

REGIONE ABRUZZO

PROVINCIA DI TERAMO



COMUNE DI ALBA ADRIATICA

DGRn. 88/2020 - D.M. 15.07.2016, n. 173 - D.lgs. 03/04/2006, n. 152 e s.m.i. - Programmazione opere di difesa costiera 2020/2021 da realizzare a seguito degli eventi meteomarinari del novembre 2019. 1^ Fase Urgente. Comune di Alba Adriatica (TE) - Realizzazione intervento di ingegneria marittima per la realizzazione di una spiaggia di alimentazione per ripascimento a rilascio controllato.

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ED ECONOMICA

Titolo elaborato :

STUDIO DELLA MORFODINAMICA COSTIERA

Committente:

DIPARTIMENTO INFRASTRUTTURE, TRASPORTI, MOBILITA', RETI E LOGISTICA - SERVIZIO OPERE MARITTIME E ACQUE MARINE
Ufficio Attività per Coste e Porti
Via Catullo n°2 - 65127 PESCARA - ☎ 085.9181108
PEC: dpe012@pec.regione.abruzzo.it

Relazione R 3

Dimensioni foglio: A4

Data: dicembre 2020

Il Progettista

Ing. Andrea SANZONE

Consulente tecnico aspetti di idraulica

Ing. Daniela SAN LORENZO

Consulente tecnico aspetti ambientali

Dott. ssa Sara SCRIMIERI



INDICE

1	PREMESSE.....	2
2	FINALITÀ E METODOLOGIA DI ANALISI.....	3
3	ANALISI PRELIMINARI	4
3.1	OSSERVAZIONI INTRODUTTIVE.....	4
3.2	EVOLUZIONE A LUNGO TERMINE: DEFINIZIONE DELLA FORMA PLANIMETRICA DELLO SVERSAMENTO.....	4
3.3	EVOLUZIONE A BREVE TERMINE: DEFINIZIONE DEL PROFILO TRASVERSALE DELLO SVERSAMENTO	7
4	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO PER LA VALUTAZIONE DELL'EVOLUZIONE A LUNGO TERMINE	10
4.1	IL MODELLO NUMERICO	10
4.2	SCHEMATIZZAZIONE DEL LITORALE E DOMINI DI CALCOLO.....	12
4.3	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI E DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO	14
4.4	MOTO ONDOSI.....	15
4.5	CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE	16
4.6	SCENARI DI SIMULAZIONE	17
4.6.1	Opzione 0	17
4.6.2	Opzione 1	17
4.6.3	Opzione 2	18
4.6.4	Opzione 3	18
4.6.5	Opzione 4	18
4.7	ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI.....	19
4.7.1	Opzione 0	19
4.7.2	Opzione 1	22
4.7.3	Opzione 2	23
4.7.4	Opzione 3	24
4.7.5	Opzione 4	26
5	OSSERVAZIONI CONCLUSIVE.....	27
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	28

1 Premesse

La presente relazione illustra lo Studio Morfodinamico, che consiste nella valutazione della tendenza evolutiva del litorale mediante approccio numerico, finalizzato all'ottimizzazione dell'intervento.

Il rapporto è organizzato come segue. Il successivo Capitolo 2 descrive sinteticamente la finalità dello studio e la metodologia di analisi. Il Capitolo 3 riporta alcune valutazioni preliminari sull'evoluzione a lungo e breve termine dell'intervento. Il Capitolo 4 descrive il modello numerico implementato per la previsione della tendenza evolutiva del litorale in esame; sono esplicitate le configurazioni oggetto delle simulazioni e viene mostrata la tendenza evolutiva del litorale per i vari scenari di simulazione valutandone i risultati in relazione alla Opzione 0 ("Do Nothing"). Il Capitolo 5, a favore di sintesi, traccia alcune osservazioni conclusive.

2 Finalità e metodologia di analisi

Lo “Studio Morfodinamico” illustrato in questo documento ha l’obiettivo di valutare la tendenza evolutiva del litorale di Alba Adriatica al fine di ottimizzare l’intervento di progetto, caratterizzato dalla realizzazione di una spiaggia a smantellamento programmato attraverso lo sversamento di sabbia di volume pari a circa 100'000 m³, in corrispondenza del litorale Nord (per una lunghezza di spiaggia pari a circa 500 m). Oltre allo sversamento sono previsti interventi rigidi costituiti da opere di contenimento che hanno lo scopo di incrementare la durata dell'intervento. A tal fine è necessario utilizzare strumenti numerici in grado di prevedere l’evoluzione del litorale.

Lo studio fornisce alcune informazioni preliminari basate sull'applicazione di un modello semplificato per la valutazione dell'evoluzione a lungo termine (pluriennale) dell'intervento. Inoltre, nella fase preliminare dello studio, sono fornite alcune indicazioni sull'evoluzione a breve termine utili all'ottimizzazione del profilo di intervento.

Successivamente, con l'utilizzo dei dati desunti dalle indagini di campo disponibili (rilievi batimetrici, sedimentologici e topografici) e i risultati dell'analisi meteomarina del paraggio, è stato implementato un modello numerico “a una linea” (Kraus et al., 1989), il quale è stato preventivamente e opportunamente calibrato e verificato in relazione al litorale in esame.

Nel dettaglio, i modelli “a una linea”, assumendo l’invarianza della forma del profilo trasversale del litorale, si fondano sulla determinazione della variazione della linea di riva indotta dal moto ondoso frangente legandolo al gradiente del trasporto solido longitudinale. Tale modello, in sintesi, è stato utilizzato per stimare la tendenza evolutiva del litorale in assenza di interventi e per ottimizzare la distribuzione dei volumi di sabbia da versare.

3 Analisi preliminari

3.1 Osservazioni introduttive

L'intervento in progetto è caratterizzato da alcuni elementi di innovatività che ne richiedono alcune analisi specifiche.

Da un punto di vista concettuale, la realizzazione dell'intervento è finalizzata a sopperire al deficit sedimentario dovuto all'annullamento dell'alimentazione fluviale (in particolare del Fiume Tronto, a Nord dell'area di intervento). Nella sostanza, l'obiettivo è quello di sostituire l'ormai assente apporto sedimentario tramite lo sversamento di una grande quantità di sedimento in una fascia di costa piuttosto ristretta (dell'ordine dei 500 m lineari), immediatamente a Sud della struttura denominata "Bambinopoli". In questo modo, lo scopo dell'intervento è incrementare temporaneamente l'ampiezza di spiaggia in un'area in cui l'arenile è notevolmente ridotto e, contemporaneamente, alimentare il litorale sottoflutto.

Sulla base di queste osservazioni, si sottolinea che l'intervento ha l'obiettivo di ripristinare momentaneamente l'apporto sedimentario del litorale che, da Bambinopoli, si estende sino al Porto di Giulianova. Pertanto, l'ampiezza di spiaggia nell'area di sversamento è destinata a diminuire nel tempo sino a che non si ripristinerà la configurazione ante-operam. Tale diminuzione dipende, in prima approssimazione, dall'evoluzione del litorale a breve termine (ore o giorni) e da quella a lungo termine (pluriennale). La prima è legata all'effetto delle singole mareggiate ed eventi di sovrizzo che tendono a modificare il profilo trasversale di spiaggia verso una configurazione di equilibrio. La seconda, invece, è legata principalmente all'effetto della componente longitudinale del trasporto solido che tende a far migrare i sedimenti dall'area di versamento.

Alla luce di quanto esposto, si evidenzia la necessità di alcune indagini preliminari finalizzate a definire:

- la forma planimetrica dello sversamento;
- la forma del profilo trasversale dello sversamento.

Entrambi gli aspetti devono essere analizzati per incrementare la durata dell'intervento. Nel seguito di questo capitolo, si analizzano preliminarmente gli effetti a lungo termine per valutare l'influenza della forma planimetrica e gli effetti a breve termine per valutare l'influenza della forma del profilo trasversale. I risultati preliminari ottenuti in questo capitolo sono dunque utilizzate per definire le configurazioni di progetto analizzate nel dettaglio nel capitolo successivo.

3.2 Evoluzione a lungo termine: definizione della forma planimetrica dello sversamento

Come descritto diffusamente nel Capitolo 4, l'evoluzione a lungo termine può essere descritta da un modello che tenga conto del ruolo della componente longitudinale del trasporto solido. Ne deriva la formulazione dei cosiddetti "modelli a una linea" che, nell'ipotesi semplificativa di onde poco oblique rispetto alle batimetriche, ammettono una soluzione analitica per qualsiasi forma dello sversamento.

Con l'obiettivo di valutare l'influenza della forma planimetrica dello sversamento, sono stati considerati i seguenti casi:

- sversamento di forma rettangolare, con estensione longitudinale pari a 500 m;
- sversamento di forma triangolare, con estensione longitudinale (base) pari a 500 m;
- sversamento trapezoidale, con base maggiore pari a 500 m e base minore (verso largo) pari a 250 m.

Il volume dello sversamento è stato considerato costante per tutti gli sversamenti e pari a 100'000 m³. L'avanzamento della linea di riva (ampiezza dello sversamento) è stato valutato nell'ipotesi di sedimento sversato in maniera uniforme su tutta la fascia attiva (sino ad una profondità di circa 6.6 m, si faccia riferimento allo studio Meteomarino del progetto in epigrafe). A tal proposito si evidenzia che tale avanzamento è notevolmente inferiore rispetto all'effettivo profilo di sversamento che non mira a riprodurre il profilo di equilibrio.

Tutte le configurazioni sono state analizzate sia nel caso di totale assenza di opere rigide, sia nel caso di un'opera trasversale posta in corrispondenza di un contorno laterale dello sversamento (sfruttando la simmetria della soluzione analitica).

Le condizioni di moto ondoso sono state desunte dai risultati dello Studio Meteomarino, in termini di onde di modellazione.

La Figura 3.1 mostra la variazione della posizione della linea di riva adimensionalizzata rispetto all'avanzamento massimo (a lungo termine) iniziale. I risultati si riferiscono ad un orizzonte temporale di 5 anni.

Si può osservare che, dopo, 5 anni il sedimento ha abbandonato l'area di sversamento (ascisse comprese tra 0 e 500 m) ed è migrato nelle aree limitrofe ($|x| < 2500$ m). Considerando l'effetto di un'opera di contenimento in corrispondenza dell'origine delle ascisse ($x=0$), lo smantellamento dello sversamento alimenta il solo litorale delle ascisse positive ($x > 500$ m).

La Figura 3.2 mostra, in analogia con la precedente, la variazione media annua della linea di riva da cui si possono trarre osservazioni simili.

La Figura 3.3 mostra la variazione del volume sedimentario presente nell'area di sversamento (di ampiezza pari a 500 m) e nella cosiddetta area di intervento (di ampiezza pari a 1000 m) nel caso di sversamento con forma planimetrica trapezoidale.

Si può osservare che, nel caso non protetto da un'opera di contenimento sopraflutto, circa l'80% del volume sversato ha abbandonato l'area di sversamento dopo 2 anni. Tuttavia, tale volume è migrato nella zona sottoflutto, all'interno dell'area di intervento, ove rimane su un orizzonte temporale di 10 anni.

Nel caso di presenza di un'opera di contenimento sopraflutto, il tempo di residenza del sedimento nell'area di sversamento aumenta notevolmente: circa il 75% del sedimento l'abbandona su un orizzonte temporale di 6 anni.

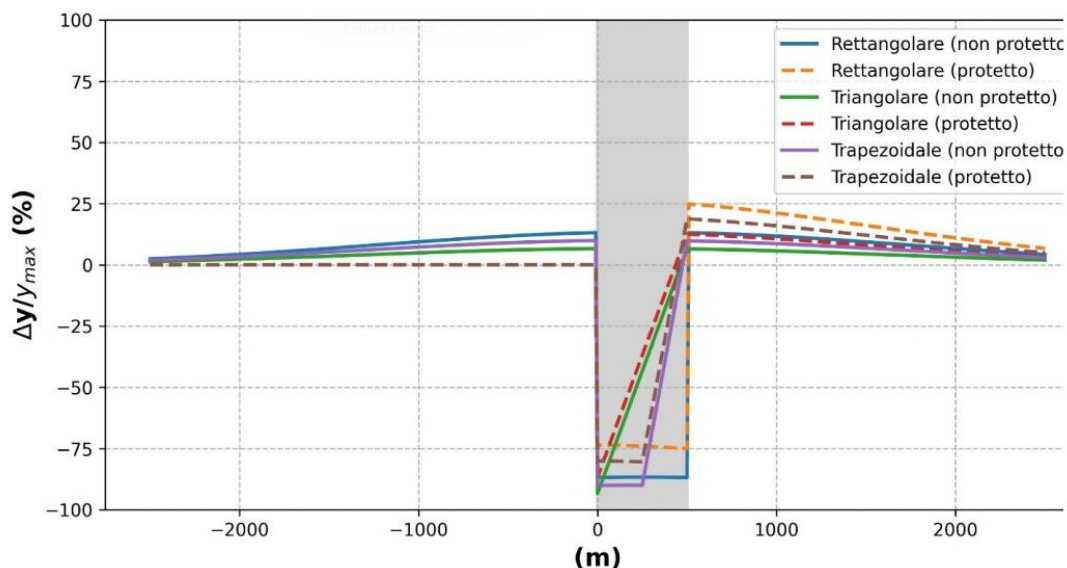


Figura 3.1: variazione longitudinale dell'arretramento rispetto all'ampiezza massima dello sversamento.

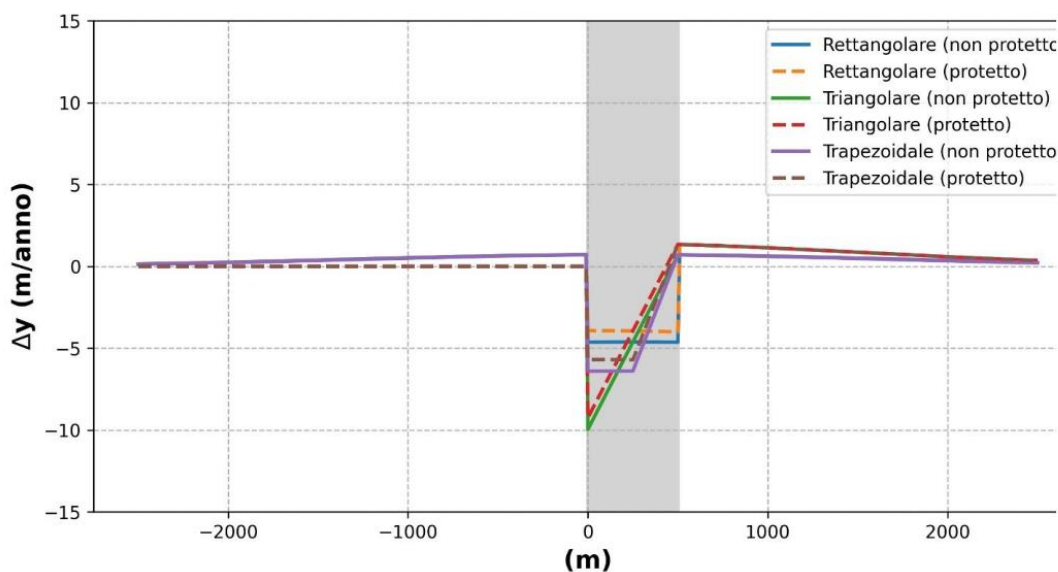


Figura 3.2: variazione longitudinale dell'arretramento medio annuo.

Sottolineando che i risultati dell'analisi sono basati su forti assunzioni esemplificative, è possibile osservare quanto segue:

- un'opera di contenimento in corrispondenza del contorno dello sversamento (nel caso specifico in corrispondenza del limite meridionale di Bambinopoli) incrementa la durata dell'intervento;
- la durata dell'intervento sembra compresa tra 2 anni (ottenuta per il caso non protetto) e 6 anni (ottenuta per il caso protetto da un'opera trasversale di contenimento);
- l'estensione del tratto di litorale sottoflutto alimentato dall'intervento supera i 1000 m (nel caso specifico misurata a partire dal limite meridionale di Bambinopoli) all'interno del quale, su un orizzonte temporale di 5 anni, rimane una percentuale del volume di sversamento compresa tra il

25% (ottenuta per il caso non protetto) e il 50% (ottenuta per il caso protetto da un'opera trasversale di contenimento).

Si sottolinea che tali osservazioni valgono senza considerare il processo di deriva sedimentaria attualmente in atto nell'area di intervento. D'altro canto, tali risultati sono da ritenersi a favore di sicurezza poiché è del tutto trascurato il tempo necessario a ricostituire un profilo trasversale di equilibrio dopo lo sversamento.

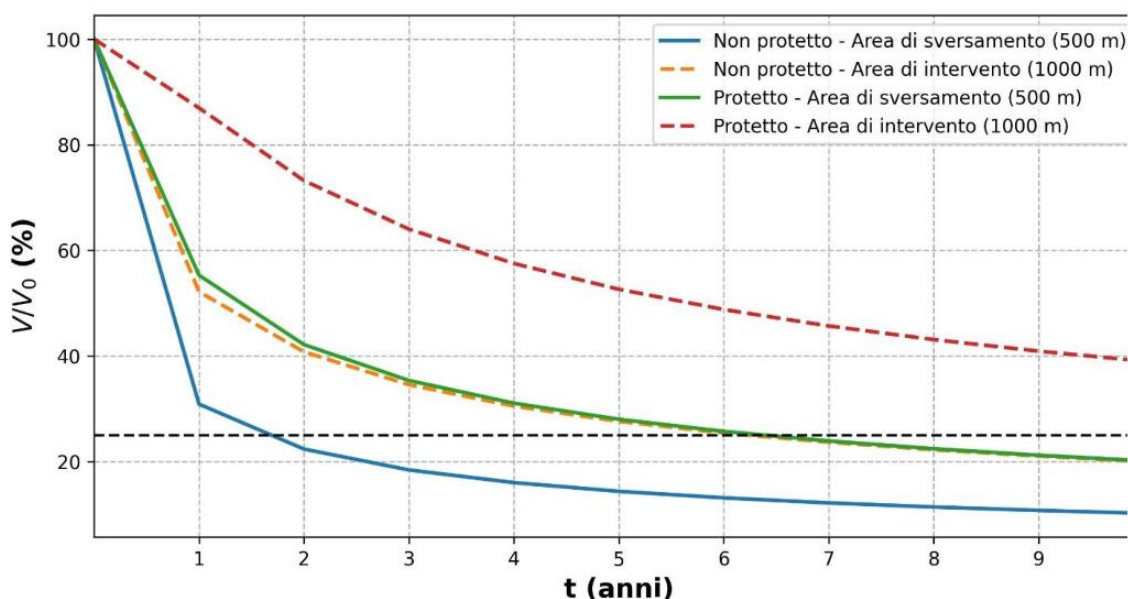


Figura 3.3: Variazione temporale dei volumi sedimentari sversati (adimensionalizzati rispetto al volume iniziale). La linea tratteggiata orizzontale si riferisce al valore del 25%.

3.3 Evoluzione a breve termine: definizione del profilo trasversale dello sversamento

Come sottolineato nel paragrafo precedente, lo sversamento effettivamente operato nell'area di intervento non corrisponde alla posizione della linea di riva a lungo termine. Infatti, quest'ultima, corrisponde al volume uniformemente distribuito su tutta il profilo attivo. Per ovvie esigenze tecnico-economiche, lo sversamento è effettuato seguendo un profilo trasversale di forma trapezoidale. Tale profilo è caratterizzato dalla quota emersa dello sversamento e dalla pendenza del tratto (lineare) che raccorda lo sversamento alla configurazione batimetrica naturale.

Il profilo di sversamento, pertanto, è molto lontano dal profilo di equilibrio a lungo termine e sono da attendersi forti arretramenti della linea di riva anche con mareggiate non intense. Tuttavia, è da sottolineare che tali arretramenti non sono da considerarsi un fenomeno erosivo, bensì una redistribuzione del sedimento sull'intera fascia attiva. In altre parole, tali arretramenti sono da considerarsi il fenomeno che fa transitare la configurazione planimetrica da quella (transitoria) a breve termine a quella (stabile) a lungo termine.

Con l'obiettivo di valutare l'evoluzione a breve termine del profilo di sversamento, è stato applicato un modello numerico (XBeach) in grado di risolvere la propagazione delle onde, l'idrodinamica indotta e la relativa morfodinamica. XBeach è un modello "open-source" che, per quanto di interesse nell'ambito di questo studio, simula i processi idrodinamici relativi alla propagazione delle onde corte e all'idrodinamica non stazionaria indotta. Sviluppato da un gruppo di ricerca costituito da ricercatori provenienti da diversi enti (l'ente di ricerca olandese Deltares, l'Università di Delft e l'Università di Miami), lo strumento numerico appartiene alla famiglia dei modelli integrati sulla verticale (2DH, bidimensionali -- 2D -- sul piano orizzontale -- H --). Molto sinteticamente, XBeach riproduce la propagazione del moto ondoso sotto costa, la circolazione costiera indotta, il trasporto sedimentario costiero e l'evoluzione morfodinamica. Per quanto riguarda la propagazione del moto ondoso, il modello numerico risolve la cosiddetta equazione dell'azione d'onda considerando, senza pretesa di completezza, i fenomeni di rifrazione (dovuta a variazioni di fondale e alle correnti), e di shoaling. Senza entrare nei dettagli dell'implementazione del modello numerico, si sottolinea che il modello numerico è in grado di risolvere la mutua interazione tra le correnti indotte e la propagazione del moto ondoso. A tal fine, all'equazione di conservazione dell'azione d'onda, è accoppiata l'equazione dell'iconale. L'idrodinamica indotta dal moto ondoso è riprodotta risolvendo le equazioni delle onde non lineari in acqua bassa. Tale equazione si basa sull'ipotesi che possa essere trascurata la deviazione della distribuzione della pressione da quella idrostatica, così come sono trascurate le componenti verticali delle velocità, secondo un approccio di media generalizzata lagrangiana mediata sulla verticale (GLM). In estrema sintesi, le equazioni tengono conto degli effetti della forza di Coriolis, delle eventuali tensioni agenti sulla superficie libera, delle tensioni agenti sul fondo a causa della scabrezza del fondale e fornisce l'evoluzione spazio-temporale dei livelli medi e delle componenti cartesiane delle velocità euleriane. Infine, l'evoluzione morfodinamica è stimata risolvendo l'equazione di continuità del sedimento (equazione di Exner) forzata dal trasporto solido di fondo (tramite formulazioni empiriche) e dal trasporto solido in sospensione (ottenuta risolvendo l'equazione di diffusione e dispersione). Per un approfondimento tecnico sul modello numerico, si rimanda alla letteratura di settore (es. XBeach Team, 2018).

Il profilo di sversamento considerato è caratterizzato da una quota pari a +1.5 m l.m.m. e da una pendenza del piede dello sversamento 1:10 (V:H).

Le simulazioni sono state effettuate in relazione al tempo di ritorno pari a 5 anni (sia in termini di caratteristiche sintetiche del moto ondoso, sia in termini di sovrizzo meteorologico; si faccia riferimento allo studio meteomarino). In questo modo si ha l'obiettivo di valutare l'evoluzione del profilo di sversamento dovuto a mareggiate non frequenti.

La Figura 3.4 mostra l'evoluzione della linea di riva a breve termine. Si può osservare che con una mareggiata con tempo di ritorno pari a 5 anni, la linea di riva arretra di circa 17.5 m. La Figura 3.5 mostra il dettaglio dell'evoluzione del profilo trasversale. Si evidenzia, inoltre, la formazione di una barra di frangimento con la migrazione del sedimento lungo la direzione trasversale. A tal proposito si osserva che il sedimento rimane a disposizione della fascia attiva (cioè la migrazione è contenuta in profondità inferiore alla profondità di chiusura). Inoltre, si nota la formazione della cosiddetta "scarpa" in corrispondenza del tratto orizzontale del profilo di sversamento. Infine, si osserva che la quota dello sversamento è superiore

al livello idrico (che raggiunge la quota di circa +1.0 m l.m.m.), dato dalla sovrapposizione della marea meteorologica, della componente astronomica (considerata in condizioni di sizigia) e dalla componente dovuta al moto ondoso (il cosiddetto "wave set-up").

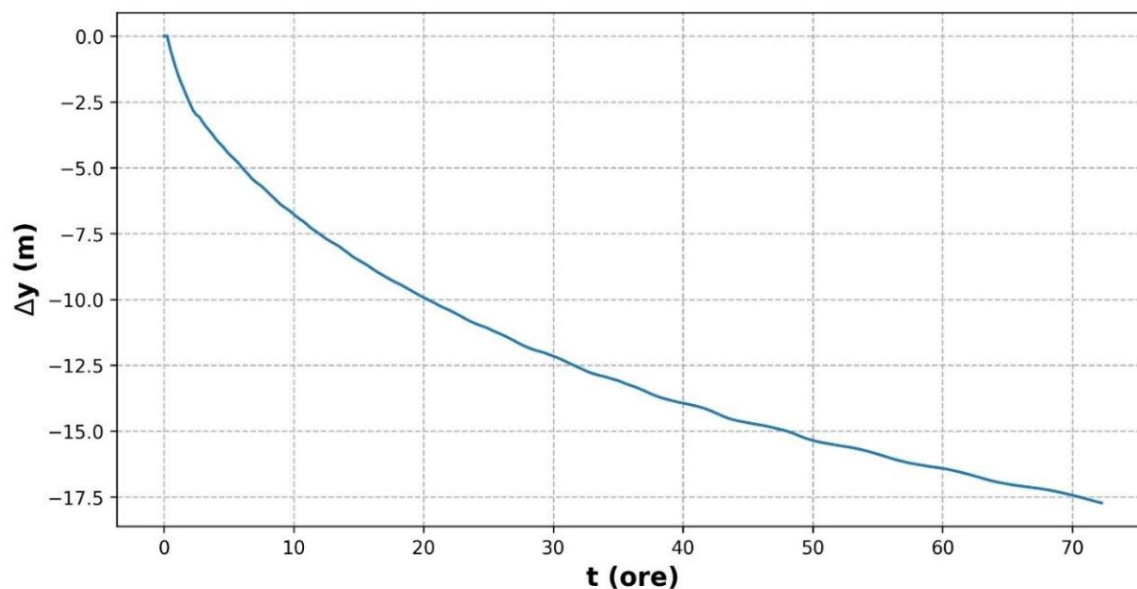


Figura 3.4: Evoluzione della linea di riva a breve termine (tempo di ritorno pari a 5 anni).

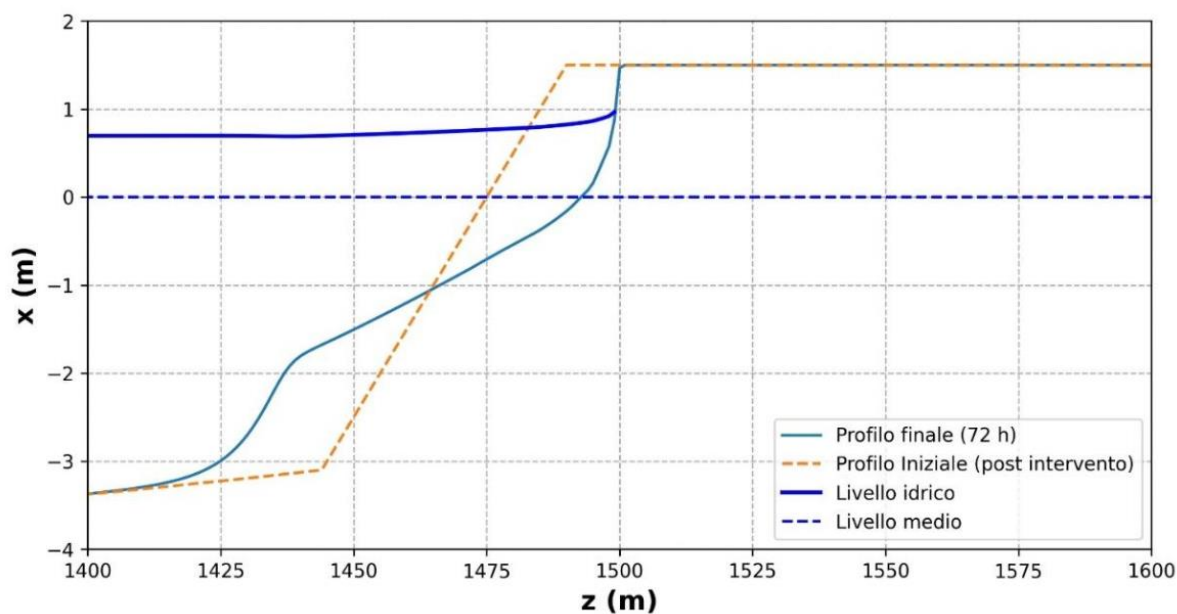


Figura 3.5: Evoluzione trasversale del profilo post-intervento (tempo di ritorno pari a 5 anni).

4 Implementazione del modello numerico per la valutazione dell'evoluzione a lungo termine

4.1 Il modello numerico

I modelli numerici ad una linea si fondano sulle seguenti ipotesi, comunemente accettate dalla comunità scientifica e tecnica per la stima della tendenza evolutiva di un litorale:

- il litorale presenta in termini di evoluzione a medio e lungo termine un profilo trasversale di equilibrio di forma costante che può traslare in conseguenza del 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 correnti collegate all'azione diretta del vento;
- il flusso solido litoraneo responsabile dei fenomeni evolutivi si realizza essenzialmente lungo la direzione 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;
- il regime del flusso solido longitudinale è funzione principalmente del contenuto energetico e dell'angolo 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) e comunque quantificabili in termini di portata solida entrante e/o uscente.

Sulla base di queste ipotesi è possibile modellare la complessa dinamica di un litorale sabbioso imponendo, e risolvendo alle differenze finite, l'equazione di conservazione (continuità) del volume di sabbia associata al flusso del materiale sabbioso relativo alla sola componente longitudinale e calcolato in funzione delle caratteristiche del moto ondoso al frangimento.

Con riferimento alla simbologia delle Figura 4.1, nonché per le ipotesi esposte, l'equazione di continuità (1) espressa alle differenze finite risulta espressa nel seguente modo:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta x} \pm q \right) = 0$$

dove:

- **y (x, t)** (m) è la posizione della linea di riva nell'istante di tempo t;
- **Q (x, t)** (m³/s) è la portata solida longitudinale;
- **D_B** (m) l'altezza media della berma;
- **D_C** (m) la profondità di chiusura;
- **q** (m³/s/m) la portata trasversale entrante o uscente riconducibile a fattori naturali o antropici lungo la direzione trasversale;
- **Δx** (m) larghezza della cella (costante) di discretizzazione;
- **Δt** (s) intervallo di discretizzazione temporale (costante).

Per risolvere l'equazione è necessario calcolare preliminarmente l'entità del trasporto solido longitudinale Q e degli eventuali flussi trasversali q_i e individuare il valore della profondità D intesa come risultante della profondità di chiusura D_c lato mare e altezza di swash (berma) D_b lato arenile.

In sintesi, la legge di conservazione della massa intesa nella sua forma più generale è esplicitata secondo la sola componente longitudinale Q , riferendosi a una relazione di derivazione empirico-concettuale. Questa metodologia di stima, tipica della scuola americana e giapponese, può apparire semplificata ma, considerata la notevole incertezza dei dati cui solitamente si può fare riferimento (caratteristiche meteomarine e morfologiche) risulta la più pratica e attendibile per le applicazioni proprie dell'ingegneria costiera. L'espressione usata, che deriva da un approccio di questo tipo, è una relazione che contiene molteplici parametri quali la pendenza del profilo trasversale, la tessitura dei sedimenti, la ripidità dell'onda e la variabilità dell'altezza d'onda lungo la linea di riva.

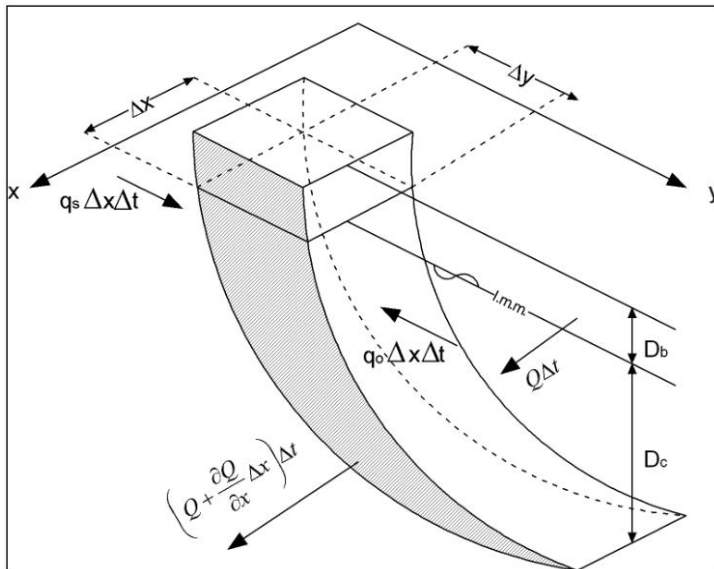


Figura 4.1: Schema qualitativo di calcolo dei modelli a una linea.

In definitiva, il termine Q , che esprime il trasporto solido longitudinale, viene espresso con la nota relazione, di origine semi empirica, elaborata dal CERC (SPM, 1984):

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

nella quale H è l'altezza d'onda significativa, c_g rappresenta la celerità di gruppo, ϑ è l'angolo che localmente il fronte d'onda forma con la normale locale alla linea di riva (e quindi con la generica linea batimetrica). Il pedice b indica che le grandezze contenute tra le parentesi, vanno valutate in condizioni di frangimento. I parametri adimensionali a_1 e a_2 sono espressi dalle seguenti relazioni:

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) (1.416)^{5/2}} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) (\tan \beta) (1.416)^{7/2}} \quad (4)$$

dove ρ_s e ρ rappresentano, rispettivamente, la densità della sabbia e dell'acqua, p la porosità del fondo sabbioso, $\tan \beta$ la pendenza media del fondale dalla riva alla profondità di chiusura. I coefficienti K_1 e K_2 rappresentano i parametri di calibrazione (e verifica) del modello.

In prima approssimazione si può fare riferimento ai valori riportati dalla letteratura specializzata definiti in funzione delle caratteristiche del sedimento movimentato dalla corrente longitudinale (granulometria, porosità, peso specifico), della morfologia trasversale del fondale, nonché della tipologia del frangente:

$$K_1 = 0,1 \div 1; \quad K_2 = (0,5 \div 1,5) K_1 \quad (5)$$

La risoluzione dell'equazione (2) con la portata longitudinale espressa dalla (3) è possibile soltanto dopo aver valutato le caratteristiche del moto ondoso incidente in condizioni di frangimento e dopo aver imposto idonee condizioni al contorno. A tale scopo, è stata utilizzata la serie propagata sottocosta in prossimità del litorale di Alba Adriatica (v. Studio Meteomarino). Tale serie, dalla batimetrica posta sotto costa è stata propagata sino alle condizioni di frangimento tramite un modello che utilizza la teoria lineare del moto ondoso. In sintesi, le caratteristiche del moto ondoso stimate in corrispondenza della batimetrica sotto costa (altezza d'onda significativa H_s , periodo di picco T_p e direzione ϑ) sono propagate sino al punto di frangimento (H_s , T_p e ϑ in condizione di frangimento) utilizzando la teoria lineare. Questi valori sono poi utilizzati per il calcolo della componente longitudinale del trasporto solido (3), necessaria alla risoluzione dell'equazione (2) del modello a una linea.

4.2 Schematizzazione del litorale e domini di calcolo

L'analisi morfologica effettuata per l'unità fisiografica (dalla foce del torrente Vibrata al Porto di Giulianova) e, in particolare, l'analisi diacronica delle linee di riva, ha permesso di effettuare la caratterizzazione delle tendenze evolutive del tratto di litorale in esame. In questo studio è stata eseguita l'analisi diacronica tra le epoche 2010 e 2018, riportata in Figura 4.2. Dall'analisi diacronica risulta evidente che tutto il litorale di Alba Adriatica è, sostanzialmente, in arretramento. Tale tendenza risulta più evidente in corrispondenza del tratto Nord del litorale, dove sono presenti insediamenti turistici che hanno visto ridurre la superficie dell'area di arenile in concessione.

L'obiettivo di questo Studio Morfodinamico è quello di valutare la tendenza evolutiva del litorale e ottimizzare l'intervento del presente progetto, anche sulla base delle valutazioni preliminari descritte nel capitolo precedente.

La griglia di calcolo per l'analisi morfodinamica si estende dalla Foce del Fiume Tronto al Porto di Giulianova, per una estensione complessiva del dominio di calcolo di circa 14'500 km e tenendo conto anche delle opere rigide presenti in corrispondenza del litorale di Martinsicuro.

Alla luce di quanto esposto al paragrafo precedente l'utilizzo del modello numerico implementato si scompone in due fasi:

- propagazione della serie di eventi rappresentativi del clima ondometrico sottocosta sino al punto di frangimento mediante teoria lineare;
- stima dell'evoluzione del litorale soggetto all'azione del moto ondoso.

La griglia di calcolo del modello a una linea è monodimensionale. Il dominio è stato discretizzato con una risoluzione spaziale pari a 20 m, per un totale di nodi di calcolo pari a 725 (estensione del dominio di calcolo pari a 14'500 m). In particolare, è stato assunto un sistema di riferimento ortometrico con origine in corrispondenza del Fiume Tronto, e con asse delle ordinate orientato secondo la direzione 73° N, come schematizzato in Figura 4.3.

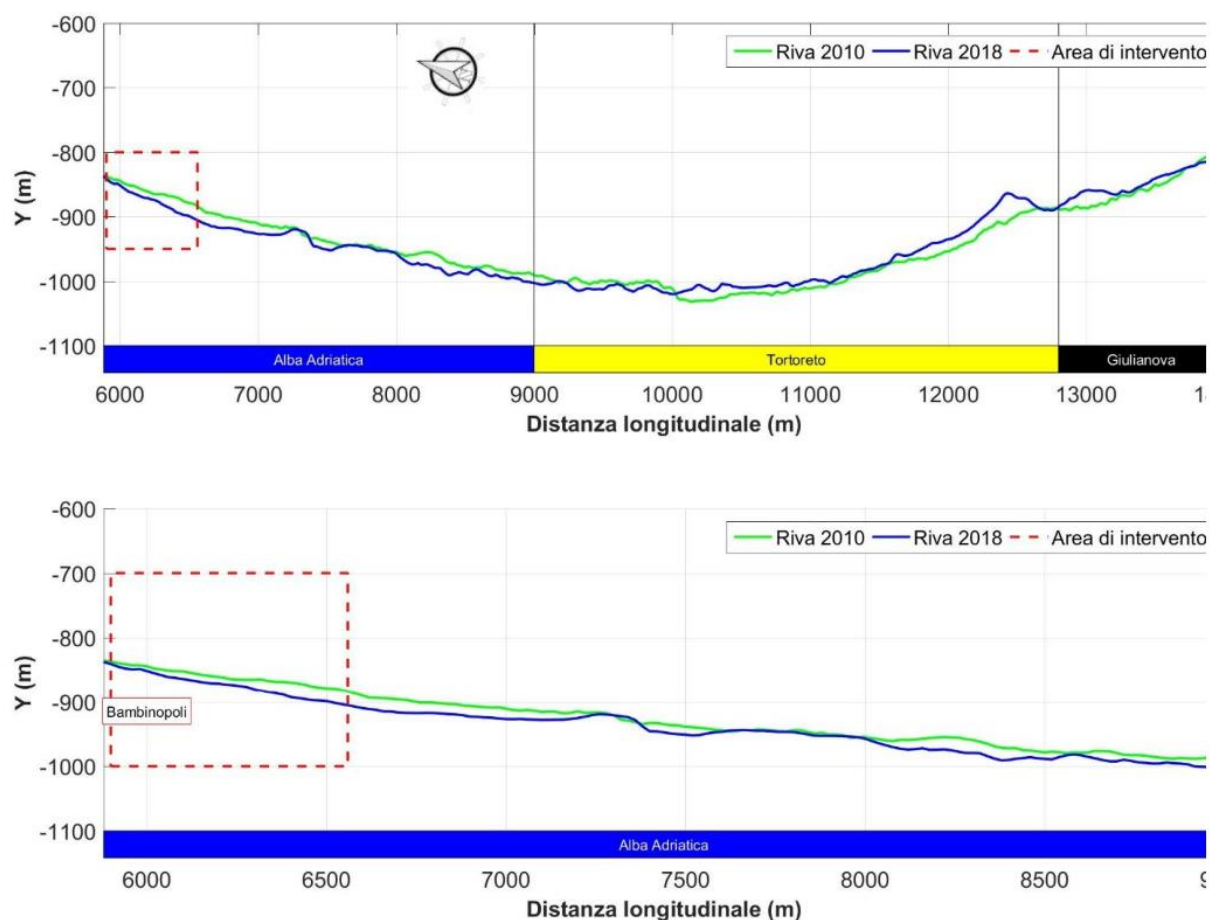


Figura 4.2: Posizione della linea di riva tra il 2010 e il 2018. In alto, in corrispondenza dell'intero litorale, in basso in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziata l'area di intervento.



Figura 4.3: schema del sistema di riferimento della griglia di calcolo.

4.3 Definizione dei parametri e delle condizioni al contorno

Come osservato, l'applicazione del modello morfodinamico richiede la definizione di condizioni al contorno quali le caratteristiche del moto ondoso incidente sul litorale e le caratteristiche dei sedimenti che lo costituiscono. A tali condizioni si aggiungono quelle da imporre alle estremità della linea di riva simulata, nonché quelle derivanti dall'eventuale esistenza, all'interno del tratto di litorale simulato, di apporti solidi trasversali.

Alla luce della strategia comparativa dello studio è stata imposta la condizione di scambio sedimentario nullo sia nel contorno Nord (Foce Tronto) che a Sud in corrispondenza del Porto di Giulianova. Seppur tali condizioni non siano verificate a rigore nella realtà (soprattutto in corrispondenza della Foce del Tronto), l'estensione del dominio è tale da verificare l'indipendenza della soluzione numerica nell'area di interesse dalle condizioni al contorno.

I modelli a una linea prevedono, inoltre, la caratterizzazione dei sedimenti mediante l'utilizzo di un diametro medio (D_{50}) costante lungo tutto il litorale simulato. Nelle simulazioni numeriche è stato preso in considerazione un diametro dei sedimenti pari a 0.20 mm. Tale valore è stato desunto dal Progetto Preliminare relativo ai "PAR – FAS 2007-2013 "Linea di azione IV.2.1.A – riduzione del rischio derivante da fenomeni alluvionali, franosi ed erosivi delle diverse fasce di territorio regionale (montagna interna, pedemontana e costiera)" - ripascimento con sabbie provenienti dall'utilizzo di sedimenti e/o dragaggio della fascia costiera esterna alla zona attiva a complementarietà degli interventi di difesa della costa nei comuni di: Martinsicuro (TE), Alba Adriatica (TE), Pineto (TE), Silvi (TE), Francavilla al Mare (CH) e Ortona (CH)", redatto dal Servizio Opere Marittime e Acque Marine della Regione Abruzzo.

4.4 Moto ondoso

L'applicazione del modello numerico per la stima dell'evoluzione morfodinamica futura della linea di riva richiede la definizione della forzante idrodinamica che induce il trasporto solido longitudinale, responsabile dell'evoluzione a lungo termine del litorale.

La definizione della forzante idrodinamica può essere effettuata secondo due approcci, congruenti da un punto di vista concettuale. Il primo approccio è quello di calcolare le caratteristiche (altezza d'onda, periodo, direzione e durata) della cosiddetta "onda morfologicamente equivalente" o "onda di modellazione". Tale onda è definita con l'intento di rappresentare l'anno climatico medio da un punto di vista morfologico.

In alternativa, approccio seguito nel presente studio per l'analisi della tendenza evolutiva della linea di riva, è possibile utilizzare direttamente la sequenza di onde dell'anno climatico medio. Con tale scopo, è stata utilizzata la classificazione in base all'altezza d'onda e alla direzione degli eventi di moto ondoso sottocosta illustrata nello "Studio Meteomarino". Il periodo di picco T_p associato all'altezza d'onda significativa è stato stimato applicando la seguente relazione (Mathiesen et al., 1994):

$$T_p = a (H_s)^b \quad (6)$$

ove i parametri a e b sono stati ricavati dall'analisi di correlazione tra altezza d'onda significativa e periodo di picco, effettuata nello studio meteomarino.

In sostanza, la classificazione sulla base dell'altezza d'onda significativa e della direzione può tradursi in tabelle climatiche annuali e stagionali che contengono le frequenze di accadimento f_{ij} durante l'anno di ogni classe di eventi che soddisfa le disequaglianze $H_j < H_s < H_{j+1}$ e $\theta_i < \theta < \theta_{i+1}$:

$$f_{ij} = \frac{n_{ij}}{N} \quad (7)$$

pari al rapporto tra il numero di eventi n_{ij} osservati nell'anno, con altezza d'onda significativa H_s ricadente nella j -esima classe di altezza d'onda significativa ($H_j - H_{j+1}$) e direzione θ ricadente nella i -esima classe di direzione (θ_i e θ_{i+1}), e il numero totale di eventi N (triorari) che si verificano nell'anno.

Per ognuna delle classi con frequenza di accadimento f_{ij} superiore a 0,03 sono stati generati n_{ij} eventi caratterizzati da altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione pari a:

$$H_{s_k} = H_j + r_H (H_{j+1} - H_j) \quad (8)$$

$$\vartheta_k = \vartheta_i + r_\vartheta (\vartheta_{i+1} - \vartheta_i) \quad (9)$$

$$T_{pk} = a H_{s_k}^b \quad (10)$$

nelle quali r_H e r_ϑ indicano numeri casuali, realizzazioni estratte dalla popolazione di una variabile aleatoria con distribuzione di probabilità uniforme nell'intervallo 0-1.

La serie rappresentativa dell'anno climatico medio così definita è stata quindi propagata fino al punto di frangimento mediante teoria lineare delle onde.

4.5 Calibrazione e validazione

Allo scopo di assicurare l'affidabilità dei risultati delle simulazioni numeriche orientate alla definizione della tendenza evolutiva futura della linea di riva è necessario anteporre alla vera e propria fase predittiva una fase preliminare di calibrazione e validazione del modello mediante utilizzo dei dati storici a disposizione. Pertanto, il modello, sulla base delle schematizzazioni operate e delle condizioni al contorno imposte è stato calibrato mediante simulazione dell'evoluzione del litorale tra la linea di riva del 2010 e quella del 2018, utilizzata anche per la valutazione della tendenza evolutiva del litorale descritta nel paragrafo 4.2. La Figura 4.4 mostra il risultato della calibrazione.

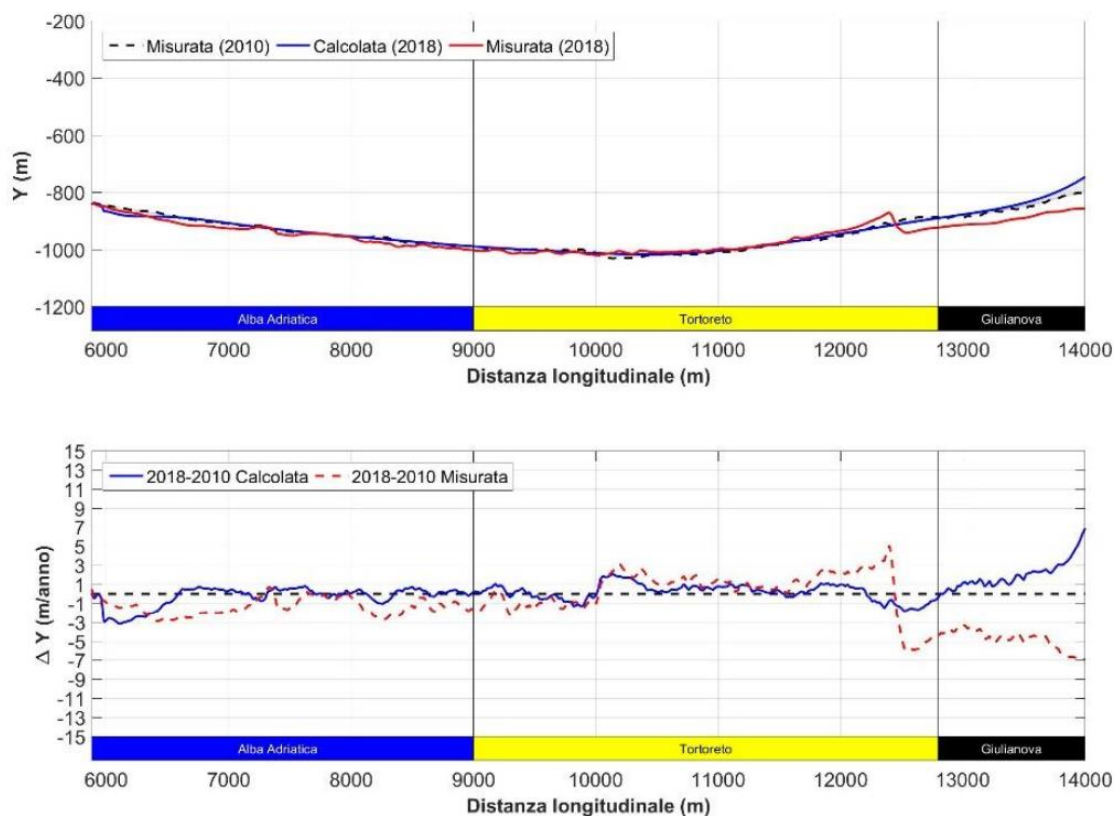


Figura 4.4: Risultati della calibrazione.

4.6 Scenari di simulazione

Questo paragrafo ha lo scopo di descrivere le caratteristiche degli scenari di simulazione. Nel seguito vengono mostrati gli scenari limitatamente in corrispondenza del tratto di litorale oggetto di intervento. I risultati ottenuti dalle simulazioni, descritti nel paragrafo successivo, sono riportati in corrispondenza di tutto il litorale di Alba Adriatica.

4.6.1 Opzione 0

La configurazione di riferimento è costituita dalla situazione di fatto (in assenza di interventi: Opzione 0, “do nothing”). Pertanto, è stata effettuata una simulazione con orizzonte temporale pari a 10 anni della situazione di fatto del litorale di Alba Adriatica, allo scopo di stimarne la tendenza evolutiva.

La Figura 4.5 mostra la situazione attuale in corrispondenza del litorale oggetto di intervento, con evidenziata la linea di riva rilevata a Settembre 2020.



Figura 4.5: Scenari di simulazione: Opzione 0.

4.6.2 Opzione 1

La configurazione denominata “Opzione 1” consiste nella distribuzione di sabbia di volume pari a circa 100'000 m³ da sversare come schematizzato in Figura 4.6 e la realizzazione di un'opera di contenimento di lunghezza pari a circa 20 m in corrispondenza del parco pubblico “Bambinopoli”. Tale opera è motivata dalle analisi riportate nel capitolo precedente.

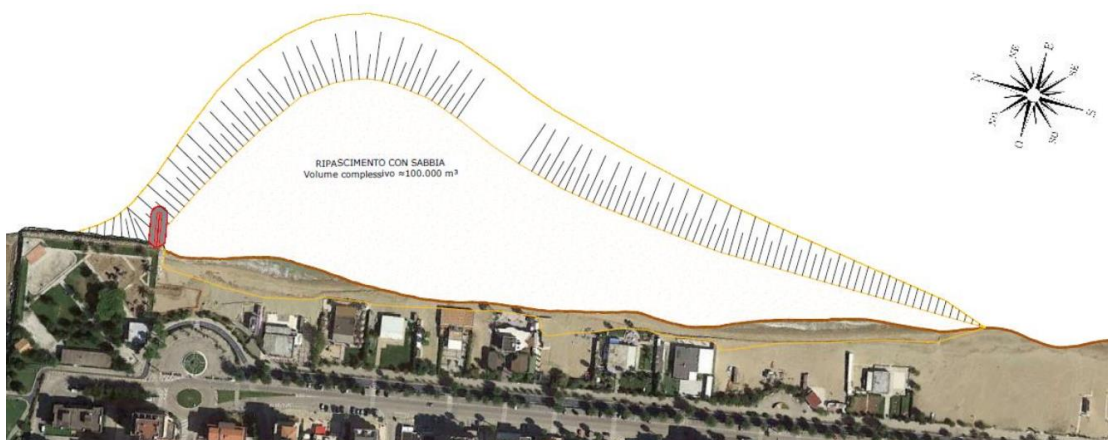


Figura 4.6: Scenari di simulazione: Opzione 1.

4.6.3 Opzione 2

La configurazione denominata “Opzione 2” coincide con la precedente “Opzione 1” a meno di un'ulteriore opera di contenimento posta a una distanza pari a circa 140 m più a sud di quella in corrispondenza del parco “Bambinopoli”, come schematizzato in Figura 4.7. La forma planimetrica dello sversamento e l'introduzione delle opere di contenimento sono motivate dalle analisi di cui al capitolo precedente.

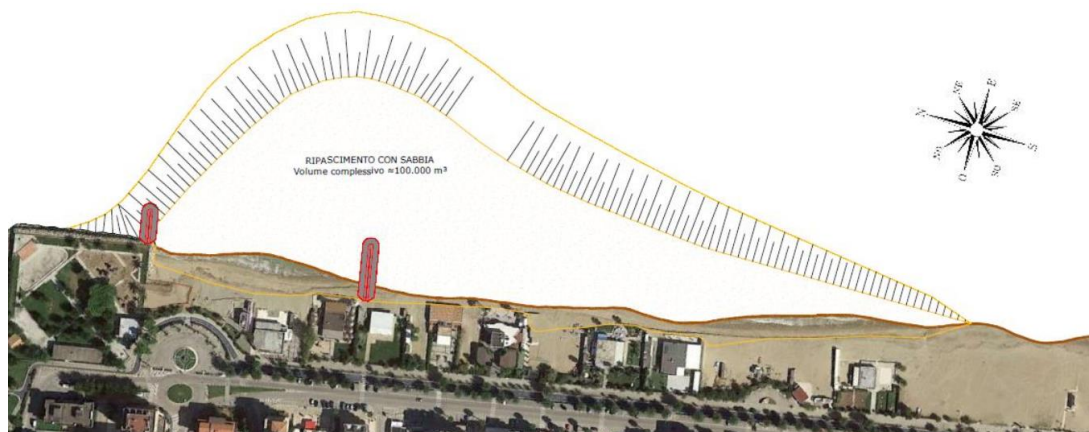


Figura 4.7: Scenari di simulazione: Opzione 2.

4.6.4 Opzione 3

La configurazione denominata “Opzione 3” coincide con la precedente “Opzione 2” a meno della lunghezza dell'opera di contenimento più a nord (pari a circa 60 m), e della presenza di un'ulteriore opera di lunghezza pari a circa 25 m posto a una distanza pari a circa 360 m più a sud rispetto al limite meridionale della struttura Bambinopoli, come schematizzato in Figura 4.8.

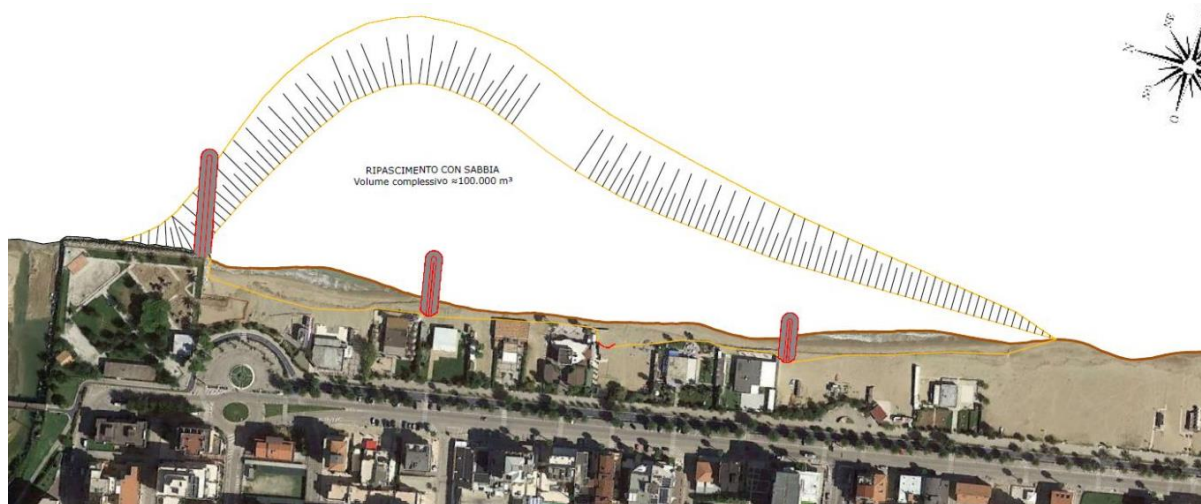


Figura 4.8: Scenari di simulazione: Opzione 3.

4.6.5 Opzione 4

La configurazione denominata “Opzione 4” coincide con la precedente “Opzione 3” a meno della lunghezza dell'opera di contenimento in corrispondenza del parco “Bambinopoli” (pari a 20 m, come l’“Opzione 2”) e

della presenza di un'ulteriore opera di lunghezza pari a circa 30 m posto 110 m a monte di quella più a sud, come schematizzato in Figura 4.9.

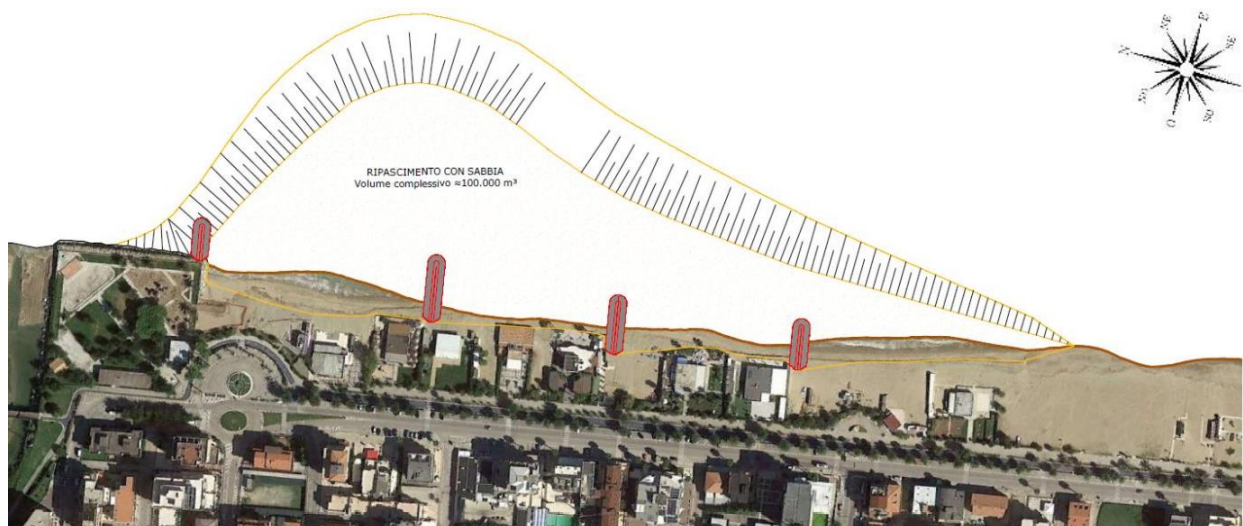


Figura 4.9: Scenari di simulazione: Opzione 4.

4.7 Analisi comparativa dei risultati

4.7.1 Opzione 0

Nella Figura 4.10 e nella Figura 4.11 è riportata la tendenza evolutiva del litorale in esame su un orizzonte temporale di 10 anni. I risultati sono mostrati in termini di andamento della linea di riva (Figura 4.10) e di variazione annua della posizione della linea di riva (Figura 4.11 e Figura 4.12). In particolare, il grafico in alto di tutte le figure, mostra i risultati sul tratto di litorale che va dalla Foce del Vibrata al Porto di Giulianova, il grafico in basso, il dettaglio dei medesimi risultati in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziata, l'area di intervento. La Figura 4.12 mostra i ratei medi annui valutati per tratti di litorale di estensione pari a 100 m. Le barre verdi, indicano valori positivi e quindi le aree in avanzamento, le barre rosse indicano i valori negativi, di conseguenza, le aree in arretramento, mentre le barre gialle, quelle in sostanziale stabilità (per valori di avanzamento/arretramento inferiori a 0.5 m/anno).

I risultati mostrano un sostanziale arretramento in corrispondenza dell'area di intervento, in analogia a quanto ottenuto nell'analisi delle linee di riva delle epoche passate (paragrafo 4.2). Tale arretramento si attesta mediamente circa a circa 1,00 /anno, con valore massimo pari a circa 2,00 m/anno. C'è da sottolineare che tale arretramento risulta limitato a causa della presenza della barriera inderodibile costituita dagli stabilimenti balneari e dalle infrastrutture presenti (pista ciclabile, lungomare). Nello specifico, con un tempo di ritorno di 10 anni in assenza di interventi, l'arretramento si protrae sino a raggiunge le infrastrutture presenti.

Tuttavia, nel tratto Sud, si evidenzia un sostanziale avanzamento stimato mediamente pari a circa 5,00 m/anno, (Figura 4.11 e Figura 4.12) dovuto alla presenza del porto di Giulianova che tende a “bloccare” il trasporto solido longitudinale, favorendo “l’intrappolamento” delle portate solide provenienti da Nord.

Lungo l'intero litorale sono presenti tratti in avanzamento/arretramento locale, che, tuttavia, sono legati alla risposta morfodinamica locale della spiaggia.

Il risultato ottenuto per questo scenario è utilizzato come termine di paragone, secondo un approccio comparativo.

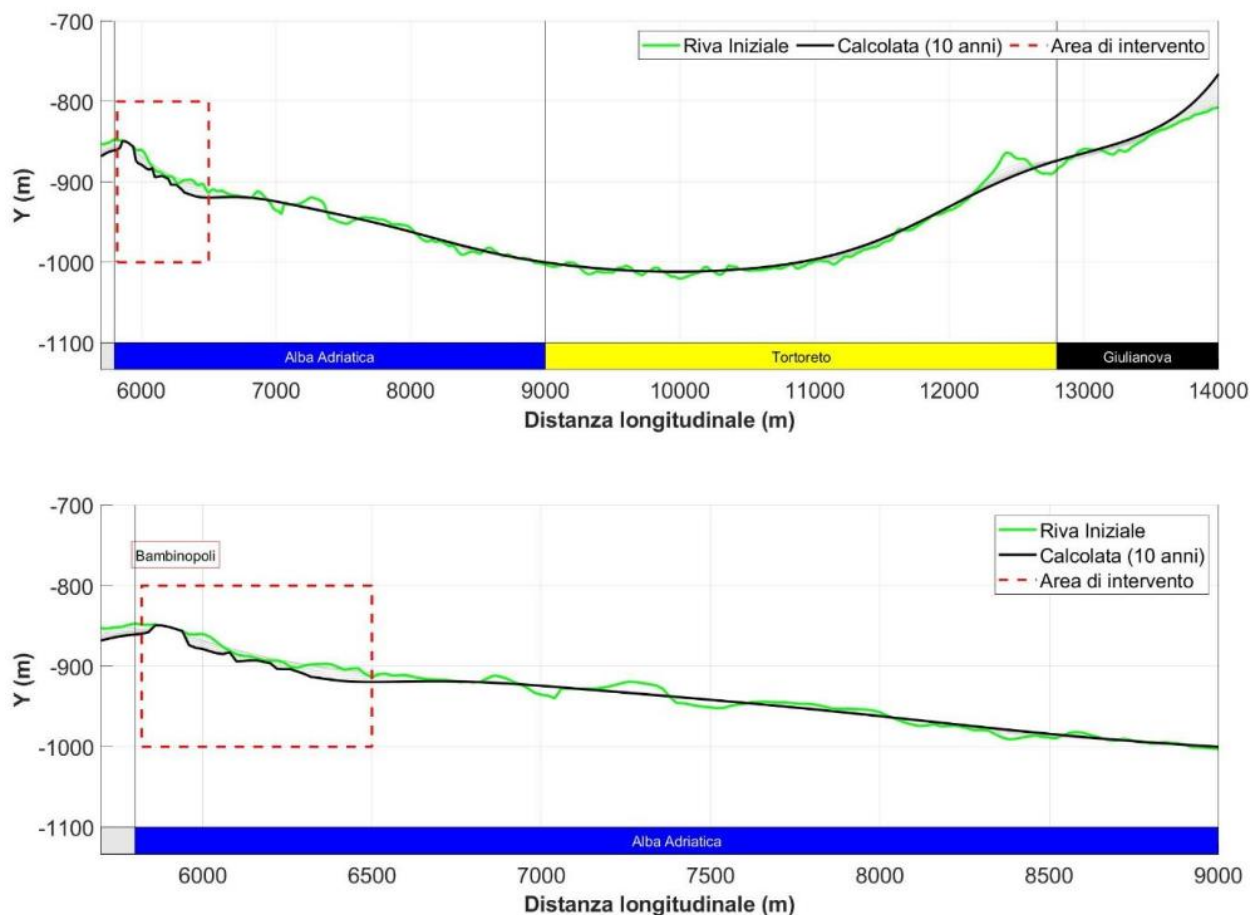


Figura 4.10: Evoluzione della linea di riva su un orizzonte temporale di 10 anni: confronto tra linea di riva iniziale 2019 (linea magenta) e linea di riva calcolata per l'Opzione 0 (linea blu). In alto, in corrispondenza del litorale compreso tra il Torrente Vibrata a sinistra e il porto di Giulianova a destra, in basso, in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziata (tratteggio rosso) l'area interessata dall'intervento in epigrafe.

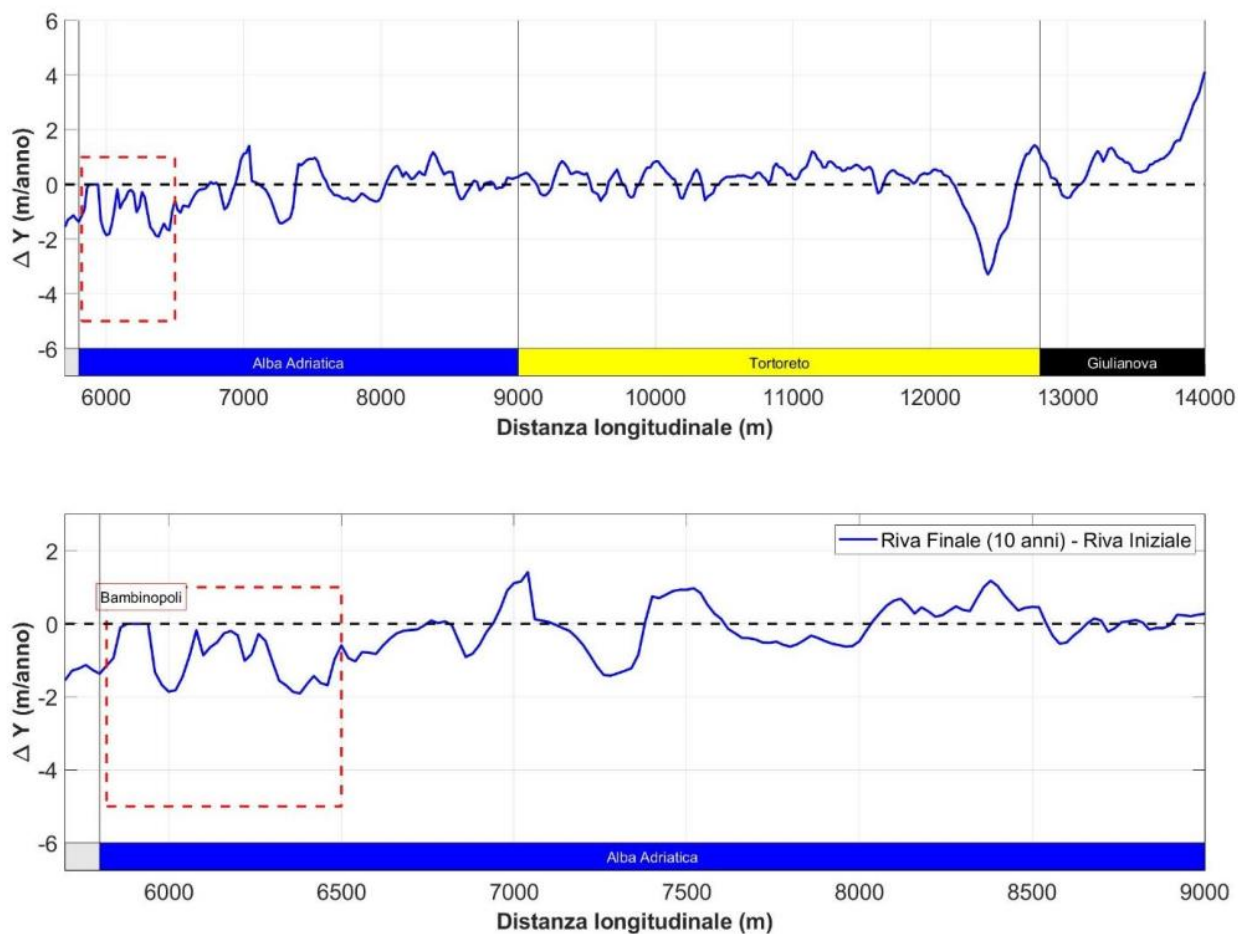


Figura 4.11: Rateo medio annuo di variazione della posizione della linea di riva tra la riva iniziale e l'Opzione 0. In alto, in corrispondenza del litorale compreso tra Il Torrente Vibrata a sinistra e il porto di Giulianova a destra, in basso, in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziati (tratteggio rosso) i risultati nell'area interessata dall'intervento.

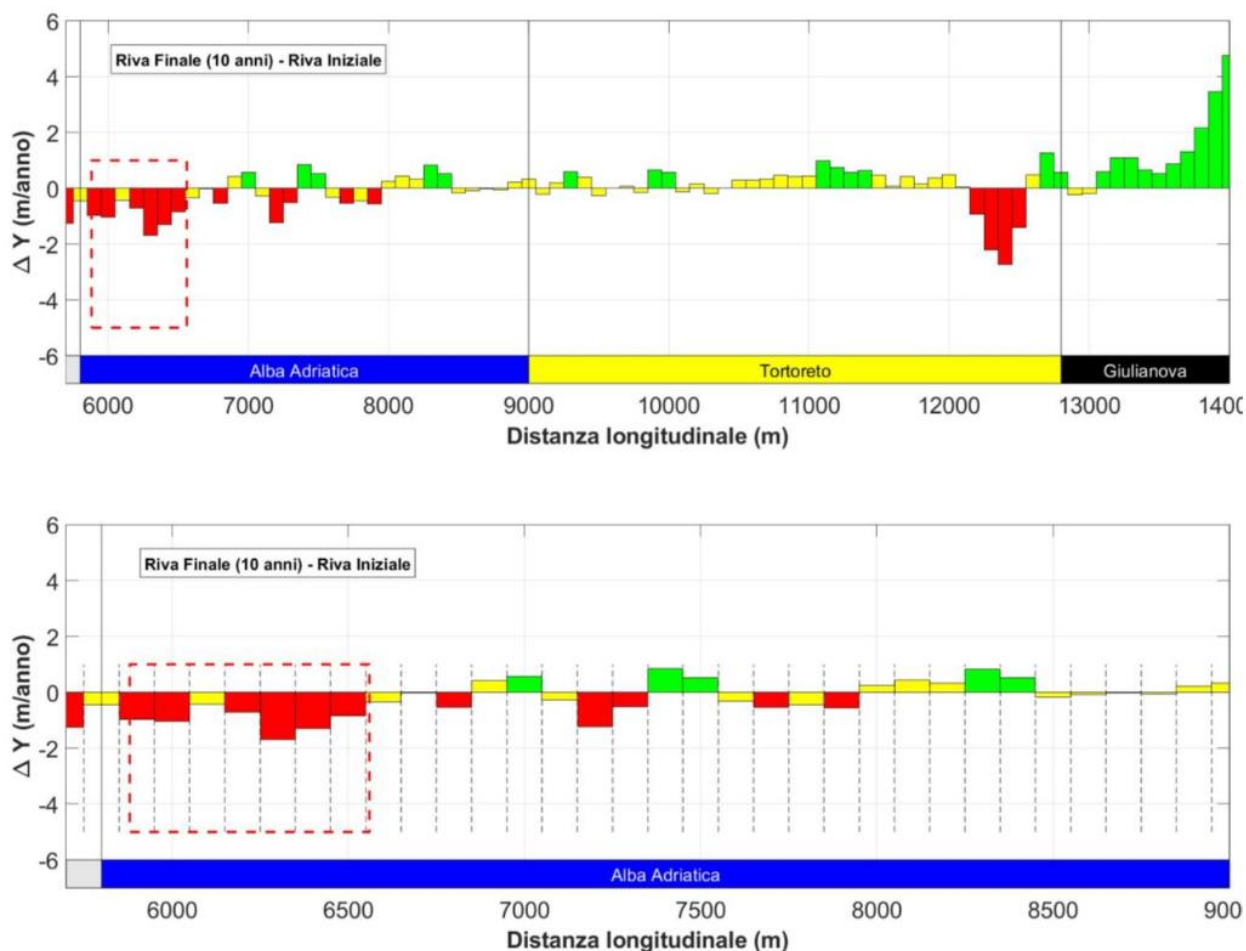


Figura 4.12: Rateo annuo della variazione della posizione della linea di riva tra la riva iniziale e l'Opzione 0 (a barre). In alto, in corrispondenza del litorale compreso tra Il Torrente Vibrata a sinistra e il porto di Giulianova a destra, in basso, in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica. Le barre in rosso indicano le aree in arretramento, quelle in verde le aree in avanzamento e le barre gialle le zone sostanzialmente stabili (valore assoluto del rateo di variazione inferiore a 0,5 m/anno).

4.7.2 Opzione 1

Come più volte sottolineato, l'efficacia dell'intervento va valutata rispetto all'assenza di interventi. Pertanto, questo paragrafo e i successivi hanno l'obiettivo di analizzare le differenze rispetto all'Opzione 0 dell'evoluzione della posizione della linea di riva sul tratto di litorale di Alba Adriatica.

Nella Figura 4.13 è riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva su un orizzonte temporale di 5 anni (in rosso) e 10 anni (in nero) per la soluzione "Opzione 1" e l'evoluzione ottenuta per la configurazione "Opzione 0", descritta nel paragrafo precedente. In linea generale, si osserva, come il profilo iniziale dell'intervento (in verde), tende a distribuirsi, principalmente verso sud, e pertanto risulta evidente un avanzamento, rispetto all'evoluzione in assenza di interventi, anche su un orizzonte temporale di 10 anni.

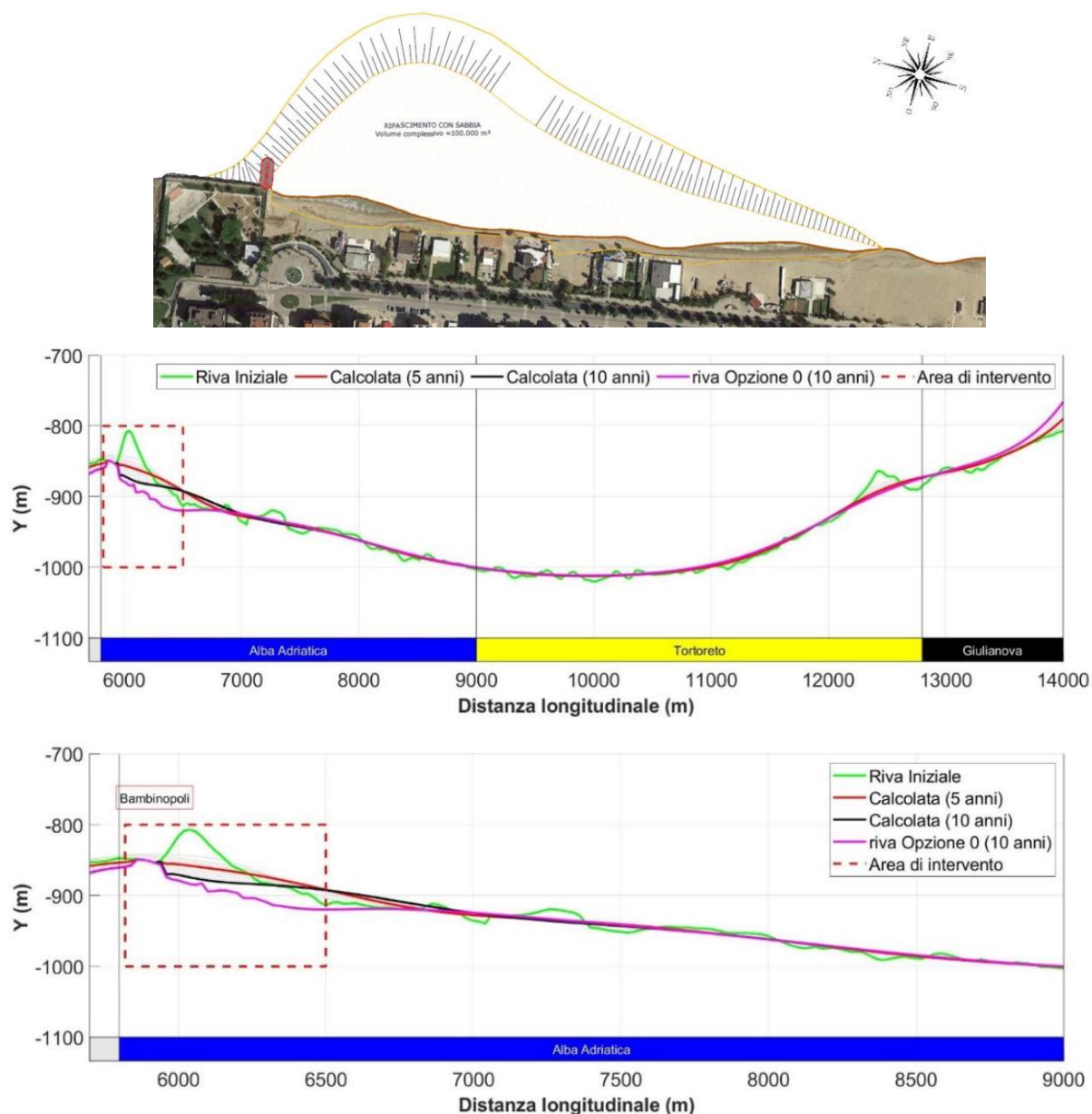


Figura 4.13: Evoluzione della linea di riva nella configurazione “Opzione1”: confronto tra linea di riva iniziale di progetto (linea verde), linea di riva calcolata su un orizzonte temporale di 5 e 10 anni e linea di riva calcolata per l’Opzione 0 (linea magenta). In alto, in corrispondenza del litorale compreso tra Il Torrente Vibrata a sinistra e il porto di Giulianova a destra, in basso, in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziata (tratteggio rosso) l’area interessata dall’intervento di progetto

4.7.3 Opzione 2

Come nel paragrafo precedente, nella Figura 4.14 è riportato il grafico dell’evoluzione della linea di riva su un orizzonte temporale di 5 anni (in rosso) e 10 anni (in nero) per la soluzione “Opzione 2” comparata con l’evoluzione ottenuta per la configurazione “Opzione 0”. In questo caso si osserva, come atteso, che il profilo iniziale dell’intervento (in verde), tende a distribuirsi, sia verso Nord ma principalmente verso sud, e pertanto risulta evidente un avanzamento, rispetto all’evoluzione in assenza di interventi, anche su un orizzonte

temporale di 10 anni. Tuttavia, in questo caso, risulta evidente l'effetto dell'opera di contenimento posta 140 m più a sud del parco Bambinopoli, che induce l'avanzamento più marcato nei primi 150 m a nord diminuendo l'avanzamento nel tratto sottoflutto.

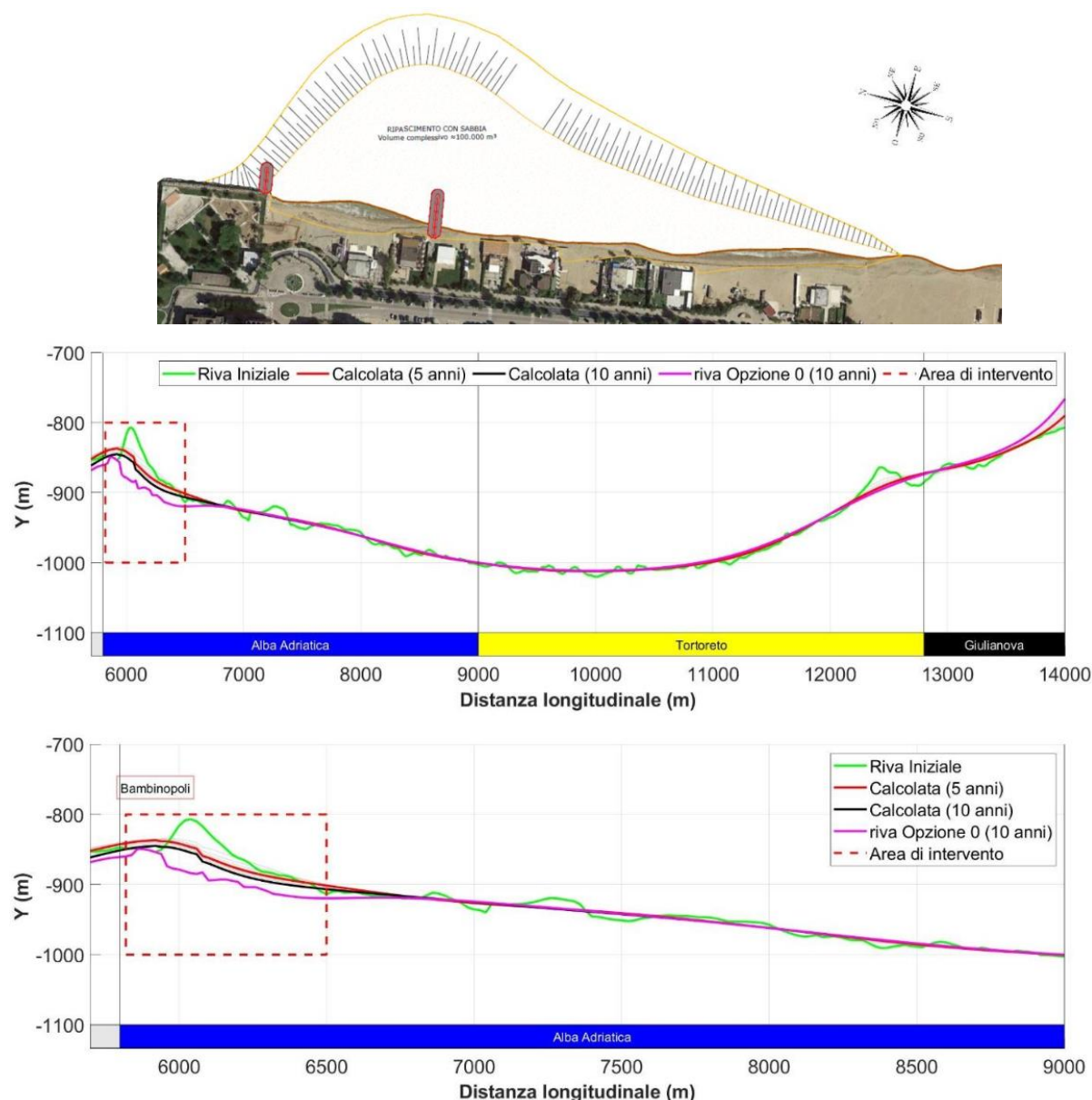


Figura 4.14: Evoluzione della linea di riva nella configurazione "Opzione2": confronto tra linea di riva iniziale di progetto (linea verde), linea di riva calcolata su un orizzonte temporale di 5 e 10 anni e linea di riva calcolata per l'Opzione 0 (linea magenta). In alto, in corrispondenza del litorale compreso tra Il Torrente Vibrata a sinistra e il porto di Giulianova a destra, in basso, in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziata (tratteggio rosso) l'area interessata dall'intervento di progetto.

4.7.4 Opzione 3

Come nel paragrafo precedente, nella Figura 4.15 è riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva su un orizzonte temporale di 5 anni (in rosso) e 10 anni (in nero) per la soluzione "Opzione 3" comparata con

l'evoluzione ottenuta per la configurazione "Opzione 0". Si osserva come per le configurazioni precedenti, che il profilo iniziale dell'intervento (in verde), tende a distribuirsi, sia verso Nord ma principalmente verso sud, e pertanto risulta evidente un avanzamento, rispetto all'evoluzione in assenza di interventi, anche su un orizzonte temporale di 10 anni. In questo caso, tuttavia, l'avanzamento, rispetto alla configurazione in assenza di interventi ("Opzione 0") risulta limitato in corrispondenza dell'area di intervento. Tale effetto è dovuto alla presenza dell'opera di contenimento più a Sud che a lungo termine tende ad innescare i cosiddetti effetti di bordo (arretramento sottoflutto).

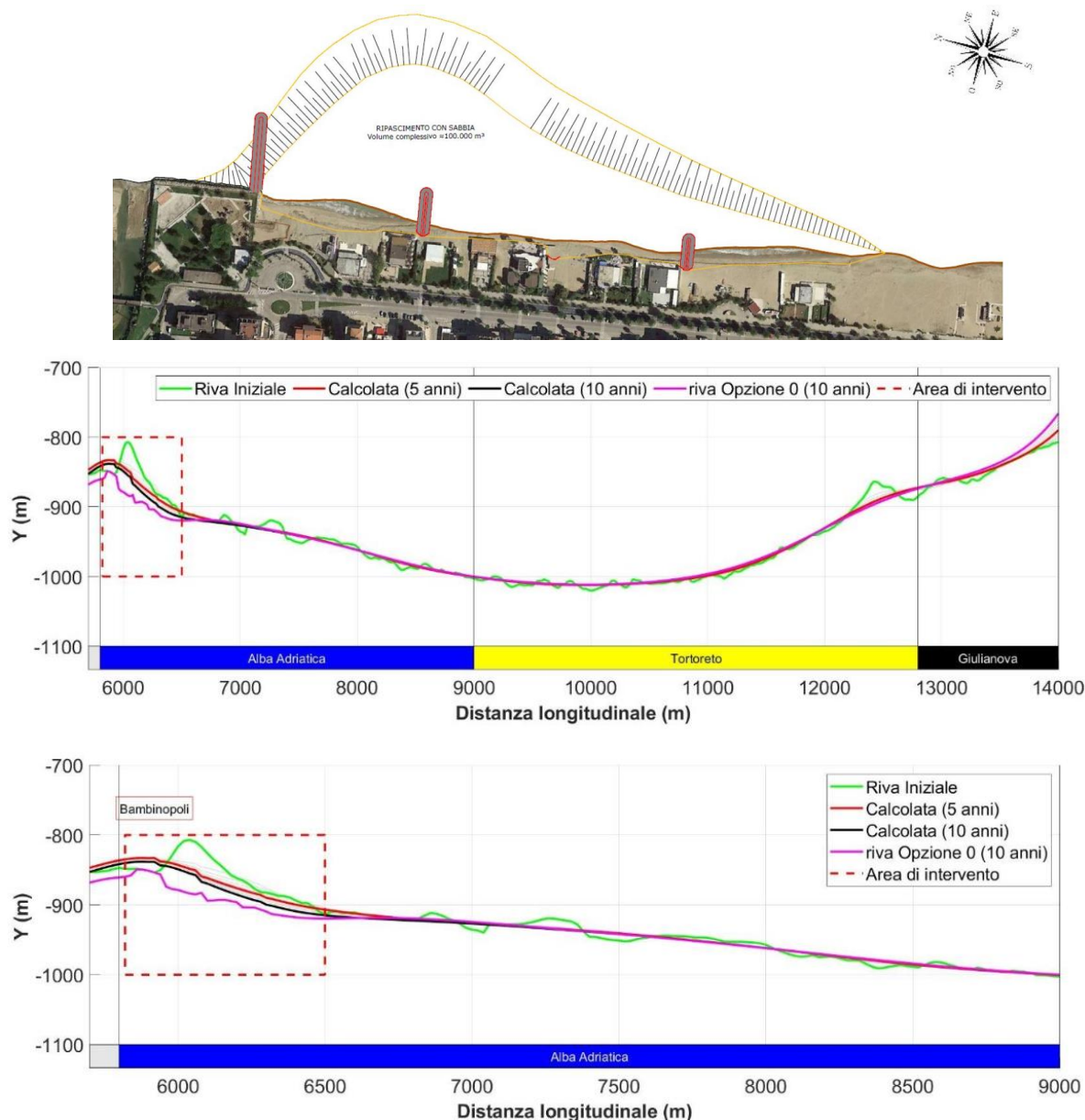


Figura 4.15: Evoluzione della linea di riva nella configurazione "Opzione 3": confronto tra linea di riva iniziale di progetto (linea verde), linea di riva calcolata su un orizzonte temporale di 5 e 10 anni e linea di riva calcolata per l'Opzione 0 (linea magenta). In alto, in corrispondenza del litorale compreso tra Il Torrente Vibrata a sinistra e il porto di Giulianova a destra, in basso, in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziata (tratteggio rosso) l'area interessata dall'intervento di progetto.

4.7.5 Opzione 4

Come nel paragrafo precedente, nella Figura 4.16 è riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva su un orizzonte temporale di 5 anni (in rosso) e 10 anni (in nero) per la soluzione "Opzione 4" comparata con l'evoluzione ottenuta per la configurazione "Opzione 0". Si osserva come per le configurazioni precedenti, che il profilo iniziale dell'intervento (in verde), tende a distribuirsi, sia verso Nord ma principalmente verso sud, e pertanto risulta evidente un avanzamento, rispetto all'evoluzione in assenza di interventi, anche su un orizzonte temporale di 10 anni. In questo caso, tuttavia, l'avanzamento, rispetto alla configurazione in assenza di interventi ("Opzione 0") risulta limitato in corrispondenza dell'area di intervento dovuto alla presenza delle opere a sud, che, a lungo termine, come per la configurazione precedente, tende ad innescare gli effetti di bordo. In questo caso risulta evidente un arretramento rispetto all'opzione 0 della configurazione di progetto immediatamente a sud dell'ultima opera di contenimento di progetto.

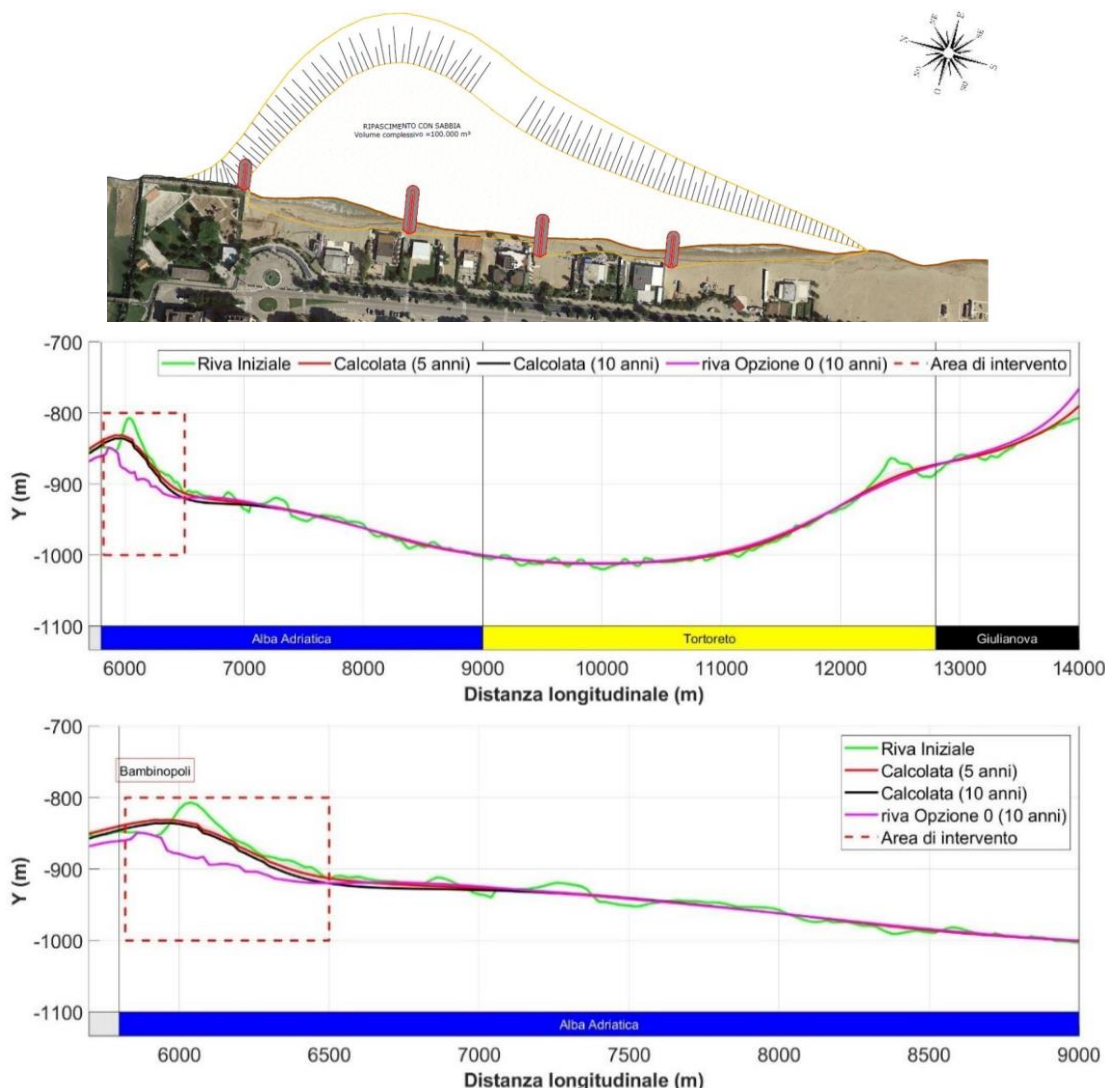


Figura 4.16: Evoluzione della linea di riva nella configurazione "Opzione 4": confronto tra linea di riva iniziale di progetto (linea verde), linea di riva calcolata su un orizzonte temporale di 5 e 10 anni e linea di riva calcolata per l'Opzione 0 (linea magenta). In alto, in corrispondenza del litorale compreso tra Il Torrente Vibrata a sinistra e il porto di Giulianova a destra, in basso, in corrispondenza del litorale di Alba Adriatica, con evidenziata (tratteggio rosso) l'area interessata dall'intervento di progetto.

5 Osservazioni conclusive

Lo "Studio Morfodinamico" ha l'obiettivo di valutare la tendenza evolutiva del litorale di Alba Adriatica al fine di ottimizzare l'intervento di progetto caratterizzato dalla realizzazione di una spiaggia di alimentazione con opere rigide trasversali che hanno lo scopo di "sostenere" la spiaggia a lungo termine evitando del tutto eventuali effetti al contorno. A tal fine è necessario utilizzare strumenti numerici in grado di prevedere l'evoluzione del litorale in seguito allo sversamento sull'arenile delle sabbie e stimarne l'effetto.

In particolare, lo studio ha avuto l'obiettivo di fornire alcune valutazioni preliminari in grado di suggerire la configurazione planimetrica dello sversamento, l'eventuale efficacia di opere di contenimento e l'evoluzione a breve termine del profilo di sversamento.

Le analisi preliminari hanno suggerito un andamento planimetrico dello sversamento caratterizzato da una forma trapezoidale con la presenza di un'opera di contenimento in corrispondenza del contorno settentrionale. L'analisi preliminare dell'evoluzione a breve termine ha suggerito un profilo di sversamento caratterizzato da una quota pari a +1.5 m s.l.m.m. e una pendenza pari a $h/b=1/10$. In tali condizioni, la riproduzione bidimensionale di un evento con tempo di ritorno pari a 5 anni ha evidenziato un arretramento della linea di riva pari a circa 17.5 m con redistribuzione del sedimento all'interno della fascia attiva. La simulazione ha peraltro evidenziato che il livello idrico, in condizioni di tempesta, raggiunge la quota pari a circa +1.0 m (a cui è da aggiungersi la risalita delle onde corte).

L'analisi è stata poi approfondita tramite uno strumento numerico in grado di riprodurre l'evoluzione a lungo termine del litorale.

La riproduzione della cosiddetta "Opzione 0" ha evidenziato che la spiaggia emersa è destinata a scomparire nella zona immediatamente a Sud della struttura denominata "Bambinopoli" e a subire forti arretramenti per un'estensione pari a circa 900 m (su un orizzonte temporale di 10 anni).

Sono state, poi, considerate quattro diverse configurazioni di intervento. Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche effettuate ipotizzando le suddette opzioni progettuali si evince che lo sversamento sedimentario deve essere accompagnato da un'opera di contenimento nel contorno settentrionale (in corrispondenza del limite meridionale di Bambinopoli) e di un'opera di contenimento realizzata a circa 140 m a Sud di questa (Opzione 2) e che non induce effetti al contorno nel tratto sottoflutto. La vita utile della spiaggia di alimentazione risulta pari a circa 5 anni. Oltre tale durata, per contrastare la tendenza evolutiva del litorale di Alba Adriatica, complessivamente in arretramento, sarà pertanto necessario intervenire con un ulteriore versamento di sabbia e/o con nuovi interventi di difesa integrati a quello in progetto.

6 Riferimenti bibliografici

AA.VV. (2003): "Coastal Engineering Manual: Part III – Coastal Sediment Transport".

Brampton, A.H. e H. Ozasa (1980) "Mathematical Modelling of Beaches Backed by Seawalls". Coastal Engineering, vol.4, No.11.

Gravens, M., Kraus, N.C., Hanson, H. (1991) "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. CERC Report 89-19.

Hanson, H. (1987) "GENESIS: A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use. University of Lund. Report 1007.

Hanson, H. e N.C. Kraus (1989) "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change. CERC Report 89-19.

Kraus, N.C. e S. Harikai (1983) "Numerical model of the shoreline change at Oarai beach". Coastal Engineering, vol.7, No.1.

Mimura, N., Shimizu, T., Horikawa K. (1983) "Laboratory study on the influence of detached breakwater on coastal change". Proc. Coastal Structures '83, ASCE.

Pelnard-Considere, R. (1956): "Essai de theorie de l'evolution des formes de rivages en plages de sable et de galets" 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No.1.

Silvester, R. e Hsu, J.R.C. (1993). "Coastal stabilization". World Scientific.