vegetale rappresenta l'elemento fondamentale per una significativa azione antierosiva. Infatti, nella scelta della vegetazione da posizionare sul corpo della duna e nelle aree retrostanti vanno considerate solo specie ben adattate alle particolari

condizioni morfoedafiche del sito, specie autoctone o ormai pienamente naturalizzate.

8. I risultati delle simulazioni delle mareggiate rappresentative effettuate con DELFT 3D hanno evidenziato che le scogliere sommerse a protezione del ripascimento determinano una significativa attenuazione del moto ondoso. L'azione delle onde genera significative correnti litoranee localizzate nell'area compresa tra le opere di difesa e la riva e in corrispondenza dei varchi tra le opere. Nel corso delle simulazioni si sono osservate significative variazioni della quota del fondo localizzate in aree prospicienti la foce del fiume Tronto. La presenza di questi fenomeni di rapida evoluzione morfodinamica, unita alla complessa circolazione che si determina dall'interazione tra le correnti litoranee con il flusso proveniente dal fiume e le opere di difesa, suggerisce che in sede progettuale venga posta particolare cura nella definizione della configurazione delle opere nell'area della foce del Tronto.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Inman D. L.: "*Measures for describing the size distribution of sediments.*" J. Sediment. Petrol. 22(3) :125-145, 1952.
- [2] Shepard F. P.: "*Nomenclature based on sand-silt-clay ratios.*" Jour. Sedimentary Petrology, v. 24, p. 151-158, 1954.
- [3] Bruun P.: "*Coastal Erosion and the Development of Beach Profiles.*" Beach Erosion Board Technical Memorandum No.44, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1954.
- [4] Folk R. L.: "*Petrology of Sedimentary Rocks*" Austin, University of Texas Publication, 170 p, 1968.
- [5] James, J.R.: "*Techniques in Evaluating Suitability of Borrow Material for Beach Nourishment.*" Technical Memorandum No. 60, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer No 60, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg, MS. 1975.
- [6] Hallermeier R.J.: "*Uses for calculated Limit Depth to beach Erosion.*" Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering , American Society of Civil Engineers, 1978.
- [7] Hallermeier R.J.: "*Fall Velocity of beach sands.*" Coastal Engineering Technical Note CETN-II-4, 1981.
- [8] Hallermeier R.J.: "*A profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from wave climate.*" Coastal Engineering, 1981.
- [9] Moore B. D.: "*Beach Profile Evolution in Response to Changes in water level and Wave Height.*" 1982
- [10] AQUATER, Regione Marche: "*Studio generale per la difesa delle coste.*" 1<sup>a</sup> fase, Vol.I, Relazione generale; Vol. II; Rapporti di settore, 1982.
- [11] Curzi P.V., Gallignani P.: "*Evoluzione sedimentaria recente della piattaforma continentale centro e Nord adriatica.*" Atti Conf. Naz. Per una politica ambientale di salvaguardia dei litorali , Cronache adriatiche, 1982.
- [12] Lenaz R., Taviani M.: "*Pedological evidences in Late Quaternary sediments of the Upper Adriatic continental shelf*". Ist. Int. Conf.on Paleooceanography, Zurich, 1983.
- [13] Shore Protection Manual 4<sup>th</sup> ed 2 vol, USArmy Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing office, Washington, DC. 1984
- [14] AQUATER, Regione marche: "*Studio generale per la difesa delle coste*". 2<sup>a</sup> fase. Analisi del regime del trasporto litoraneo e bilancio dei sedimenti. SNAMPROGETTI, 1984.
- [15] Stefanon A.: "*Sedimentologia del Mare Adriatico: rapporti tra erosione e sedimentazione olocenica.*" Boll. Oceanol. Teor. Appl., II, 4, 1984.
- [16] Ferretti M., Moretti E., Savelli D., Stefanon A., Tramontana M., Wezel F.C.: "*Late Quaternary alluvial sequences in the north-western Adriatic Sea from UNIBOOM profiles*" Boll. Ocean Ter. Appl., IV,1, 1986.
- [17] Curzi P.V. e Tomadin L.: "*Dinamica della sedimentazione pelitica attuale ed olocenica nell'Adriatico centrale.*" Giornale di Geologia, ser. 3, vol. 49/1, pp.101-111, Bologna, 1987.
- [18] Hanson H., GENESIS. A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use. 1987
- [19] Coltorti M., Garzonio C.A., Nanni T., Rainone M.L., Vivalda P.: "*Un esempio di degrado ambientale in un bacino delle Marche centrali: il fiume Musone.*" Politiche del territorio, Prisma, n.11, settembre, 1988.
- [20] Van Der Meer J.W. "*Rock Slopes and gravel Beaches Under Wave Attack.*" 1988.
- [21] Hanson H. & Kraus N.C., GENESIS: "*Generalized Numerical Modelling System for Simulating Shoreline Change.*" Report 1, Technical Reference Manual. 1989.

- [22] Dean R.G.: *“Equilibrium beach profiles: Characteristics and Applications.”* Journal of Coastal Research. 7(1), 53-84. 1991
- [23] Dean R.G.: *“Beach Fill volume Required to Produce Specified Dry Beach Width.”* Coastal Engineering Technical note CETN II 32. 1991.
- [24] J.W. Kamphuis: *“Incipient wave breaking”* Coastal Engineering, 1991
- [25] CIRIA – *“Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering.”* 1991
- [26] Regione Marche – Giunta Regionale – Assessorato Urbanistica Ambientale: *“L’ambiente fisico delle Marche”* – Geologia, geomorfologia, Idrogeologia. S.E.L.C.A. s.r.l., Firenze 1991.
- [27] Presidenza del Consiglio Superiore LL.PP. Servizio Tecnico Centrale: *“Istruzioni tecniche per la progettazione e l’esecuzione di opere di protezione delle coste in erosione”.* 1991
- [28] Pedrotti F., Gafta D.: *“Ecologia delle foreste ripariali e paludose dell’Italia, “L’uomo e l’ambiente.”* 23, Camerino, 1996.
- [29] Ciarrocchi G.: *“Il porto di Ascoli – Ipotesi di ubicazione della Sentina:”* Archeoclub d’Italia, sede di S. Benedetto del Tronto, 1998.
- [30] Lama R., Corsini S.: *“La Rete Mareografica Italiana.”* Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali, 2000.
- [31] J.W. Kamphuis. *“Introduction to Coastal Engineering and Management.”* World Scientific Publishing. 2000
- [32] Benassai G.: *“Analisi di dati meteo-oceanografici finalizzati al calcolo del sovrizzo del livello del mare.”* Acqua, vol. IV pp. 23-29, 2002.
- [33] Lama R., Corsini S.: *“La Rete Mareografica Italiana – Analisi delle serie storiche.”* Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali, 2003.
- [34] RSA: Rapporto sullo Stato dell’Ambiente, ARTA Abruzzo 2005
- [35] Noli A., Mita M.: PODIS, *“Progetto Operativo Difesa del suolo – Analisi delle caratteristiche meteo-marine al largo e a riva e valutazione dei processi evolutivi costieri.”* Ministero dell’ambiente e della tutela del territorio, Ministero dell’economia e delle finanze, 2005
- [36] Calabrese M., Buccino M., Zanuttigh B., Cappietti L., Paris A.: *“Riflessione e trasmissione di scogliere a cresta bassa.”* Studi Costieri n. 9, 2005.
- [37] Regione Marche, Istituto d’idraulica dell’Università degli studi di Ancona, *“Studi, indagini, modelli matematici finalizzati alla redazione del piano di difesa della costa”*– Relazione Generale”.
- [38] Regione Marche – Dipartimento Territorio e Ambiente, *“Piano di gestione integrata delle aree costiere”* 2005.
- [39] SFWMD, Design Criteria Memorandum: DCM-2, *“Wind and Precipitation Design Criteria for Freeboard”* Revision 001.00g, 2005.
- [40] PROGETTO ATLANTE COSTIERO – *“Il moto ondoso lungo le coste italiane.”* APAT – Edizioni Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 2006.
- [41] Corsini S., Inghilesi R., Franco L., Piscopia R.: *“Atlante delle onde nei mari Italiani”* 2006
- [42] Benassai G.: *“Introduction to Coastal Dynamics and Shoreline Protection.”* 2006
- [43] Robert M. Sorensen: *“Basic Coastal Engineering”* Springer 2006.
- [44] Comune di San Benedetto del Tronto: *“Piano attuativo di riqualificazione e salvaguardia del patrimonio edilizio extraurbano.”* Variante al Piano Regolatore Generale, Gennaio 2006.
- [45] Fase A, *“ANALISI DEI DATI”*, Convenzione APAT – ICRAM: Implementazione di modelli numerici per l’analisi dei problemi della fascia costiera prospiciente la Riserva Naturale della Sentina, S. Benedetto del Tronto – Marche 2007.
- [46] Bavecchi G., Studio di fattibilità per interventi di sistemazione con opere di ingegneria naturalistica del tratto di valle del fosso Sentina.