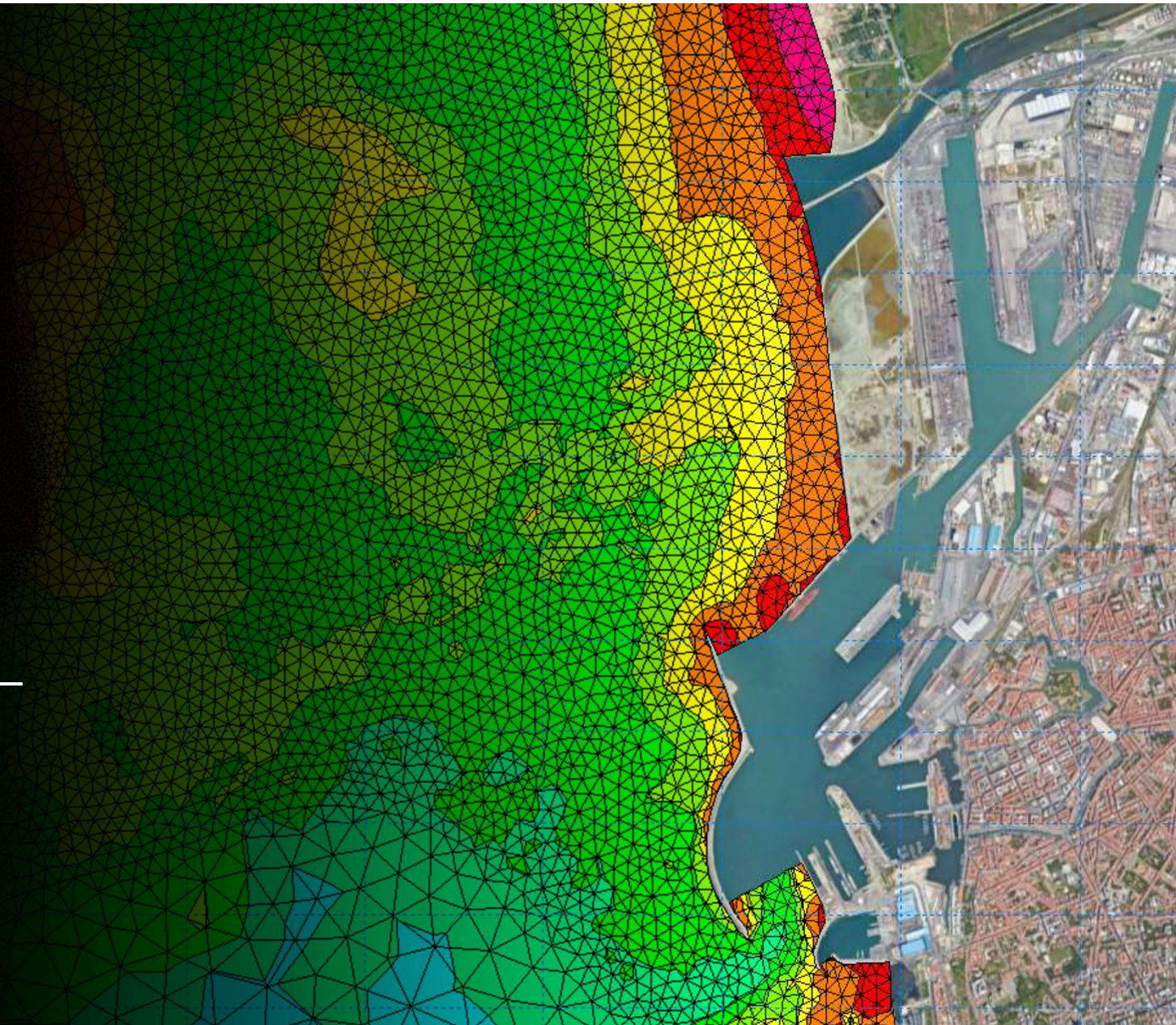


Studio sugli interventi
necessari per mitigare
gli effetti della
realizzazione della
Darsena Europa sul
litorale pisano

Attività di studio e Modellazione
Numerica



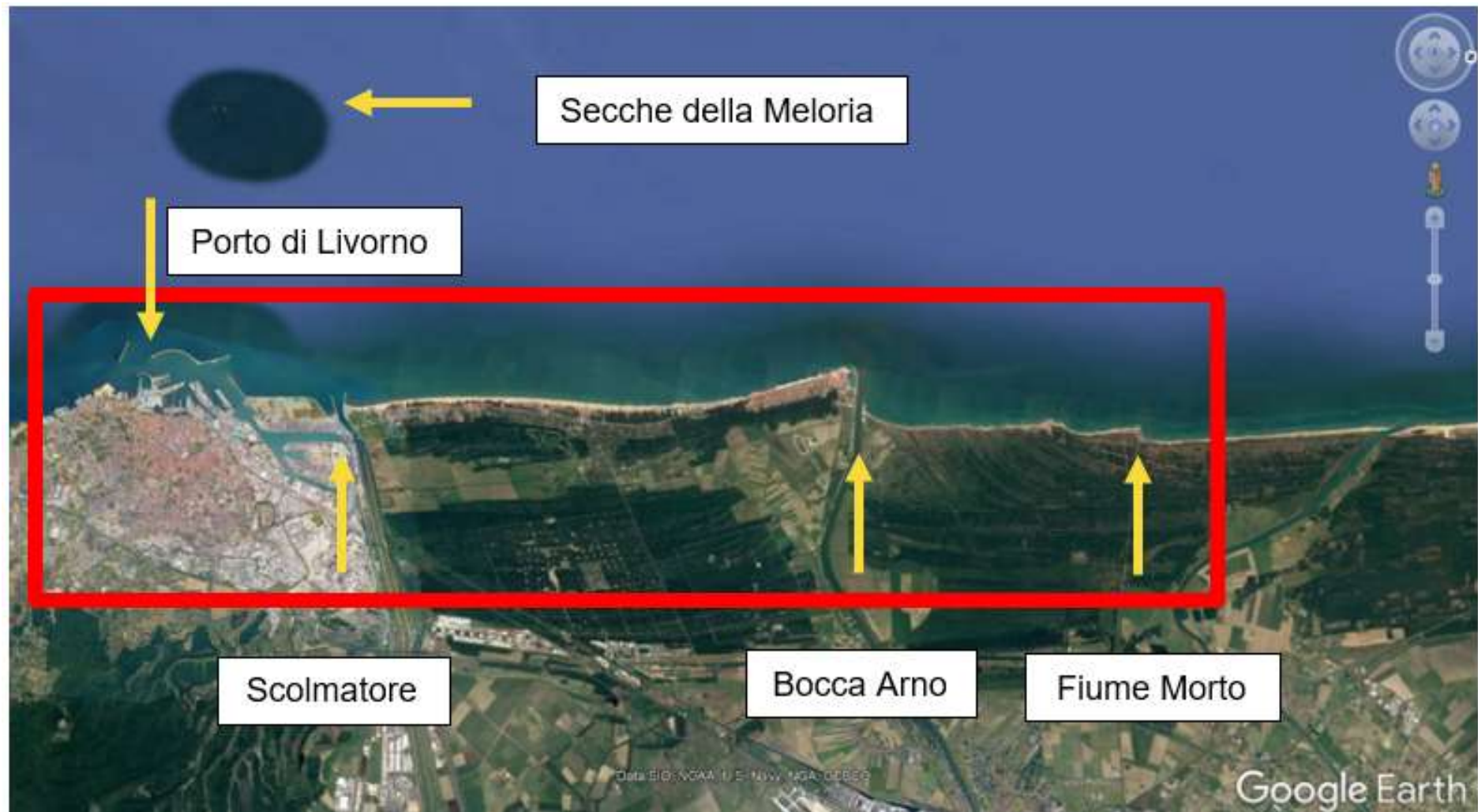
Fasi dello studio

Fase 1: Analisi e valutazione tecnica degli effetti dell'intervento denominato Darsena Europa sul litorale pisano

Fase 2: Studio degli interventi necessari per mitigare gli effetti della realizzazione della Darsena Europa

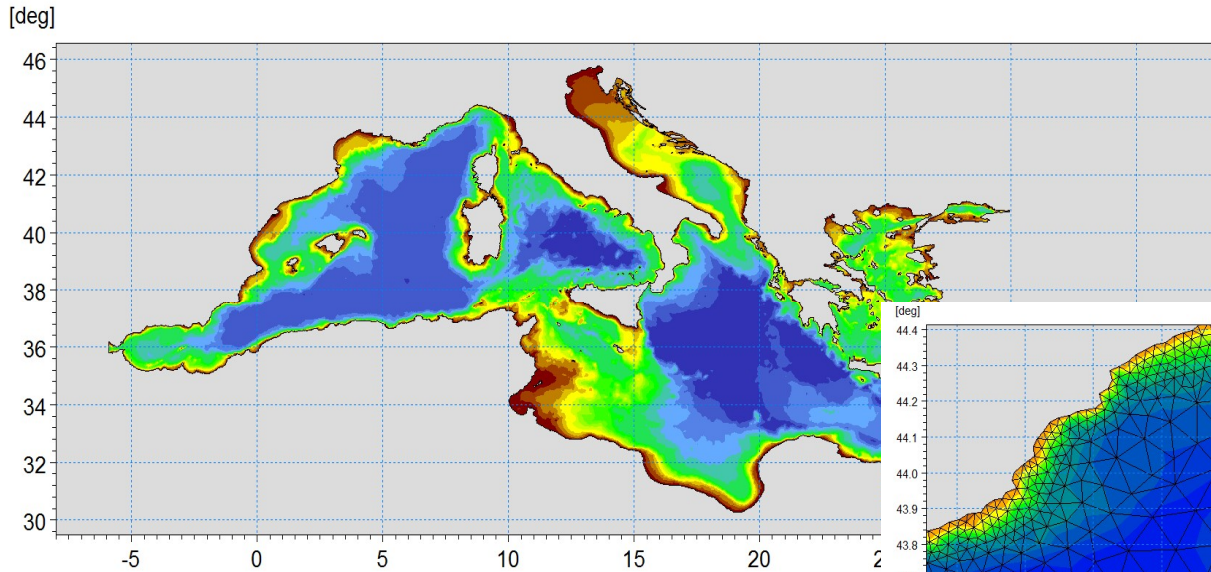
Fase 3: Servizio di quantificazione degli effetti dell'intervento denominato Darsena Europa sul litorale pisano e individuazione di possibili misure di compensazione

Inquadramento dell'area di studio



FASE 1

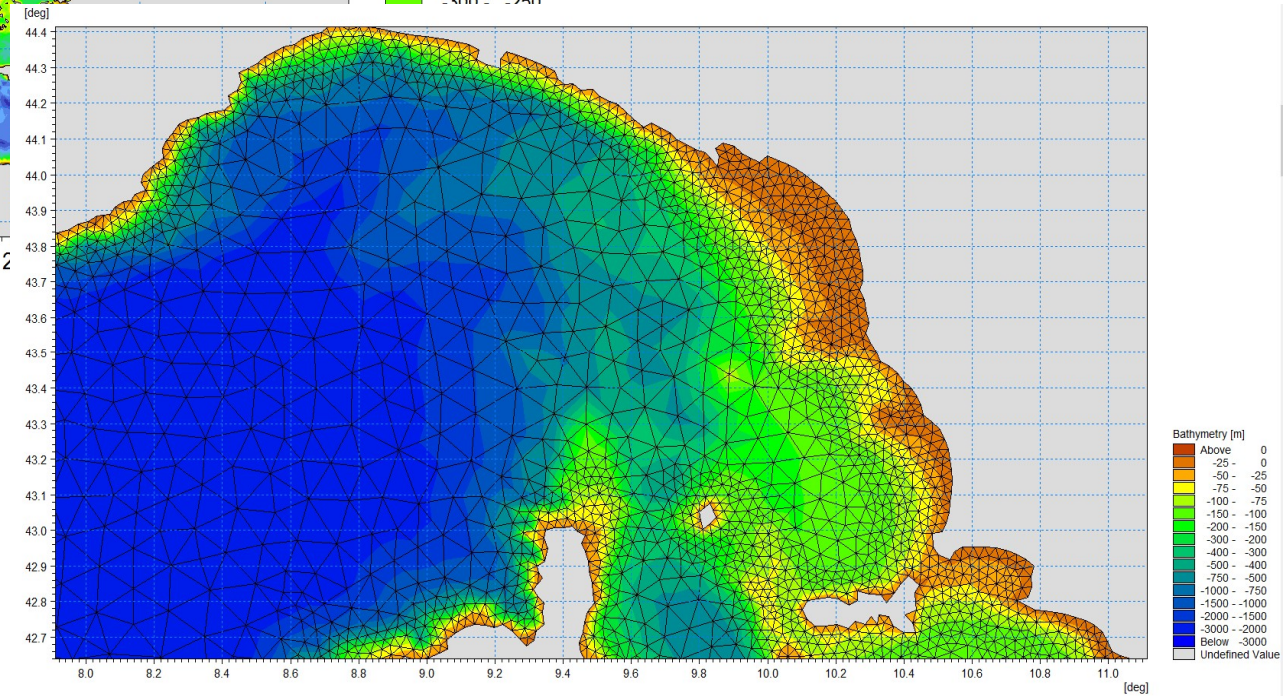
Analisi dei dati di moto ondoso al largo



Database Hindcast utilizzato: MWM

Mediterranean Wind Wave Model -
prodotto da DHI in collaborazione con
HyMOLab (Hydrodynamics and Met-
Ocean Laboratory)

Risoluzione spaziale: da 10Km a 3Km
Passo temporale: 1h
Disponibilità: 1979-2021 (43 anni)



Analisi del moto ondoso al largo



| Punto | Lon [°E] | Lat [°N] |
|---------|----------|----------|
| MWM OFF | 10.099 | 43.541 |

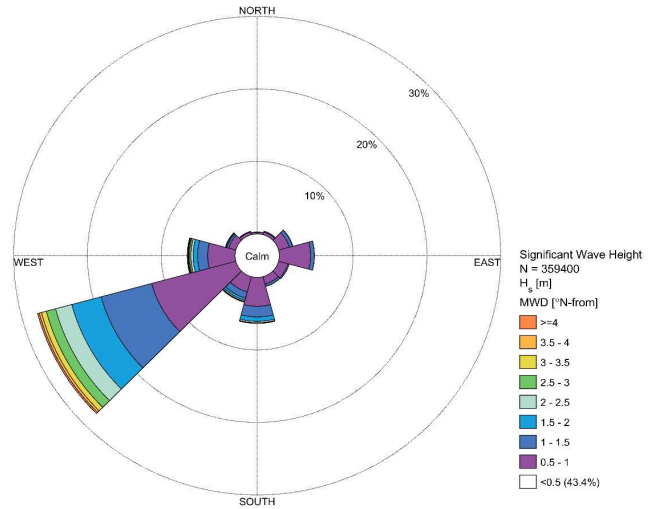
Dalla serie storica di altezza d'onda significativa al largo estratta dal database MWM emerge che nel periodo dei 43 anni considerati si raggiungono valori massimi di altezza significativa H_s oltre gli 8.0 m. Il valore più alto presente nella serie risulta associato ad una mareggiata del Dicembre 1999 (H_s al picco pari a circa 8.46 m).

Dall'analisi della rosa del clima ondoso e della tabella delle frequenze di occorrenza si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono da Sud-Ovest e da Ovest (direzioni comprese tra 225°N e 285°N). Se si esclude la calma, tale settore racchiude circa il 30% delle onde presenti nel database, corrispondenti a quasi 4 mesi / anno in media.

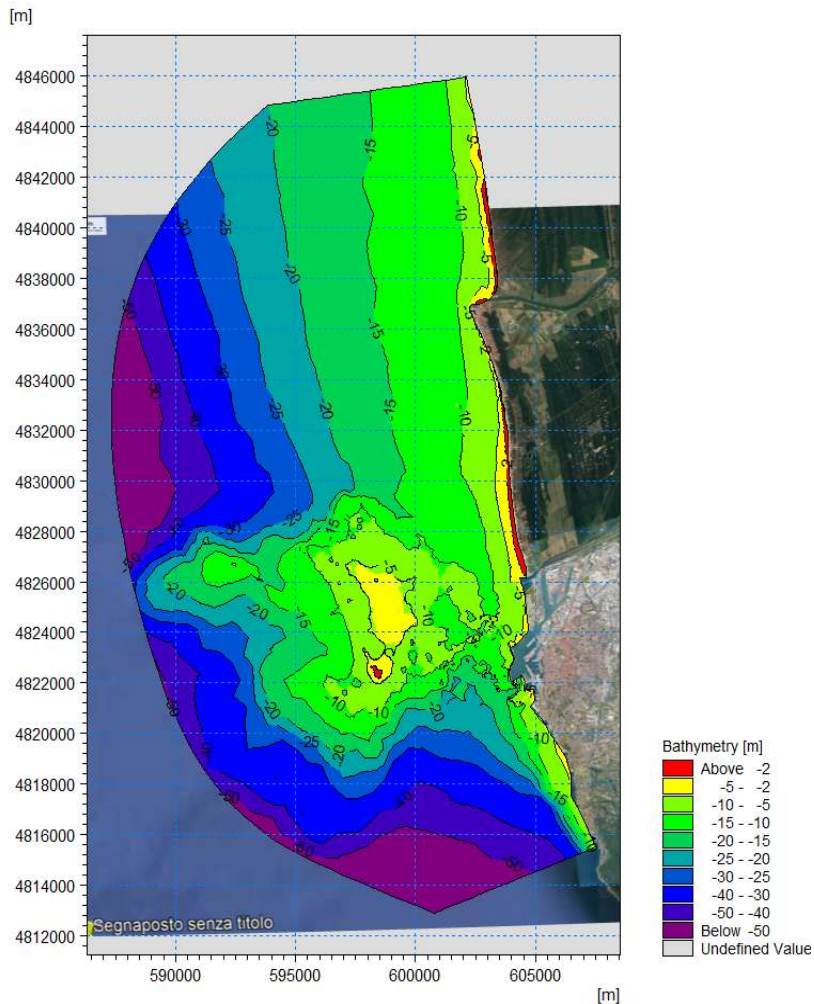
La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.5 m, si verifica per circa il 43% del tempo (corrispondenti a circa 5 mesi / anno in media).

H_s [m] - Significant Wave Height

| | [0-0.5] | [0.5-1] | [1-1.5] | [1.5-2] | [2-2.5] | [2.5-3] | [3-3.5] | [3.5-4] | [4-4.5] | [4.5-5] | [5-5.5] | [5.5-6] | [6-6.5] | [6.5-7] | [7-7.5] | [7.5-8] | [8-8.5] | Total | Accum |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| [16-18] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 359400 |
| [14-16] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 359400 |
| [12-14] | 26 | 12 | 6 | 13 | 6 | 14 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 77 | 359400 |
| [10-12] | 298 | 631 | 1056 | 980 | 356 | 371 | 134 | 138 | 82 | 77 | 74 | 70 | 55 | 16 | 5 | 2 | 3 | 4348 | 359323 |
| [8-10] | 4625 | 15437 | 12722 | 6611 | 3339 | 2969 | 1978 | 2187 | 1345 | 682 | 312 | 89 | 39 | 5 | - | - | - | 52340 | 354975 |
| [6-8] | 18325 | 26999 | 19118 | 12949 | 6799 | 3942 | 1102 | 388 | 40 | - | - | - | - | - | - | - | - | 89662 | 302635 |
| [4-6] | 49459 | 41748 | 11994 | 2521 | 156 | 4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 105882 | 212973 |
| [2-4] | 70063 | 29733 | 4010 | 23 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 103829 | 107091 |
| [0-2] | 3262 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 3262 | 3262 |
| Total | 146058 | 114560 | 48906 | 23097 | 10656 | 7300 | 3214 | 2713 | 1467 | 759 | 386 | 159 | 94 | 21 | 5 | 2 | 3 | 359400 | - |
| Accum | 146058 | 260618 | 309524 | 332621 | 343277 | 350577 | 353791 | 356504 | 357971 | 358730 | 359116 | 359275 | 359369 | 359390 | 359395 | 359397 | 359400 | - | - |



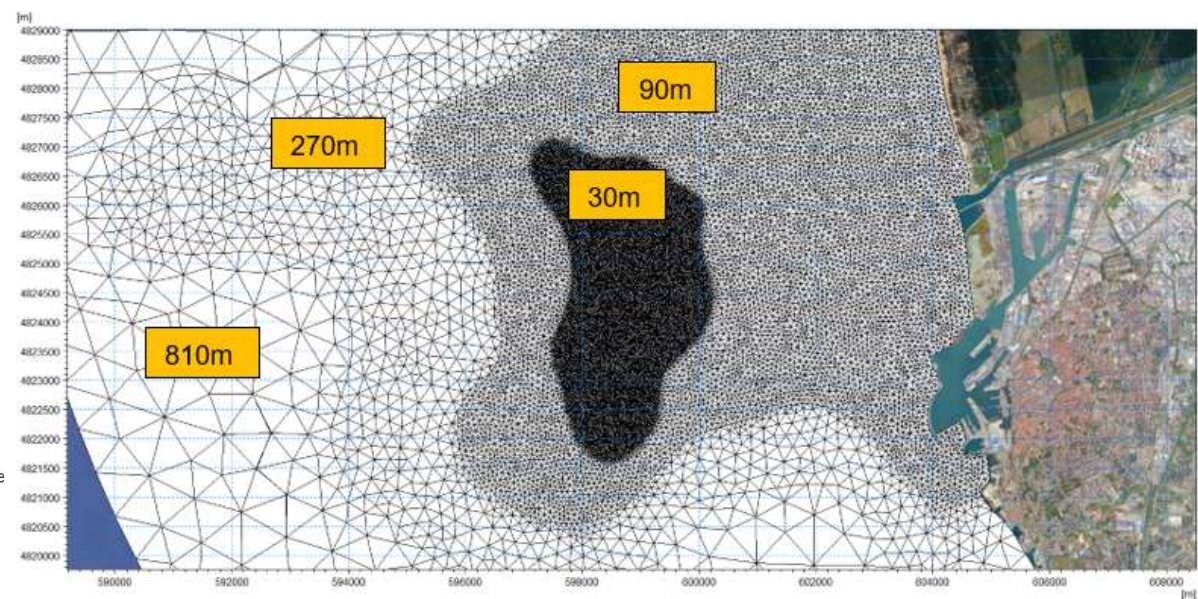
Modello di propagazione largo-costa



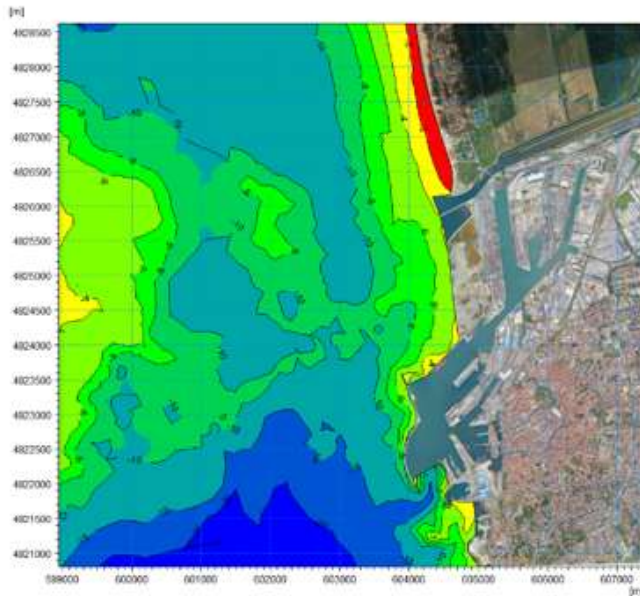
E' stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre una porzione di mare antistante il litorale di Marina di Pisa, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 5 km e un'estensione verso il largo di 5 km.

La mesh di calcolo del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 810 m, per arrivare a circa 30 m nella zona delle secche della meloria, caratterizzata da valori di batimetria fino a -2m. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 60'000 elementi

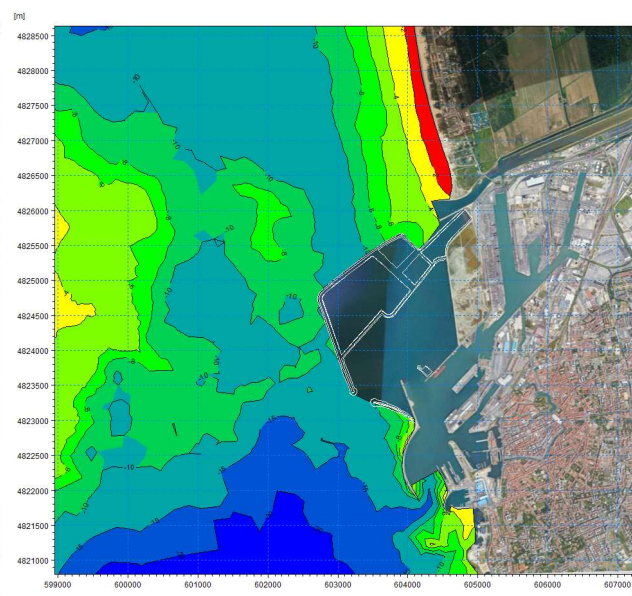
Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP, ed ai rilievi batimetrici disponibili



Modello di propagazione Largo-Costa



Stato Attuale

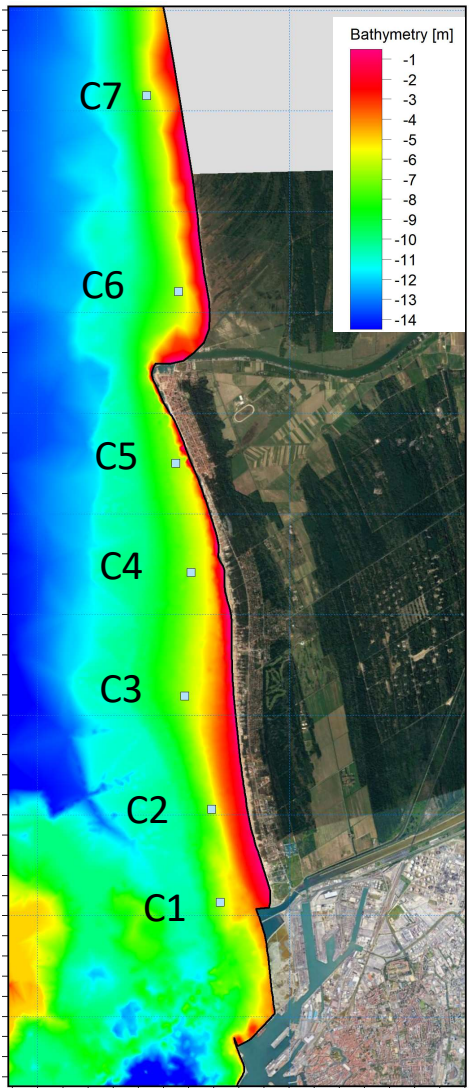


Scenario Progetto

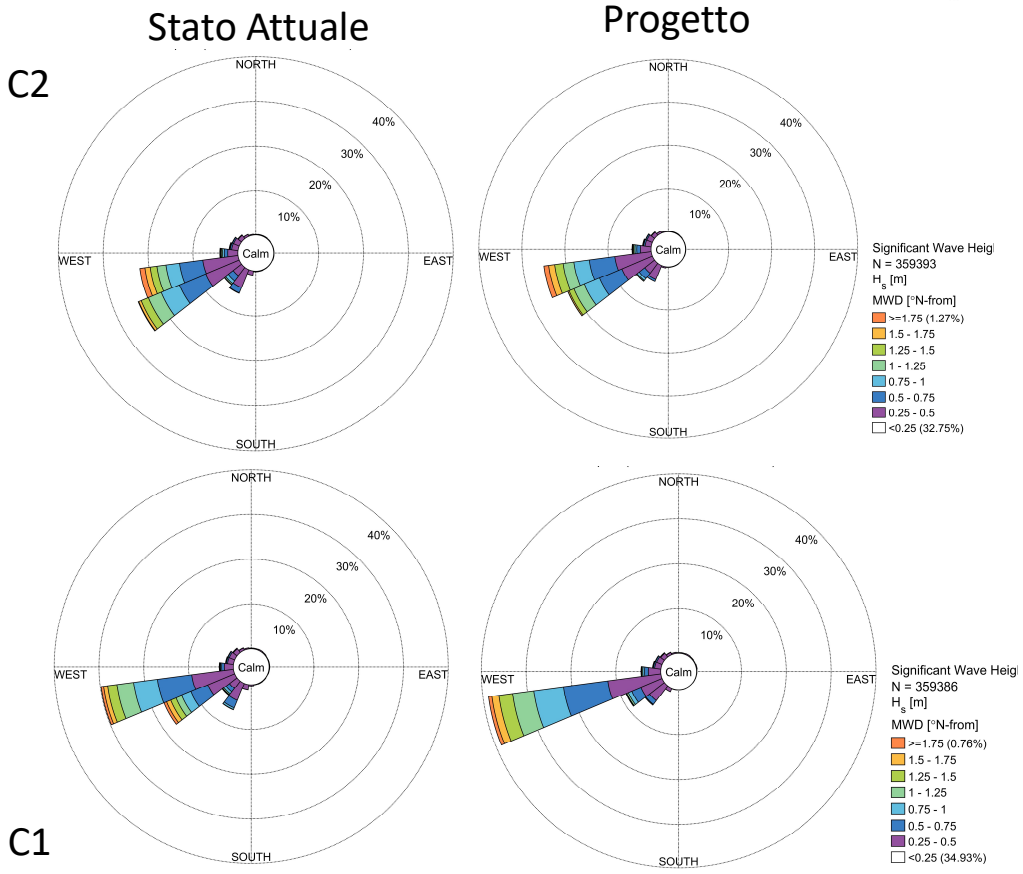
Le simulazioni sono state condotte in riferimento al nuovo layout della Darsena Europa presentato nell'ambito di una revisione del Progetto Definitivo (Ottobre 2022), resasi necessaria a seguito dei risultati della caratterizzazione dei sedimenti.

Al fine di comprendere l'influenza della realizzazione delle opere in progetto sul clima ondoso medio nel tratto immediatamente a nord del porto di Livorno sono state predisposte due simulazioni: una in riferimento allo stato attuale ed una in riferimento allo stato di progetto. Entrambe le simulazioni sono state condotte per l'intero periodo di 43 anni.

Analisi del Moto ondoso a costa nei due scenari



| | Stato Attuale | | Progetto | |
|----|---------------|----------|----------|----------|
| | Hs [m] | MWD [°N] | Hs [m] | MWD [°N] |
| C1 | 0.51 | 247 | 0.44 | 259 |
| C2 | 0.51 | 249 | 0.49 | 251 |
| C3 | 0.54 | 255 | 0.53 | 256 |
| C4 | 0.55 | 258 | 0.55 | 258 |
| C5 | 0.57 | 256 | 0.57 | 256 |
| C6 | 0.55 | 260 | 0.55 | 260 |
| C7 | 0.60 | 254 | 0.60 | 254 |



La realizzazione delle opere in progetto determina una riduzione significativa delle ondazioni provenienti da Sud-Ovest limitatamente al punto C1;

il clima ondoso nel punto C1 risulta significativamente influenzato dalla realizzazione della darsena in progetto. La differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è pari a circa 12° per la configurazione di progetto;

il clima ondoso nel punto C2 risulta leggermente influenzato dalla realizzazione delle opere di progetto. La differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è di circa 2°;

Il clima ondoso nel punto C3 risulta in minima parte influenzato dalla realizzazione delle opere di progetto. In questo caso, infatti la differenza tra le direzioni della risultante energetica di stato attuale e progetto è di circa 1°;

il clima ondoso nei punti C4-C7 non risulta influenzato dalle opere di progetto in quanto la differenza tra le direzioni della risultante energetica (tra stato attuale e progetto) è pressoché nulla.

Analisi di base del trasporto litoraneo (Fase1)



| | Attuale | | Progetto Layout Nuovo | |
|----|-----------|-----------|-----------------------|-----------|
| | T. Netto | T. Lordo | T. Netto | T. Lordo |
| | [m3*1000] | [m3*1000] | [m3*1000] | [m3*1000] |
| C1 | 8.2 | 16.0 | -15.1 | 11.1 |
| C2 | 26.2 | 30.3 | 21.1 | 25.6 |

I risultati delle elaborazioni mostrano quanto segue:

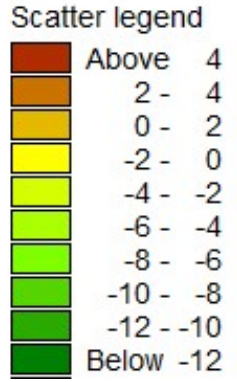
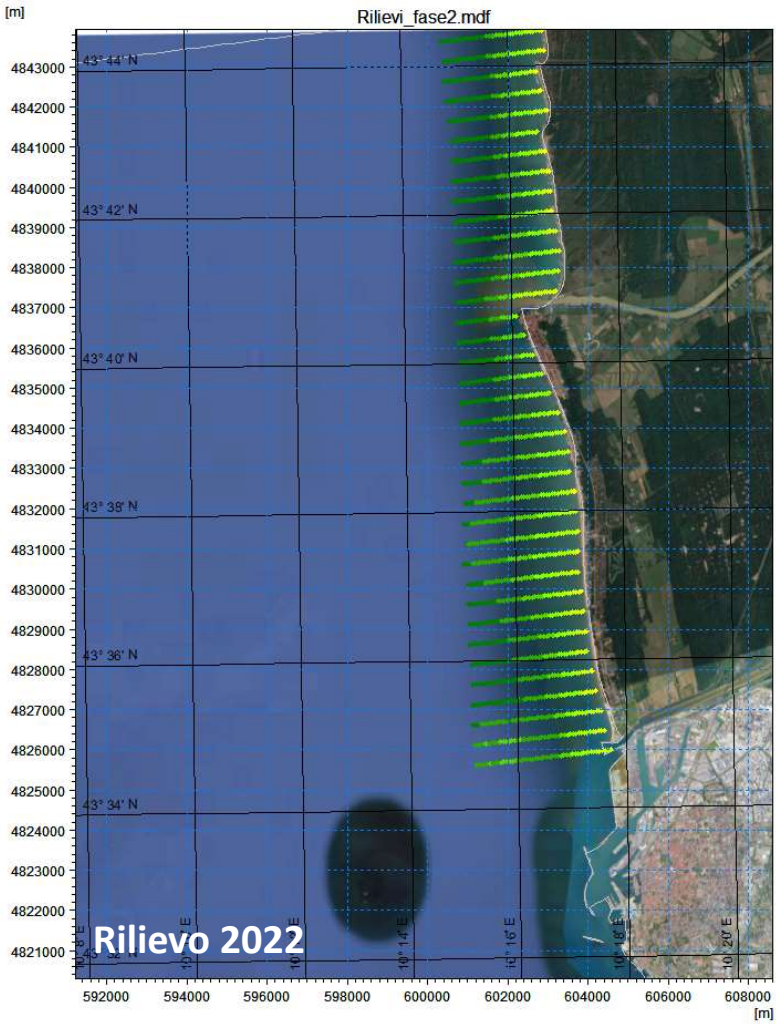
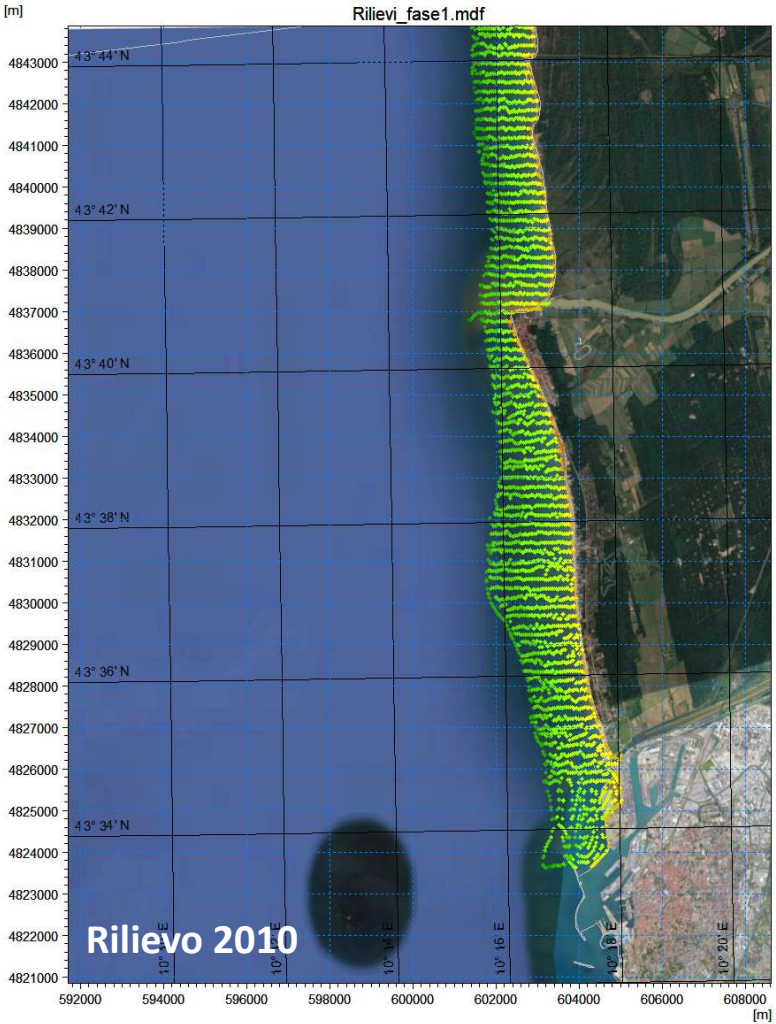
in riferimento allo stato attuale, il trasporto netto medio annuo nei punti C1 e C2 risulta diretto verso nord e caratterizzato da volumi pari rispettivamente a circa 8'200 m3/anno e circa 26'200 m3/anno. Il trasporto lordo risulta invece caratterizzato da volumi mediamente pari a circa 16'000 m3/anno per C1 e 30'300 m3/anno per C2;

in riferimento allo scenario di progetto, il trasporto netto medio annuo risulta diretto verso sud (15'100 m3/anno) nel punto C1, mentre risulta diretto verso nord (21'100 m3/anno) nel punto C2. Il trasporto lordo invece risulta caratterizzato da volumi mediamente pari a circa 11'100 m3/anno per C1 e 25'600 m3/anno per C2.

La realizzazione delle opere in progetto determina, come atteso, un impatto limitatamente al tratto di costa rappresentato dai transetti C1 e C2, ovvero dalla foce dello scolmatore fino a circa 2Km a nord. Nello specifico, l'effetto di schermatura che le nuove opere in progetto offriranno al tratto di costa immediatamente a nord potrebbe determinare nel transetto C1 una diminuzione consistente del trasporto proveniente da Sud fino a far prevalere il trasporto solido diretto verso sud con conseguente inversione del trasporto netto.

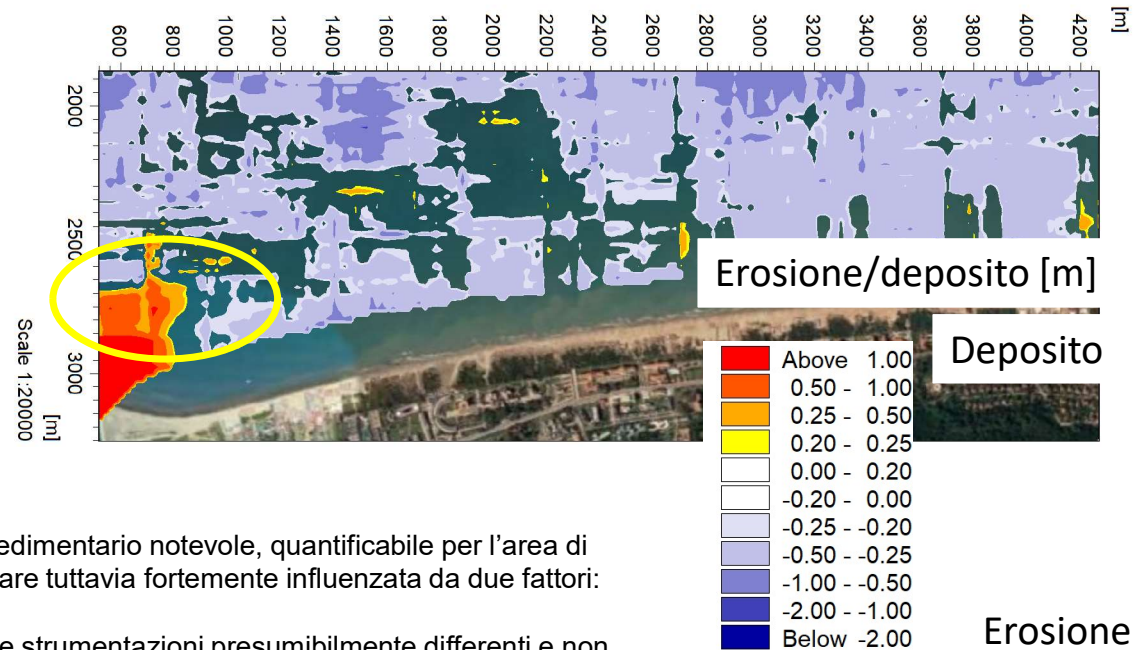
FASE 2

Analisi comparativa rilievi batimetrici



Analisi comparativa rilievi batimetrici

| | Area | | |
|--|----------|----------|----------|
| | A1 | A2 | A3 |
| Bilancio volumi 2010-2021 [m ³] | -3483500 | -1331800 | -2414300 |
| Bilancio volumi medio annuo [m ³ /anno] | -316700 | -121100 | -219500 |
| variazione media 2010-2021 [m] | -0.098 | -0.222 | -0.145 |
| tasso di variazione medio annuo [m/anno] | -0.009 | -0.020 | -0.013 |

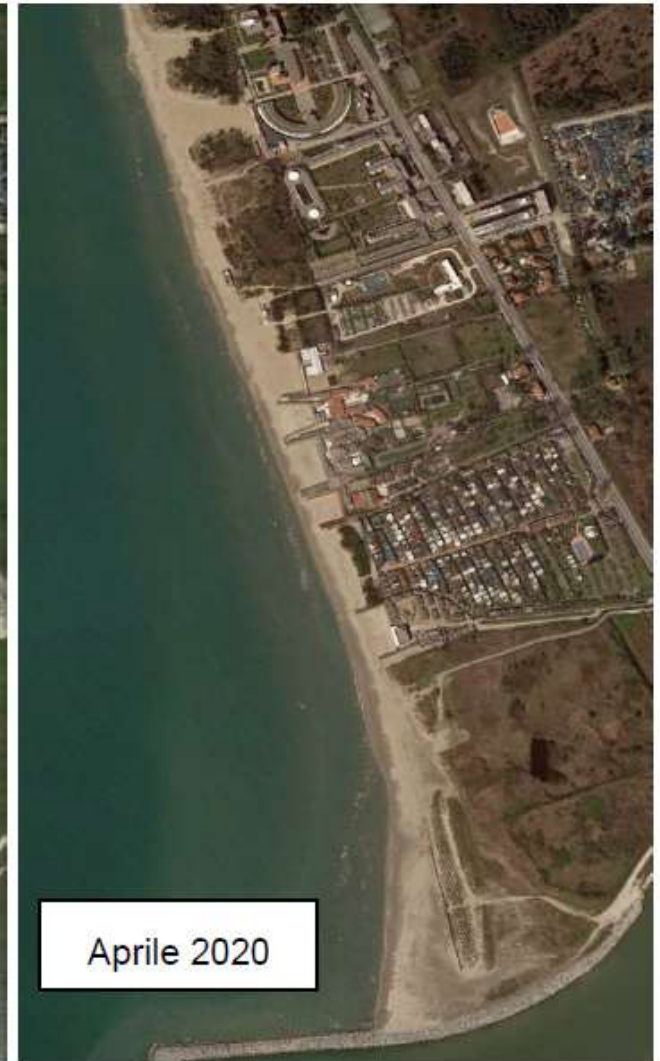


L'analisi comparativa dei rilievi storici (2022 e 2010) ha evidenziato un deficit sedimentario notevole, quantificabile per l'area di interesse (Calambrone e Tirrenia, A2) in circa 120'000 m³/anno. Tale stima appare tuttavia fortemente influenzata da due fattori:

- i due rilievi confrontati sono stati realizzati da soggetti diversi, con tecnologie e strumentazioni presumibilmente differenti e non vi può essere la certezza che sia stato preso a riferimento il medesimo riferimento verticale. Purtroppo, variazioni anche solo di pochi centimetri nel riferimento verticale possono determinare variazioni enormi in termini di quantificazione del volume accumulato / eroso calcolato per differenza, specie su un'area così vasta;
- i due rilievi sono stati condotti ad oltre 10 anni di distanza (2022 e 2010) ed in riferimento a configurazioni geometriche assai diverse. Tra il 2016 ed il 2017, infatti, è stata realizzata l'armatura della foce dello Scolmatore del fiume Arno, che ha determinato uno squilibrio importante nelle dinamiche evolutive dell'area di interesse, per cui il risultato della comparazione potrebbe non essere significativo del deficit sedimentario medio annuo attuale.

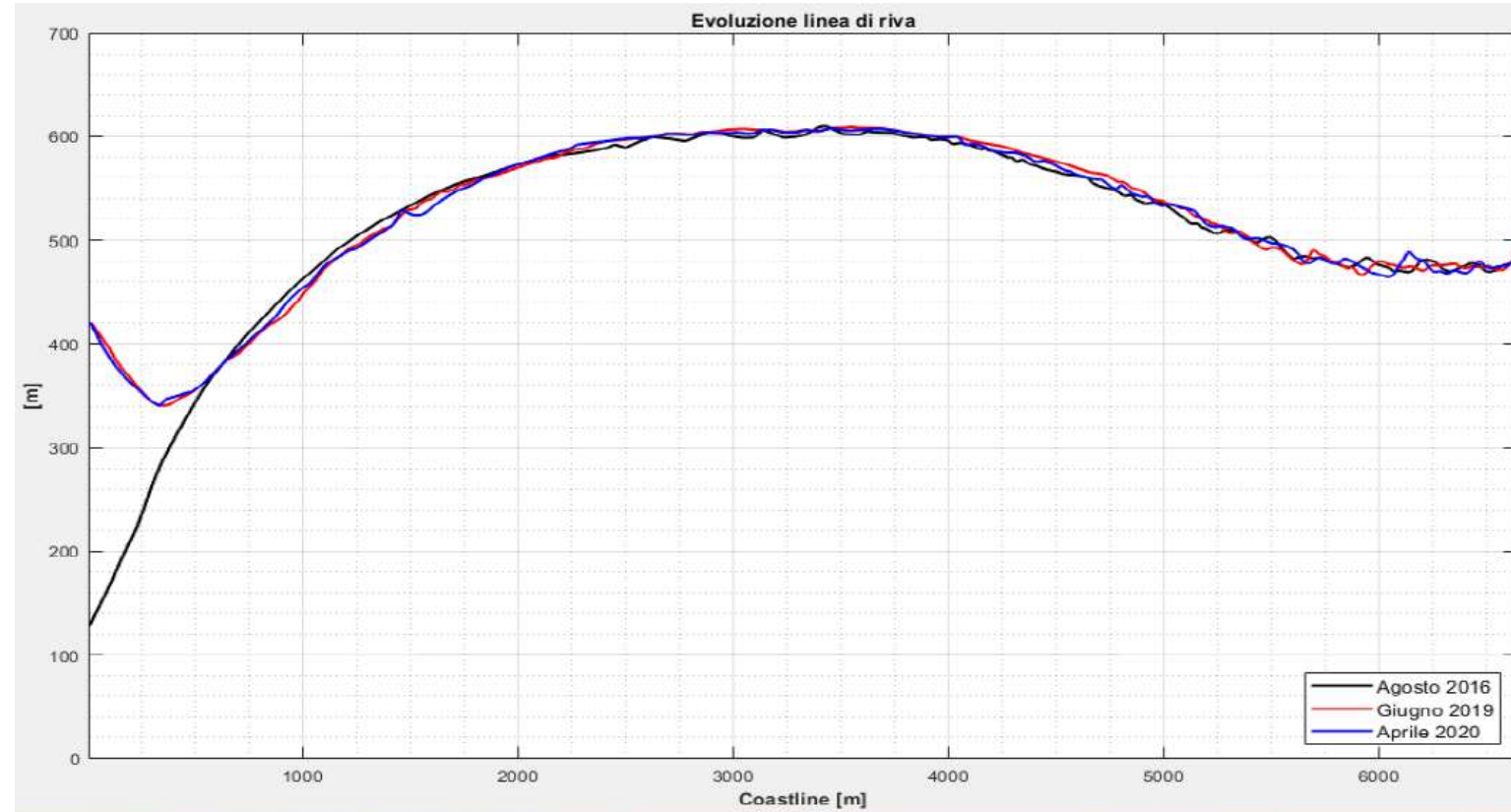
Peraltro, le variazioni batimetriche ottenute dal confronto tra rilievi presentano un andamento poco realistico, ovvero mettono in evidenza un'erosione diffusa in tutta l'area senza una differenziazione nello spazio e/o in funzione della profondità

Analisi e processamento delle linee di riva storiche



Analisi e processamento delle linee di riva storiche

Grafico dell'evoluzione delle linee di riva: Agosto 2016, Giugno 2019 e Aprile 2020



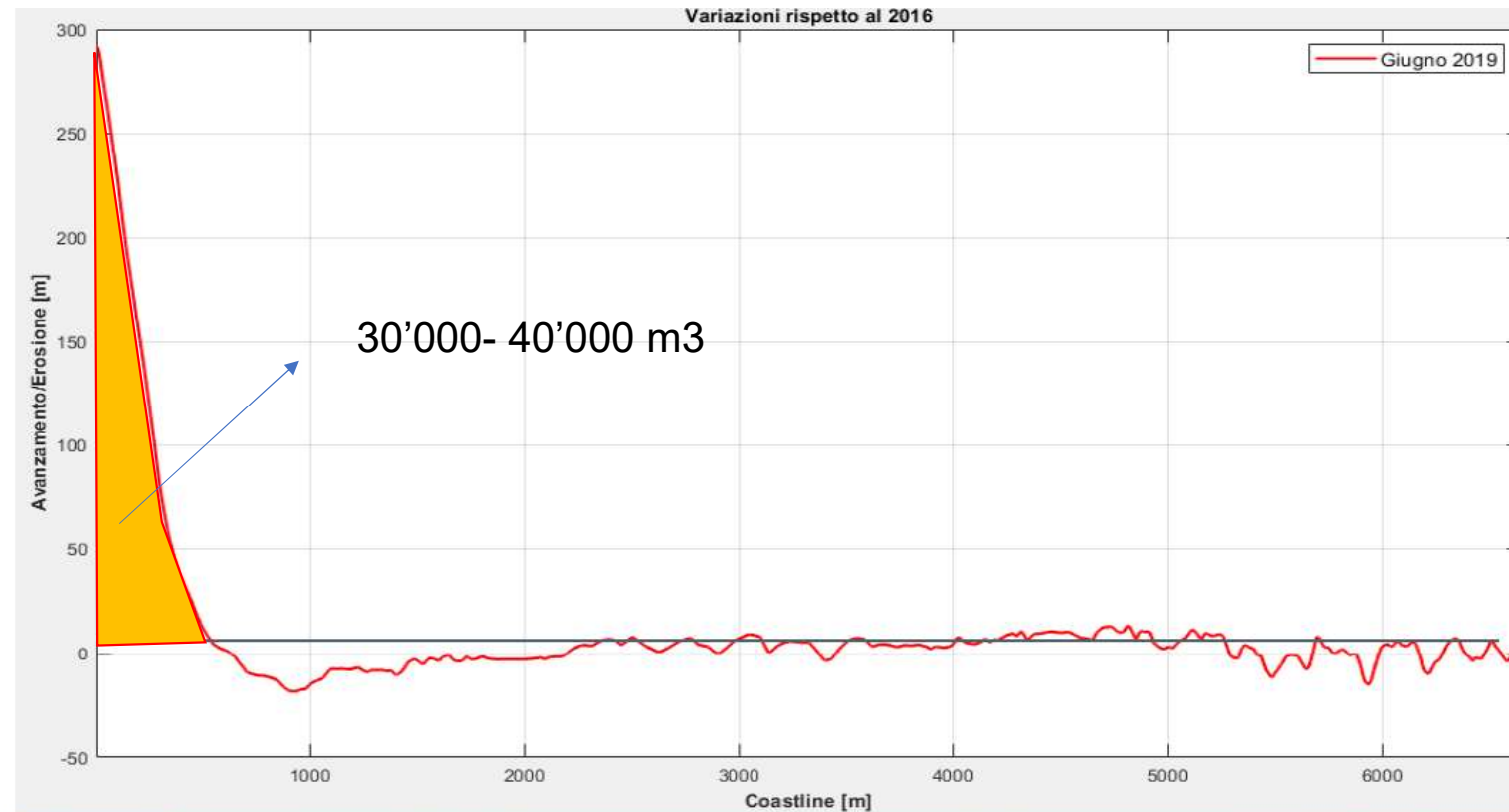
Analisi e processamento delle linee di riva storiche

Variazioni della linea di riva rispetto all'Agosto 2016: Giugno 2019 (in rosso)

Le variazioni della linea di costa sono significative (fino a 250m-300m) specialmente nella zona a Sud, interessata dall'intervento di Foce Scolmatore. Sulla base di questi dati è stato possibile stimare l'accumulo di sedimenti verificatosi a valle della realizzazione del pennello di foce Scolmatore (indicativamente da ascissa 0 a 500) in circa 30'000- 40'000 m³.

Lo spostamento di sedimenti verso sud nei primi anni successivi alla realizzazione dell'opera è stato relativamente rapido in quanto la linea di riva a nord dello Scolmatore ha dovuto ruotare in senso orario al fine di orientarsi secondo il nuovo equilibrio indotto dalla presenza del pennello. Durante questo processo, la direzione del trasporto netto nel tratto si è mantenuta prevalentemente verso sud.

Procedendo verso Nord si osserva, da ascissa 500 ad ascissa 2000, che la costa tra il 2016 ed il 2019 ha subito un non trascurabile arretramento con una perdita di sedimenti, che verosimilmente è migrata verso Sud. Il resto della linea di riva risulta invece piuttosto stabile e privo di variazioni significative.



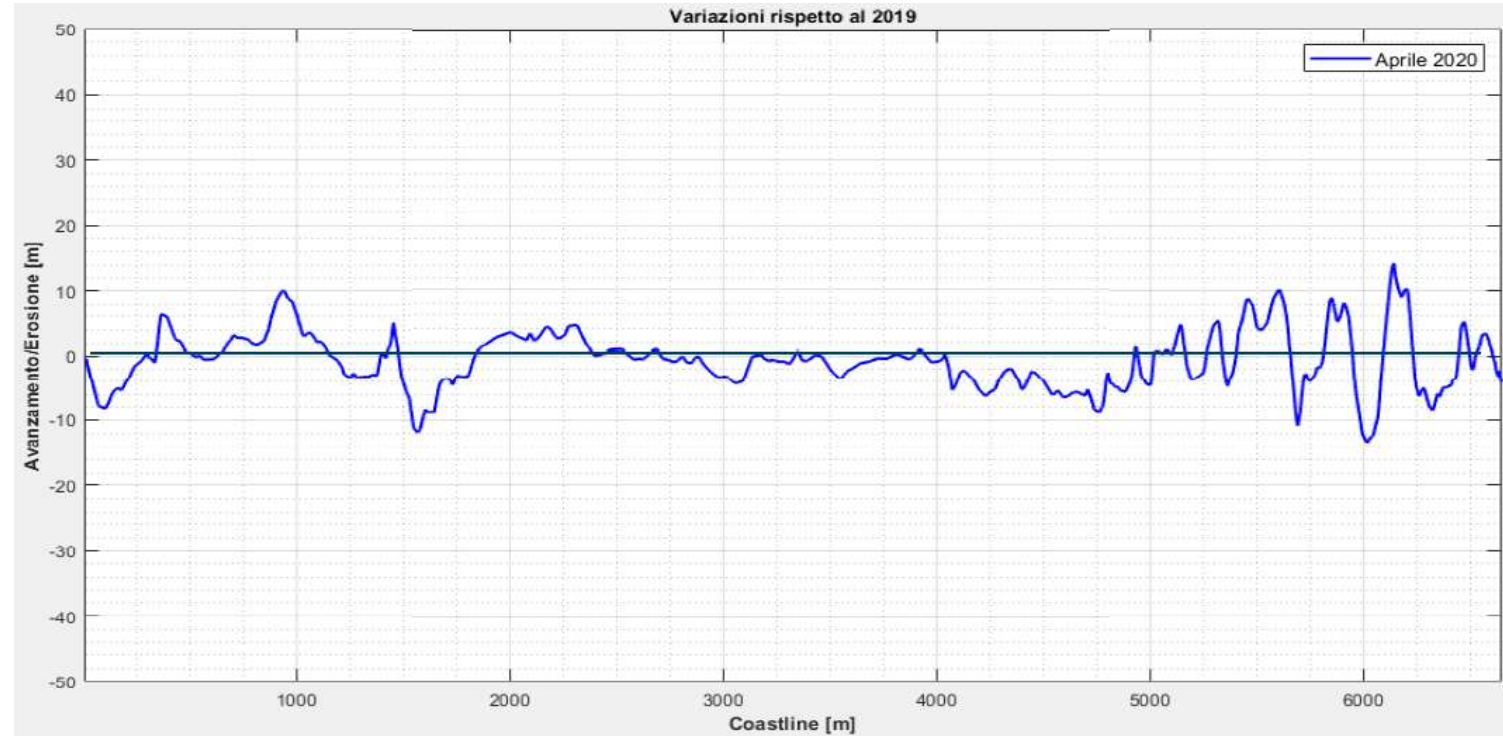
Analisi e processamento delle linee di riva storiche

Variazioni della linea di riva rispetto al Giugno 2019: Aprile 2020 (in blu).

Le variazioni della linea di costa sono contenute e spesso caratterizzate da variazioni locali: ovvero i sedimenti migrano verso Nord o verso Sud in un intorno di 100-200m.

L'arretramento medio della linea di costa in questo periodo è di modesta entità e stimabile in meno di 0.5 m. Sulla base di questo arretramento medio, assumendo una traslazione rigida del profilo di costa, è stata stimata una perdita di sedimenti complessiva di circa 5'000-7'000 m³ (in circa 1 anno).

In virtù di quanto sopra, per la calibrazione del modello LITLINE, sono stati utilizzati gli esiti delle analisi condotte sulle variazioni della linea di riva da immagini satellitari, relativamente al periodo Giugno 2019-Aprile 2020.



Modello dell'evoluzione della linea di riva

Calibrazione



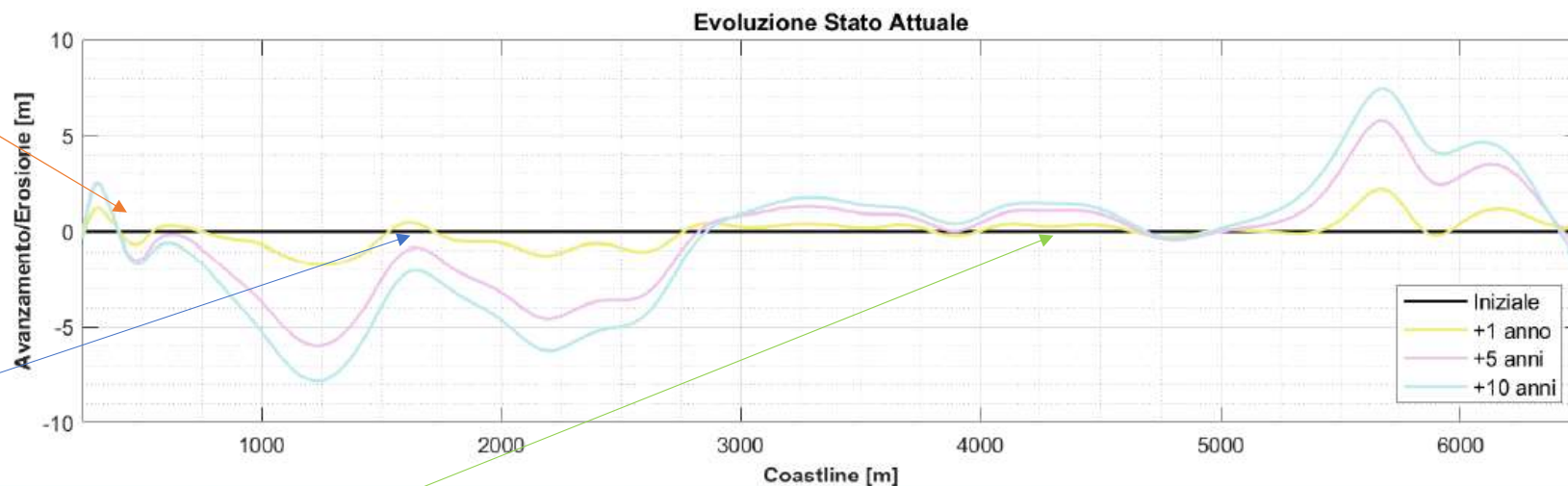
Dettaglio della calibrazione per il tratto di costa di Calambrone: In rosso la linea di riva di partenza (Giugno 2019) in blu la linea di riva al termine del periodo di calibrazione (Aprile 2020). L'immagine satellitare si riferisce al periodo Aprile 2020

Modello dell'evoluzione della linea di riva – Scenario di Stato Attuale

Il tratto di costa compreso tra la foce dello Scolmatore e circa 100-200 m più a Nord presenta una linea di riva in leggero avanzamento con tendenza alla stabilizzazione.

Il tratto di costa in corrispondenza della frazione Calambrone, ubicato da circa 500 m a 3000 m a Nord del pennello di foce, presenta caratteristiche erosive con tendenza all'equilibrio.

Il tratto di costa in corrispondenza di Tirrenia, ubicato da circa 3000 m a circa 6500 m a Nord del pennello di foce, risulta essere viceversa in leggero avanzamento con tendenza all'equilibrio.



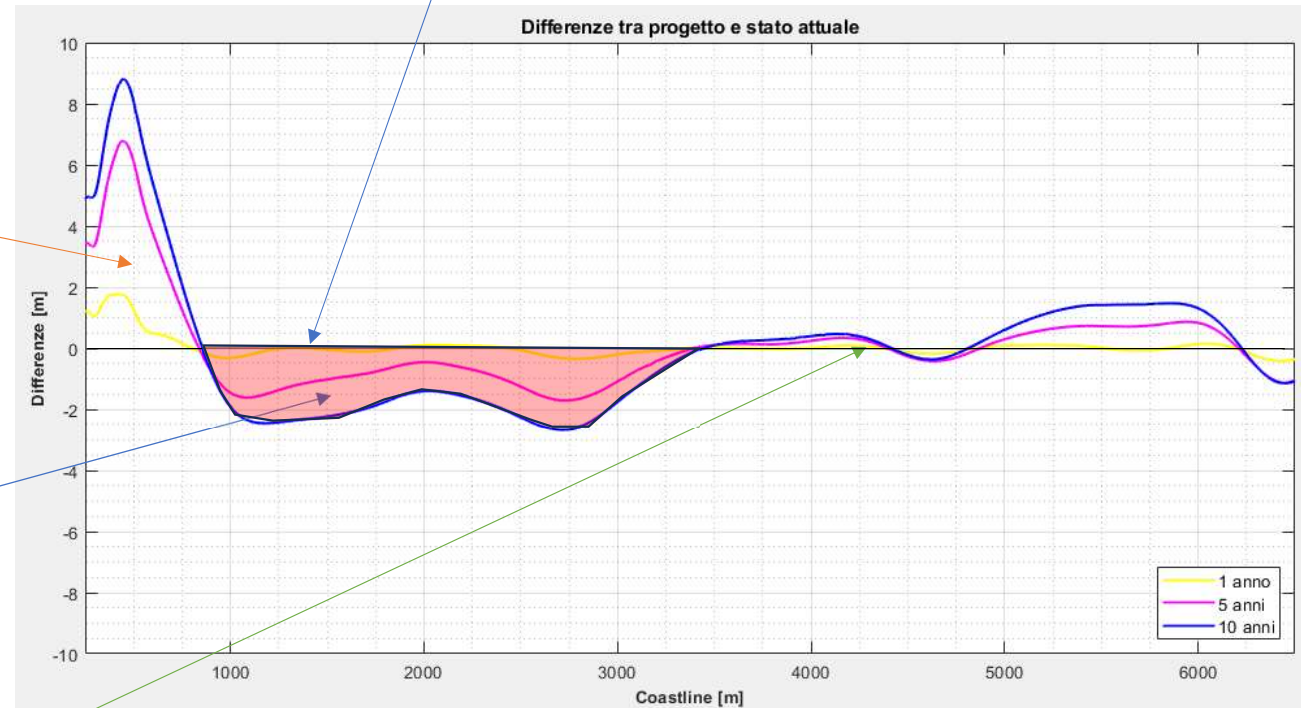
Modello dell'evoluzione della linea di riva – Scenario di Progetto

Il modello ha permesso di stimare che in 10 anni la perdita di sedimenti in tale tratto, per effetto della presenza della Darsena Europa sia piuttosto ridotta, intorno ai 1'000-2'000 m³.

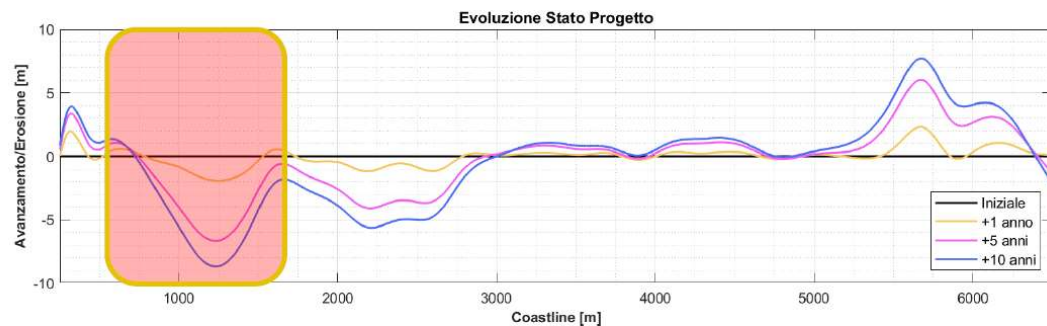
Come atteso la realizzazione della Darsena Europa determina un effetto di schermatura per il litorale immediatamente a Nord, che si concretizza in un maggiore avanzamento, rispetto alla configurazione di stato attuale, nei primi 1000 m a Nord del pennello di foce. L'incremento di tale avanzamento risulta essere pari a circa 2 m, 7 m e 9 m rispettivamente dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni.

Il tratto di costa da circa 1000 m a circa 3500 m a Nord del pennello di foce risulta viceversa caratterizzato da un arretramento lievemente maggiore rispetto alla configurazione attuale: dopo 1 anno le differenze non risultano apprezzabili, mentre la variazione è quantificabile fino ad un massimo di 1 m dopo 5 e 2 m dopo 10 anni

Proseguendo ulteriormente verso Nord, il litorale risulta invece caratterizzato da un'alternanza di tratti in cui la linea di costa nella configurazione di progetto è più avanzata rispetto a quella di stato attuale e viceversa. Tali oscillazioni sono comunque comprese tra +1 m e -1 m dopo 10 anni di simulazione.



Individuazione delle aree più critiche



Tali aree corrispondono indicativamente anche a quelle caratterizzate dal maggiore (seppure contenuto) incremento dell'arretramento a fronte della realizzazione della Darsena Europa, come mostrato in Figura 7-2, dove nello specifico si osserva che tali incrementi sono localizzati da circa 900 a circa 1700 m a Nord del pennello di foce Scolmatore. Il modello ha permesso di stimare che in 10 anni la perdita di sedimenti in tale tratto, per effetto della presenza della Darsena Europa sia piuttosto ridotta, intorno ai 1'000-2'000 m³.

Le aree che presentano maggiori criticità, ovvero caratterizzate dal maggiore tasso di erosione, sono quelle del litorale di Calambrone, ubicate indicativamente da circa 600 m a 1700 m a Nord del pennello di foce Scolmatore

Implementazione ripascimento tradizionale



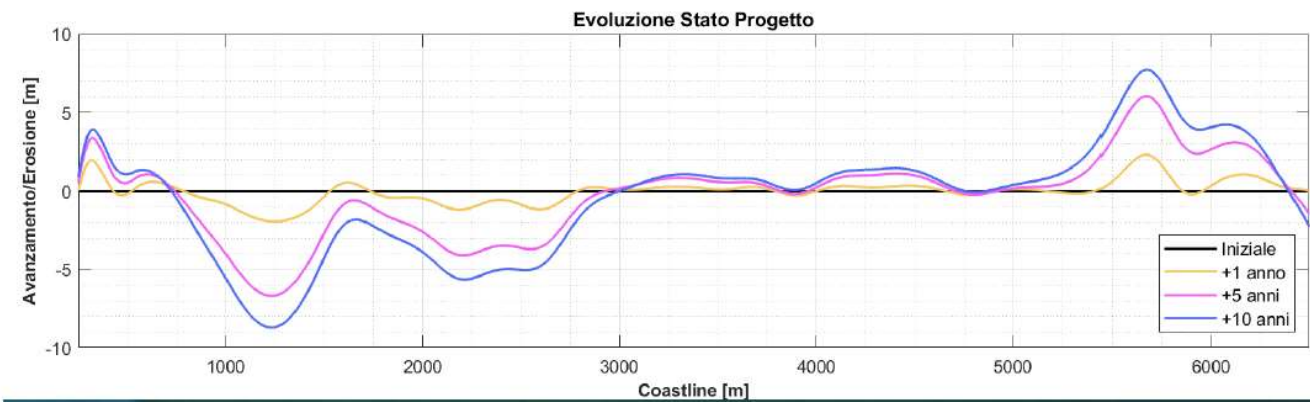
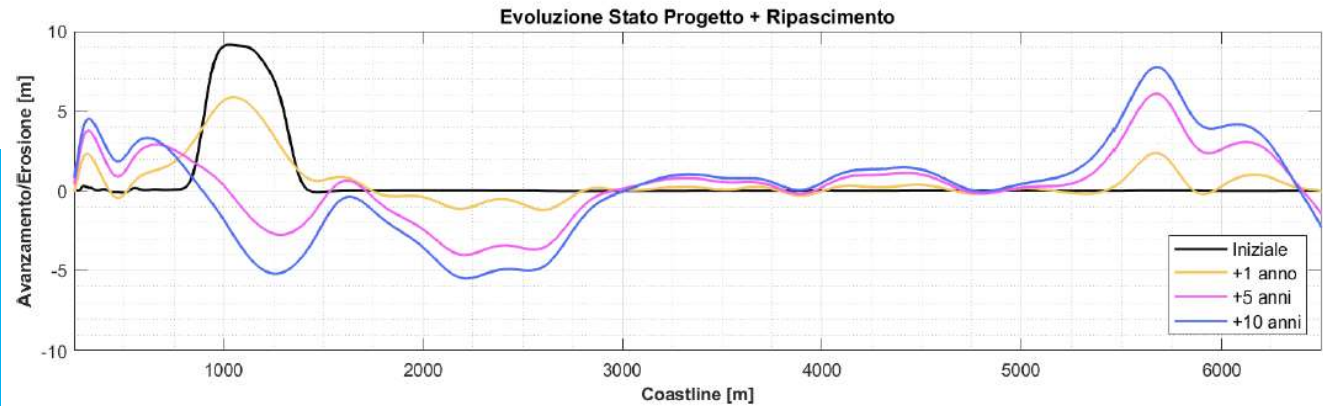
A fronte di tali evidenze si è ritenuto opportuno ipotizzare un ripascimento di volume minimo pari a $10'000 \text{ m}^3$, che è comunque significativamente superiore rispetto alla perdita di sedimenti stimata, per il litorale di Calambrone, a causa della realizzazione della Darsena Europa. Tale intervento può ritenersi efficace in primis per compensare i seppur minimi incrementi di arretramento determinati in tale area dalla realizzazione della Darsena Europa e nello stesso tempo a mitigare il fenomeno erosivo “naturale” già in atto nel litorale di Calambrone.

Considerata la direzione del trasporto litoraneo (verso Nord) si suggerisce di posizionare il ripascimento tra circa 900 m e 1400 m a Nord della foce Scolmatore, dove tra le altre cose sono presenti anche diverse strutture balneari. In questa fase, il ripascimento è stato ipotizzato pari a circa $10'000 \text{ m}^3$ a cui corrisponde, approssimativamente, un avanzamento medio della linea di riva (per una lunghezza di 500 m) di 8-10 m.

Valutazione efficacia ripascimento tradizionale

Al fine di valutare l'effettiva efficacia dell'intervento di ripascimento è stata predisposta una simulazione con il modello LITLINE nella configurazione di progetto comprensiva della realizzazione della Darsena Europa e, contestualmente, del ripascimento.

Il grafico mostra che il ripascimento determina un beneficio per tutto il litorale di Calambrone, in quanto determina una riduzione di quasi il 50% (a 5 e 10 anni) dell'arretramento rispetto alla soluzione senza ripascimento.



FASE 3

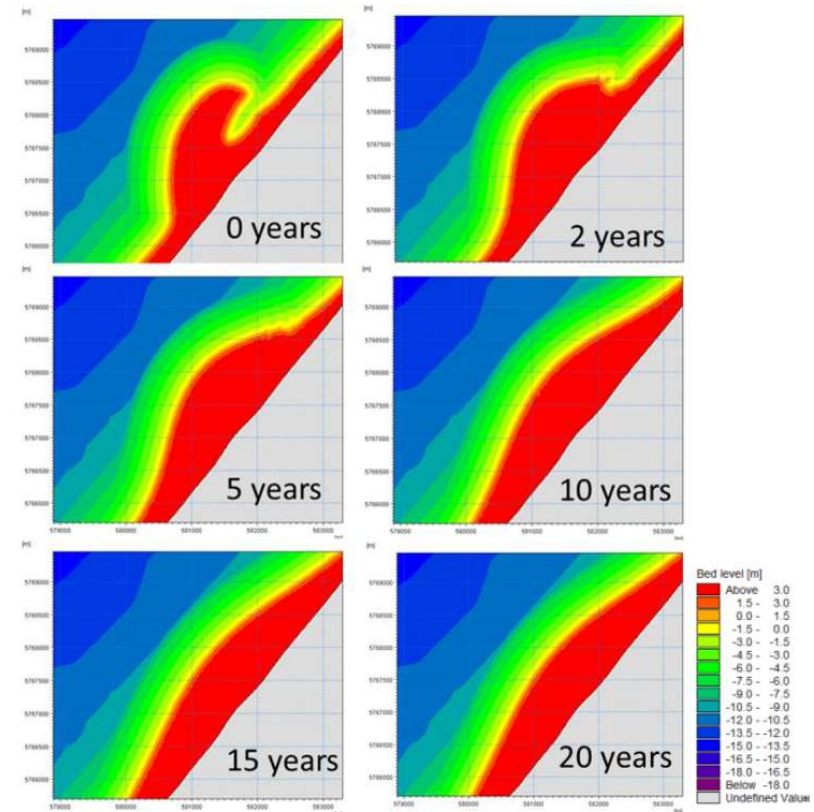
Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale

In alternativa al ripascimento di tipo tradizionale, si sono sviluppate negli ultimi anni tecniche di “ripascimento non convenzionale”. L'utilizzo delle tecniche di “**Sand Engineering**”, applicate in contesti non italiani, rappresenta un modo innovativo di effettuare ripascimenti. Spesso, nell'ambito di un intervento di protezione di un litorale, nasce l'esigenza di “nutrire” un determinato tratto di spiaggia in maniera continua: ovvero modeste o medie quantità di sabbia distribuite su un tratto di litorale ad intervalli regolari, ad esempio ogni anno. **L'idea alla base del Sand Engine è quella di effettuare un unico grande ripascimento, ubicato in prossimità della o delle zone critiche e lasciare che la dinamica costiera (tipicamente onde e correnti) faccia il proprio corso, modellando il “Sand Engine” e ridistribuendo la sabbia lungo l'intero tratto di litorale.**

Esempio di Sand Engine in Olanda

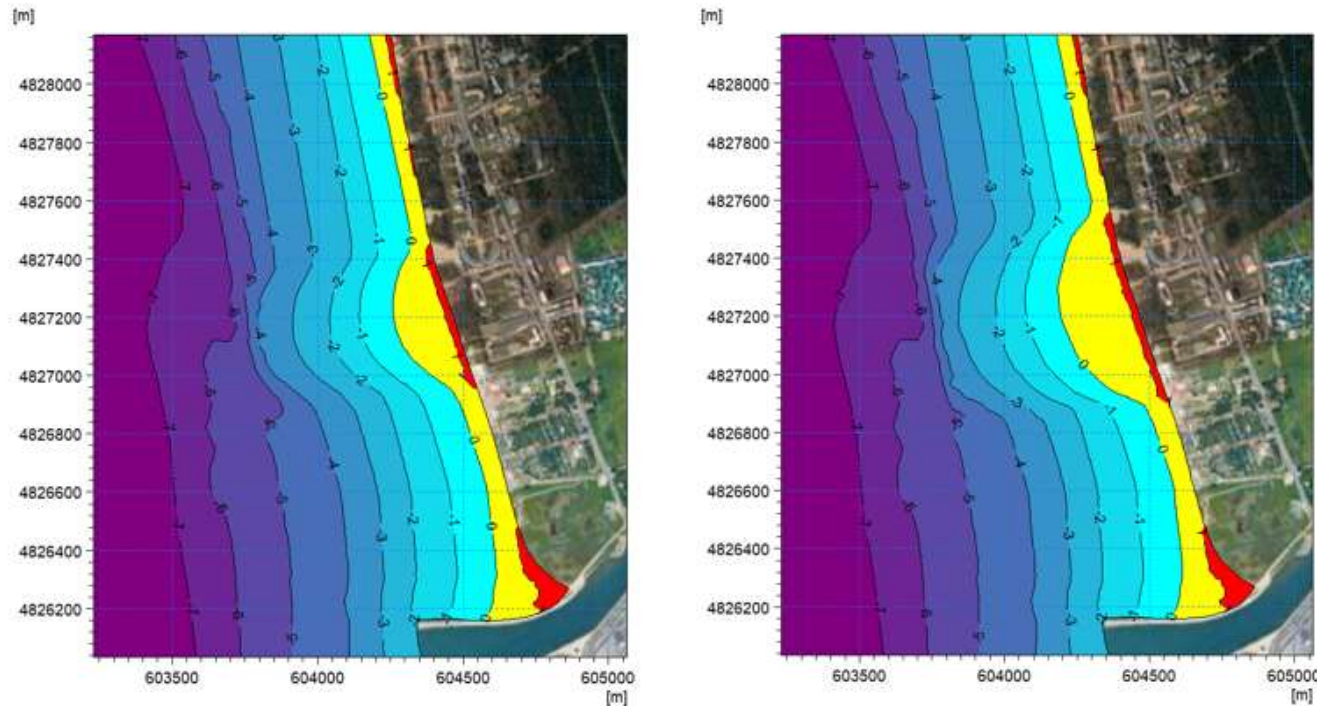
Si tratta di un intervento realizzato dal Governo olandese con il supporto della comunità scientifica di dimensione senza precedenti (21.5 Mm³ di sabbia). La forma assunta dalla sabbia riversata in mare è stata progettata in modo tale da permettere la creazione di nuovo litorale, sia per scopi ambientali che per le attività prettamente ricreative. L'obiettivo principale del progetto è che il sistema costiero venga modificato in modo tale che la linea di costa si mantenga in una configurazione stabile per un lungo periodo (proiezione a 20 anni) e all'interno di un'ampia area (10 km).

L'evoluzione attesa per il Sand Engine realizzato in Olanda è stata oggetto di modellazione anche da parte di DHI mediante l'applicazione del nuovo modulo MIKE 21 Shoreline Morphology Model.



Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale

Nel caso in oggetto è stata valutata l'efficacia di un ripascimento non convenzionale del tipo "Sand Engine" in alternativa a quello tradizionale. Sono state investigate due configurazioni di Sand Engine rispettivamente caratterizzate da un volume di ripascimento pari a circa 100'000 m³ e 200'000 m³.



Caratteristiche geometriche delle due configurazioni di Sand Engine ipotizzate

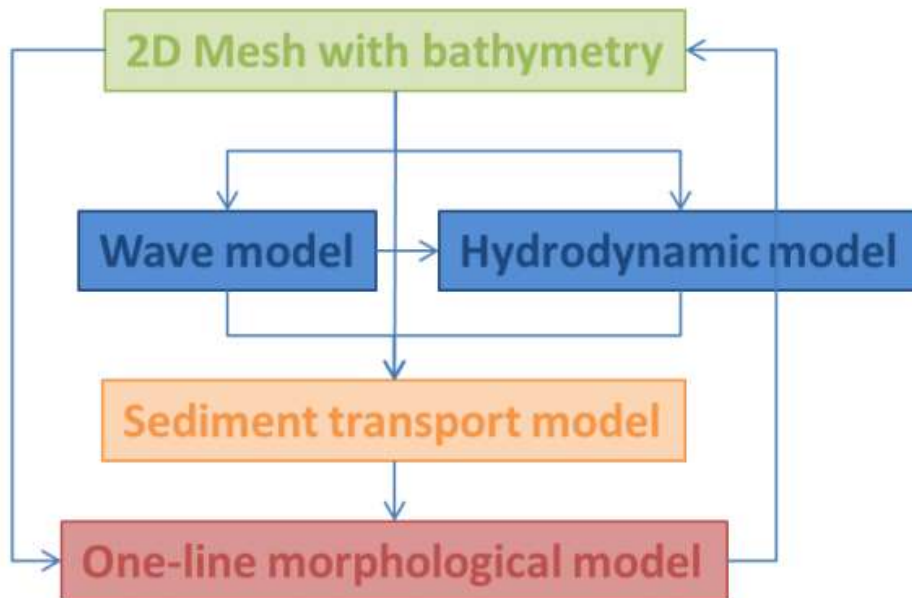
| | | Sand Engine 1 | Sand Engine 2 |
|--------------------------|-------------------|---------------|---------------|
| Volume di Ripascimento | [m ³] | 100'000 | 200'000 |
| Estensione trasversale | [m] | 150 | 200 |
| Estensione longitudinale | [m] | 500 | 700 |

Ipotesi di Sand Engine nella configurazione da 100'000m³ (a sinistra) e 200'000m³ (a destra)

Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale – Simulazione con MIKE21 SM

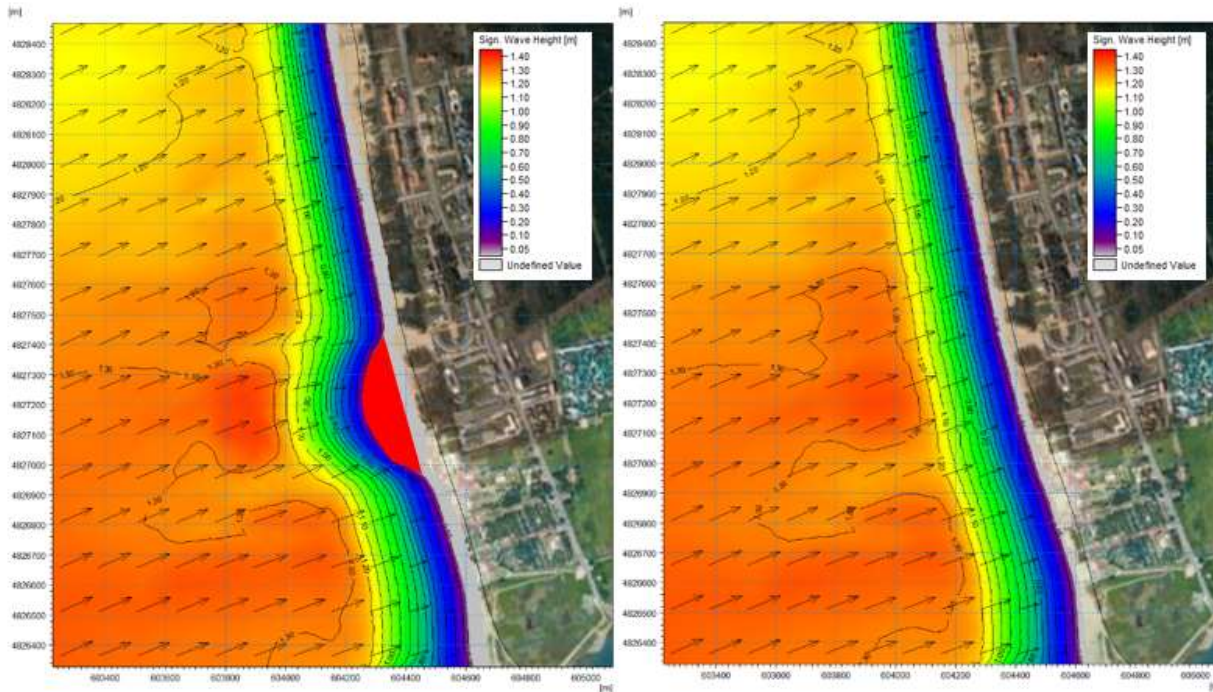
Il MIKE 21 Shoreline Morphology Model è costituito da quattro moduli strettamente legati tra loro, di seguito elencati:

- MIKE 21 SW – Modulo d'onda
- MIKE 21 HD – Modulo idrodinamico
- MIKE 21 ST – Modulo di trasporto di sedimenti (sabbie)
- MIKE 21 SM – Modulo di evoluzione della linea di riva



I quattro moduli descritti sono impiegati in sequenza: per ogni step temporale il modello effettua dapprima i calcoli relativi al moto ondoso, poi quelli idrodinamici e del trasporto ed in ultimo viene applicato lo Shoreline Morphology Module. Al termine del ciclo, viene aggiornata la batimetria che poi sarà utilizzata per il ciclo successivo

Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale – Modulo d'onda (caso 100'000 m³)

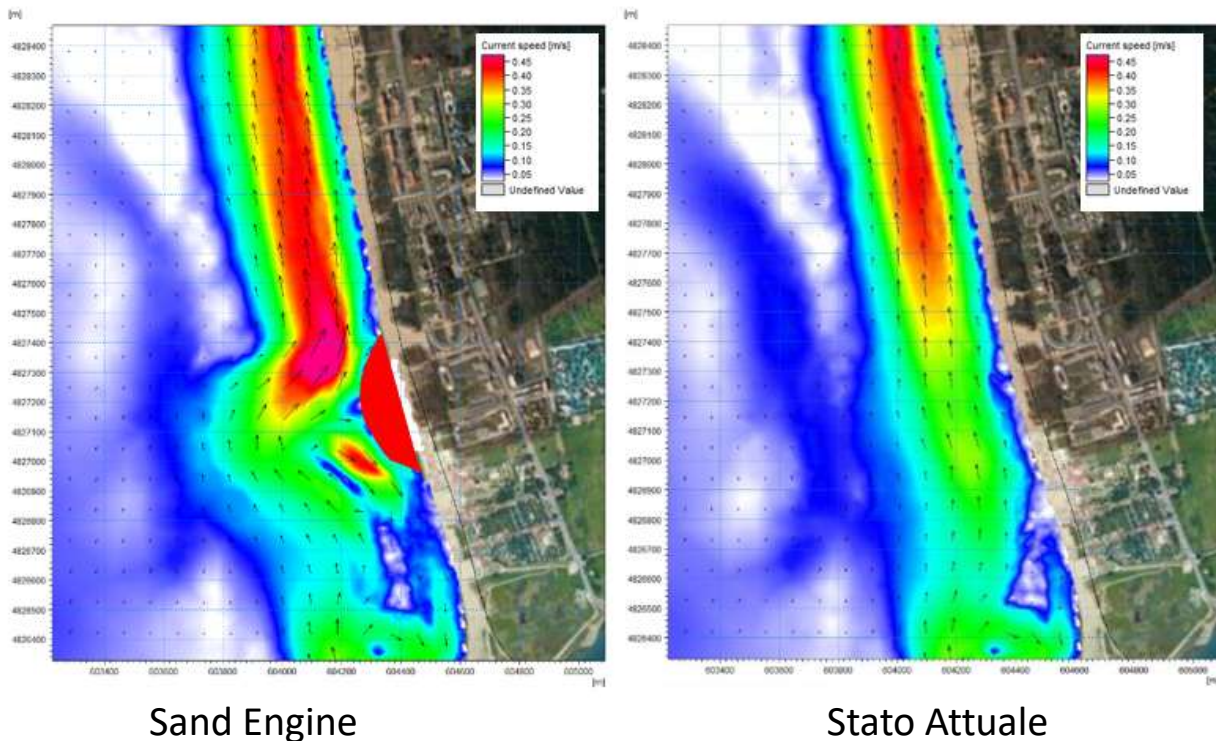


Sand Engine

Stato Attuale

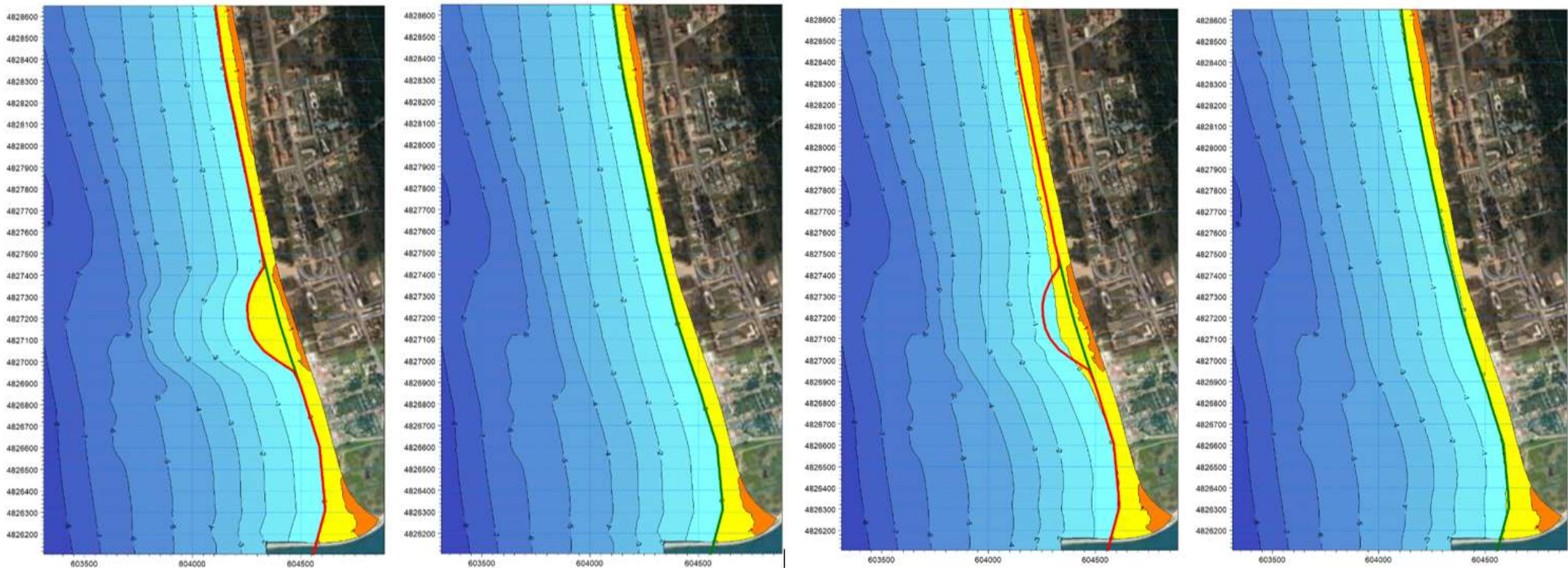
Le immagini relative ai campi d'onda illustrano che la presenza del Sand Engine comporta una modifica locale dell'altezza d'onda significativa e delle direzioni. In particolare, la peculiare conformazione batimetrica nello scenario di Sand Engine determina un'inevitabile curvatura dei fronti d'onda, che per effetto della rifrazione, tendono a disporsi sempre paralleli alla costa.

Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale – Modulo idrodinamico (caso 100'000 m³)



Le immagini relative ai campi di corrente mostrano che la presenza del Sand Engine determina una significativa variazione dei flussi di corrente. Le condizioni di moto ondoso simulate determinano che nello scenario naturale il flusso di corrente litoranea sia chiaramente diretto verso Nord. Nello specifico si osserva che il flusso di corrente si intensifica notevolmente a partire dall'ordinata 4837600 m. L'introduzione del mega ripascimento comporta, analogamente a quanto osservato per i campi d'onda, una modificazione locale delle correnti. La notevole curvatura del mega ripascimento determina la comparsa di due flussi distinti. A nord del ripascimento, il flusso di corrente si muove verso il Nord, mentre a sud il flusso si dirige verso Sud. È importante sottolineare che l'intensità dei due flussi è notevolmente differente: il flusso diretto verso Nord è sicuramente più intenso, con valori che superano i 45 cm/s. Questa maggiore intensità provoca due fenomeni distinti: a) il ripascimento viene smantellato più rapidamente nella zona settentrionale; b) i sedimenti si sposteranno più verso Nord che verso Sud.

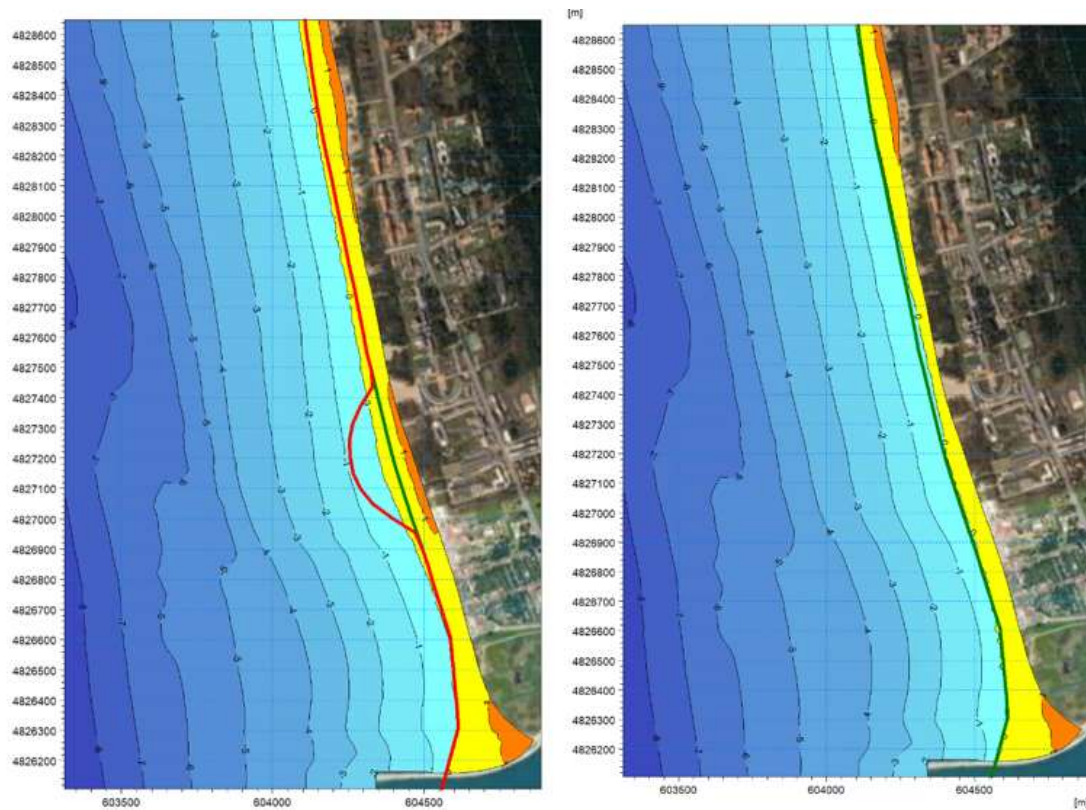
Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale – Modulo di evoluzione linea di riva (caso 100'000 m³)



Batimetria all'istante iniziale della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

Batimetria dopo 5 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale – Modulo di evoluzione linea di riva (caso 100'000 m³)

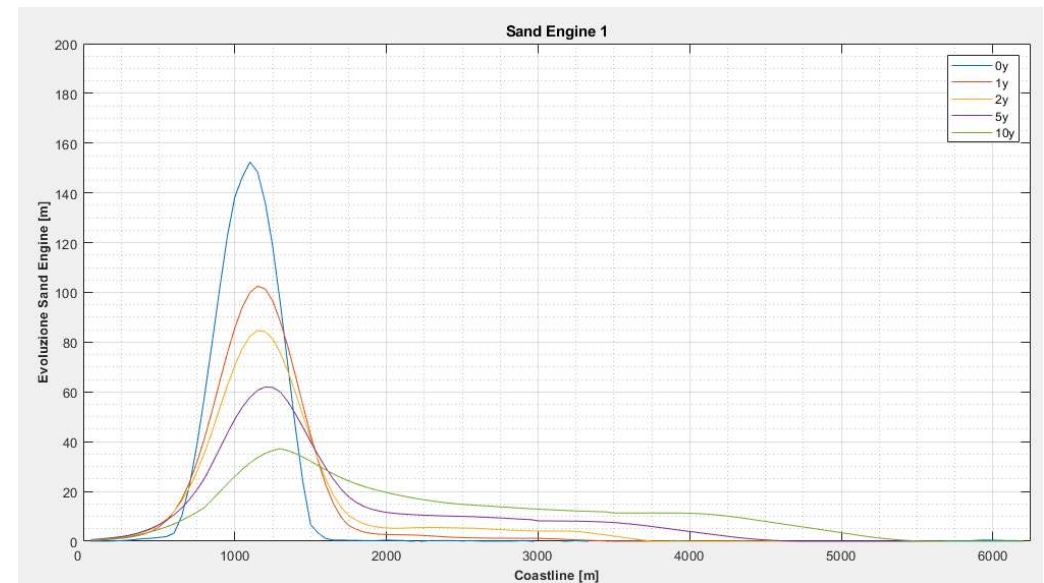


Batimetria dopo 10 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale – Modulo di evoluzione linea di riva (caso 100'000 m³)

L'analisi combinata delle immagini e del grafico permette di apprezzare chiaramente lo smantellamento della cuspidè iniziale del Sand Engine e la lunghezza del tratto di costa influenzato dal mega ripascimento. Tali parametri sono chiaramente funzione del tempo. Nello specifico si può affermare che il rateo di smantellamento è, come atteso, molto elevato nei primi anni e via via diminuisce nel tempo. Nello specifico, l'estensione trasversale iniziale del ripascimento è di circa 150 m. Dopo 1 anno, si riduce a 100 m, e dopo 2 anni si è ulteriormente ridotta a 80 m, fino ad arrivare a 30 m dopo 10 anni. Viceversa, la lunghezza di influenza risulta piuttosto limitata nel primo anno, ma cresce nei periodi successivi. Nello specifico, dopo il primo anno, il tratto di costa a nord risulta influenzato per circa 500m mentre dopo 10 anni la lunghezza di influenza a nord è di circa 3.5Km. Il litorale di Marina di Pisa, ubicato a circa 4.5 km dal Sand Engine non risulta influenzato dal ripascimento a 10 anni dallo sversamento.

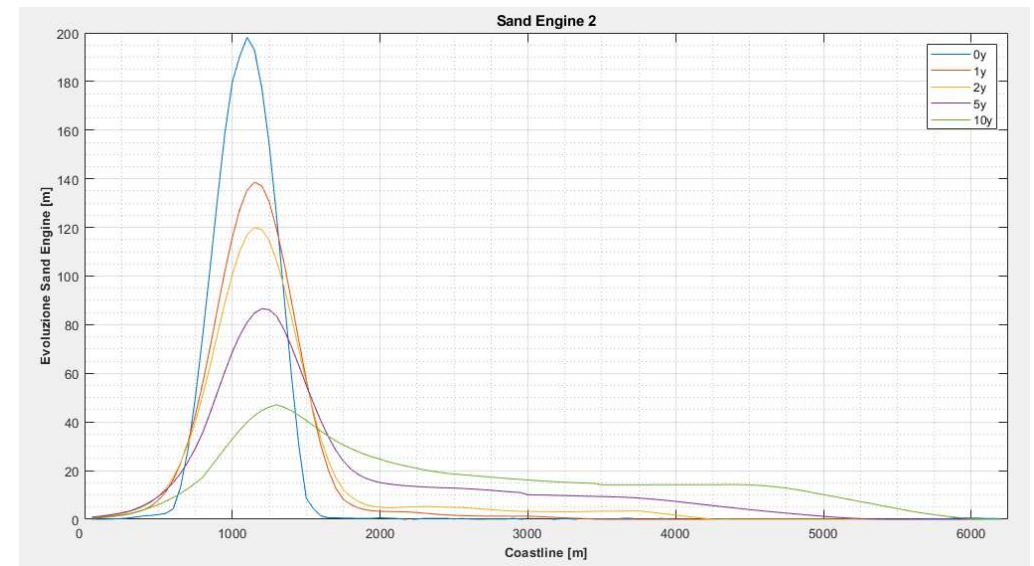
Grafico dell'evoluzione del Sand Engine



Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale – Modulo di evoluzione linea di riva (caso 200'000 m³)

Anche in questo caso mediante un'analisi combinata delle immagini e del grafico è possibile apprezzare lo smantellamento della cuspide iniziale del Sand Engine e la lunghezza del tratto di costa influenzato dal mega ripascimento. Il rateo di smantellamento è, come per il Sand Engine 1, molto elevato nei primi anni e via via diminuisce nel tempo. Nello specifico, l'estensione trasversale iniziale del ripascimento è di circa 200 m. Dopo 1 anno, si riduce a 140 m e dopo 2 anni si ulteriormente ridotta a 120 m, fino ad arrivare a 50 m dopo 10 anni. Viceversa, la lunghezza di influenza risulta piuttosto limitata nel primo anno, ma cresce nei periodi successivi. Nello specifico, dopo il primo anno, il tratto di costa a nord risulta influenzato per circa 800m mentre dopo 10 anni la lunghezza di influenza a nord è di circa 4.2Km. Il litorale di Marina di Pisa, ubicato a circa 4.5 km dal Sand Engine non risulta influenzato dal ripascimento a 10 anni dallo sversamento.

Grafico dell'evoluzione del Sand Engine



Conclusioni

Il presente studio ha illustrato in maniera estensiva una serie di attività volte a quantificare gli effetti che la realizzazione dell'infrastruttura "Darsena Europa" nel porto di Livorno determina sul litorale pisano. Tali effetti, ritenuti non trascurabili nel tratto di costa immediatamente a Nord della foce dello scolmatore, sono stati quantificati in termini di variazioni del clima ondoso locale, del regime di trasporto sedimentario e di evoluzione della linea di riva.

A compensazione di tali effetti è stata valutata l'efficacia di un ripascimento tradizionale (da 10'000 m³) e di un ripascimento non convenzionale del tipo "Sand Engine" in due configurazioni, da 100'000 m³ e 200'000 m³. Tali interventi risultano efficaci in primis a compensare i seppur minimi incrementi di arretramento determinati in tale area dalla realizzazione della Darsena Europa e nello stesso tempo a mitigare il fenomeno erosivo "naturale" già in atto nel litorale di Calambrone. L'intervento di Sand Engine si pone inoltre l'obiettivo di "nutrire" eventualmente il tratto di costa più a Nord fino al litorale di Marina di Pisa (non oggetto di studio). Attualmente, quest'area risulta altamente antropizzata e caratterizzata dalla presenza di diverse opere di difesa, volte a ridurre i gravi problemi erosivi in corso.

Le due configurazioni di Sand Engine testate hanno mostrato che, a 10 anni dallo sversamento, il ripascimento non risulta ancora smantellato del tutto. In aggiunta, sempre a 10 anni dallo sversamento, si può affermare che il litorale di Marina di Pisa, ubicato a circa 5 km dal Sand Engine non risulta essere influenzato dal ripascimento.

In questa sede si suggerisce, al fine di dare seguito alle attività modellistiche finora condotte, di valutare gli effetti a più lungo termine (oltre 10 anni) di un ripascimento non convenzionale (magari caratterizzato da volumi ancora maggiori, superiori a 200'000 m³). Questa attività richiederebbe tuttavia una riconsiderazione radicale di tutte le opere di difesa a protezione del litorale di Marina di Pisa, al fine di renderle compatibili con il Sand Engine. A tal fine sarebbe auspicabile un confronto con gli enti preposti alla pianificazione costiera mirato a condurre un'analisi completa ed approfondita, che abbracci una vasta gamma di elementi, tra cui quelli di carattere ambientale e socio-economico.