

REGIONE CAMPANIA  
PROVINCIA di SALERNO



UNIONE DEI COMUNI VELINI  
COMUNE DI CASAL VELINO

MESSA IN SICUREZZA ED ADEGUAMENTO  
INFRASTRUTTURALE  
DEL PORTO DI MARINA DI CASAL VELINO  
I° LOTTO - STRALCIO FUNZIONALE  
CIG : 7400806A4E - CUP : B79F17000080009

# PROGETTO DEFINITIVO

Titolo elaborato :

## STUDIO MORFOLOGICO

1 8 0 0 2 P D R 0 4 - 1 M A R

Committente:  
Comune di Casal Velino

Area Tecnica  
Ufficio Urbanistica, Lavori  
Pubblici, Pianificazione

Responsabile del Procedimento  
Arch. Angelo GREGORIO

Progettazione:  
RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO

Capogruppo:

**MODIMAR**  
Via Monte Zebio 40 00195 ROMA

Mandanti:

Dott. Ing. Luigi RISPOLI  
Dott. Ing. Eugenio LOMBARDI  
Dott. Ing. Davide VASSALLO  
Dott. Geol. Michele CAMMAROTA  
POIESIS S.r.l. - Servizi per i Beni Culturali

Gruppo di lavoro:

Dott. Ing. Paolo CONTINI  
Dott. Ing. Davide SALTARI  
Dott. Ing. Marco DEL BIANCO  
Geom. Renzo PAREGGIANI

Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:
Dicembre 2019	1	Adeguamento a seguito parere SABAP SA-AV ed Ente PARCO	SALTARI	SALTARI	CONTINI
Dicembre 2018	0	EMISSIONE	SANZONE	SALTARI	CONTINI

La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo documento con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta.  
This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission

Visto del Committente:

COMUNE DI CASAL VELINO

INTERVENTI DI “MESSA IN SICUREZZA E ADEGUAMENTO INFRASTRUTTURALE  
DEL PORTO DI MARINA DI CASAL VELINO”  
1° LOTTO STRALCIO FUNZIONALE

PROGETTO DEFINITIVO

**RELAZIONE GEOMORFOLOGICA**

**Committente:**

Comune di Casal Velino  
P. zza XXIII Luglio n° 6  
84040 – Casal Velino (SA)

**Progettisti:**

MODIMAR S.r.l.  
Ing. Luigi Rispoli  
Ing. Eugenio Lombardi  
Ing. Davide Vassallo  
Dott. Geol. Michele Cammarota  
Soc. POIESIS

## **INDICE**

<b>1</b>	<b>PREMESSE .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INGUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO .....</b>	<b>3</b>
	2.1 Caratteristiche principali dell'unità fisiografica .....	3
	2.2 Elementi Principali dell'unità fisiografica .....	6
<b>3</b>	<b>ANALISI MORFOLOGICHE IN FUNZIONE DELLE LINEE DI RIVA STORICHE .....</b>	<b>10</b>
	3.1 Dati cartografici di riferimento: selezione ed analisi qualitativa .....	10
	3.2 Analisi diacronica delle linee di riva .....	15
	3.3 Calcolo del trasporto solido litoraneo .....	21
<b>4</b>	<b>INTEGRAZIONI E CHIARIMENTI CONSEGUENTI ALLA PRESENTAZIONE DELLE ISTANZE DI PRONUNCIA PRELIMINARE AGLI ENTI COMPETENTI .....</b>	<b>27</b>

## **1 PREMESSE**

La presente relazione riporta l'aggiornamento dello studio specialistico morfologico (precedentemente elaborato in fase di progettazione preliminare) redatto nell'ambito della progettazione definitiva degli interventi necessari per l'adeguamento e la messa in sicurezza del Porto di Marina di Casal Velino – I Lotto Stralcio Funzionale.

Lo studio è finalizzato all'analisi dei fenomeni di morfologia costiera con particolare riferimento alle tendenze evolutive della posizione della linea di riva.

L'insieme dei risultati ottenuti dal suddetto studio permette di individuare la tendenza evolutiva del litorale in oggetto, fornendo così una stima qualitativa e quantitativa dei fenomeni morfologici che interessano questo tratto di costa.

L'analisi dell'evoluzione delle linee di riva risulta essere propedeutica allo studio morfodinamico finalizzato alla valutazione degli effetti degli interventi in progetto sui litorali limitrofi.

La relazione si compone di due parti:

1. inquadramento geografico e morfologico del sito;
2. una analisi diacronica delle linee storiche di riva finalizzata alla stima del trasporto solido longitudinale.

## **2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E MORFOLOGICO**

Il litorale appartenente al Comune di Casal Velino è posto sulla costa tirrenica, e si estende per circa 6.5 km tra il paese di Pioppi (confine con il comune di Pollica) e la foce del Fiume Alento (confine con il comune di Ascea) (Figura 1). Il litorale di Casal Velino ricade all'interno dell'unità fisiografica che si sviluppa per circa 13 km da torre La Punta, ad ovest di Marina di Casal Velino, fino alla Torre del Telegrafo a sud di Ascea (Figura 2).

### *2.1 Caratteristiche principali dell'unità fisiografica*

#### Morfotipi

L'unità fisiografica in cui ricade Casal Velino è caratterizzata dalla presenza di diversi morfotipi costieri (Figura 2). Procedendo da nord verso sud si incontra tra Torre la Punta e il torrente Mortelle un tratto a costa alta costituita da una formazione prevalentemente argilloso-marnoso, che assume le caratteristiche tipiche della falesia "viva", con altezza inferiore ai 10 m, al piede della falesia è presente un deposito ghiaioso-ciottoloso di ampiezza massima di 3 metri. Successivamente in corrispondenza della foce del torrente Mortelle si incontra un tratto caratterizzato dalla presenza di depositi di tipo ghiaioso ed una tratto antropizzato caratterizzato dalla presenza di opere distaccate di difesa costiera in corrispondenza del centro abitato di Pioppi. Proseguendo si incontra nuovamente un tratto di falesia bassa, di estensione di circa 2,3 km, che interessa la costa che va da Pioppi fino quasi al porto di Casal Velino. Presenta altezze massime di circa 10 m e pendenze dell'ordine dei 60°. Anche in corrispondenza di questa falesia la spiaggia al piede, costituita da ghiaia e ciottoli, presenta larghezza massima di tre metri.

Dal porto di Marina di Casal Velino in poi si incontra un diverso morfotipo costiero: costa bassa e sabbiosa che si estende per circa 3 km fino a Torre la Punta. La granulometria

della costa bassa è costituita da sabbie medio-fini ed in prossimità della battigia da ghiaie e sabbie medio-grossolane. La spiaggia sommersa ha una pendenza variabile tra 2:100 e 4:100.

Il tratto di Marina di Casal Velino è caratterizzato dalla presenza di diversi interventi antropici, innanzitutto il porto di Casal Velino, la cui conformazione planimetrica è del tipo a bacino, costituito da un molo sopraflutto (principale) a levante e da un molo sottoflutto (secondario) a ponente, entrambi del tipo a gettata con scogliera in massi naturali lato mare, banchina a massi sovrapposti lato terra e massiccio di coronamento con muro paraonde in calcestruzzo.

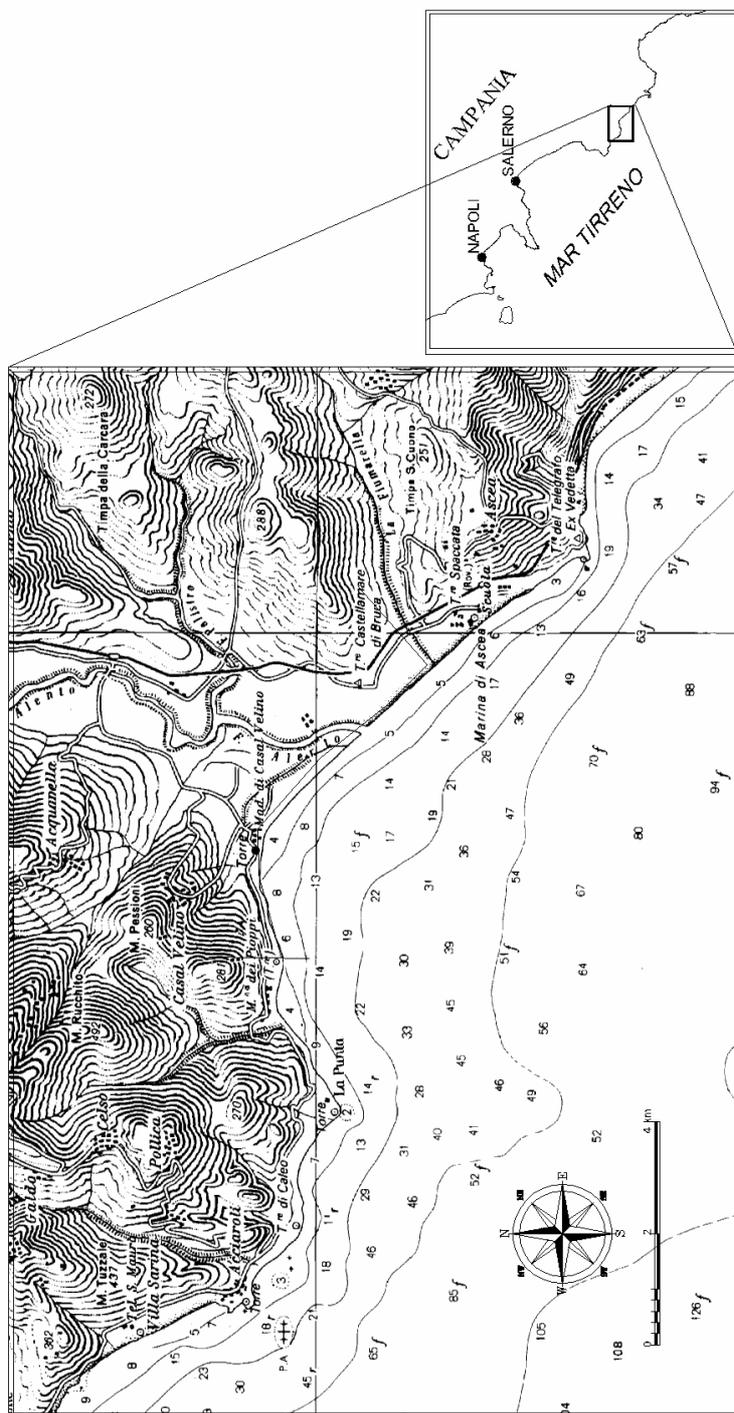


Figura 1: Corografia dell'unità fisiografica ove ricade il litorale in esame.

(Fonte: Istituto Idrografico della Marina - Foglio 11- Da Punta Licosa a Diamante)

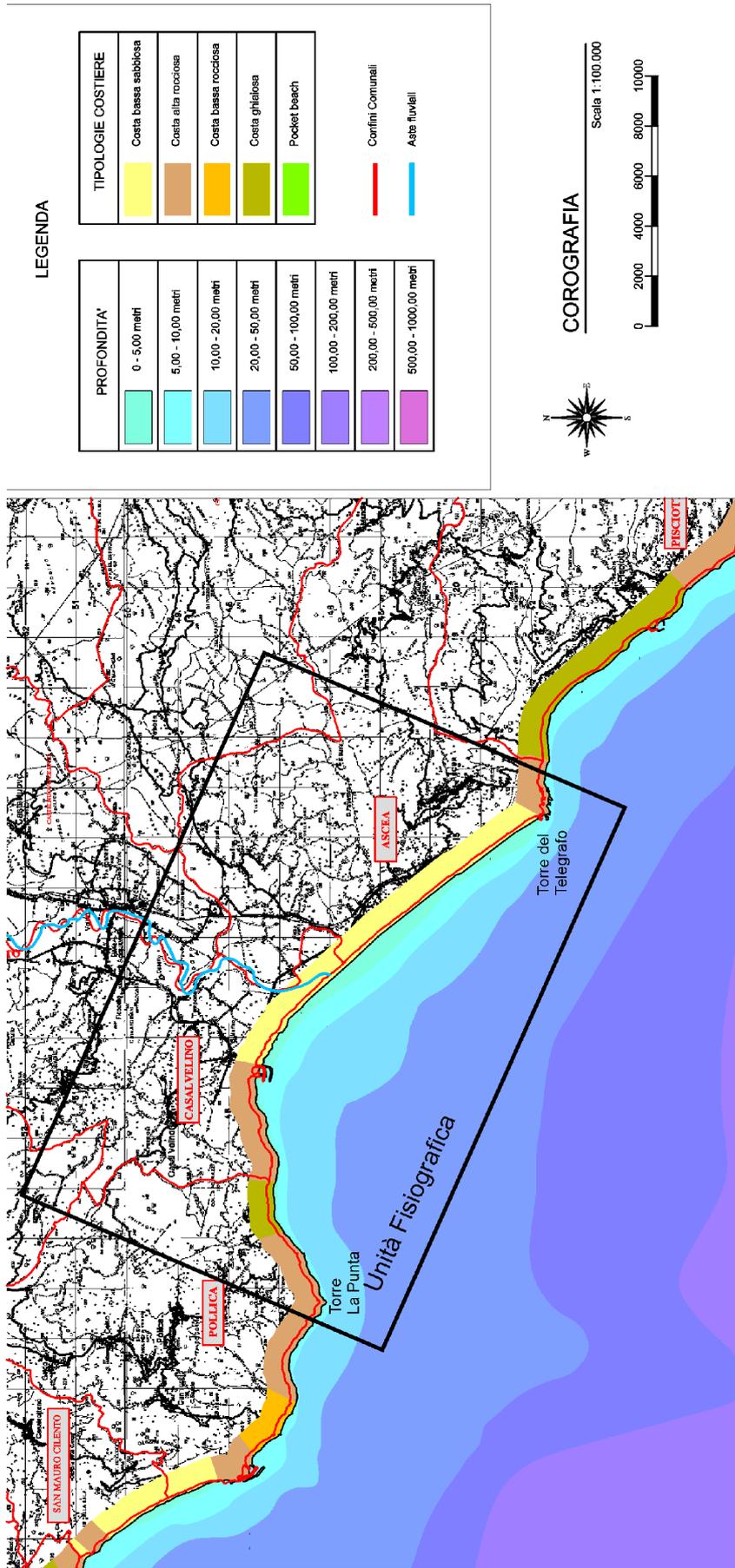


Figura 2. Batimetria e tipologie costiere dell'unità fisiografica.  
(cartografia: Piano Stralcio Erosione Costiera- Autorità di Bacino Sinistra Sele)

Il tratto di litorale a ponente del porto di Marina di Casal Velino è contraddistinto da fronti di falesia “attive” con depositi prevalentemente ghiaiosi e ciottolosi al piede. A ridosso del molo di sottoflutto del porto vi è un ampio deposito sabbioso che sotto l’azione del moto ondoso tende a divagare verso l’imboccatura portuale.

Il tratto di costa dinanzi all’abitato di Marina di Casal Velino presenta diversi interventi di difesa costiera, subito a levante del porto si incontra una successione di nove scogliere frangiflutti, emerse, in massi naturali, poste in opera a protezione del litorale sabbioso.

Proseguendo a levante verso la foce del fiume Alento si incontrano diverse difese radenti realizzate in passato a protezione di edifici oramai interessati dall’azione diretta del moto ondoso. Per tale motivo recentemente (2009 -2013) sono state realizzate altre opere di difesa “a celle” sia nel tratto di costa antistante l’abitato di Marina di Casal Velino sia davanti l’altro centro abitato di Marina di Ascea. Tali opere di difesa costiera, costituite da due pennelli trasversali di estremità e da una scogliera sommersa, sono state realizzate dall’Autorità di Bacino Sx Sele ad integrazione di quelle già esistenti, per contrastare il continuo e progressivo arretramento della linea di riva che caratterizza il paraggio in esame. Il tratto di costa successivo a quello in cui è attualmente presente l’opera di difesa di Marina di Ascea, che si estende dalla foce del fiume Alento fino alla foce della Fiumarella, prosegue fino a raggiungere il promontorio di Torre del Telegrafo contraddistinto da affioramenti rocciosi.

La costa bassa è caratterizzata da distinti ordini di cordoni dunari, alcuni antropizzati ed altri invece in erosione. I cordoni dunari risultano stabilizzati, con altezza media di 1 m. Le dune sono costituite da sabbie con stratificazione incrociata e coperte da vegetazione bassa, tipica di questo ambiente.

## *2.2 Elementi Principali dell’unità fisiografica.*

Un’unità fisiografica è governata da un delicato equilibrio tra i diversi elementi che la interessano: le caratteristiche di esposizione al moto ondoso, le proprietà dei sedimenti lungo il litorale, che ne caratterizzano la capacità di mobilitazione, gli apporti e le perdite di sedimenti lungo il confine dell’unità fisiografica.

Non si può ignorare il ruolo dei corsi d’acqua o prescindere dall’effetto delle correnti longitudinali e trasversali causate dal moto ondoso. L’equilibrio di una spiaggia è quindi il risultato dei diversi fenomeni fisici che avvengono all’interno dell’unità fisiografica.

Per valutare le condizioni medie di esposizione dell’unità fisiografica si è fatto riferimento ai dati ondametrici triorari ricostruiti tra il 1979 ed il 2009 per l’intero bacino del mediterraneo dalla NOAA con il modello di generazione e propagazione del moto ondoso WaveWatch III (WWIII), calibrati e validati sulla base dei dati di moto ondoso storici registrati da luglio 1989 a giugno 2005 dalla boa posta al largo di Ponza ed appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (ISPRA ex APAT).

I dati di altezza, periodo e direzione del moto ondoso sono stati successivamente trasposti al largo di Casal Velino e da qui propagati sottocosta, con un modello di inversa spettrale, in cinque punti di analisi C1, C2, C3, C4 e C5.

L’analisi delle serie propagate sottocosta ha permesso di determinare le condizioni medie di esposizione al moto ondoso dei punti di studio. Tali condizioni possono essere riassunte dall’onda morfologica, valutata come risultante energetica di tutte le onde della serie

storica. Determinata l'altezza d'onda equivalente  $H_e$ , la direzione equivalente  $Dir_e$  ed il periodo equivalente  $T_e$  dell'onda morfologica è possibile valutare la tendenza evolutiva di un litorale. Sotto l'azione dell'energia associata al moto ondoso, rappresentata in modo sintetico proprio dall'onda morfologica, il litorale tenderà a raggiungere nel lungo termine una condizione di equilibrio disponendosi ortogonalmente alla direzione prevalente del flusso di energia del moto ondoso.

Una rappresentazione sintetica delle condizioni di esposizione al moto ondoso dell'unità fisiografica viene riportata in Figura 3 dove sono rappresentati i flussi di energia associati al moto ondoso, su base annuale ed invernale nei punti di propagazione C2, C3 e C4.

Nella stessa Figura 3 sono inoltre riportate sia le caratteristiche delle onde morfologiche calcolate nei diversi punti di propagazione sottocosta che lo stralcio del piano di rischio di erosione costiera, redatto dall'ex Autorità di bacino Sinistra Sele, con l'indicazione delle aree più a rischio distinte per: coste alte di natura rocciosa, o comunque coesiva; coste basse formate da sabbie e sedimenti sciolti.

Come già riportato in precedenza, l'unità fisiografica in esame presenta due distinti morfotipi, quello a costa alta e quello a costa bassa. Prescindendo momentaneamente dal sub-ambiente a costa alta, è possibile riconoscere nel tratto sabbioso i segni di una morfologia tipica delle foci a delta in cui l'azione del moto ondoso risulta dominante. In queste circostanze infatti si assiste ad uno smantellamento dell'apparato di foce; l'evoluzione è dovuta alla differenza tra la capacità di trasporto delle correnti longitudinali indotte dal moto ondoso e l'apporto di sedimenti da parte del fiume.

È da osservare che l'erosione a cui è soggetta la falesia è dovuta principalmente da una dinamica trasversale, tali fenomeni erosivi prendono parte in modo limitato alla dinamica longitudinale.

Sulla base delle indicazioni riportate nella carta tematica del CNR (Figura 4), dei dati riportati nel Piano Stralcio di Erosione Costiera dell'ex Autorità di Bacino Sinistra Sele e dei rilievi fotogrammetrici relativi agli anni 1994, 2000, 2006, 2012 e 2016 è possibile riconoscere all'interno dell'unità i seguenti elementi di rilievo:

- evidenti segni di erosione costiera con tendenza all'arretramento lungo tutta la falcata;
- un clima meteomarinico che presenta una forte direzionalità, con stati di mare provenienti prevalentemente da Sud-Ovest;
- corrente longitudinale e trasporto solido longitudinale generati dal moto ondoso con verso prevalente da Nord-Ovest verso Sud-Est;
- presenza di serie di barre sottomarine che si riducono ad una sola barra alle estremità della falcata;
- cordoni di dune sia allo stato naturale che antropizzati, ben stabilizzati;
- la diga di Pian della Rocca sul fiume Alento, nel comune di Prignano Cilento, realizzata tra il 1984 ed il 1994, ed ulteriori zone umide artificiali realizzate per favorire la sosta e la nidificazione degli uccelli;
- prelievi di sedimenti da cave in alveo lungo i corsi d'acqua.

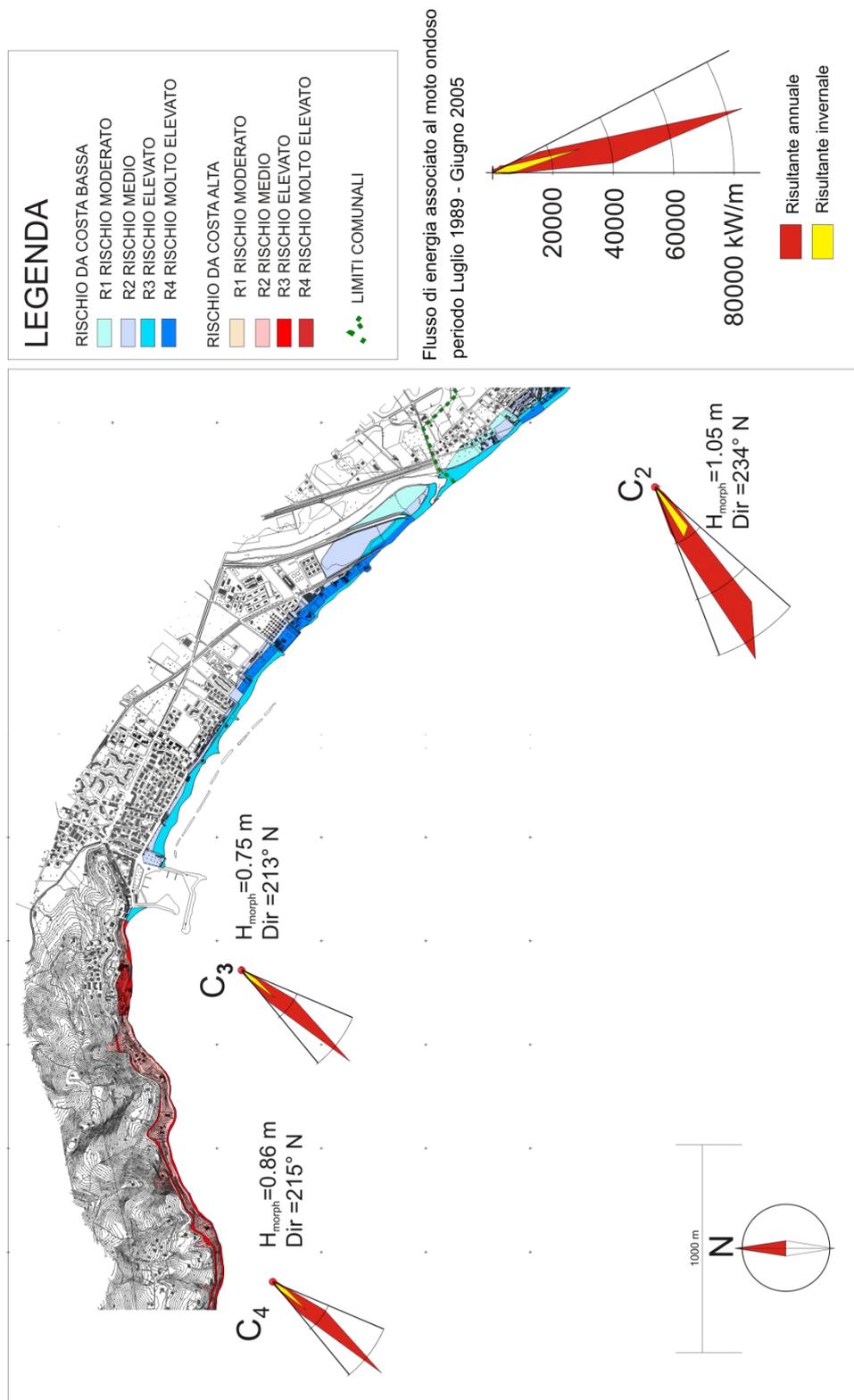


Figura 3. Flussi di energia associate al moto ondoso nei putnti sottocosta C2-C3-C4 e carta del Rischio Erosione per il litorale di Casal Velino (fonte: ex Autorità di Bacino Sx Sele).

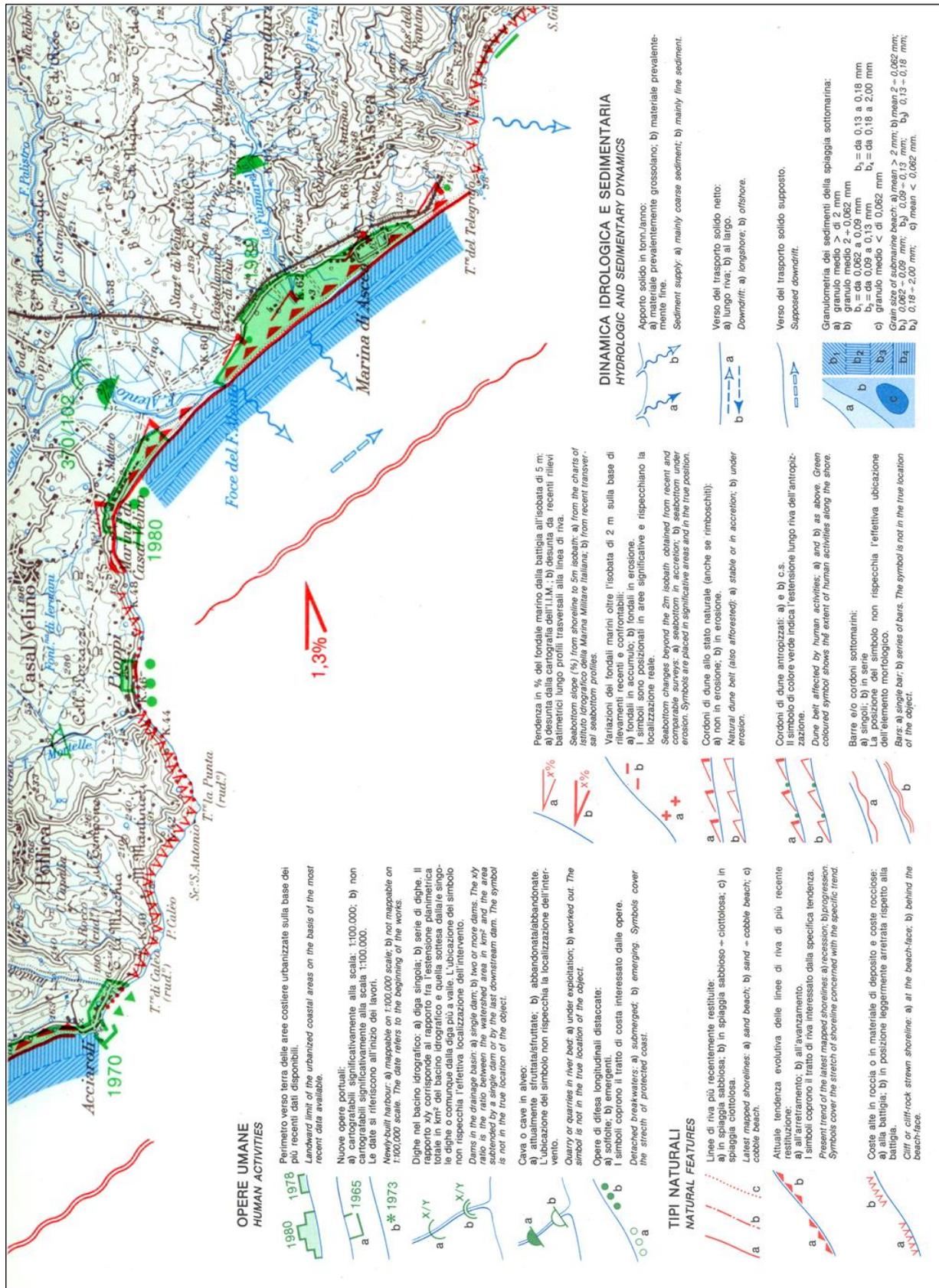


Figura 4: Inquadramento geomorfologico del litorale di Casal Velino. (fonte: Atlante delle Spiagge Italiane-CNR1997).

### **3 ANALISI MORFOLOGICHE IN FUNZIONE DELLE LINEE DI RIVA STORICHE**

Per poter analizzare le tendenze evolutive che negli ultimi decenni hanno interessato il litorale in esame, è stata condotta un'analisi comparativa delle linee di riva "storiche", provenienti da cartografie ed aerofotogrammetrie degli ultimi decenni, opportunamente digitalizzate e georeferenziate su CAD.

Successivamente i dati ottenuti, rappresentativi della posizione della linea di riva relativa ad un riferimento cartesiano, sono stati utilizzati per valutare i ratei annui di variazione della linea di riva e il bilancio solido dei sedimenti.

#### *3.1 Dati cartografici di riferimento: selezione ed analisi qualitativa*

Il primo passo per la ricostruzione storica dell'evoluzione della linea di riva risiede nell'acquisizione dei dati cartografici di base. Lo studio è stato condotto sulla base dei rilievi disponibili delle linee di riva esaminando differenti fonti quali ad esempio carte IGM, rilievi topografici, rilievi aerofotogrammetrici e foto da satellite. Le linee di riva considerate nel presente studio sono relative ai seguenti periodi:

- linee di riva del 1954 (carta 1:25000 IGM);
- linea di riva del 1994 (ortofoto b/n PCN<sup>1</sup>);
- linea di riva del 2000 (ortofoto colori PCN);
- linea di riva del 2006 (ortofoto colori PCN);
- linea di riva del 2012 (ortofoto colori PCN);
- linea di riva del 2016 (ortofoto colori Google Earth);

L'area investigata si sviluppa per circa 4 km tra il centro abitato di Pioppi e la foce del fiume Alento, pertanto viene investigata una buona porzione dell'unità fisiografica che si estende per circa 6.5 km da Punta la Torre sino a Punta del Telegrafo.

L'analisi delle variazioni della posizione della linea di riva ha richiesto una preliminare georeferenziazione e sovrapposizione dei dati disponibili. Per ottenere una buona sovrapposizione sono stati individuati dei capisaldi comuni ai distinti gruppi di dati limitando così l'errore dovuto alle inevitabili distorsioni presenti nella cartografia opportunamente trasferita in formato digitale (mediante lettura ottica e decodifica in forma grafica digitale).

Il risultato della sovrapposizione delle linee di riva è riportato in Figura 5.

Il sistema di riferimento cartesiano assunto per l'analisi delle linee di riva, riportato in Figura 6, presenta l'asse delle ascisse orientato a 150° N, parallelamente all'allineamento medio del litorale. Le linee di riva sono state estrapolate con un passo di discretizzazione di 15 m; in Figura 7 sono riportate in scala distorta le linee di riva digitalizzate.

---

<sup>1</sup> Portale Cartografico Nazionale

Come è possibile osservare la posizione della linea di riva in passato risultava nettamente più avanzata rispetto alla situazione più recente. Le cause di tale arretramento della linea di riva negli ultimi anni sono da ricercare principalmente nella riduzione degli apporti solidi del fiume Alento, che rappresenta la principale risorsa di alimentazione del bilancio solido dell'unità fisiografica. Le portate solide del fiume sono state irrimediabilmente intercettate dalle opere di regimazione idraulica realizzate nell'ultimo decennio. Anche la realizzazione del porto di Casal Velino ha rappresentato un ostacolo per l'originario flusso litoraneo dei sedimenti con ripercussioni nei fenomeni di morfodinamica. L'effetto di tale alterazione è riscontrabile a ridosso del molo di sottoflutto del porto dove i sedimenti vengono ad accumularsi, causando inoltre problemi di insabbiamento per l'imboccatura portuale. Nel contempo la presenza delle opere foranee del porto ha causato una locale tendenza all'erosione lungo il litorale a levante del porto. Tale effetto è stato contrastato in passato con la messa in opera, in più fasi, di diverse scogliere frangiflutti che hanno localmente mitigato gli effetti erosivi innestando in alcuni casi la formazione di salienti e di tomboli a tergo delle opere stesse.

Al di fuori della zona di influenza delle barriere si riscontra un evidente tendenza all'erosione. Per contrastare l'arretramento della linea di riva sono state messe in opera diverse difese radenti.

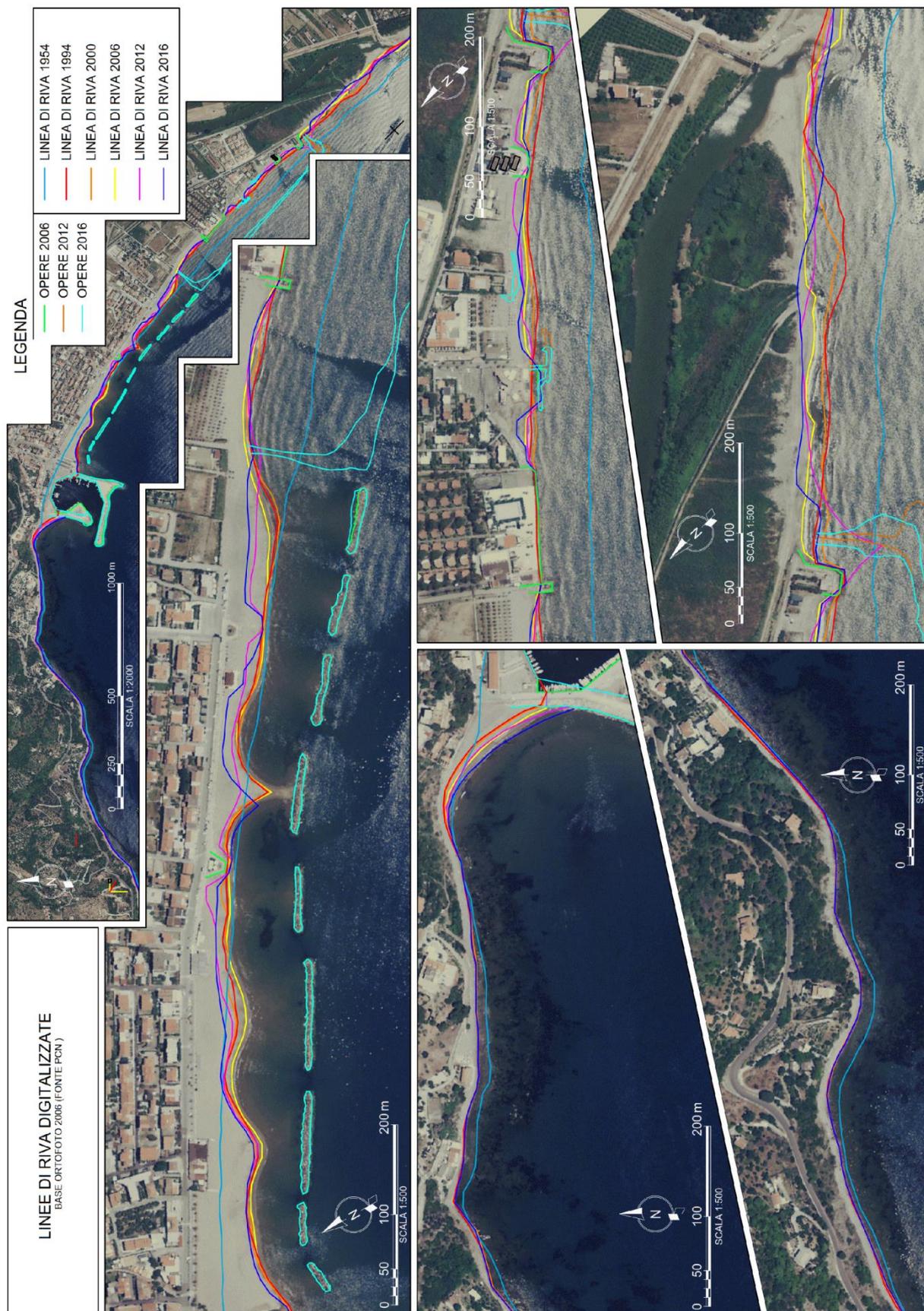


Figura 5. Linee di riva digitalizzate relative agli anni 1954, 1994, 2000, 2006, 2012 e 2016 utilizzate per l'analisi diacronica.

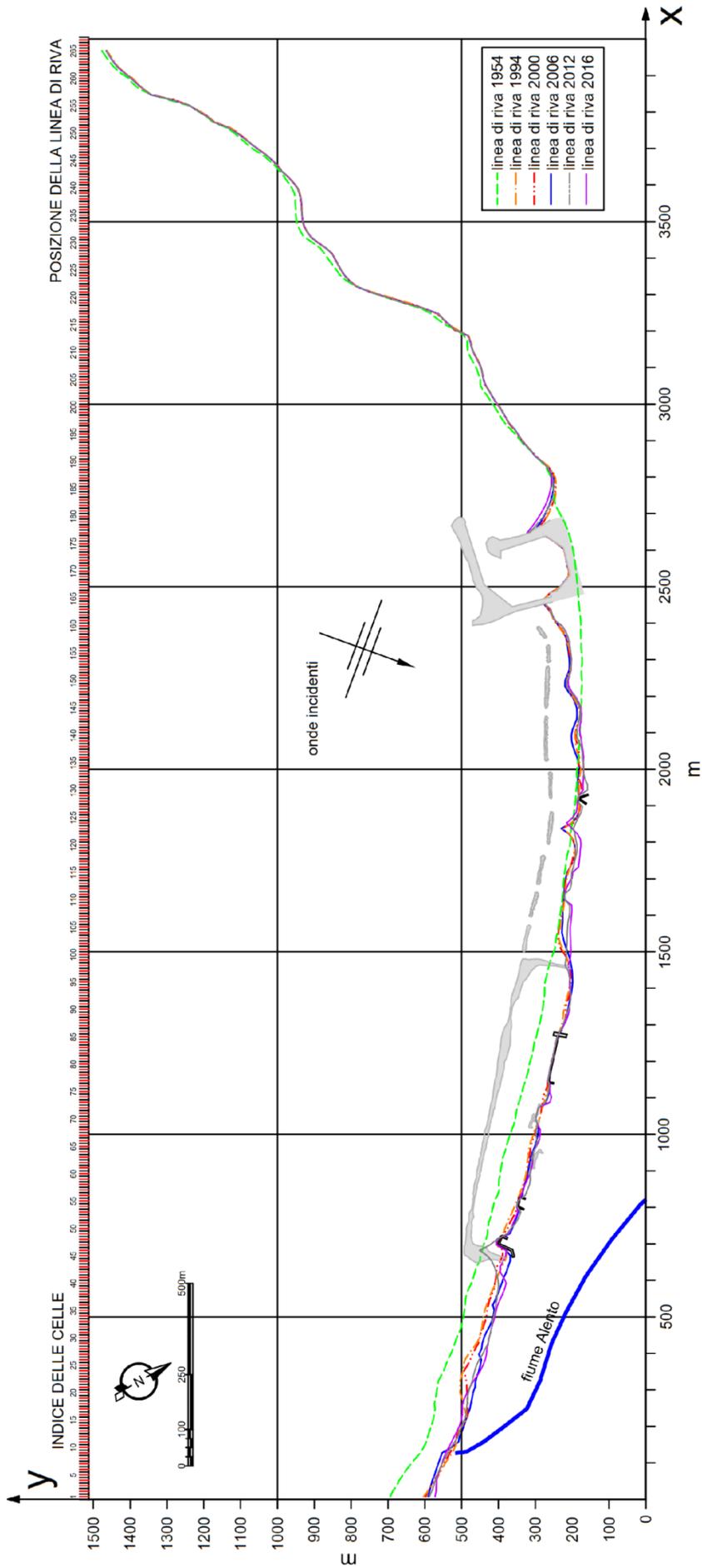


Figura 6 . Sistema di riferimento adottato per l'analisi delle linee di riva.

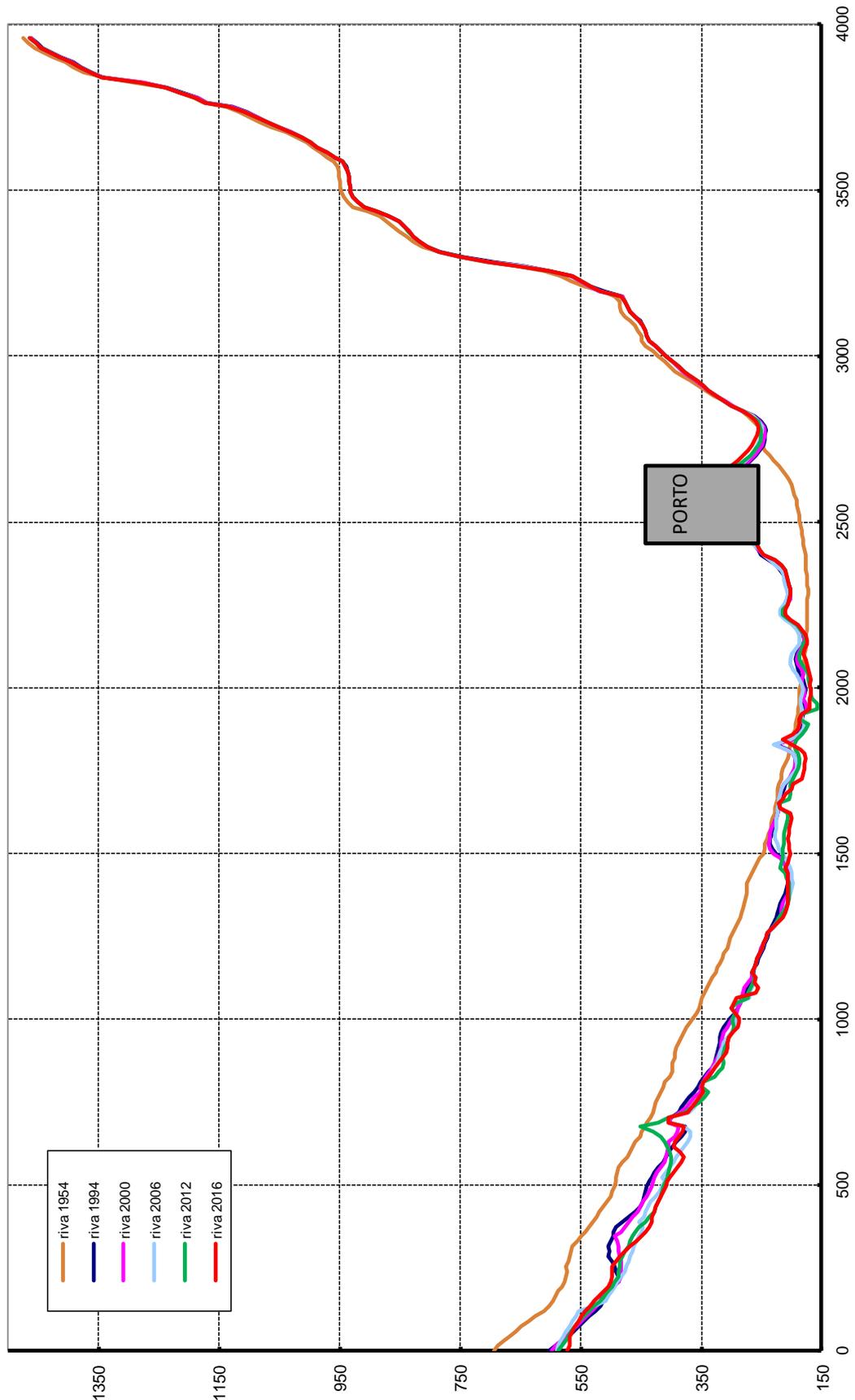


Figura 7. Rappresentazione in scala distorta delle linee di riva del litorale di Casal Velino relative agli anni 1954 - 1994 - 2000 - 2006 - 2012 - 2016.

### 3.2 Analisi diacronica delle linee di riva

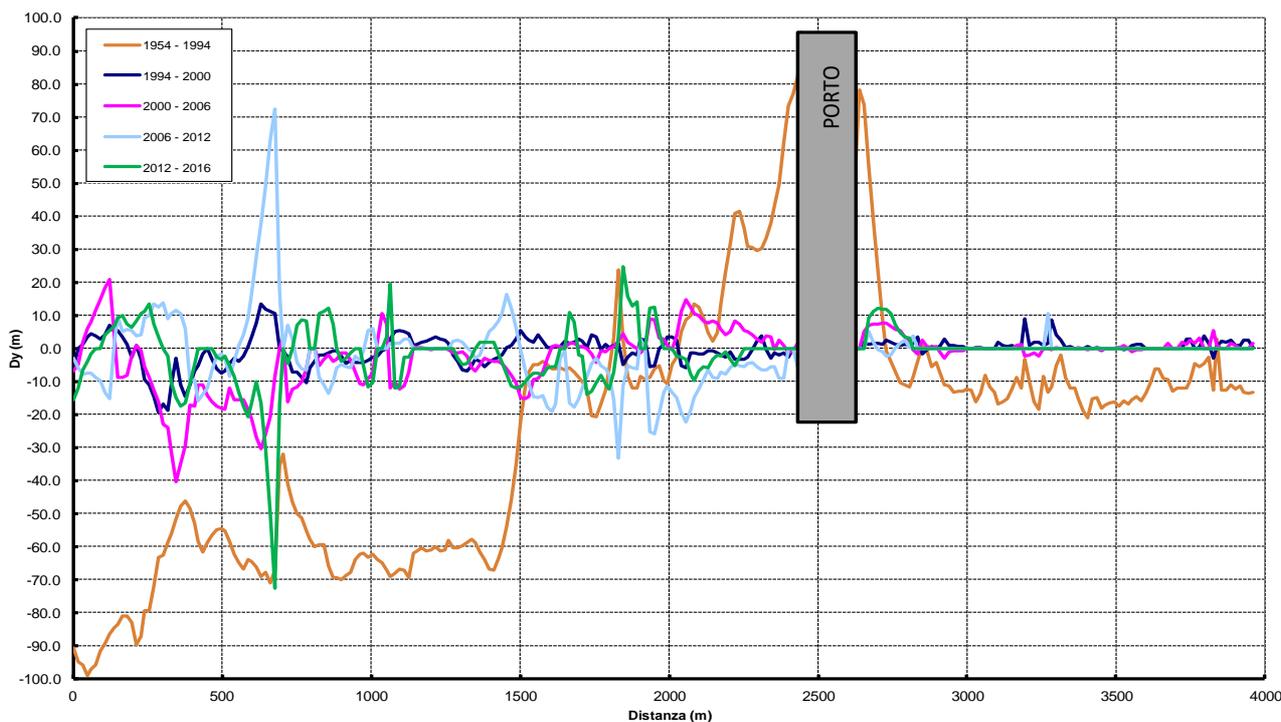
Le linee di riva così predisposte sono state comparate al fine di calcolare, in corrispondenza di ciascun vertice di discretizzazione, le variazioni subite secondo l'equazione:

$$\Delta y_{1,2} = y_2 - y_1$$

ove il pedice indica l'anno di riferimento. Secondo la convenzione adottata valori positivi di  $\Delta y$  denunciano un avanzamento della linea di riva mentre valori negativi rappresentano un arretramento della linea di riva.

In Figura 8 sono riportate le variazioni misurate tra i diversi anni di osservazione, 1954, 1994, 2000, 2006, 2012 e 2016. Ovviamente nella zona dove ricadono le strutture del porto di Casal Velino non è stata effettuata l'analisi.

L'andamento della variazione della linea di riva misurato tra il '54 e il '94 evidenzia un forte mutamento del litorale. Anche se la linea di riva del '54, acquisita da una carta IGM a scala 1:25000, può essere in qualche misura approssimativa della reale posizione della linea di riva nell'anno 1954, l'ordine di grandezza della variazione misurata è indice della erosione avvenuta sul tratto di costa in esame nell'arco di quaranta anni tra il '54 e il '94. Nella zona difesa dalle scogliere l'arretramento calcolato risulta più contenuto, fino ad arrivare a ridosso del porto dove si riscontra un avanzamento della posizione della linea di riva dovuto agli effetti di diffrazione e schermo sul moto ondoso dati dalle strutture portuali. Nella zona a Nord del porto, dove si trova lo costa alta e rocciosa, la variazione misurata nel periodo '54-'94 risulta molto contenuta.



**Figura 8. Variazioni della linea di riva misurate tra i diversi anni di rilevamento.**

Nei periodi compresi tra il 1994 e il 2016, nel tratto sottoflutto al porto [da 0 a circa 2450 m] si osserva una forte variabilità della linea di costa che va ad attenuarsi man mano che ci si

avvicina al porto di Marina di Casal Velino, per via della presenza delle esistenti opere di difesa costituite da pennelli e barriere longitudinali (radenti e distaccate dalla costa), ulteriormente integrate con il sistema di difesa “a cella” realizzato nel periodo 2009 ÷ 2013, come già accennato in precedenza. In particolare dal precedente grafico si evince quanto segue:

- a destra della foce del fiume Alento (localizzata in corrispondenza dell'ascissa 400 m), si riscontra una zona in arretramento;
- dall'ascissa 400 alla 700 (in cui è localizzato l'attuale pennello trasversale appartenente al sistema di difesa “a cella” recentemente realizzato), si osserva una sostanziale invarianza della posizione della linea di riva, mentre in prossimità del citato pennello si nota l'arretramento tipico della zona di sottoflutto originata dal radicamento emerso del pennello stesso;
- dall'ascissa 700 alla 1600 (in cui è presente l'opera di difesa costituita dai due pennelli trasversali di estremità e dalla scogliera sommersa) si osserva un certa variabilità della linea di riva nei tratti non protetti dalle difese radenti ed un certo grado di avanzamento soprattutto nell'intervallo 2006-2012, periodo in cui è stato realizzato il nuovo sistema di difesa costiera “a cella”. Successivamente (anni 2012 – 2016) l'andamento della linea di costa si è mantenuto praticamente invariato confermando trend evolutivo negativo, come era logico attendersi in mancanza del ripascimento della spiaggia interna alla cella.
- oltre l'ascissa 1600 fino alla 2450 l'andamento della linea di riva in presenza di barriere distaccate mostra i tipici avanzamenti localizzati conseguenti alla formazione di salienti e tomboli.

Per quanto riguarda il tratto di litorale posto a Nord del porto, a partire dalla progressiva di circa 2650 m fino al termine della falcata studiata posto alla progressiva 4000 m, nel periodo temporale studiato si osservano delle variazioni della linea di riva molto modeste. Tale risultato, infatti, conferma la stabilità nel lungo termine dell'intero tratto di costa posto a Ponente del porto. Per la comprensione delle tendenze evolutive si è fatto riferimento a due diverse metodologie di analisi.

La prima, indicata in letteratura come “*average of eras rates*”, si svolge in due fasi: la prima fase prevede la valutazione in ogni *i*-esimo punto della griglia di calcolo e per ogni per ogni periodo di riferimento (*eras*) del rateo annuo di variazione:

$$\frac{\Delta y_{1,2}^i}{\Delta t_{1,2}}$$

Per i periodi 1954-1994, 1994-2000, 2000-2006, 2006-2012 e 2012-2016 sono stati così valutati i ratei annui di variazione, espressi in termini di m/anno di variazione.

Nella fase successiva è stata valutata la media e la deviazione standard dei diversi ratei di variazione annuale per ottenere un rateo medio di evoluzione nel tempo e un indice dello scostamento che si ha mediamente da questo “*trend*”.

I risultati della applicazione di questa prima metodologia di analisi sono riportati in Figura 9 dove in alto sono rappresentati i ratei annui ottenuti per ogni distinto periodo di analisi, mentre in basso è rappresentato il trend ottenuto mediando in ogni *i*-esimo punto della

griglia i valori dei ratei annui precedentemente calcolati. Unitamente al trend è rappresentata, su una scala diversa, la deviazione standard che fornisce, in ogni punto di calcolo, una stima apprezzabile della variabilità, nei confronti del trend stimato, del rateo di evoluzione.

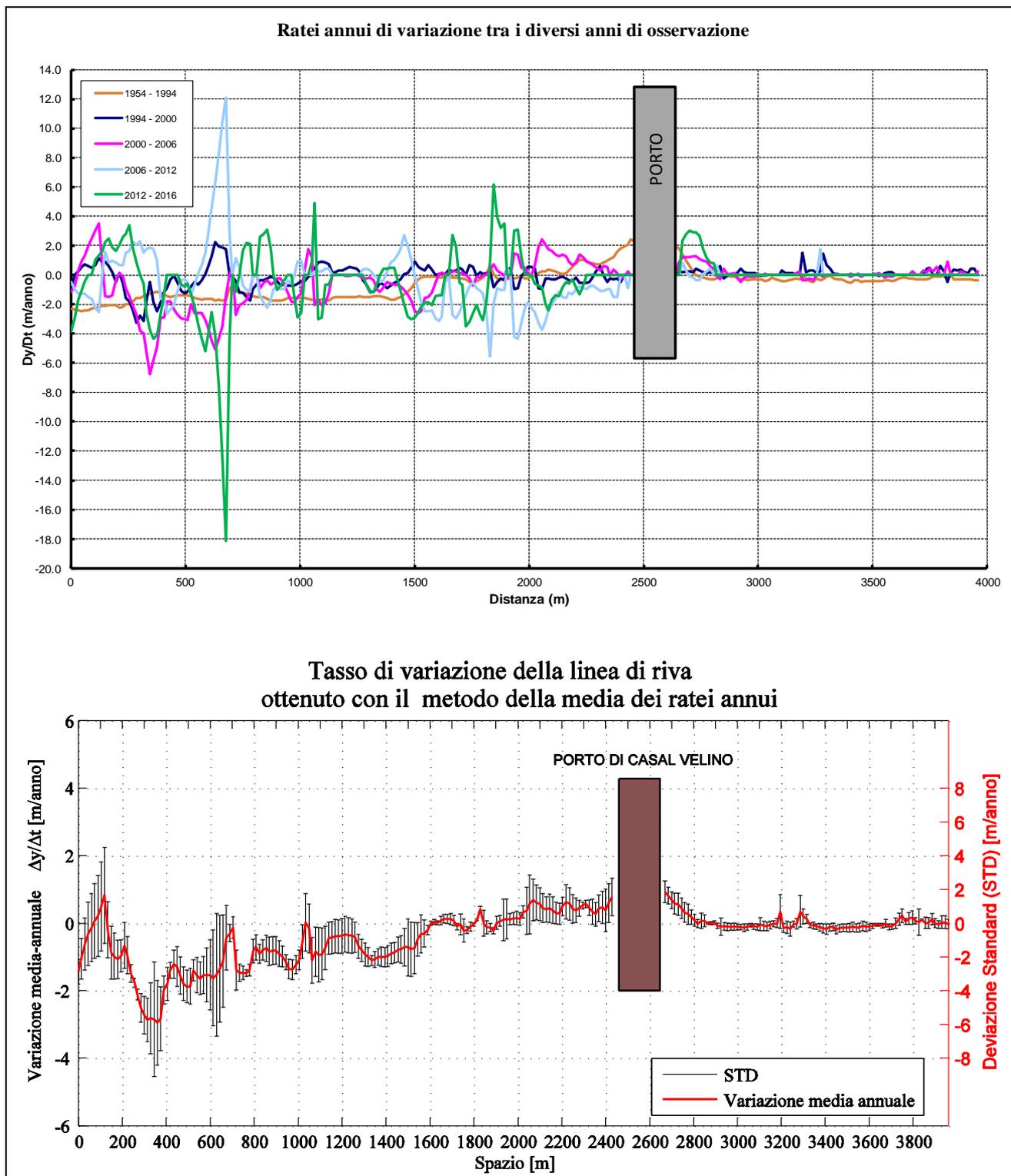


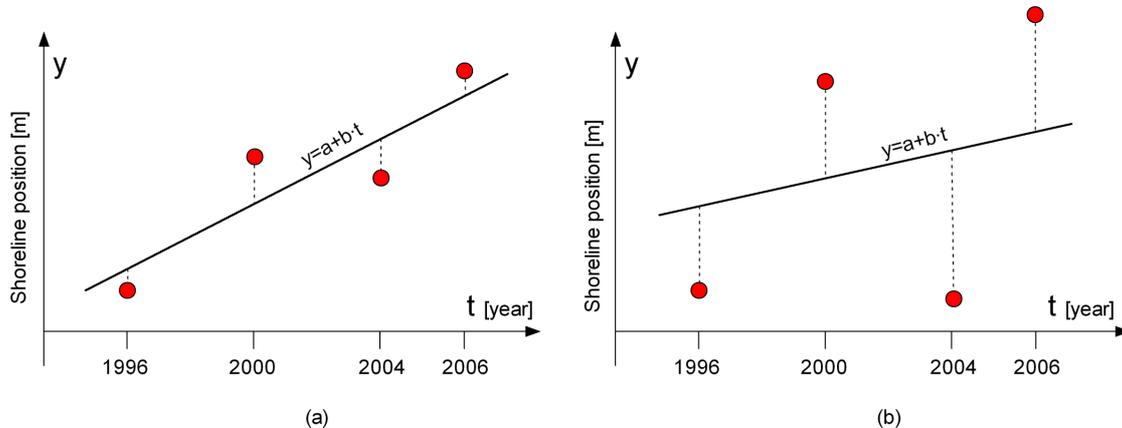
Figura 9. Risultati della applicazione della metodologia di analisi “average of rates”. Sopra sono riportati i ratei annui ottenuti tra i diversi anni di osservazione. Sotto è rappresentato il trend di evoluzione ottenuto come media dei diversi ratei annui. In figura è riportata inoltre la deviazione standard dal trend (si noti che la STD è rappresentata su una scala diversa).

La seconda metodologia di analisi, definita come “*analisi di regressione lineare*”, prevede, per ogni transetto lungo il quale si hanno le posizioni storiche della linea di riva, l’applicazione del metodo dei minimi quadrati per valutare la retta che meglio approssima i dati rilevati nel tempo. Con riferimento alla Figura 10, dati N-anni di osservazione  $(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)$ , relativi ad una sezione della spiaggia, si cercano i parametri della retta  $y=a+b \cdot t$  tali da minimizzare la funzione S definita come la somma al quadrato degli scarti tra le osservazioni e la retta di regressione:

$$S = \sum_i^N (\hat{y}_i - a - b \cdot t)^2$$

Il coefficiente angolare, b, della retta di regressione fornisce il *trend* evolutivo della spiaggia lungo la sezione di calcolo. Applicando tale procedura, da sezione a sezione, è possibile individuare il trend lungo tutto lo sviluppo della spiaggia.

Valutando per ogni vertice di discretizzazione la deviazione standard dalla retta di regressione è possibile ottenere una misura della dispersione dei dati rispetto alla retta di regressione.



**Figura 10.** *Illustrazione del metodo della regressione lineare applicato alle linee di riva storiche. I parametri della retta (a e b) vengono valutati con il metodo dei minimi quadrati. Il coefficiente angolare della retta (b) indica il trend evolutivo della spiaggia nel punto di analisi. A sinistra (a) si riscontra un grado di correlazione elevato con un buon adattamento dei dati; a destra (b) il grado di correlazione è basso e l’adattamento non è buono.*

La Figura 10 riporta un esempio di applicazione del metodo della regressione lineare a due diversi transetti. Come si vede nei grafici non sempre vi è buona correlazione tra i dati. Per valutare il grado di correlazione e la conseguente bontà della stima del trend effettuata si utilizza il coefficiente di determinazione  $R^2$ , ottenuto come il quadrato del coefficiente di correlazione lineare.

Il coefficiente di determinazione  $R^2$  risulta compreso tra i valori 0 e 1. Valori prossimi all’unità indicano un grado di correlazione elevato. Al contrario valori prossimi allo zero indicano scarsa correlazione. È da notare che se la retta di interpolazione tende ad essere orizzontale (evoluzione nulla) il valore di  $R^2$  tende a zero, ne segue che in quel punto la

linea di riva è stabile. Nelle figure seguenti sono riportati i risultati della analisi condotta con il metodo della regressione lineare.

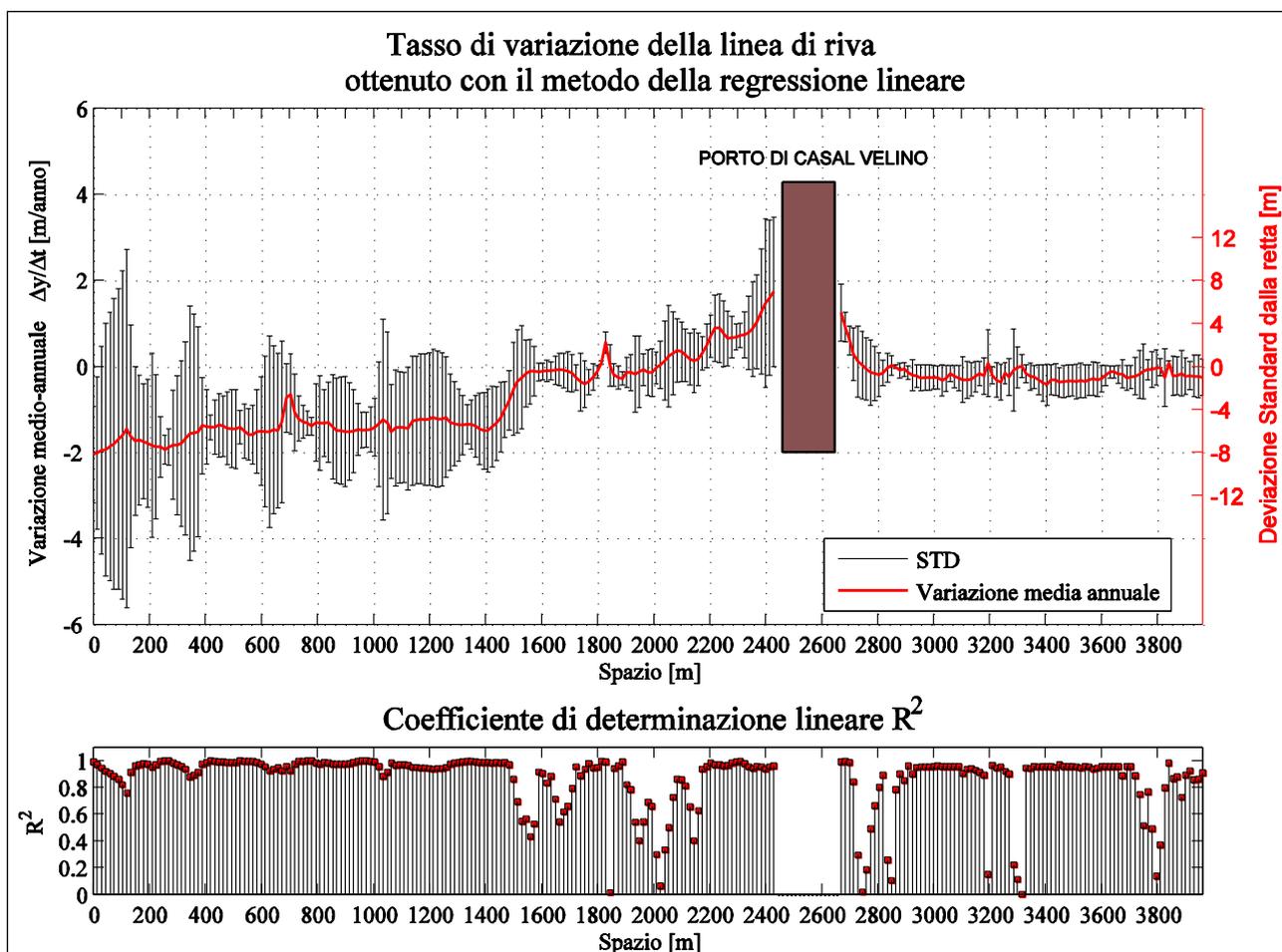


Figura 11. Risultati dell'applicazione del metodo della regressione lineare alle linee di riva del litorale di Casal Velino relative agli anni 1954, 1994, 2000, 2006, 2012 e 2016. In alto è riportato il trend di evoluzione e la deviazione standard, rispetto alla retta di regressione, ottenuti lungo il litorale (si noti che la STD è rappresentata con una scala diversa). In basso è riportato il coefficiente di determinazione  $R^2$  indice del grado di correlazione tra le diverse osservazioni.

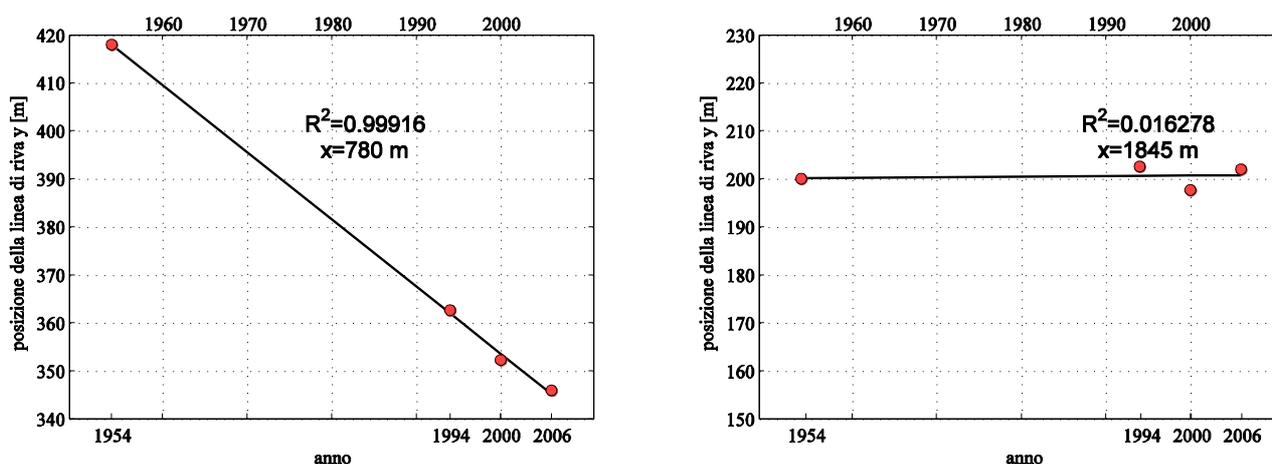


Figura 12. Rappresentazione della massima e della minima correlazione ottenuta con la regressione lineare delle posizioni della linea di riva per il litorale di Casal Velino.

In Figura 11 viene riportato in alto il trend evolutivo stimato, unitamente alla deviazione standard dei dati relativa al trend, in basso è invece rappresentato il coefficiente di determinazione  $R^2$  ottenuto in ogni vertice di discretizzazione. In Figura 12 sono riportati, a titolo esemplificativo, i risultati della regressione lineare nei due distinti vertici in cui sono stati ottenuti rispettivamente il massimo e il minimo valore di  $R^2$ .

I risultati ottenuti con le due metodologie di analisi mostrano un litorale interessato da un forte processo evolutivo. In particolare, come già detto precedentemente, nella zona compresa tra la foce del fiume Alento e il porto di Casal Velino si riscontrano i valori più elevati del trend evolutivo.

Come si può osservare il trend di variazione annuo, espresso in m/anno, in questa zona risulta essere negativo ad indice di una tendenza netta all'arretramento della posizione della linea di riva, che presenta una forte variabilità, dovuta alle diverse opere di difesa che sono state realizzate nel tempo per proteggere questo tratto di costa, consistenti in pennelli trasversali e barriere longitudinali (comprensivo dell'ultimo sistema di difesa "a cella" finito di realizzare nel 2013), sia delle difese radenti alla costa che distaccate dalla stessa.

In particolare, tra le ascisse 700 e 1600 il tasso di variazione dimostra una tendenza negativa in quanto l'opera di difesa sommersa fornisce solo un modesto contributo alla stabilizzazione della linea di riva interna alla cella, per via della sua minore capacità di attenuazione delle onde rispetto alle opere emerse. Tale trend evolutivo potrà essere invertito operando il previsto ripascimento che attraverso i previsti quantitativi di sabbia forniranno un avanzamento della linea di riva, che si dovrebbe mantenere sufficientemente stabile per l'effetto di contenimento dei due pennelli trasversali parzialmente emersi.

Inoltre, si osserva che tale rateo si riduce a tergo delle scogliere frangiflutti (tra le ascisse di circa 1500 e circa 2500) in cui il trend, in alcuni periodi di riferimento, diviene anche positivo, indice di un avanzamento dovuto alla capacità di "catturare" le sabbie da parte delle opere di difesa esistenti formando, a tergo delle stesse, salienti e tomboli. È

importante sottolineare che tali interventi costituiscono solo una protezione locale ovvero non risolvono il problema di erosione costiera su ampia scala. Infatti, come si osserva appena al di fuori della zona di influenza delle opere di difesa esistenti, il tasso medio annuo di erosione aumenta rapidamente in accordo con le caratteristiche di esposizione del paraggio in esame.

Per quanto riguarda invece il tratto di litorale posto ad nord del porto di Casal Velino, a ridosso del molo sottoflutto si riscontra un rateo di evoluzione positivo e quindi una tendenza all'avanzamento della linea di riva, mentre il resto del litorale, caratterizzato da coste alte e rocciose, risulta prevalentemente stabile.

E' importante evidenziare come l'avanzamento della linea di costa posta subito ad ovest del radicamento del molo di sopraflutto del porto di Casal Velino causi sostanziali fenomeni di interrimento dell'imboccatura portuale con conseguenti problematiche sulla sicurezza della navigazione e, quindi, sull'operatività del porto.

### 3.3 Calcolo del trasporto solido litoraneo

Il movimento dei sedimenti all'interno di un'unità fisiografica è il risultato di un complesso sistema dinamico in cui entrano in gioco la circolazione idrodinamica connessa al moto ondoso ed i volumi di materiale solido che entrano o escono dal volume di controllo dell'unità ad opera di altri processi, come ad esempio gli apporti solidi dovuti ai corsi d'acqua oppure le perdite dovute all'azione eolica o ancora all'azione antropica.

In questo complesso sistema la linea di riva di un litorale sabbioso rappresenta l'equilibrio tra tutti i processi che interessano l'unità fisiografica. È importante sottolineare che tale posizione non rappresenta un confine fissato tra terra e mare ma, al contrario, è caratterizzata da una forte variabilità che si contrappone alla visione conservativa dell'uomo.

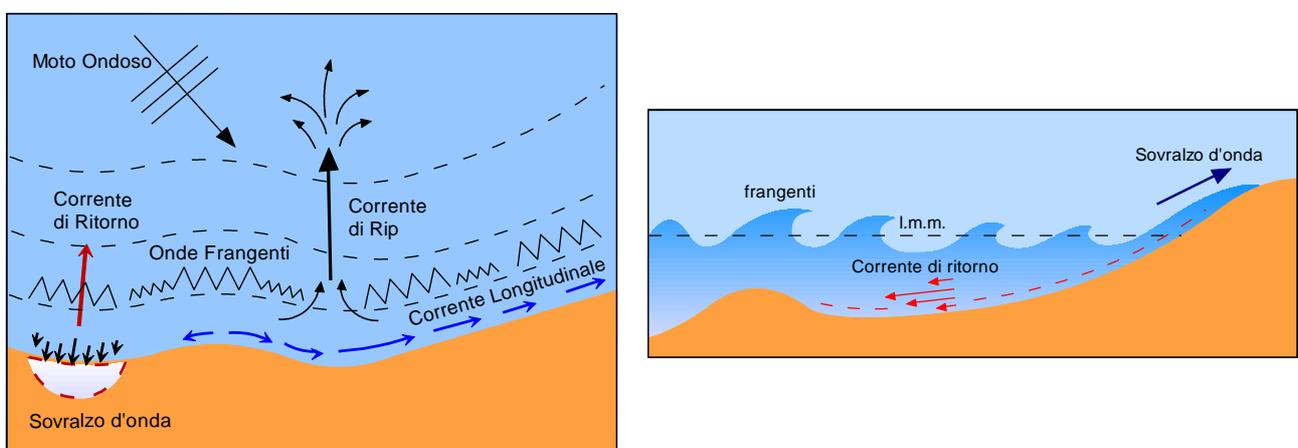


Figura 13. Idrodinamica costiera, descrizione planimetrica e trasversale dei fenomeni idrodinamici connessi al frangimento del moto ondoso in prossimità della linea di riva.

La causa principale della mobilitazione e della successiva migrazione dei sedimenti sabbiosi è il moto ondoso. Con riferimento alla Figura 13 è possibile descrivere i fenomeni idraulici connessi al moto ondoso incidente. Si può osservare che i fenomeni idraulici costieri sono caratterizzati da una dinamica longitudinale, parallela alla linea di riva, e da una trasversale. Le cause e gli effetti di tali dinamiche sono differenti e vengono di seguito illustrate:

### **DINAMICA TRASVERSALE**

- **CORRENTE DI RITORNO:** Il frangimento dell'onda non solo causa la risalita dell'onda sulla battigia, fenomeno che prende il nome di *run-up*, ma, fatto molto più rilevante, causa una variazione temporale del livello medio marino che viene denominato *sovrizzo d'onda*. La conseguenza principale di tali effetti è la nascita di correnti trasversali che equilibrano questa situazione e che sono causa della migrazione verso il largo dei sedimenti messi in sospensione dal frangimento dell'onda. Tale effetto è più rilevante in occasione delle mareggiate, durante le quali il sovrizzo d'onda può raggiungere e superare il metro di altezza.
- **CORRENTE DI RIP:** l'interazione con il fondale e il frangimento differenziato causano delle variazioni di livello localizzate che generano delle correnti superficiali di compensazione definite *correnti di rip*, tali correnti provocano un allontanamento verso il largo dei sedimenti messi in sospensione dal frangimento delle onde.

### **DINAMICA LONGITUDINALE**

- **CORRENTE LONGITUDINALE:** il frangimento dell'onda genera una corrente che si muove parallelamente alla linea di riva e che ha la sua massima intensità in prossimità della zona dei frangenti. L'effetto di tale corrente è quello di trasportare la sabbia messa in movimento dal frangimento delle onde.

E' importante sottolineare che gli effetti della dinamica longitudinale sull'evoluzione planimetrica della linea di spiaggia sono i più rilevanti, in quanto sono associati ad una condizione media di moto ondoso e rappresentano quindi una condizione di erosione a lungo termine; le dinamiche trasversali invece sono associate alle mareggiate, le quali hanno una frequenza di accadimento annuale minore, rappresentano quindi una condizione di erosione a breve termine ma possono rappresentare un via di fuga irreversibile per il materiale.

La stima della portata solida longitudinale associata alla corrente longitudinale fornisce una valida indicazione delle tendenze morfologiche di un litorale oltre a rappresentare un dato di fondamentale importanza per la modellazione numerica dei processi di dinamica costiera. Il calcolo del flusso solido longitudinale viene effettuato utilizzando la nota equazione differenziale del bilancio solido litoraneo:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \cdot \left[ \frac{\partial Q}{\partial x} - (q_o - q_i) \right] = 0$$

nella quale  $\partial y/\partial t$  rappresenta la variazione temporale della posizione della linea di riva,  $\partial Q/\partial x$  la variazione spaziale della portata solida longitudinale,  $q_o$  e  $q_i$  eventuali apporti o

perdite di sedimenti per unità di lunghezza e infine  $D_s$  rappresenta la profondità di chiusura del volume di controllo coinvolto nel bilancio dei sedimenti.

L'equazione di continuità è stata risolta in ogni nodo secondo uno schema esplicito alle differenze finite in avanti, che consente di ottenere la componente longitudinale  $Q(x)$  del flusso solido litoraneo in funzione di  $\partial y/\partial t$ . Il sistema di riferimento adottato per la valutazione della portata solida è lo stesso di quello adottato per l'analisi diacronica ed è rappresentato in Figura 6.

Per risolvere l'equazione precedente, al fine di calcolare la funzione  $Q(x)$ , è necessario prefissare alcuni parametri e fissare delle condizioni di flusso solido all'estremità del tratto di costa in esame.

In base alle valutazioni fatte nello studio meteomarinario è stato assunto come valore della profondità di chiusura  $D_s$  il valore di 9.13 m.

In questa fase di studio sono stati considerati trascurabili eventuali apporti solidi dovuti al fiume Alento per la presenza di sbarramenti finalizzati alla realizzazione di bacini artificiali, i quali hanno causato una riduzione degli apporti di materiale, che in passato andavano ad alimentare il litorale.

La convenzione adottata vuole che una portata positiva sia diretta da sinistra verso destra mentre al contrario una portata negativa sia diretta da destra verso sinistra; gradienti di portata positiva (pendenza positiva) indicano tendenza all'erosione, gradienti negativi (pendenza negativa) tendenza all'accrescimento.

Per la stima della portata solida relativa al periodo 1954-1994 è stata imposta come condizione al contorno una portata nulla all'estremità destra della griglia di calcolo. Muovendo da destra verso sinistra per differenze finite è stata così valutata la portata solida totale per questo periodo.

Per i successivi periodi è stata invece utilizzata una condizione al contorno interna al dominio di calcolo: il porto di Casal Velino rappresenta un ostacolo praticamente invalicabile per i sedimenti; si ha di conseguenza una condizione di portata nulla interna al dominio di calcolo. Tale condizione è stata sfruttata eseguendo il calcolo alle differenze finite muovendo da destra verso sinistra per il tratto a Sud del porto e muovendo da sinistra verso destra nel tratto a Nord del porto.

La procedura è stata effettuata utilizzando i dati relativi ai periodi 1954-1994, 1994-2000, 2000-2006, 2006-2012 e 2012-2016 ottenendo i risultati riportati in Figura 14 e Figura 15.

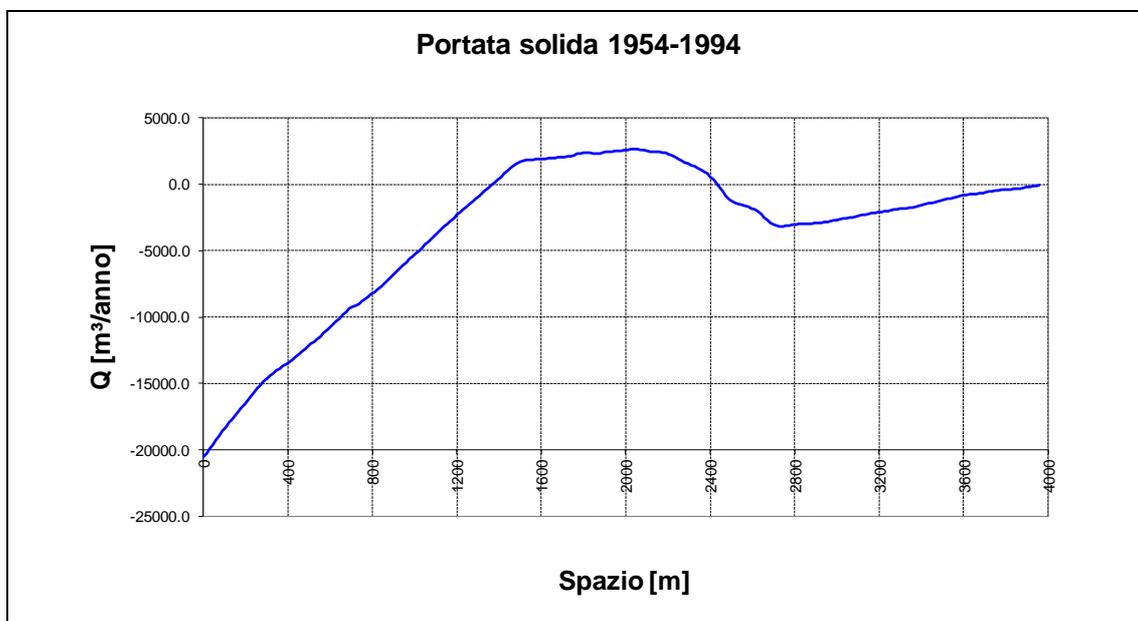
In accordo con quanto già rilevato dall'analisi diacronica, i valori massimi di portata si riscontrano nel tratto compreso tra la foce del fiume Alento e la zona di influenza delle barriere frangiflutti disposte a levante del porto [0, 1600], la portata ha valore negativo con direzione dx-sx e valore medio massimo pari a circa 10000 m<sup>3</sup>/anno, in questo tratto si rilevano i gradienti maggiori con forte tendenza all'erosione. Si evidenzia che nel tratto [700, 1600] in cui è presente la nuova opera di difesa sommersa il trend è rimasto negativo per quanto già esposto in precedenza e soprattutto per il mancato e previsto apporto di sedimenti all'interno della cella.

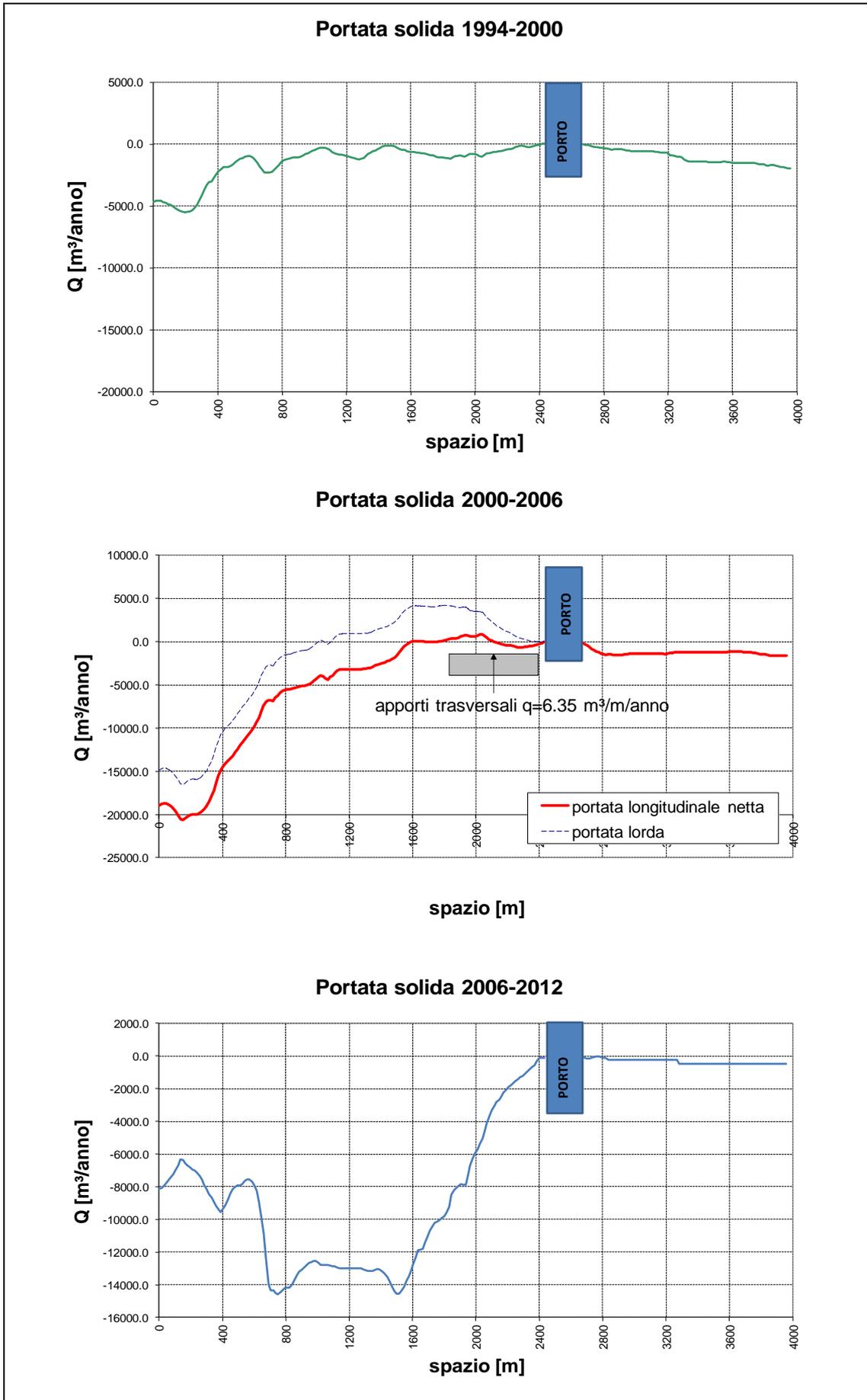
Nel tratto di influenza delle barriere [1600,2350], si viene a realizzare una zona protetta in cui il valore di portata viene a ridursi assumendo valori medi dell'ordine di 2000 m<sup>3</sup>/anno;

In questa zona si osserva in alcuni periodi di riferimento un trasporto solido positivo dovuto sia all'effetto schermo delle barriere e del porto ma anche alla dinamica trasversale dei sedimenti a tergo delle barriere che vengono catturati a tergo delle barriere.

A destra del porto, rispetto al riferimento adottato, si hanno valori di portata modesti, mediamente inferiori ai 1500 m<sup>3</sup>/anno con verso dx-sx, dovuti all'orientamento della costa rispetto alla direzione prevalente di provenienza del moto ondoso e alla ridotta disponibilità di sedimenti fini in questo tratto di costa prevalentemente rocciosa.

Nel periodo 2000-2006 al fine di scorporare la componente longitudinale da quella complessiva si è provveduto, in corrispondenza delle barriere frangiflutti, ad inserire nell'equazione di bilancio una componente trasversale virtuale a cui è stata totalmente affidata la causa degli avanzamenti della linea di riva (vedi Figura 14). Il valore ottenuto di 6.35 m<sup>3</sup>/m/anno è stato calcolato in modo da annullare la portata longitudinale netta diretta verso destra nel tratto di costa di 620 m. Si è così assunto che l'avanzamento della linea di riva a tergo delle scogliere sia dovuta principalmente a tale dinamica trasversale, ottenendo una stima degli apporti solidi trasversali da inserire nel modello numerico di morfodinamica costiera.





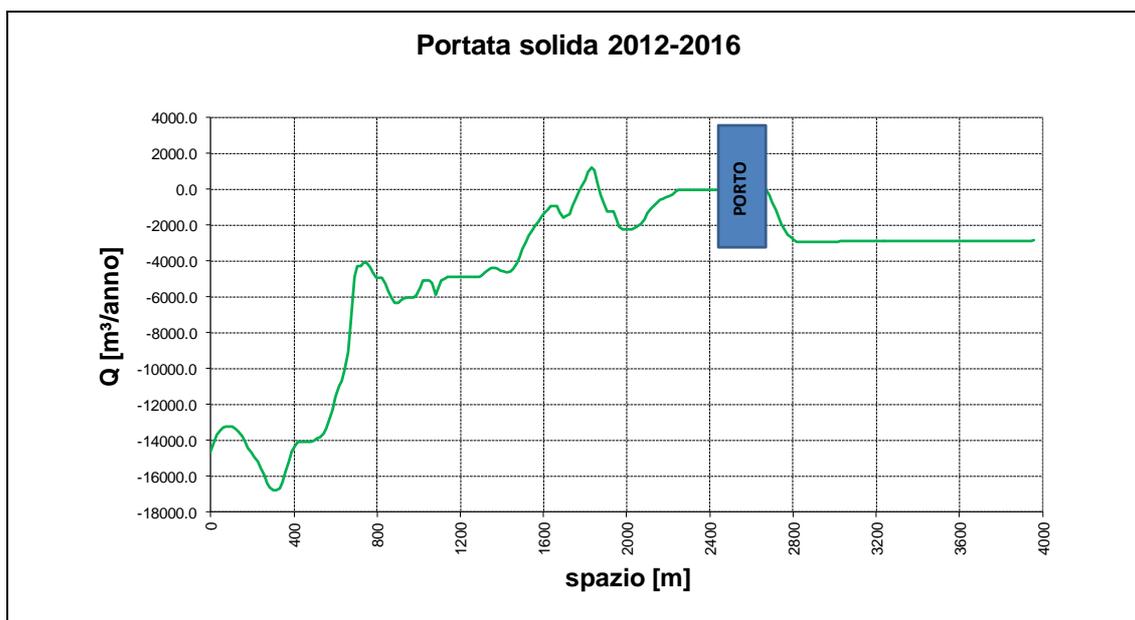


Figura 14. Portate solide ottenute per gli intervalli temporali 1954-1994, 1994-2000, 2000-2006, 2006-2012 e 2012-2016 per il litorale di Casal Velino.

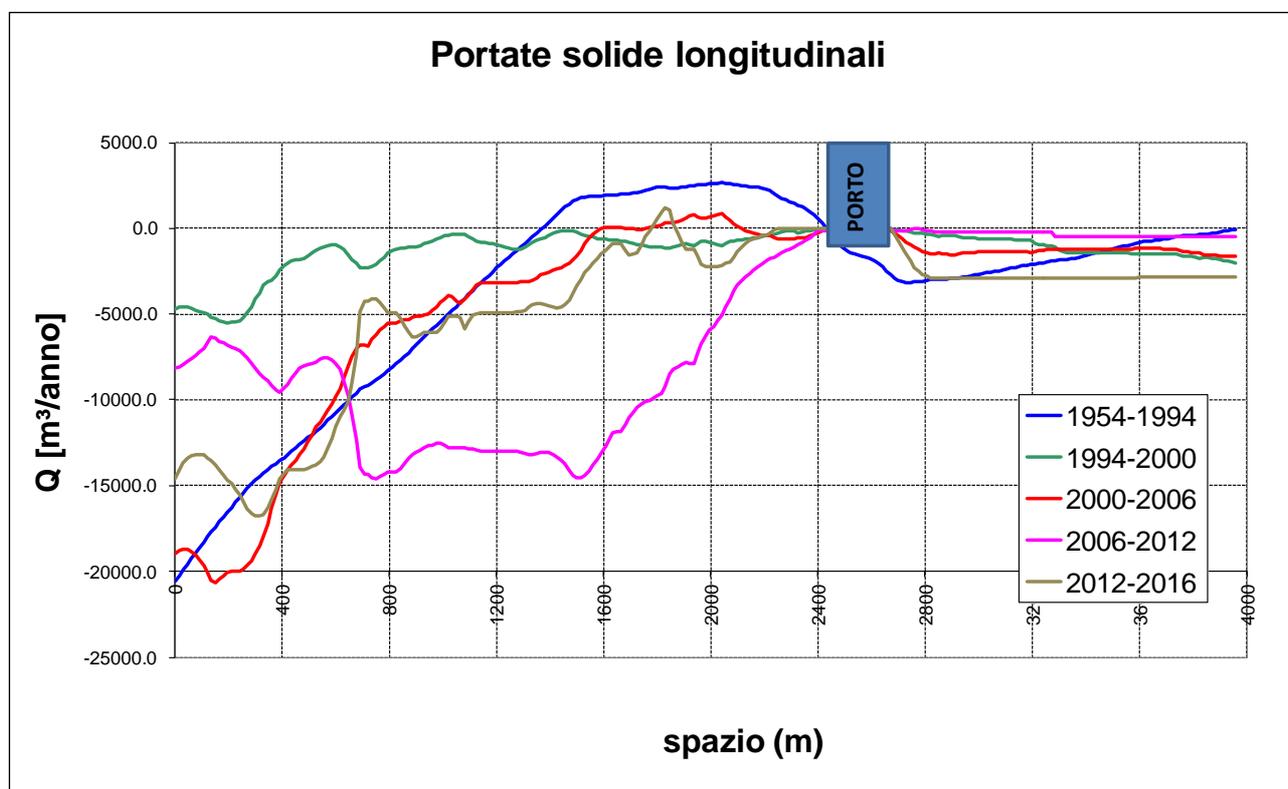


Figura 15. Confronto tra le portate solide longitudinali ottenute nei diversi periodi di analisi per il litorale di Casal Velino.

#### **4 INTEGRAZIONI E CHIARIMENTI CONSEGUENTI ALLA PRESENTAZIONE DELLE ISTANZE DI PRONUNCIA PRELIMINARE AGLI ENTI COMPETENTI**

Con riferimento alla richiesta trasmessa dal Comune di Casal Velino (nota prot. n. 2368 del 11.03.2019) per l'ottenimento di un parere preliminare sul progetto di "Messa in sicurezza, adeguamento infrastrutturale del porto di Marina di Casal Velino – I Lotto Stralcio Funzionale", l'Ente Parco ha esternato alcune perplessità inerenti l'influenza dei nuovi moli sulle dinamiche del moto ondoso e sul processo di erosione e/o ripascimento della linea di costa.

Come indicato nei specifici paragrafi integrativi (vedi Capitolo 7 e relativi paragrafi) della Relazione generale, emessa in Rev. 1, sono stati illustrati i risultati ottenuti dalle integrazioni e approfondimenti eseguiti sulla configurazione di progetto definitivo proposta nella prima emissione (Rev. 0 del Dicembre 2018).

Relativamente alla richiesta di "individuazione degli scenari evolutivi della linea di costa a seguito della realizzazione del nuovo molo di ponente (da elaborare a supporto dello studio di impatto ambientale) con particolare riferimento alla dimostrazione di come i nuovi moli influiranno sulle dinamiche del moto ondoso e sul processo di erosione e/o ripascimento della linea di costa" si deve ricordare che tali aspetti sono stati ampiamente trattati nel progetto definitivo (prima emissione), in cui con lo Studio Morfo-dinamico sono state effettuate le necessarie valutazioni quantitative e qualitative.

Con la presente revisione del Progetto Definitivo (Rev. 1) si è ulteriormente specificato che l'aggiornamento dell'analisi diacronica delle linee di riva effettuata con il presente Studio Morfologico, aggiungendo al confronto anche la linea di riva relativa all'anno 2016, ha consentito di effettuare il confronto del trend evolutivo "reale", mettendo a confronto i risultati ottenuti dall'analisi diacronica con quelli "predittivi" dei processi evolutivi ottenuti tramite le simulazioni matematiche riportate nello studio morfo-dinamico, in cui era stata studiata la previsione dell'evoluzione della linea di riva a 10 anni (2006 – 2016). La configurazione del porto esaminata prevede la realizzazione delle due opere foranee costituenti la sagoma esterna del tutto simile a quella proposta nel presente progetto. Il suddetto confronto ha fornito un riscontro positivo e confermato il processo evolutivo previsto in passato per il tratto di costa oggetto di studio. Proprio in funzione del positivo confronto e riscontro tra valori "reali" e "previsionali" e dalla sostanzialmente conferma delle condizioni al contorno si è ritenuto ragionevole estendere la tendenza evolutiva individuata per l'arco temporale 2018-2028, senza effettuare ulteriori simulazioni per le quali sarebbe stato peraltro necessario avere a disposizione (aspetto non trascurabile) il rilievo della linea di riva di un ampio tratto del litorale al momento della prima emissione del progetto definitivo (anno 2018). Si fa presente a tal proposito che il rilievo batimetrico e topografico eseguito il 05.07.2018 ha riguardato la sola fascia litoranea (emersa e sommersa) interessata dagli interventi previsti dal Progetto di Fattibilità posto a base di gara per un "intorno" di almeno 300 m rispetto all'ambito portuale, ricomprendendo anche l'attuale specchio portuale.

Infine si deve sottolineare che nella stessa nota dell'Ente Parco viene indicato che l'intervento di "Messa in sicurezza e adeguamento infrastrutturale del porto di Marina di Casal Velino" proposto con il presente progetto definitivo "... individua caratteri che non contrastano con le disposizioni di cui all'art. 18 della NTA del Parco del Cilento, Vallo di Diano e Alburni", per cui la compatibilità delle opere è da ritenere rispettata.