

COMUNE DI SIRACUSA

TITOLO PROGETTO:

RIELABORAZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO DELL'APPRODO TURISTICO "MARINA DI SIRACUSA" SVILUPPATO SULLA BASE DEI CONTENUTI DEL PROGETTO PRESENTATO E DISCUSO IN CONFERENZA DEI SERVIZI IN DATA 15.02.2021

COMMITTENTE:

S.P.E.R.O. s.r.l.
Via Elorina 29 - 96100 Siracusa - Italy

PROGETTISTA GENERALE

TEAMNETWORK s.r.l. - Engineering & Management
Via Luigi Spagna 50/L-M, 96100 Siracusa - Italy



TITOLO ELABORATO:

STUDIO DELLA DINAMICA DELLE COSTE

Scala

Formato

FILE

PROGETTISTA

Progettista architettonico:
Arch. Mario Rizza

Progettista strutture ed impianti:
Ing. Paolo Calafiore

Geologia e Ambiente:

Dott. G. Bellomo

Dott. G. Anselmo

NUMERO DOCUMENTO

IMM12-08

MdS

PD

REL

SDC

04

R0

JOB N.

COD. 1

COD. 2

COD. 3

COD. 4

COD. 5

REV. n.

N. REV

DATA

DESCRIZIONE

DRW.

CHK.

APP.

Provincia di Siracusa
COMUNE DI SIRACUSA

MARINA DI SIRACUSA

**RIELABORAZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO DELL'APPRODO TURISTICO
"MARINA DI SIRACUSA" SVILUPPATO SULLA BASE DEI CONTENUTI DEL PROGETTO
PRESENTATO E DISCUSO IN CONFERENZA DEI SERVIZI IN DATA 15.02.2021**

STUDIO DELLA DINAMICA DELLA COSTA

GIUGNO 2023

VERSIONE :	DESCRIZIONE:	PREPARATO :	APPROVATO :	DATA:
01	EMISSIONE			21/06/2023
NOME FILE:			DISTRIBUZIONE: RISERVATA	

INDICE

1. PREMESSA	1
2. LO STUDIO DELLA DINAMICA DELLA COSTA	2
3. METODOLOGIA GENERALE DI INDAGINE	3
4. DESCRIZIONE DELL'UNITA' FISIOGRAFICA.....	5
5. PRINCIPALI CONCLUSIONI DEGLI STUDI A SUPPORTO	9
5.1 STUDI SEDIMENTOLOGICI ED INDAGINI DI CAMPO	9
5.2 STUDI CLIMATICI E METEOMARINI	9
5.3 STUDI IDRODINAMICI.....	14
5.4 STUDI IDROLOGICI – IDRAULICI.....	16
6. ANALISI DIACRONICA	17
7. MORFODINAMICA DEL TRASPORTO SOLIDO TRASVERSALE.....	19
7.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO	20
7.2 SCELTA DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO ED INIZIALI	21
7.2.1 DETERMINAZIONE DEI PROFILI	21
7.2.2 DETERMINAZIONE DELLE MAREGGIATE	23
7.2.3 DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI E DELLA SPIAGGIA	24
7.3 RISULTATI OTTENUTI	25
7.4 CONCLUSIONI SUL TRASPORTO SOLIDO CROSS-SHORE.....	30
8. MORFODINAMICA DEL TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE.....	32
8.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO	32
8.2 ANALISI DEL CLIMA ONDOSI CON STWAVE.....	34
8.3 APPLICAZIONE DEL MODELLO GENESIS	40
8.3.1 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO E SCELTA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI.....	40
8.3.2 CONDIZIONI AL CONTORNO	40
8.3.3 TARATURA DEL MODELLO E VERIFICA DELLA COMPONENTE LONGSHORE	41
9. PREVISIONE DEGLI EFFETTI SUL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO DOVUTI ALLA PRESENZA DELLE OPERE IN PROGETTO.....	43
9.1 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO E DI MITIGAZIONE	43
9.2 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE	44
9.2.1 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 0	45
9.2.2 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 1.....	47
9.2.3 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 2	49
9.2.4 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 3	50
9.2.5 CONFRONTO TRA GLI SCENARI IPOTIZZATI E CONCLUSIONI	51
10. PREVISIONI QUALITATIVE SUI FENOMENI DI DEPOSITO E DI EROSIONE ALL'INTERNO DEL BACINO PROTETTO.....	54
10.1 TEORIA DEL MODELLO.....	54

10.2 ANALISI EFFETTUATE.....	57
10.2.1 CASO 1: FORZANTE DI MAREA	63
10.2.2 CASO 2: FORZANTI DI MAREA E SCIROCCO	66
10.2.3 CASO 3: FORZANTI DI MAREA E GRECALE	68
10.2.4 CONCLUSIONI	71
11. CONCLUSIONI	73

1. PREMESSA

Questo elaborato fa parte degli studi specialistici redatti a supporto del progetto **PROGETTO DEFINITIVO DELL'APPRODO TURISTICO "MARINA DI SIRACUSA" SVILUPPATO SULLA BASE DEI CONTENUTI DEL PROGETTO PRESENTATO E DISCUSO IN CONFERENZA DEI SERVIZI IN DATA 15.02.2021**

Il concetto che sta alla base di questo corpo documentale, è quello che la realizzazione di qualsiasi tipologia di infrastruttura ovvero qualsiasi attività antropica legata alla presenza della stessa, interagisce inevitabilmente con i processi climatici, idrodinamici e sedimentologici del sistema costiero in cui è inserita, caratterizzato da un complesso equilibrio "dinamico".

Tali interazioni possono provocare fenomeni spesso complessi da prevedere e i cui effetti sicuramente ricadono sia sull'ambiente, sia sull'intero sistema, compromettendo talvolta anche le stesse strutture antropiche.

Un approccio moderno che consenta la comprensione dei possibili scenari futuri connessi alla costruzione delle opere in progetto è rappresentato da uno studio "omnicomprensivo" di tutte le caratteristiche in gioco, che, anche tramite l'uso di modelli matematici, descrive i fenomeni reali e può proporre la previsione degli scenari futuri.

Il corpo documentale degli studi tecnici è quindi da intendersi come un unico testo organico, in cui ogni singolo elaborato rappresenta solo un capitolo dedicato ad un determinato aspetto.

In particolare lo studio climatologico, lo studio idraulico marittimo, lo studio idrodinamico, lo studio della dinamica della costa, lo studio della qualità delle acque e lo studio idrologico-idraulico costituiscono le tessere di un puzzle che insieme definiscono il "quadro ambientale" in cui viene inserito il progetto proposto e di cui si vogliono individuare gli impatti indotti.

2. LO STUDIO DELLA DINAMICA DELLA COSTA

Il presente studio è stato redatto con lo scopo di chiarire quali siano le dinamiche relative al trasporto litoraneo all'interno del sito del Porto Grande ed in particolare del tratto di costa interessato dalle opere in progetto.

La finalità del presente studio è quindi quella di identificare quali siano le conseguenze che derivano dalla realizzazione delle opere previste dal progetto definitivo sulla linea di riva interessata, e di indicare gli interventi atti a mitigare e/o a compensare gli eventuali fenomeni ad impatto negativo.

La necessità della redazione di questo elaborato nasce dalle seguenti considerazioni.

Qualsiasi intervento antropico costiero, sia esso radicato o radente la linea di riva, comporta una manomissione ed uno squilibrio dell'idrodinamica costiera precedente.

Ciò si esplicita in una serie di effetti ambientali concatenati ed interdipendenti, il più delle volte a caratteristica evolvente in funzione della facilità, o meno, di raggiungere un nuovo equilibrio idrodinamico.

Dal punto di vista ingegneristico, devono essere compiuti tutti gli sforzi possibili ai fini di:

- prevedere con la maggiore esattezza possibile gli effetti provocati dall'opera;
- attuare tutti i possibili rimedi ai fini della mitigazione degli impatti e dell'esclusione degli effetti inattesi, non proficui se non dannosi.

In una unità fisiografica, il regime di trasporto solido in prossimità della costa determina, ove ne occorrono le condizioni ed in concorso con altri fattori, le caratteristiche della linea di riva, soprattutto quando sia presente una componente superficiale di detrito alluvionale poco coeso.

La disponibilità di solido in sospensione che partecipi al naturale scambio con la fascia litoranea dipende dai rifornimenti che avvengono all'interno dell'unità fisiografica.

Il regime idrologico dei fiumi e dei torrenti, e quindi il regime di trasporto solido degli stessi è anch'esso componente fondamentale dell'argomento in questione.

Le variazioni indotte sia sul vettore idraulico marittimo che sul regime dell'apporto solido fluviale, comportano conseguenze che possono essere più o meno accentuate in funzione delle molte variabili ambientali in gioco. Lo squilibrio ingenerato può evolvere o in un nuovo equilibrio o in un transitorio, anche molto lungo, dove il sistema litoraneo cercherà un nuovo assetto a seguito di notevoli cambiamenti morfologici.

Questi ultimi casi includono i purtroppo noti e frequenti fenomeni di erosione o di accrescimento (interrimento) di carattere patologico.

3. METODOLOGIA GENERALE DI INDAGINE

Nell'ingegneria costiera con il termine morfodinamica si intende l'evoluzione spazio-temporale della morfologia della spiaggia o anche di una forma morfologica della spiaggia quale la linea di riva, il profilo trasversale, la barra sottomarina ecc..

Si possono individuare le tre fasi fondamentali di uno studio rivolto alla modifica dei fondali:

- idrodinamica;
- trasporto solido iniziale;
- morfodinamica.

E' importante sottolineare che il passaggio dal trasporto solido iniziale alla morfodinamica costituisce tuttora una delle frontiere della ricerca che opera nel settore. Una delle principali difficoltà che si incontrano nello studio della morfodinamica dei fondali è causata dall'elevato grado di non linearità dei processi fisici coinvolti. Conseguentemente modesti errori nella definizione delle condizioni al contorno possono amplificarsi nel tempo causando il divergere della soluzione prevista (calcolata) da quella reale.

E' evidente che la riproduzione completa su modello, matematico o fisico, dei processi legati alla morfodinamica dei fondali richiede quindi una completa descrizione dell'idrodinamica, delle proprietà del materiale di fondo e dei fenomeni di interazione tra matrice fluida e solida.

Lo studio del trasporto solido costiero risulta particolarmente complesso in quanto complessa è l'idrodinamica che lo governa. Infatti, il moto oscillatorio delle particelle fluide, indotto dalle onde di superficie, risulta accoppiato alla turbolenza e alla circolazione generale indotta dalle onde frangenti che presenta una struttura spiccatamente tridimensionale. Tuttavia, allo scopo di pervenire ad una valutazione quantitativa delle variazioni del fondo marino, si è soliti suddividere il trasporto solido costiero in due componenti principali individuate sulla base delle direzioni dominanti assunte dal trasporto stesso:

- trasporto solido trasversale alla linea di battigia (cross-shore);
- trasporto solido longitudinale parallelo alla linea di battigia (longshore).

Il trasporto solido trasversale è causato principalmente dalla corrente di ritorno indotta dal moto ondoso frangente, mentre il trasporto solido longitudinale è causato dalla corrente longitudinale indotta dalle onde frangenti.

Il trasporto solido trasversale è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine (ore-giorni) e produce prevalentemente variazioni locali dei fondali influenzando in modo secondario sull'evoluzione a lungo termine.

Il trasporto solido longitudinale influisce in modo prevalente sull'evoluzione a medio e lungo termine (anni) della morfologia di un litorale.

Tuttavia occorre sempre ricordare che ambedue le modalità di trasporto solido (trasversale e longitudinale) sono in realtà contemporaneamente presenti su un litorale e che il trasporto solido trasversale può dar luogo, in alcuni casi, alla perdita definitiva di materiale verso il largo. Comunque, nonostante l'approssimazione introdotta, questo tipo di schematizzazione, se ben applicata, dà luogo, nella maggior parte dei casi, a corrette valutazioni dei fenomeni evolutivi di un litorale.

Da un punto di vista applicativo la stima del trasporto solido longitudinale risulta più semplice rispetto alla stima del trasporto trasversale.

La complessa interazione tra i sedimenti e il fluido è causata, oltre che dalla turbolenza e dal moto oscillatorio delle particelle idriche, anche da altri fattori quali ad esempio le variazioni del livello medio marino, la pendenza locale del fondale che influisce sulla stabilità dei sedimenti e la diversa granulometria presente nel sedimento che costituisce la spiaggia.

Dapprima è stata effettuato un riepilogo dei dati e delle informazioni utili provenienti dagli altri studi tecnici che fanno parte del progetto definitivo.

Alla luce di tali informazioni è stata quindi affrontata l'analisi diacronica per evidenziare quali siano stati i trend che hanno interessato il tratto di litorale in esame.

Le risultanze analitiche sul trasporto solido delle componenti cross-shore e long-shore sono state verificate attraverso l'applicazioni di specifici modelli di calcolo:

- per la valutazione dell'evoluzione del profilo trasversale a breve termine si è operato seguendo l'approccio consentito dall'applicazione di un modello matematico trasversale "SBEACH" dal "Coastal Engineering Reserch Center", oggi CHL, dell' "US Army Corps of Engineers".
- per la valutazione dell'evoluzione del profilo longitudinale a medio termine, si è operato mediante l'applicazione del modello matematico "GENESIS" sviluppato dallo stesso istituto di ricerca sopra richiamato.

Inoltre è stata effettuata la previsione degli effetti a medio termine (10 anni) sul trasporto solido litoraneo dovuti alla presenza delle opere in progetto e delle opere di mitigazione previste ed in particolare agli effetti dovuti al grado di permeabilità del molo foraneo e della scogliera antisedimentazione.

Infine verrà ulteriormente verificato qualitativamente quale sia l'entità dei fenomeni di erosione e sedimentazione all' interno del bacino protetto di progetto, attraverso l'applicazione della modellistica matematica adatta.

4. DESCRIZIONE DELL'UNITA' FISIOGRAFICA

Il sito della baia del Porto Grande di Siracusa si estende tra l'isola di Ortigia e la penisola della Maddalena.

La batimetria all'interno del Porto Grande è variabile tra 0 e 30 m sotto il l.m.m.

Il Porto Grande di Siracusa è di fatto un bacino semichiuso e costituisce una subunità fisiografica.

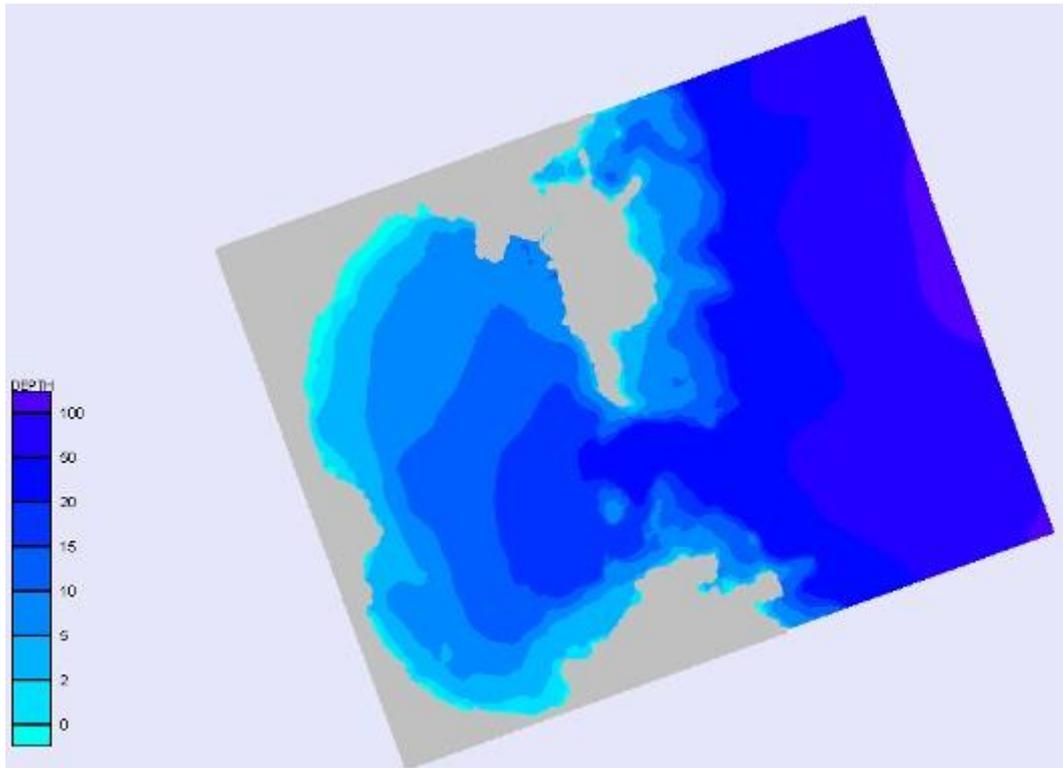


Figura 4-1. Rappresentazione modellistica del sito del Porto Grande di Siracusa.

Si osserva che secondo la suddivisione riportata nel Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Sicilia, il litorale del Bacino del Porto Grande di Siracusa, ricade all'interno dell'unità fisiografica n. 6, da Capo Punto Castelluzzo a Isola delle Correnti.

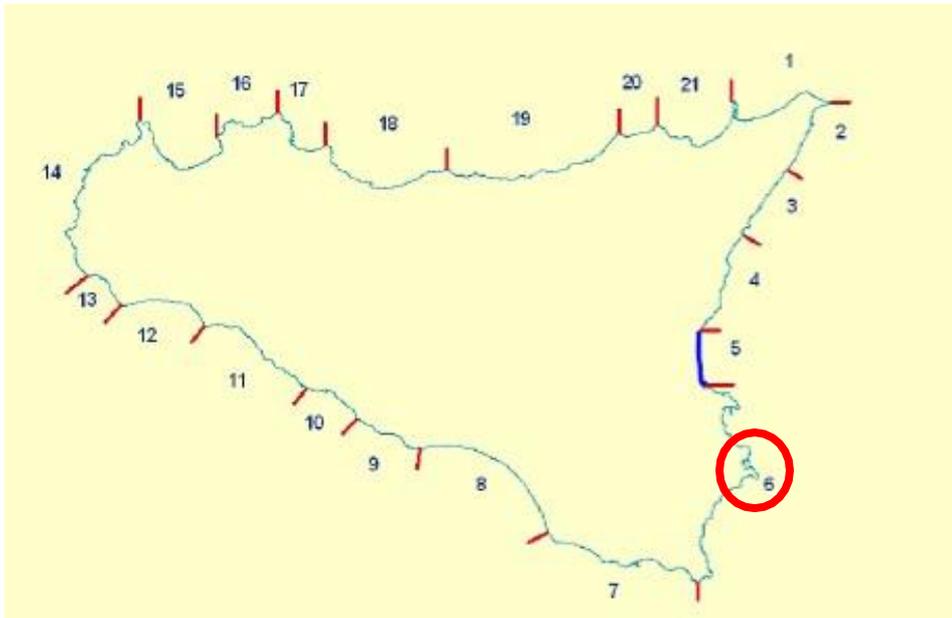


Figura 4-2. Schema di riferimento per la localizzazione delle unità fisiografiche secondo la suddivisione prevista nel P.A.I. della Regione Sicilia, con indicazione del sito di interesse all' interno dell' unità fisiografica di appartenenza.

In particolare il "Piano di Tutela delle Acque" (2007) della Regione Sicilia, inserisce il sito del Porto Grande di Siracusa all' interno del tratto di costa tra capo S. Panagia e capo Murro di Porco.



Figura 4-3. Schema di riferimento per la localizzazione delle unità fisiografiche secondo la suddivisione prevista nel P.T.A. della Regione Sicilia del 2007 con indicazione del sito di interesse all' interno dell' unità fisiografica di appartenenza.

Inoltre gli studi dell' ENEA del 2003 (cfr. "Elementi di Gestione Costiera"-2003), il tratto di costa in esame corrisponde al morfotipo "Costa di Golfo".

A tale morfotipo corrisponde un litorale non esposto ai marosi del mare aperto.

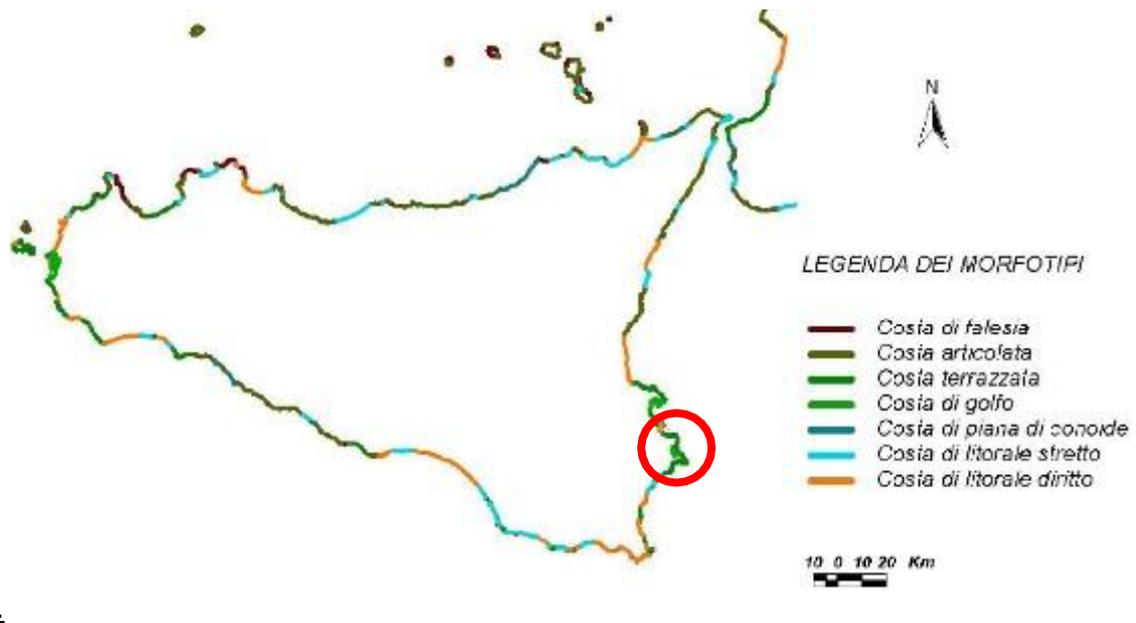


Figura 4-4. Schema di riferimento per l'individuazione del morfotipo secondo gli studi dell'ENEA del 2003, con indicazione del sito di interesse.

Di seguito si riporta lo stralcio dell'ortofoto ATA 2007/2008, relativo alla sub-unità fisiografica "Porto Grande di Siracusa".

Come già osservato tale tratto di litorale si estende dall'Isola di Ortigia e alla penisola della Maddalena.

E' stato possibile identificare due tratti di costa principali:

- il litorale a nord, compreso tra l'area dei Pantani e l'isola di Ortigia.
- Il litorale a sud, compreso tra l'area dei Pantani e la penisola della Maddalena.

Il litorale a nord si presenta costituito soprattutto da sedimenti di tipo limosi e limo-sabbiosi.

Lungo questo tratto sono presenti le foci del sistema fluviale Anapo-Ciane-Mammaiabica, e quello del Pantanelli, e altri corsi d'acqua minori tra cui il canale Regina (cfr. elaborato B.7-SIDR-"Studio Idrologico-Idraulico").

In questo tratto, tra la foce del Canale Regina e il molo S. Antonio si localizza in sito destinato ad ospitare le opere in progetto.

Il litorale a sud si presenta invece caratterizzato dall'alternarsi di tratti di costa alta e di costa bassa.



Figura 4-5. Stralcio dell'ortofoto ATA 2007/2008. Sub-unità fisiografica "Porto Grande di Siracusa", con individuazione del sito di interesse e delle foci dei principali sistemi fluviali presenti.

5. PRINCIPALI CONCLUSIONI DEGLI STUDI A SUPPORTO

La redazione di questo studio ha tratto spunto dalle conclusioni ottenute in seno alle indagini specialistiche effettuate durante la redazione del progetto ove queste, a seguito di una accurata analisi, siano risultate idonee ed esaustive per la definizione dello stato di fatto e delle tendenze evolutive del fenomeno.

5.1 STUDI SEDIMENTOLOGICI ED INDAGINI DI CAMPO

Durante la redazione del progetto definitivo è stata condotta una campagna di rilievi topografici e batimetrici.

I risultati e le conclusioni di questa campagna di rilievi e degli studi di carattere sedimentologico geologico sono presenti all'interno dell'elaborato B.5-SG "Studio Geologico".

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei sedimenti presenti nell'area, nell'ambito della campagna di rilievi sono stati campionati i sedimenti superficiali sia della spiaggia emersa sia di quella sommersa sottoponendoli ad analisi di laboratorio.

L'insieme dei risultati delle analisi eseguite ha fornito una completa descrizione della natura dei sedimenti ottemperando a quanto previsto dalla vigente normativa.

Si evidenzia che i sedimenti presenti in sito sono stati classificati come "limi sabbiosi".

In particolare si tratta di depositi granulometricamente riferibili di colore nerastro, sciolti, plastici e talora inconsistenti, caratterizzati dalla presenza di abbondante sostanza organica in decomposizione.

Dette caratteristiche evidenziano quindi il basso dinamismo che interessa l'area in oggetto e la provenienza mineralogica dai fiumi che insistono nel Porto Grande.

Per maggiori chiarimenti in merito si rimanda allo Studio Geologico.

5.2 STUDI CLIMATICI E METEOMARINI

Di seguito si riportano le principali conclusioni relative alle caratteristiche meteomarine principali per il sito di interesse, quali:

- caratteristiche anemologiche,
- caratterizzazione del clima ondoso,
- caratterizzazione degli eventi estremi.

Tali conclusioni sono stati estratti dagli elaborati "Studio Climatologico" (elaborato B.1-SC) e "Studio Idraulico Marittimo" (elaborato B.2-SIM), a cui si rimanda.

Per quanto riguarda i fenomeni anemologici si osserva che al livello globale i venti regnanti sono quelli provenienti da est, i venti dominanti sono ancora da est e da N-E e S-E.

La caratterizzazione stagionale vede d'inverno la conferma della tendenza globale; d'estate invece i venti regnanti sono quelli da scirocco.

Il settore di traversia individuato per il paraggio del Porto Grande è compreso tra 30 e 165°N.

Per quanto riguarda il regime medio del moto ondoso è caratterizzato da una predominanza del moto ondoso proveniente dal primo e dal secondo quadrante sia in termini di frequenza che in termini di massima altezza d'onda.

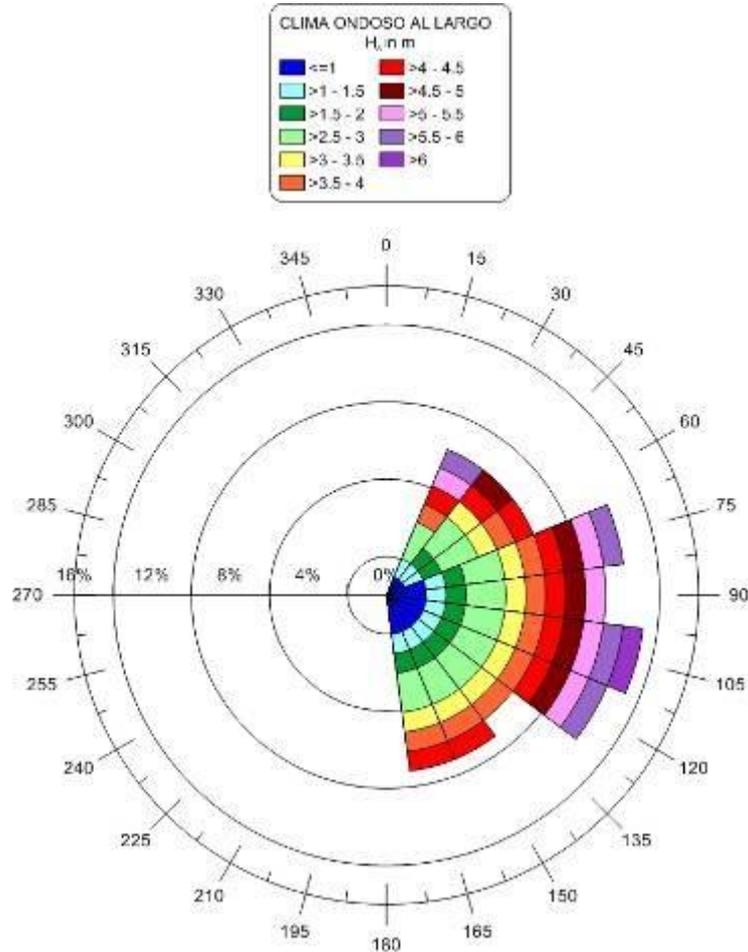


Figura 5-1. Diagramma polare rappresentante il clima d'onda per il paraggio in esame.

Durante i fenomeni di propagazione dal largo sottocosta, i treni d'onda si dispongono in modo pressoché perpendicolare alla linea di costa, come mostra la seguente figura.

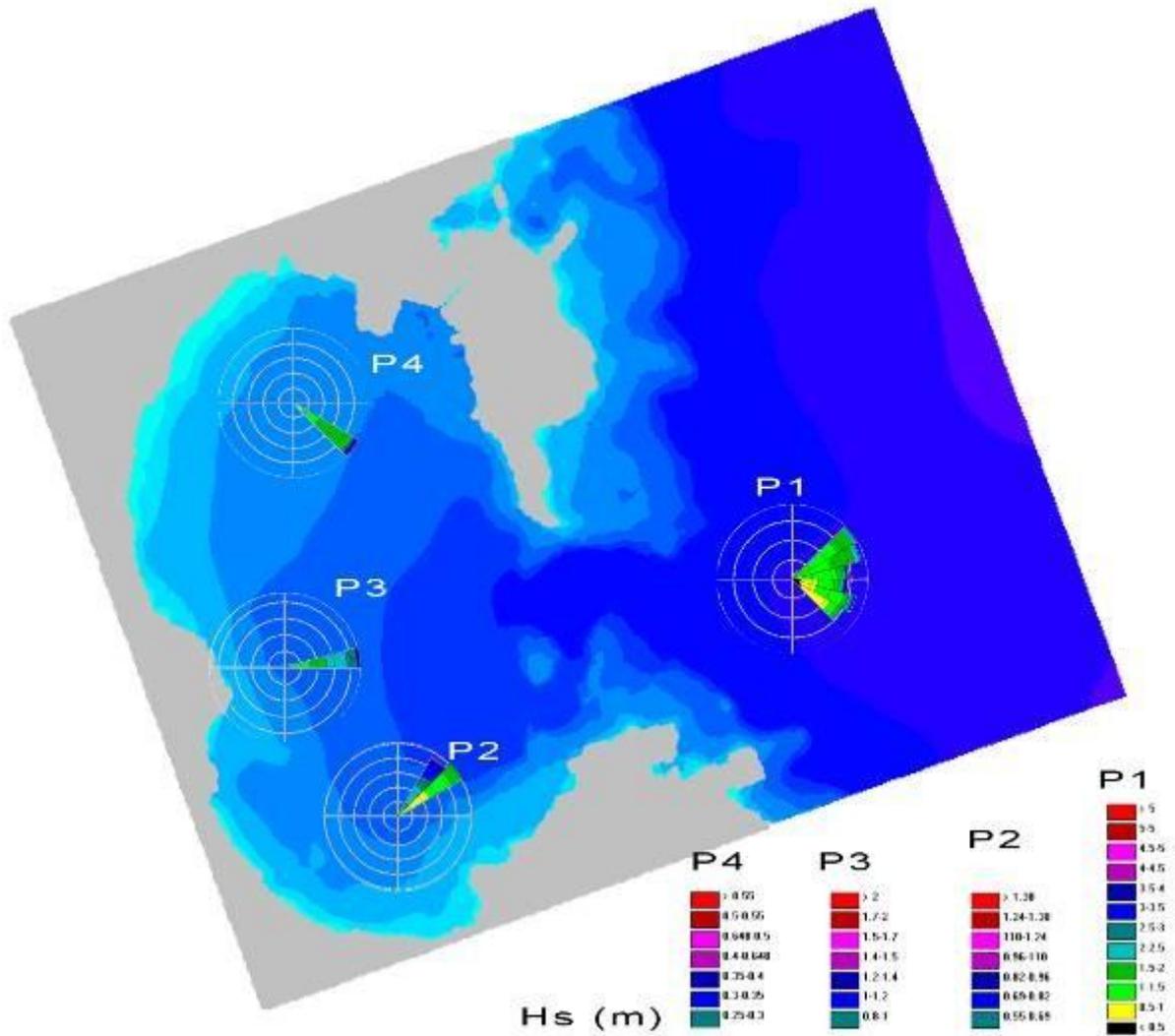


Figura 5-2. Diagrammi polari relativi alla distribuzione del clima d'onda sottocosta.

Durante la redazione dello studio idraulico marittimo sono state calcolate le altezze d'onda al largo per il sito di Siracusa in funzione della direzione di provenienza; di seguito si riporta il prospetto di riepilogo.

Hs (m) -ANALISI DIREZIONALE DEGLI EVENTI ESTREMI -SIRACUSA										
R (anni)	30°N	45°N	60°N	75°N	90°N	105°N	120°N	135°N	150°N	165°N
2	2.35	2.86	2.74	2.90	3.18	2.92	2.17	1.51	0.84	1.08
5	3.28	4.37	3.90	3.94	4.15	3.96	3.00	2.27	1.36	1.95
10	3.82	5.25	4.56	4.53	4.70	4.69	3.47	2.72	1.66	2.45
25	4.41	6.21	5.31	5.19	5.31	5.40	4.00	3.20	1.99	2.99
50	4.81	6.86	5.80	5.63	5.73	5.87	4.34	3.52	2.21	3.36
73	5.00	7.18	6.05	5.85	5.93	6.12	4.52	3.68	2.31	3.55
100	5.17	7.45	6.25	6.03	6.10	6.31	4.66	3.82	2.41	3.70

Tabella 5-1. Eventi estremi al largo del paraggio per 2 anni < R < 100 anni.

Ai fini del completamento delle elaborazioni del presente studio, sono state determinate le onde direzionali al largo aventi tempo di ritorno R=1 anno.

ANALISI DIREZIONALE DEGLI EVENTI ESTREMI -TEMPO DI RITORNO R=1 ANNO										
D(°N)	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
H (m)	0,40	0,45	0,50	0,98	1,25	1,50	0,75	0,50	0,40	0,30

Tabella 5-2. Eventi estremi al largo del paraggio per il tempo di ritorno R=1 anno.

Al fine di completare la caratterizzazione del clima ondoso al largo e di individuare la direzione di provenienza del maggior contenuto energetico associato al moto ondoso, è stata effettuata un'analisi sul contenuto energetico direzionale del moto ondoso al largo.

L'energia media del moto ondoso è stata calcolata mediante la relazione:

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H_s^2 \cdot L \cdot \frac{10800}{T}$$

In cui:

- E è il contenuto energetico in MJ/(m x anno),
- ρ in è la densità dell' acqua pari a 1030 Kg/m³,
- g l'accelerazione di gravità pari a 9,81 m/s,
- H_s (in m) l'altezza d'onda significativa,
- L (in m) è la lunghezza d'onda,
- T (in s) è il periodo medio dell' onda

Di seguito si riporta il diagramma polare relativo alla distribuzione di energia ondosa media annuale al largo e sottocosta.

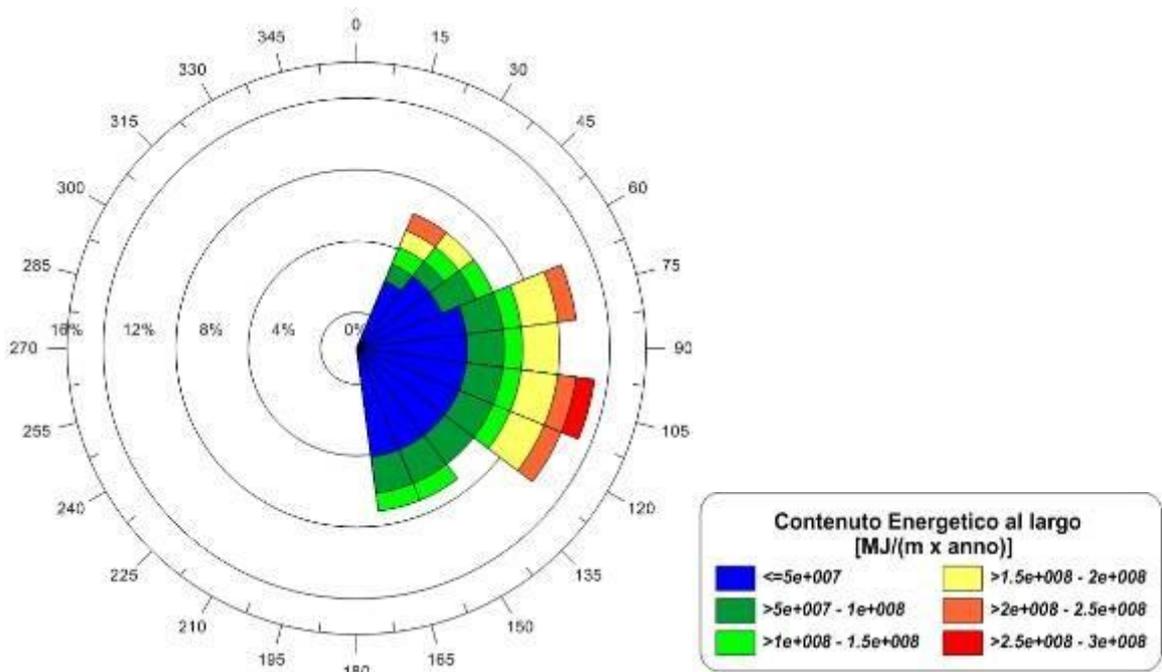


Figura 5-3. Diagramma polare relativo alla distribuzione di energia ondosa media annuale al largo del paraggio in esame

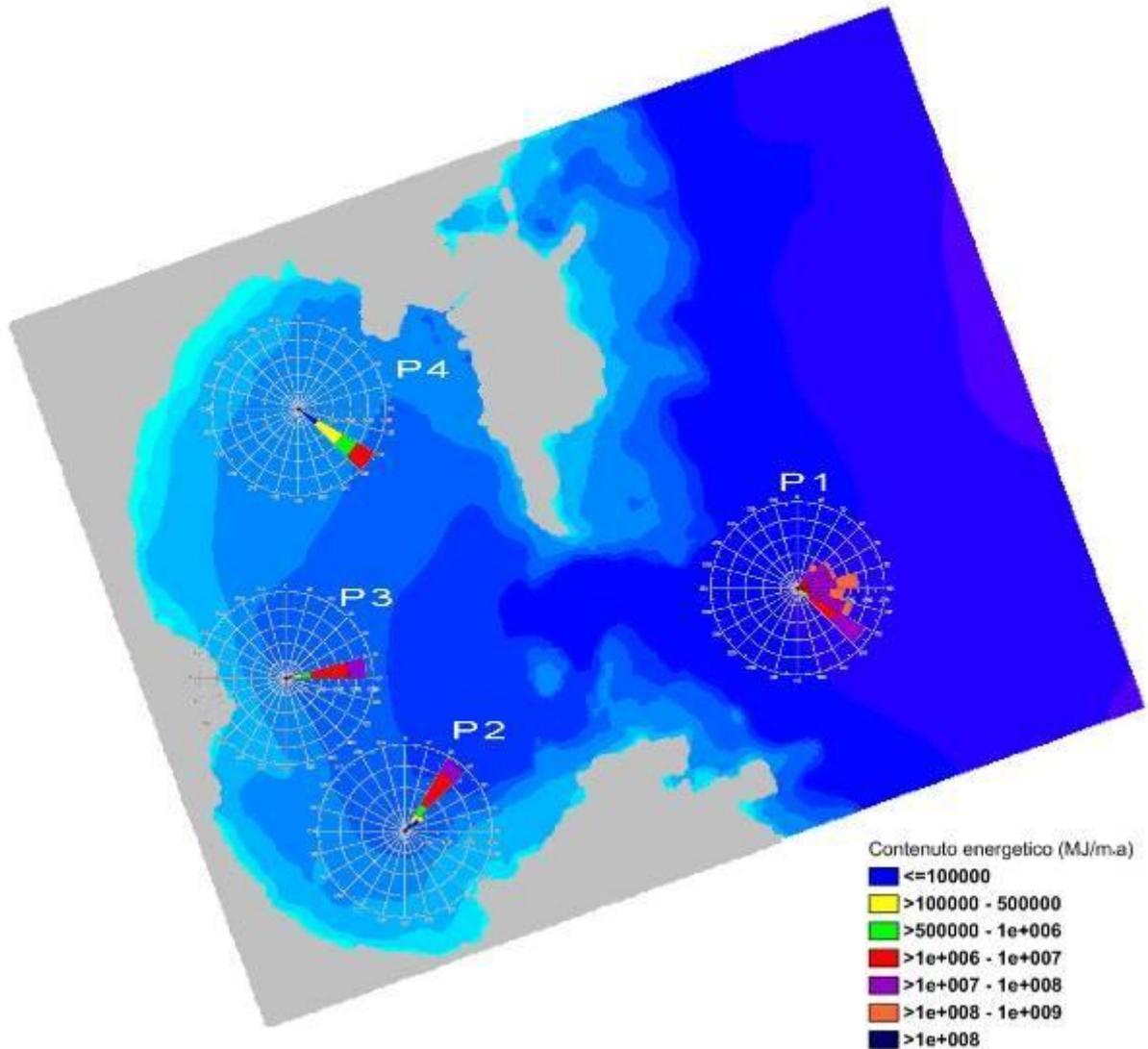


Figura 5-4. Diagrammi polari relativi alla distribuzione di energia ondosa media annuale sottocosta.

Inoltre è stata determinata la profondità di chiusura, che corrisponde al limite della fascia i cui i sedimenti del fondo subiscono rimaneggiamento e il trasporto per azione del moto ondoso.

Il calcolo è stato effettuato utilizzando la relazione proposta da Birkemeier (1985):

$$h_c = 1.57 H_{s,12}$$

in cui $H_{s,12}$ è l'altezza significativa sottocosta che mediamente è uguagliata o superata solo 12 ore in un anno.

Dalla valutazione del clima d'onda al largo del sito di Siracusa (cfr. elaborato B.2-SIM) è stato valutato che l'onda con $H_{s,12}$ più gravoso è quella proveniente dalla direzione $105^\circ N$, caratterizzata da $H_{s,12} = 4,98$ m.

Dalle simulazioni relative alla propagazione sottocosta del clima ondoso sottocosta (cfr. elaborato B.2-SIM) tale treno si presenta sottocosta (sulla batimetrica dei -10 m, rispetto il l.m.m.) nei punti di controllo scelti (cfr. figura seguente) con le seguenti caratteristiche (cfr. figura 5-2):

- P.2: $H_{s,12} = 1,20$ m

- P.3: $H_{s,12} = 1,55$ m
- P.4: $H_{s,12} = 0,62$ m.

A questa distribuzione ondometrica corrisponde la seguente distribuzione delle profondità di chiusura:

- P.2: $h_c = 1,90$ m
- P.3: $h_c = 2,50$ m
- P.4: $h_c = 0,90$ m.

5.3 STUDI IDRODINAMICI

Lo studio idrodinamico è oggetto dell'elaborato B.3.1-SDC, a cui si rimanda per la visualizzazione delle immagini.

Di seguito si riportano le principali conclusioni.

Il regime correntometrico nella configurazione di stato di fatto dovuto agli effetti di marea è caratterizzato dalla presenza di due celle di circolazione.

La prima è situata a nord ed è caratterizzata da un senso di rotazione orario, essa corre parallela alla costa dalla foce del F. Anapo all'estremità sud di Ortigia.

La seconda invece è situata sud ed è caratterizzata da un senso di rotazione antiorario.

Le velocità della corrente variano all'interno di tutto il dominio del Porto Grande tra 0 e 2,5 m/s.

In prossimità dell'area destinata ad accogliere le opere in progetto sono dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-4} m/s.

I livelli idrici all'interno del dominio variano tra - 25 e + 30 cm.

In prossimità dell'area destinata ad accogliere le opere in progetto tale variazione è dell'ordine di qualche cm.

La presenza delle opere in progetto per gli effetti della marea causa una deviazione della corrente nord e provoca di fatto una modesta riduzione dell'entità delle velocità delle correnti, mentre i livelli idrici rimangono dello stesso ordine di grandezza.

Il regime correntometrico nella configurazione di stato di fatto dovuto agli effetti della marea e del vento di scirocco è caratterizzato dalla formazione di più celle di circolazione all'interno del Porto Grande.

Nella configurazione di stato di fatto, si instaura una cella principale del Porto Grande con circolazione di tipo antiorario, in ingresso in prossimità della Punta Maniace di Ortigia, e ruota verso sud in prossimità del tratto di costa tra le foci del fiume Anapo e del canale Pantanelli.

La cella minore è localizzata a nord in prossimità dell'approdo del Marina di Archimede, è di tipo orario ed interessa l'area compresa tra il Marina di Archimede e Ortigia ed è caratterizzata da una circolazione di tipo orario.

Infine in prossimità del sito destinato ad ospitare opere in progetto, si osserva la formazione una cella caratterizzata da una circolazione oraria, avente componente

longitudinale dall'area delle foci del fiume Anapo e del canale Pantanelli verso il Marina di Archimede.

Rispetto al caso di sola marea, il vento di scirocco provoca un innalzamento dei livelli idrici di circa 2-5 cm in prossimità del sito destinato ad accogliere le opere in progetto.

Le velocità all'interno dell'intero dominio del Porto Grande variano tra 0 e 2,8 m/s.

In prossimità delle opere in progetto esse raggiungono l'ordine di 10^{-1} m/s.

Nel caso di forzanti di scirocco e marea, in presenza delle opere in progetto, la corrente che va dall'Anapo verso Ortigia risulta ancora sussistere, ma le velocità risultano essere minori per via degli effetti di schermatura dovuti alla presenza delle opere in progetto.

In presenza di vento da grecale e di marea all'interno del Porto Grande, nella configurazione di stato di fatto, si forma una cella di circolazione antioraria; essa risulta essere alimentata dalla correnti di grecale entranti nel bacino semichiuso rispettivamente dal canale di collegamento tra Ortigia e la terra ferma nei pressi del Porto Piccolo, e dall'imboccatura del Porto Grande nei pressi del Castello Maniace.

Il range di variazione delle velocità all'interno del dominio indagato è compreso tra 0 e 1,7m/s.

I livelli idrici si attestano sugli stessi valori di quelli che si manifestano in presenza di scirocco.

In presenza delle opere in progetto, per gli effetti della marea e del vento da grecale si osserva un rallentamento locale della corrente a causa dell'azione di schermatura dell'opera foranea.

Infine per effetto delle forzanti di marea e di flusso continuo proveniente dal fiume Anapo, nella configurazione di stato di fatto, all'interno del Porto Grande, si instaura un regime correntometrico caratterizzato dalla formazione di due celle di circolazione.

Quella principale è di tipo orario e va dalla foce dell'Anapo, verso l'isola di Ortigia.

La cella secondaria è localizza invece più a Sud e la circolazione indotta è di tipo antiorario.

La presenza delle opere in progetto scherma la zona degli approdi, provocando la deviazione della corrente. La cella principale risulta avere una forma più allungata e schiacciata, si osserva anche un aumento delle velocità.

All'interno dello specchio protetto si instaura un regime correntometrico caratterizzato da velocità ridotte (dell'ordine di qualche cm/s).

Ricapitolando, all'interno del Porto Grande; in tutti i casi analizzati, si è osservata la formazione di una cella di circolazione principale localizzata tra la foce F. Anapo e Ortigia.

Lungo il litorale tra la foce del F. Anapo e Ortigia si osserva la formazione quindi di una corrente a componente longshore.

Il verso di rotazione principale è quello orario, che risulta ben delineato in presenza dei fenomeni indotti dalla marea, dal vento da scirocco e dall'apporto idrico del fiume Anapo; in presenza del vento da grecale la cella di circolazione sembra assumere verso antiorario.

La realizzazione delle opere in progetto, destinate alla protezione di uno specchio idrico per il diporto, non causa variazioni dei pattern idrodinamici esistenti all'interno del Porto Grande di Siracusa, limitandosi ad un'azione di schermatura dello specchio idrico e ad una modesta riduzione del regime delle correnti nella zona interessata.

5.4 STUDI IDROLOGICI – IDRAULICI

Il tratto di costa interessato dalle opere insiste sulle foci di segmenti d'acqua naturali ed artificiali:

- il sistema fluviale Anapo -Ciane- Mammaibica
- il sistema di canali Pantanelli-Pisimotta-Grimaldi
- il canale Regina
- il canale di scolo tra il complesso ex S.P.E.R.O. e la base dell'Aeronautica.

Tali corsi d'acqua rappresentano per l'unità fisiografica delle fonti di sedimento.

La valutazione dell'entità dei sedimenti è stata condotta durante la redazione dello studio idrologico-idraulico, utilizzando una metodologia che stima la produzione di sedimento a partire dalla perdita di suolo calcolata secondo la formula di Wischmeier e Smith (USLE).

Per maggiori chiarimenti si rimanda all'elaborato B.5-SIDR "Studio Idrologico-Idraulico".

In particolare per la valutazione del contributo solido alla foce di ognuno dei corsi d'acqua analizzati si è supposto l'assenza di qualsiasi opera di protezione idraulica adatta alla riduzione del trasporto solido fluviale.

Di seguito si riporta il prospetto riassuntivo sulla stima della produzione dei sedimenti.

PRODUZIONE DI SEDIMENTO P	
BACINO	P(t/anno)
ANAPO	3800
PANTANELLI	8,5
REGINA	5×10^{-3}

Tabella 5-3. Produzione dei sedimenti dei bacini che sfociano lungo il litorale del Porto Grande.

6. ANALISI DIACRONICA

Al fine di effettuare un'analisi delle tendenze evolutive dei litorali, che negli ultimi anni hanno interessato il tratto di costa in esame, è stata condotta una analisi comparativa delle linee di riva "storiche" a scala 1:5.000 (cfr. elaborato 3.3.SDC).

Le linee di riva considerate nello studio sono relative ai seguenti periodi:

- Linea di riva del 1994 (Fonte: Ortofoto Ministero dell'Ambiente - 1994)
- Linea di riva del 2000 (Fonte: Ortofoto IT - 2000)
- Linea di riva del 2006 (Fonte: Ortofoto Ministero dell'Ambiente - 2006)
- Linea di riva del 2008 (Fonte: Ortofoto ATA -2007/2008)

Il tratto di costa investigato si estende per tutto l'arco del Porto Grande e precisamente riguarda un tratto di estensione pari a circa 9.5 km.

Naturalmente l'analisi delle variazioni della posizione della linea di riva ha richiesto una preliminare georeferenziazione e sovrapposizione dei dati disponibili.

Per ottenere una buona georeferenziazione sono stati individuati dei caposaldi comuni, in modo da limitare così l'errore dovuto alle inevitabili distorsioni derivanti dalle manipolazioni a cui è stata soggetta la cartografia.

Il sistema di riferimento cartesiano adottato è tale che l'azimut dell'asse X rispetto alla direzione 0°N sia pari a 210°N; l'asse Y ha la normale orientata verso il mare.

L'origine del sistema di riferimento è stata posizionata sul punto di coordinate:

- $X_0=2544751,400$
- $Y_0=4102465,300$

La linee di costa sono state discretizzate secondo due livelli.

Il primo livello di discretizzazione a carattere generale ha permesso di individuare cinque transetti, ritenuti significativi dei trend evolutivi della costa all'interno del bacino del Porto Grande.

Il secondo livello di discretizzazione ha permesso di individuare invece lungo l'arco di costa che insiste direttamente sull'area destinata ad accogliere le opere in progetto, alcuni transetti secondo passi long shore di estensione 100 m.

In corrispondenza di ciascun vertice di discretizzazione le variazioni subite dalla linea di riva sono state ottenute tramite la seguente formula

$$\Delta Y_{1,2} = Y_2 - Y_1$$

In cui il pedice indica l'anno di riferimento.

Valori positivi di DY indicano un avanzamento della linea di costa locale; mentre valori negativi rappresentano un arretramento.

Tale confronto è stato effettuato tramite il confronto reciproco dei dati secondo la progressione cronologica.

Di seguito si riportano le principali osservazioni.

Nel periodo tra il 1994 ed il 2000 le variazioni nella linea di riva sono pressoché nulle, le aree in arretramento si alternano a quelle in erosione.

Gli scostamenti sono modesti, le entità maggiori si osservano in prossimità della foce del Canale Pantanelli, con un avanzamento di circa 5 metri.

Nel periodo tra il 2000 ed il 2006, il trend evolutivo identificato è quello erosivo, con un arretramento della linea di riva di elevata entità; gli arretramenti più consistenti si riscontrano nel tratto più a Nord, in prossimità delle aree destinate ad ospitare le opere in progetto (arretramento pari a circa 10-20 m) e presso la foce dell'Anapo (arretramento pari a circa 40 m) e nel tratto di costa in prossimità delle Saline (arretramento pari a circa 15 m).

Nel periodo tra il 2006 ed il 2008 il trend precedente viene confermato; gli arretramenti più consistenti si riscontrano nel tratto più a Nord, in prossimità delle aree destinate ad ospitare le opere in progetto (arretramento pari a circa 2 m) e presso la foce dell'Anapo (arretramento pari a circa 35 m) e nel tratto di costa in prossimità delle Saline (arretramento pari a circa 10 m).

Nel periodo tra il 2006 ed il 2008, inoltre si osserva l'erosione anche in due tratti di costa a sud, in cui la linea di riva risulta arretrata di circa 6-7 m.

In virtù delle informazioni estrapolate dagli altri studi tecnici redatti, sono state effettuati delle deduzioni sulle possibili cause dei trend evolutivi identificati.

Dal punto di vista del trasporto solido fluviale, tali trend possono essere attribuiti ad una probabile diminuzione degli apporti solidi dei corsi d'acqua che sfociano nel Porto Grande ed in particolare dei canali Regina e Pisimotta deviati nel canale Pantanelli a monte del rilevato ferroviario (cfr. elaborato B.5-SIDR "Studio idrologico – idraulico") e principalmente quelli provenienti dal F. Anapo, che in questi anni è stato interessato da lavori di sistemazione idraulica.

Dal punto di vista dell'idrodinamica (cfr. elaborato B.3.1-SDC "Studio Idrodinamico"), si ricorda che all'interno del Porto Grande, si è osservata la formazione di una cella di circolazione principale localizzata tra la foce del F. Anapo e Ortigia avente una notevole componente longshore; tale componente è stata individuata come la principale causa dei trend evolutivi osservati.

Dal punto di vista ondometrico, le caratteristiche delle onde sottocosta incidenti (responsabili dei fenomeni di trasporto cross-shore) sono tali che le altezze sottocosta sono ridotte e che la fascia di frangenza si localizza sulle batimetriche di -1, -2 m sotto il l.m.m. (cfr. elaborato B.2-SIM-"Studio Idraulico Marittimo"), il che implica che la componente cross-shore sia ridotta.

Per confermare queste deduzioni sono state effettuate valutazioni sulle due componenti, tramite l'applicazione di codici numerici specifici.

7. MORFODINAMICA DEL TRASPORTO SOLIDO TRASVERSALE

Dallo studio della previsione degli eventi estremi, è emerso che l'onda annuale massima per il Porto Grande è caratterizzata da $H=1.25$ m e $D=105^\circ N$ (cfr. capitolo 5).

Tale onda in funzione della tipologia di sedimento (LIMI - $D_{50} < 0,1$ mm) a mezzo di considerazioni empiriche (cfr. la figura successiva) consente di valutare che l'ampiezza della fascia di trasporto litorale sia sicuramente intorno ai 200 m. (cfr. la figura successiva).

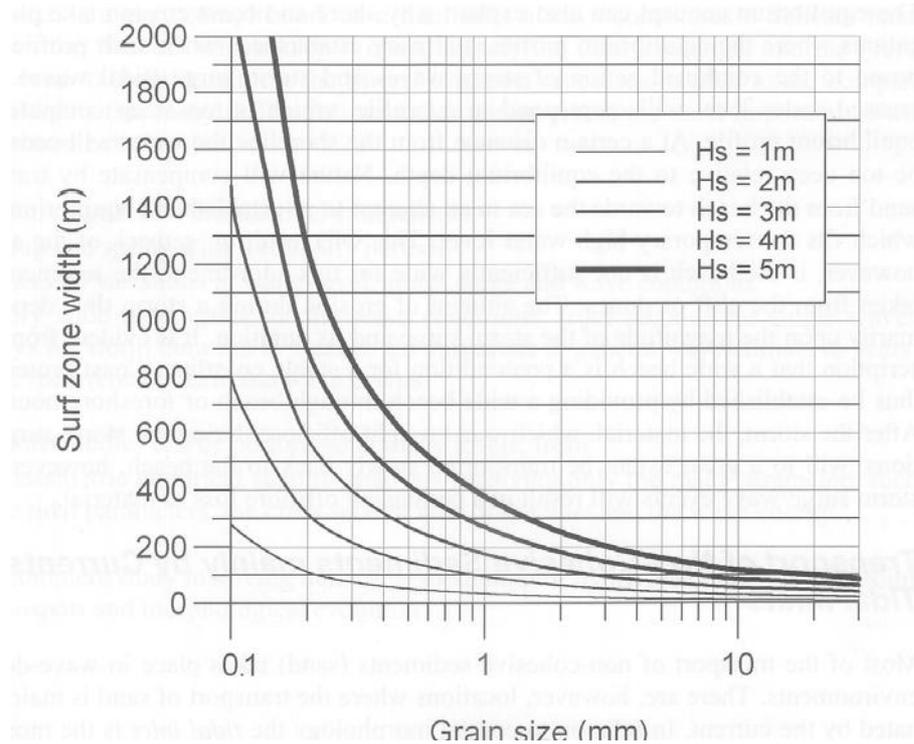


Figura 7-1. Diagramma empirico per la determinazione dell'ampiezza della surf zone (Shoreline Management Guidelines, K. Mangor, 2004).

Secondo una corrente classificazione delle coste ai fini traspedeposizionali, che tiene conto dello stato dell'arte della produzione scientifica più aggiornata (Shoreline Management Guidelines, K. Mangor, 2004, cfr. la figura 7-2), la linea di costa nel sito in esame può essere individuata come:

- in funzione dell'angolo di incidenza degli stati del mare prevalenti: tipo 2, quasi perpendicolare – trasporto netto medio da scarso a moderato;
- in funzione dell'onda annuale: M, moderatamente esposta $1 < H_{\text{annuale}} < 3$ m

Schematicamente e genericamente le condizioni di trasporto litorale cross-shore possono essere rappresentate da questo tipo di grafico.

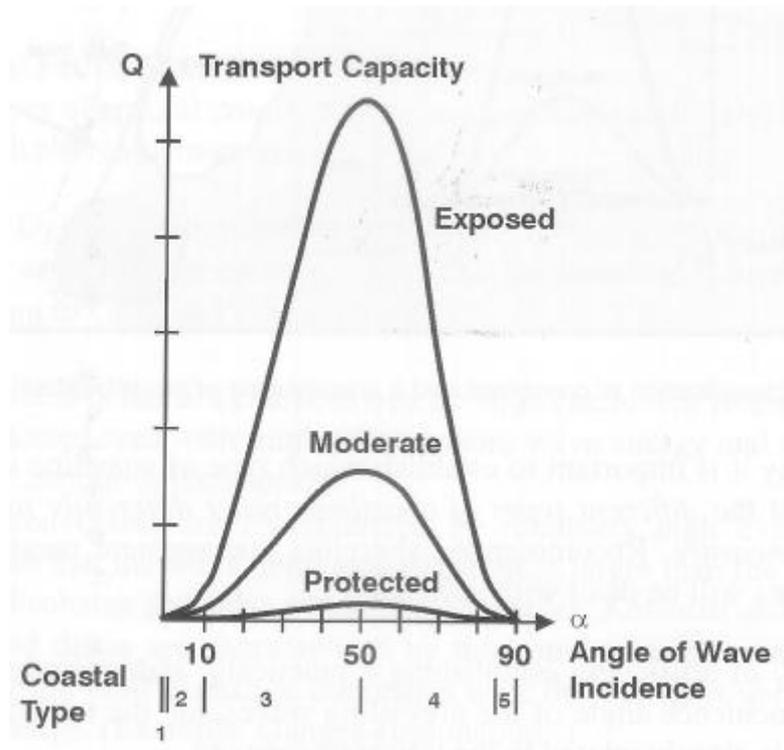


Figura 7-2. Diagramma della classificazione delle coste in funzione delle condizioni di trasporto offshore

Da queste considerazioni si conferma quindi come una importante causa del trasporto longitudinale del sito in questione siano le correnti longshore come determinate nello studio idrodinamico.

Ulteriore conferma della ridotta influenza dei fenomeni cross-shore viene data dalle analisi numeriche eseguite, tramite l'applicazione del modello SBEACH.

7.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO

SBEACH è un modello numerico del "Coastal Engineering Reserch Center", oggi CHL, dell'"US Army Corps of Engineers".

SBEACH è un modello numerico bidimensionale, fondato su formulazioni teorico sperimentale, che simula le variazioni del profilo trasversale di una spiaggia sottoposta all'azione del moto ondoso frangente.

SBEACH calcola i cambiamenti del profilo di spiaggia tenendo conto dell'erosione delle dune e della formazione o degli spostamenti delle barre sommerse.

Il modello è stato sviluppato per predire le risposte morfologiche nei confronti delle mareggiate a breve termine dei profili di spiaggia.

Una delle ipotesi fondamentali del modello SBEACH è che il cambiamento del profilo è prodotto unicamente dai fenomeni di dinamica trasversale e dalla redistribuzione del sedimento lungo il profilo stesso senza variazioni volumetriche complessive.

I processi longitudinali sono considerati uniformi con risultante nulla nei confronti dei cambiamenti del profilo trasversale di spiaggia.

SBEACH per calcolare le risposte morfodinamiche del profilo di spiaggia richiede i dati tipici utilizzati per gli studi di ingegneria marittima; in particolare come condizioni

al contorno ed iniziali, esso necessita della sequenza temporanea delle altezze, periodi e direzioni d'onda relativi alla mareggiata di calcolo; della sequenza temporanea dei livelli idrici; dei dati che descrivono le coordinate del profilo trasversale; del diametro medio del sedimento D_{50} .

Informazioni dettagliate sul metodo di sviluppo del modello e su varie applicazioni possono essere reperite in una serie di documenti tecnici e nei manuali del C.E.R.C. (Larson and Kraus 1989; Larson, Kraus, and Byrnes 1990; Rosati et al. 1993; Wise, Smith, and Larson 1996).

7.2 SCELTA DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO ED INIZIALI

7.2.1 DETERMINAZIONE DEI PROFILI

L'analisi diacronica ha permesso di individuare 5 tratti costieri in cui sono stati riscontrati negli ultimi anni variazioni sensibili della linea di riva all'interno del litorale del Porto Grande di Siracusa.

In corrispondenza di tali tratti, sono stati elaborati cinque profili cross-shore, come riportato nell'immagini successiva.

Questi profili collegano idealmente i punti localizzati lungo il litorale in esame, con un punto localizzato presso l'imboccatura del Porto Grande per il quale è stata determinata l'altezza dell'onda annuale (punto di controllo 0, cfr. figura 7-3).

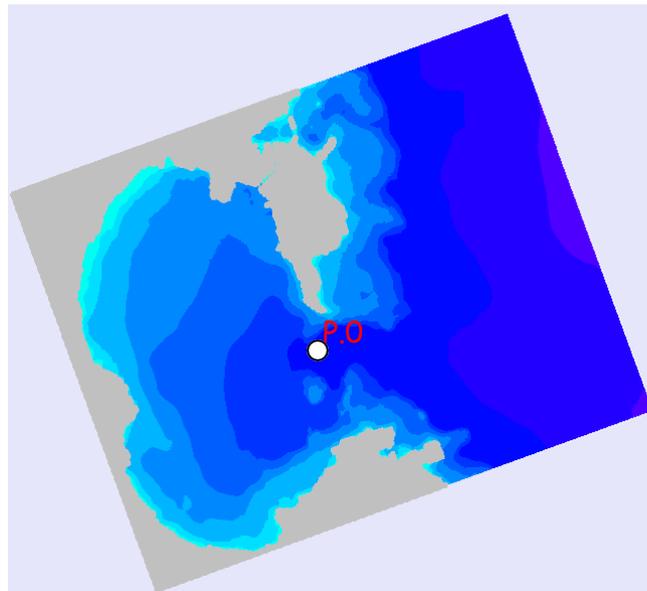


Figura 7-3. Localizzazione del punto di controllo all'imboccatura del Porto Grande.

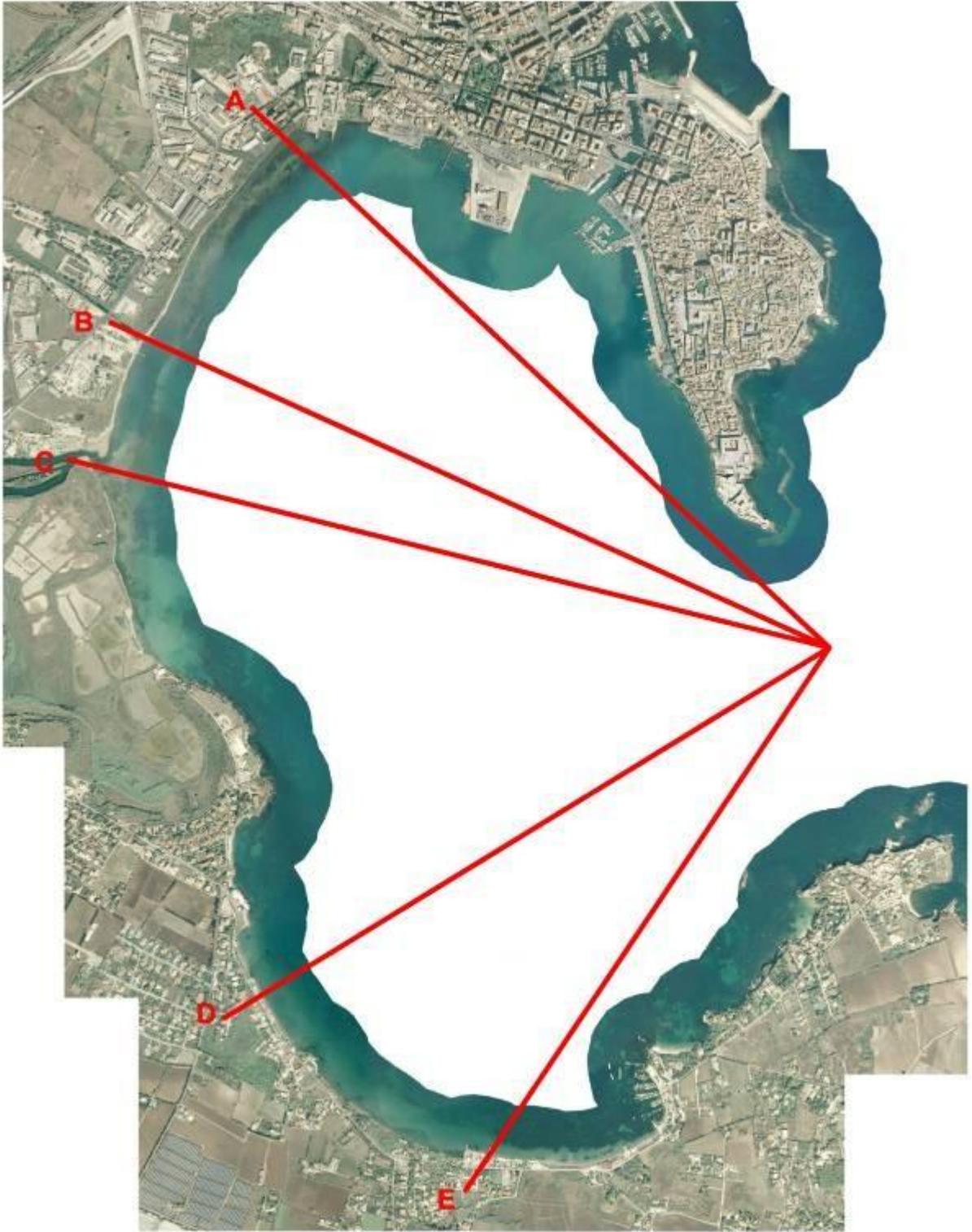


Figura 7-4. Localizzazione dei profili cross-shore.

Il profilo A è lungo circa 2640 m, è orientato secondo la direzione 310°N e collega idealmente il punto presso l'imboccatura del Porto Grande con un punto del litorale presso l'area S.P.E.R.O, sito destinato ad accogliere le opere in progetto.

Il profilo B è lungo circa 2720 m, è orientato secondo la direzione 290°N e collega idealmente il punto presso l'imboccatura del Porto Grande con un punto del litorale presso la foce del canale Pantanelli.

Il profilo C è lungo circa 2630 m, è orientato secondo la direzione 280°N e collega idealmente il punto presso l'imboccatura del Porto Grande con un punto del litorale presso la foce del fiume Anapo.

Il profilo D è lungo circa 2100 m, è orientato secondo la direzione 230°N e collega idealmente il punto presso l'imboccatura del Porto Grande con un punto del litorale a sud oltre la zona dei Pantani.

Il profilo E è lungo circa 2400 m, è orientato secondo la direzione 210°N e collega idealmente il punto presso l'imboccatura del Porto Grande con un punto del litorale a sud.

La geometria di tali profili è stata ricavata a partire dai dati batimetrici delle Carte Nautiche e dai rilievi batimetrici.

In ognuno di essi la batimetria varia tra 0 e -30 m rispetto al l.m.m..

Ai fini computazionali, i profili sopraindicati sono stati discretizzati in celle regolari di dimensione 5m.

Il profilo A è stato discretizzato in 528 celle, il profilo B in 543 celle, il profilo C in 525 celle, il profilo D in 415 celle, il profilo E in 476 celle.

7.2.2 DETERMINAZIONE DELLE MAREGGIATE

Per determinare il profilo trasversale assunto a seguito della modellazione del moto ondoso è stata propagata la mareggiata tipo con tempo di ritorno R pari a 1 anno.

Dai calcoli effettuati per la previsione degli eventi estremi e dalle simulazioni STWAVE relative ai fenomeni di propagazione dell'onda dal largo verso riva (cfr. elaborato B.2-SIM- "Studio Idraulico Marittimo") si è osservato che:

- per il tratto di litorale a nord, l'onda annuale direzionale che si presenta sottocosta con direzione incidente (punto di controllo p.4-cfr. figura 5-4), e con valori di altezza significativa maggiori è l'onda al largo proveniente da 105°N; con altezza significativa di 1,25 m
- per il tratto di litorale a sud, l'onda annuale direzionale che si presenta sottocosta con direzione incidente (punto di controllo p.3 cfr. figura 5-4), con valori di altezza significativa maggiore è l'onda al largo proveniente da 90°N; con altezza significativa di 1,01 m.

Queste onde presso l'imboccatura del Porto Grande (Punto di Controllo 0 - cfr. figura 7.3) si presentano con le seguenti caratteristiche (cfr. elaborato B.2-SIM):

- Per la direzione al largo 90°N, H=1,22 m, T=5,22 s
- Per la direzione al largo 105°N, H=0,95 m, T=4,26 s

La durata della mareggiata è stata calcolata tramite la formula riportata nel capitolo 6 dell'elaborato B.2-SIM-"Studio Idraulico Marittimo"; tale formula deriva dal concetto di "mareggiata triangolare equivalente" (Boccotti 2004).

Per entrambi i casi, è stato calcolata una durata della mareggiata prossima a 72 ore.

La mareggiata con R=1anno e D=105°N sarà usata come input per la modellazione dei profili A e B.

La mareggiata con $R=1$ anno e $D=90^\circ N$ sarà usata come input per la modellazione dei profili C,D e E.

Di seguito si riportano i diagrammi temporali delle due mareggiate tipo di modellazione.

Ogni mareggiata è stata discretizzata in 72 step temporali di durata 1 h.

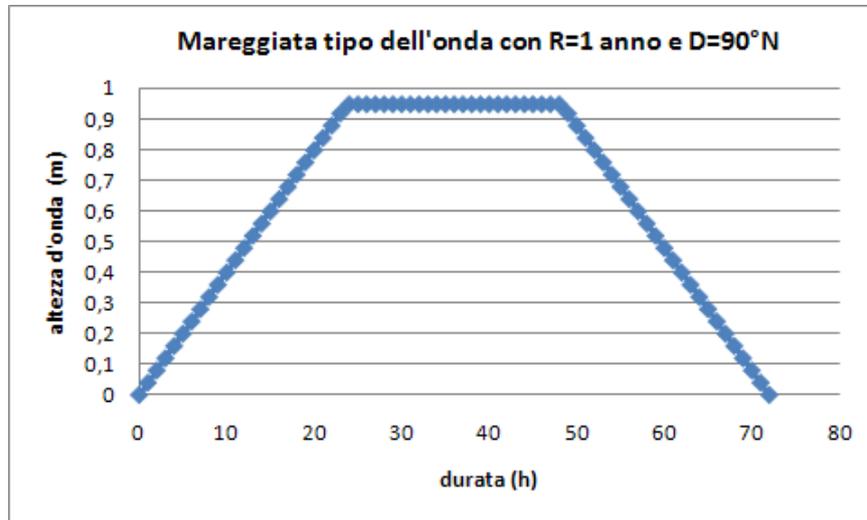


Figura 7-5. Diagramma della Mareggiata tipo con $R=1$ anno e $D=90^\circ N$.

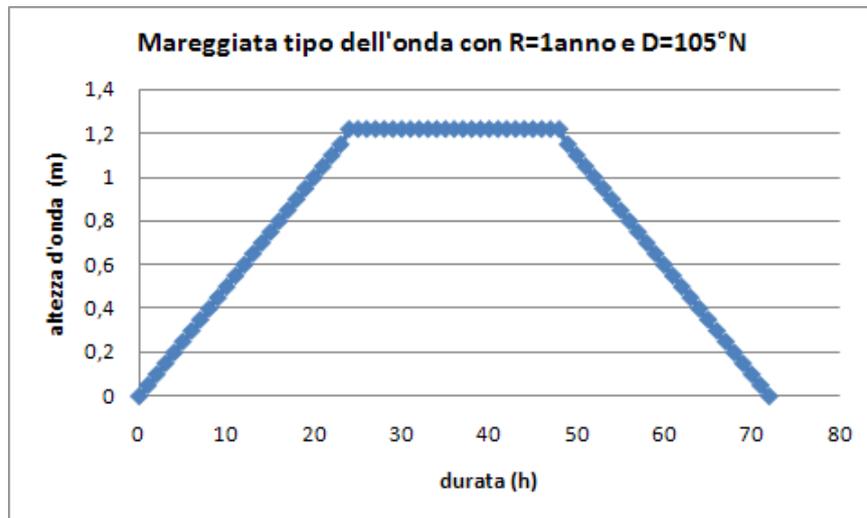


Figura 7-6. Diagramma della Mareggiata tipo con $R=1$ anno e $D=105^\circ N$.

Inoltre è stata considerata la variazione media dei livelli idrici, tenendo in considerazione gli effetti dovuti alla marea astronomica, alle variazioni di pressione e all'azione anemologica.

Dalle analisi effettuate durante la redazione dell'elaborato B.2.-SIM "studio Idraulico Marittimo" è emerso che la variazione media di livello idrico risulta compresa tra -30 e + 30 cm rispetto al l.m.m., con andamento semidiurno.

7.2.3 DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI E DELLA SPIAGGIA

Il modello di calcolo ha un limite relativo alla tipologia di sedimento soggetto ai fenomeni di trasporto cross-shore; esso infatti è capace di simulare sedimenti caratterizzati da D_{50} compreso tra 0,1 e 1 mm (sabbie quarzitiche).

Dalle analisi sedimentologiche è emerso che la tipologia dei sedimenti presenti corrisponde alla categoria dei limi sabbiosi.

Il modello è stato applicato comunque tenendo conto di tale limite.

Altri parametri caratteristici sono

- la profondità D di transito tra la “surf zone” e la “swash zone”.
- L'angolo P di massima pendenza del profilo, caratteristico del movimento incipiente dei sedimenti

Per le applicazioni di questo studio, tali grandezze sono state fissate a:

- $D=0,5$ m;
- $P= 15^\circ$.

7.3 RISULTATI OTTENUTI

Di seguito si riporta per ogni simulazione eseguita i diagrammi di sovrapposizione tra la posizione iniziale e quella finale di ognuno dei 5 profili analizzati.

Per la modellazione relativa ai profili A e B è utilizzata la mareggiata da $D=105^\circ N$

Per la modellazione ai profilo C,D,E è utilizzata la mareggiata da $D=90^\circ N$

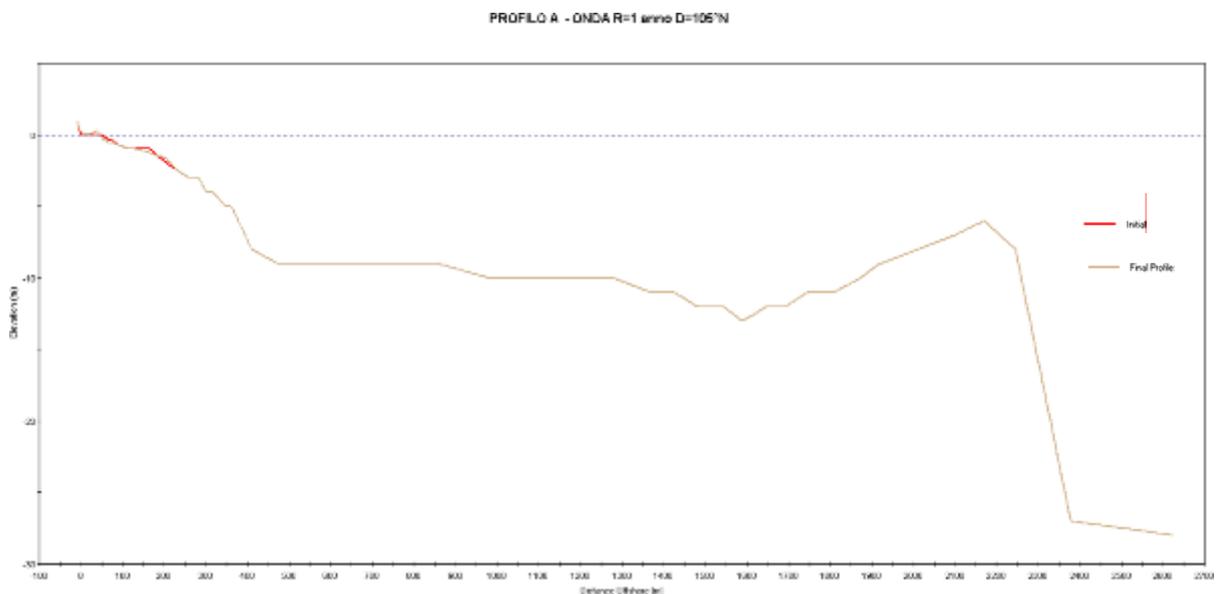


Figura 7-7. Evoluzione del profilo A, sotto la mareggiata da $R=1$ anno e $D=105^\circ N$

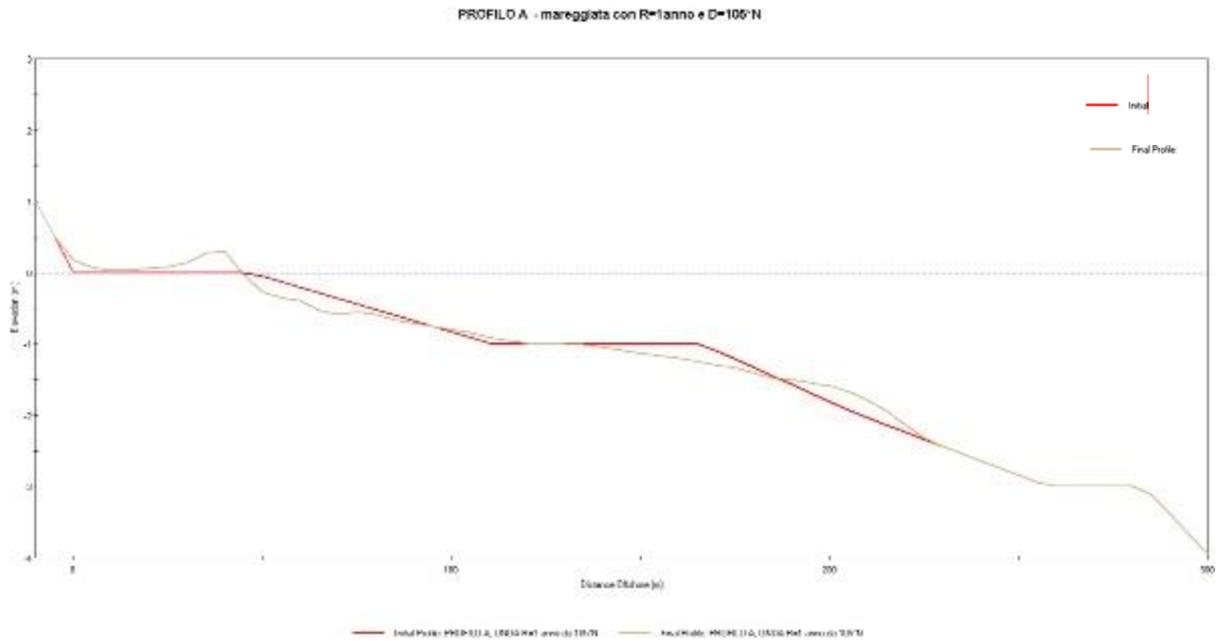


Figura 7-8. Particolare dell'evoluzione del profilo A, sotto la mareggiata da R=1anno e D=105°N.

Per il profilo A si osserva che gli effetti relativi alla mareggiata sono evidenti sui fondali tra la quota -2,5 m rispetto al l.m.m. e la linea di riva. Lo sviluppo longitudinale di questo tratto risulta essere pari a circa 225 m. In particolare si osserva l'alternarsi lungo i fondali in esame di tratti sia leggermente in erosione sia leggermente in accumulo (con entità intorno a qualche decina di cm), un arretramento della linea di riva pari al massimo a qualche metro.

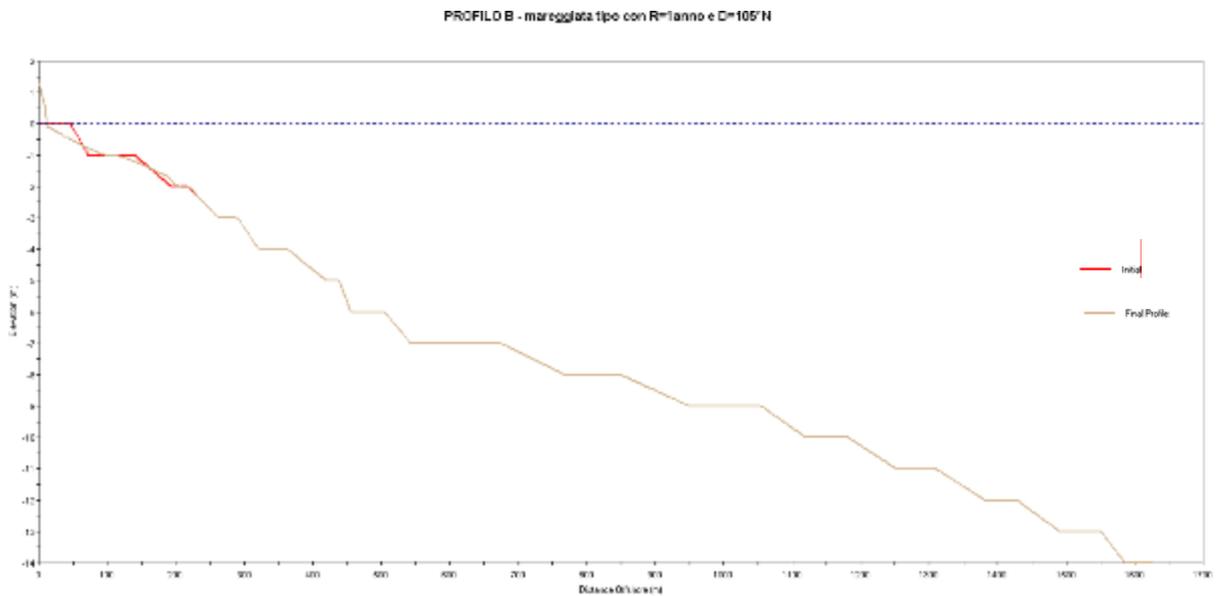


Figura 7-9. Evoluzione del profilo B, sotto la mareggiata da R=1anno e D=105°N

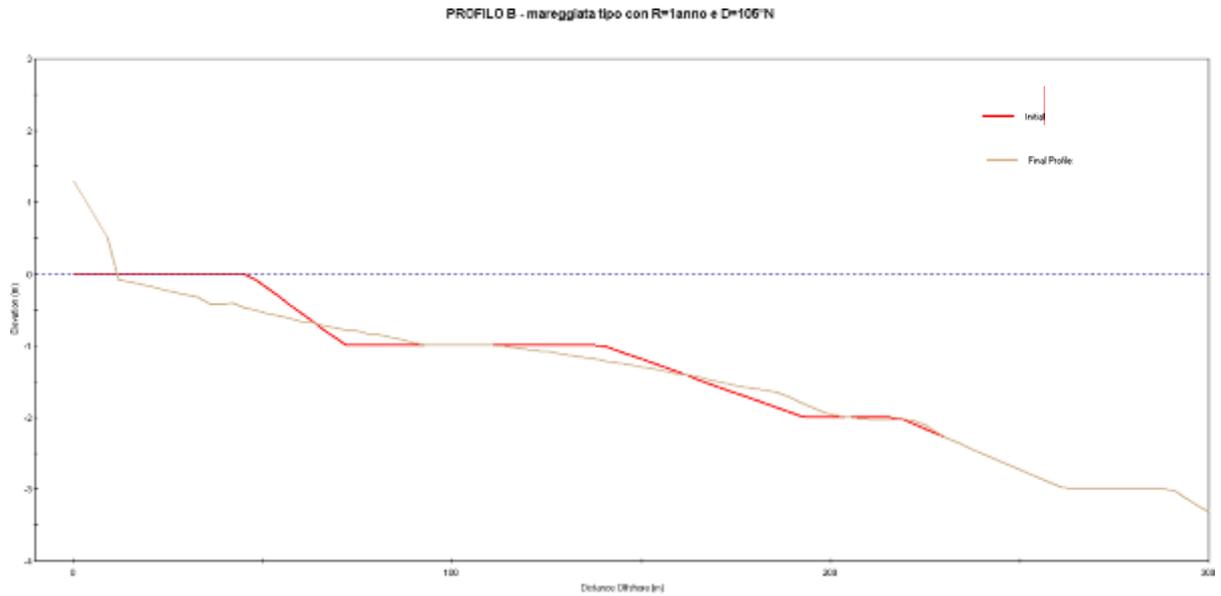


Figura 7-10. Particolare dell'evoluzione del profilo B, sotto la mareggiata da R=1anno e D=105°N.

Per il profilo B si osserva lo stesso trend del profilo A; gli effetti relativi alla mareggiata sono evidenti sui fondali tra la quota -2,5 m rispetto al l.m.m. e la linea di riva. Lo sviluppo longitudinale di questo tratto risulta essere pari a circa 225 m; in particolare si osserva l'alternarsi lungo i fondali in esame sia di tratti leggermente in erosione sia in accumulo (con entità intorno a qualche decina di cm), un arretramento della linea di riva pari al massimo a qualche decina di metri.

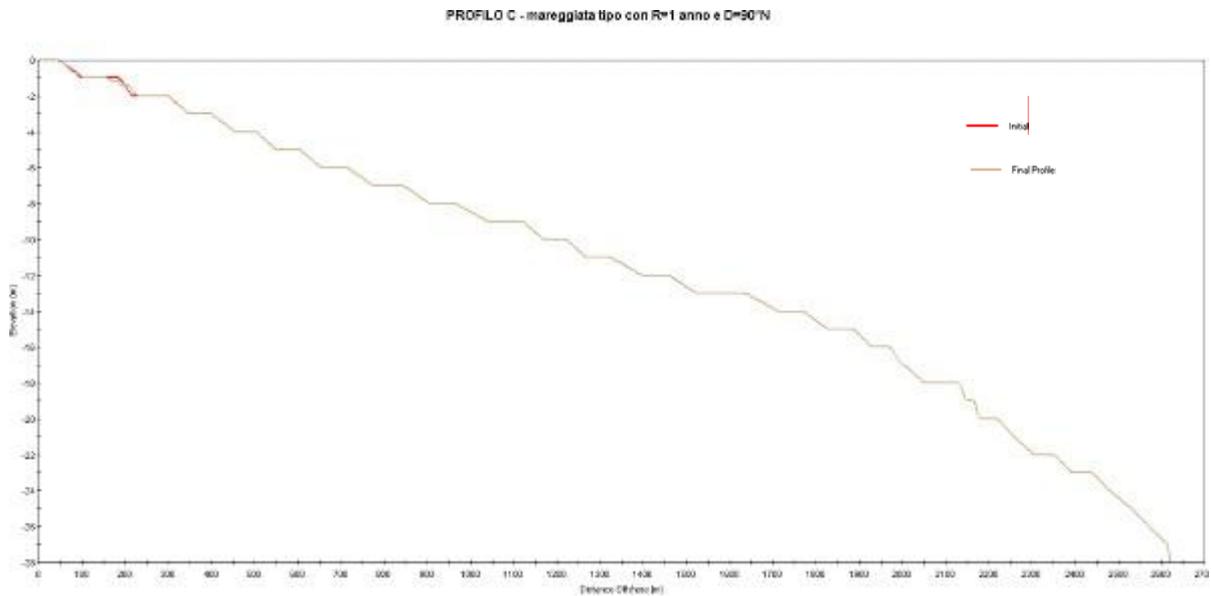


Figura 7-11. Evoluzione del profilo C, sotto la mareggiata da R=1anno e D=90°N

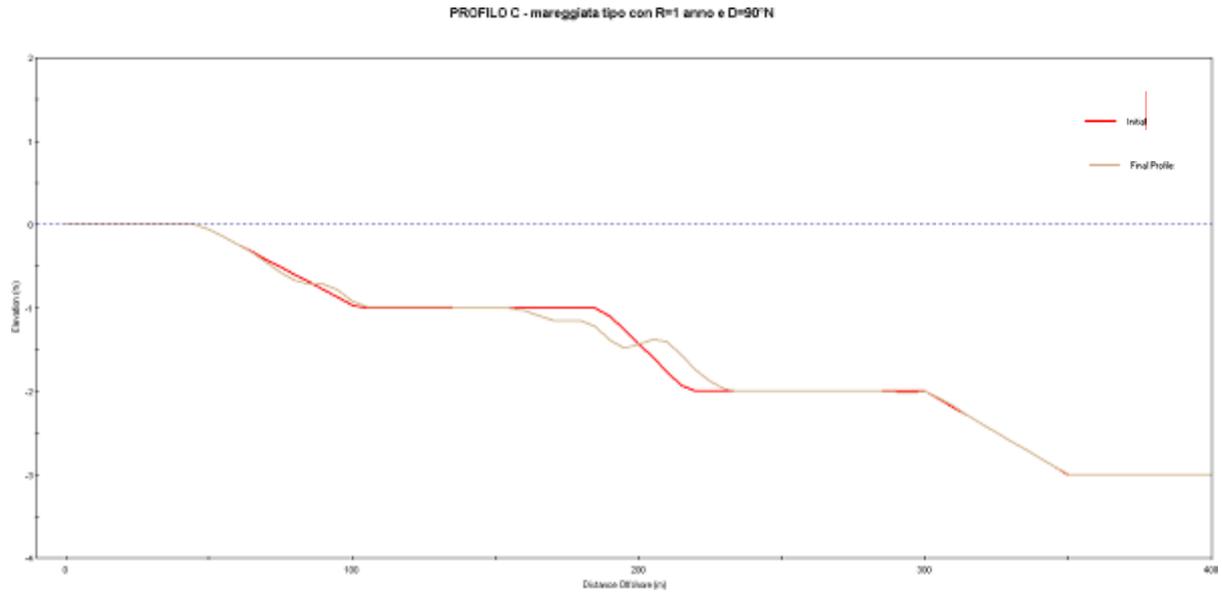


Figura 7-12. Particolare dell'evoluzione del profilo B, sotto la mareggiata da R=1anno e D=105°N.

Per il profilo C si osserva lo stesso trend evolutivo dei casi precedenti; gli effetti relativi alla mareggiata sono evidenti sui fondali tra la quota -2,5 m rispetto al l.m.m. e la linea di riva. Lo sviluppo longitudinale di questo tratto risulta essere pari a circa 320 m; in particolare si osserva la presenza l'alternarsi lungo i fondali in esame di tratti sia in erosione sia in accumulo (con entità intorno a qualche decina di cm); non si verifica nessun arretramento della linea di costa.

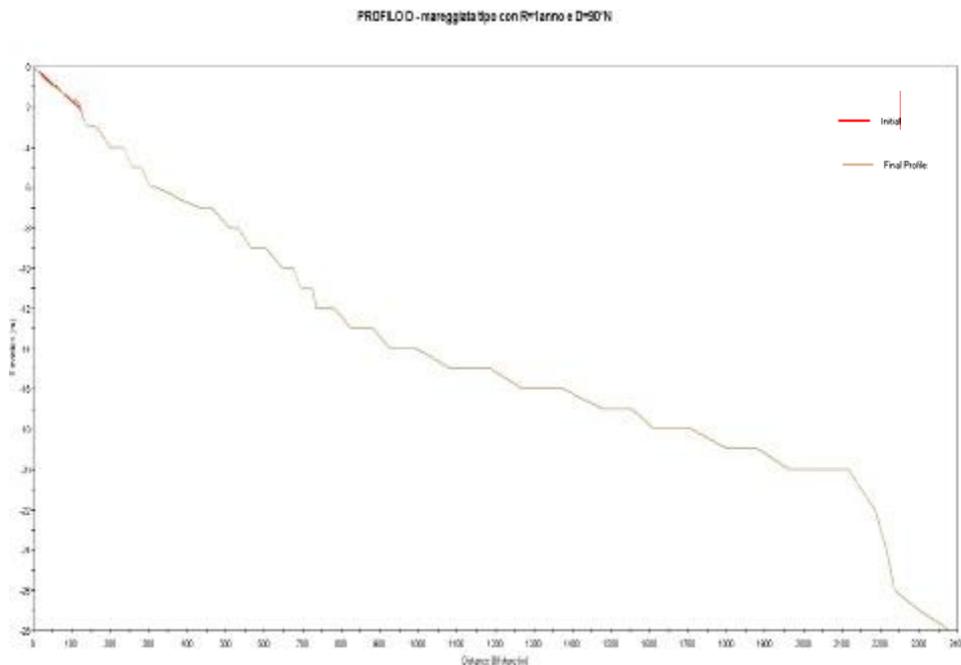


Figura 7-13. Evoluzione del profilo D, sotto la mareggiata da R=1anno e D=90°N

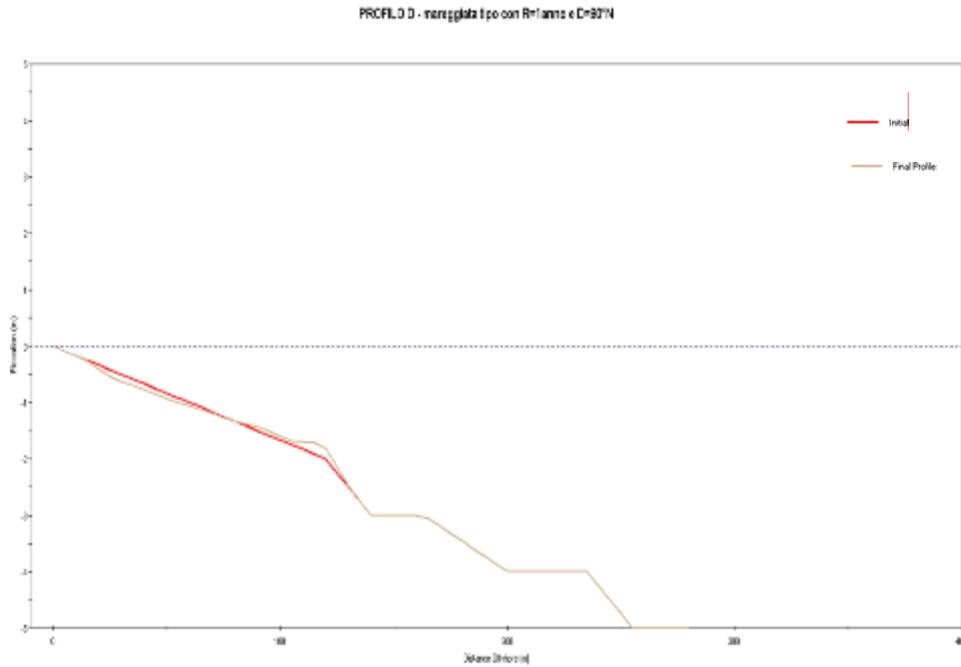


Figura 7-14. Particolare dell'evoluzione del profilo D, sotto la mareggiata da R=1anno e D=90°N.

Per il profilo D si osserva lo stesso trend evolutivo dei casi precedenti; gli effetti relativi alla mareggiata sono evidenti sui fondali tra la quota -3,0 m rispetto al l.m.m. e la linea di riva: lo sviluppo longitudinale di questo tratto risulta essere pari a circa 150 m; in particolare si osserva la presenza l'alternarsi lungo i fondali in esame sia di tratti leggermente in erosione sia di tratti leggermente in accumulo (con entità intorno a qualche decina di cm); non si verifica nessun arretramento della linea di costa.

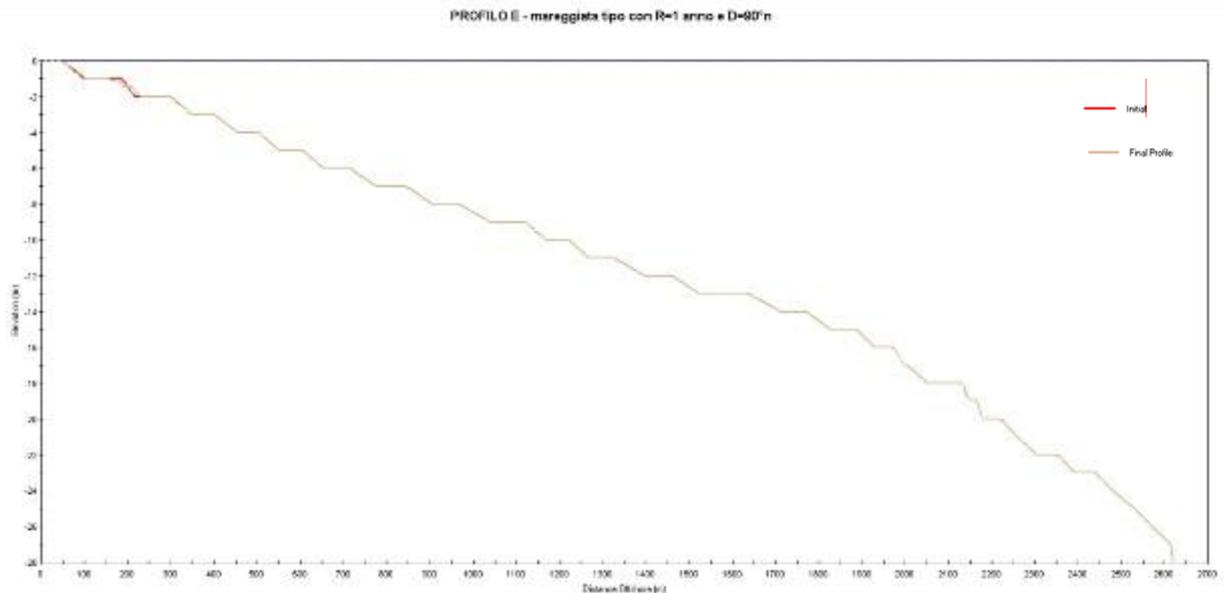


Figura 7-15. Evoluzione del profilo D, sotto la mareggiata da R=1anno e D=90°N

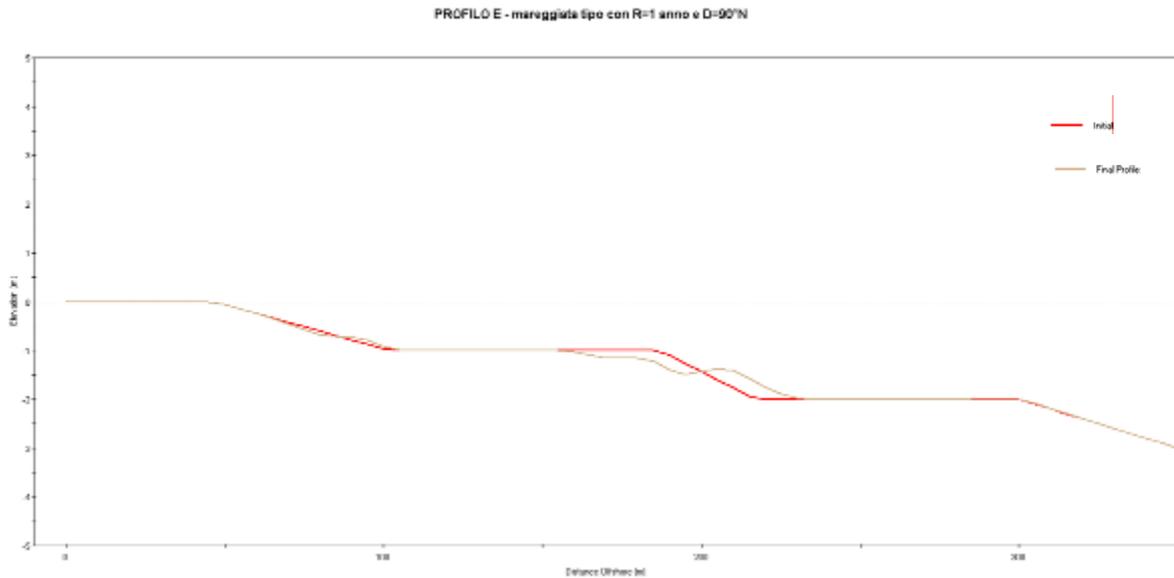


Figura 7-16. Particolare dell'evoluzione del profilo E, sotto la mareggiata da R=1anno e D=90°N.

Per il profilo E si osserva lo stesso trend evolutivo dei casi precedenti; gli effetti relativi alla mareggiata sono evidenti sui fondali tra la quota -2,5 m rispetto al l.m.m. e la linea di riva: lo sviluppo longitudinale di questo tratto risulta essere pari a circa 320 m; in particolare si osserva l'alternarsi lungo i fondali in esame di tratti leggermente sia in erosione sia in accumulo (con entità intorno a qualche decina di cm); non si verifica nessun arretramento della linea di costa.

Dai risultati ottenuti si possono trarre le seguenti conclusioni.

La fascia attiva di rimaneggiamento e di trasporto dei sedimenti, all'interno del Porto Grande si localizza tra le profondità comprese tra 0 e -3 m , rispetto al l.m.m. in conformità dei risultati relativi alla valutazione della profondità di chiusura (cfr. capitolo 5).

Per quanto riguarda il litorale a nord che va dalla foce dell'Anapo verso il sito interessato dalle opere in progetto, considerato che:

- l'analisi diacronica ha indicato che il litorale è soggetto a fenomeni di erosione e di avanzamento,
- gli studi idrodinamici hanno evidenziato la presenza di correnti longshore,

si conviene che lungo il litorale a nord, gli scompensi sedimentologici provocati dalle mareggiate (arretramento della linea di costa pari al massimo a qualche metro), sono in gran parte bilanciati dal volume di sedimenti in movimento secondo la componente longshore.

Lungo il litorale a sud la componente cross-shore risulta trascurabile e gli effetti sulla posizione della linea di riva sono praticamente nulli, confermando le evidenze ottenute durante l'analisi diacronica.

7.4 CONCLUSIONI SUL TRASPORTO SOLIDO CROSS-SHORE

A seguito delle analisi condotte sul fenomeno trasporto solido litoraneo trasversale, e in virtù delle informazioni ricavate durante gli studi sull'analisi diacronica e sugli studi idrodinamici nell'ambito del Porto Grande, si conviene che:

- lungo il litorale sud la componente cross-shore risulta trascurabile.
- lungo il litorale nord i ridotti scompensi di sedimento causati dalle mareggiate sono compensati dai volumi trasportati dalla componente longshore.

Da queste considerazioni si conferma quindi come una importante causa del trasporto longitudinale del sito in questione siano le correnti longshore che si generano all'interno del Porto Grande (cfr. elaborato B.3.1.-SDC "Studio Idrodinamico").

8. MORFODINAMICA DEL TRASPORTO SOLIDO LONGITUDINALE

Per verificare il comportamento longshore del tratto di litorale in esame, è stato applicato il modello GENESIS sviluppato dal CERC, oggi CHL, dell'US Corps of Engineers.

Il modello Genesis a partire dai dati storici rappresentativi delle caratteristiche morfologiche (linea di riva, diametro dei sedimenti, profondità "attiva" della fascia litoranea, condizioni di evoluzione degli estremi) e dalla configurazione di calcolo comprensiva di eventuali strutture (opere radenti, trasversali, distaccate) è possibile effettuare una stima relativa all'entità del trasporto solido longitudinale e del variazione della linea di riva.

8.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO

Il codice di calcolo GENESIS, rientra nella categoria dei modelli numerici "di spiaggia" del tipo "ad una linea" basati sull'ipotesi che il profilo trasversale della spiaggia rimane costante nel tempo e che le variazioni di volume dovuti al trasporto longitudinale associato al moto ondoso provocano di conseguenza un arretramento o un avanzamento della linea di riva.

Si prescinde da un calcolo diretto della componente trasversale del trasporto solido litoraneo che può essere comunque introdotto a priori anche al fine di simulare ad esempio apporti solidi fluviali, perdite verso il largo e/o interventi di ripascimento.

La relazione fondamentale dei modelli di spiaggia del tipo ad una linea è la seguente equazione di continuità:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_b + D_c)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + q \right) = 0$$

nella quale $y(x,t)$ rappresenta la posizione della linea di riva, rispetto ad un riferimento cartesiano, variabile lungo l'asse x e nel tempo; $Q(x,t)$ è la portata solida longitudinale, mentre $q=qs+qo$ rappresenta la portata entrante o uscente dovuta ad altre cause, come ad esempio un apporto fluviale di sedimenti oppure una perdita verso il largo dovuta ad una corrente di rip. I due termini D_b e D_c sono rispettivamente l'altezza della berma della spiaggia sopra il livello medio mare e la profondità di chiusura, oltre la quale gli effetti del trasporto longitudinale non sono più apprezzabili.

Il termine Q , che esprime il trasporto solido longitudinale, viene modellato secondo la seguente espressione:

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

nella quale H è l'altezza d'onda, c_g rappresenta la celerità di gruppo con cui si propagano le onde, ϑ_b è l'angolo che localmente il fronte d'onda forma con la linea di

riva. Il pedice b sta ad indicare che tutte le grandezze vanno valutate in condizioni di frangimento per l'onda incidente.

I parametri monodimensionali a_1 e a_2 sono dati dalle seguenti espressioni:

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

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

in cui ρ_s e ρ rappresentano rispettivamente la densità della sedimento e dell'acqua, p la porosità del materiale sul fondo, $\tan \beta$ la pendenza media del fondale dalla riva alla profondità di chiusura.

I coefficienti K_1 e K_2 rappresentano i parametri di calibrazione e taratura del modello.

Il modello assume per il profilo di spiaggia l'andamento parabolico definito dall'equazione di Dean:

$$D = Ay^{\frac{2}{3}}$$

in cui la profondità D è funzione della distanza dalla linea di riva, y , e dipende dal parametro A che tiene conto della granulometria della spiaggia. Ne consegue che a parità di distanza dalla riva con sedimenti grossolani si avranno profondità maggiori rispetto a sedimenti più fini.

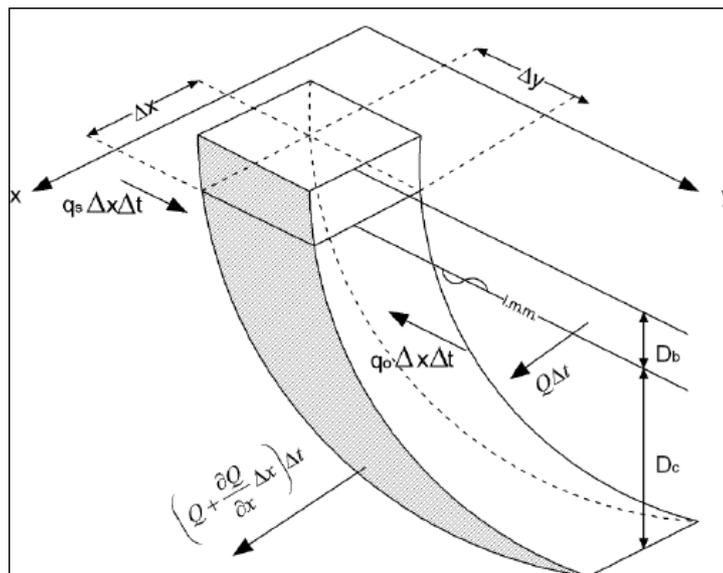


Figura 8-1. Discretizzazione spaziale del dominio di calcolo prevista dal modello Genesis

Il codice di calcolo GENESIS è in grado di simulare la variazione della linea di riva e quindi la "risposta morfodinamica" del litorale in esame anche in presenza di

strutture quali pennelli e barriere trasversali (groin and breakwater) poste lungo il litorale per le quali è in grado di calcolare gli effetti di diffrazione indotti sulle onde che si propagano verso costa.

Il modello è anche in grado di simulare le variazioni della linea di riva dovuti a interventi di ripascimento della spiaggia (beach fill) o ad apporti solidi alle foci dei fiumi (by pass).

È doveroso precisare che il modello GENESIS ha delle limitazioni, al pari di tutti i modelli del tipo ad una linea, dettate dalle assunzioni di base; il programma di calcolo utilizza un profilo analitico di tipo parabolico a batimetrie parallele e pertanto non tiene conto della batimetria reale dei fondali.

Inoltre il modulo di propagazione del moto ondoso dal largo verso riva è in grado di valutare i soli fenomeni di shoaling e rifrazione ma non tiene conto dei fenomeni di riflessione/assorbimento delle onde.

Vi sono infine delle restrizioni nel numero complessivo, posizionamento e orientamento delle opere.

Per maggiori chiarimenti si rimanda alle numerose pubblicazioni presenti in letteratura tecnica, nonché al manuale d'uso del modello numerico.

8.2 ANALISI DEL CLIMA ONDOSO CON STWAVE

Come già osservato, l'applicazione di GENESIS consente di valutare avanzamenti ed arretramenti della linea di riva nel corso degli anni indotti dal trasporto solido longitudinale a sua volta causato dal moto ondoso incidente.

Pertanto, utilizzando i dati provenienti dalle indagini relative alle batimetrie e dallo studio meteomarino, è stato possibile implementare una griglia di calcolo per la propagazione con il modello STWAVE da largo verso riva dei diversi stati di moto ondoso rappresentativi dell'anno climatico medio; in questo modo si è ottenuta il moto ondoso sottocosta che costituisce la "forzante" responsabile dei fenomeni di trasporto solido litoraneo e da utilizzare come input per l'applicazione di Genesis.

Si ricorda che il modello STWAVE è un modello spettrale alle differenze finite che consente di propagare stati di moto ondoso all'interno di un dominio di calcolo rappresentativo di una generica batimetria con valori $d = d(X,Y)$. Il modello utilizza come condizione al contorno, lungo il bordo esposto verso largo, gli spettri di energia precedentemente generati a partire dagli eventi di moto ondoso in ingresso. Il modulo STWAVE simula i principali fenomeni di propagazione e generazione del moto ondoso per fondale variabile, come gli effetti di rifrazione e shoaling, la generazione dovuta al vento e gli effetti dissipativi dovuti al frangimento. Per qualsiasi altro chiarimento sul modello si rimanda al capitolo specifico presente nell'elaborato "studio idraulico marittimo", nonché alla letteratura tecnica del settore.

Di seguito si riporta il diagramma di flusso relativo alle modalità di accoppiamento dei due modelli matematici.

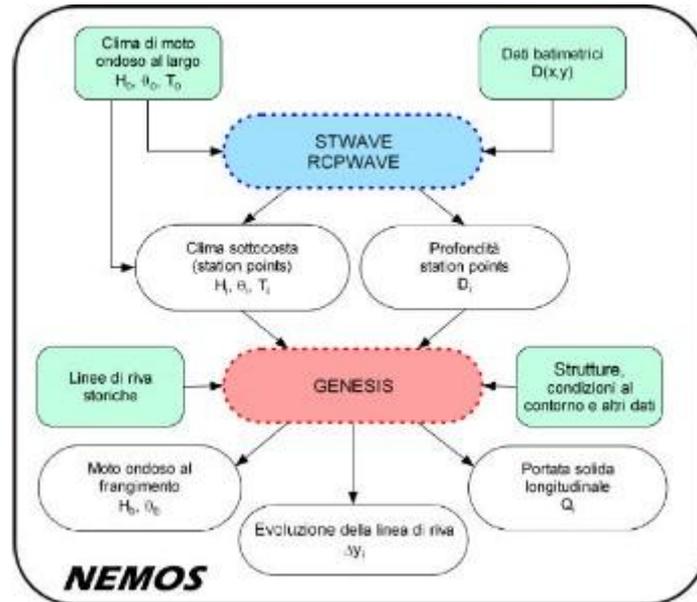


Figura 8-2. Diagramma di flusso relativo all'accoppiamento tra STWAVE ed GENESIS

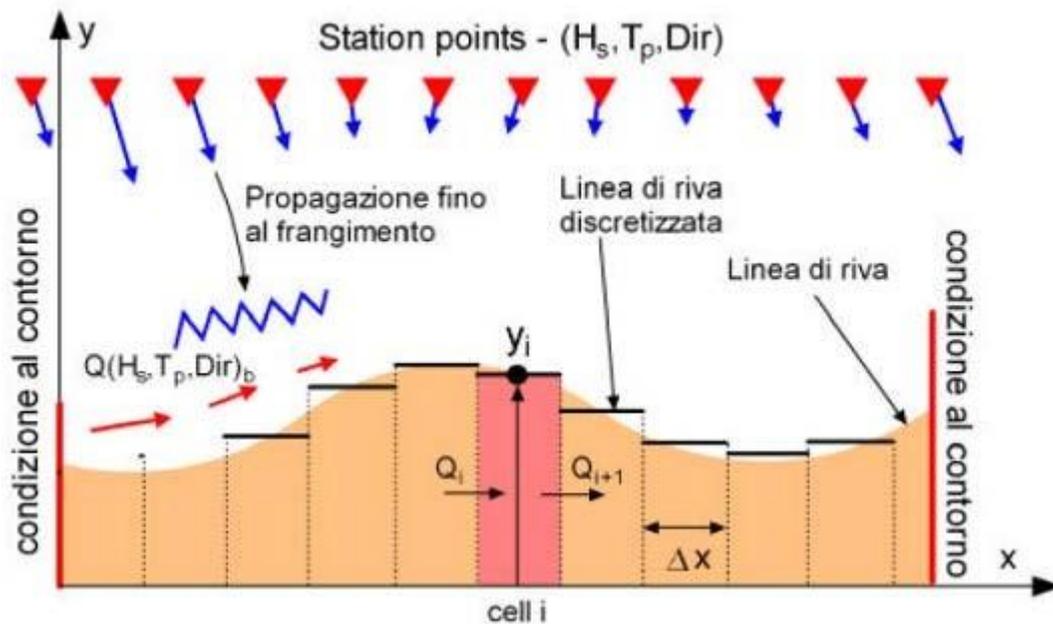


Figura 8-3. Geometria schematica relativa all'accoppiamento tra STWAVE Ed GENESIS

A partire dai dati batimetrici provenienti dalle Carte Nautiche e dai rilievi effettuati è stata costruita la griglia di calcolo.

Il tratto di costa in esame va da Ortigia ad oltre la foce del F. Anapo, il tratto di litorale identificato come quello soggetto ai fenomeni di trasporto longshore più evidenti.

L'origine del sistema di riferimento cartesiano è stato posto nel punto:

- $X_0 = 2547340,283$ m
- $Y_0 = 41012742,812$ m

La griglia si estende per 2862m lungo l'asse X e per 2460m lungo l'asse Y, in modo tale da assicurare che eventuali effetti di bordo legati alle condizioni di input del moto ondoso possano propagarsi impropriamente interessando il dominio di calcolo interno ove ricade il tratto di costa in esame.

L'asse X ha direzione ortogonale ed incidente rispetto la linea di riva.

L'angolo tra il Nord e l'asse X del sistema di riferimento di STWAVE è pari a 300° ; il passo di discretizzazione adottato è pari a 20 metri.

Nella figura successiva è rappresentata la griglia di calcolo utilizzata per le simulazioni.

Inoltre sono riportati in rosso i punti sottocosta (station points), posti per lo più lungo la batimetrica - 10.0 m s.l.m., in cui sono stati registrati i dati di moto ondoso per ottenere un database di input relativo agli eventi sottocosta per Genesis

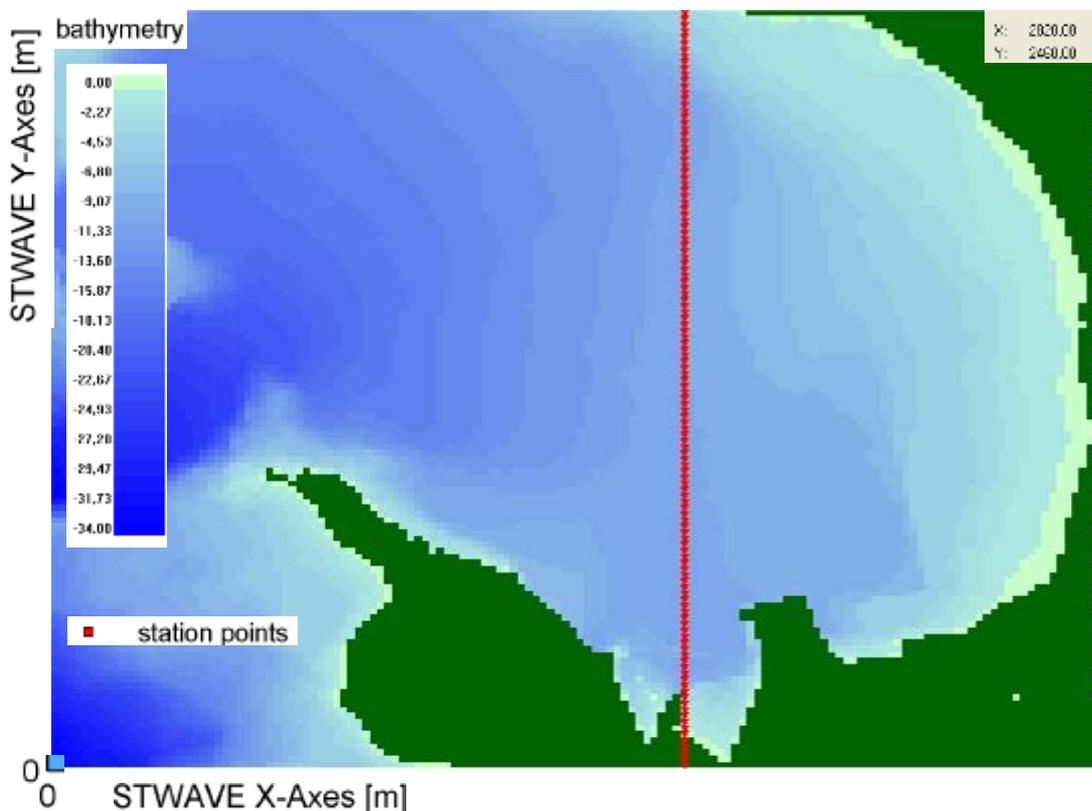


Figura 8-4. Dominio di calcolo del modello STWAVE

Dalle serie storiche dei dati ondometrici registrati dalla boa Ron di Catania sono stati estratti i dati relativi alle misure dell'anno 2000; tali dati sono stati trasposti in modo adeguato su un punto al largo sulla batimetrica dei -100m rispetto al l.m.m., di fronte il paraggio del Porto Grande di Siracusa, e dopo aver effettuato alcune operazioni di filtro sul dataset, è stato sintetizzato un input ondometrico costituito da 2929 eventi.

Tali eventi sono stati suddivisi in 11 di classi di altezza, 7 classi di periodo e 12 classi di direzione come riportato nella tabella climatica seguente per un totale di 924 permutazioni.

Si è osservato che l'evento a cui è associabile una maggiore frequenza di accadimento è quello con $H=0.37$ m, $T=3.70$ s, $D=8^\circ X$ ($112^\circ N$).

L'evento massimo atteso nella sequenza media annuale è caratterizzato da $H=3.58$ m, $T=5.2$ m, $D=59^\circ X$ ($70^\circ N$).

Inoltre per le direzioni provenienti dal II quadrante si osserva che l'evento caratterizzato dalla più alta frequenza è quello con $H=0.37$ m, $T=3.70$, $D=-8^\circ X$ ($128^\circ N$).

Nel complesso sono state definite 235 combinazioni H-Dir-T degli stati di mare rappresentativi del clima meteomarinico al largo di Siracusa.

Gli eventi significativi sono stati successivamente propagati, dal largo verso riva con STWAVE, in modo da ottenere i valori ondametrici valevoli per gli station points.

A titolo di esempio nelle figure successive si riportano i campi d'onda ottenuti per la propagazione dell'evento a cui è associata la maggior frequenza di accadimento e quello massimo atteso nella sequenza media annuale.

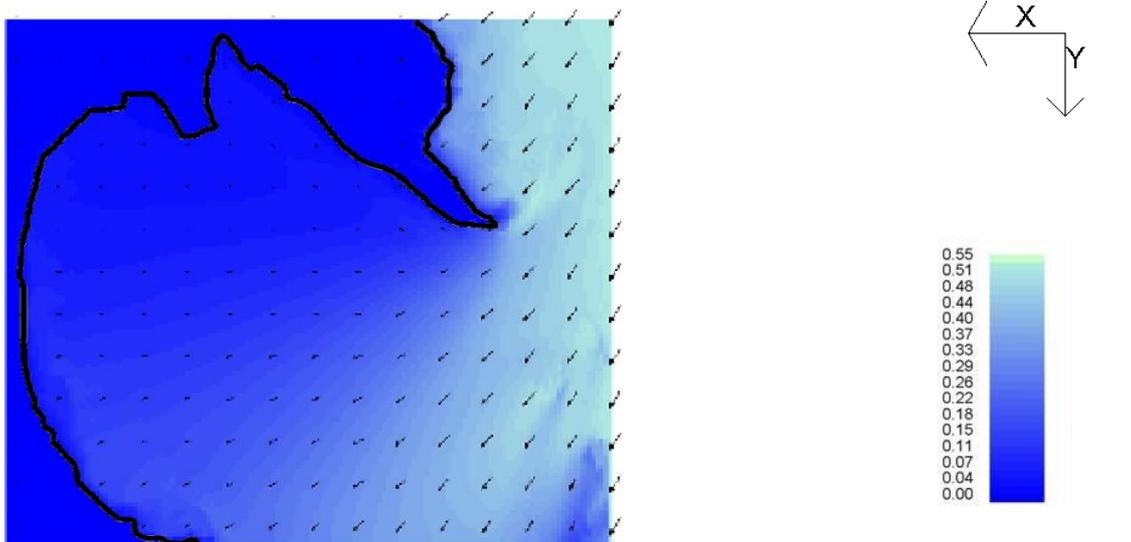


Figura 8-5. Simulazioni STWAVE. Distribuzione

Figura 8-6. Simulazioni STWAVE. Distribuzione delle altezze d'onda sottocosta, per $H=0,37$ m
 $T=3,70$ s, $Dir=8^\circ X$ ($112^\circ N$)

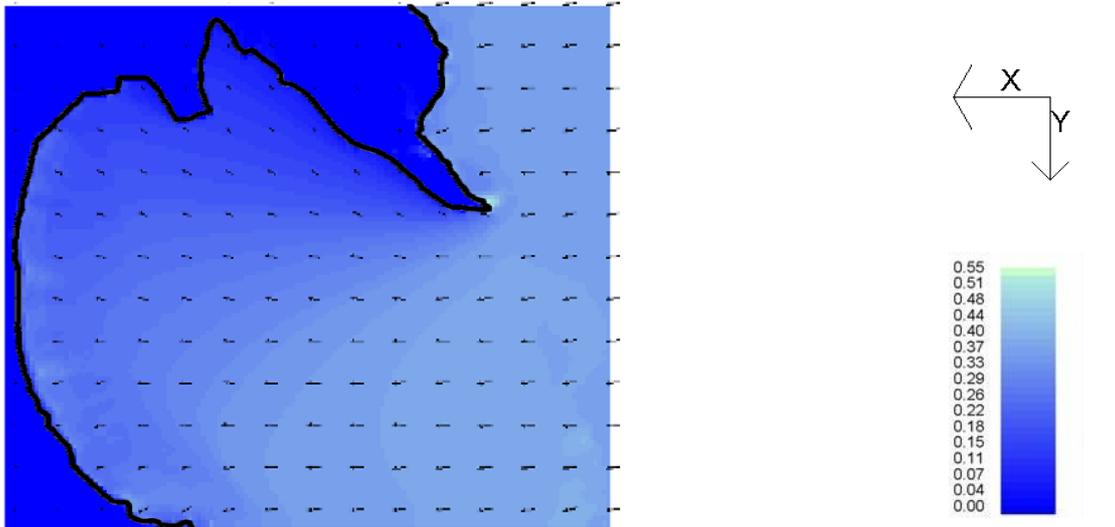


Figura 8-7. Simulazioni STWAVE. Distribuzione delle altezze d'onda sottocosta, per $H=3.58$ m; $T=5,2$ m $D=59^\circ X$ ($70^\circ N$)

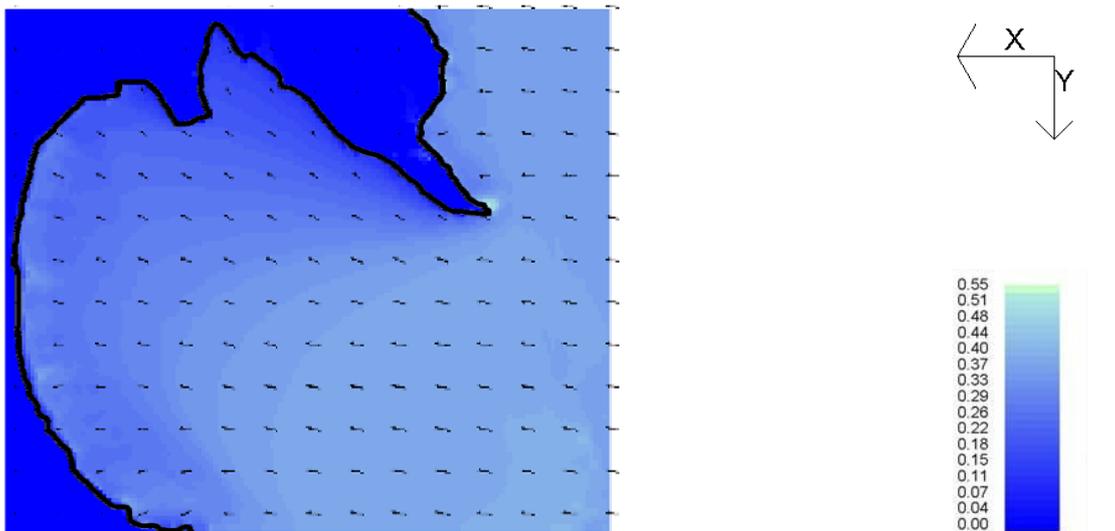


Figura 8-8. Simulazioni STWAVE. Distribuzione delle altezze d'onda sottocosta, per $H=0,37$ m $T= 3,70, Dir =-7^\circ X$ ($127^\circ N$)

Inoltre di seguito sono state riportate le altezze d'onda registrate presso le stazioni di controllo.

Si osserva che questi risultati sono in accordo con le simulazioni già effettuate durante la redazione dello studio idraulico marittimo.

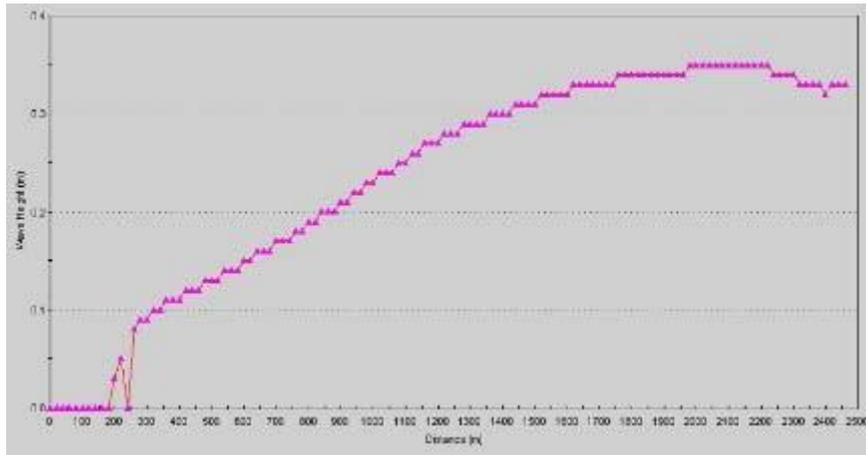


Figura 8-9. Simulazioni STWAVE. Distribuzione delle altezze d'onda sottocosta registrati nei punti di controllo, per $H=0,37$ m $T=3,70$ s, $Dir= 8^{\circ}X (112^{\circ}N)$

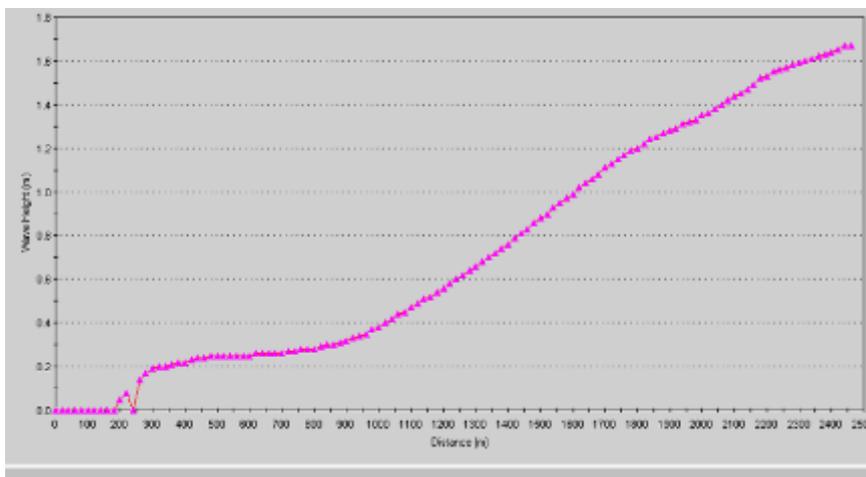


Figura 8-10. Simulazioni STWAVE. Distribuzione delle altezze d'onda sottocosta registrate nei punti di controllo, per $H=3.58$ m; $T=5,2$ m $D=59^{\circ}X (70^{\circ}N)$

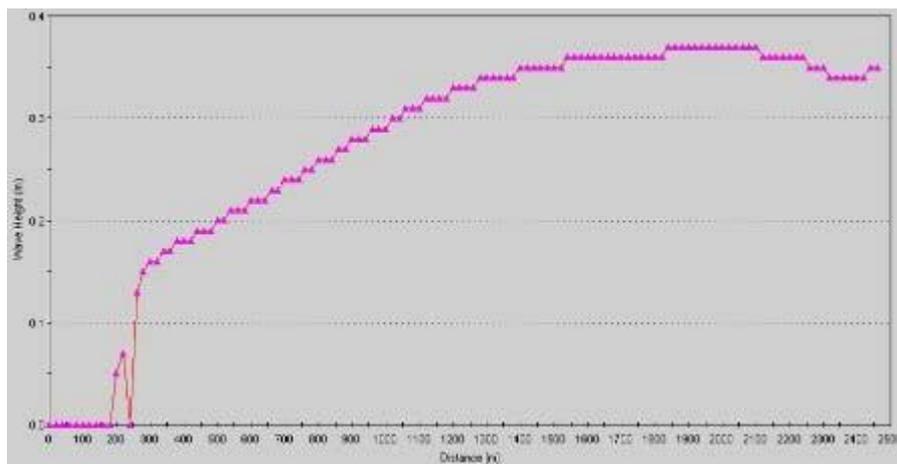


Figura 8-11. Simulazioni STWAVE. Distribuzione delle altezze d'onda sottocosta registrate nei punti di controllo, per $H=0,37$ m $T= 3,70$, $Dir =-7^{\circ}X (127^{\circ}N)$

8.3 APPLICAZIONE DEL MODELLO GENESIS

Il modello GENESIS è stato applicato al litorale in esame per verificare che la componente longshore del trasporto solido sia effettivamente la principale responsabile dei trend evolutivi che hanno caratterizzano il litorale in esame.

Nei paragrafi seguenti sono presentati innanzitutto le condizioni di calcolo e i risultati della fase di taratura del modello e successivamente l'applicazione del modello per la verifica delle condizioni di trasporto longshore

8.3.1 DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO E SCELTA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI.

La griglia di calcolo adottata per le simulazioni con GENESIS è allineata secondo due assi ortogonali: un asse X coincidente con la direzione long-shore, e un asse Y coincidente con direzione off-shore.

L'origine degli assi è stata posizionato sul punto di coordinate:

- $X_g = 2544751,4$ m
- $Y_g = 4102465,3$ m

L'asse di riferimento X_G , di lunghezza complessiva di circa 2040 m, risulta orientato a $210^\circ N$, in modo tale coincidere con l' asse Y_o della griglia STWAVE.

E' stato adottato un passo di discretizzazione spaziale d pari a 20 m al fine di assicurare un'adeguata rappresentazione non solo della linea di riva ma anche delle opere di difesa da simulare per i diversi scenari di intervento ipotizzati.

Il numero totale di celle è 102.

L'intervallo di discretizzazione temporale Dt è stato assunto pari a 3 ore.

8.3.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Sulla scorta delle linee di riva acquisite per il periodo dal 1994 al 2008, si è fatto riferimento al periodo 2000 e 2006, in quanto contraddistinto dall'assenza di grandi interventi antropici e perché caratterizzato già da fenomeni erosivi marcati per il tratto di litorale in esame (cfr. il capitolo 4).

Dalla sovrapposizione della linea di costa del 2000 e del 2006 si osserva infine che i fenomeni erosivi hanno entità trascurabili sia nel tratto più a Nord, in cui è presente il banchinamento di riva fino al Molo S. Antonio (a sinistra nella convenzione di GENESIS), sia nel tratto più sud oltre la foce dell'Anapo, (a destra secondo la convenzione GENESIS).

Si conviene quindi di imporre la condizione al contorno "pinned" a destra e a sinistra, in quanto è chiaro che i gradienti di trasporto sono molto limitati.

Tra le strutture presenti lungo il litorale sono state modellate:

- il banchinamento del Porto Grande, considerato come un limite inerodibile (sea-walls)
- il molo S. Antonio, come "non diffracting groin" (pennello non diffrattivo) con permeabilità nulla.
- i due pennelli localizzati presso l'area dell'Aeronautica, modellati come "non diffracting groins" a permeabilità bassa ($P=0,2$).

Inoltre sono stati modellati gli apporti solidi più significativi che sono quelli del fiume Anapo-Ciane-Mammaibica e del canale Pantanelli.

La condizione al contorno “lato mare” è costituita dai treni d'onda sottocosta registrati nei punti di controllo scelti durante la simulazione STWAVE, che ha permesso di ricostruire una serie trioraria media annuale.

Di seguito si riporta lo schema del layout di calibrazione, con la linea di costa del 2000 in nero, la linea del 2006 in rosso, il sea wall in giallo ed i moli in verde, e l'apporto solido in bianco. La freccia in bianco indica l'orientamento verso il Nord.

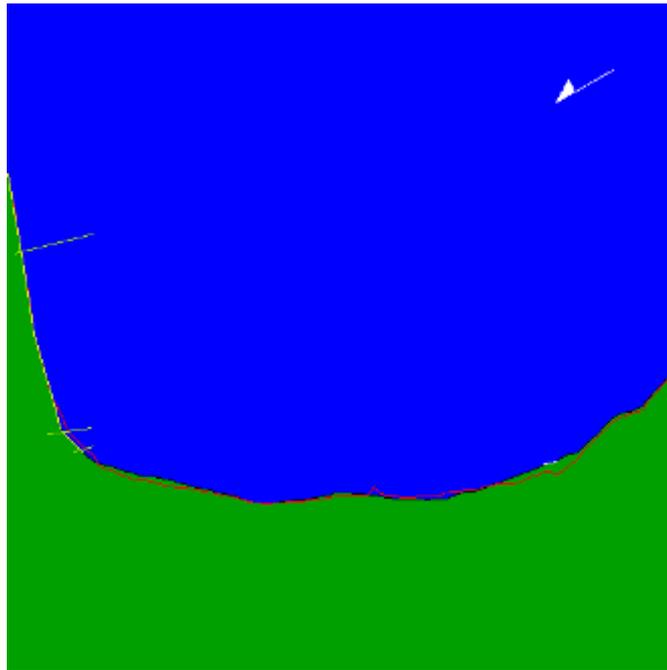


Figura 8-12. Dominio di Calcolo del Modello GENESIS.

8.3.3 TARATURA DEL MODELLO E VERIFICA DELLA COMPONENTE LONGSHORE

L'obiettivo della fase di taratura è stimare i valori dei due parametri K_1 e K_2 che governano l'equazione del modello. Per la taratura del modello è stato preso in considerazione l'intervallo temporale compreso tra il 2000 ed il 2006 in quanto contraddistinto dall'assenza di grandi interventi antropici e perché caratterizzato già da fenomeni erosivi marcati per il tratto di litorale in esame (cfr. il capitolo 4).

La scelta della coppia dei valori ottimali è stata effettuata in modo da minimizzare il gap relativo alla differenza tra i valori Y calcolati e quelli misurati riferendosi appunto a tale intervallo temporale 2000-2006.

Sono state condotte una serie di simulazioni variando i due parametri (in particolare il loro rapporto) e successivamente la scelta della coppia dei valori ottimali è stata effettuata in modo da minimizzare lo “scarto” relativo alla differenza tra i valori Y calcolati e quelli misurati riferendosi all'intervallo temporale scelto.

Come si evidenzia dal diagramma seguente la coppia di valori ottimali per simulare la tendenza evolutiva del litorale in esame risultati essere $K_1=0.050$ e $K_2=0.025$.

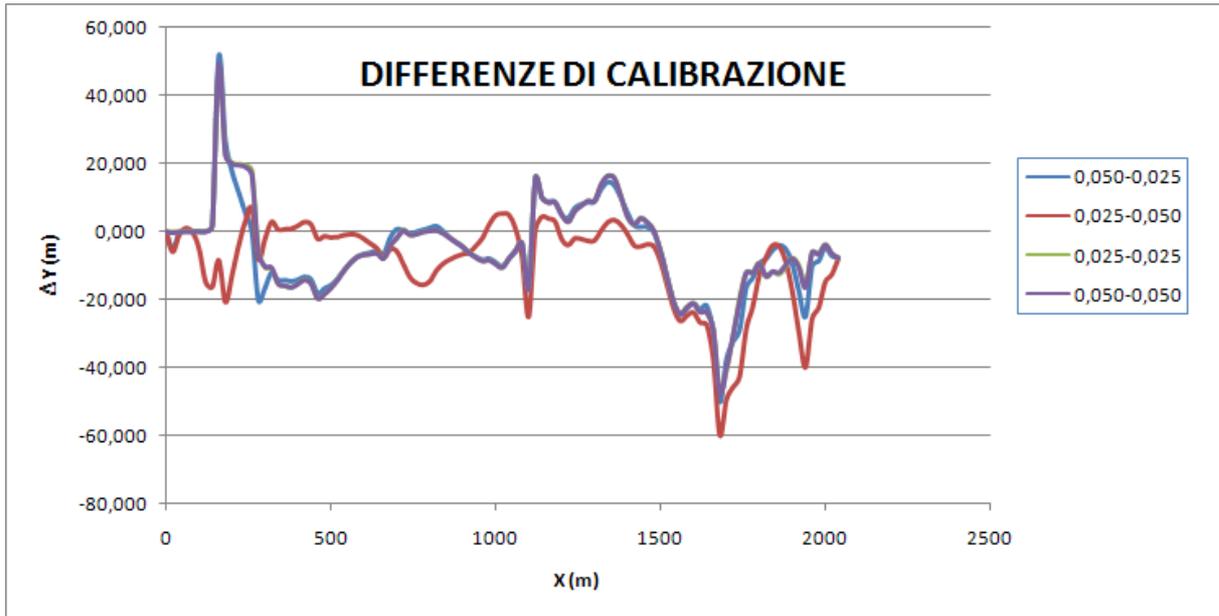


Figura 8-13. Diagramma di Calcolo delle differenze di Calibrazione.

Di seguito riportiamo la sovrapposizione delle linee di costa "misurate" e "calcolate".

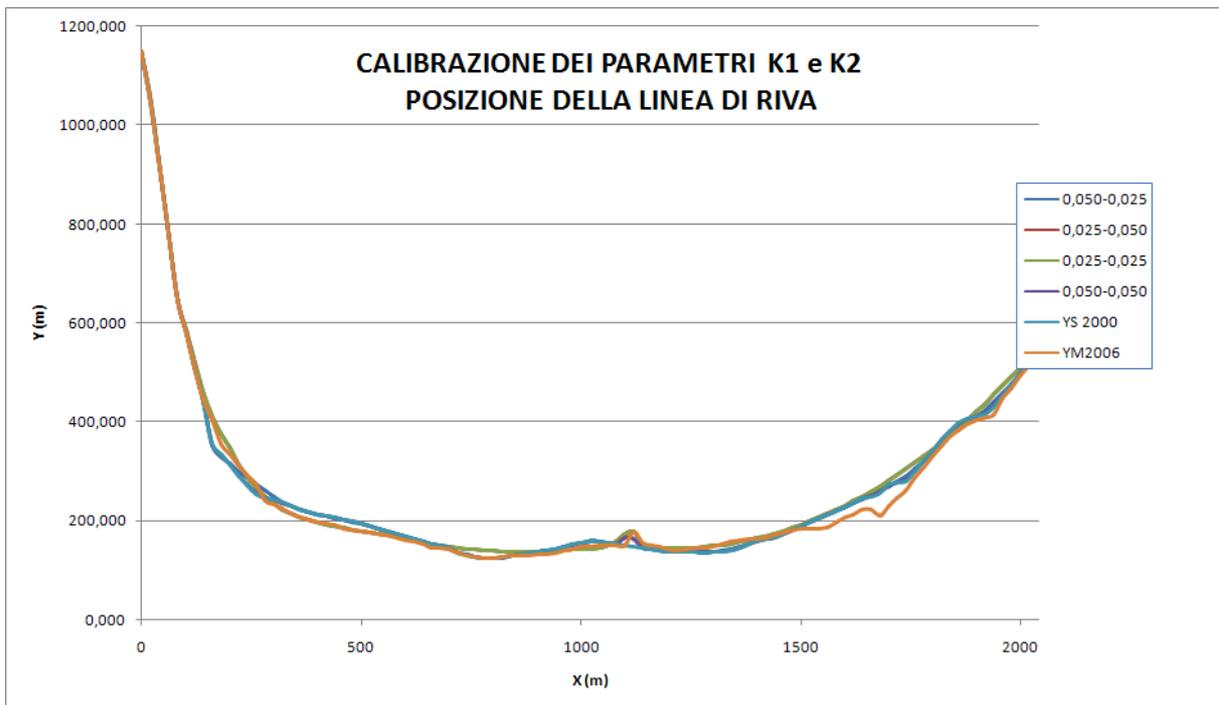


Figura 8-14. Posizionamento della linea di riva ai fini della calibrazione dei parametri.

9. PREVISIONE DEGLI EFFETTI SUL TRASPORTO SOLIDO LITORANEO DOVUTI ALLA PRESENZA DELLE OPERE IN PROGETTO

La previsione di possibili accumuli all'interno dell'area individuata per la realizzazione del canale di vivificazione e dello specchio idrico protetto già effettuata durante la redazione del progetto preliminare, ha spinto il progettista ad individuare nel molo foraneo e nella scogliera antisedimentazione i dispositivi adatti a prevenire i fenomeni di sedimentazione; le simulazioni di seguito descritte sono state svolte al fine di confermare delle scelte progettuali effettuate e al fine di individuare correttamente il grado di permeabilità di tali opere.

Dapprima verranno descritte le opere in progetto e le opere di mitigazione previste.

Inseguito verranno descritte le simulazioni relative alla previsione a medio termine (10 anni) degli effetti previsti sull'evoluzione della linea di riva in presenza delle opere in progetto ed in particolare in funzione del grado di permeabilità di quest'ultime.

9.1 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO E DI MITIGAZIONE

opere marittime principali previste in progetto sono:

- Molo foraneo di ponente;
- Colmate e banchine di riva;
- Pennello antisedimentazione;
- Opere di dragaggio per la regolarizzazione dei fondali.

Il molo foraneo sarà lungo circa 520 m, ed è costituito da una bilaterale.

Rispetto alla posizione prevista nel progetto preliminare, esso ha subito una traslazione dell'asse longitudinale verso ovest, tale operazione ha reso necessaria la rotazione del tratto terminale per garantire la necessaria protezione dello specchio acqueo protetto.

Il piano di calpestio è a quota +1,60 m rispetto al l.m.m, mentre la larghezza del molo foraneo è di 8m nel primo tratto e 10m nel secondo.

Il molo è realizzato su pali trivellati in cls.a. rivestiti, per la parte non infissa, da lamierino in acciaio corten e aventi diametro:

- D=1,00 m, fino alla batimetrica dei -5m rispetto al l.m.m.
- D=1,20 m dalla batimetrica dei -5m fino a quella di -9 m rispetto al l.m.m.

I pali sono disposti secondo una maglia 6 x 6 m.

La lunghezza di infissione sotto la quota del fondale è di circa 35 m.

Ai fini di garantire gli standard dell'agitazione residua, la tipologia costruttiva del molo prevede:

- uno schermo totalmente immerso costituito da setti in cls, lungo la fila esterna;
- uno schermo parzialmente immerso lungo la fila lato specchio acqueo protetto.

Sopra ogni fila trasversale di pali è realizzata la trave pulvino su cui poggiano i tegoli in cls precompresso e quindi la soletta collaborante. Sopra è disposta la pavimentazione in elementi autobloccanti.

Le colmate saranno delimitate da barriere di pali secanti. Lungo i lati che delimitano lo specchio acqueo per il diporto, sui pali saranno solidarizzati dei cassoncini antiriflettenti finestrati sul lato esterno.

I cassoncini hanno dimensioni planimetriche di 3.00 x 3.00 m ed altezza 3.00 m, posti sulla paratia di pali accostati e sul terreno consolidato a quota - 2.40 m s.l.m.; l'apertura frontale del cassone è alta 1,20 m; la pendenza dello strato di scogli interno è 3/2.

Ai piedi della palificata saranno posizionati dei massi guardiani per la protezione al piede della stessa.

Dal lato del canale di vivificazione, la palificata sarà coronata con un cavidotto impiantistico.

La quota di calpestio delle banchine di riva è posta pari a +1,20 m rispetto al l.m.m.; le pavimentazioni sono realizzate in elementi autobloccanti.

A nord ovest dell'opera portuale verrà realizzato un pennello antisedimentazione che si radica sulla battigia. Questo sarà lungo circa 210 m e orientato secondo l'asse N/S. Esso sarà realizzato con massi di 2° categoria. La quota della berma sarà di 0,50 m rispetto al l.m.m.

Il pennello sarà radicato presso la foce del Canale Regina, la testata dello stesso raggiungerà fondali sulla batimetrica dei -2,0 m rispetto al l.m.m.

Le opere di dragaggio saranno effettuate per ottenere un fondale a quota -5,00 m s.l.m. nello specchio acqueo per il diporto e dello specchio acqueo cantieristico, a quota -3,00 m s.l.m. nella darsena polifunzionale, ed a quota -2,00 m s.l.m. nel canale di vivificazione

Dal punto di vista del trasporto solido si mette in evidenza la presenza del pennello antisedimentazione.

Il pennello proteggerà l'imboccatura del canale tra l'area di colmata e la linea di costa dall'ingresso di materiale trasportato per effetto della componente long-shore nella zona di frangenza o eventualmente ed in minima parte dal Canale Regina e dal fosso adiacente all'area ex SPERO, qui deviato.

9.2 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE

Le simulazioni effettuate sono relative alla previsione futura nel medio periodo (10 anni) della configurazione del litorale secondo i seguenti scenari:

- l'ipotesi di "non intervento" (SCENARIO 0) e cioè la configurazione del litorale (riferita alla linea del 2008) che tenga conto della presenza delle opere attuali o in fase di realizzazione (banchinamento del molo S. Antonio, delle banchine limitrofe e di quelle in fase di realizzazione secondo il progetto del Marina di Archimede),
- l'ipotesi di "opere trasparenti" (SCENARIO 1) e cioè la configurazione del litorale (riferita alla linea del 2008) che tenga conto della presenza delle

opere previste dal presente progetto, considerate ad elevata permeabilità ($P=0,8$), e delle strutture del Marina di Archimede,

- l'ipotesi di "opere parzialmente trasparenti" (SCENARIO 2) e cioè la configurazione del litorale (riferita alla linea del 2008) che tenga conto della presenza delle opere previste dal presente progetto, considerate ad bassa permeabilità ($P=0,2$), e delle strutture del Marina di Archimede,
- l'ipotesi di "opere opache" (SCENARIO 3) e cioè la configurazione del litorale (riferita alla linea del 2008) che tenga conto della presenza delle nuove opere del presente progetto, considerate a permeabilità nulla ($P=0$), in conformità con le tipologie strutturali previste (cfr. l'elaborato "Studio idraulico marittimo"), e delle strutture del Marina di Archimede.

Ovviamente quanto simulato impone l'assunzione che le condizioni al contorno ed in particolare quelle meteomarine e sedimentologiche, assunte a base nella fase di calibrazione del modello, rimangano simili per l'arco temporale in esame.

9.2.1 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 0

Le strutture portuali sono state implementate tramite tre "non diffracting groin", a permeabilità bassa o nulla, al fine di poter ricostruire una geometria del modello più verosimile alla quella della realtà.

Inoltre i banchinamenti sono stati implementati come sea walls.

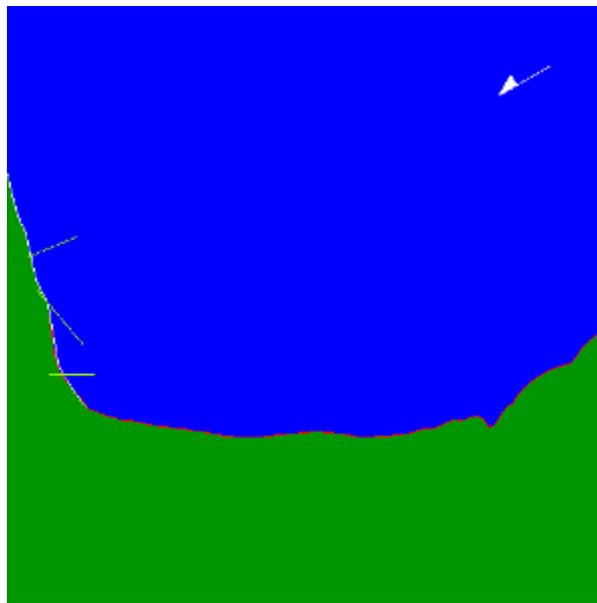


Figura 9-1. Modellazione in GENESIS delle opera portuale attuali (banchinamenti esistenti e marina di Archimede)

Di seguito si riporta il diagramma relativo alla posizione assunta dalla linea di costa all'inizio e alla fine dell' arco temporale di simulazione rispetto al sistema di riferimento. Inoltre il confronto tra le linee di riva è osservabile anche sull'elaborato grafico "B.3.3", allegato a questa relazione.

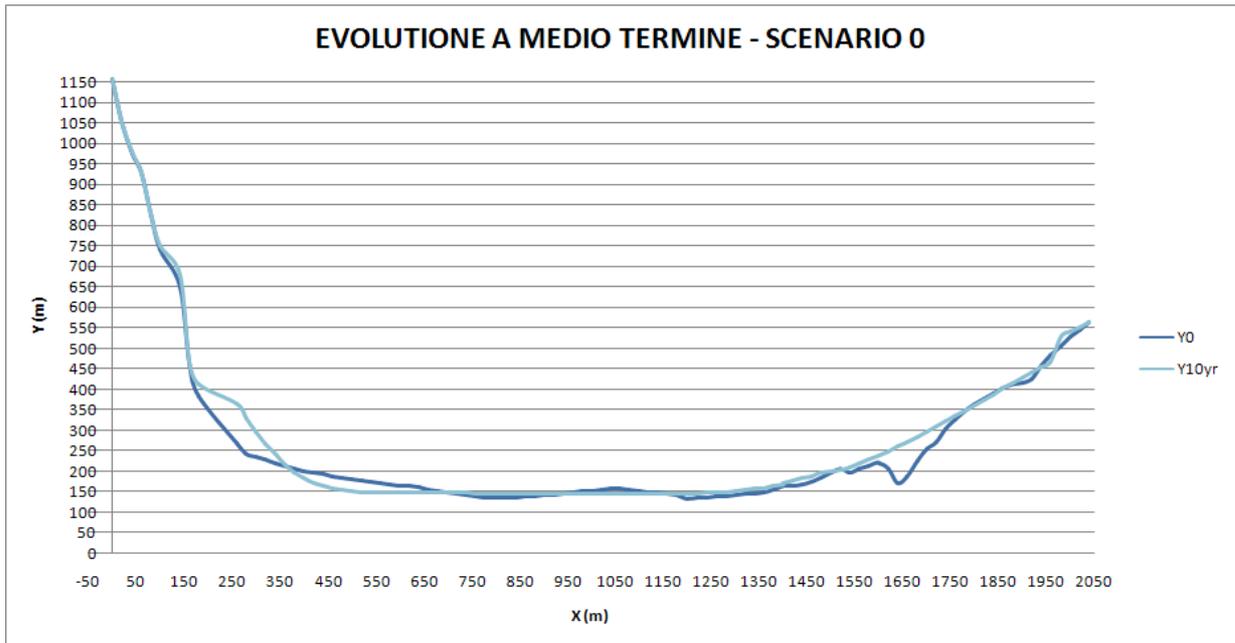


Figura 9-2. Sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale durante la simulazione dello scenario 0.

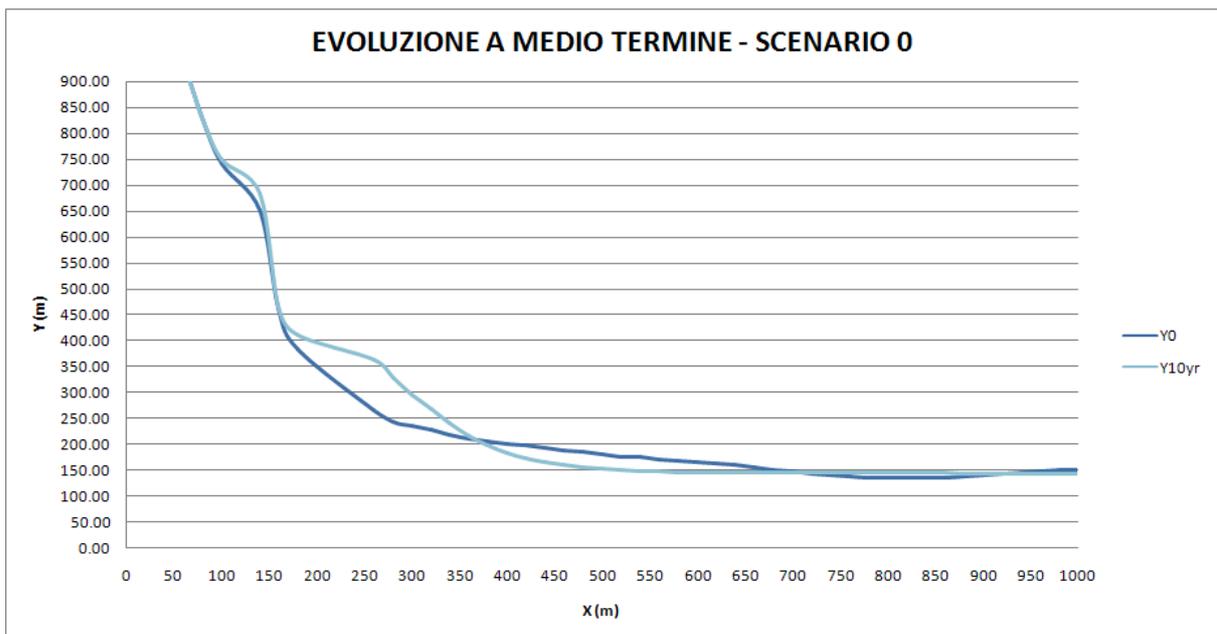


Figura 9-3. Particolare della sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale durante la simulazione dello scenario 0"lungo il tratto interessato dalle opere in progetto.

Lungo l'arco di costa in analisi, si osserva in generale la formazione di un profilo pseudo parabolico tipico di questo tipo di simulazioni.

A sud, si osserva l'avanzamento della linea di riva in prossimità della Foce del F. Anapo, per via dei materiali trasportati sia dalle acque fluviali che da quelle marine.

Nel tratto centrale si osserva l'alternarsi di brevi tratti in avanzamento che si alternano a quelli in arretramento.

L'entità di tali scostamenti è al massimo di una decina di metri.

Nel tratto a nord, si osserva la formazione di un accumulo consistente a ridosso del banchinamento tra l'area dell' Aeronautica e le opere di Marina di Archimede, di un accumulo minore all' interno del bacino protetto del Marina di Archimede e la presenza di erosione di un tratto davanti al complesso ex S:P.E.R.O.

Sia l'arretramento che l'accrescimento sono dell'ordine di qualche decina di metri.

Ciò corrisponde qualitativamente a quanto effettivamente al trend evolutivo della costa negli ultimi anni.

Si osserva che la simulazione effettuata ha confermato la previsione di possibili accumuli all'interno dell'area individuata per la realizzazione del canale di vivificazione e dello specchio idrico protetto, e quindi anche la scelta progettuale di realizzare dispositivi adatti a mitigare i fenomeni di sedimentazione.

9.2.2 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 1.

La seconda serie di simulazioni condotta è relativa alla previsione nel medio periodo del litorale nell'ipotesi di realizzazione dell'Approdo previsto dall'opere in progetto, ipotizzando un elevato grado di permeabilità sia delle opere di protezione sia del pennello ($P=0,8$)

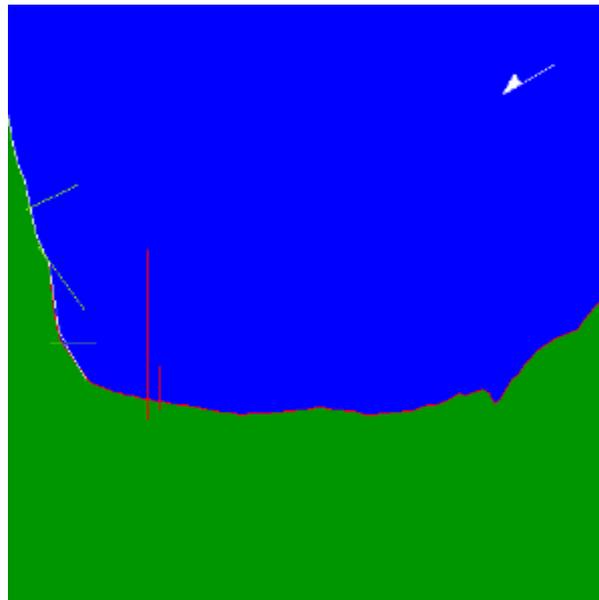


Figura 9-4. Modellazione in GENESIS del tratto di costa interessato dalle nuove opere portuali

Di seguito si riporta il diagramma relativo alla posizione assunta dalla linea di costa all'inizio e alla fine dell'arco temporale di simulazione rispetto al sistema di riferimento. Inoltre il confronto tra le linee di riva è osservabile anche sull'elaborato grafico "B.3.4", allegato a questa relazione.

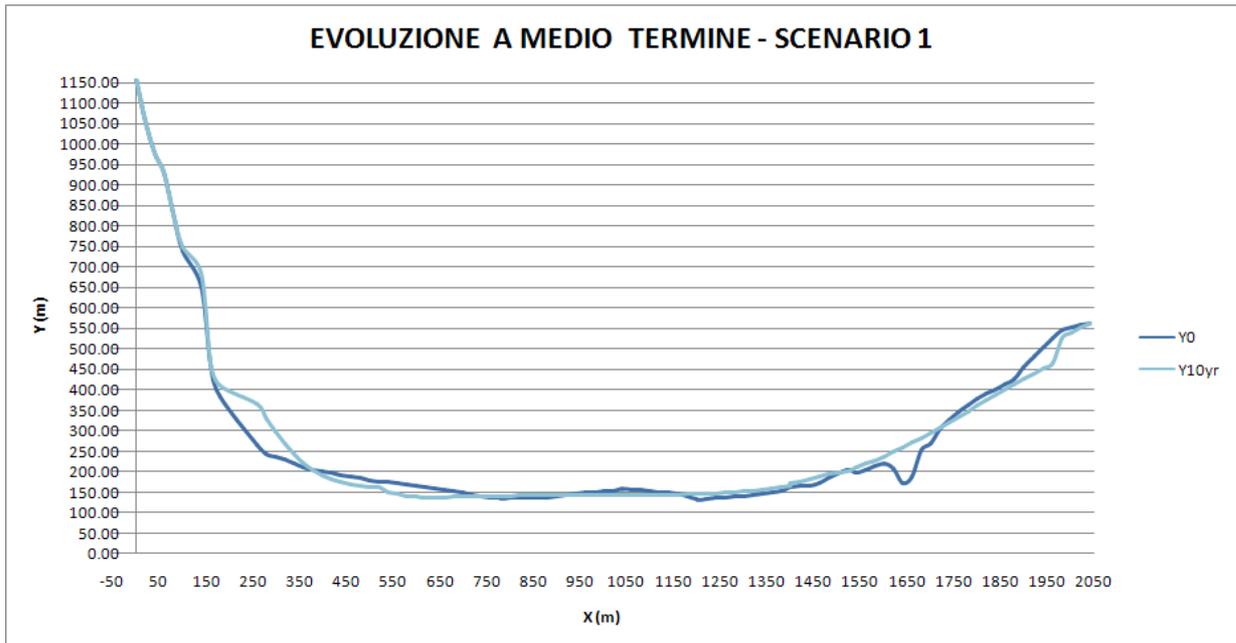


Figura 9-5. Confronto tra la configurazione della linea di costa finale ed iniziale durante la simulazione dello scenario 1

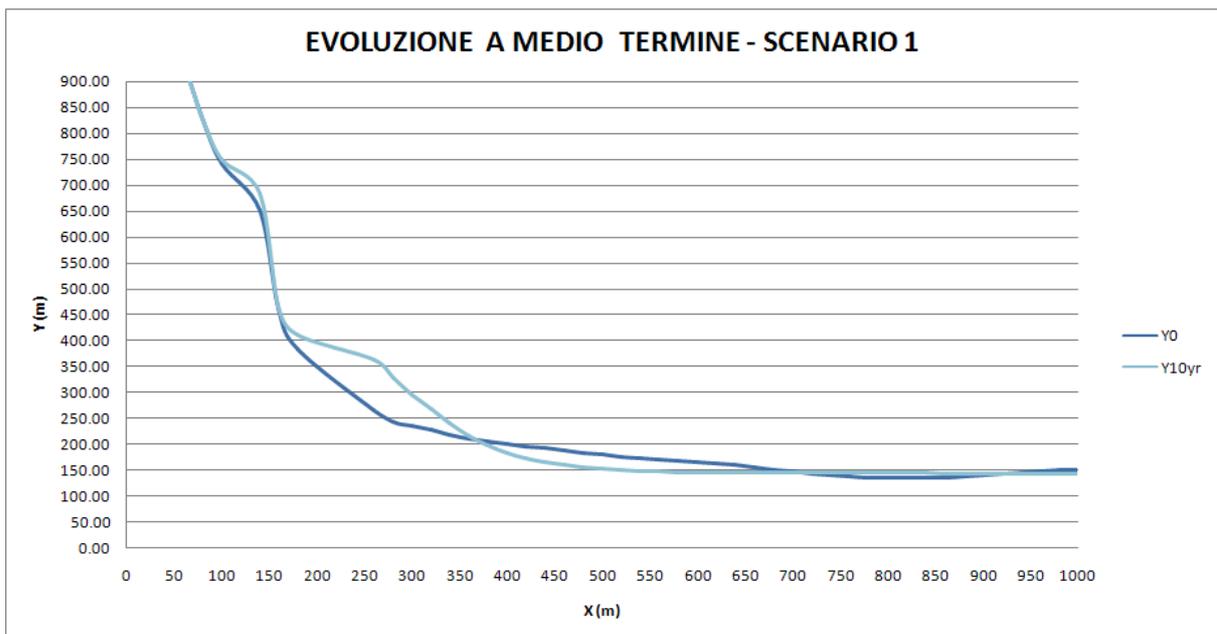


Figura 9-6. Sovrapposizione della linea di costa iniziale e finale per il tratto interessato dalle opere in progetto durante lo scenario 1

L'osservazione e l'analisi dell'output evidenzia sempre la formazione di un accumulo lungo il banchinamento di riva tra l'approdo in progetto, il marina di Archimede e la linea di riva, presso le aree destinate ad ospitare il canale di vivificazione

Inoltre si conferma la presenza dell'erosione immediatamente a sud del nuovo approdo.

L'entità di tali scostamenti raggiunge i livelli del caso precedente.

9.2.3 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 2

La terza serie di simulazioni è relativa alla previsione nel medio-lungo periodo del litorale sotto l'ipotesi dello "scenario 2" che prevede la realizzazione dell'approdo previsto dalle opere in progetto per mezzo di strutture a bassa permeabilità.

L'opera foranea è stata modellata tramite l'inserimento di pennello di tipo diffracting groin normale alla linea di costa a cui è stato associato un grado di permeabilità basso ($P=0.2$).

Tale grado di permeabilità è stato attribuito anche al pennello antisedimentazione.

Di seguito si riporta il diagramma relativo alla posizione assunta dalla linea di costa all'inizio e alla fine dell' arco temporale di simulazione rispetto al sistema di riferimento. Inoltre il confronto tra le linee di riva è osservabile anche sull'elaborato grafico "B.3.4", allegato a questa relazione.

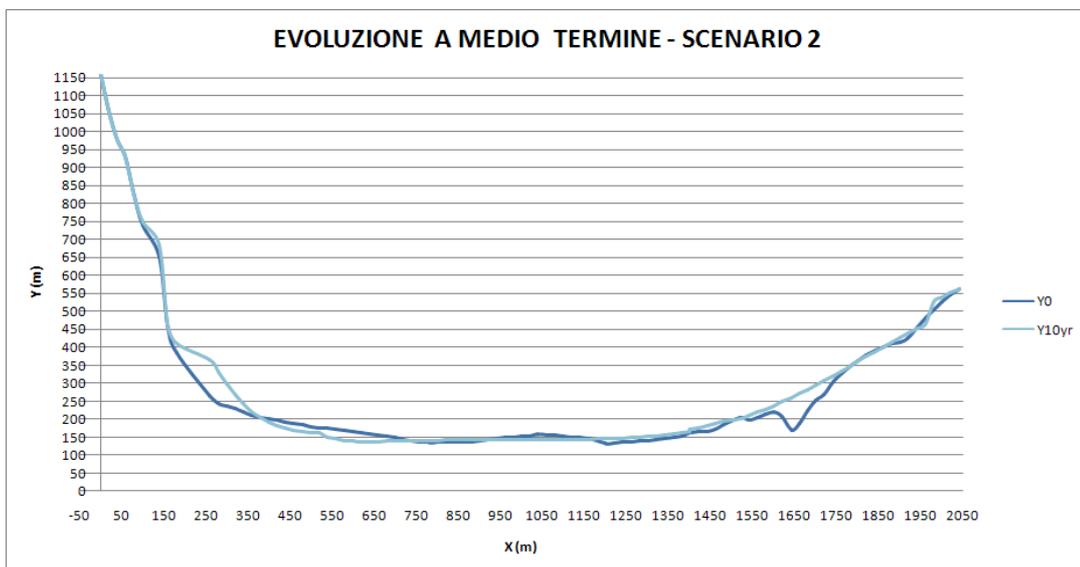


Figura 9-7. Sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale durante la simulazione" scenario 2"

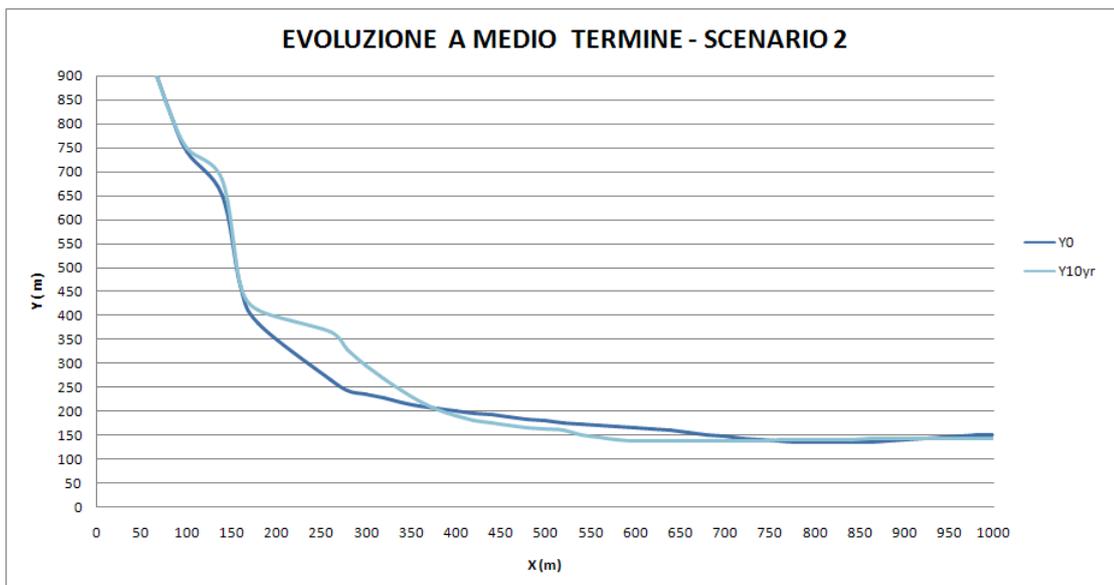


Figura 9-8. Particolare della sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale durante lo scenario 2, per l'area interessata dalle opere in progetto.

L'osservazione e l'analisi dell'output evidenzia qualitativamente la parziale efficacia del funzionamento del pennello a bassa permeabilità, che implica una riduzione dell'entità dell'erosione immediatamente a sud delle opere in progetto, ma non la riduzione dell'accumulo all'interno del canale di vivificazione.

9.2.4 EVOLUZIONE A MEDIO TERMINE PER LO SCENARIO 3

L'ultima serie di simulazioni è relativa alla previsione nel medio-lungo periodo del litorale sotto l'ipotesi dello "scenario 3" che prevede la realizzazione dell'approdo previsto dalle opere in progetto per mezzo di strutture a permeabilità nulla.

Le opere del molo foraneo sono state modellate tramite l'inserimento di pennello di tipo diffracting groin normale alla linea di costa a cui è stato associato un grado di permeabilità nullo ($P=0$).

Al pennello antisedimentazione è stato attribuito un grado di permeabilità basso ($P=0,2$).

Di seguito si riporta il diagramma relativo alla posizione assunta dalla linea di costa all'inizio e alla fine dell'arco temporale di simulazione rispetto al sistema di riferimento. Inoltre il confronto tra le linee di riva è osservabile anche sull'elaborato grafico "B.3.4", allegato a questa relazione.

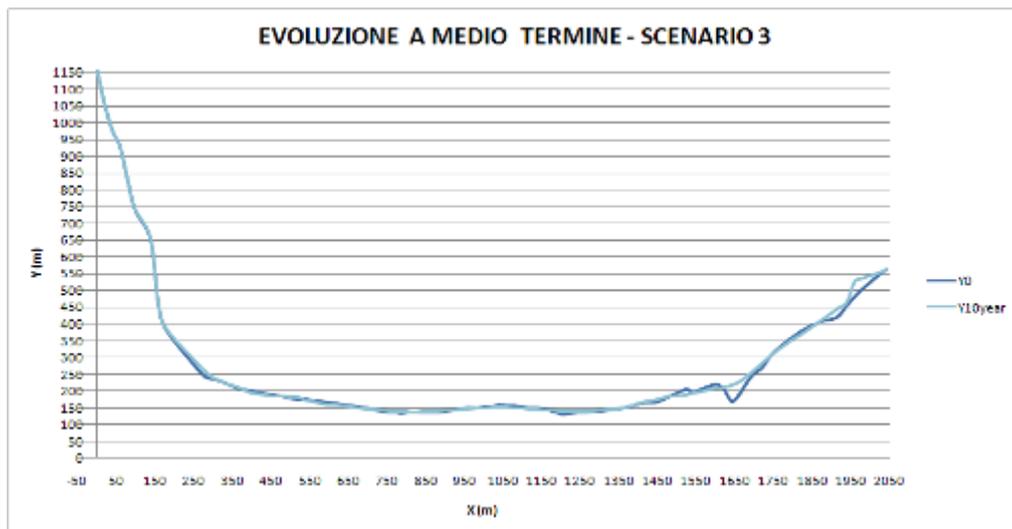


Figura 9-9. Sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale durante la simulazione" scenario 3"

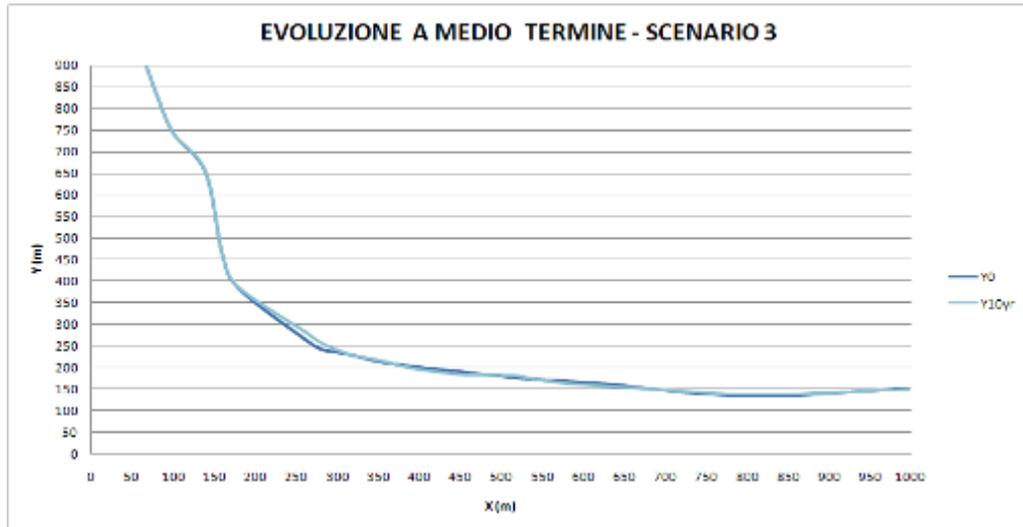


Figura 9-10. Particolare della sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale durante lo scenario 3, per l'area interessata dalle opere in progetto.

L'osservazione e l'analisi dell'output evidenzia qualitativamente la sostanziale efficacia del funzionamento delle opere opache, che implica sia la riduzione dell'entità dell'erosione immediatamente a sud delle opere in progetto, sia la riduzione dell'accumulo all'interno del canale di vivificazione.

9.2.5 CONFRONTO TRA GLI SCENARI IPOTIZZATI E CONCLUSIONI

La previsione di possibili accumuli all'interno dell'area individuata per la realizzazione del canale di vivificazione e dello specchio idrico protetto, ha determinato la scelta progettuale di realizzare dispositivi adatti a mitigare i fenomeni di sedimentazione.

Lo scopo delle simulazioni eseguite è stato quello di identificare qualitativamente l'evoluzione futura della linea di riva nel medio termine (arco temporale pari a 10 anni) nell'ipotesi di diversi scenari di intervento, in funzione del grado di permeabilità delle opere di mitigazione.

Sono stati quindi analizzati quattro distinti scenari:

- scenario 0 (presenza del banchinamento di riva e delle opere del Marina di Archimede);
- scenario 1 (costruzione delle opere previste in progetto con un grado di permeabilità elevato),
- scenario 2 (costruzione delle opere previste in progetto con un grado di permeabilità basso),
- scenario 3 (costruzione delle opere previste in progetto con un grado di permeabilità nullo).

Di seguito si riportano la sovrapposizione tra le linee di costa ai fini di individuarne qualitativamente i principali trend evolutivi.

In particolare per meglio identificare questi scostamenti rispetto alla posizione della linea di costa di partenza si riporta il diagramma riepilogativo di confronto. Inoltre, il confronto tra le linee di riva è osservabile anche sull'elaborato " B.3.4", allegato a questa relazione.

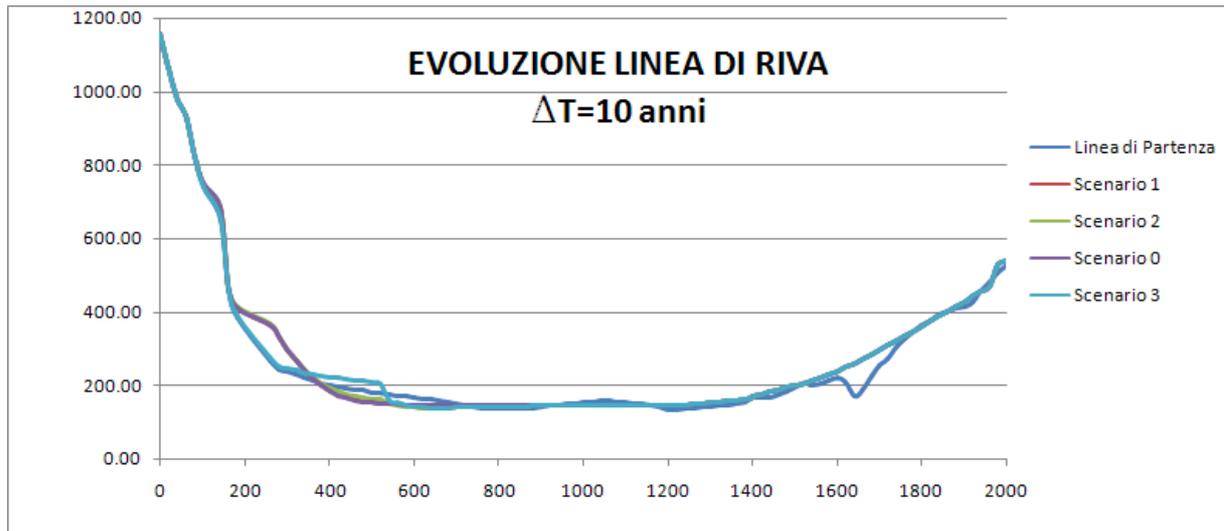


Figura 9-11. Sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale relative ai quattro scenari di simulazione.

In ognuna delle simulazioni effettuate si è osservato la presenza del trend evolutivo di erosione che ha caratterizzato l'arco di costa in analisi negli ultimi anni.

In particolare nel tratto centrale si osserva un alternarsi di tratti in accrescimento e di tratti in erosione; l'entità degli scostamenti risulta al massimo di una decina di metri.

Inoltre si evidenzia un accrescimento della linea di costa in prossimità della Foce Anapo, dovuta alla presenza del materiale costituente il trasporto solido fluviale, elemento di modellazione introdotto anche in questo gruppo di simulazioni.

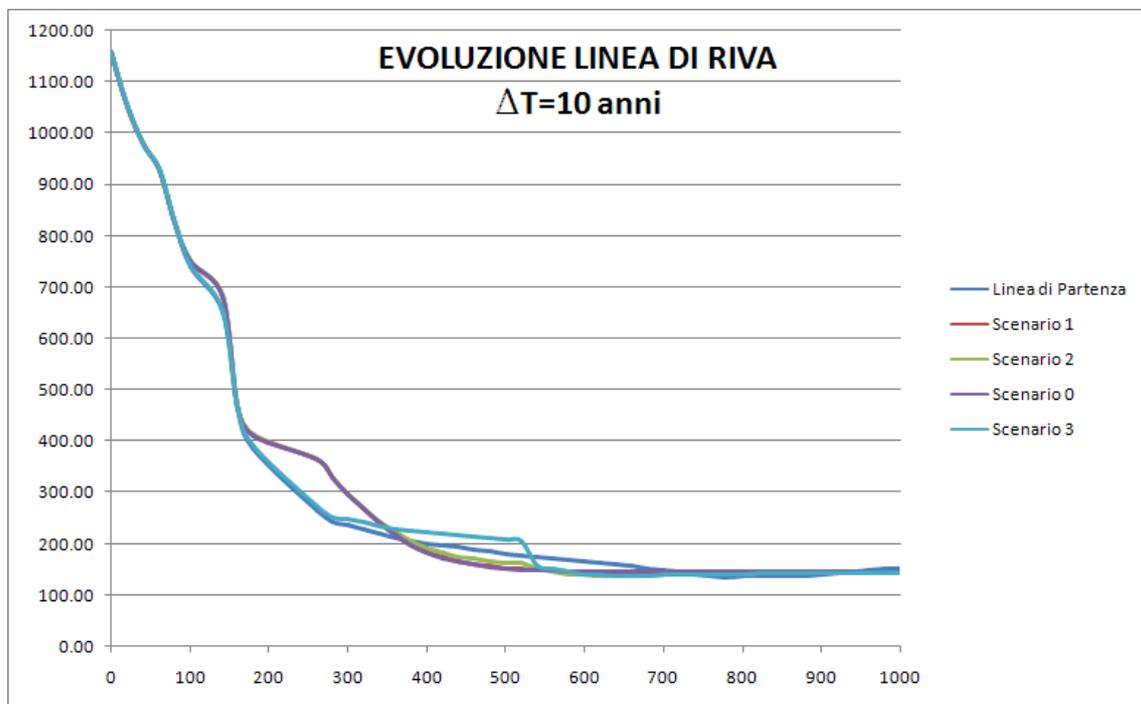


Figura 9-12. Particolare della sovrapposizione della linea di costa finale ed iniziale relative ai quattro scenari di simulazione .

Nel tratto a nord, interessato dalla presenza delle opere in progetto, si osserva la formazione di un accumulo, presso l'area destinata ad accogliere il canale di vivificazione, e della formazione di un tratto in erosione, a sud delle opere in progetto.

Gli scenari simulati, sono caratterizzati da scostamenti dalla linea di costa di partenza, che sono funzione del diverso grado di permeabilità assegnato alle opere implementate.

In particolare è stato possibile osservare l'estensione dell'“area” di influenza delle opere in progetto, caratterizzata da uno sviluppo longshore DX pari a circa 750 m, (da $X_1=250$ m a $X_2=1000$ m).

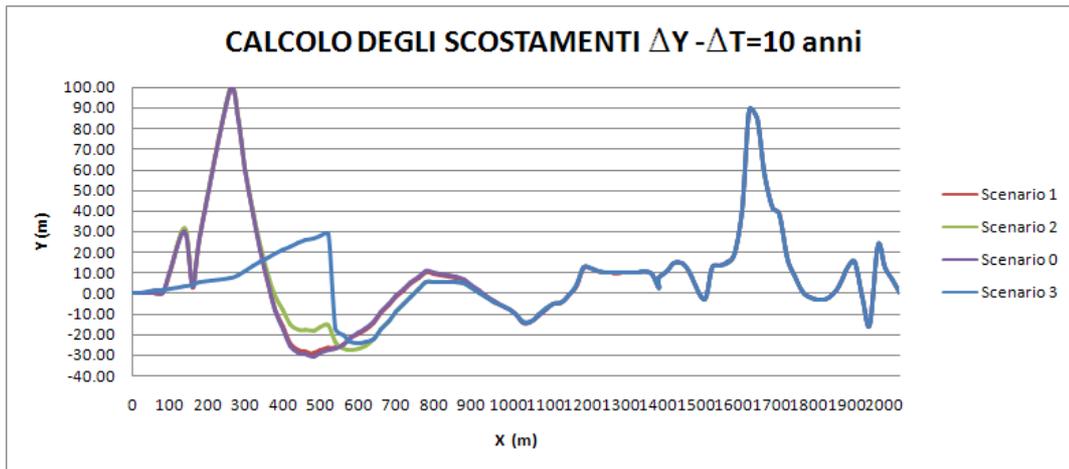


Figura 9-13 Previsione degli scostamenti relativi ai trend evolutivi della linea di costa a medio termine rispetto la posizione iniziale e relativi ai tre scenari di simulazione .

L'implementazione di opere ad elevata permeabilità (scenario 1) provoca rispetto alla situazione relativa all'assenza delle opere (scenario 0) solo una leggera riduzione degli scostamenti sia in avanzamento sia in erosione della linea di costa rispetto allo scenario 0, pari al massimo a qualche metro.

Lo scenario 2 (opere a bassa permeabilità) prevede una riduzione degli scostamenti sia in avanzamento sia in erosione della linea di riva rispetto a quella di partenza; l'entità di tali riduzioni è variabile fino a qualche decina di metri rispetto alle linee di riva finali dei precedenti scenari di analisi.

Lo scenario 3 (opere opache) prevede un'ulteriore riduzione degli scostamenti della linea di riva: ciò implica l'aumento del deposito presso le radici del molo foraneo e del pennello, la riduzione degli accumuli all'interno del canale di vivificazione ed una leggera traslazione verso sud del tratto in erosione.

Si conviene che le opere di mitigazione (molo foraneo e pennello antisedimentazione), da considerare come opache ai fini del trasporto litoraneo, sono caratterizzate da un'impatto positivo poiché inducono la riduzione sia del deposito all'interno del canale di vivificazione, sia dell'erosione lungo il litorale limitrofo, salvaguardandone la fruibilità.

10. PREVISIONI QUALITATIVE SUI FENOMENI DI DEPOSITO E DI EROSIONE ALL'INTERNO DEL BACINO PROTETTO

Al fine di verificare ulteriormente se il bacino protetto possa soffrire di interrimenti fisiologici e per valutare qualitativamente i fenomeni di deposizione/erosione all'interno dello stesso, è stata effettuata un'analisi modellistica applicando anche il codice di calcolo SED-2D, prodotto nel 1998 dall'US Army Engineer Waterways Experiment Station (US WES).

Tale modello nasce per le indagini sedimentologiche nell'ambito dell'idraulica fluviale ma il suo uso può essere esteso anche al caso dei bacini portuali (confronta il report "Tidal Circulation and Sediment Transport Modeling for Port Dhamra Chandbali Expansion Project" di Khangaonkar, Kristanovich, Rashid, Bankim, Mallick del 1998).

10.1 TEORIA DEL MODELLO

I concetti base della teoria applicata dal modello numerico sono i seguenti:

- Il processo di erosione/sedimentazione ad opera dell'azione del flusso idrico sui sedimenti consta delle seguenti fasi:
 - erosione
 - trascinamento,
 - trasporto,
 - deposizione.
- Il sedimento rimane immobile solo fino a quando le forze di energia del flusso idrico non superano la soglia critica dello sforzo di trascinamento.
- Un sedimento resta in sospensione fino a quando la velocità è maggiore del valore critico per la sospensione.
- La variazione della quota in un punto del fondale avviene solo se il "tasso di erosione" non è uguale al "tasso di deposizione".

Il modello numerico SED2D può essere applicato nelle seguenti condizioni:

- i fondali sono costituiti da sedimenti che vanno dai terreni argillosi a quelli sabbiosi,
- il campo delle velocità viene considerato "bidimensionale" nel piano orizzontale e "mediato" rispetto alla profondità.

Il campo delle velocità viene fornito a SED2D come input esterno; esso viene ricavato dalle calcolazioni del modello RMA2 dell'US Corps of Engineers, applicato già durante la redazione dell'elaborato B.4-SQA "Studio della qualità delle acque".

Per ulteriori informazioni sul modello RMA2 si rimanda all'elaborato B.4-SQA "Studio della qualità delle acque".

Si osserva che SED2D trascura le variazioni al regime idrodinamico indotte dalla variazione di morfologia dei fondali dovuta al fenomeno di erosione/deposizione dei sedimenti; l'informazione quindi fornita è solo qualitativa.

Il codice permette di ricavare i seguenti campi:

- concentrazione dei sedimenti in sospensione
- sforzo tangenziale sul fondo.
- variazione di quota del fondale rispetto a quello originale
- quota assoluta del fondale secondo il sistema di riferimento.

La concentrazione dei sedimenti in sospensione viene calcolata risolvendo tramite un metodologia agli elementi finiti secondo lo schema di Crank-Nicholson l'equazione di diffusione/convezione di Ariathurai, MacArthur e Krone (1977),

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \alpha_1 C + \alpha_2$$

in cui

- c è concentrazione, (kg/m^3)
- t è tempo, (s)
- u, v sono componenti della velocità del flusso, (m / sec)
- D_x è coefficiente di diffusione efficace in direzione x , (m^2/sec)
- D_y è coefficiente di diffusione efficace in direzione y , (m^2/sec)
- a_1 è un coefficiente per il termine "sorgente", (1/sec)
- a_2 è la "porzione della concentrazione di equilibrio" per il termine "sorgente" ($\text{kg}/\text{m}^3/\text{sec}$)

Il termine "sorgente" viene calcolato tramite la seguente equazione:

$$S = a_1 C + a_2,$$

I metodi di calcolo dei coefficienti dipendono dal tipo di sedimento e dal fatto se l'erosione o deposizione si sta verificando.

Lo sforzo tangenziale viene calcolato tramite la seguente espressione:

$$\tau_b = \rho (u^*)^2$$

In cui:

- ρ è la densità dell' acqua
- u^* è la velocità di trascinarsi che viene calcolato secondo la teoria di Manning:

$$u^* = \frac{\sqrt{g} \bar{u} n}{CME D^{1/6}}$$

Con:

- u è la velocità media del flusso
- D è la profondità del fondale
- g è l'accelerazione di gravità
- n è il coefficiente di scabrezza di Manning
- CME è un coefficiente che vale 1.0 se si usano le unità di misura S.I. e 1.486 se le unità di misura sono quelle anglosassoni.

La variazione di densità nel tempo segue la seguente legge:

$$\rho = \rho_f - (\rho_f - \rho_i) e^{-\beta t}$$

In cui:

- ρ la densità del fluido al tempo t
- ρ_i densità iniziale del fluido
- ρ_f densità finale del fluido
- β coefficiente di consolidamento (1/s)

Altro parametro richiesto dal modello è la velocità di sedimentazione dei sedimenti.

Tale parametro è stato calcolato esternamente al modello applicando la formula di Stokes:

$$v = \frac{2(\rho_s - \rho_f)g r^2}{9 \eta}$$

In cui

- ρ_s : densità della particella
- ρ_f : densità del fluido
- η : coefficiente di attrito viscoso del fluido
- g : accelerazione gravitazionale
- r : raggio della particella.

La velocità di Stokes, rappresenta il limite del campo delle velocità al di sotto del quale la particella di diametro $2r$ comincia a sedimentare.

Gli input necessari al modello SED2D sono:

- Campo idrodinamico (da RMA2);
- Campo delle concentrazioni di sedimento;
- Granulometria dei sedimenti;
- Peso specifico del materiale;
- Fattore di forma del sedimento;
- Coefficienti di deposito ed erosione
- Peso specifico del fluido,
- Spessore del banco di sedimenti,
- Coefficiente di scabrezza alla manning del fondale;
- La velocità di sospensione;
- Il valore di accelerazione di gravità;
- I coefficienti di diffusione;
- Coefficiente di calcolo di Crank-Nicholson

Per ulteriori specifiche si rimanda al manuale d'uso del codice.

10.2 ANALISI EFFETTUATE

Il modello SED2D è stato utilizzato per indagare qualitativamente quale livello di interrimento si possa verificare all'interno dell'approdo in progetto.

A vantaggio di sicurezza sulle previsioni qualitative di SED2D, il dominio di indagine coincide pressoché con la configurazione "2B" conforme al layout delle opere in progetto (cfr. l'elaborato B.4-SQA-Studio della qualità delle acque).

Il codice numerico SED2D soffre delle stesse limitazioni sul numero di elementi e di nodi della mesh di calcolo di RMA2.

Il passo temporale di simulazione adottato è pari ad 1 h.

Si sottolinea che il dominio in analisi è adatto a fornire informazioni qualitative relative alla previsione dell' interrimento globale all' interno del bacino protetto.

Il numero di nodi 4739; il numero di elementi triangolari è 480, il numero di elementi quadrangolari è 1052.

Il contorno esterno è di tipo semicircolare; le profondità sono quelle previste dalla configurazione di progetto e variano tra 0 e -10 m rispetto al l.m.m.

L'input idrodinamico è stato fornito dalle calcolazioni di RMA2.

Sono stati implementati in RMA2, i tre casi ritenuti più significativi:

- Regime correntometrico indotto dalla composizione delle forzanti marea,
- Regime correntometrico indotto dalla composizione delle forzanti di marea e vento da Grecale,
- Regime correntometrico indotto dalla composizione delle forzanti di marea e vento da Scirocco,

Le condizioni idrodinamiche al contorno imposte sono state derivate dalle simulazioni ADCIRC (cfr. elaborato B.3.1-SDC "Studio Idrodinamico").

Da tali simulazioni sono state estratte le serie temporali relative all'escursione di livello idrico derivate in un punto all'interno del bacino del Porto Grande (punto di Controllo P.4 delle simulazioni STWAVE, ADCIRC; CGWAVE), coincidente con il nodestring del dominio RMA2-SED2D (cfr. elaborati B.2-SIM-"Studio Idraulico Marittimo" ed B.3.1-SDC"Studio Idrodinamico").

Di seguito si riportano i diagrammi temporali per un periodo di 96 h.

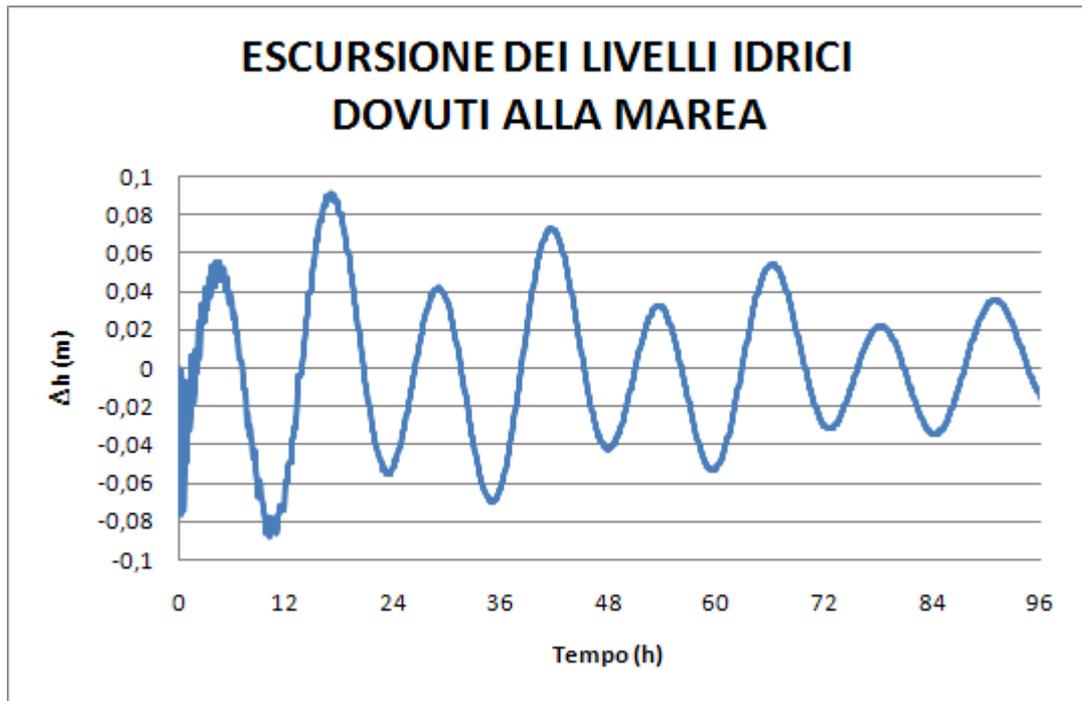


Figura 10.1. Applicazione RMA2-SED2D. Escursione di livello idrico per sola marea.

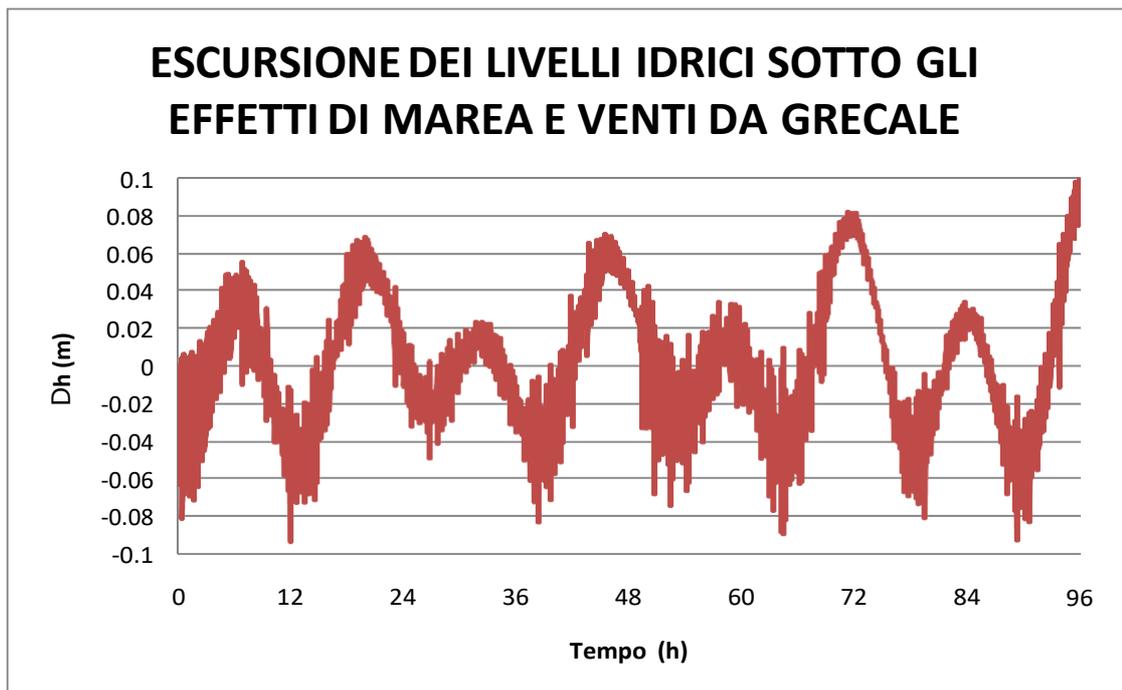


Figura 10.2. Applicazione RMA2-SED2D. Escursione di livello idrico per marea e Grecale

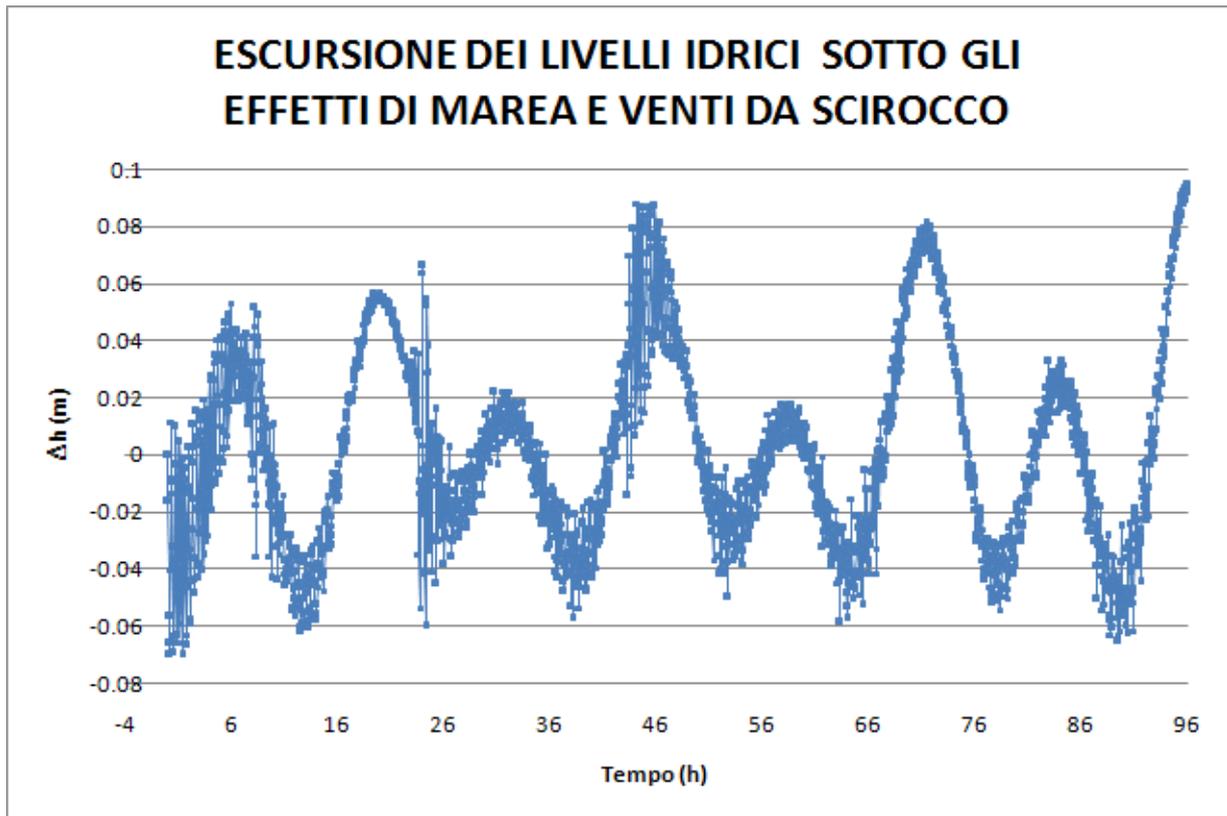


Figura 10.3. Applicazione RMA2-SED2D. Escursione di livello idrico per marea e Scirocco.

Per il campo delle concentrazioni, applicando la coppia di modelli RMA2-SED2D in condizioni statiche, è stata calcolata una condizione iniziale della distribuzione della concentrazione dei sedimenti per le simulazioni dinamiche a partire dal volume di trasporto netto longshore, ottenuti dall'applicazione del software GENESIS su un arco temporale di 10 anni (cfr. capitolo 9 di questo elaborato).

In particolare, per ognuno degli anni simulati e per ognuna delle celle di calcolo del modello GENESIS è stato possibile ricavare il volume solido netto annuale (in m^3).

Sono stati quindi calcolati:

- la portata solida netta media annuale (in m^3 /anno),
- la portata solida netta media giornaliera (in m^3 /gg),
- la portata solida netta media oraria (in m^3 /h),
- il flusso solido netto medio giornaliero (in m^3 /[gg x m]),
- il flusso solido netto medio orario (in m^3 /[h x m]).

Di seguito si riporta la tabella riepilogativa in funzione della coordinata X nel modello di calcolo GENESIS; si osserva che le grandezze stimate sono tutte riferite alla componente di trasporto netto longshore.

X	PORTATA MEDIA ANNUALE m ³ /anno*	PORTATA MEDIA GIORN. m ³ /h*	PORTATA MEDIA ORARIA m ³ /h*	FLUSSO MEDIO GIORN. m ³ /(gg*m)*	FLUSSO MEDIO ORARIO m ³ /(h*m)*
0	5122	14.03	5.847E-01	3.772E-02	1.572E-03
20	5122	14.03	5.847E-01	2.949E-02	1.229E-03
40	5122	14.03	5.847E-01	2.543E-02	1.060E-03
60	5122	14.03	5.847E-01	2.335E-02	9.728E-04
80	5121	14.03	5.846E-01	2.002E-02	8.343E-04
100	5121	14.03	5.846E-01	1.788E-02	7.449E-04
140	4981	13.65	5.686E-01	1.582E-02	6.592E-04
160	4526	12.40	5.167E-01	1.164E-02	4.852E-04
180	4472	12.25	5.105E-01	1.082E-02	4.510E-04
260	4066	11.14	4.642E-01	9.174E-03	3.823E-04
280	2638	7.23	3.012E-01	5.809E-03	2.421E-04
300	1403	3.84	1.602E-01	3.043E-03	1.268E-04
320	530	1.45	6.053E-02	1.134E-03	4.724E-05
340	-42	-0.11	-4.772E-03	-8.816E-05	-3.673E-06
360	-382	-1.05	-4.361E-02	-7.968E-04	-3.320E-05
380	-512	-1.40	-5.844E-02	-1.058E-03	-4.410E-05
400	-494	-1.35	-5.644E-02	-1.015E-03	-4.230E-05
420	-373	-1.02	-4.260E-02	-7.629E-04	-3.179E-05
440	-157	-0.43	-1.792E-02	-3.196E-04	-1.332E-05
460	99	0.27	1.124E-02	1.998E-04	8.325E-06
480	356	0.98	4.064E-02	7.202E-04	3.001E-05
500	619	1.70	7.068E-02	1.249E-03	5.205E-05
520	855	2.34	9.764E-02	1.722E-03	7.174E-05
540	1077	2.95	1.229E-01	2.158E-03	8.990E-05
560	1419	3.89	1.620E-01	2.835E-03	1.181E-04
580	1804	4.94	2.059E-01	3.593E-03	1.497E-04
600	2202	6.03	2.513E-01	4.377E-03	1.824E-04
620	2587	7.09	2.953E-01	5.139E-03	2.141E-04
640	2951	8.08	3.368E-01	5.854E-03	2.439E-04
660	3269	8.96	3.732E-01	6.476E-03	2.698E-04
680	3522	9.65	4.021E-01	6.969E-03	2.904E-04
700	3717	10.18	4.243E-01	7.345E-03	3.060E-04
720	3852	10.55	4.397E-01	7.602E-03	3.167E-04
740	3927	10.76	4.482E-01	7.741E-03	3.226E-04
760	3949	10.82	4.508E-01	7.778E-03	3.241E-04
780	3919	10.74	4.474E-01	7.713E-03	3.214E-04
800	3842	10.53	4.386E-01	7.565E-03	3.152E-04
820	3765	10.31	4.298E-01	7.415E-03	3.090E-04
840	3688	10.10	4.210E-01	7.266E-03	3.028E-04
860	3609	9.89	4.120E-01	7.113E-03	2.964E-04
880	3531	9.67	4.031E-01	6.962E-03	2.901E-04
900	3463	9.49	3.953E-01	6.835E-03	2.848E-04
920	3426	9.39	3.911E-01	6.770E-03	2.821E-04
940	3422	9.37	3.906E-01	6.767E-03	2.820E-04
960	3450	9.45	3.939E-01	6.830E-03	2.846E-04
980	3512	9.62	4.009E-01	6.956E-03	2.898E-04
1000	3598	9.86	4.108E-01	7.133E-03	2.972E-04
1020	3712	10.17	4.237E-01	7.364E-03	3.068E-04
1040	3858	10.57	4.404E-01	7.665E-03	3.194E-04
1060	4060	11.12	4.634E-01	8.064E-03	3.360E-04
1080	4254	11.65	4.856E-01	8.442E-03	3.517E-04
1100	4408	12.08	5.032E-01	8.736E-03	3.640E-04
1120	4514	12.37	5.153E-01	8.939E-03	3.725E-04
1140	4583	12.56	5.232E-01	9.075E-03	3.781E-04
1160	4644	12.72	5.301E-01	9.186E-03	3.828E-04
1180	4658	12.76	5.317E-01	9.200E-03	3.833E-04
1200	4602	12.61	5.254E-01	9.065E-03	3.777E-04
1220	4422	12.12	5.048E-01	8.716E-03	3.632E-04
1240	4250	11.64	4.851E-01	8.386E-03	3.494E-04
1260	4096	11.22	4.676E-01	8.092E-03	3.372E-04

- peso specifico del materiale	1700 Kg/m ³
- peso specifico dell'acqua di mare:	1030 Kg/m ³
- spessore del banco di sedimenti :	> 10 m
- coefficiente di scabrezza di Manning:	0,02
- fattore di forma :	0,67
- coefficiente di erosione:	1
- coefficiente di deposito :	10
- coefficiente di diffusione:	1
- Coefficiente di Crank-Nicholson:	0.67

Ogni simulazione è relativa ad un arco temporale di circa 60 giorni al fine di individuare in modo qualitativo il trend all'interno del bacino.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per ognuno dei casi analizzati.

10.2.1 CASO 1: FORZANTE DI MAREA

All'interno del dominio indagato, il regime correntometrico è dovuto al semplice fenomeno afflusso/deflusso dovuto alle oscillazioni di livello per marea.

Le velocità sono comprese tra 0 e 7 mm/s.

Le velocità maggiori si instaurano in prossimità dell'imboccatura del bacino protetto; in corrispondenza della sezione di passaggio tra la darsena polifunzionale e il canale di vivificazione e nel tratto del canale di vivificazione compreso tra la testata e la radice del pennello.

Le velocità minori si osservano nei punti più interni dell'area cantieristica, tra i pali della darsena polifunzionale; in prossimità del molo di sottoflutto del Marina di Archimede, lungo la banchina di riva del Marina di Archimede e all'esterno del molo foraneo dell' Approdo in progetto.

Inoltre per via dell'escursione di marea è possibile che si formino all' interno del canale di vivificazione delle aree soggette a prosciugamento lungo la linea di riva della terra ferma.

Il regime idrodinamico appena descritto è stato utilizzato come input per SED2D.

Tra le aree soggette a trascurabili erosioni vi sono:

- lungo il canale di accesso all'approdo protetto, tra il molo foraneo su pali e il molo di sopraflutto del Marina di Archimede.
- il canale di ingresso all'area cantieristica presso lo scalo di alaggio,
- il canale di vivificazione, presso la sezione compresa tra la banchina di riva e la radice del pennello;
- gli ingressi della darsena polifunzionale;

-
- il canale di accesso del Marina di Archimede.

Tra le aree soggette a trascurabili sedimentazioni vi sono:

- punti interni del bacino del Marina di Archimede, del bacino della cantieristica e dello scalo di alaggio;
- le acque basse limitrofe al pennello antisedimentazione lungo il lato rivolto alla foce del f. Anapo,
- la radice del molo foraneo su pali sul versante lato porto,
- le acque lungo il lato esterno del molo foraneo,
- le aree in prossimità dei due moli del Marina di Archimede e presso i banchinamenti del Molo S. Antonio,
- le aree di fronte la banchina di riva presso l'ingresso della darsena polifunzionale.

I trend descritti sono compatibili con quelli ottenuti durante le simulazioni sul trasporto longshore effettuate con GENESIS, considerando le opere di mitigazione (molo foraneo e pennello antisedimentazione), come opache ai fini del trasporto litoraneo (cfr. i paragrafi 9.2.4 e 9.2.5).

10.2.2 CASO 2: FORZANTI DI MAREA E SCIROCCO

All'interno del dominio indagato, il regime correntometrico è dovuto all'interazione tra le forzanti di marea e scirocco.

Le velocità sono comprese tra 0 e 10 mm/s.

Il campo delle velocità corrisponde in linee generali a quello delle simulazione precedente.

In particolare si osserva un regime correntometrico più ridotto all'esterno del molo foraneo e all'uscita del canale di ingresso nei momenti di flusso in uscita; velocità maggiori si verificano invece nel tratto del canale di vivificazione tra la banchina di riva e la radice del pennello.

Il regime idrodinamico appena descritto è stato utilizzato come input per SED2D.

Di seguito si riporta l'immagine relativa alla variazioni del fondale dovute al regime idrodinamico appena descritto, ritenuta identificativa dei trend erosivi/sedimentologici.

Il trend erosivo/sedimentologico simulato conferma quello del caso precedente.

Il regime correntometrico dovuto alle forzanti di scirocco e marea, provoca una riduzione delle aree caratterizzate dal possibile fenomeno di erosione.

Le aree in cui è possibile che avvenga il fenomeno dell'erosione si localizzano ancora presso i canali di accesso agli approdi e dove le sezioni idriche sono ridotte e le velocità sono maggiori.

I trend descritti sono compatibili con quelli ottenuti durante le simulazioni sul trasporto longshore effettuate con GENESIS, considerando le opere di mitigazione (molo foraneo e pennello antisedimentazione), come opache ai fini del trasporto litoraneo (cfr. i paragrafi 9.2.4 e 9.2.5).

10.2.3 CASO 3: FORZANTI DI MAREA E GRECALE

All'interno del dominio indagato, il regime correntometrico è dovuto all'interazione tra le forzanti di marea e vento da Grecale.

Le velocità sono comprese tra 0 e 5 mm/s.

Il campo delle velocità corrisponde in linee generali a quello delle simulazioni precedenti.

In particolare si osserva un regime correntometrico più marcato all'esterno del molo foraneo e all'uscita del canale di ingresso nei momenti di flusso in uscita; velocità maggiori si verificano invece nel tratto del canale di vivificazione tra la banchina di riva e la radice del pennello.

Il regime idrodinamico appena descritto è stato utilizzato come input per SED2D.

Il trend erosivo/sedimentologico simulato conferma quello dei casi precedenti.

Il regime correntometrico dovuto alle forzanti di Grecale e marea, provoca una ulteriore riduzione delle aree che potrebbero essere soggette ad sedimentazione.

Le aree soggette che potrebbero essere soggette ad erosione si localizzano presso i canali di accesso agli approdi e dove le sezioni idriche sono ridotte e le velocità maggiori.

I trend descritti sono compatibili con quelli ottenuti durante le simulazioni sul trasporto longshore effettuate con GENESIS, considerando le opere di mitigazione (molo foraneo e pennello antisedimentazione), come opache ai fini del trasporto litoraneo (cfr. i paragrafi 9.2.4 e 9.2.5).

Inoltre, i trend di sedimentazione/erosione, per il caso in esame, sono compatibili con quelli ottenuti nell'ambito dello studio idro-morfodinamico per il sito del Porto Grande, redatto dalla società THESIS S.P.A su incarico di " Sviluppo Italia Aree Produttive (SIAP)", nel periodo settembre 2006 - dicembre 2007, a cui si rimanda.

10.2.4 CONCLUSIONI

Ai fini di stabilire se il bacino protetto possa soffrire di interrimenti fisiologici e valutare qualitativamente i fenomeni di deposizione/erosione è stata effettuata una analisi modellistica, applicando a partire dai risultati RMA2, il codice SED2D.

Tale modello nasce per le indagini sedimentologiche nell'ambito dell'idraulica fluviale ma il suo uso può essere esteso anche al caso dei bacini portuali.

Sono stati implementati i tre casi ritenuti più significativi:

- Regime correntometrico indotto dalla forzante di marea;
- Regime correntometrico indotto dalle forzanti di marea e vento da Scirocco;
- Regime correntometrico indotto dalle forzanti di marea e vento da Grecale.

Tra le aree soggette a trascurabili erosioni vi sono:

- il canale di accesso all'approdo protetto, tra il molo foraneo su pali e il molo di sopraflutto del Marina di Archimede;
- il canale di ingresso all'area cantieristica presso lo scalo di alaggio,
- il canale di vivificazione, presso la sezione compresa tra la banchina di riva e la radice del pennello,
- gli ingressi della Darsena Polifunzionale,
- il canale di accesso del Marina di Archimede,

Tra le aree soggette a trascurabili sedimentazioni vi sono:

- i punti interni del bacino del Marina di Archimede, del bacino della cantieristica e dello scalo di alaggio;
- le acque basse limitrofe al pennello lungo il lato rivolto alla foce dell'Anapo,
- radice del molo foraneo su pali sul versante lato porto,
- le acque lungo il lato esterno del molo foraneo,
- le aree in prossimità dei due moli del Marina di Archimede e presso i banchinamenti del molo S. Antonio.;
- le aree di fronte la banchina di riva presso l'ingresso della darsena polifunzionale.

Tale trend evolutivo qualitativo è stato confermato in tutte e tre le simulazioni.

I tre casi simulati si differenziano tra loro per differenze minimali tra le aree soggette ad erosione ed aree soggette ad sedimentazione.

Si conclude che molto probabilmente il trend evolutivo reale sarà una combinazione dei tre casi analizzati.

A conferma dei trend qualitativi individuati, si osserva che quest'ultimi sono compatibili con le previsioni ottenute:

- con le applicazioni di tipo GENESIS sull'evoluzione della linea di riva, considerando le opere di mitigazione (molo foraneo e pennello antisedimentazione), come opache ai fini del trasporto litoraneo (cfr. i paragrafi 9.2.4 e 9.2.5).
- nell'ambito dello studio idro-morfodinamico per il sito del Porto Grande, redatto dalla società THESIS S.P.A su incarico di " Sviluppo Italia Aree Produttive (SIAP)", nel periodo settembre 2006 - dicembre 2007.

Si conferma, infine, la buona risposta delle soluzioni ingegneristiche adottate ai fini della mitigazione dei suddetti fenomeni.

11. CONCLUSIONI

Il presente studio è stato redatto con lo scopo di chiarire quali siano le dinamiche relative al trasporto litoraneo all'interno del sito del Porto Grande ed in particolare del tratto di costa interessato dalle opere in progetto, identificando quali siano le conseguenze che derivano dalla realizzazione delle opere previste dal progetto definitivo sulla linea di riva interessata, e di indicare gli interventi atti a mitigare e/o a compensare gli eventuali fenomeni ad impatto negativo.

Dopo aver raccolto le informazioni di tipo climatico, ondametrico, correntometrico idrologico-idraulico ottenute durante la redazione delle altre relazioni tecniche costituenti il corpo documentale del progetto definitivo, sono state effettuate le indagini sulla dinamica della costa, individuando i trend di evoluzione della costa e le caratteristiche delle componenti cross-shore e long-shore del trasporto solido litoraneo.

Innanzitutto è stata effettuata l'analisi diacronica (cfr. elaborato B.3.3-SDC).

Tale analisi ha permesso di evidenziare le tendenze evolutive dei litorali, che negli ultimi anni (periodo 1994-2008) hanno interessato il tratto di costa in esame ed in particolare:

- il litorale a sud, oltre l'area dei Pantani, è fondamentalmente in equilibrio,
- il litorale a nord, compreso tra la foce del fiume Anapo e l'area destinata ad ospitare le opere in progetto, è soggetto ad un trend di arretramento della linea di costa.

In virtù delle informazioni estrapolate dagli altri studi tecnici redatti sono state effettuati delle deduzioni sulle possibili cause dei trend evolutivi identificati.

Dal punto di vista del trasporto solido fluviale, tali trend possono essere attribuiti ad una probabile diminuzione degli apporti solidi dei corsi d'acqua che sfociano nel Porto Grande ed in particolare dei canali Regina e Pisimotta deviati nel canale Pantanelli a monte del rilevato ferroviario (cfr. elaborato B.5-SIDR "Studio idrologico – idraulico") e principalmente quelli provenienti dal F. Anapo, che in questi anni è stato interessato da lavori di sistemazione idraulica.

Dal punto di vista dell'idrodinamica (cfr. elaborato B.3.1-SDC-"Studio Idrodinamico"), si ricorda che all'interno del Porto Grande si è osservata la formazione di una cella di circolazione principale che localizzata tra foce del F. Anapo e Ortigia avente una notevole componente longshore, che è stata individuata come la principale causa dei trend evolutivi osservati.

Dal punto di vista ondometrico, le caratteristiche delle onde sottocosta incidenti (responsabili dei fenomeni di trasporto cross-shore) sono tali che le altezze sottocosta sono ridotte e che la fascia di frangenza si localizza sulle batimetriche di -1, -2 m sotto il l.m.m. (cfr. elaborato B.2-SIM-"Studio Idraulico Marittimo"), il che implica che la componente offshore sia poco significativa.

A conferma di queste deduzioni sono state effettuate valutazioni sulle due componenti sopracitate.

Per quanto riguarda la componente cross-shore del trasporto solido, a seguito delle applicazioni numeriche eseguite tramite il modello SBEACH, si è osservato una ridotta influenza dei fenomeni di trasporto in direzione trasversale su tutto il litorale del Porto Grande.

Per quanto riguarda la componente long-shore del trasporto solido litoraneo, a seguito delle analisi condotte con codice GENESIS, è stato confermato che lungo il litorale nord il regime del trasporto solido litoraneo è effettivamente governato dalla componente longshore e che il trend di evoluzione sia quello individuato dall'analisi diacronica.

Inoltre, la previsione di possibili accumuli all'interno dell'area destinata alla realizzazione del canale di vivificazione e dello specchio idrico protetto a seguito delle simulazioni GENESIS, ha determinato la scelta progettuale di realizzare dispositivi adatti a mitigare i fenomeni di sedimentazione; tali dispositivi sono stati individuati nelle strutture del molo foraneo del pennello antisedimentazione.

Sono state quindi effettuate altre simulazioni numeriche con lo scopo di identificare qualitativamente l'evoluzione futura della linea di riva nel medio termine (arco temporale pari a 10 anni) nell'ipotesi di diversi scenari di intervento, in funzione del grado di permeabilità delle opere di mitigazione.

Sono stati analizzati quattro distinti scenari:

- scenario 0 (presenza del banchinamento di riva e delle opere del Marina di Archimede);
- scenario 1 (costruzione delle opere previste in progetto con un grado di permeabilità elevato)
- scenario 2 (costruzione delle opere previste in progetto con un grado di permeabilità basso)
- scenario 3 (costruzione delle opere previste in progetto con un grado di permeabilità nullo).

L'implementazione di opere ad elevata permeabilità (scenario 1) provoca rispetto alla situazione relativa all'assenza delle opere (scenario 0) solo una leggera riduzione degli scostamenti sia in avanzamento sia in erosione della linea di costa rispetto allo scenario 0, pari al massimo a qualche metro (cfr. elaborato B.3.4-SDC).

Lo scenario 2 (opere a bassa permeabilità) prevede una riduzione degli scostamenti sia in avanzamento sia in erosione della linea di riva rispetto a quella di partenza; l'entità di tali riduzioni è variabile fino a qualche decina di metri rispetto alle linee di riva finali dei precedenti scenari di analisi (cfr. elaborato B.3.4-SDC).

Lo scenario 3 (opere opache) prevede un'ulteriore riduzione degli scostamenti della linea di riva: ciò implica l'aumento del deposito presso le radici del molo foraneo e del pennello, lungo il lato rivolto a sud, la riduzione del deposito all'interno del canale di vivificazione ed una leggera traslazione verso sud del tratto in erosione (cfr. elaborato B.3.4-SDC).

Si conviene che le opere di mitigazione (molo foraneo e pennello antisedimentazione), da considerare come "opache" ai fini del trasporto litoraneo, sono caratterizzate da un'impatto positivo poiché inducono la riduzione dei possibili fenomeni di deposito all'interno del canale di vivificazione e dello specchio idrico, sia dei fenomeni di erosione lungo il litorale limitrofo, salvaguardandone la fruibilità.

Infine, a conferma dei risultati ottenuti relativi alle indagini svolte per determinare se il bacino protetto possa soffrire di interrimenti fisiologici e valutare qualitativamente i fenomeni di deposizione erosione all'interno del bacino portuale, è stata effettuata una ulteriore analisi modellistica, applicando a partire dai risultati RMA2 il codice SED2D nato per le indagini sedimentologiche nell'ambito dell'idraulica fluviale e adattato anche al caso dei bacini portuali.

Sono stati implementati tre casi, ritenuti più significativi:

- Regime correntometrico indotto dalla forzante di marea,
- Regime correntometrico indotto dalle forzanti di marea e vento da Scirocco,
- Regime correntometrico indotto dalle forzanti di marea e vento da Grecale.

In ognuna delle simulazioni effettuate è stato identificato lo stesso trend evolutivo globale.

Tra le aree soggette a trascurabili erosioni vi sono:

- il canale di accesso all'approdo protetto, tra il molo foraneo su pali e il molo di sopraflutto del Marina di Archimede.
- il canale di ingresso all'area cantieristica presso lo scalo di alaggio,
- il canale di vivificazione, presso la sezione compresa tra la banchina di riva e la radice del pennello,
- gli ingressi della Darsena Polifunzionale,
- il canale di Accesso del Marina di Archimede.

Tra le aree soggette a trascurabili sedimentazioni vi sono:

- i punti interni del bacino del Marina di Archimede, del bacino della cantieristica e dello scalo di alaggio,
- le acque basse limitrofe al pennello,

-
- la radice del molo foraneo su pali sul versante lato porto,
 - le acque lungo il lato esterno del molo foraneo,
 - le aree in prossimità dei due moli del Marina di Archimede e presso i banchinamenti del molo S. Antonio.
 - le aree di fronte la banchina di riva presso l'ingresso della darsena polifunzionale.

A conferma dei trend qualitativi individuati, si osserva che quest'ultimi sono compatibili con le previsioni ottenute:

- con le applicazioni di tipo GENESIS sull'evoluzione della linea di riva, considerando le opere di mitigazione (molo foraneo e pennello antisedimentazione), come opache ai fini del trasporto litoraneo,
- nell'ambito dello studio idro-morfodinamico per il sito del Porto Grande, redatto dalla società THESIS S.P.A su incarico di " Sviluppo Italia Aree Produttive (SIAP)", nel periodo settembre 2006 - dicembre 2007.

Si conferma, infine, la buona risposta delle soluzioni ingegneristiche adottate ai fini della mitigazione dei suddetti fenomeni.

SIRACUSA, 21/06/2023

ILTECNICO

ING.PAOLO CALAFIORE
