n. 04

AUTORITA' PORTUALE DI GENOVA

Direzione Tecnica

PROGETTO PRELIMINARE N° 2931

PROTEZIONE PASSEGGIATA DI VOLTRI IN DESTRA IDRAULICA DEL TORRENTE LEIRA

STUDIO SULL'IMPATTO DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI

	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO:
Rev. 3	Novembre 2014	Aggiornamento post incontro Regione Liguria del 3/10/14	

Progettista interni: Geom. Ivano Dellepiane Geom. Augusto Narizzano	Progettisti esterni: Dott. Ing. Paolo Turbolente

Coordinatore di progetto:	VERIFICATO	VALIDATO	VISTO
Geom. Ivano Dellepiane	Il Direttore Tecnico: **Dott. Ing. Andrea Pieracci**	Il Responsabile Unico del Procedimento: **Dott. Ing. Marco Vaccari**	Il Il Direttore Tecnico: **Dott. Ing. Andrea Pieracci**

1. PREMESSA 1

2. METODOLOGIA GENERALE DI LAVORO 1

3. APPLICAZIONE DEL MODELLO DI MORFODINAMICA LONGITUDINALE "GENESIS" ……..4

3.1. Descrizione del modello GENESIS 4

3.2. Discretizzazione della linea di riva e definizione delle condizioni al contorno 6

3.3. Calibrazione e validazione del modello 9

3.3.1. Calibrazione – Evoluzione 2000÷2006 9

3.3.2. Validazione – Evoluzione 2006÷2012 11

3.4. Previsione dell'evoluzione della linea di riva 18

4. CONCLUSIONI 31

INDICE DELLE FIGURE 33

INDICE DELLE TABELLE 34

1. PREMESSA

L'Autorità Portuale di Genova ha affidato alla società Acquatecno S.r.l. l'incarico di eseguire la Modellazione numerica a supporto della "Progettazione passeggiata di Voltri in destra idraulica del Torrente Leira", ricadente nel territorio del Comune di Genova (GE) nella Regione Liguria. Nell'ambito di tale incarico sono state eseguite le modellazioni numeriche atte ad analizzare l'impatto della alternative progettuali sulla dinamica del litorale e sull'apparato di foce del torrente Leira.

2. METODOLOGIA GENERALE DI LAVORO

Nell'ingegneria costiera con il termine morfodinamico 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, un apparato di foce di un corso d'acqua, ecc.

L'opera marittima prevista per la protezione della passeggiata di Voltri è rappresenta da una scogliera di circa 65 m di lunghezza, che si diparte dall'armatura di foce in destra idraulica del torrente Leira a guisa di braccio laterale.

Tale opera non modifica le condizioni di deflusso del Torrente Leira a breve termine, ma potrebbe produrre effetti a medio-lungo termine sul fondale in corrispondenza della foce del torrente e sulla dinamica longitudinale delle spiagge limitrofi. Tali effetti sono stati studiati nel presente documento.

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 errori nella definizione dei dati di base o delle condizioni al contorno possono portare nel tempo ad una progressiva divergenza 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 influendo in modo secondario sull'evoluzione a lungo termine.

Il trasporto solido longitudinale influisce in modo prevalente sull'evoluzione a **medio** termine (anni) e **lungo** termine (secoli) 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.

Allo scopo di valutare la tendenza evolutiva di una regione costiera, è necessario quantificare lo scambio dei sedimenti tra la regione di interesse e il resto del litorale (bilancio dei sedimenti - sediment budget). Lo studio del bilancio solido longitudinale avvenuto negli ultimi decenni, lungo l'unità fisiografica a cui appartiene il sito oggetto del progetto in esame, è riportato nello studio del

trasporto solido litoraneo allegato (STL) e costituisce la base per lo studio morfodinamico a medio-lungo termine.

Per la valutazione dell'evoluzione a medio-lungo termine (20 anni) si è applicato il modello matematico longitudinale *GENESIS*, sviluppato dal "Coastal Engineering Reserch Center" dell' "US Army Corps of Engineers". Il modello *GENESIS* ha consentito di prevedere l'evoluzione della linea di riva lungo il litorale di Voltri nello scenario attuale e in quello di progetto.

Sono stati simulati diversi scenari di progetto al fine di ridurre gli effetti indotti dalla presenza delle opere sulla dinamica longitudinale e sulla morfologia della foce del Torrente Leira. Tale procedura ha consentito di individuare la configurazione delle opere che meglio risponde alla duplice esigenza di proteggere la passeggiata di Voltri alla sua estremità orientale e di garantire il libero deflusso idraulico del Torrente Leira, evitando l'accumulo di materiale alla sua foce ovvero il suo avanzamento verso il mare.

Nella configurazione di progetto la scogliera di circa 65 m di lunghezza si stacca lateralmente dal pennello di armatura posto in destra idraulica della foce del torrente Leira a circa 10 m di distanza verso terra dalla testata dell'armatura fociale. Il suo orientamento curvo, secondo un settore circolare di circa 52°, gli consente di raggiungere in testata fondali di circa 2 m di profondità.

Al fine di proteggere il tratto di circa 250 m più orientali della passeggiata di Voltri è stata considerata, in aggiunta alla realizzazione della scogliera, la realizzazione di un intervento di ripascimento di circa 10.000 m^3 di sedimento, costituito da sabbia molto grossolana simile a quella della spiaggia nativa sommersa più prossima a riva.

Nel presente rapporto è pertanto riportata la previsione dell'evoluzione della linea di riva dei seguenti scenari:

1. evoluzione del litorale nei prossimi 20 anni in assenza di nuove opere (scenario attuale);
2. evoluzione del litorale nei prossimi 20 anni con la realizzazione della scogliera d progetto;
3. evoluzione del litorale nei prossimi 20 anni con la realizzazione della scogliera d progetto e un ripascimento di 10.000 m^3/anno .

3. APPLICAZIONE DEL MODELLO DI MORFODINAMICA LONGITUDINALE "GENESIS"

L'intervento per la protezione della passeggiata di Voltri oggetto di studio ricade nel tratto di litorale di circa 1,7 km compreso tra il Porto di Voltri (780 m ad est della foce del torrente Leira) e la foce del torrente Cerusa (840 m ad ovest della foce del torrente Leira). Il litorale rappresenta un unità fisiografica a se stante (vedi lo studio STL allegato).

Le verifiche morfodinamiche a medio-lungo termine (20 anni) vengono attualmente effettuate con modelli monodimensionali detti "ad una linea". Questi ultimi si applicano bene lungo le spiagge pressoché rettilinee in cui si può scegliere un asse del modello con orientamento quasi parallelo alla linea di riva. Nel caso del litorale compreso tra il Porto di Voltri e la foce del torrente Cerusa si individua un asse rettilineo avente direzione di 273° N (direzione normale all'asse verso il mare 183°N) rispetto al quale la linea di riva del litorale risulta pressoché parallela in corrispondenza della foce del torrente Leira.

Il litorale appare diviso dalla foce del torrente Leira in due spiagge leggermente arcuate rispetto alla stessa foce. Quella più orientale si discosta dall'asse di 273° N di circa +9° in corrispondenza della foce del torrente Leira e di circa -11° in corrispondenza del Porto di Voltri. Quella più occidentale si discosta rispetto all'asse di 273° N di circa +16° in corrispondenza della foce del torrente Cerusa e di circa -8° in corrispondenza della foce del torrente Leira.

In tali condizioni l'applicazione dei modelli "ad una linea" risulta affidabile. Si è pertanto applicato il modello "ad una linea" GENESIS sviluppato dal "Coastal Engineering Reserch Center" dell' "US Army Corps of Engineers" con l'asse "x" orientato secondo la direzione di 273° N. Le forzanti meteomarine sono state determinate in base a quanto riportato nello "Studio meteomarino" allegato. Le condizioni al contorno, costituite dalla granulometria del sedimento e dal valore della portata solida netta agli estremi del modello, sono state determinate in base a quanto riportato nello "Studio del Trasporto Solido" allegato.

3.1. Descrizione del modello GENESIS

GENESIS è un modello di spiaggia "ad una linea" e consente di simulare l'evoluzione della fascia costiera attraverso la modellazione delle modifiche planimetriche, nel tempo, della sola linea di riva. Per la descrizione dettagliata del modello si rimanda ai manuali scientifici del CERC.

Il modello trae la sua origine dai principi teorici degli studi di dinamica costiera condotti da Pelnard-Considère e può essere applicato ad aree costiere ove le fenomenologie di morfodinamica evolvono sotto le seguenti ipotesi:

- il litorale presenta un profilo di equilibrio, rispetto al piano trasversale alla linea di riva, che mantiene la sua forma, muovendosi parallelamente a se stesso, al manifestarsi sia di fenomeni di erosione sia di accrescimento della fascia costiera;
- il trasporto solido litoraneo è indotto essenzialmente dall'azione delle correnti connesse alle onde di superficie, mentre può ritenersi trascurabile l'effetto delle correnti di marea o di correnti collegate all'azione diretta del vento;
- il flusso solido si realizza essenzialmente in senso longitudinale alla linea di riva e rimane confinato entro una fascia costiera (fascia "attiva"), alle cui estremità di "riva" (foreshore) e "largo" (offshore) il flusso solido può ritenersi trascurabile;
- la portata Q del flusso solido longitudinale è funzione del contenuto energetico (proporzionale ad Hb^2) e dell'angolo α di incidenza delle onde frangenti lungo il litorale;
- i possibili scambi di materiale solido tra la fascia attiva e l'esterno sono di tipo puntuale (foci fluviali; canyons sottomarini) in termini di portata solida entrante od uscente. Possono essere comunque considerati perdite o apporti diffusi.

Sulla base di queste ipotesi è possibile modellare la complessa dinamica di un litorale sabbioso, imponendo e risolvendo, alle differenze finite, l'equazione di continuità del volume di sabbia associata al flusso di materiale sabbioso relativo alla sola componente litoranea. Ovviamente, il modello matematico GENESIS consente di simulare in maniera soddisfacente l'evoluzione del litorale previa definizione accurata delle condizioni al contorno.

Una di queste condizioni è costituita dal clima meteomarino al largo, ovvero alla sequenza di onde rappresentative delle condizioni di esposizione medio-climatiche del sito in esame (forzanti di moto ondoso). Propagandosi verso "riva" su fondali via decrescenti, le onde subiscono una serie di trasformazioni geometriche e perdite d'energia sino a frangere lungo il litorale innescando ed alimentando i fenomeni di trasporto litoraneo. Il modello di calcolo GENESIS è in grado di simulare, note le condizioni al largo (espresse in funzione di altezza d'onda significative Hs periodi di picco Tp e direzioni di provenienza α) i fenomeni di propagazione verso riva (rifrazione e shoaling) sino al frangimento, tenendo conto anche del fenomeno della diffrazione di eventuali ostacoli emergenti e/o sommersi.

Altra condizione al contorno è costituita dal valore della portata solida netta agli estremi dell'area simulata.

3.2. Discretizzazione della linea di riva e definizione delle condizioni al contorno

Il tratto di litorale simulato si estende fra il Porto di Voltri (a est) e il tratto di costa rocciosa subito ad ovest della foce del torrente Cerusa, per uno sviluppo costiero di circa 1,7 km lungo l'asse di riferimento.

Il tratto di costa è stato discretizzato con 170 sezioni tracciate ortogonalmente rispetto all'asse del modello. Le sezioni sono state tracciate ad interasse di 10 m uniformemente lungo l'asse di riferimento.

CONDIZIONI DI ESTREMITÀ

Le condizioni al contorno nel modello GENESIS possono essere espresse in termini di portata solida longitudinale od in termini di variazione della posizione della linea di riva. Nel caso in esame, avendo considerato l'intera unità fisiografica si è imposta la condizione di portata solida nulla sia in corrispondenza del Porto di Voltri (punto di estremità di est) che in corrispondenza della costa rocciosa ad ovest della foce del torrente Cerusa (punto di estremità di ovest).

APPORTI SOLIDI TRASVERSALI

Sulla base dello studio STL allegato si è considerato un apporto solido medio annuo del torrente Leira di circa 1.100 m^3/anno e del torrente Cerusa di circa 1.350 m^3/anno.

DIAMETRO MEDIO DEI SEDIMENTI

Il modello di calcolo per descrivere la mobilità del sedimento, utilizza:

- il peso specifico immerso, assunto pari a 1,15 t/m^3;
- un coefficiente di taratura.

Nel caso di spiagge a granulometria non uniforme il coefficiente di taratura viene fatto variare in funzione del diametro medio D_{50} del sedimento. Nel modello in esame si è considerata una distribuzione uniforme del diametro medio del sedimento lungo la spiaggia ad ovest della foce del torrente Leira ed una distribuzione uniforme del diametro medio del sedimento lungo la spiaggia ad est della foce del torrente Leira.

Il coefficiente di taratura è stato dimensionato in modo da poter riprodurre il trasporto solido litoraneo netto stimato nello studio STL allegato.

Il modello di calcolo per descrivere la forma del profilo trasversale di spiaggia utilizza l'espressione di Dean ($h=Ay^{2/3}$) dove A è un coefficiente funzione di un diametro medio D_{50}.

Come evidenziato nello studio STL l'andamento medio del profilo trasversale di spiaggia fino alla profondità di chiusura è ben rappresentato da un profilo di Dean tracciato mediamente:

- con un valore del D_{50}=1,20 mm per la spiaggia ad ovest della foce del torrente Leira;
- con un valore del D_{50}=1,10 mm per la spiaggia ad est della foce del torrente Leira.

Tali valori del D_{50} sono stati adottati nelle simulazioni per le due spiagge in esame.

ALTEZZA DEL PROFILO DI SPIAGGIA

Il modello di calcolo considera spostamenti rigidi del profilo trasversale di spiaggia tra la profondità di chiusura e l'altezza limite di swash. La profondità di chiusura è stata considerata pari 7,9 m, mentre l'altezza limite di swash è stata considerata pari a 1.6m (vedi lo studio STL e lo studio SM allegati). In definitiva l'altezza del profilo di spiaggia ai fini del bilancio sedimentario è stata considerata pari a 9,5 m.

OPERE A MARE

Il modello di calcolo è in grado di simulare:

1. pennelli trasversali, che influenzano per diffrazione i fenomeni di propagazione del moto ondoso fino al frangimento ed intercettano parte della "deriva" (drift) longitudinale del trasporto solido;
2. barriere frangiflutti distaccate dalla linea di riva, che modificano per diffrazione le condizioni di propagazione del moto ondoso nella zona ridossata, determinando un differente campo di trasporto solido;
3. opere di tipo misto, combinando le opere di discontinuità trasversali e longitudinali;
4. opere radenti alla linea di riva, che rappresentano una condizione di inerodibilità della costa;
5. barriere sommerse, che modificano per trasmissione le condizioni di propagazione del moto ondoso nella zona ridossata determinando un differente campo di trasporto solido.

Le opere di armatura alla foce del torrente Leira, come l'opera di progetto sono state descritte con pennelli trasversali. Il pennello insabbiato posto ad est della foce del torrente Leira è stato schematizzato come un elemento puntuale inerodibile.

CLIMA ONDAMETRICO

L'evoluzione del litorale è stata riprodotta tenendo conto del moto ondoso incidente. Le onde utilizzate sono quelle ricavate nello "Studio meteomarino" allegato. In particolare sono stati utilizzate le onde morfologiche equivalenti determinate alla profondità di -20 m al largo di Voltri nel periodo 1/7/1989-

30/6/2004, riportate in Tabella 1. Per ogni settore di provenienza nelle simulazioni sono state utilizzate onde equivalenti di durata non superiore a 225 ore.

durata mesi	H_e *(m)*	T_e *(s)*	*a (°N)*
0.030	0.90	6.64	120.00
0.088	1.20	6.93	130.00
0.177	1.43	7.04	140.00
0.067	1.50	7.66	150.00
0.097	1.63	9.03	160.00
0.096	1.59	9.25	170.00
0.064	1.61	9.43	180.00
0.077	1.68	10.11	190.00
0.212	1.67	10.42	200.00
0.304	1.51	8.99	210.00
0.134	1.08	6.35	220.00
0.022	0.72	4.45	230.00
0.067	1.50	7.66	150.00
0.097	1.63	9.03	160.00
0.096	1.59	9.25	170.00
0.064	1.61	9.43	180.00
0.077	1.68	10.11	190.00
0.212	1.67	10.42	200.00
0.304	1.51	8.99	210.00
0.067	1.50	7.66	150.00
0.097	1.63	9.03	160.00
0.096	1.59	9.25	170.00
0.064	1.61	9.43	180.00
0.077	1.68	10.11	190.00
0.212	1.67	10.42	200.00
0.304	1.51	8.99	210.00
0.067	1.50	7.66	150.00
0.097	1.63	9.03	160.00
0.096	1.59	9.25	170.00
0.064	1.61	9.43	180.00
0.077	1.68	10.11	190.00
0.212	1.67	10.42	200.00
0.304	1.51	8.99	210.00
4.120			

Tabella 1. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Onde morfologiche equivalenti

Periodo 01/07/1989-30/06/2004

3.3. Calibrazione e validazione del modello

Per una previsione attendibile dell'evoluzione futura della linea di riva è necessaria una preliminare calibrazione e validazione del modello sulla base dei dati storici a disposizione.

In fase di calibrazione è stata simulata l'evoluzione della linea di riva avvenuta tra il 2000 ed il 2006 tra il Porto di Voltri ed la foce del torrente Cerusa, determinando il valore dei coefficienti di movimentazione del materiale che meglio riproduce: l'evoluzione storica delle linea di riva ed il trasporto solido netto determinato per lo stesso periodo nello studio STL allegato.

In fase di validazione è stata simulata l'evoluzione della linea di riva avvenuta tra il 2006 ed il 2012 tra il Porto di Voltri ed la foce del torrente Cerusa. Le simulazioni sono state eseguite con il valore dei coefficienti di movimentazione del materiale determinato in fase di calibrazione. In fase di validazione si è pertanto verificato che gli errori commessi nel prevedere l'evoluzione delle linea di riva del 2012 siano dello stesso ordine di grandezza di quelli della fase di calibrazione per la previsione delle linea di riva del 2006. In particolare si è confrontata la posizione della linea di riva storica delle due spiagge poste a cavallo della foce del torrente Leira con quella calcolata dal modello.

3.3.1. Calibrazione – Evoluzione 2000÷2006

Il modello è stato applicato per riprodurre l'evoluzione della linea di riva tra il 2000 ed il 2006.

Dopo una serie di numerosi tentativi, eseguiti modificando i parametri di calibrazione del modello al fine di ottenere il migliore adattamento della linea di riva calcolata con quella misurata ed il trasporto solido netto determinato per il periodo 2000÷2006 nello studio STL allegato, si è pervenuti ai risultati riportati nella Figura 3. Nella figura è evidenziata la posizioni della foce del torrente Leira e di quella del torrente Cerusa. Dalla Figura 3 si evince che la linea di riva al termine della simulazione secondo il modello (linea rossa) risulta in buon accordo con quella rilevata nel 2006 (linea blu). Infatti lo scarto quadratico medio tra la curva teorica e quella misurata raggiunge appena i 2,5 m (0.4 m/anno) per l'intera spiaggia investigata. Approssimazione simili sono state raggiunte tanto per la spiaggia compresa tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira (progressive 0÷460) quanto per quella compresa tra il pennello insabbiato e la foce del torrente Leira (progressive 460÷840) che per quella ad ovest della stessa foce (progressive 840÷1680).

L'errore medio, l'errore massimo positivo e negativo e l'errore quadratico medio per l'intero tratto di costa simulato e per i singoli tratti sopra descritti sono sintetizzati nella Tabella 2.

La posizione della spiaggia calcolata rispetto a quella dell'aerofoto del 2006 risulta mediamente spostata verso terra di circa 1,4 m lungo la spiaggia compresa tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira, mentre risulta mediamente spostata verso terra di circa

1,0 m lungo la spiaggia compresa tra il pennello insabbiato e la foce del torrente Leira e di circa 0,8 m lungo la spiaggia ad ovest della stessa foce.

I valori massimi degli errori verso il mare (+) sono dell'ordine dei 3,5 m se si esclude il valore di 8m che si verifica a ridosso del porto di Voltri. I valori massimi degli errori verso terra (-) sono dell'ordine dei 6 m.

Tenuto conto che:

- le linee di costa sono state desunte da aerofoto in scala al 10.000 per cui lo spessore del pennino (0,3mm) comporta errori di 3,0 m sulla valutazione della linea di riva;
- il clima ondametrico utilizzato nelle simulazioni è quello medio annuo ottenuto dall'analisi dei dati ondametrici del periodo 1989÷2004, mentre l'evoluzione stoica del 2006 è relativa all'effettiva sequenza di onde incidenti la spiaggia nel periodo 2000÷2006;

i risultati della simulazione eseguita per la riproduzione delle modifiche morfodinamiche del litorale avvenute tra il 2000 ed il 2006 sono più che soddisfacenti.

Nella Figura 1 è riportato l'andamento nel tempo del trasporto solido netto costiero calcolato dal modello tra il 2000 ed il 2006. Nella figura le portate positive indicano una risultante del trasporto solido litoraneo da est verso ovest concorde con il verso positivo dell'asse del modello.

In base al moto ondoso incidente considerato, alle condizioni al contorno ed al valore del coefficiente di movimentazione del materiale è stato calcolato:

- un trasporto solido netto diretto verso est lungo tutto il tratto di litorale;
- un valore nullo del trasporto solido in prossimità del porto di Voltri;
- un valore massimo del trasporto solido netto ad est della foce del torrente Leira di circa 2.000 m^3/anno;
- un valore minimo del trasporto solido netto ad ovest della foce del torrente Leira di circa 1.000 m^3/anno;
- un valore massimo del trasporto solido netto ad est della foce del torrente Cerusa di circa 1.500 m^3/anno;
- un valore nullo del trasporto solido ad ovest della foce del torrente Cerusa.

3.3.2. Validazione – Evoluzione 2006÷2012

Il modello è stato successivamente applicato per verificare la riproduzione dell'evoluzione storica della linea di riva avvenuta tra il 2006 ed il 2012. In questa fase sono stati utilizzati gli stessi valori dei coefficienti di movimentazione del materiale individuati in fase di calibrazione. Inoltre, come nella fase precedente, si è ipotizzando un apporto solido medio annuo del torrente Leira di circa 1.100 m^3/anno e del torrente Cerusa di circa 1.350 m^3/anno . Si è pervenuti ai risultati riportati nella Figura 4 Dalla figura si evince che la linea di riva rilevata nel 2012 (linea blu) risulta in buon accordo con quella calcolata dal modello (linea rossa).

L'errore quadratico medio tra linea di riva calcolata e quella rilevata risulta di circa 2,6 m (0.45 m/anno). Approssimazione maggiore è stata raggiunta per il tratto di spiaggia compreso tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira (progressive 0÷460) in cui l'errore quadratico medio tra linea di riva calcolata e quella rilevata risulta di circa 1,2 m (0.2 m/anno). Approssimazione minore si è ottenuta per il tratto di spiaggia compreso tra il pennello insabbiato e la foce del torrente Leira (progressive 460÷840) in cui l'errore quadratico medio tra linea di riva calcolata e quella rilevata risulta di circa 4,0 m (0,7 m/anno).

Per il tratto di spiaggia ad ovest della foce del torrente Leira (progressive 840÷1680) l'errore quadratico medio risulta pari a circa 2,4m (0,4 m/anno).

L'errore medio, l'errore massimo positivo e negativo e l'errore quadratico medio per l'intero tratto di costa rilevato nel 2012 e per i singoli tratti sopra descritti sono sintetizzati nella Tabella 3.

Nel tratto di spiaggia compreso tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira la posizione della spiaggia calcolata rispetto a quella rilevata nel 2012 risulta praticamente identica.

Diversamente a quanto rilevato in fase di calibrazione la posizione della spiaggia calcolata rispetto a quella di riferimento in fase di validazione (riva 2012) risulta mediamente spostata verso mare. In particolare la posizione della spiaggia calcolata rispetto a quella rilevata nel 2012 risulta:

- mediamente spostata verso il mare di circa 1,1 m per il tratto di spiaggia compreso tra il pennello insabbiato e la foce del torrente Leira, con errori massimi verso mare (+) di circa 9,8 m e verso terra (-) di circa 7,2 m;
- mediamente spostata verso mare di circa 1,5 m, per il tratto di spiaggia ad ovest della foce del torrente Leira, con errori massimi verso mare (+) di circa 5,4 m e verso terra (-) di circa 2,4 m.

Gli errori ottenuti in fase di validazione utilizzando lo stesso set di parametri utilizzati in fase di calibrazione sono dello stesso ordine di grandezza di quelli ottenuti in fase di calibrazione, pertanto alla luce dei risultati ottenuti, si può ritenere che il modello possa essere utilizzato per prevedere la

posizione futura della linea di riva nel tempo con i parametri ed i limiti ottenuti in fase di calibrazione e validazione.

Nella Figura 2 è riportato l'andamento del trasporto solido netto longitudinale calcolato dal modello tra il 2006 ed il 2012.

In base al moto ondoso incidente considerato, alle condizioni al contorno ed al valore del coefficiente di movimentazione del materiale è stato calcolato:

- un trasporto solido netto diretto verso est lungo tutto il tratto di litorale;
- un valore nullo del trasporto solido in prossimità del porto di Voltri;
- un valore massimo del trasporto solido netto ad est della foce del torrente Leira di circa 2.500 m^3/anno;
- un valore del trasporto solido netto ad ovest della foce del torrente Leira di circa 1.100 m^3/anno;
- un valore minimo del trasporto solido netto circa 150 m ad ovest della foce del torrente Leira di circa 800 m^3/anno;
- un valore massimo del trasporto solido netto ad est della foce del torrente Cerusa di circa 1.500 m^3/anno;
- un valore nullo del trasporto solido ad ovest della foce del torrente Cerusa.

sezione	0-48	48-80	80-170	0-170
progr.	0-460	460-840	840-1680	0-1680
Media	1.38	-0.98	-0.80	-0.20
Max +	8.25	3.16	3.53	8.25
Max -	-0.53	-4.22	-6.33	-6.33
sqm	2.40	2.52	2.53	2.47
sqm annuale	0.40	0.42	0.42	0.41

Tabella 2. Errore medio, Errore massimo +/- ed errore quadratico medio tra la linea misurata e quella calcolata per tratti di costa – fase di calibrazione 2006÷2008 (valori in metri)

sezione	0-48	48-80	80-170	0-170
progr.	0-460	460-840	840-1680	0-1680
Media	0.01	1.11	1.51	0.98
Max +	3.30	9.79	5.38	9.79
Max -	-2.23	-7.17	-2.37	-7.17
sqm	1.19	4.01	2.40	2.63
sqm annuale	0.20	0.67	0.40	0.44

Tabella 3. Errore medio, Errore massimo +/- ed errore quadratico medio tra la linea misurata e quella calcolata per tratti di costa – fase di validazione 2008÷2011 (valori in metri)

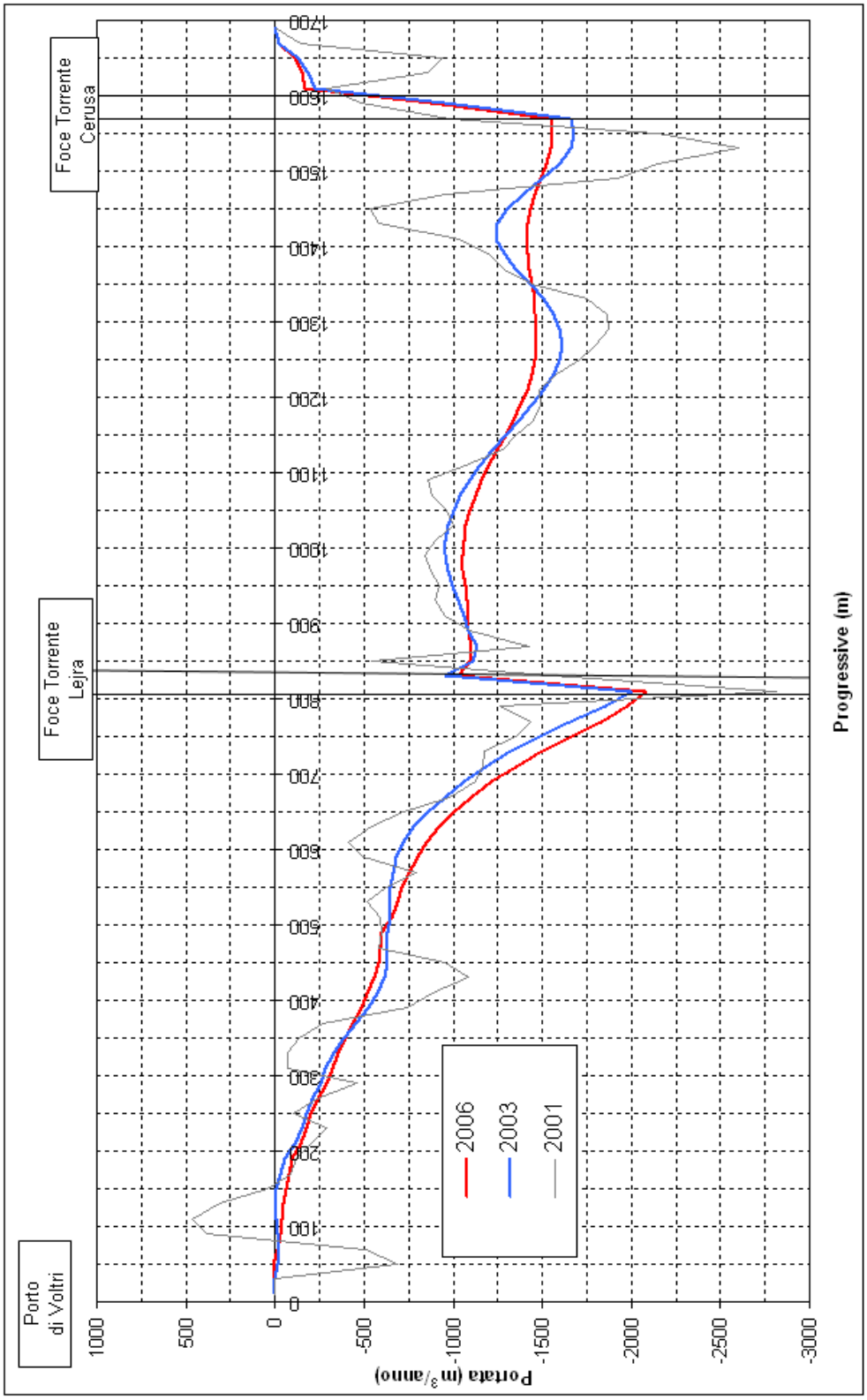


Figura 1. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS Calibrazione del modello 2000-2006

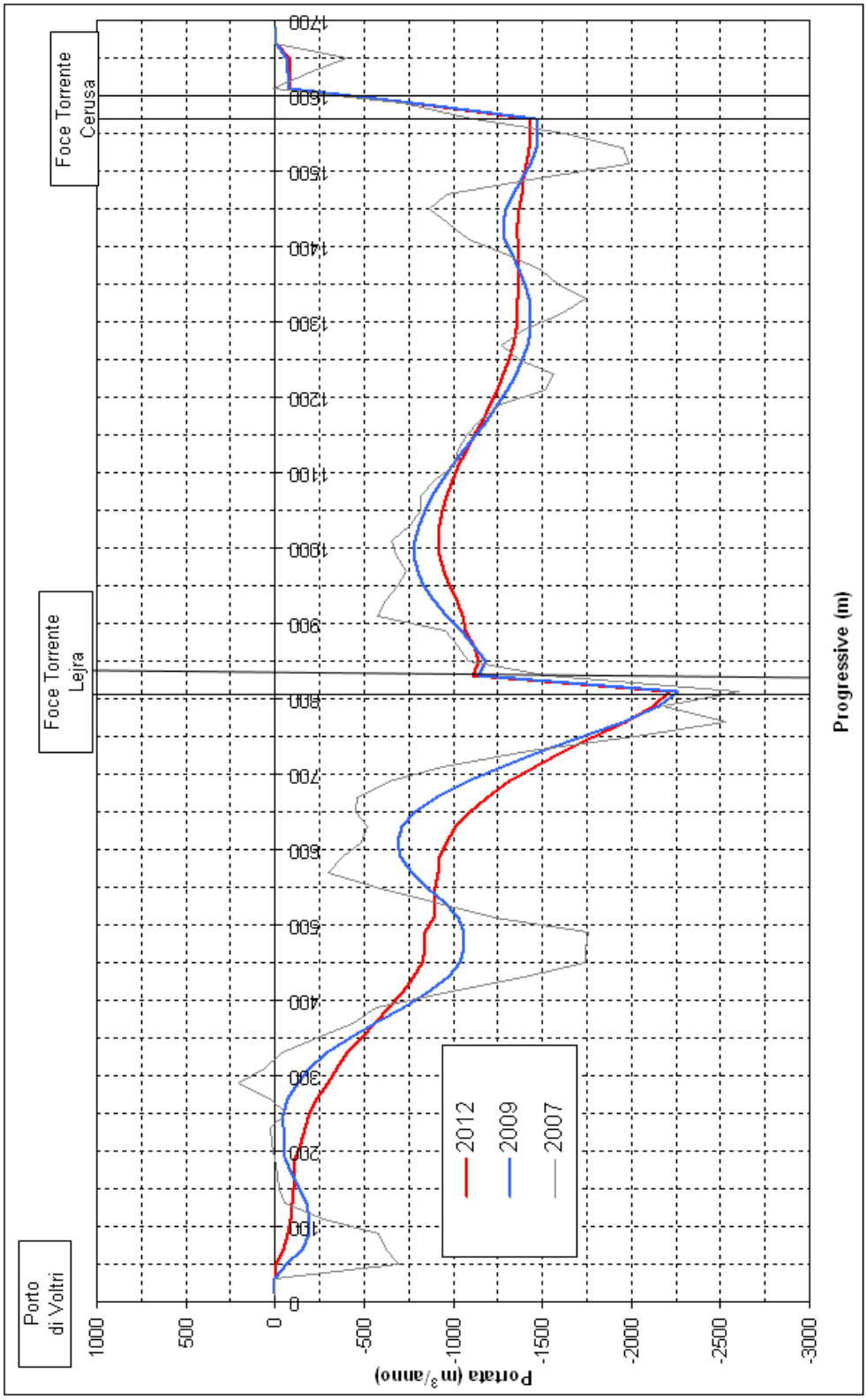


Figura 2. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS Validazione del modello 2006÷2012

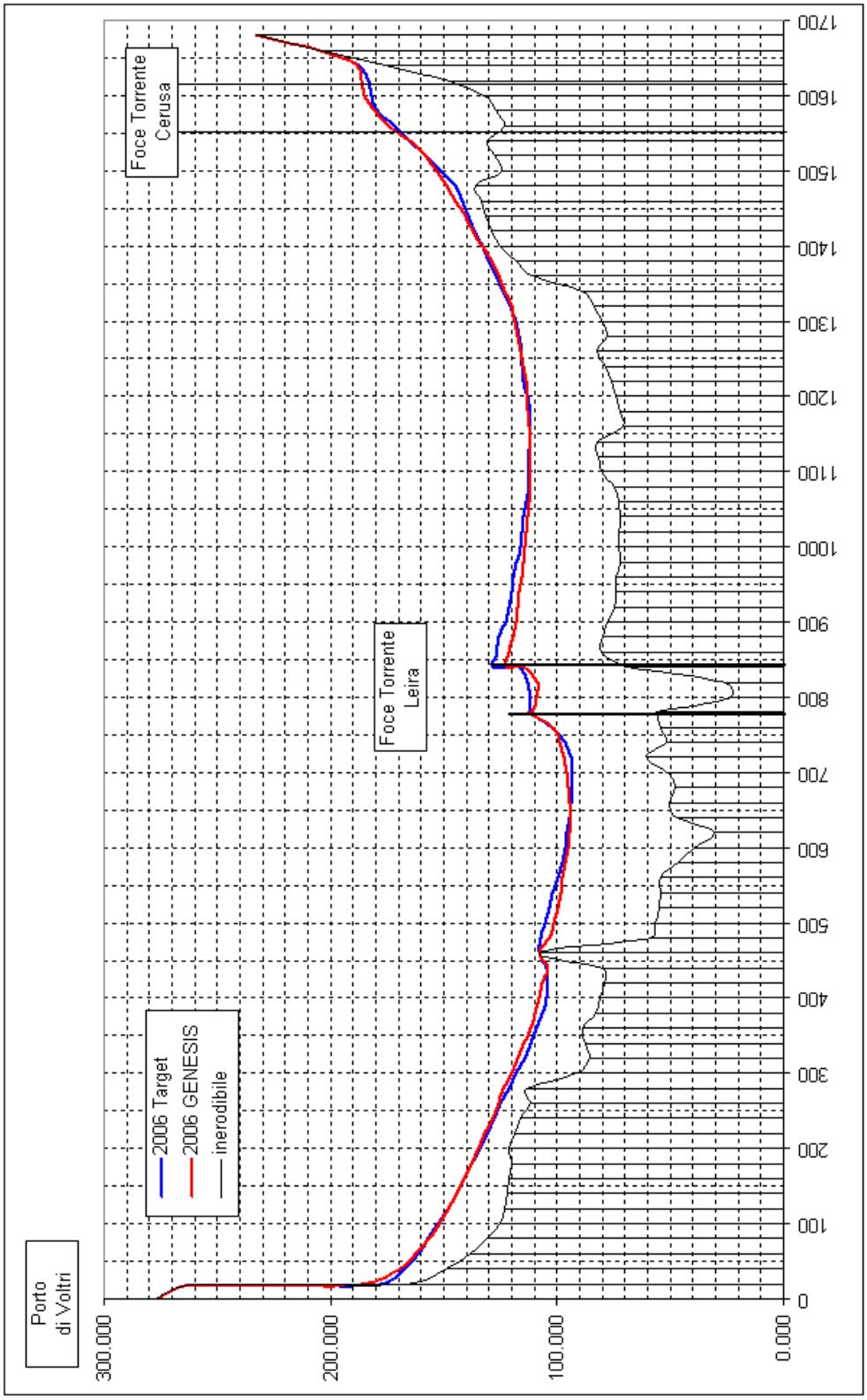


Figura 3. Calibrazione evoluzione 2000-2006

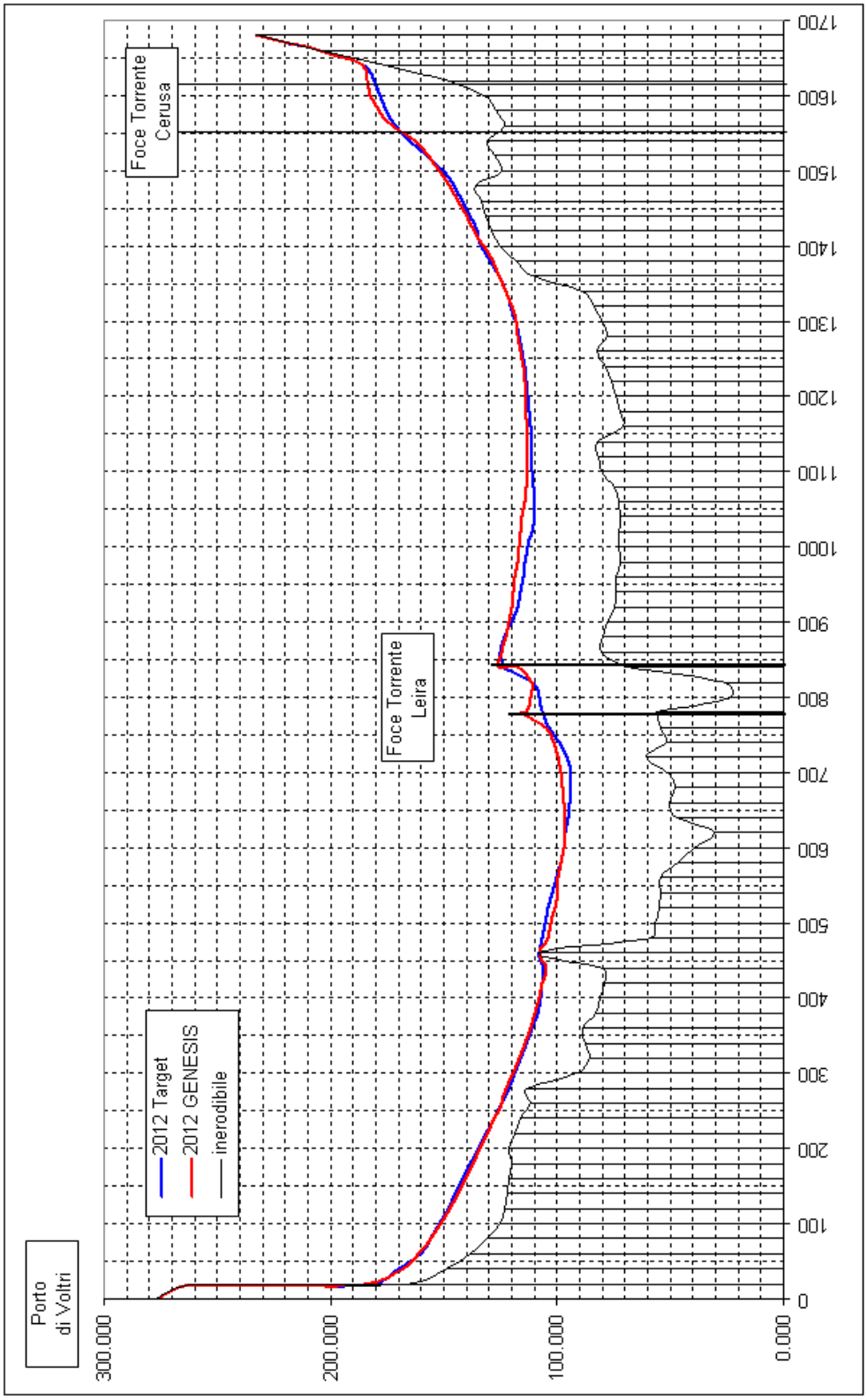


Figura 4. Validazione evoluzione 2006-2012

3.4. Previsione dell'evoluzione della linea di riva

La seconda fase dell'applicazione del modello GENESIS ha avuto per obiettivo la previsione dell'evoluzione della linea di riva nei 20 anni futuri, per diversi scenari, mantenendo i valori dei parametri di taratura individuati in fase di calibrazione. Per quanto riguarda la linea di riva iniziale si fatto riferimento alla linea di riva del 2012.

E' stata prevista inizialmente l'evoluzione della linea di riva nello scenario attuale, ovvero l'evoluzione della linea di riva senza la realizzazione della scogliera in progetto. Successivamente si è studiato il comportamento evolutivo della linea di costa in presenza della scogliera in progetto. Infine si è studiato il comportamento evolutivo della linea di costa in presenza della scogliera in progetto e di un intervento di ripascimento di circa 10.000 m^3 nel tratto di 250 ad ovest della scogliera in progetto volto ad avanzare la linea di riva di circa 5 m verso il mare al fine di proteggere la passeggiata di Voltri. L'intervento di ripascimento è stato previsto con sabbia molto grossolana simile a quella nativa presente nella spiaggia sommersa in prossimità della battigia.

1. Il risultato della previsione delle modifiche morfologiche del litorale nello scenario attuale è riportato in scala distorta nella Figura 8, nella quale sono riportate le linee di riva dopo 5, 10, 15 e 20 anni. Nella Figura 11 sono riportate in dettaglio le linee di riva in prossimità della foce del torrente Leira previste dopo 5, 10 e 20 anni. Nella Figura 5 è riportato l'andamento del trasporto solido costiero dopo 1, 5, 10, 15 e 20 anni. Anche in questo caso i flussi positivi si intendono diretti nel verso concorde con l'asse del modello.

   Nella situazione attuale per i prossimi 20 anni si prevedono le seguenti tendenze evolutive:

   - la spiaggia compresa tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira risulterà sostanzialmente stabile;
   - la spiaggia compresa tra il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira e la foce dello stesso torrente risulterà in leggero accrescimento, con avanzamenti valutati in circa 0,5m all'anno;
   - la linea di riva i corrispondenza della foce le torrente Leira risulterà stabile nella posizione attuale;
   - la spiaggia ad ovest della foce le torrente Leira risulterà stabile fino alla foce del torrente Cerusa;
   - il trasporto solido netto risulterà diretto verso est lungo tutto il tratto di litorale;
   - il trasporto solido lungo la spiaggia ad est della foce del torrente Leira risulterà essere crescente dal Porto di Voltri fino alla foce dello stesso torrente, in cui verranno raggiunti valori massimi di circa 2.000 m^3/anno;

- il trasporto solido in corrispondenza della riva destra della foce del torrente Leira manterrà valori di circa 1.000 m^3/anno;
- il trasporto solido lungo la spiaggia ad ovest della foce del torrente Leira risulterà essere leggermente crescente dalla foce del torrente Leira fino alla foce del torrente Cerusa, in cui verranno raggiunti valori massimi di circa 1.350 m^3/anno.

2. Il risultato della previsione delle modifiche morfologiche del litorale in presenza della scogliera di progetto è riportato in scala distorta nella Figura 9, nella quale sono riportate le linee di riva dopo 5, 10, 15 e 20 anni. Nella Figura 12 sono riportate in dettaglio le linee di riva previste in prossimità della foce del torrente Leira dopo 5, 10 e 20 anni. Nella Figura 6 è riportato l'andamento del trasporto solido costiero dopo 1, 5, 10, 15 e 20 anni. Anche in questo caso i flussi positivi si intendono diretti nel verso concorde con l'asse del modello.

   Nello scenario con la scogliera di progetto si prevedono per i prossimi 20 anni le seguenti tendenze evolutive:

   - la spiaggia compresa tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira risulterà sostanzialmente stabile;
   - la spiaggia compresa tra il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira e la foce dello stesso torrente risulterà in leggero accrescimento con avanzamenti valutati in circa 0,5m all'anno;
   - la linea di riva i corrispondenza della foce le torrente Leira risulterà sostanzialmente stabile nella posizione attuale;
   - in corrispondenza della scogliera di progetto non si verificheranno insabbiamenti o avanzamenti della linea di riva;
   - la spiaggia ad ovest della scogliera in progetto risulterà stabile fino alla foce del torrente Cerusa;
   - il trasporto solido netto risulterà diretto verso est lungo tutto il tratto di litorale;
   - il trasporto solido lungo la spiaggia ad est della foce del torrente Leira risulterà essere crescente dal Porto di Voltri fino alla foce dello stesso torrente, in cui verranno raggiunti valori massimi di circa 2.000 m^3/anno;
   - il trasporto solido in corrispondenza della scogliera di progetto ad ovest della foce del torrente Leira avrà valori leggermente decrescenti nel tempo, con valori che passeranno da 1.250 m^3/anno a 1.000 m^3/anno dopo 20 anni;

- il trasporto solido lungo la spiaggia ad ovest della scogliera di progetto risulterà essere leggermente crescente dall'estremità del pennello fino alla foce del torrente Cerusa, in cui verranno raggiunti valori massimi di circa 1.350 m^3/anno.

3. Il risultato della previsione delle modifiche morfologiche del litorale in presenza della scogliera di progetto e di un intervento di ripascimento di circa 10.000 m^3 nel tratto di 250 m ad ovest della scogliera è riportato in scala distorta nella Figura 10 nella quale sono riportate le linee di riva dopo 5, 10, 15 e 20 anni. Nella Figura 13 sono riportate in dettaglio le linee di riva in prossimità della foce del torrente Leira previste dopo 5, 10 e 20 anni. Nella Figura 7 è riportato l'andamento del trasporto solido costiero dopo 1, 5, 10, 15 e 20 anni. Anche in questo caso i flussi positivi si intendono diretti nel verso concorde con l'asse del modello.

   Nello scenario di progetto con la scogliera di progetto e il ripascimento di circa 10.000 m^3 nel tratto di 250 m ad ovest della scogliera per i prossimi 20 anni si prevedono le seguenti tendenze evolutive:

   - la spiaggia compresa tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira risulterà sostanzialmente stabile;
   - la spiaggia compresa tra il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira e la foce dello stesso torrente risulterà in leggero accrescimento con avanzamenti valutati in circa 0,5m all'anno;
   - la linea di riva i corrispondenza della foce le torrente Leira risulterà in leggero avanzamento rispetto alla posizione attuale con valori di circa 0,25 m/anno;
   - in corrispondenza della scogliera di progetto non si verificheranno insabbiamenti o avanzamenti della linea di riva;
   - la spiaggia nel tratto di 250 m ad ovest della scogliera di progetto in corrispondenza del ripascimento risulterà avanzata di circa 5 m rispetto alla posizione attuale, ma nel corso degli anni essa tenderà a riportarsi nella posizione attuale, soprattutto nella parte più prossima alla scogliera di progetto;
   - la spiaggia ad ovest del tratto oggetto di ripascimento risulterà stabile fino alla foce del torrente Cerusa;
   - il trasporto solido netto risulterà diretto verso est lungo tutto il tratto di litorale;
   - il trasporto solido lungo la spiaggia ad est della foce del torrente Leira risulterà essere crescente dal Porto di Voltri fino alla foce del torrente, in cui verranno raggiunti valori massimi di circa 2.000 m^3/anno;

- il trasporto solido in corrispondenza della scogliera di progetto ad ovest della foce del torrente Leira avrà valori costanti nel tempo di circa 1.250 m^3/anno;
- il trasporto solido lungo la spiaggia ad ovest della scogliera di progetto per effetto del ripascimento risulterà essere uniforme fino alla foce del torrente Cerusa, con valori di circa 1.350m^3/anno.

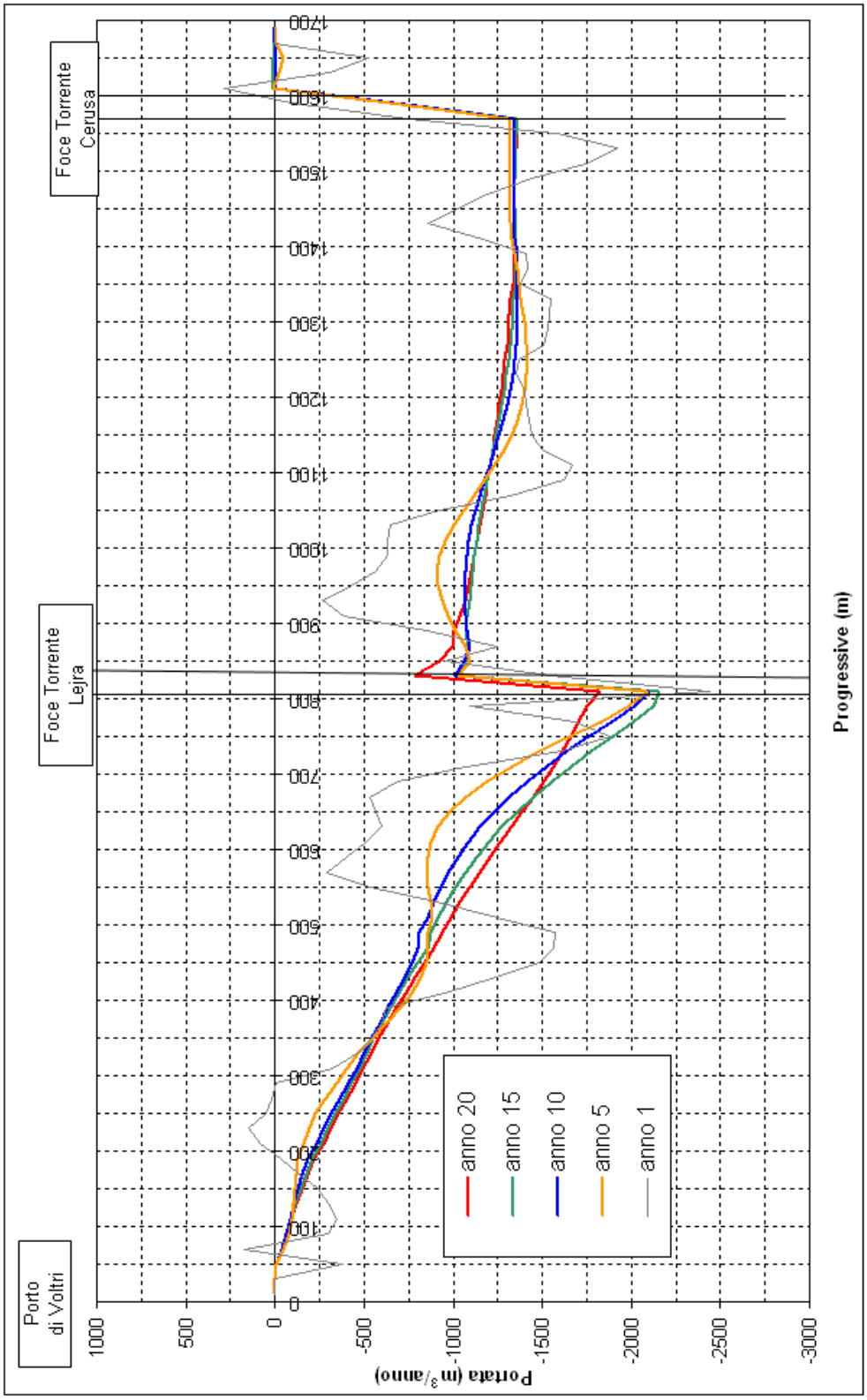


Figura 5. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS – scenario attuale

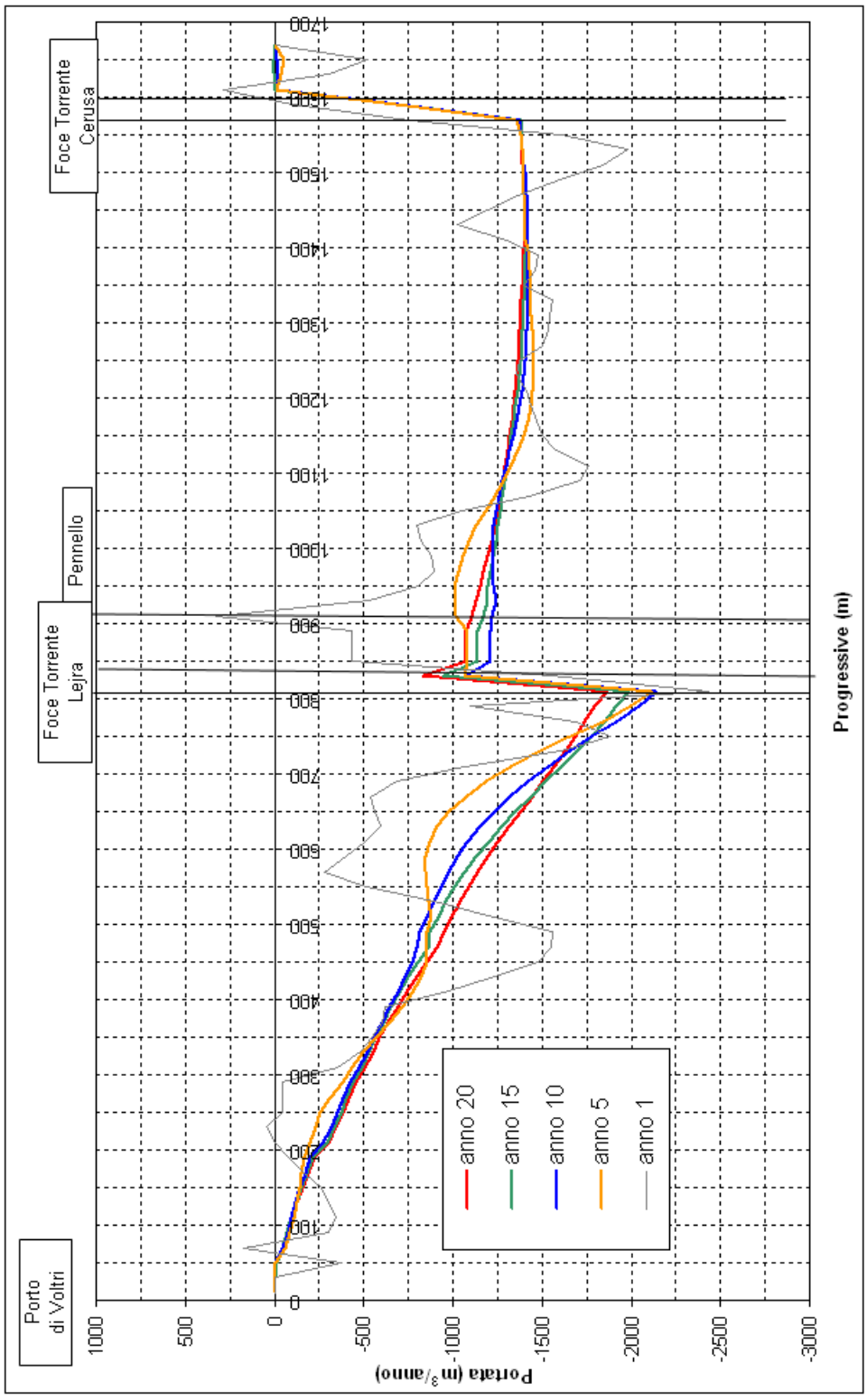


Figura 6. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS – scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira

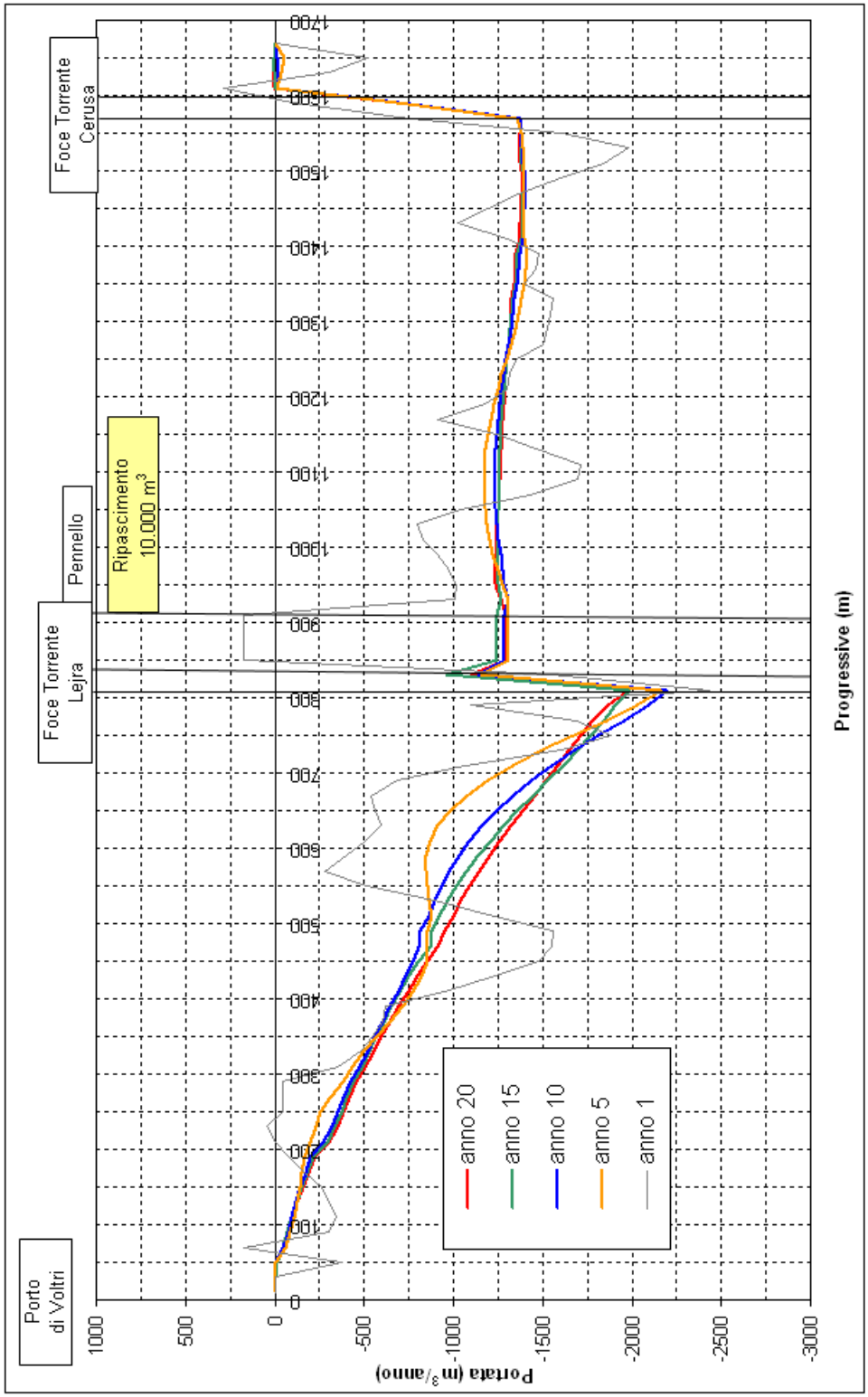


Figura 7. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS - Scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira e ripascimento di 10.000 m^3

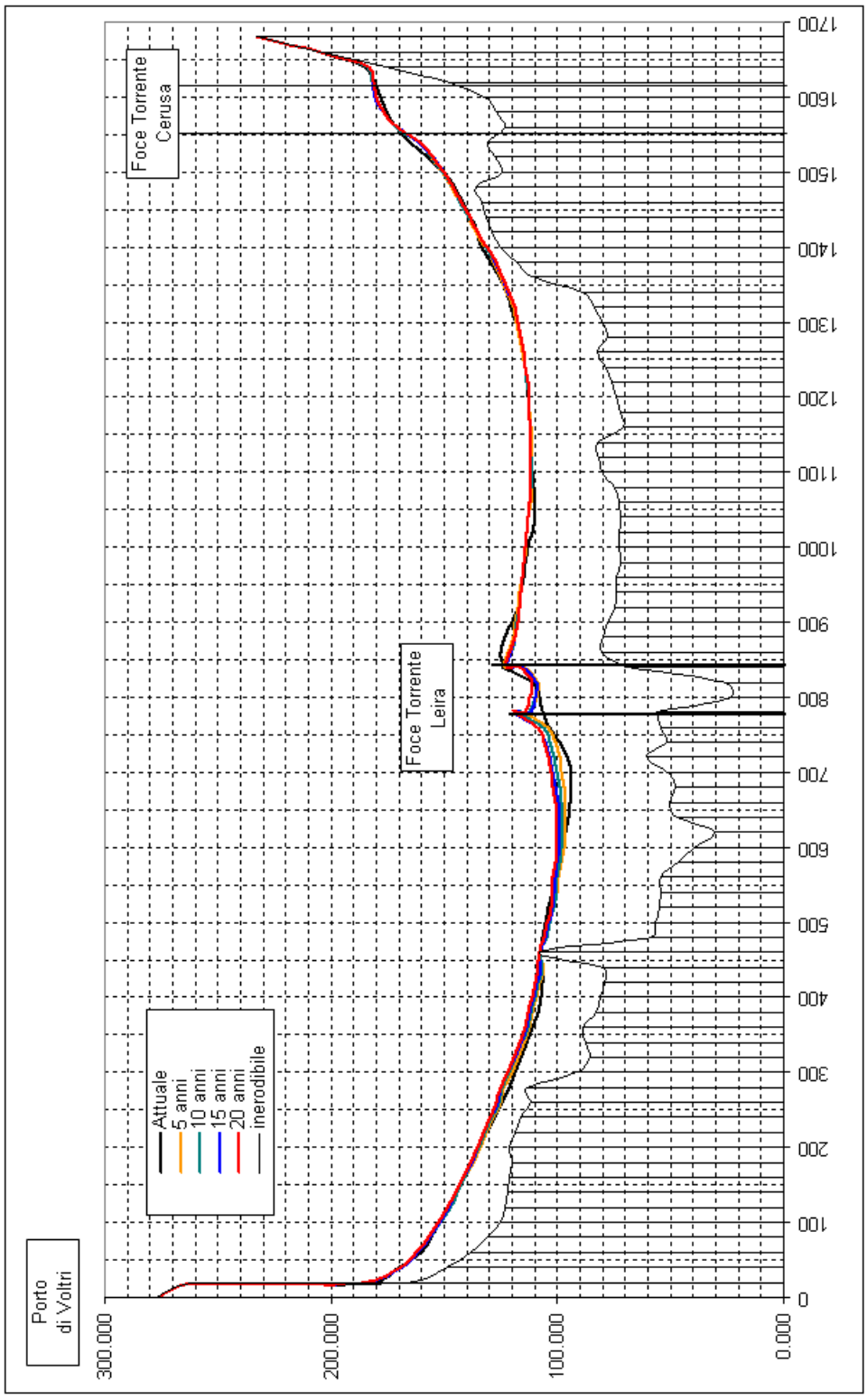


Figura 8. Previsione evoluzione linea di riva, scenario attuale

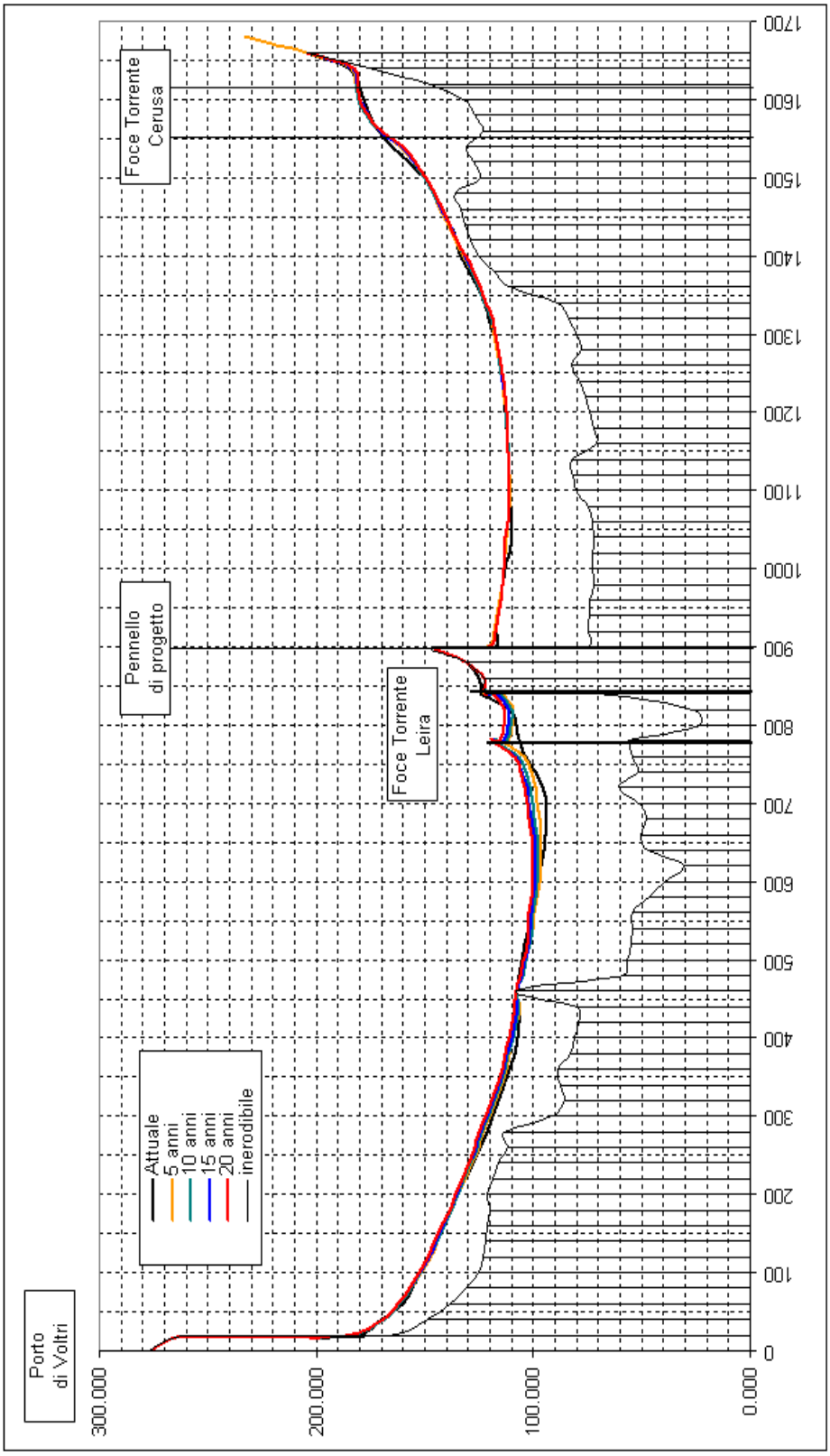


Figura 9. Previsione evoluzione linea di riva, con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira

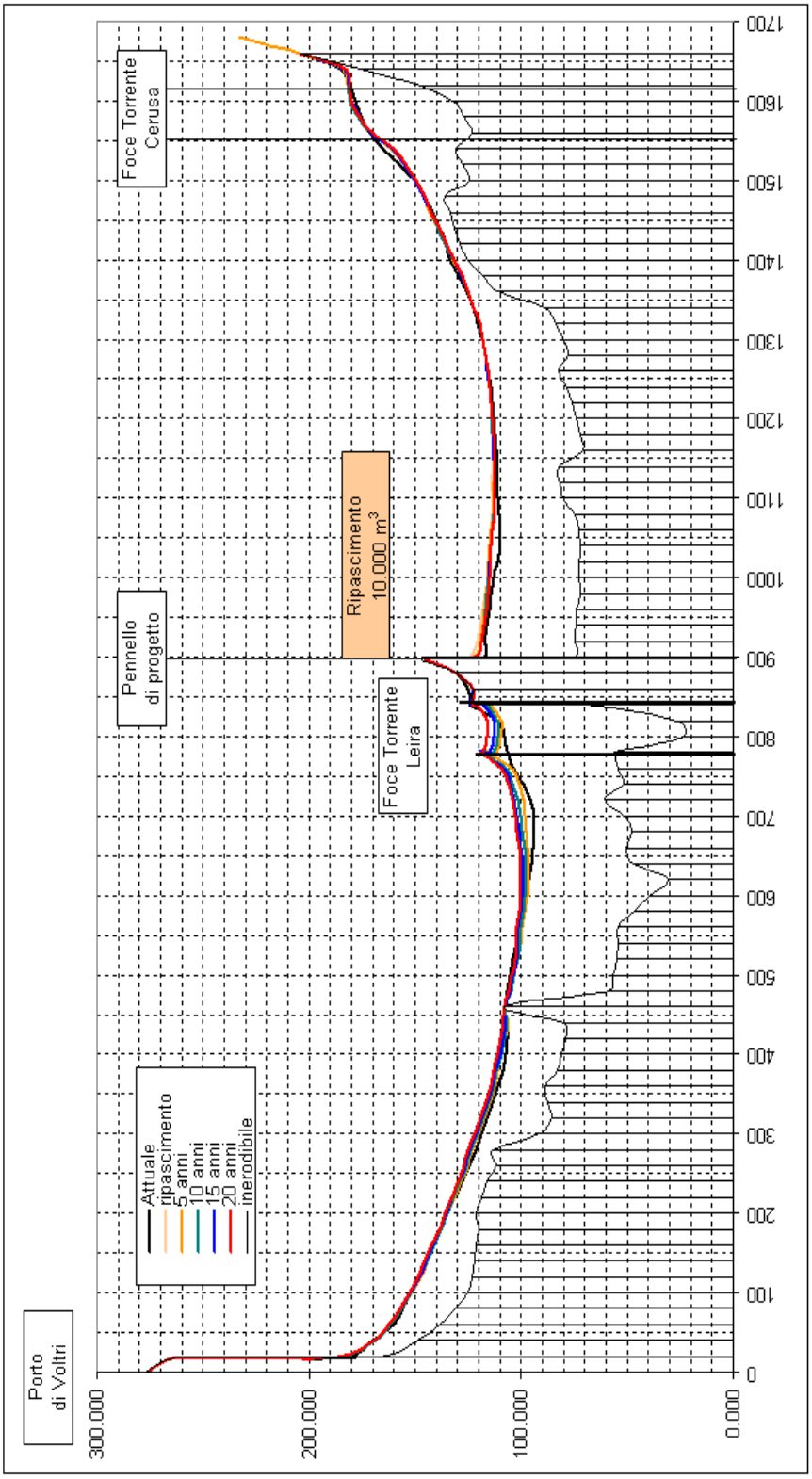


Figura 10. Previsione evoluzione linea di riva, scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira e ripascimento di 10.000 m^3 di sabbia molto grossolana



Figura 11. Previsione evoluzione linea di riva, scenario attuale - dettaglio in prossimità della foce del torrente Leira



Figura 12. Previsione evoluzione linea di riva, scenari o con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira - dettaglio in prossimità della foce del torrente Leira



Figura 13. Previsione evoluzione linea di riva, scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira e ripascimento di 10.000 m^3 di sabbia molto grossolana - dettaglio in prossimità della foce del torrente Leira

4. CONCLUSIONI

Le simulazioni eseguite con il modello numerico morfodinamico hanno messo in luce le seguenti tendenze evolutive del litorale in esame:

- la spiaggia di Voltri risulta nella sua configurazione attuale:
  - stabile nel tratto compreso tra il Porto di Voltri ed il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira;
  - in leggero avanzamento nel tratto compreso tra il pennello insabbiato ad est della foce del torrente Leira e la foce dello stesso torrente, con avanzamenti che non supereranno i 0,5 m all'anno;
  - stabile in corrispondenza della foce le torrente Leira;
  - stabile nel tratto ad ovest della foce le torrente Leira fino alla foce del torrente Cerusa;
- il clima ondoso produce un trasporto solido netto diretto verso est, con valori:
  - nulli in corrispondenza del Porto di Voltri;
  - di circa 2.000 m^3/anno subito ad est della foce del torrente Leira;
  - di circa 1.000 m^3/anno subito ad ovest della foce del torrente Leira;
  - di circa 1.350 m^3/anno in corrispondenza della foce del torrente Cerusa;
  - nulli in corrispondenza della costa rocciosa ad ovest della foce del torrente Cerusa.

Il confronto della linea di riva prevista dopo 20 anni nello scenario attuale (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) e quella prevista nello stesso anno con la scogliera di progetto (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), rappresentata da un braccio laterale dell'armatura di foce in riva destra del torrente Leira, mostra come la scogliera in progetto non induce modifiche morfodinamiche sul litorale, tanto ad est della foce del torrente Leira che ad ovest della stessa.

In particolare l'applicazione modellistica ha messo in evidenza che il pennello laterale in progetto non determina avanzamenti della spiaggia ad ovest della stessa opera e quindi non determina alcuna rotazione planimetrica della spiaggia tra la foce del torrente Leira e la foce del Torrente Cerusa.

Infine l'applicazione modellistica ha messo in evidenza che la presenza del pennello laterale in progetto non determina modifiche morfodinamiche alla foce del torrente Leira. Infatti le linee di riva nel periodo investigato di 20 anni alla foce del torrente risultano essere pressoché identiche sia in assenza che in presenza del pennello laterale all'armatura di foce.

Il confronto della linea di riva prevista dopo 20 anni nello scenario con la scogliera di progetto (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) e quella prevista nello stesso anno con la

realizzazione combinata della scogliera e di un ripascimento di circa 10.000 m^3 nel tratto di 250 m subito ad ovest della stessa (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), mostra come il ripascimento determina un iniziale avanzamento della linea di riva di circa 5 m nel tratto oggetto di intervento. Nel corso degli anni però la linea di riva tende a riportarsi nella posizione attuale, soprattutto nella parte più prossima alla scogliera.

Per effetto della migrazione del sedimento del ripascimento verso est la linea di riva in corrispondenza della foce le torrente Leira potrebbe risultare in leggero avanzamento rispetto alla posizione attuale con valori di 0,25 m/anno.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS Calibrazione del modello 2000-2006 14

Figura 2. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS Validazione del modello 2006÷2012 15

Figura 3. Calibrazione evoluzione 2000-2006 16

Figura 4. Validazione evoluzione 2006-2012..... 17

Figura 5. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS – scenario attuale 22

Figura 6. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS – scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira 23

Figura 7. Andamento delle portate solide nette calcolata dal modello GENESIS - Scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira e ripascimento di 10.000 m^3 ... 24

Figura 8. Previsione evoluzione linea di riva, scenario attuale 25

Figura 9. Previsione evoluzione linea di riva, con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira 26

Figura 10. Previsione evoluzione linea di riva, scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira e ripascimento di 10.000 m^3 di sabbia molto grossolana..... 27

Figura 11. Previsione evoluzione linea di riva, scenario attuale - dettaglio in prossimità della foce del torrente Leira 28

Figura 12. Previsione evoluzione linea di riva, scenari o con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira - dettaglio in prossimità della foce del torrente Leira..... 29

Figura 13. Previsione evoluzione linea di riva, scenario con pennello in destra idraulica alla foce del torrente Leira e ripascimento di 10.000 m^3 di sabbia molto grossolana - dettaglio in prossimità della foce del torrente Leira..... 30

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Punto P0 (-20,0 m s.l.m.) – Onde morfologiche equivalenti 8

Tabella 2. Errore medio, Errore massimo +/- ed errore quadratico medio tra la linea misurata e quella calcolata per tratti di costa – fase di calibrazione 2006÷2008 (valori in metri) . 13

Tabella 3. Errore medio, Errore massimo +/- ed errore quadratico medio tra la linea misurata e quella calcolata per tratti di costa – fase di validazione 2008÷2011 (valori in metri) ... 13