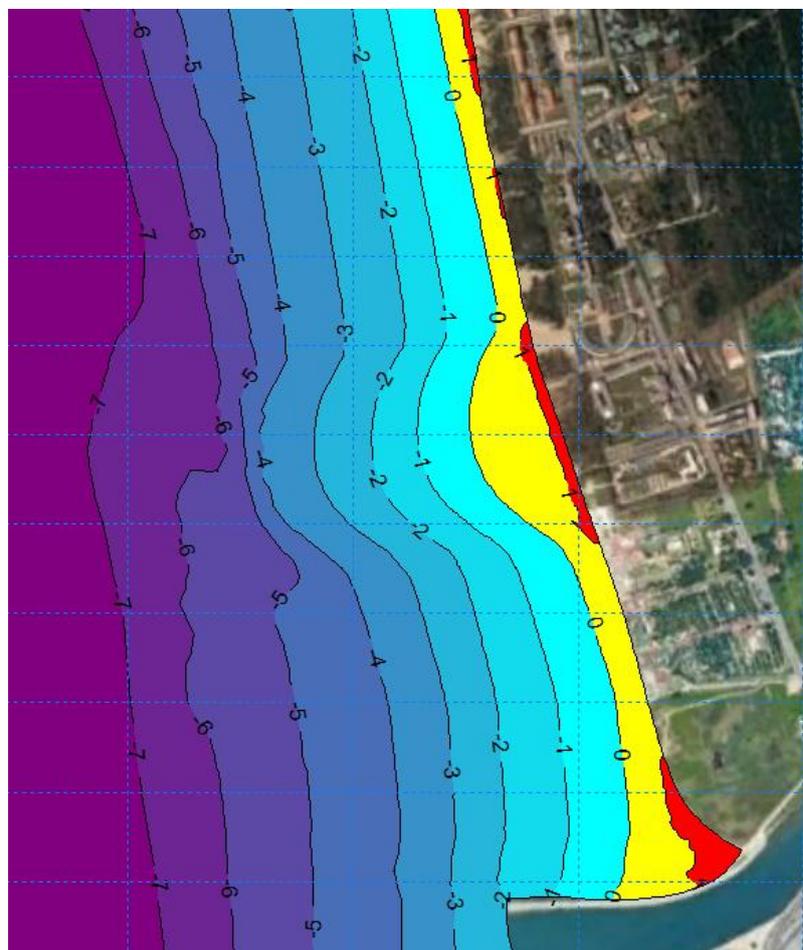


Quantificazione degli effetti dell'intervento denominato "Darsena Europa" sul litorale pisano

Studi modellistici

Relazione tecnica



This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S

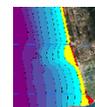


Quantificazione degli effetti dell'intervento denominato "Darsena Europa" sul litorale pisano

Analisi modellistiche volte a valutare gli effetti della
Darsena Europa sul litorale pisano ed
individuazione di possibili interventi di
compensazione

Relazione tecnica

Committente **Comune di Pisa**
Referente del Committente **dott. geol. Marco Redini**



Ripascimento non convenzionale

| | |
|--------------------|---------------------|
| Project manager | Luis Alberto Cusati |
| Quality supervisor | Andrea Pedroncini |
| Author | Luis Alberto Cusati |

| | |
|-----------------------------|-------------------|
| Codice progetto - elaborato | 22803551-01-00201 |
| Data di approvazione | 31.12.2022 |
| Revisione | 1.0 |
| Classificazione | Aperta |



INDICE

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Premessa | 1 |
| 2 | Inquadramento del sito di studio | 2 |
| 3 | Analisi studi pregressi e raccolta dati disponibili..... | 3 |
| 4 | Analisi dati meteomarini al largo | 4 |
| 4.1 | Dati di vento | 6 |
| 4.2 | Dati di moto ondoso | 8 |
| 4.3 | Dati di livello della superficie marina..... | 9 |
| 4.4 | Analisi statistica degli eventi estremi al largo | 10 |
| 4.4.1 | Altezza d'onda significativa | 10 |
| 4.4.2 | Intensità del vento | 12 |
| 4.4.3 | Livello marino | 13 |
| 5 | Propagazione del moto ondoso a costa | 15 |
| 5.1 | Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno | 15 |
| 5.2 | Scenari di simulazione | 17 |
| 5.3 | Risultati della propagazione della serie temporale quarantennale | 18 |
| 5.4 | Analisi delle differenze nel clima ondoso tra scenario attuale e progetto..... | 20 |
| 6 | Quantificazione ed analisi di base del trasporto litoraneo | 24 |
| 6.1 | Impostazione del modello LITDRIFT | 24 |
| 6.2 | Calcolo del trasporto <i>longshore</i> netto e lordo nei transetti C1 e C2 | 26 |
| 6.3 | Analisi della variabilità del trasporto netto e lordo nei 44 anni analizzati | 27 |
| 7 | Quantificazione del bilancio sedimentario tramite analisi comparativa dei rilievi storici e delle linee di riva da satellite | 30 |
| 7.1 | Analisi e processamento dei rilievi batimetrici | 30 |
| 7.2 | Analisi e processamento delle linee di riva storiche | 35 |
| 7.3 | Quantificazione del bilancio sedimentario storico..... | 39 |
| 8 | Analisi dell'evoluzione della linea di riva..... | 40 |
| 8.1 | Impostazioni del modello LITLINE | 40 |
| 8.2 | Calibrazione del modello..... | 41 |
| 8.3 | Analisi del trasporto litoraneo..... | 43 |
| 8.4 | Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione attuale | 44 |
| 8.5 | Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione di progetto | 46 |
| 9 | Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento tradizionale | 51 |
| 9.1 | Individuazione delle aree più critiche | 51 |
| 9.2 | Implementazione e simulazione di un ripascimento tradizionale..... | 53 |
| 10 | Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale | 55 |
| 10.1 | Requisiti tecnico scientifici del modello finalizzato a simulare le dinamiche di Sand Engine | 55 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 10.2 | Descrizione del MIKE21 Shoreline Morphology | 57 |
| 10.3 | Applicabilità del MIKE 21 Shoreline Morphology Model nel simulare le dinamiche di trasporto in corrispondenza di un intervento di Sand Engine | 59 |
| 10.4 | Implementazione e simulazione del sand engine sul litorale pisano | 64 |
| 10.4.1 | Descrizione dell'intervento | 64 |
| 10.4.2 | Estensione del modello e batimetria | 65 |
| 10.4.3 | Condizioni al contorno | 66 |
| 10.4.4 | Input al MIKE 21 Shoreline Morphology Module | 66 |
| 10.4.5 | Risultati delle simulazioni | 68 |
| 11 | Sintesi dello studio e conclusioni | 78 |
| 11.1 | Propagazione del moto ondoso ed analisi dei risultati a costa | 78 |
| 11.2 | Quantificazione ed analisi del trasporto litoraneo | 79 |
| 11.3 | Analisi ed Evoluzione della linea di riva | 80 |
| 11.4 | Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento tradizionale | 81 |
| 11.5 | Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento non convenzionale | 82 |

ALLEGATI

ALLEGATO A – MWM

Descrizione Tecnica

ALLEGATO B

MIKE 21

Descrizione Tecnica

ALLEGATO C

Littoral Process

Descrizione Tecnica

1 Premessa

Al fine di quantificare gli effetti che la realizzazione delle opere previste dal progetto dell'infrastruttura "Darsena Europa" nel porto di Livorno potrebbe determinare sul litorale pisano, il Comune di Pisa ha commissionato a DHI una serie attività modellistiche.

Tali studi, hanno previsto l'applicazione di modelli numerici di ultima generazione ad elevata risoluzione spaziale, con l'ausilio dei quali sono state simulate e comprese le dinamiche di stato attuale e quantificate le variazioni attese al moto ondoso e al trasporto sedimentario lungo la costa pisana nella configurazione di Progetto Definitivo della Darsena Europa.

Le attività di studio hanno inoltre previsto l'individuazione degli interventi di prevenzione e/o compensazione più adeguati a livello concettuale, nonché la quantificazione della loro efficacia attraverso modellazione numerica, evidenziando i vantaggi e le eventuali criticità in modo da indirizzare compiutamente la progettazione preliminare degli interventi stessi. Tali interventi riguardano anche l'implementazione di un ripascimento non convenzionale ("Sand Engine") per il litorale oggetto di studio. L'utilizzo delle tecniche di Sand Engineering, già applicate in contesti non italiani, rappresenta un modo innovativo di effettuare ripascimenti. 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.

Per la finalità dello studio sono utilizzati differenti codici di calcolo appartenenti alla famiglia MIKE Powered by DHI, in particolare:

- MIKE 21 SW (Spectral Waves), modello d'onda bidimensionale;
- MIKE Litpack (Littoral Processes), sistema integrato di modelli per la simulazione del trasporto litoraneo di sedimenti;
- MIKE21 SM (Shoreline Morphology), sistema integrato per la simulazione bidimensionale di onda, correnti, trasporto ed evoluzione della linea di riva.

2 Inquadramento del sito di studio

Il paraggio costiero del sito oggetto di studio si sviluppa per circa 20 km ed è compreso tra la foce del fiume Morto (a Nord) ed il porto di Livorno (a Sud). Il paraggio, procedendo da Nord verso Sud, risulta caratterizzato da:

- litorale sabbioso con presenza di opere di difesa costiera (prevalentemente trasversali) nel tratto compreso tra la foce del fiume Morto e Bocca d'Arno;
- litorale sabbioso con presenza di opere di difesa costiera (scogliere emerse e pennelli) nel tratto antistante Marina di Pisa;
- litorale sabbioso libero nel tratto compreso tra Marina di Pisa e lo Scolmatore;
- zona portuale con presenza di scogliere radenti e dighe foranee nel tratto compreso tra lo Scolmatore ed il porto di Livorno.

Principale caratteristica di questa area è l'influenza che le Secche della Meloria esercita sul moto ondoso e – di conseguenza - sul flusso sedimentario litoraneo. Per tale ragione, nelle attività modellistiche condotte, è stata rivolta particolare attenzione alla caratterizzazione modellistica di tale area.

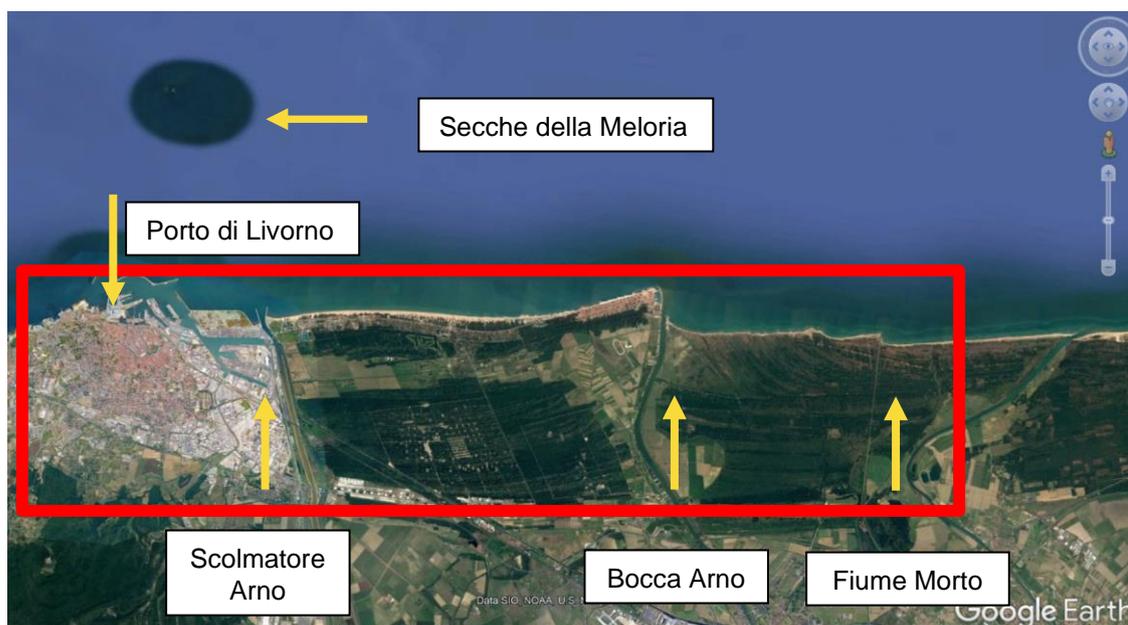


Figura 2-1 Inquadramento del litorale oggetto di studio (riquadro rosso)

3 **Analisi studi pregressi e raccolta dati disponibili**

Nell'ambito della realizzazione del progetto preliminare e definitivo della Darsena Europa sono stati condotti diversi studi idraulico-marittimi ed effettuate specifiche indagini topo batimetriche e sedimentologiche. L'attività di analisi di tutto il materiale messo a disposizione dalla committenza è fondamentale per inquadrare le problematiche di studio e per il raggiungimento degli obiettivi del presente studio.

Per quanto riguarda gli studi pregressi analizzati risulta utile citare i seguenti elaborati:

- Studio Idraulico Marittimo volto a caratterizzare il clima ondoso ordinario ed estremo del paraggio antistante il litorale di Marina di Pisa.
- Studio morfologico di base volto ad investigare le dinamiche evolutive del litorale oggetto di studio mediante un'analisi della cartografia storica.
- Studio della dinamica litoranea volto a caratterizzare il regime di trasporto solido sia fluviale che costiero mediante opportuna modellistica numerica.
- Studio della risospensione dei sedimenti relativo all'analisi di dispersione dei sedimenti rilasciati durante le operazioni di dragaggio mediante la realizzazione di un modello tridimensionale.

Risultano inoltre disponibili una serie di campagne topo-batimetriche messe a disposizione del comune di Pisa in formato digitale. Nello specifico:

- Rilievi batimetrici effettuati dal Comune di Pisa negli anni 2010-2019 relativi al tratto di mare antistante il litorale delimitato a sud dallo scolmatore dell'Arno ed a nord dal Fiume Serchio ed estesi indicativamente fino alla batimetrica -10m.
- Rilievo batimetrico dell'area delle Secche della Meloria del 2013 realizzato dalla Provincia di Pisa.
- Rilievo multibeam realizzato nell'ambito della realizzazione del PRP da Geopolaris srl nell'area del Porto di Livorno nel 2011.
- Rilievo di dettaglio della foce dello Scolmatore effettuato nel 2018 dalla Provincia di Pisa.

Per quanto riguarda le analisi sedimentologiche risulta disponibile una campagna di indagini effettuate dalla ditta Nuova Idrocart srl nel 2005 ed analizzati dal laboratorio Ilag srl.

4 Analisi dati meteomarini al largo

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al vento e al moto ondoso.

Per quanto riguarda la disponibilità di registrazioni di moto ondoso, la principale fonte di riferimento nel nostro paese è la Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati di boa possono essere utilizzati come riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica. Frequentemente, tuttavia, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10) oppure ancora perché per il paraggio in esame la boa o l'anemometro non sono disponibili o non sono sufficientemente rappresentativi.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "*wind/wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di intensità e direzione del vento, altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato.

Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [1] [2], prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI [3]).

In Figura 4-1 e Figura 4-2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso e un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

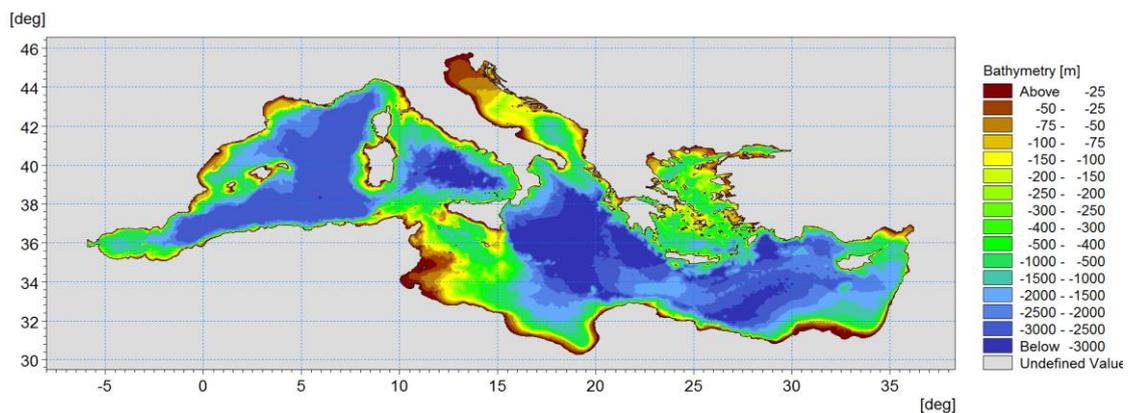


Figura 4-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

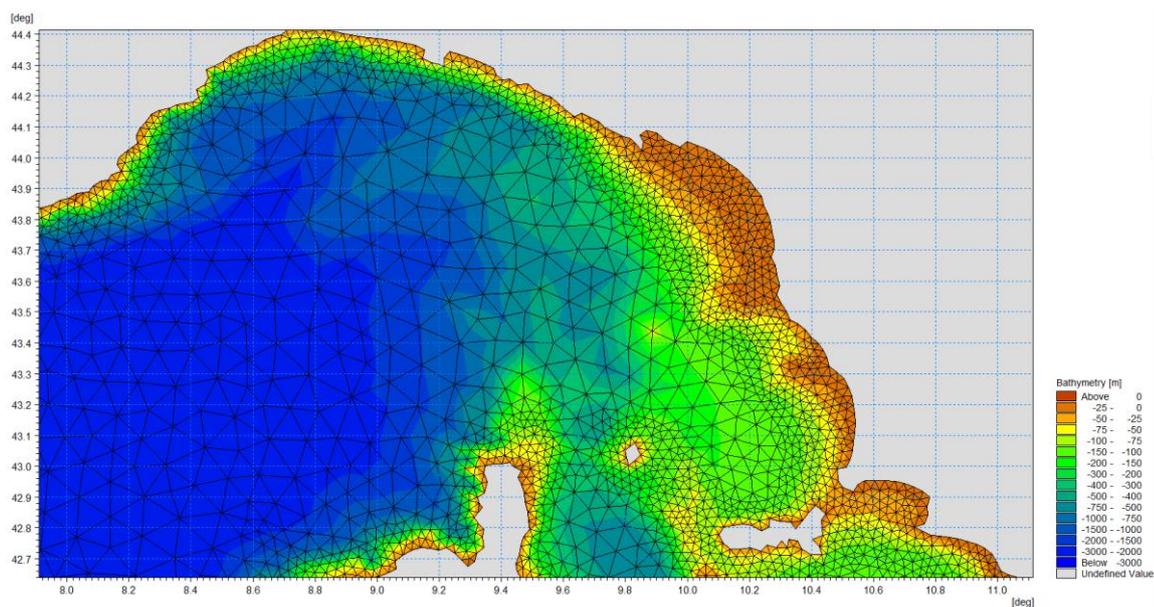


Figura 4-2 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM – dettaglio sul Mar Ligure

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto in Allegato A al presente documento.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo del litorale pisano, è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto di estrazione deve essere ben rappresentativo dell’esposizione del sito a vento e onda;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 3 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l’interazione dell’onda con il fondale, che verrà pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito. In questo aspetto particolare attenzione è stata rivolta alle secche della Meloria.
- la localizzazione del punto non dovrà essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo eccessivamente onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto, a circa 15 km dal sito in esame, per l’estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda a partire dal 1979. A seguire si riportano l’ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato.

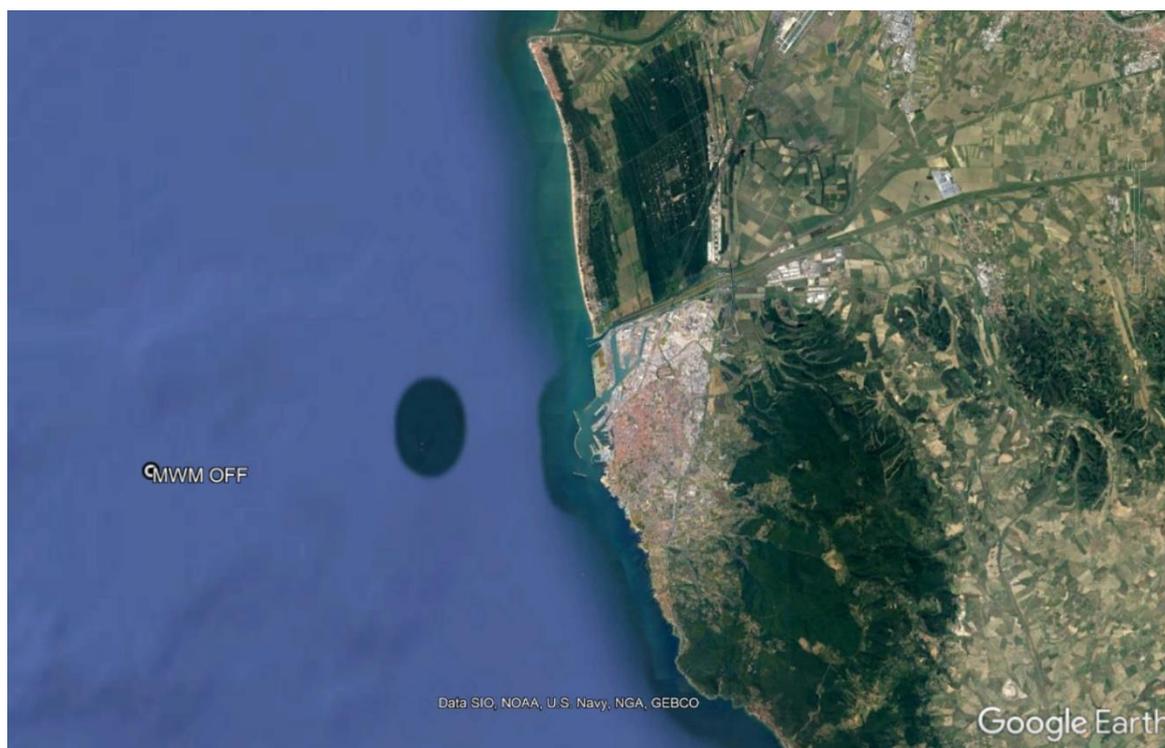


Figura 4-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N) i cui dati sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Tabella 4-1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

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

4.1 Dati di vento

A seguire (Figura 4-4 e Figura 4-5) si riportano la serie delle velocità del vento per il punto MWM e la relativa rappresentazione in forma di rosa. In Tabella 4-2 è invece illustrato il numero di osservazioni per classi di velocità e direzione di provenienza del vento.

Come si può osservare, nel periodo dei 43 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 26.6 m/s circa. Dall'analisi della rosa del vento si evince che i settori caratterizzati dalla maggiore frequenza sono quelli provenienti da Est, nello specifico le direzioni comprese tra 75°N e 105°N. In termini di intensità, gli eventi caratterizzati dalle velocità maggiori (superiori a 20 m/s) sono associati prevalentemente alle direzioni di provenienza da Ovest (225°N-315°N) e da Est (75°N-105°N).

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2.5 m/s, si verifica per circa il 20% del tempo.

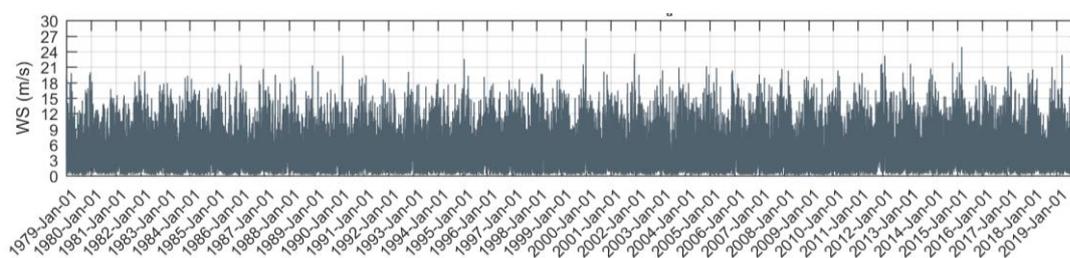


Figura 4-4 Ricostruzione storica di velocità del vento (Ws) per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N)

Tabella 4-2 Numero di dati per classi di intensità del vento (Ws, colonne) e direzione media di provenienza (Wd, righe) per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N)

| | [0-2.5] | [2.5-5] | [5-7.5] | [7.5-10] | [10-12.5] | [12.5-15] | [15-17.5] | [17.5-20] | [20-22.5] | [22.5-25] | [25-27.5] | [27.5-30] | Total | Accum |
|-----------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| [315-345] | 5509 | 9960 | 4512 | 1206 | 704 | 253 | 85 | 20 | - | - | - | - | 22249 | 359400 |
| [285-315] | 6065 | 9678 | 3419 | 943 | 445 | 196 | 79 | 12 | 1 | - | - | - | 20838 | 337151 |
| [255-285] | 5903 | 8441 | 4184 | 2500 | 1240 | 703 | 358 | 145 | 25 | 10 | 1 | - | 23510 | 316313 |
| [225-255] | 5677 | 7394 | 5995 | 5707 | 3999 | 1691 | 502 | 103 | 22 | 3 | - | - | 31093 | 292803 |
| [195-225] | 5623 | 5491 | 2832 | 1570 | 686 | 202 | 32 | 6 | 1 | - | - | - | 16443 | 261710 |
| [165-195] | 5435 | 7572 | 4451 | 2045 | 883 | 321 | 104 | 17 | 3 | - | - | - | 20831 | 245267 |
| [135-165] | 5714 | 8722 | 6338 | 3104 | 1070 | 334 | 73 | 9 | - | - | - | - | 25364 | 224436 |
| [105-135] | 7111 | 13369 | 5876 | 1654 | 319 | 24 | 5 | - | - | - | - | - | 28358 | 199072 |
| [75-105] | 8644 | 31398 | 30217 | 16607 | 5414 | 1252 | 201 | 15 | - | - | - | - | 93748 | 170714 |
| [45-75] | 6894 | 14178 | 11379 | 7390 | 4655 | 2136 | 699 | 166 | 35 | 11 | - | - | 47543 | 76966 |
| [15-45] | 5012 | 5812 | 1927 | 715 | 235 | 59 | 25 | 4 | - | - | - | - | 13789 | 29423 |
| [-15-15] | 4922 | 6474 | 2690 | 962 | 405 | 127 | 44 | 8 | 2 | - | - | - | 15634 | 15634 |
| Total | 72509 | 128489 | 83820 | 44403 | 20055 | 7298 | 2207 | 505 | 89 | 24 | 1 | - | 359400 | - |
| Accum | 72509 | 200998 | 284818 | 329221 | 349276 | 356574 | 358781 | 359286 | 359375 | 359399 | 359400 | 359400 | - | - |

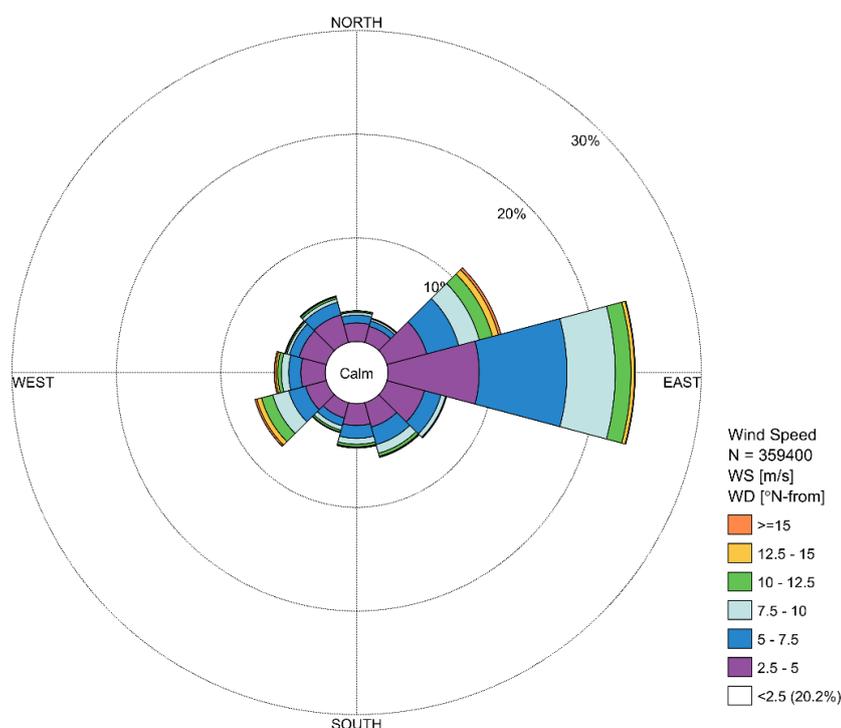


Figura 4-5 Rosa del vento per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N). La calma, qui associata ad intensità inferiori a 2.5 m/s, si verifica per il 20.2% del tempo, ovvero per poco meno di 2 mesi all'anno in media

4.2 Dati di moto ondoso

Dalla serie storica di altezza d'onda significativa al largo estratta dal database MWM emerge che nel periodo considerato 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 (Figura 4-7) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 4-3) 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).

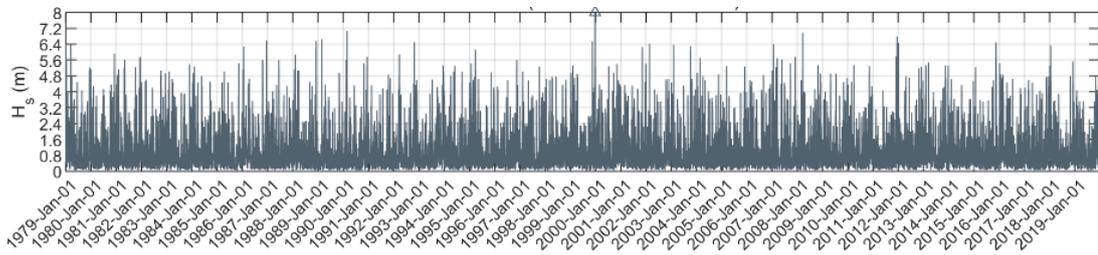


Figura 4-6 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N)

Tabella 4-3 Numero di dati per classi di altezza d'onda significativa (colonne) in funzione della direzione media di provenienza (righe) per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N)

| | [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 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| [315-345[| 4780 | 1502 | 371 | 75 | 12 | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 6743 | 359400 |
| [285-315[| 13903 | 3917 | 1058 | 516 | 247 | 117 | 35 | 8 | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | 19804 | 352657 |
| [255-285[| 22447 | 13700 | 5275 | 2465 | 1053 | 762 | 426 | 387 | 274 | 197 | 113 | 47 | 36 | 6 | 5 | 2 | 3 | 47209 | 332853 |
| [225-255[| 41523 | 41200 | 26252 | 15693 | 7927 | 5722 | 2534 | 2198 | 1134 | 539 | 264 | 112 | 58 | 15 | - | - | - | 145171 | 285644 |
| [195-225[| 14802 | 7833 | 3594 | 1291 | 618 | 338 | 123 | 91 | 48 | 17 | 9 | - | - | - | - | - | - | 28764 | 140473 |
| [165-195[| 19924 | 14484 | 5556 | 2451 | 752 | 355 | 96 | 29 | 8 | 6 | - | - | - | - | - | - | - | 43661 | 111709 |
| [135-165[| 4464 | 3845 | 1251 | 149 | 9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 9718 | 68048 |
| [105-135[| 6696 | 4950 | 771 | 53 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 12471 | 58330 |
| [75-105[| 10581 | 15698 | 2269 | 75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 28623 | 45859 |
| [45-75[| 3525 | 5280 | 1877 | 219 | 13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 10914 | 17236 |
| [15-45[| 1665 | 1318 | 472 | 69 | 13 | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 3540 | 6322 |
| [-15-15[| 1748 | 833 | 160 | 40 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2782 | 2782 |
| 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 | - | - |

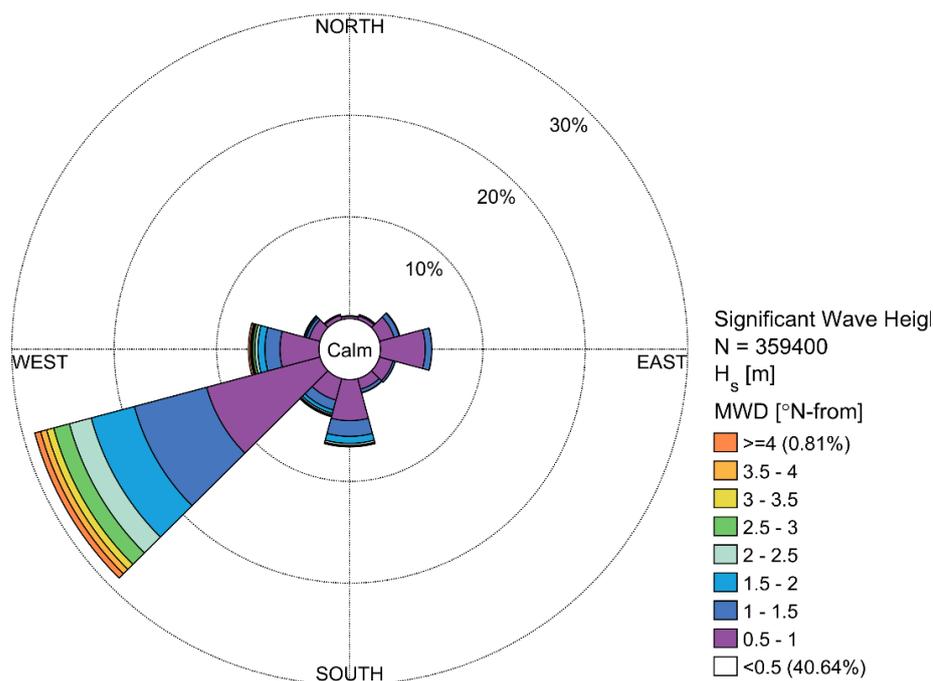


Figura 4-7 Rosa del moto ondoso al largo per il punto MWM OFF (Lon 10.099°E, Lat 43.541°N)

4.3 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione dell'opera si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Livorno [4], il più vicino al sito e con maggior disponibilità di dati recenti (monografia in Figura 4-8). In particolare, si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nel periodo 1.1.2010 – 31.12.2019.

| | | | |
|--|---|--|---|
| ISPRA <small>Istituto Nazionale per lo Studio e la Cura degli Ambienti Acquatici</small> | Rete idrografica e mareografica nazionale LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE | Rilievi anno 2009 - 2010 | Stazione mareografica di Livorno |
| | ORIGINE IGM Csv: 0028_D02_003P Punto GPS: I11601 | Annotazioni: il csv mareografico ISPRA è stato misurato utilizzando la stadietta invar da 60 cm. con staffetta di sospensione (vedi foto laterale) | |
| CSO MAREOGRAFICO Coordinate piane UTM - ETRF 2000 N: 4822300.609 E: 604989.189 Quota s.l.m.: m. 1.6926 quota italego 2005: m.1.510 Bullone in acciaio inox murato sulla banchina lato destro della cabina | | | |
| CSV MAREOGRAFICO Quota s.l.m.: m. 3.6925 Piastra mensolata murata sulla parete a sinistra della porta di accesso alla cabina mareografica | | | |
| CSO RIFERIMENTO STAFFA MAREOGRAFICA Quota s.l.m. 2009: m. 2.1843 Bullone in acciaio inox murato davanti al boccaforno del pozzo di calma allineato con la staffa mareografica | | | |
| STAFFA MAREOGRAFICA Quota s.l.m. 1999: m. 2.1350 Quota s.l.m. 2009: m. 2.1623 Differenza di quota Δ = 0,02730 Staffa in acciaio zincato aggettante sul pozzo di calma | | | |

Figura 4-8 Monografia della stazione mareografica di Livorno

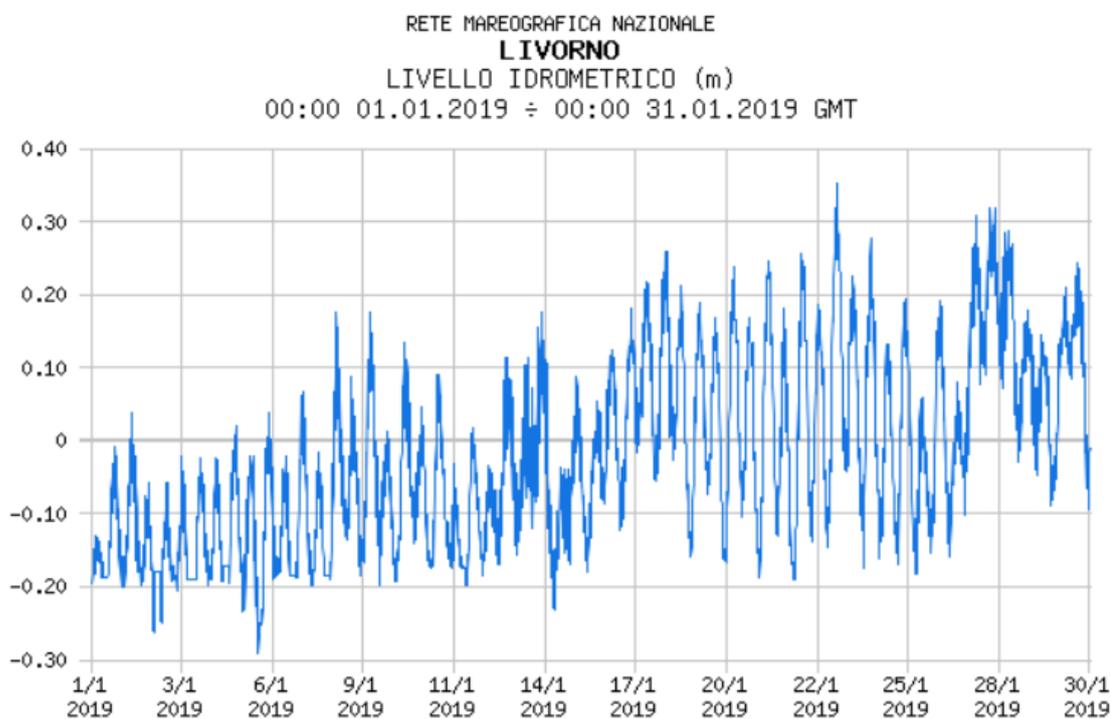


Figura 4-9 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Genova (dettaglio del mese di Gennaio 2019)

4.4 Analisi statistica degli eventi estremi al largo

Sulla base delle serie di dati disponibili al largo di Marina di Pisa si è proceduto con un'analisi statistica finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno. L'analisi statistica è stata svolta sia per la serie di altezza d'onda significativa, che per i dati di vento e di livello idrometrico.

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting e i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata.

Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

4.4.1 Altezza d'onda significativa

Per quanto riguarda l'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- individuazione, a partire dalla serie temporale di dati orari in corrispondenza del punto MWM estratto al largo, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 36 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);

Tabella 4-4 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa H_s (analisi omnidirezionale)

| Tempo di ritorno [anni] | H_s omnidirezionale [m] |
|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 5.61 |
| 2 | 5.98 |
| 5 | 6.54 |
| 10 | 6.93 |
| 25 | 7.42 |
| 50 | 7.79 |
| 100 | 8.15 |

4.4.2 Intensità del vento

Anche per i valori di intensità del vento l'analisi statistica si basa sull'intera serie temporale dei dati estratti nel punto al largo (database MWM). Per l'analisi è stato estratto un numero sufficientemente significativo di eventi statisticamente indipendenti (61), caratterizzati dai valori più elevati di intensità del vento.

Nella tabella a seguire sono stati riportati i risultati tabellari e grafici dell'analisi statistica della velocità di vento.

Tabella 4-5 Valori di intensità del vento WS [m/s] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

| Tempo di ritorno [anni] | WS omnidirezionale [m/s] |
|----------------------------|--------------------------|
| 1 | 19.69 |
| 5 | 22.07 |
| 10 | 23.15 |
| 25 | 24.6 |
| 50 | 25.73 |
| 100 | 26.86 |

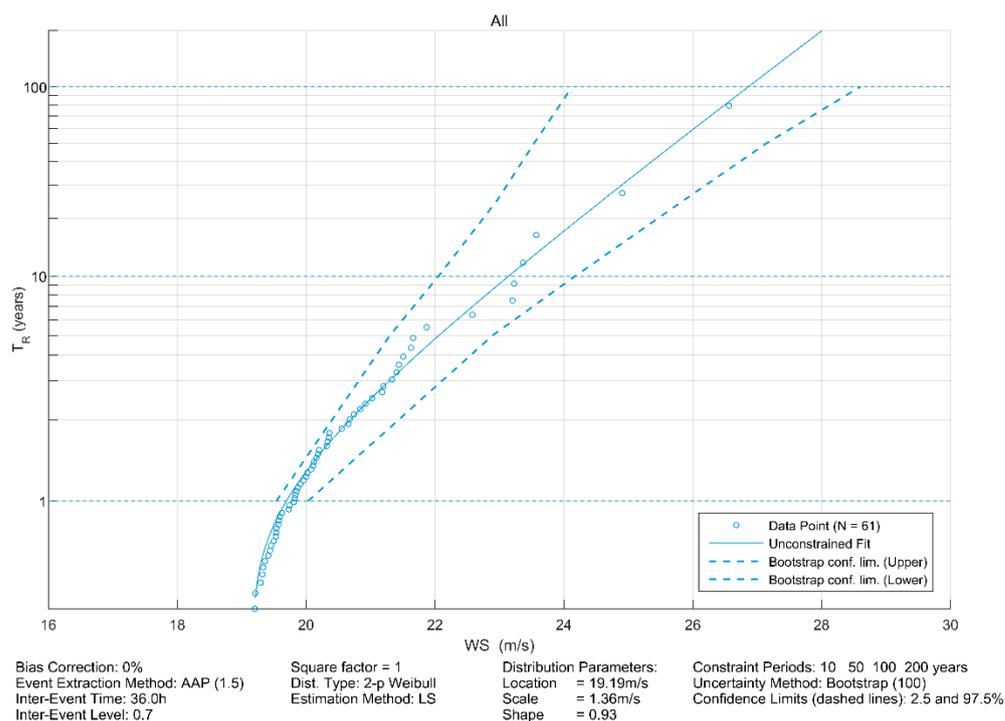


Figura 4-11 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento degli ultimi 43 anni estratte nel punto MWM al largo di Marina di Pisa

4.4.3 Livello marino

L'analisi dei dati del mareografo è basata su oltre 20 anni di osservazioni (1998-2019) a passo irregolare, portato a 30 minuti per omogeneità.

Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

La procedura adottata per l'analisi statistica dei livelli del mareografo è del tutto analoga a quella illustrata in precedenza per le altezze d'onda. Anche in questo caso per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri.

Il numero complessivo di eventi presi in considerazione è pari a 58 (3 all'anno in media). Il criterio di indipendenza adottato (in termini di intervallo minimo tra due eventi) è pari a 24 ore.

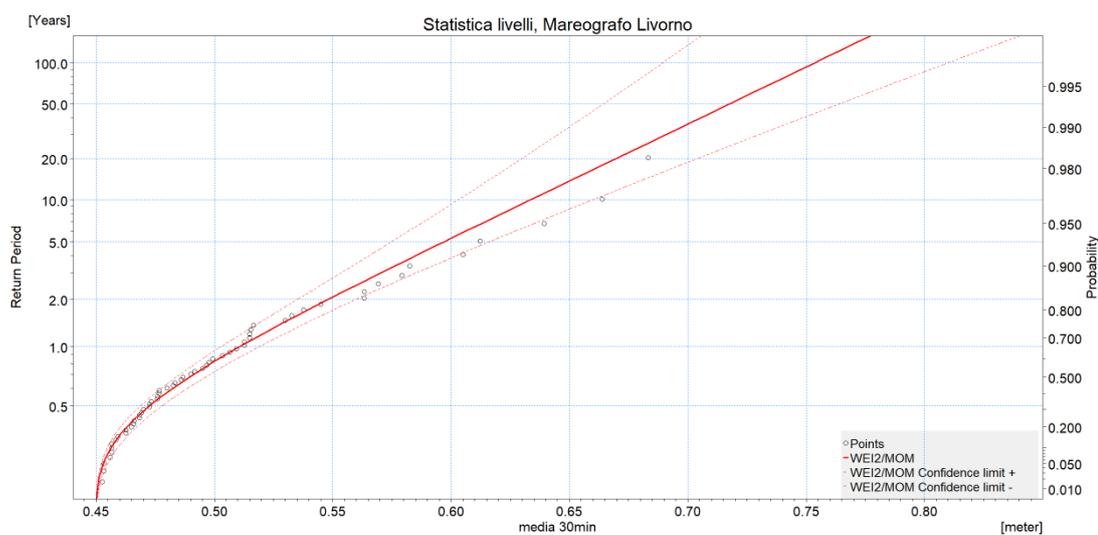


Figura 4-12 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Livorno (1998-2019)

Tabella 4-6 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

| Livello marino | TR 5 anni | TR 25 anni | TR 50 anni | TR 100 anni |
|--------------------|-----------|------------|------------|-------------|
| | WL [m] | WL [m] | WL [m] | WL [m] |
| Mareografo Livorno | 0.60 | 0.68 | 0.72 | 0.75 |

5 Propagazione del moto ondoso a costa

Al fine di propagare l'intera serie di 43 anni (dal 1979 al 2021) di moto ondoso da largo (punto di estrazione MWM) sino al litorale di Marina di Pisa è stato utilizzato il modulo SW (Spectral Waves) di MIKE 21, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

Tale modello, a maglia triangolare "flessibile", permette di utilizzare una risoluzione spaziale variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto "*white capping*";
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e *shoaling* dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;
- riflessione.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato B al presente elaborato.

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, *white-capping*, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun istante temporale di calcolo (time step), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*.

5.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3, è 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 30 km e un'estensione verso il largo di circa 20 km. La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

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 [5], ed ai rilievi batimetrici disponibili.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

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 (Figura 5-1).

I principali parametri d'onda estratti dal database MWM (paragrafo 4.2), relativamente all'intera serie disponibile, sono stati utilizzati come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto).

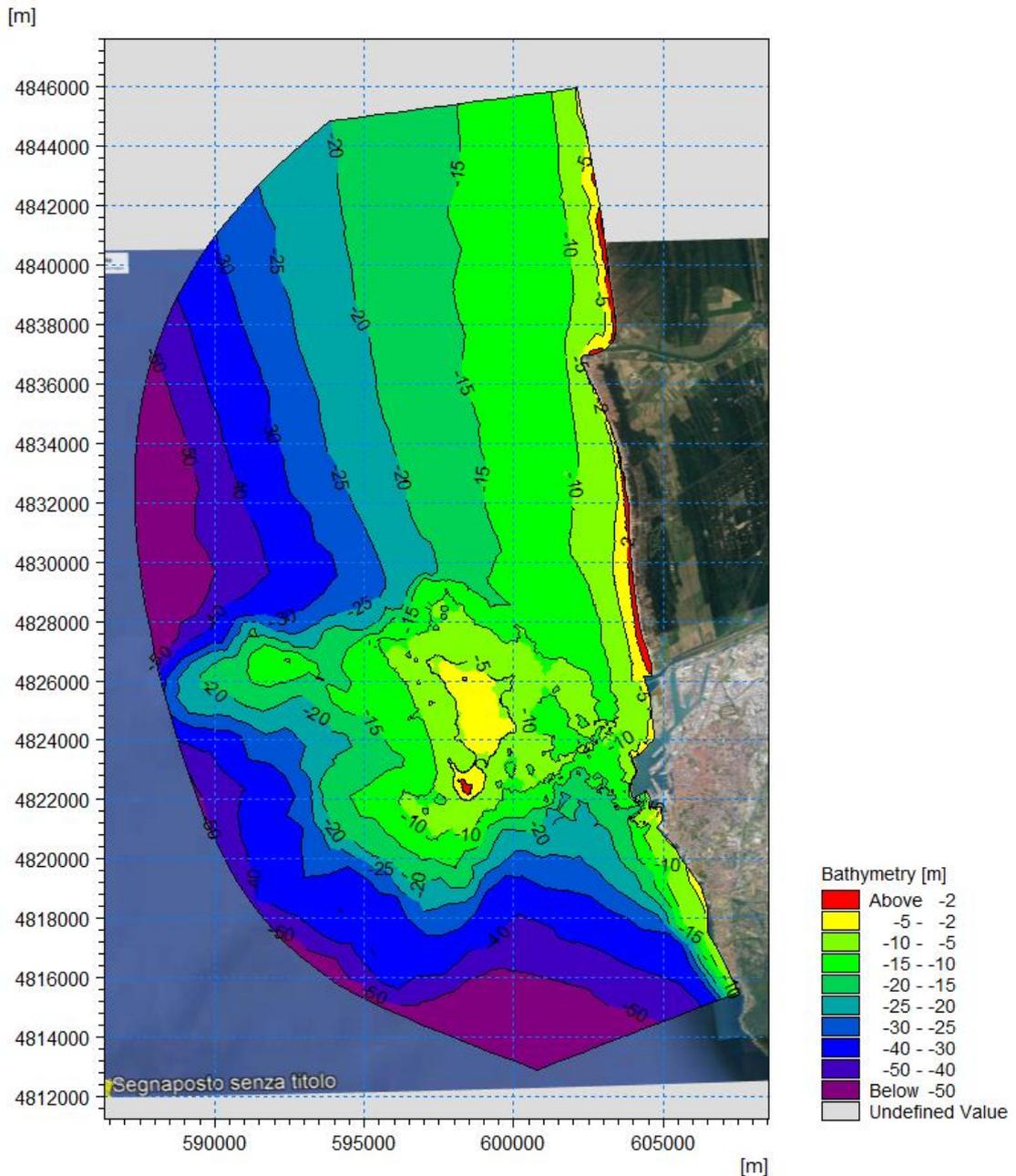


Figura 5-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

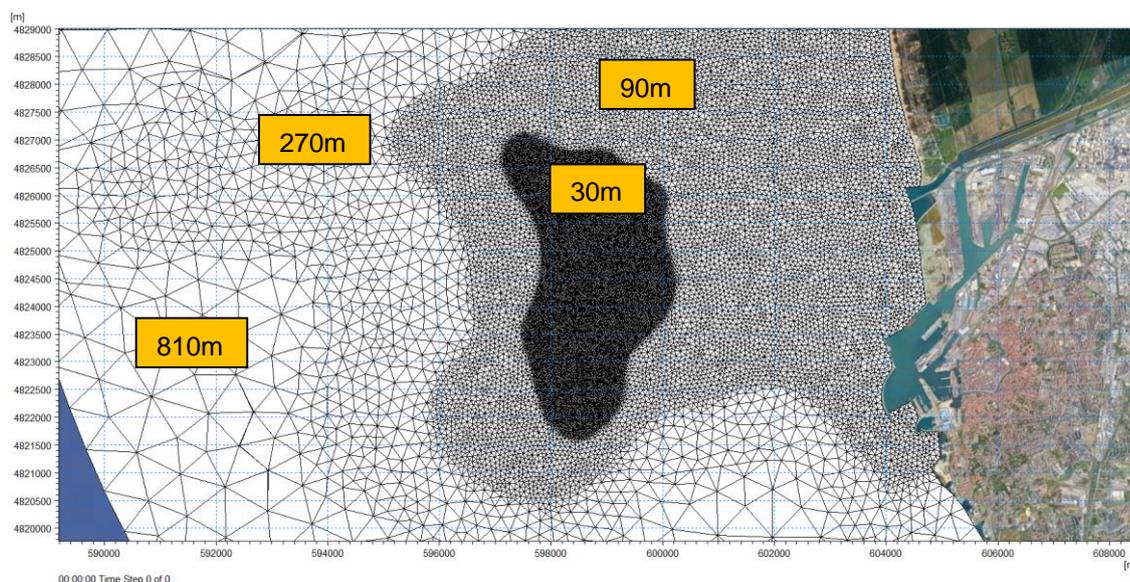


Figura 5-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso

5.2 Scenari di simulazione

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. In Figura 5-3 sono riportati i due layout utilizzati per le simulazioni. Per quanto riguarda il layout di 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.

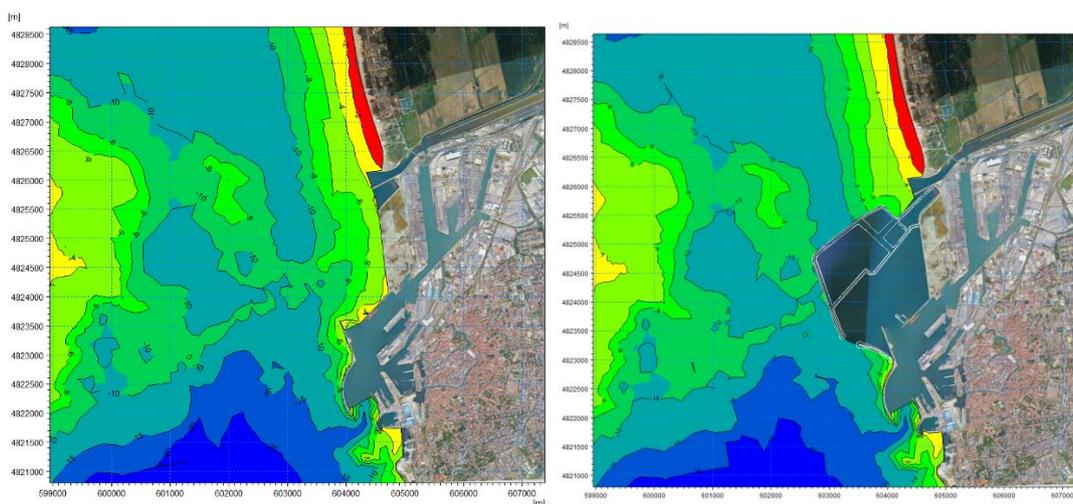


Figura 5-3 Layout attuale (a sinistra) e layout di progetto (a destra)

5.3 Risultati della propagazione della serie temporale quarantennale

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo per i due scenari di simulazione (attuale e progetto), rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sottocosta. In Figura 5-4 e Figura 5-5 sono riportati i campi d'onda relativi a due stati di mare rappresentativi, in particolare, di un'onda proveniente da Ovest e una da Sud Ovest. In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione da largo verso costa. In particolare, la scala cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante che le secche della Meloria esercitano sul litorale oggetto di studio.

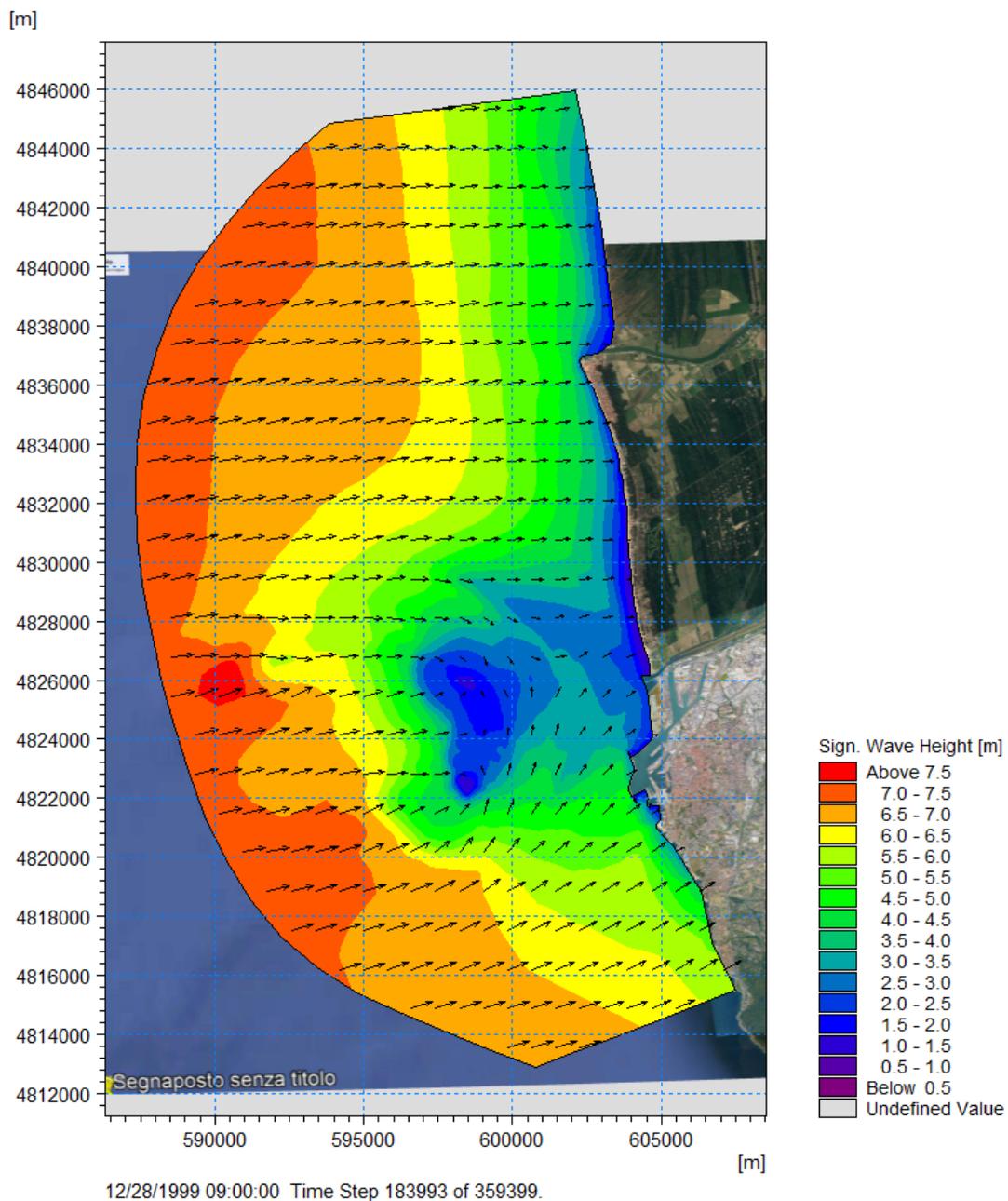


Figura 5-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Ovest (dati del 28 Dicembre 1999 ore 09)

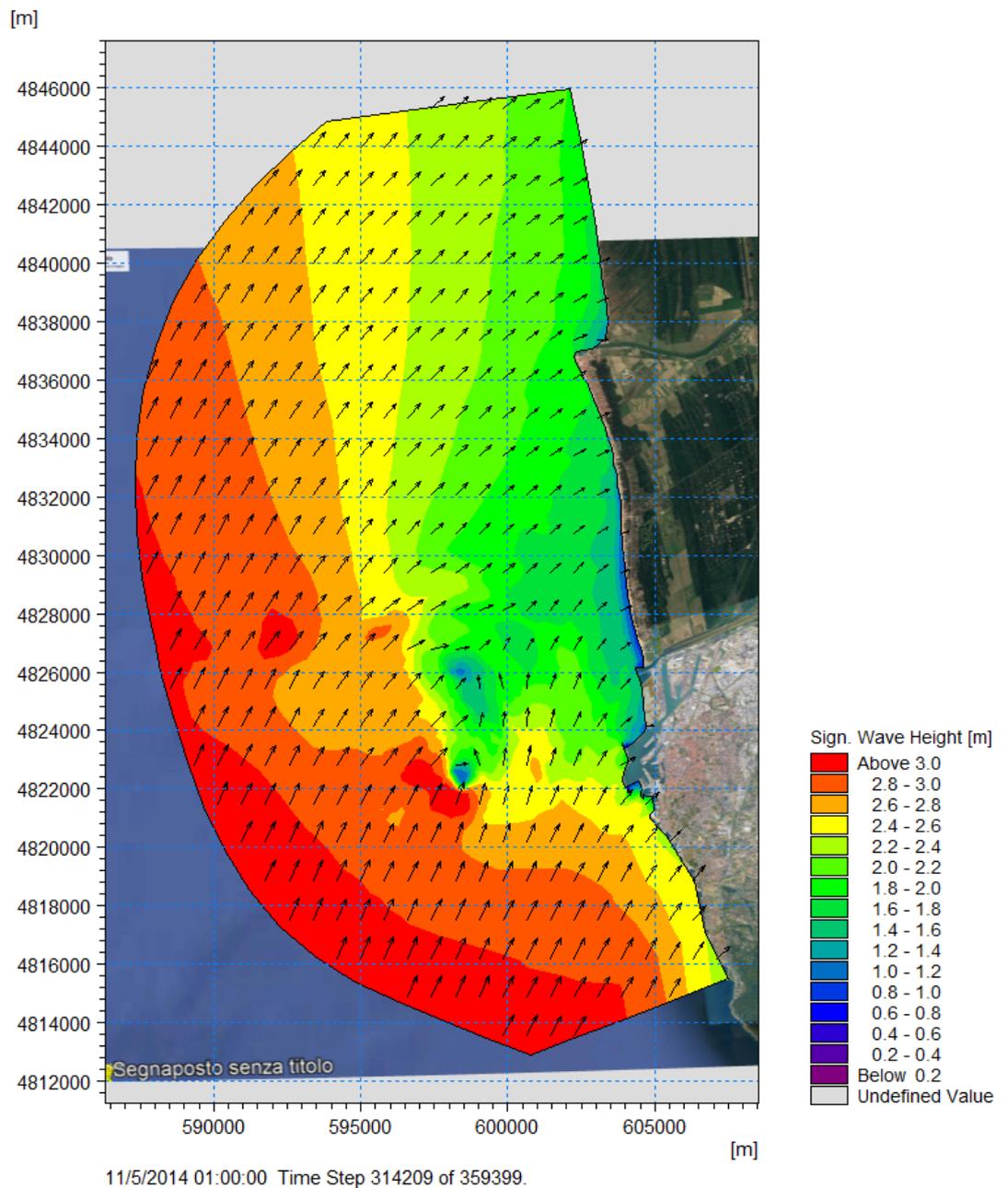


Figura 5-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per un'onda da Sud-Ovest (dati del 5 Novembre 2011 ore 01)

5.4 Analisi delle differenze nel clima ondoso tra scenario attuale e progetto

Al fine di valutare l'impatto della realizzazione della darsena Europa sul litorale immediatamente a Nord si è proceduto con la caratterizzazione del clima ondoso "nearshore" in diversi punti ubicati intorno alla batimetria -6m ed in riferimento sia allo scenario attuale che a quello di progetto. Nello specifico sono stati individuati 7 punti (C1-C7) identificati in Figura 5-6.

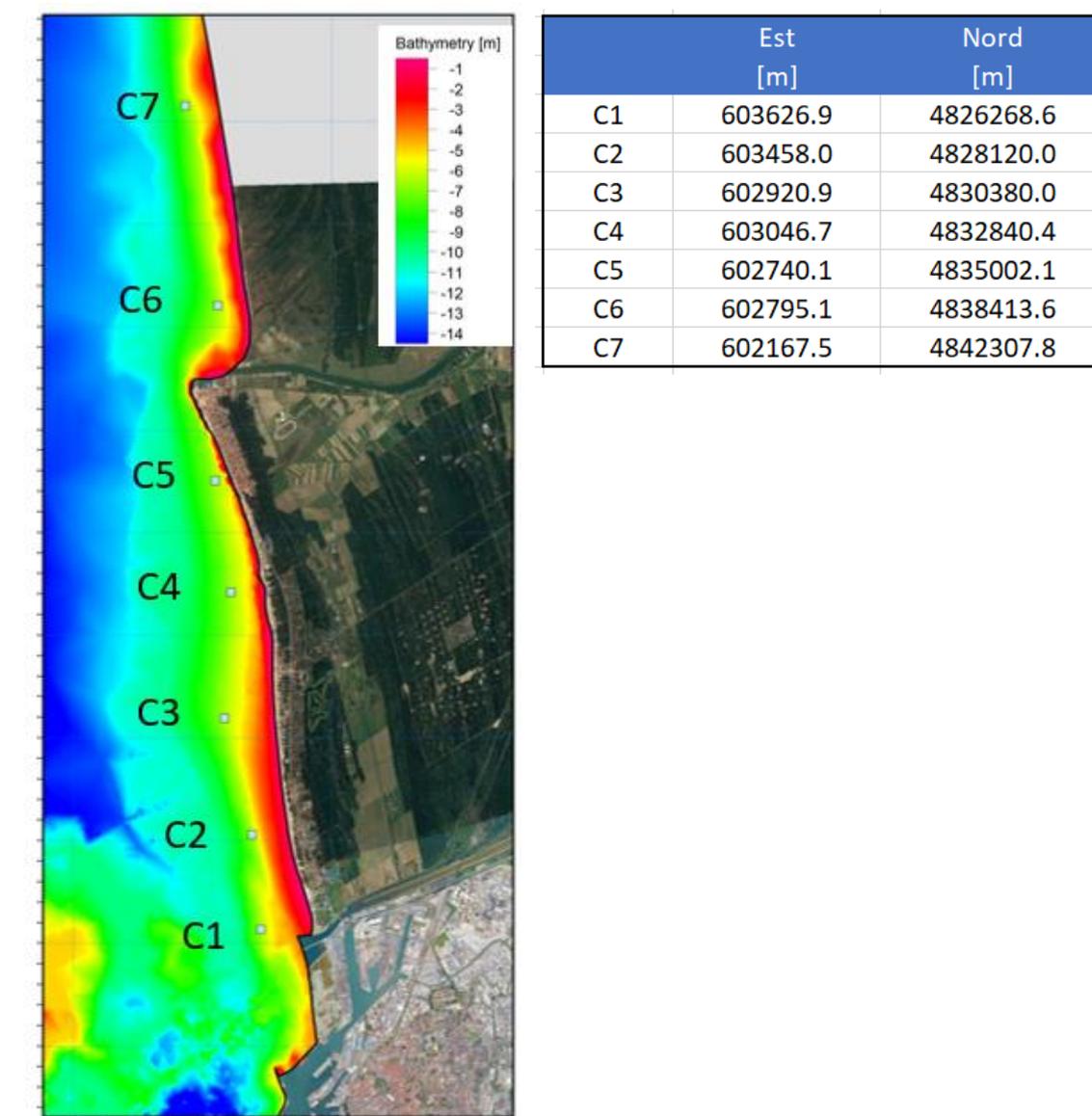


Figura 5-6 Ubicazione e coordinate (UTM32) dei 7 punti sottocosta utilizzati per l'analisi del clima nearshore

A seguire in Figura 5-7 e Figura 5-8 si riportano le rose del clima ondoso nei 7 punti C1-C7 in riferimento ai due scenari (attuale e progetto).

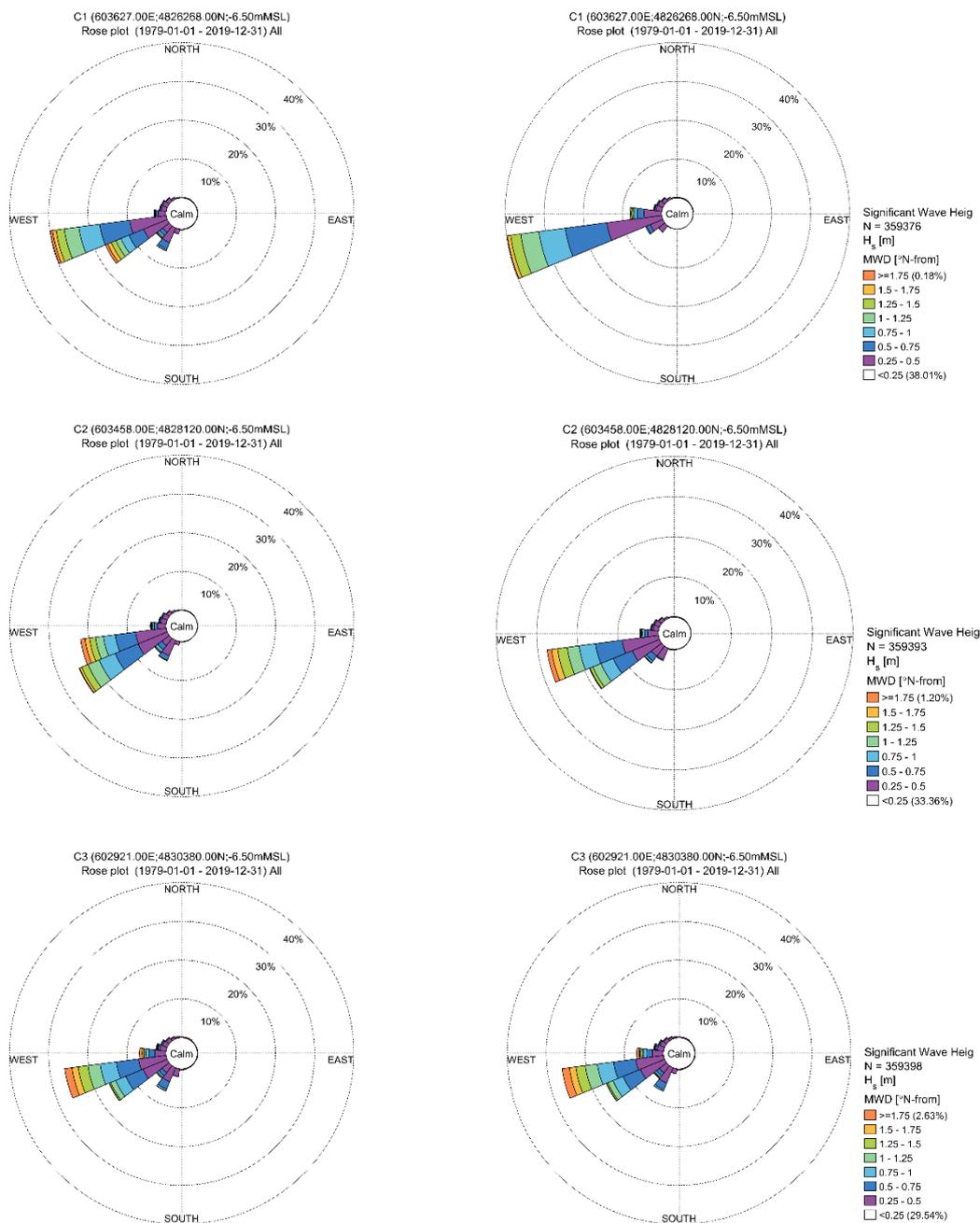


Figura 5-7 Rose del clima ondoso nello scenario attuale (a sinistra) e progetto (a destra) per i punti C1-C3

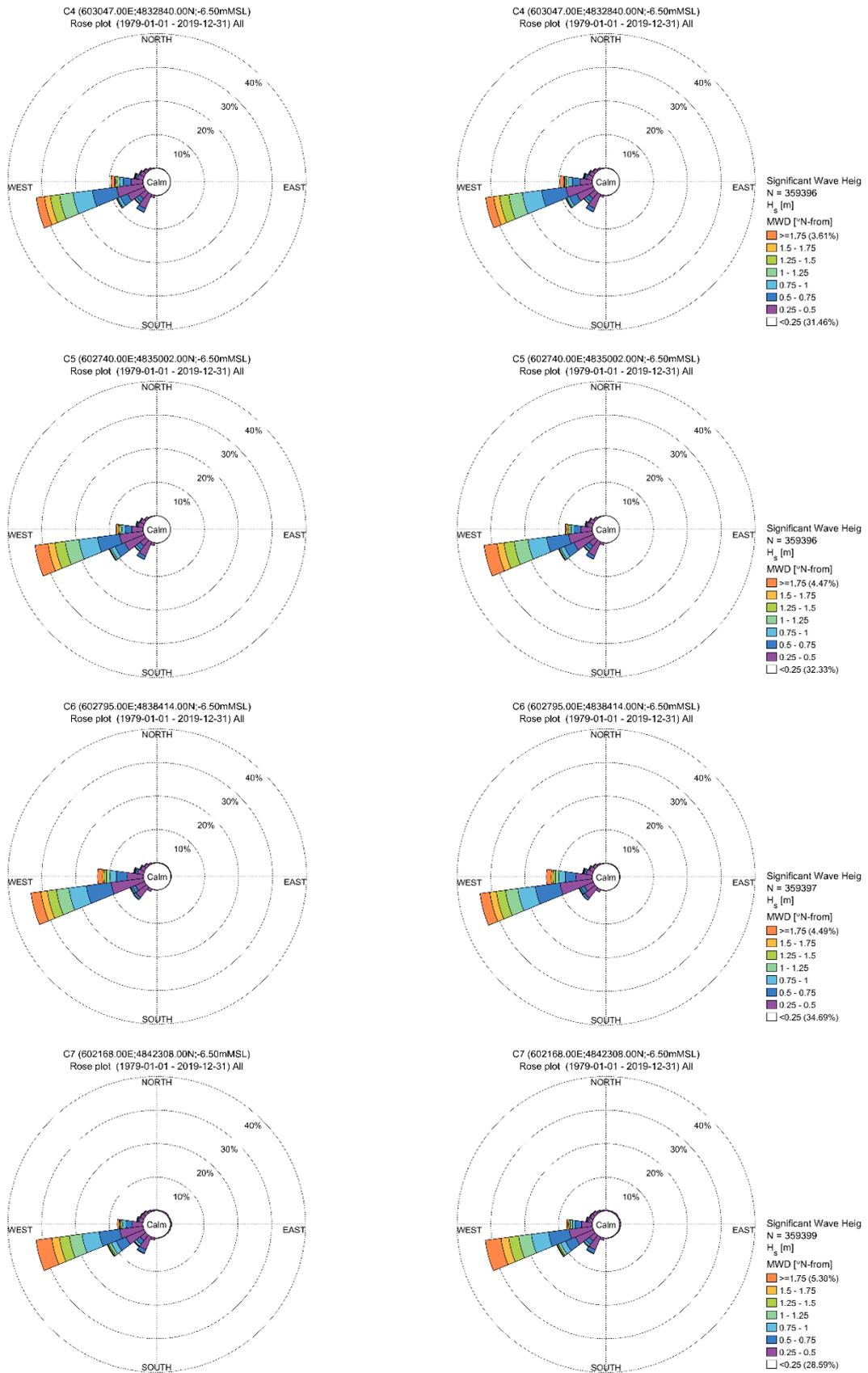


Figura 5-8 Rose del clima ondoso nello scenario attuale (a sinistra) e progetto (a destra) per i punti C4-C7

In

Tabella 5-1 sono riportati i valori della direzione risultante energetica (altezza e direzione) per ciascuno dei 7 punti analizzati in riferimento allo scenario attuale e di progetto.

Tabella 5-1 Valori della risultante energetica (Altezza d'onda e direzione) per i punti C1-C7 in riferimento allo stato attuale e di progetto.

| | 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 |

L'analisi combinata delle rose e delle risultanti energetiche mette in evidenza quanto segue:

- 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.

6 Quantificazione ed analisi di base del trasporto litoraneo

Per l'analisi preliminare del trasporto sedimentario locale è stato adottato un approccio di tipo monodimensionale tramite l'impiego del modello numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI. Una descrizione del codice di calcolo LITPROC [6] è riportata nell'Allegato D.

Il modulo LITDRIFT permette di simulare la distribuzione delle altezze d'onda, del set-up e del set-down, delle correnti *longshore* e del trasporto di sedimenti non coesivi lungo uno o più profili trasversali alla costa. LITDRIFT utilizza il metodo "STP" di DHI per calcolare la distribuzione trasversale del trasporto longitudinale di sedimenti (dato dalla somma del trasporto di sedimenti al fondo ed in sospensione) per un determinato profilo batimetrico, per onde regolari e irregolari. Il trasporto al fondo viene calcolato facendo riferimento allo *shear stress* istantaneo che si verifica durante il ciclo d'onda, mentre il trasporto dei sedimenti sospesi è dato dall'integrazione della velocità istantanea con le concentrazioni lungo i profili verticali.

STP descrive inoltre nel dettaglio le condizioni idrodinamiche, inclusi i processi di propagazione, *shoaling* e frangimento delle onde, il calcolo delle forzanti derivanti dai gradienti di *radiation stress*, il bilancio dei momenti per le direzioni trasversali e longitudinali che forniscono il set-up dell'onda e le velocità di corrente longitudinali.

Pertanto, l'applicazione del modulo LITDRIFT permette di definire il budget sedimentario nei profili trasversali di interesse, sulla base del clima meteomarinario, (onda, vento, marea e *storm surge*), delle quote del profilo e della granulometria lungo lo stesso, che può essere considerata variabile.

Nel caso in esame sono stati identificati sei profili di spiaggia rappresentativi e per ciascun profilo sono state utilizzate le condizioni d'onda estratte dal modello di propagazione del moto ondoso descritto nella sezione 5 per l'intera finestra temporale di 43 anni, 1979-2021.

6.1 Impostazione del modello LITDRIFT

Nell'ambito del presente studio, il modulo LITDRIFT è stato applicato al fine di:

- quantificare i volumi di sedimenti movimentati nel corso dei 41 anni disponibili;
- stimare la direzione del trasporto litoraneo netto;
- individuare, se esistente, un trend evolutivo nei 41 anni di dati a disposizione;
- valutare le differenze nel regime del trasporto longshore tra stato attuale e progetto.

Il modello LITDRIFT è stato applicato in riferimento ai transetti C1 e C2 e facendo riferimento ai due scenari simulati (attuale e progetto), allo scopo di evidenziare il potenziale impatto della realizzazione delle strutture della Darsena Europa sul regime del trasporto solido litoraneo attualmente in essere. Si è ritenuta non significativa l'applicazione del modello LITDRIFT ai transetti C3-C7 in quanto non presentano significative differenze in termini di esposizione al clima ondoso tra stato attuale e progetto, come evidenziato in sezione 5.4.

I profili su cui è stato applicato il modello coprono l'intera zona dei frangenti (*surf-zone*, indicativamente estesa fino alla profondità di 6 metri), ossia la fascia costiera dove hanno luogo i processi morfodinamici e la movimentazione di sedimenti.

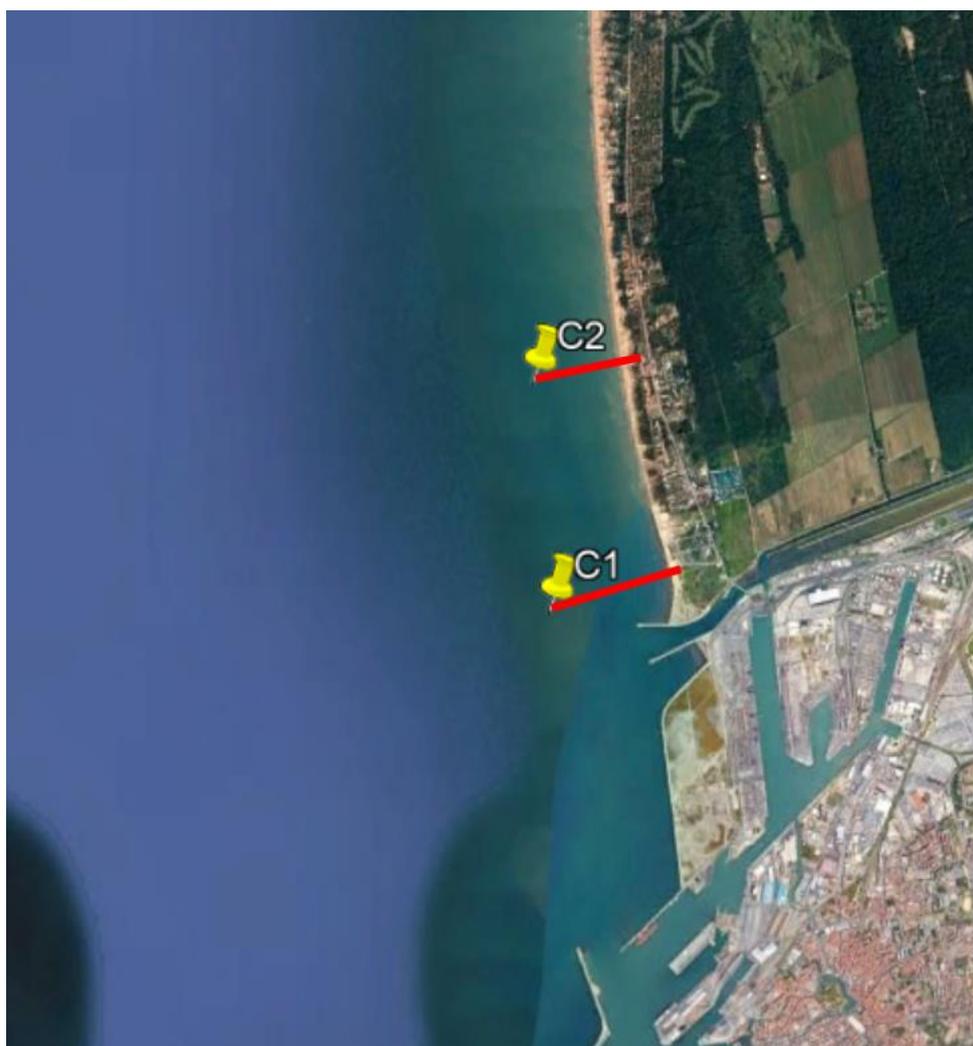


Figura 6-1 Ubicazione dei transetti utilizzati per il calcolo del trasporto litoraneo.

Per lo studio del trasporto litoraneo tramite l'applicazione del modello monodimensionale LITDRIFT sono state considerate come forzanti le condizioni d'onda locali estratte in corrispondenza dell'estremità offshore del profilo. L'estrazione è stata effettuata dai risultati del modello di propagazione ondosa verso il litorale di Marina di Pisa.

Come anticipato nella sezione relativa ai dati a disposizione, dal punto di vista granulometrico il fondale marino è stato descritto facendo riferimento alle campagne effettuate per conto della Provincia di Pisa nel 2005 (Figura 6-2). Nello specifico il sedimento è stato descritto facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio d_{50} costante pari a 0.2mm e da un parametro indicativo della variabilità del fuso (il cosiddetto "grading", corrispondente alla radice quadrata del rapporto tra il D84 ed il D16), pari a 1.5. Tale valore è stato assunto sulla base dell'analisi delle curve granulometriche a disposizione.

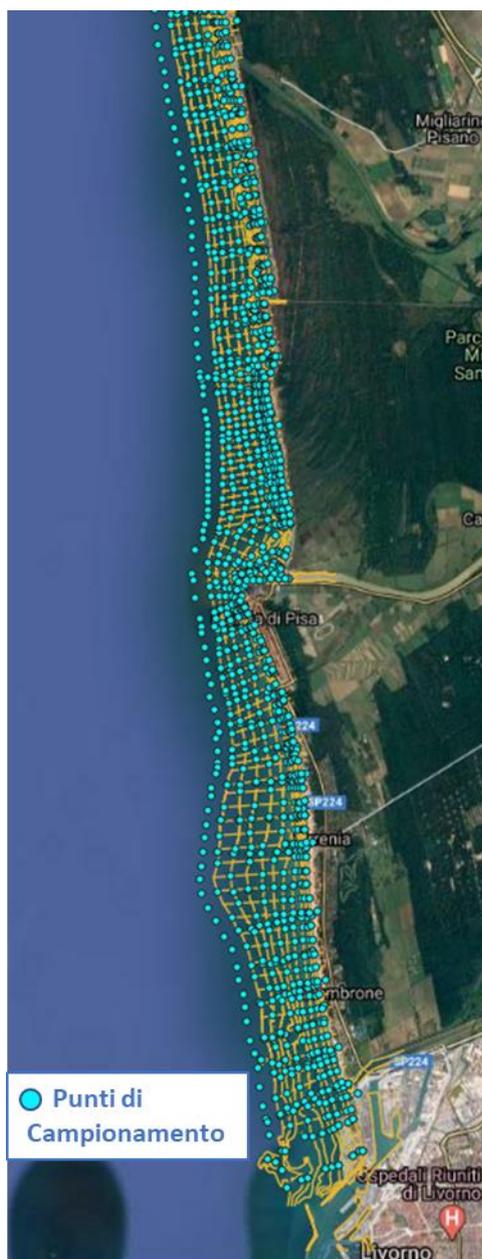


Figura 6-2 Dati sedimentologici disponibili (Provincia di Pisa, 2005): posizione dei punti di campionamento

6.2 Calcolo del trasporto *longshore* netto e lordo nei transetti C1 e C2

I risultati ottenuti dalle simulazioni hanno permesso di stimare l'andamento del trasporto longshore medio annuo (lordo, netto) lungo i profili analizzati (C1 e C2). Tali risultati sono illustrati in forma grafica (Figura 6-2) e in forma tabellare (Tabella 6-1) in riferimento sia allo stato attuale sia a quello di progetto.

Tabella 6-1 Distribuzione del trasporto netto e lordo nei due scenari (stato attuale e progetto) per i profili C1 e C2

| | 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 |

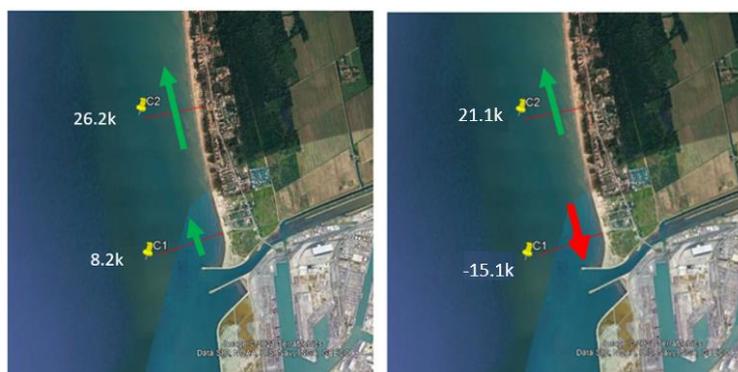


Figura 6-3 Distribuzione del trasporto netto nello scenario attuale (a destra) e progetto (a sinistra) nei due transesti C1 e C2

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 transesti 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.

6.3 Analisi della variabilità del trasporto netto e lordo

Al fine di valutare la variabilità nel tempo del regime del trasporto litoraneo (netto e lordo) e l'eventuale presenza di trend evolutivi sono stati prodotti i grafici da Figura 6-4 a Figura 6-5. Tali grafici illustrano l'andamento del trasporto annuale (netto e lordo) dal 1979 al 2019 per lo scenario di stato attuale relativamente ai transesti C1 e C2.

Si precisa che l'analisi dei trend evolutivi era stata predisposta in una fase iniziale del progetto, quando i dati MWM disponibili coprivano il periodo fino all'anno 2019.

I grafici mostrano quanto segue in relazione al transetto C1:

- il trasporto *longshore* netto, relativamente allo stato attuale, risulta sempre diretto verso Nord e varia da un minimo di circa 5'000 m³/anno (nel 1994) ad un massimo di circa 14'000 m³/anno (nel 2008 e nel 2008);
- il trasporto *longshore* lordo, relativamente allo scenario di stato attuale, varia da un minimo di 12'000 m³/anno (nel 1985, 1991 e 2005) ad un massimo di 23'000 m³/anno nel 2014;

Relativamente al transetto C2 i grafici mostrano quanto segue:

- il trasporto *longshore* netto, relativamente allo stato attuale, risulta sempre diretto verso Nord e varia da un minimo di circa 17'000 m³/anno (nel 2011) ad un massimo di circa 36'000 m³/anno (nel 2000);
- il trasporto *longshore* lordo, relativamente allo scenario di stato attuale, varia da un minimo di 20'000 m³/anno (nel 1991 e 2011) ad un massimo di 39'000 m³/anno nel 2000;

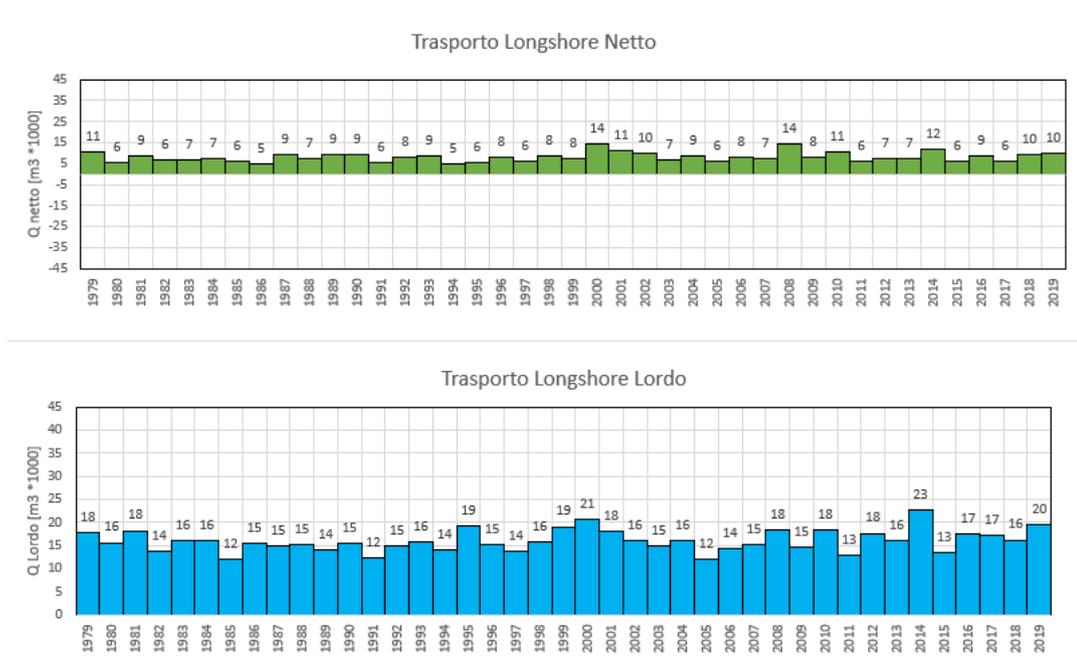


Figura 6-4 Trasporto sedimentario annuale netto e lordo per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto C1 ed allo stato attuale

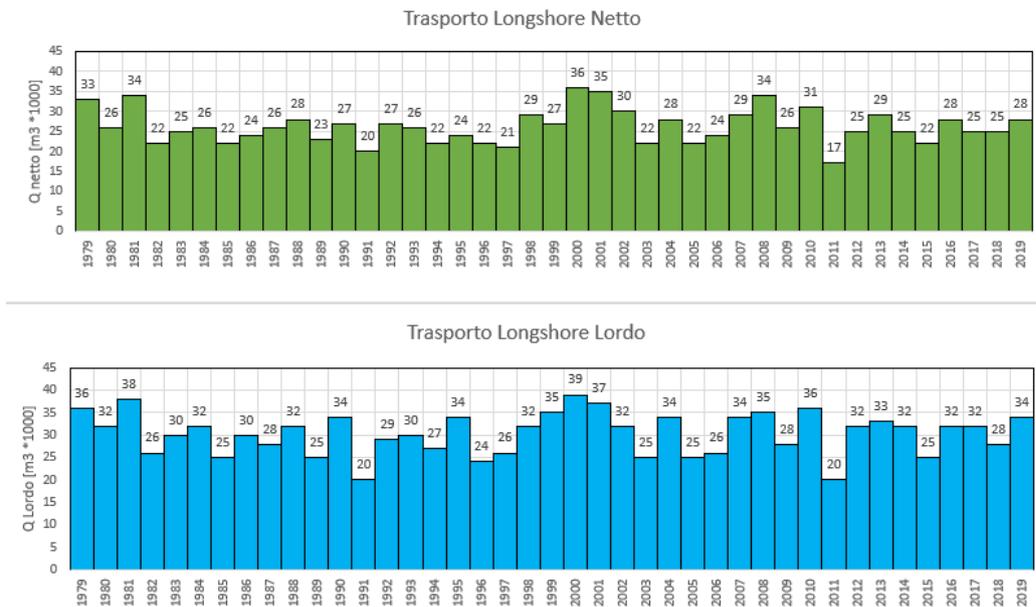


Figura 6-5 Trasporto sedimentario annuale netto e lordo per il periodo 1979-2019 in riferimento al transetto C2 ed allo scenario di stato attuale

L'analisi di cui sopra ha mostrato che il sito oggetto di studio presenta una significativa variabilità del trasporto litoraneo (sia netto che lordo) in entrambi i transetti analizzati, senza però evidenziare particolari trend evolutivi.

7 Quantificazione del bilancio sedimentario tramite analisi comparativa dei rilievi storici e delle linee di riva da satellite

La presente sezione illustra le attività condotte al fine di quantificare il bilancio sedimentario nel tratto di mare a Nord dello Scolmatore del fiume Arno. A tale scopo sono state utilizzate sia le linee di riva storiche opportunamente ricavate e digitalizzate da immagini satellitari di Google Earth, sia due diversi rilievi batimetrici effettuati nella medesima porzione di mare a dodici anni di distanza (2010 e 2022).

7.1 Analisi e processamento dei rilievi batimetrici

Essendo disponibili due diversi rilievi batimetrici, messi a disposizione dal Committente ai fini di questo studio, si è dapprima tentato un confronto diretto tra gli stessi, allo scopo di individuare e possibilmente quantificare eventuali deficit sedimentari o tendenze deposizionali di cui tenere conto nelle successive fasi di modellazione.

Tra i dataset storici disponibili si è scelto di utilizzare il rilievo multibeam effettuato nel 2010 perché copre un'area molto simile a quella coperta dai rilievi 2022. Tuttavia, i due rilievi (2010 e 2022) hanno una diversa estensione in senso trasversale: infatti, muovendosi dal largo verso costa, i rilievi più recenti partono da circa -13m di profondità e si fermano circa all'isobata -2m mentre il rilievo multibeam del 2010 parte da circa -10m e si estende fino quasi alla linea di riva. Il confronto nel tratto compreso tra -2m e la costa non risulta pertanto possibile.

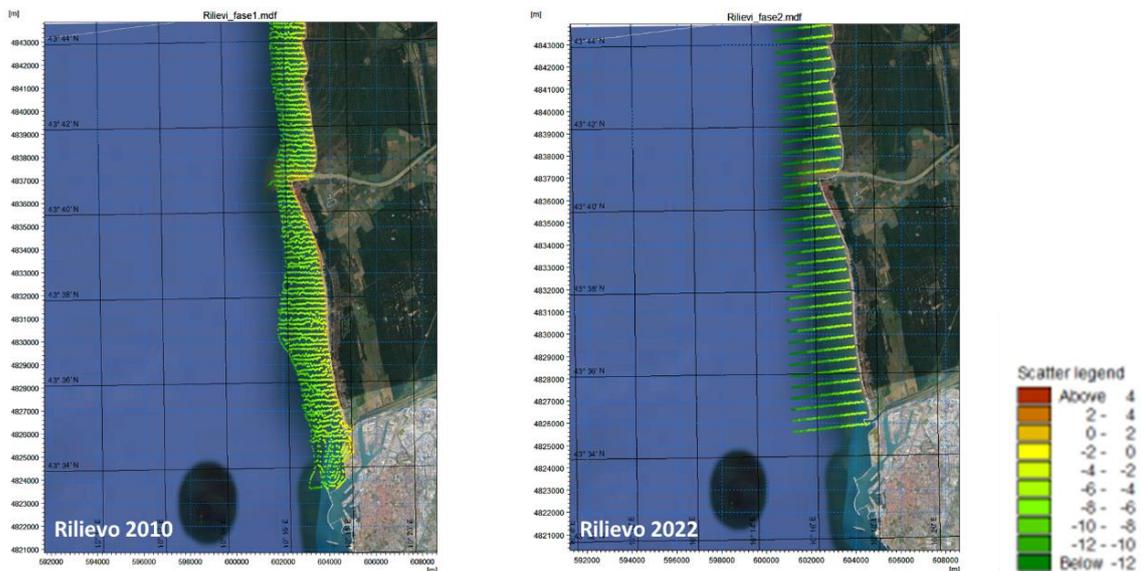


Figura 7-1 Rilievi batimetrici utilizzati per il confronto

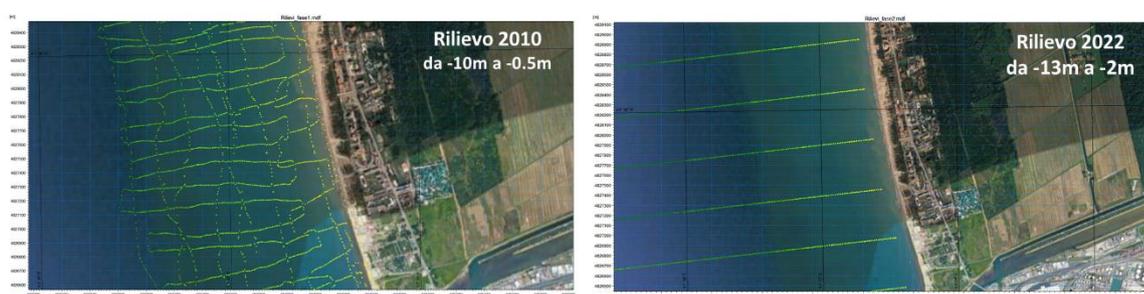


Figura 7-2 Dettaglio sull'area di maggiore interesse, che mostra la diversa estensione trasversale nei due casi (2010 e 2022)

I due rilievi sono stati rielaborati interpolando i valori ai nodi di una griglia regolare di maglie quadrate di 20m di lato. Su un profilo scelto nell'area di maggiore interesse (compresa tra lo Scolmatore e Tirrenia) è stato effettuato un controllo per verificare che l'interpolazione matematica dei dati nello spazio non abbia introdotto errori sistematici nella batimetria risultante.

Successivamente, è stata creata una mappa delle differenze tra le due batimetrie così ottenute, limitando il confronto alla fascia di fondali compresa tra -10m e -2m di profondità. La mappa ottenuta è rappresentata in Figura 7-3: le differenze sono riportate in metri e corrispondono a erosione quando sono negative, a deposizione quando sono positive. Osservando la figura si evidenziano:

- un'area di forte tendenza deposizionale a Marina di Pisa, corrispondente all'area oggetto dei progetti-pilota di ripascimento in ghiaia e protezione rigida degli arenili (si veda Figura 7-4);
- un'area di forte tendenza deposizionale in corrispondenza della foce dello Scolmatore, sede di realizzazione di vari interventi di armatura della foce e ampliamento del porto di Livorno (si veda Figura 7-5);
- nel tratto che va dallo Scolmatore fino a Tirrenia si osservano variazioni batimetriche di moderata entità, prevalentemente negative (erosione) che interessano però un'ampia fascia di spiaggia sommersa;
- nel tratto di spiaggia maggiormente interessato dai potenziali impatti della Darsena Europa (i primi 2 km da foce Scolmatore) le variazioni sono generalmente di scarsa entità, mediamente comprese nel range $\pm 0.5m$ con punte massime di $-0.7m$;
- procedendo verso Nord da Tirrenia fino a Bocca d'Arno le variazioni diventano molto più significative ma meno estese, interessando esclusivamente i primi metri di spiaggia sommersa dove si sviluppano le strutture di protezione costiera.

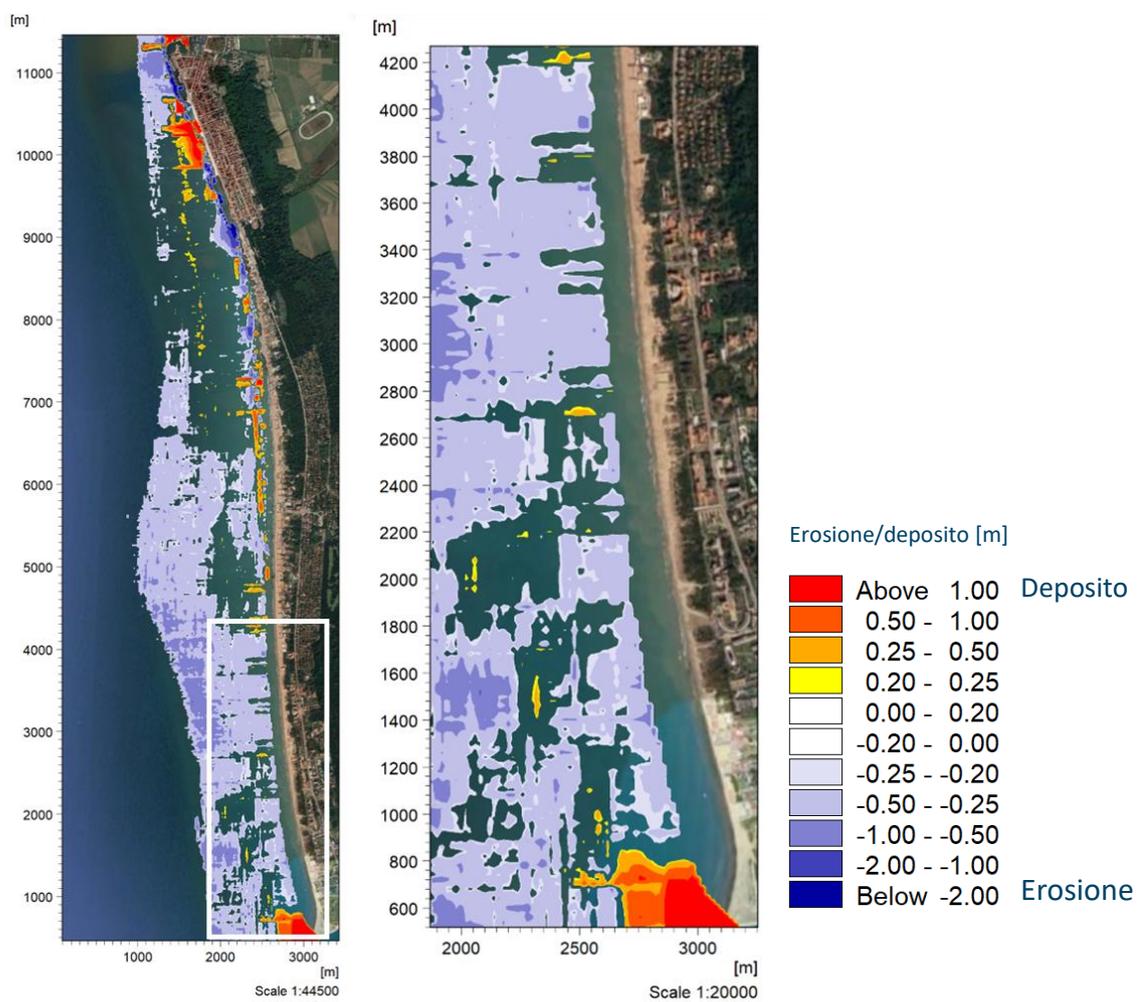


Figura 7-3 Mappa delle differenze batimetriche 2022-2010

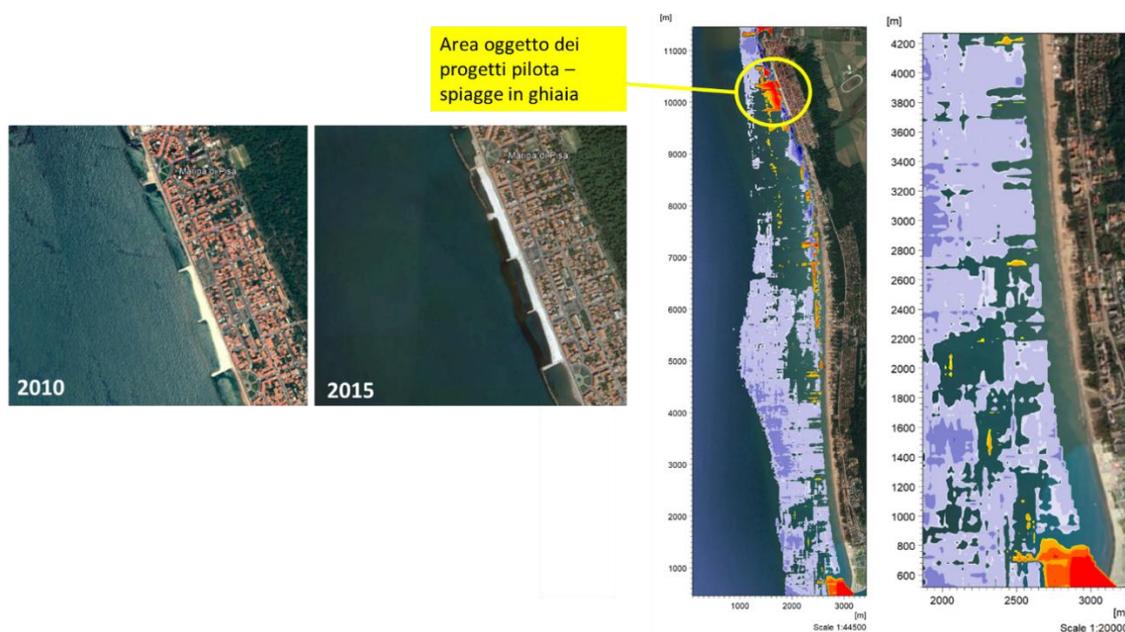


Figura 7-4 Dettaglio sull'area di Marina di Pisa dove le differenze batimetriche nel periodo 2010-2022 sono dovute all'avvicendamento nel tempo di progetti-pilota di ripascimenti in ghiaia protetti con strutture rigide

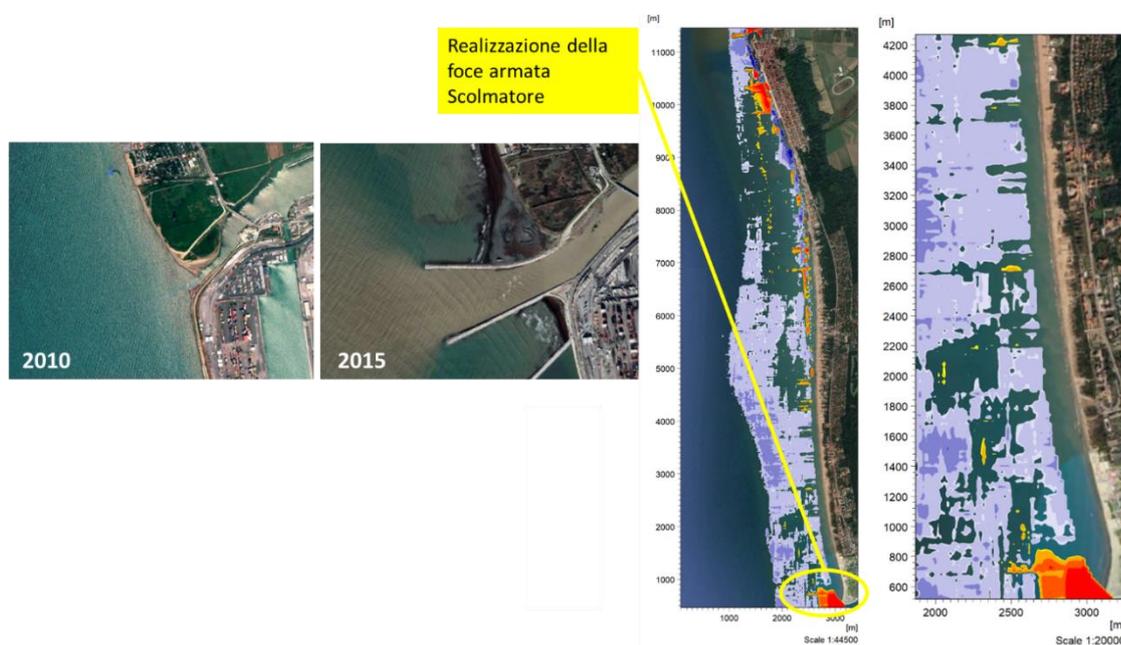


Figura 7-5 Dettaglio sull'area di foce dello Scolmatore, dove le differenze batimetriche 2010-2022 sono dovute agli interventi di armatura della foce

La stima delle differenze volumetriche è stata effettuata mediante l'assunzione che la variazione verticale sia omogeneamente distribuita sull'intera maglia del grigliato di interpolazione. Sebbene tale assunzione non sia strettamente realistica, si ritiene che possa fornire risultati ragionevoli specie se si considera il margine di errore derivante dal confronto tra le due batimetrie. La mappa delle differenze volumetriche è riportata in Figura 7-6, dove i volumi sono riportati in m^3 e sono negativi quando indicano erosione, positivi quando indicano accumulo. La mappa è stata utilizzata

ai fini della stima delle differenze volumetriche su aree predefinite. In particolare, sono state considerate tre aree (si veda Figura 7-7): la prima si estende dall'arenile di Calambrone fino a foce Morto (A1), la seconda si estende per circa 3 km lineari da foce Scolmatore fino a Tirrenia (A2) mentre la terza si estende da foce Scolmatore fino a Bocca d'Arno includendo gli arenili di Marina di Pisa.

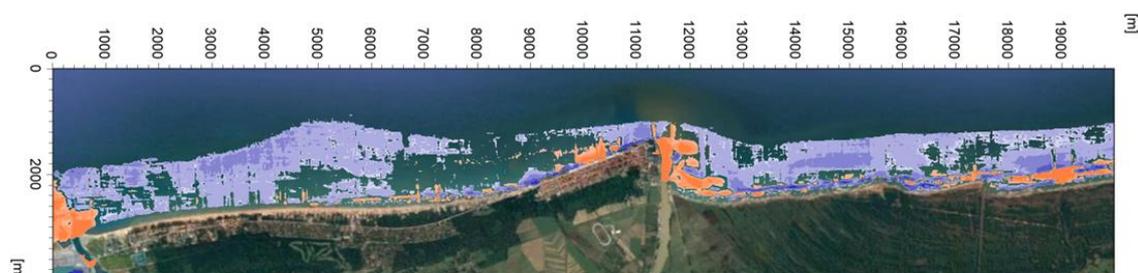
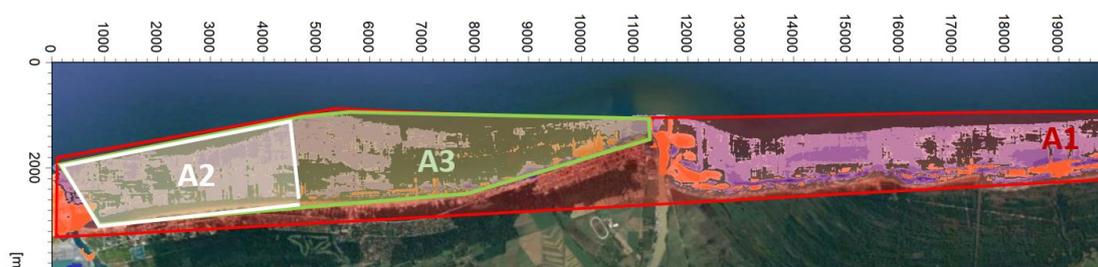


Figura 7-6 Mappa delle differenze volumetriche (in m³)



| | Area | | |
|---|----------|----------|----------|
| | A1 | A2 | A3 |
| Bilancio volumi 2010-2021 [m³] | -3483500 | -1331800 | -2414300 |
| Bilancio volumi medio annuo [m³/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 |

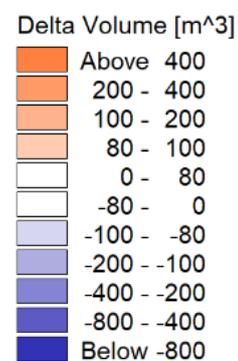


Figura 7-7 Differenze volumetriche stimate sulle tre aree A1, A2 e A3 schematizzate in figura

7.2 Analisi e processamento delle linee di riva storiche

Ad integrazione e verifica dell'attività di confronto tra rilievi batimetrici, sono state acquisite 3 immagini storiche satellitari recenti, che fanno riferimento in particolare ad Agosto 2016, Giugno 2019 e Aprile 2020. Nella scelta delle immagini da utilizzare per l'analisi sono state privilegiate le acquisizioni nei periodi primaverili-estivi caratterizzate da assenza di mareggiate in atto. La prima immagine acquisita (Agosto 2016) è precedente alla realizzazione dell'armatura di foce Scolmatore, che ha determinato una significativa evoluzione del litorale di Calambrone (Figura 7-8).



Figura 7-8 Immagini satellitari storiche prese a riferimento per l'analisi storica della linea di riva, dettaglio sul litorale di Calambrone (Agosto 2016, Giugno 2019 e Aprile 2020)

La disponibilità delle tre immagini satellitari ha permesso la digitalizzazione della linea di riva, che è stata processata mediante un apposito applicativo di Mike Zero attraverso il quale è stato possibile quantificare l'evoluzione storica del litorale. Tale evoluzione è riportata nel grafico di Figura 7-9 e nell'immagine Figura 7-10.

Con riferimento alle linee di riva dal 2016 al 2019, le cui differenze sono riportate in dettaglio nel grafico di Figura 7-11, si osserva che 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.

Con riferimento alle linee di riva del 2020 e del 2019, le cui differenze sono riportate nel grafico di Figura 7-12, si osserva che in tale periodo 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).

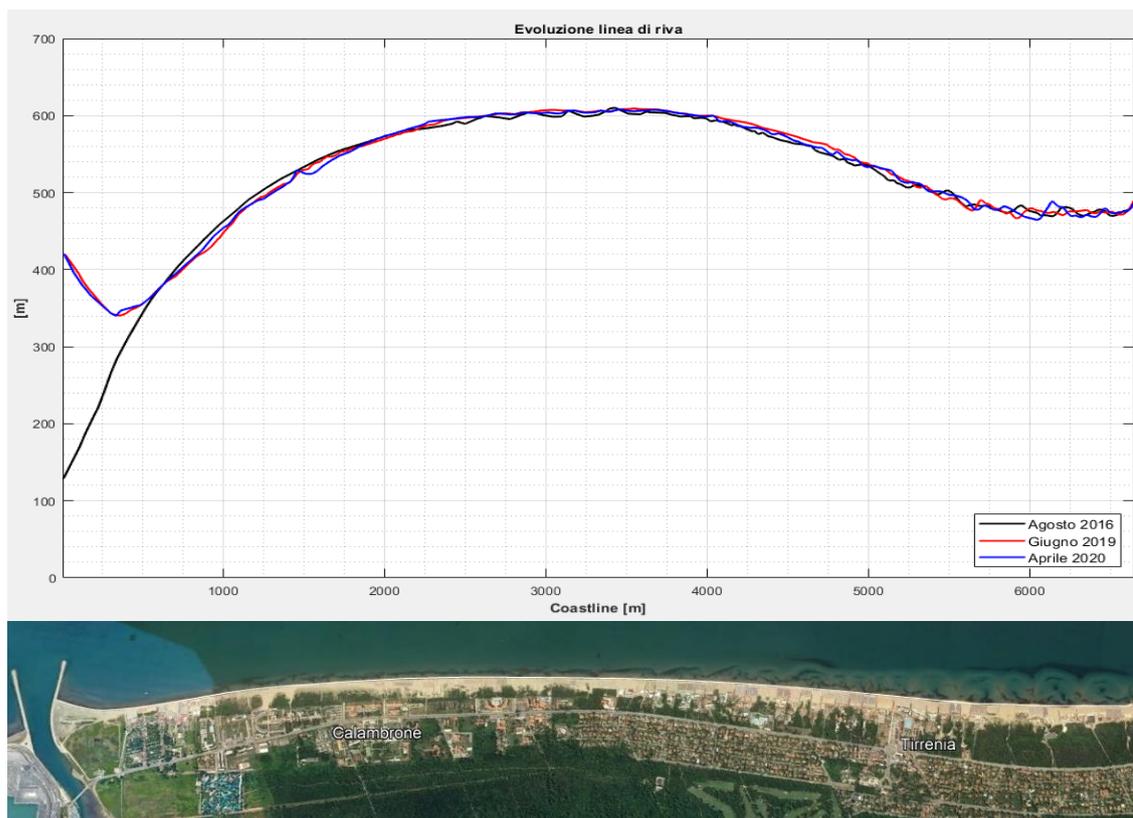


Figura 7-9 Grafico dell'evoluzione delle linee di riva: Agosto 2016, Giugno 2019 e Aprile 2020

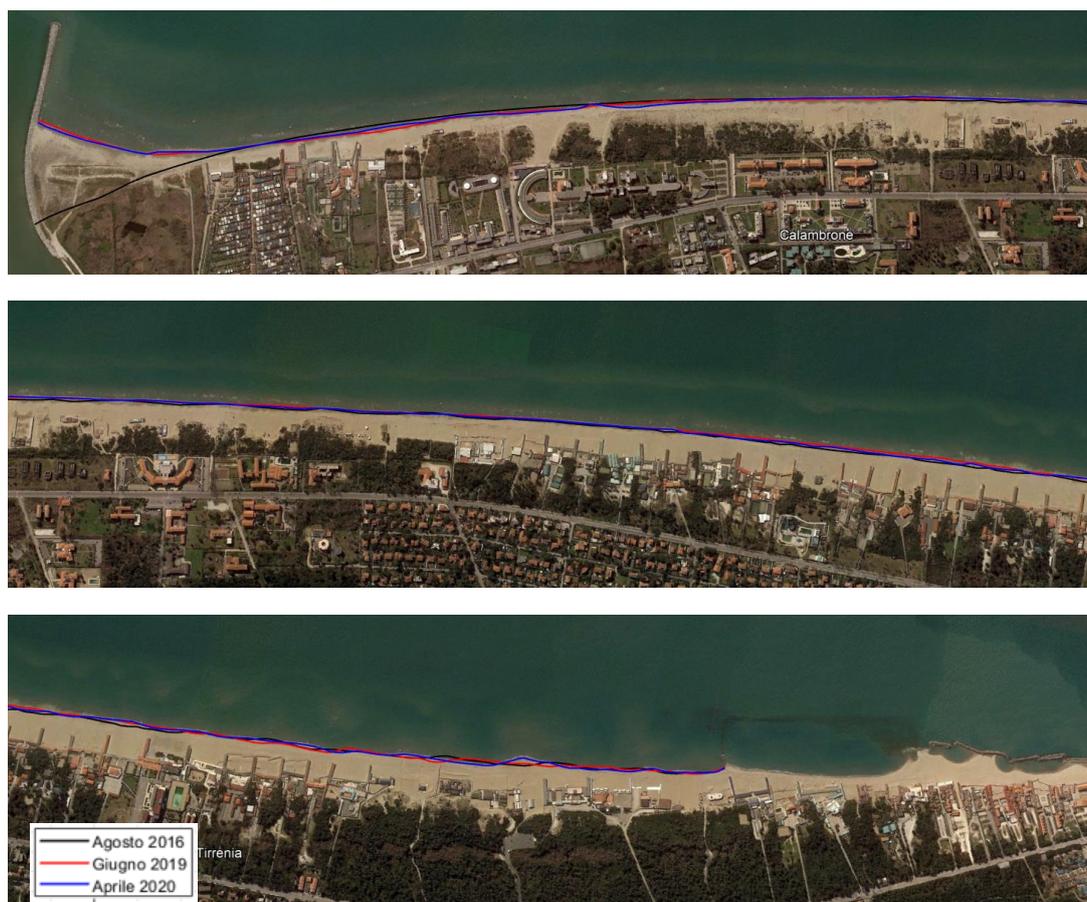


Figura 7-10 Evoluzione storica delle linee di riva: Agosto 2016, Giugno 2019 e Aprile 2020



Figura 7-11 Variazioni della linea di riva rispetto all'Agosto 2016: Giugno 2019 (in rosso)

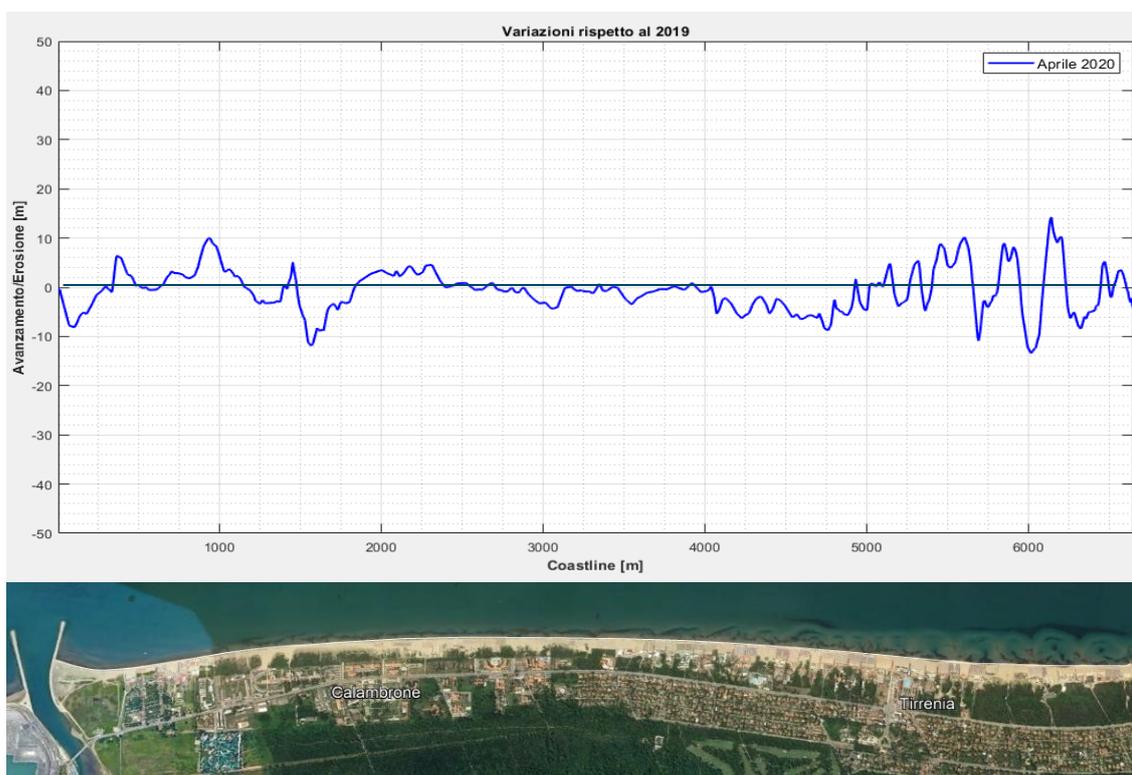


Figura 7-12 Variazioni della linea di riva rispetto al Giugno 2019: Aprile 2020 (in blu)

7.3 Quantificazione del bilancio sedimentario storico

Le analisi condotte hanno permesso di comprendere nel dettaglio le dinamiche evolutive del sito e di identificare le aree caratterizzate da possibili criticità.

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.

Di contro, l'analisi dell'evoluzione storica della linea di riva (2020, 2019 e 2016) ha evidenziato che il litorale oggetto di studio risulta piuttosto stabile, fatta eccezione per il breve tratto di costa interessato dalla realizzazione del pennello di foce dello Scolmatore, che ha determinato uno squilibrio sulle dinamiche evolutive del litorale di Calambrone nel periodo a cavallo della sua realizzazione.

Tra il 2019 ed il 2020 il deficit sedimentario stimato per il tratto di costa compreso tra la foce dello Scolmatore e Marina di Pisa è di circa 5'000-7'000 m³.

Si ritiene che tale stima, condotta nell'ipotesi di una traslazione rigida del profilo di costa e pertanto a prescindere da eventuali modifiche del profilo stesso, possa essere considerata ben più rappresentativa della situazione evolutiva attuale nell'area oggetto di studio rispetto alla stima derivante dalla comparazione dei rilievi batimetrici.

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

8 Analisi dell'evoluzione della linea di riva

Al fine di valutare gli effetti della realizzazione della Darsena Europa sul litorale pisano è stato predisposto un modello di evoluzione della linea di riva mediante l'applicazione del codice di calcolo LITLINE di Littoral Processes FM, un modello monodimensionale che simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto litoraneo e calcola l'evoluzione della linea di riva risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti con la tecnica delle differenze finite.

Il modello si basa sulla teoria ad una linea, in cui si assume che il profilo trasversale possa arretrare e avanzare rigidamente, mantenendo tuttavia la propria geometria. Pertanto, con questo modello, la morfologia costiera è descritta dalla posizione della linea di riva e da uno o più profili di riferimento.

LITLINE permette inoltre di introdurre nel calcolo sia l'effetto di strutture (ad esempio pennelli trasversali, scogliere radenti o distaccate) sia l'effetto di eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento. I dati in input dal modello sono:

- posizione della linea di riva;
- profili trasversali (spiaggia emersa e sommersa);
- clima ondoso in testata ad ogni profilo: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- livelli marini ed eventuali correnti di marea;
- posizione e dimensioni di eventuali strutture.

8.1 Impostazioni del modello LITLINE

Le simulazioni del modello LITLINE sono state condotte in riferimento ad un dominio di calcolo (*baseline*) che si estende indicativamente dalla foce dello Scolmatore del fiume Arno fino a Tirrenia, per una lunghezza complessiva di circa 6.5 km.

In Figura 8-1 è raffigurata, oltre alla *baseline*, anche la linea di costa di stato attuale, ricavata da Google Earth sulla base della più recente immagine satellitare utile (Aprile 2020). La *baseline*, al pari della linea di riva, ha una risoluzione di 5m.

Il modello è stato forzato dalla serie di moto ondoso estratta lungo tutto lo sviluppo costiero ad una batimetrica di circa -4 m. Per la previsione di evoluzione futura della posizione della linea di riva, si è fatto riferimento alle medesime condizioni di moto ondoso utilizzate per la caratterizzazione storica del litorale.

Le caratteristiche granulometriche del fondale marino sono state descritte facendo riferimento alle campagne effettuate per conto della Provincia di Pisa nel 2005. Nello specifico il sedimento è stato impostato facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio d50 costante pari a 0.2 mm e da un parametro indicativo della variabilità del fuso (il cosiddetto "grading", corrispondente alla radice quadrata del rapporto tra il d84 ed il d16), pari a 1.5. Tale valore è stato assunto sulla base dell'analisi delle curve granulometriche a disposizione.

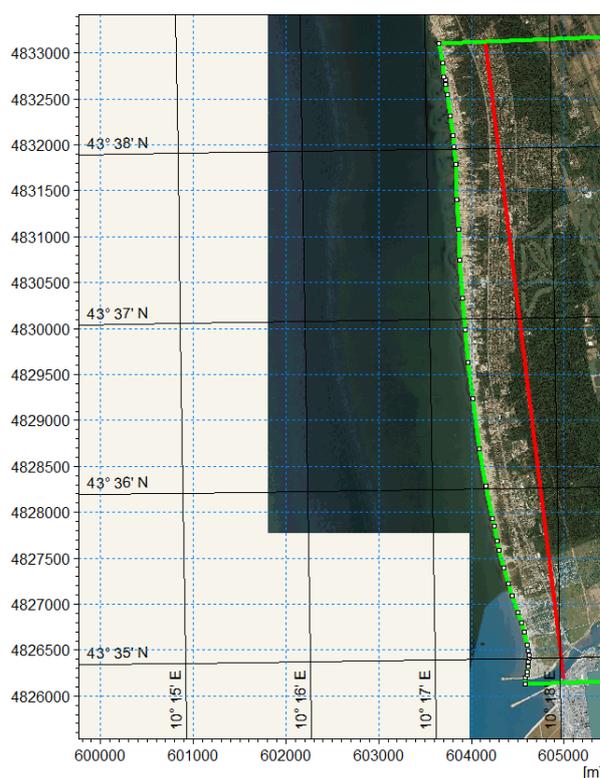


Figura 8-1 Dominio di calcolo di LITLINE: in rosso la *baseline*, in verde la linea di costa dell'Aprile 2020

8.2 Calibrazione del modello

Il modello di evoluzione della linea di riva è stato calibrato sulla base delle immagini satellitari ricavate da Google Earth e opportunamente digitalizzate. Nello specifico, la calibrazione ha previsto la simulazione di un periodo di circa 1 anno, a partire dalla posizione della linea di riva del Giugno 2019 fino all'Aprile 2020.

Il confronto tra linea di riva modellata al termine della simulazione di calibrazione (Aprile 2020) e le immagini satellitari riferite allo stesso anno è riportato nelle immagini di Figura 8-2 e Figura 8-3. Le immagini mostrano che il tratto di litorale oggetto di studio risulta piuttosto stabile con variazioni limitate durante il periodo analizzato. Dalle immagini si evince inoltre che il modello riesce a descrivere sia qualitativamente che quantitativamente il fenomeno evolutivo in atto al netto delle oscillazioni locali della linea di riva.

Le simulazioni numeriche hanno confermato che il deficit sedimentario tra il Giugno 2019 e l'Aprile 2020 è dell'ordine di grandezza dei 5'000-7'000 m³.



Figura 8-2 Risultati della calibrazione del modello LITLINE. In blu è raffigurata la linea di riva modellata riferita all'Aprile 2020 a partire da Giugno 2019, l'immagine satellitare si riferisce allo stesso periodo (Aprile 2020)



Figura 8-3 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

8.3 Analisi del trasporto litoraneo

L'applicazione del modello LITLINE, opportunamente calibrato sulla base delle immagini satellitari (come descritto al paragrafo precedente), ha permesso di affinare le stime del trasporto litoraneo condotte nell'ambito della Fase 1. Nello specifico, il modello fornisce per ogni punto del dominio di calcolo (*baseline*) la stima del trasporto long-shore. I risultati delle elaborazioni, riportati in Figura 9-1 in termini di andamento del trasporto long-shore lungo la linea di costa, permettono di affermare quanto segue.

- il litorale in studio è caratterizzato generalmente da valori positivi del trasporto che pertanto, in accordo con la convenzione utilizzata nel modello, risulta diretto da Sud verso Nord.
- i valori del trasporto long-shore netto sono in generale piuttosto contenuti e di norma inferiori ai 10'000 m³/anno. Tale aspetto risulta sicuramente legato all'attenuazione che le secche della Meloria esercitano sul clima ondoso locale ed in particolar modo sul litorale di Calambrone (ubicato nella parte più a Sud);
- il primo tratto a Sud, fino a circa 1000 m dal pennello di foce, risulta caratterizzato da valori del trasporto litoraneo estremamente ridotti, che localmente possono essere anche leggermente negativi (con inversione del trasporto: da Nord verso Sud). Qui, oltre all'effetto esercitato dalle secche della Meloria, bisogna evidenziare l'influenza del pennello di foce Scolmatore, il quale determina un'attenuazione di tutte le condizioni ondose provenienti dai settori meridionali;
- nel tratto compreso tra 1000 m e 3000 m dal pennello di foce il trasporto litoraneo netto risulta in crescita. Nello specifico si passa da un trasporto quasi nullo fino ad arrivare ad oltre 10'000 m³/anno. Valori crescenti del trasporto litoraneo nella direzione del flusso possono determinare l'insorgenza di dinamiche erosive, le quali saranno discusse nella successiva sezione.

- viceversa, nel tratto di Tirrenia compreso tra le progressive 3000 m e 6500 m, il trasporto litoraneo risulta in leggero calo fino a quasi annullarsi in corrispondenza del litorale di Marina di Pisa. Valori decrescenti del trasporto litoraneo nella direzione del flusso possono determinare l'instaurarsi di dinamiche di deposito, che al pari di quelle erosive saranno discusse nella successiva sezione.

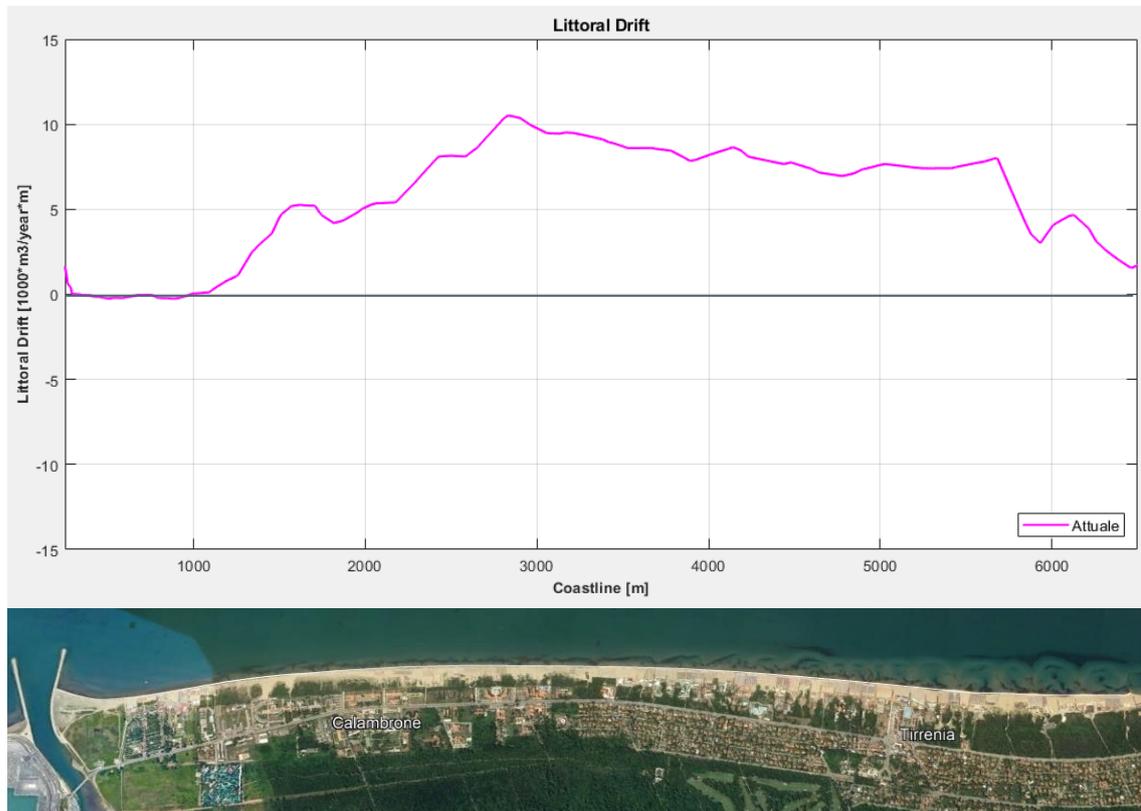


Figura 8-4 Andamento del trasporto *long-shore* lungo il litorale oggetto di studio. Valori positivi del trasporto sono indicativi di una direzione Sud-Nord

8.4 Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione attuale

Il modello LITLINE implementato e calibrato sulla base di quanto dettagliato precedentemente è stato utilizzato per la simulazione dell'evoluzione della linea di riva a medio-lungo termine nella configurazione attuale. La simulazione è stata predisposta per un periodo di 10 anni, nell'ipotesi che il clima meteomarinario possa essere assimilabile a quello degli ultimi 10 anni a disposizione. In Figura 8-5 viene riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva per l'intera area di studio a partire dalla linea di costa iniziale (2020) per i successivi 10 anni. Il grafico evidenzia che:

- 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. Dopo un anno, si osserva un avanzamento massimo di 1 m mentre dopo 5 e 10 anni l'avanzamento massimo risulta essere di circa 2-3 m. Come atteso, la realizzazione del pennello destro di foce, avvenuta tra il 2016 ed il 2017, ha creato uno squilibrio nelle dinamiche evolutive che a sua volta ha determinato, specialmente nei primi anni dopo la realizzazione, l'avanzamento della linea di riva nella zona immediatamente a Nord del pennello stesso. Secondo le elaborazioni modellistiche, in circa 5 anni (a partire dal 2020) verranno a determinarsi nuovamente delle condizioni di equilibrio con la conseguente stabilizzazione della linea di riva in questo tratto di costa;

- 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. In particolare, dopo un anno, la linea di riva arretra fino ad un massimo di circa 1-2 m; dopo 5 anni l'arretramento prosegue fino ad un massimo di 5 m. arrivando dopo 10 anni fino ad un massimo di circa 7-8 m. Spostandosi verso Nord tale effetto erosivo tende a ridursi ed annullarsi progressivamente all'incirca alla progressiva 3000 m, al confine tra Calambrone e Tirrenia, nel punto in cui cambia significativamente l'orientazione della linea di costa;
- 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. Il massimo avanzamento si osserva nella porzione di costa ubicata più a Nord, appena prima del confine con il litorale di Marina di Pisa caratterizzato da una significativa presenza di strutture a protezione della costa. Nello specifico, dopo un anno la linea di riva avanza fino ad un massimo di 1 m; dopo 5 anni fino ad un massimo di 3-5 m; dopo 10 anni fino ad un massimo di 4-5 m.

Le elaborazioni numeriche hanno altresì evidenziato che il tratto di costa in avanzamento (Tirrenia) presenta un accumulo di sedimenti pari a circa 6'000 m³, 20'000 m³ e 35'000 m³ rispettivamente dopo 1, 5 e 10 anni; Viceversa, il tratto di costa in arretramento (Calambrone) presenta una perdita di sedimenti pari a circa 9'000 m³, 27'000 m³ e 45'000 m³ rispettivamente dopo 1, 5 e 10 anni.

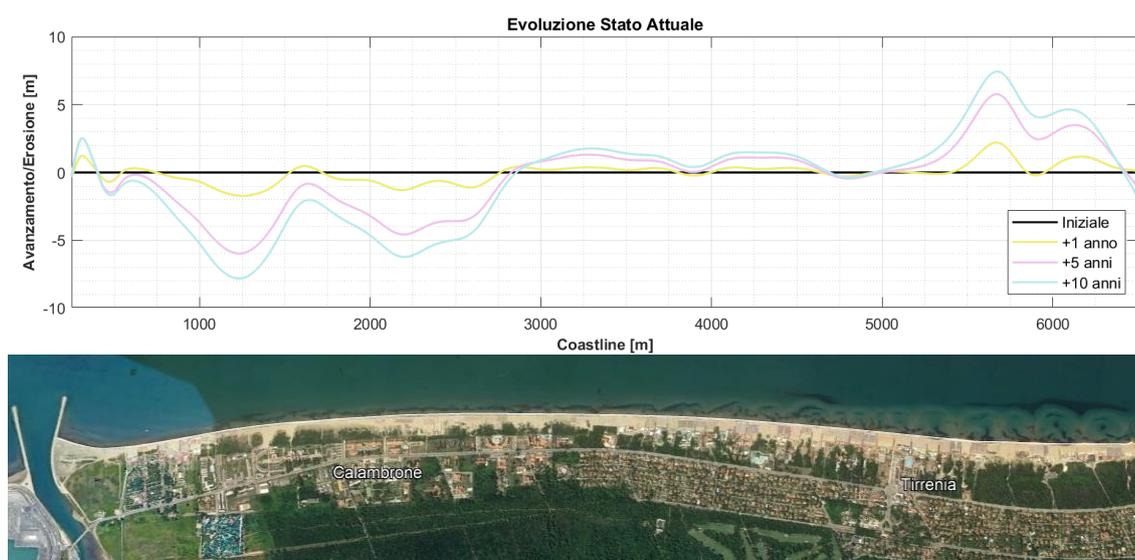


Figura 8-5 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di stato attuale

In Figura 8-6 è illustrata l'evoluzione della linea di riva ad 1, 5 e 10 anni in riferimento ai tratti di costa di Calambrone e Tirrenia, che presentano rispettivamente il maggiore arretramento ed il maggiore avanzamento.



Figura 8-6 Evoluzione della linea di riva nel tratto di maggiore arretramento (sopra) e maggiore avanzamento (sotto) con riferimento alla simulazione di stato attuale

8.5 Evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva nella configurazione di progetto

Il modello LITLINE implementato e calibrato sulla base di quanto dettagliato in precedenza è stato utilizzato anche per la simulazione dell'evoluzione a medio-lungo termine della linea di riva in riferimento alla nuova configurazione di progetto, con la presenza della Darsena Europa. Analogamente a quanto visto nella precedente sezione, la simulazione è stata predisposta per un periodo di 10 anni a partire dalla linea di riva di Aprile 2020, nell'ipotesi che il clima meteomarinario di tale periodo coincida con quello degli ultimi 10 anni a disposizione.

In Figura 8-7 è riportato il grafico dell'evoluzione della linea di riva per l'intera area di studio a partire dal 2020 (linea di costa iniziale) per i successivi 10 anni, nelle immagini Figura 8-8 e Figura 8-9 sono riportati rispettivamente un dettaglio dell'evoluzione della linea di riva (per i tratti di costa dove è previsto il massimo arretramento ed il massimo avanzamento) ed il confronto tra simulazioni di stato attuale e progetto. In Figura 8-10 è invece riportata la differenza tra l'evoluzione della linea di riva nella nuova configurazione di progetto a quella di stato attuale.

La lettura dei grafici, con particolare riferimento all'evoluzione alla fine del periodo di 10 anni, mostra che le differenze in termini evolutivi tra configurazione di progetto (secondo il nuovo layout della Darsena Europa) e attuale sono apprezzabili per tutto il tratto di costa analizzato, dalla foce dello Scolmatore verso Nord. Nello specifico si può osservare quanto segue:

- 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 circa a Nord del pennello di foce. L'incremento di tale avanzamento risulta essere pari a circa 2 m, 6 m e 9 m rispettivamente dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni.
- il tratto di costa da circa 1000 m a circa 3000 m a Nord del pennello di foce risulta viceversa caratterizzato da un arretramento maggiore rispetto alla configurazione attuale: dopo 1 anno le differenze non risultano apprezzabili, mentre la variazione è quantificabile fino ad un massimo di 2 m dopo 5 anni e di 3 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.

Le elaborazioni numeriche con riferimento alla configurazione di progetto hanno inoltre evidenziato che il bilancio complessivo sedimentario, tra volumi accumulati nel tratto in accrescimento e persi in quello in arretramento, non subisce variazioni apprezzabili rispetto alla configurazione di stato attuale.

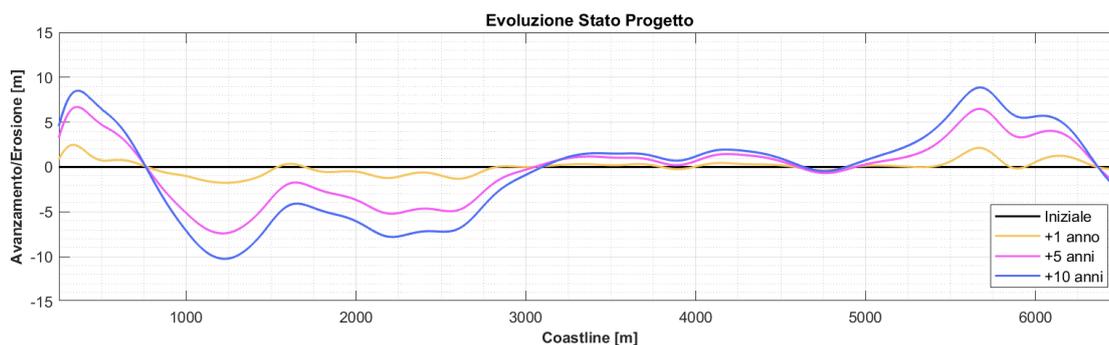


Figura 8-7 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di progetto “layout nuovo”



Figura 8-8 Evoluzione della linea di riva nel tratto di maggiore arretramento (sopra) e maggiore avanzamento (sotto) con riferimento alla configurazione di progetto “layout nuovo”

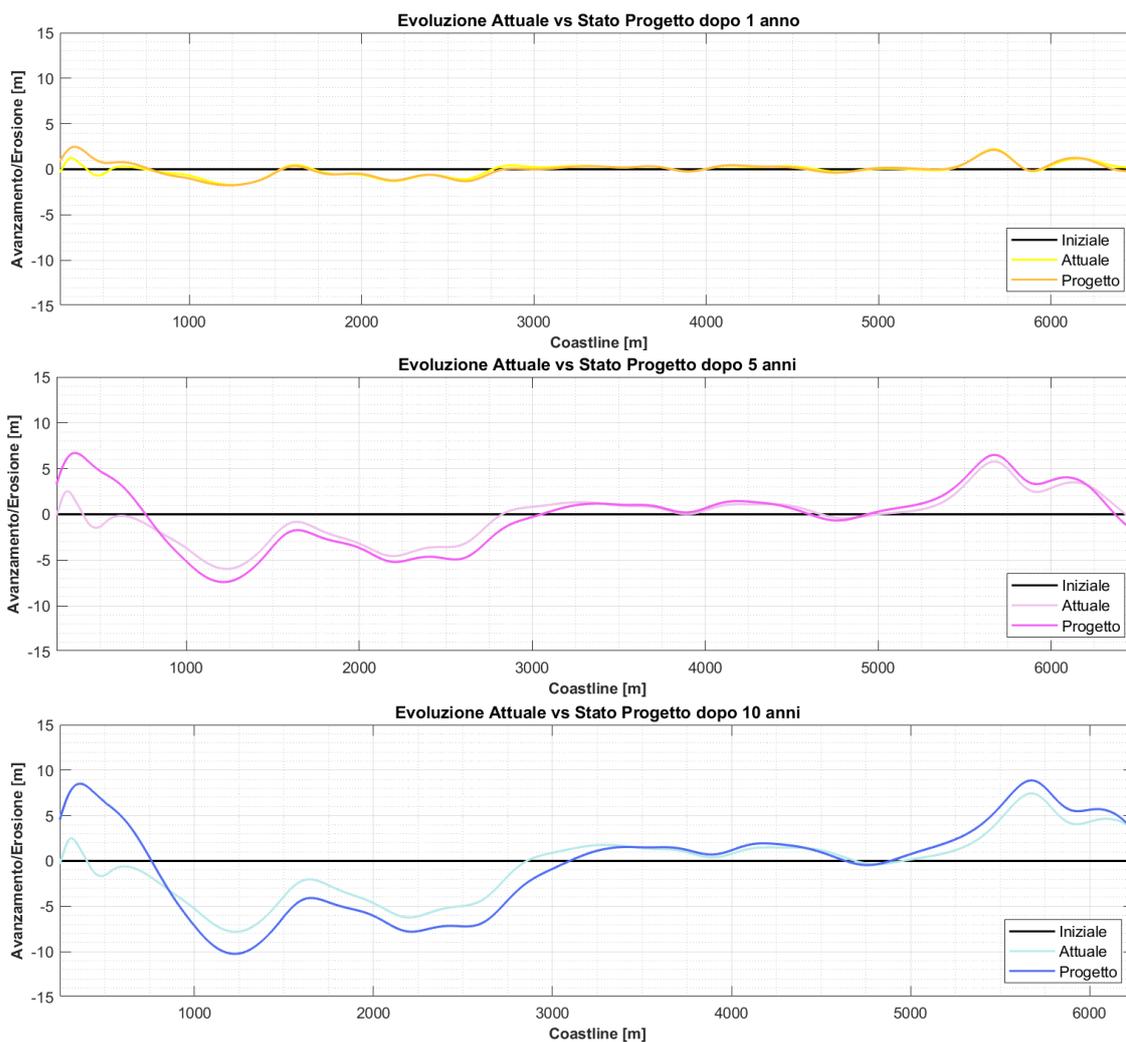


Figura 8-9 Confronto dell'evoluzione della linea di riva tra configurazione attuale e di progetto "layout nuovo" dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni

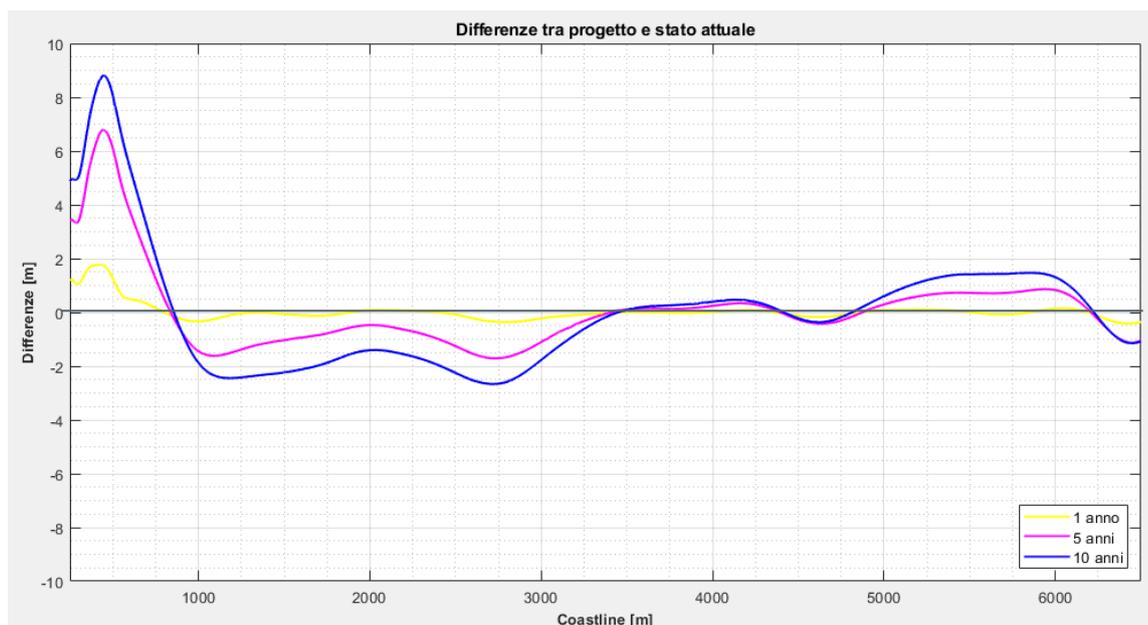


Figura 8-10 Differenze tra evoluzione della linea di riva nella configurazione di progetto "layout nuovo" ed in quella di stato attuale

In Figura 8-11 è riportato l'andamento del trasporto litoraneo per l'intero tratto di costa interessato con riferimento sia alla configurazione di stato attuale, sia a quella di progetto (valori positivi del trasporto indicano che questo è diretto verso Nord).

Si può affermare che nella configurazione di progetto, relativa al nuovo layout, l'andamento del trasporto risulta molto simile a quello in configurazione attuale. Le differenze si apprezzano fino a circa 4000 m a Nord della foce dello Scolmatore. Nello specifico, l'effetto di schermatura dal moto ondoso dovuto alla presenza della Darsena Europa, nella nuova configurazione progettuale, determina una riduzione dei valori del trasporto, che progressivamente tende ad annullarsi procedendo verso Nord. Nel tratto compreso tra la foce e circa 1500 m a Nord i valori del trasporto nella configurazione di progetto risultano negativi, ovvero tale tratto è caratterizzato da un trasporto diretto verso Sud. L'impatto risulta sicuramente maggiore in caso di realizzazione della Darsena Europa secondo il nuovo layout proposto rispetto a quanto visto per il layout vecchio.

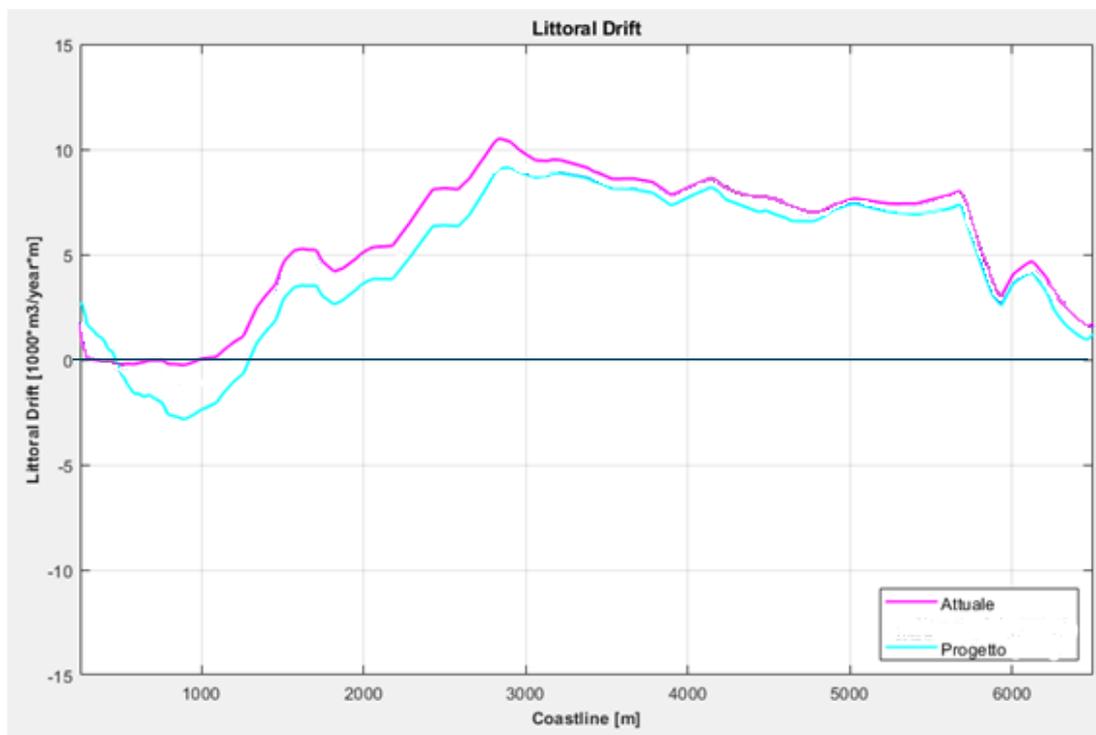


Figura 8-11 Trasporto long-shore in riferimento alla configurazione di stato attuale (linea magenta) e di progetto (linea ciano). Valori positivi del trasporto indicano che questo è diretto verso Nord

9 Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento tradizionale

Le attività numeriche illustrate nella precedente sezione hanno permesso di quantificare gli impatti della Darsena Europa sul litorale pisano in termini di evoluzione della linea di riva. In questa sede si illustra l'esito delle simulazioni atte a verificare l'efficacia un intervento di compensazione finalizzato a mitigare tali effetti. L'intervento identificato in prima battuta per la mitigazione consiste in un ripascimento di tipo tradizionale.

9.1 Individuazione delle aree più critiche

Le attività condotte hanno evidenziato che il tratto di costa oggetto di studio è caratterizzato da un sostanziale equilibrio in termini evolutivi. 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, come evidenziato in Figura 9-1.

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 9-2, 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.

Differenze tra Progetto e Stato attuale sono apprezzabili anche tra Calambrone e Tirrenia, indicativamente tra le ascisse 2700 e 3700. Questo tratto di litorale risulta tuttavia in leggero avanzamento per cui lo scenario di progetto risulta caratterizzato da un minore avanzamento rispetto allo scenario di stato attuale, di conseguenza non sussistono le criticità evidenziate nel tratto analizzato precedentemente.

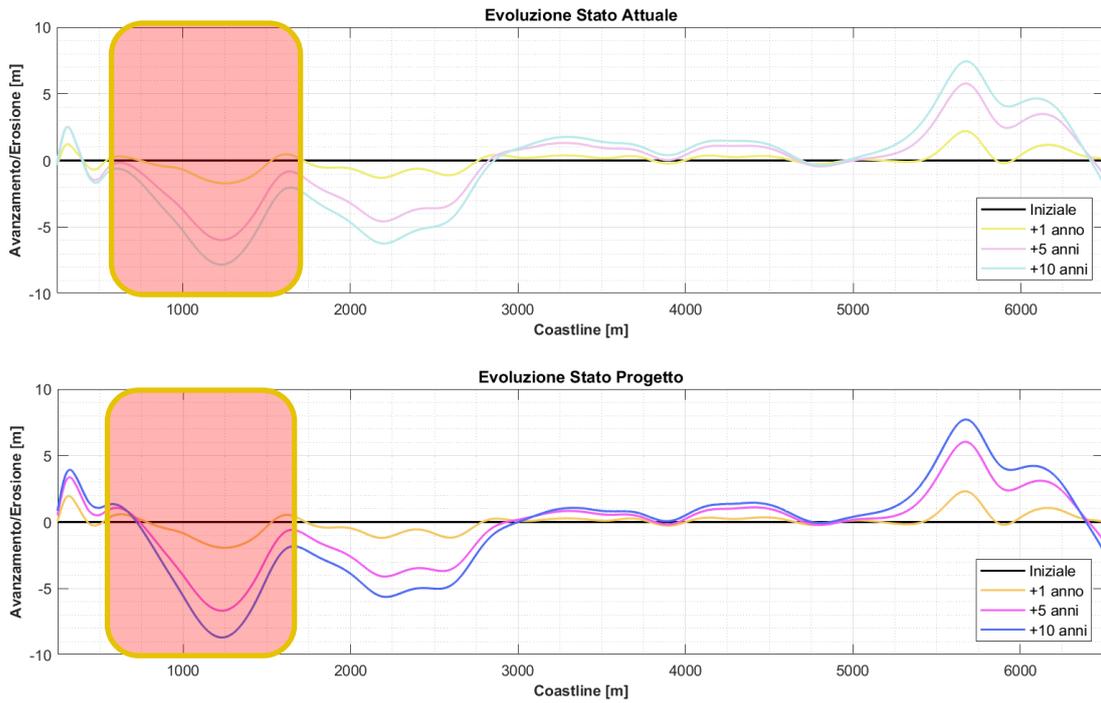


Figura 9-1 Identificazione del tratto di costa caratterizzato dal maggiore arretramento della linea di riva con riferimento alla configurazione di stato attuale ed a quella di progetto

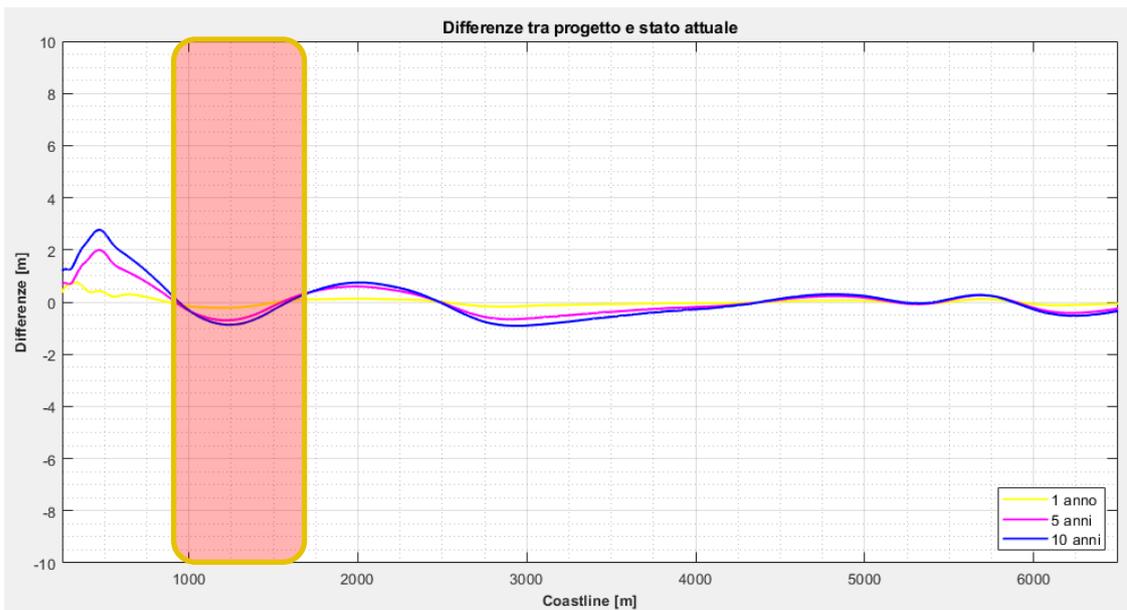


Figura 9-2 Identificazione del tratto caratterizzato dai maggiori incrementi di arretramento a fronte della realizzazione della Darsena Europa

9.2 Simulazione degli effetti di un ripascimento tradizionale

A fronte di tali evidenze si è ritenuto opportuno ipotizzare un ripascimento di volume minimo pari a 10'000 m³, 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 m³ a cui corrisponde, approssimativamente, un avanzamento medio della linea di riva (per una lunghezza di 500 m) di 8-10 m (Figura 9-3).

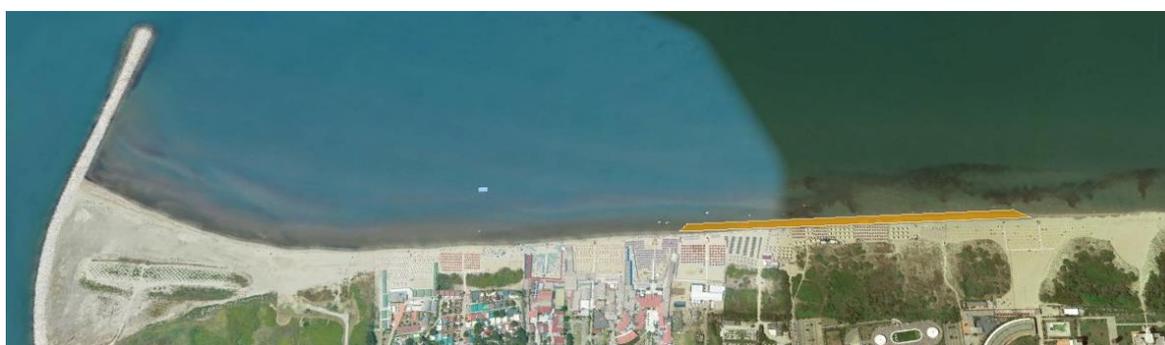


Figura 9-3 Ubicazione del ripascimento (in arancione)

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.

I risultati dell'evoluzione della linea di costa sono presentati in Figura 9-4 e Figura 9-5 (dove per semplicità di lettura sono riportati anche quelli relativi alla configurazione in assenza di 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.

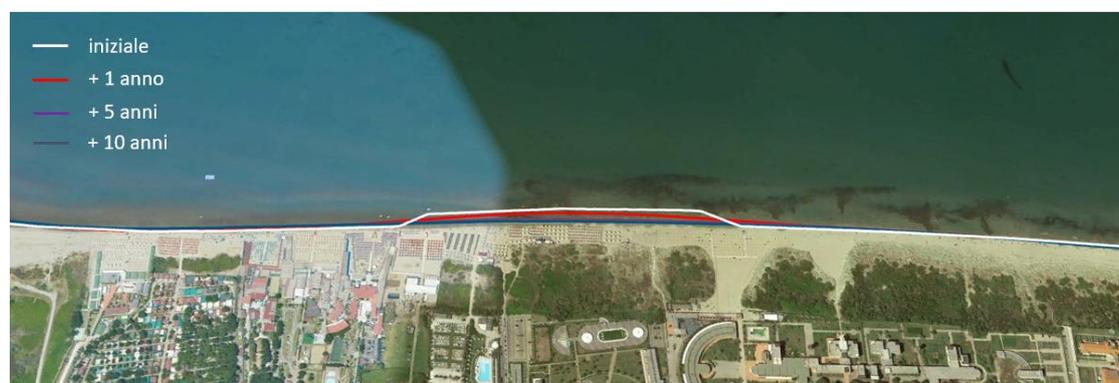


Figura 9-4 Evoluzione della linea di riva per il litorale di Calambrone oggetto di ripascimento

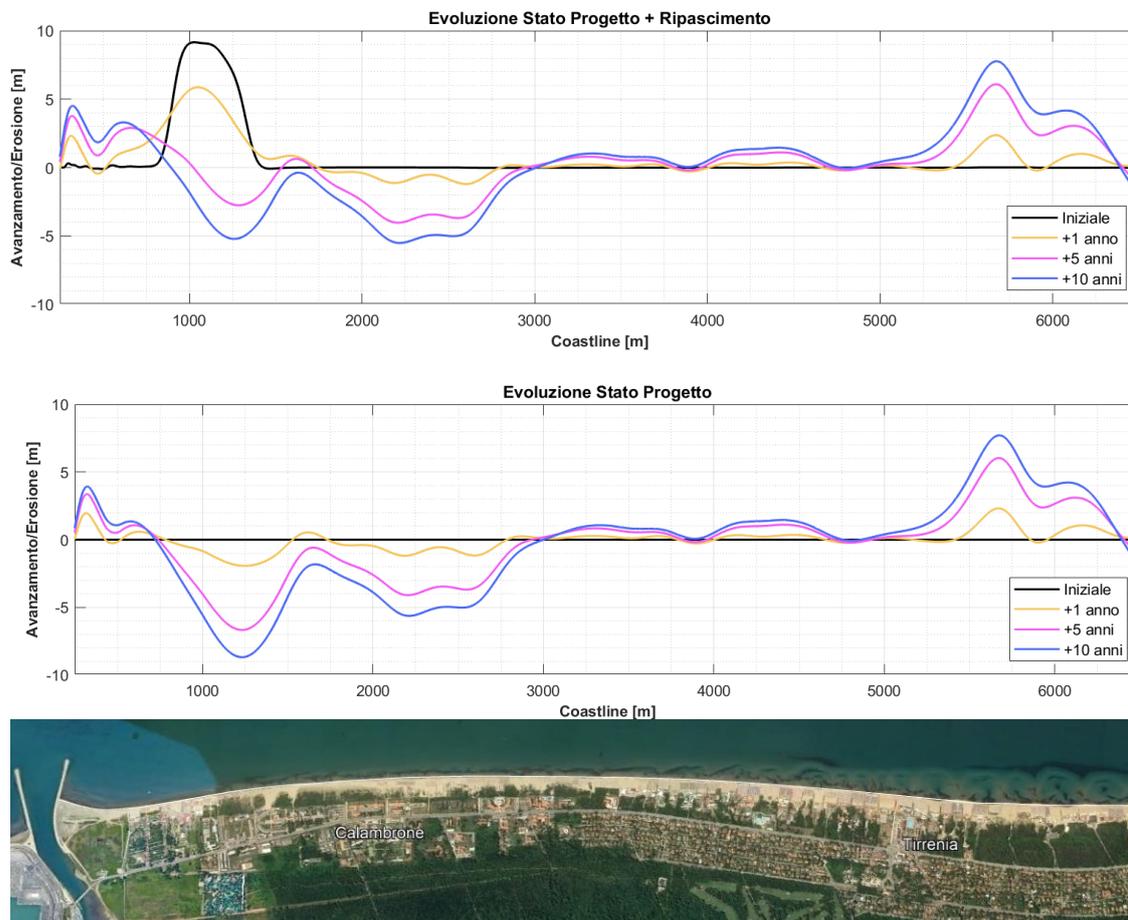


Figura 9-5 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di progetto (Darsena Europa) comprensivo del ripascimento ipotizzato a Calambrone

10 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.

Il Governo olandese, con il supporto e la collaborazione della comunità scientifica, ha realizzato nel 2011, lungo la Delfland Coast, un intervento di protezione costiera di dimensione senza precedenti (21.5 Mm³ di sabbia), con un approccio denominato “Sand Engine”. La forma assunta dalla sabbia riversata in mare è stata progettata in modo tale da permettere la creazione di aree aggiuntive, sia per scopi ambientali che per le attività prettamente ricreative. L'obiettivo principale del progetto era ed 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). Il problema dell'erosione costiera è presente anche in Italia, dove circa un terzo delle spiagge sono attualmente soggette a fenomeni erosivi significativi. Le cause dell'erosione sono molteplici, sia naturali (risalita del livello del mare, subsidenza naturale, cicli pluridecennali di configurazioni meteorologiche), sia riconducibili più o meno direttamente all'influenza antropica (tra le altre alterazione della capacità dei fiumi di trasportare sedimenti al mare, realizzazione di infrastrutture lungo la costa che possono influenzare il trasporto litoraneo, subsidenza antropica, cambiamenti climatici tali da alterare il livello marino e/o le configurazioni meteorologiche).

I tecnici del comune di Pisa hanno chiesto a DHI di investigare l'efficacia di tale tipologia di soluzione anche nel contesto del litorale pisano, ad integrazione degli studi già affidati nel 2021 ed illustrati nel presente elaborato. Il Sand Engine, configurandosi come strumento innovativo di protezioni di litorali richiede, per un efficace supporto alla progettazione, l'applicazione di strumenti modellistici altrettanto innovativi. Non risulta possibile infatti simulare, con i modelli numerici tradizionali, le intense dinamiche di erosione ed accumulo di sedimenti in corrispondenza di un intervento così particolare. Il paragrafo a seguire riporta un'analisi dei requisiti tecnico scientifici necessari al modello finalizzato a simulare le dinamiche del Sand Engine.

10.1 Requisiti tecnico scientifici del modello finalizzato a simulare le dinamiche di Sand Engine

Al fine di modellare i complessi fenomeni della dinamica costiera collegati alla realizzazione di un intervento di Sand Engine, c'è la necessità di avere uno strumento articolato che riesca a simulare contestualmente diverse fenomenologie e che abbia le seguenti caratteristiche:

- capacità di simulare con approccio bidimensionale la propagazione del moto ondoso dal largo verso riva, utilizzando un approccio di tipo spettrale in grado di riprodurre i fenomeni di rifrazione, shoaling, attrito con il fondo e frangimento;
- capacità di simulare con approccio bidimensionale le correnti generate dal moto ondoso incidente. Nello specifico, durante la propagazione verso la costa l'onda subisce diverse trasformazioni; una delle trasformazioni più rilevanti nello studio delle dinamiche costiere è il processo di rifrazione: la rotazione del fronte d'onda che tende a disporsi parallelo alle isobate ed alla linea di costa è in grado di determinare l'insorgenza di sforzi di taglio al fondo (radiation stress). I gradienti dei radiation stress, massimi in corrispondenza della zona dei frangenti,

sono i responsabili della generazione delle correnti litoranee. A parità di direzione di incidenza dell'onda, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'altezza d'onda al frangimento. A parità di altezza d'onda al frangimento, i gradienti di radiation stress, e quindi le correnti litoranee, sono tanto più elevati quanto maggiore è l'angolo di incidenza tra il fronte d'onda e le isobate;

- capacità di simulare con approccio bidimensionale gli effetti dell'azione combinata di onde e correnti sulle dinamiche di trasporto sedimentario litoraneo, con identificazione delle zone più attive dal punto di vista morfodinamico e quindi le aree soggette ad accumulo o erosione;
- capacità di accoppiare dinamicamente, all'interno della stessa simulazione, i fenomeni sopra riportati. La necessità nasce dal poter simulare gli effetti delle correnti sulla propagazione dell'onda e viceversa e di permettere di utilizzare una batimetria sempre aggiornata dinamicamente (sulla base dei risultati della simulazione allo step di calcolo precedente) in relazione ai volumi accumulati ed erosi nel corso della mareggiata.

Il modello deve inoltre includere le seguenti caratteristiche:

- possibilità di modellare l'evoluzione di un tratto di costa molto obliquo rispetto all'angolo di attacco delle onde;
- possibilità di modellare tratti di costa caratterizzati da forti curvature e quindi contraddistinti da fenomenologie di trasporto intense e peculiari, tipiche degli accumuli di sabbia tipo "Sand Engine";
- capacità di elaborare ed integrare i risultati dei modelli bidimensionali, trasferendo gli effetti bidimensionali di onda e corrente nella evoluzione della linea di costa, al fine di simulare l'avanzamento o l'arretramento della linea di riva anche su periodi lunghi (scala temporale degli anni e non delle singole mareggiate, come tipicamente avviene nei modelli bidimensionali);
- flessibilità e possibilità di introdurre all'interno del sistema diverse forzanti come: oscillazioni di marea, storm surge, vento, onda.

Il modello candidato a rispondere ai requisiti sopra riportati è stato individuato nel nuovo modello della suite MIKE Powered by DHI denominato MIKE 21 Shoreline Morphology Model. Tale modello, integrando diversi moduli esistenti del pacchetto MIKE, è in grado di combinare in un unico strumento modelli bidimensionali per la simulazione delle onde, correnti e trasporto e un modello monodimensionale per la descrizione dell'evoluzione della linea di riva. Questa specifica attitudine rende lo Shoreline Morphology Model particolarmente indicato a studiare dinamiche complesse come quelle che si attivano in corrispondenza di un intervento di Sand Engine

10.2 Descrizione del MIKE21 Shoreline Morphology

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

MIKE 21 SW (Spectral Waves) è il modello utilizzato per risolvere la propagazione delle onde in aree costiere ed offshore. Il modello è stato sviluppato dal DHI ed è in grado di simulare i fenomeni che hanno luogo nella propagazione del moto ondoso da largo verso riva. Tale modello, risolve la cosiddetta "Wave action balance equation" in riferimento ad una maglia triangolare non strutturata. Questo aspetto risulta fondamentale perché permette di utilizzare una maglia di calcolo variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, shoaling, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

MIKE 21 HD (HydroDynamics) è il modello utilizzato per risolvere la generazione e propagazione delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso. Il modello risolve la cosiddetta "non-linear shallow water equations" in riferimento alla stessa maglia di calcolo utilizzata per il modello d'onda. Nello specifico, il modello idrodinamico viene forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'applicazione di MIKE21 SW e consente di ottenere la distribuzione delle principali variabili idrodinamiche, quali: velocità di corrente, direzione della corrente e livelli.

MIKE 21 ST (Sand Transport) è il modello utilizzato per calcolare, una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (D50) e di variabilità del fuso (sediment gradation), la capacità di trasporto dovuta all'azione combinata di onde e correnti. Il modello inoltre permette di calcolare, in funzione dei gradienti di capacità di trasporto, i volumi erosi o depositati per ciascun elemento della mesh di calcolo.

MIKE 21 SM (Shoreline Module) è infine il modulo che, sulla base delle caratteristiche dell'onda, idrodinamiche e del trasporto variabili nel tempo e nel dominio di calcolo, fornisce l'evoluzione della linea di riva. Il modello divide l'intero dominio di calcolo in un numero finito di "strisce" perpendicolari alla linea di costa. Per ognuna delle strisce viene risolta l'equazione riportata di seguito, denominata "one-line modified equation":

$$\frac{dn}{dt} = \frac{vol}{dA_z}$$

dove dn rappresenta l'avanzamento o l'arretramento della linea di riva (*shoreline*) lungo la perpendicolare alla linea di costa nell'intervallo temporale dt ; vol è il volume accumulato/eroso nell'intera striscia durante l'intervallo temporale e dA_z rappresenta l'area della striscia proiettata sul piano verticale come mostrato nella Figura 10-1.

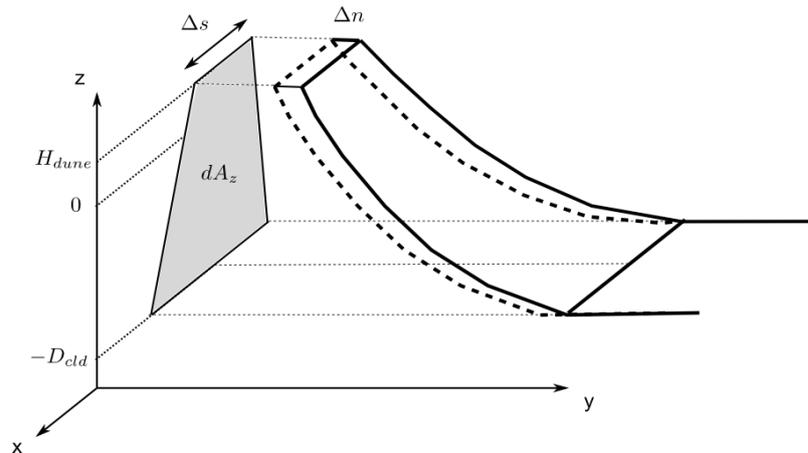


Figura 10-1 Schema della one-line modified equation

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. I moduli d'onda ed idrodinamico sono inoltre accoppiati dinamicamente, ovvero nella propagazione dell'onda si utilizzano la distribuzione dei livelli e delle correnti generate dal modulo idrodinamico e viceversa il calcolo delle variabili idrodinamiche è influenzato dai campi di altezza d'onda (in termini di *radiation stress*). Lo schema funzionale del modello è illustrato in Figura 10-2.

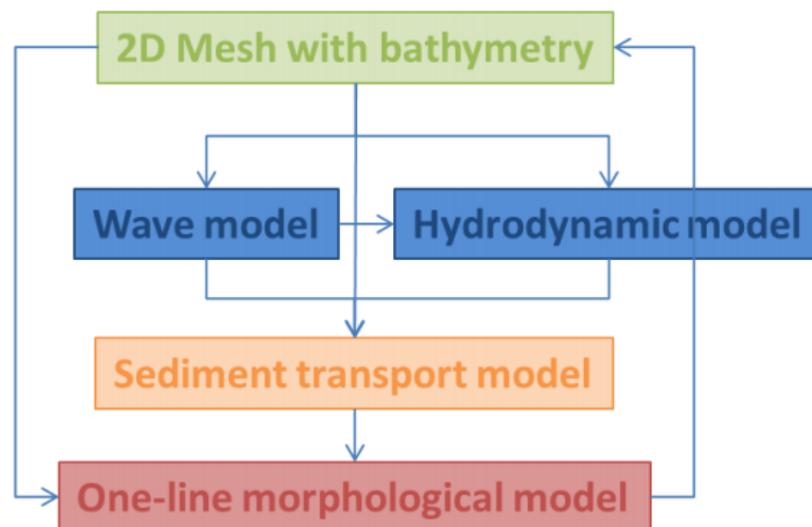


Figura 10-2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model

10.3 Applicabilità del MIKE 21 Shoreline Morphology Model nel simulare le dinamiche di trasporto in corrispondenza di un intervento di Sand Engine

Al fine di verificare l'adeguatezza dello strumento identificato per simulare le dinamiche di trasporto sedimentario connesse al progetto di Sand Engine lungo il litorale romagnolo, si illustra in questa sezione il caso studio relativo all'applicazione del MIKE 21 Shoreline Morphology Model al caso del Sand Engine olandese, realizzato lungo la Delfland Coast.

Come illustrato in premessa, 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 descritto al in precedenza. L'applicazione del modello al caso olandese ed i risultati ottenuti sono stati oggetto di pubblicazione scientifica. Il modello è stato calibrato sulla base dei dati riportati nel portale istituzionale dedicato al progetto stesso (www.dezandmotor.nl). In particolare, secondo quanto specificato nel sito del progetto, si può affermare quanto segue:

- il progetto consiste in un mega ripascimento di 21.5 milioni di m³ di sabbia;
- in riferimento alla situazione immediatamente successiva alla realizzazione, sono già stati movimentati un totale di 2.5 milioni di m³ di sabbia, di cui:
 - circa 1.14 milioni di m³ sono stati trasportati verso nord;
 - circa 680'000 m³ sono stati trasportati verso sud;
 - circa 740'000 m³ sono stati trasportati verso il largo
- una grande quantità di sabbia è stata movimentata nel periodo immediatamente successivo alla posa della sabbia, quanto il Sand Engine presentava ancora una forma artificiale;
- come atteso, le mareggiate accelerano la movimentazione dei sedimenti.

In Figura 10-3 è illustrata la batimetria nella zona del Sand Engine in riferimento a 4 rilievi effettuati in momenti diversi, a partire dall'agosto 2011 fino a dicembre 2013.

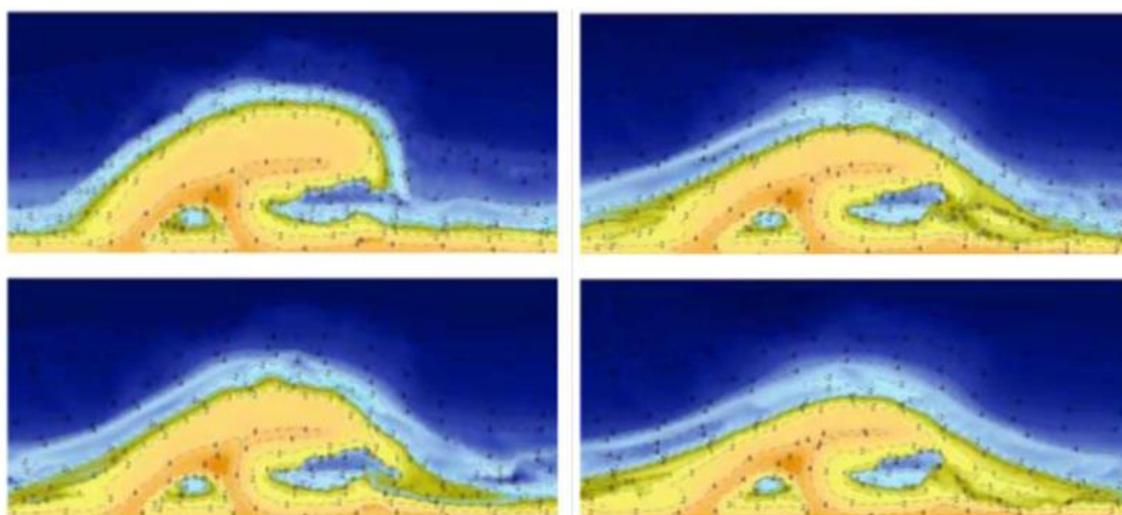


Figura 10-3 Rilievi batimetrici della zona del Sand Engine olandese in 4 momenti diversi: Agosto 2011 (in alto a sinistra), Febbraio 2012 (in basso a sinistra), Febbraio 2013 (in alto a destra) e Dicembre 2013 (in basso a destra)

Sulla base dei dati acquisiti è stata realizzata la mesh di calcolo in riferimento alla batimetria iniziale (Agosto 2011), illustrata in Figura 10-4. La mesh così costituita presenta 3 contorni aperti (SO, NO e NE).

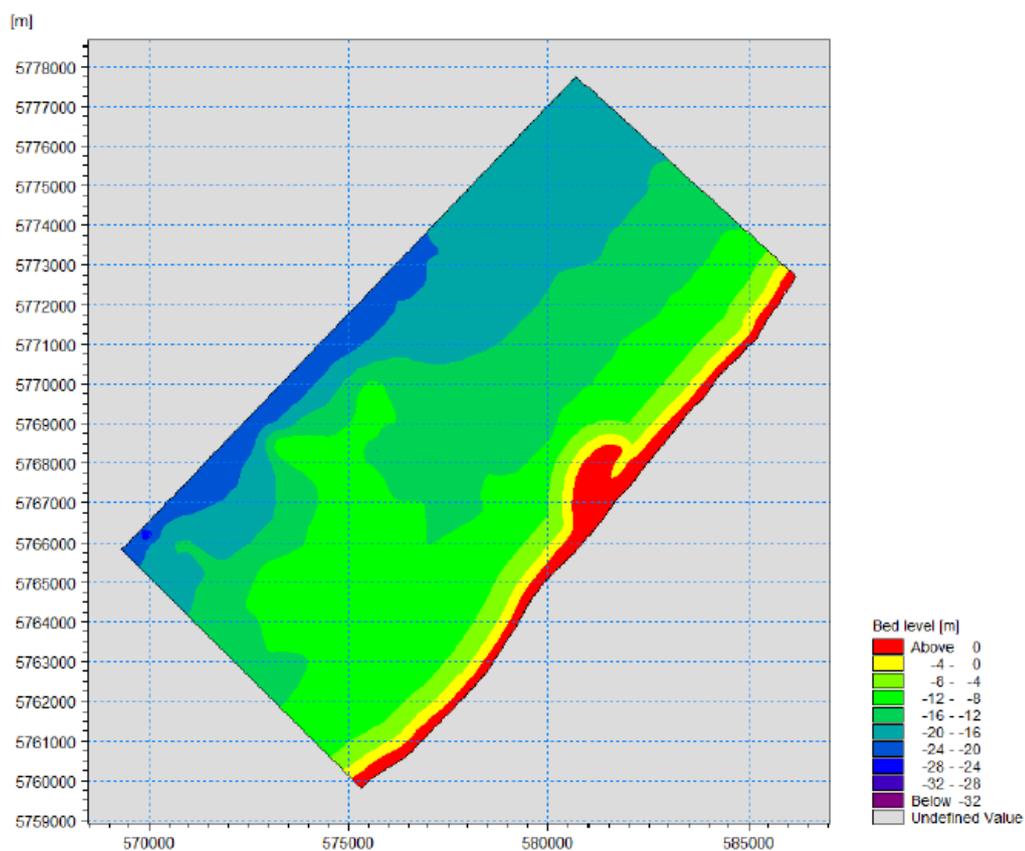


Figura 10-4 Batimetria di calcolo iniziale del modello

Il modello è stato forzato ai contorni aperti dai dati di moto ondoso (altezza, periodo e direzione dell'onda), e per l'intero dominio da campi di vento (Velocità e direzione del vento). Tali dati sono derivati dal database del Mar del Nord (modalità *hindcast*) sviluppato dal DHI.

In Figura 10-5 è illustrata la mappa delle “strisce” perpendicolari alla linea di costa, la cui predisposizione costituisce una tra le più importanti attività propedeutiche all'applicazione dello Shoreline Morphology Module. Il modello, come spiegato in precedenza, risolve per ognuna delle strisce la “one-line modified equation”. I punti che formano la linea di costa, e che sono illustrati nella Figura 10-5, sulla base dei risultati del modello morfologico, si muoveranno perpendicolarmente alla linea di costa all'interno della striscia di appartenenza.

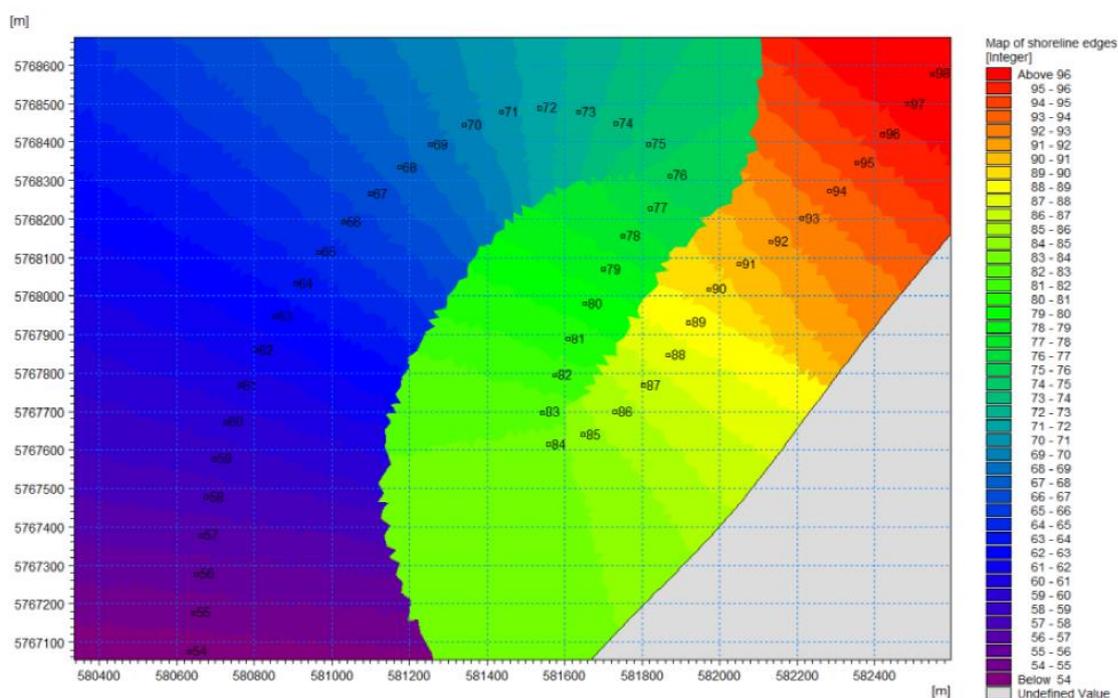


Figura 10-5 Illustrazione delle “strisce” dello Shoreline Morphology Module e dei punti che formano la linea di costa in corrispondenza del Sand Engine

La simulazione di calibrazione del modello è stata predisposta per il periodo compreso tra il mese di agosto 2011 e il mese di dicembre 2013, date rispettivamente del primo e dell'ultimo rilievo batimetrico disponibile. Successivamente alla simulazione del periodo di calibrazione è stato possibile eseguire un *run* più lungo, al fine di simulare l'evoluzione attesa della linea di costa a medio-lungo termine.

In Figura 10-6 sono presentati i risultati del modello in termini di: altezza e direzione dell'onda, velocità e direzione di corrente e velocità di erosione / accrescimento (“*rate of bed level change*”). In Figura 10-7 è presentata l'evoluzione del modello in corrispondenza degli istanti temporali in cui si hanno a disposizione i rilievi (Figura 10-3), mentre in Figura 10-8 è presentata l'evoluzione a medio-lungo termine (fino a 20 anni) della forma del Sand Engine. E' interessante notare che dopo soli due anni (fine 2013), la forma del Sand Engine si è regolarizzata notevolmente: la lingua di mare presente inizialmente nel lato di Nord Est è infatti scomparsa. Si può inoltre notare che dopo i 10 anni la linea di costa tende ad essere molto più regolare.

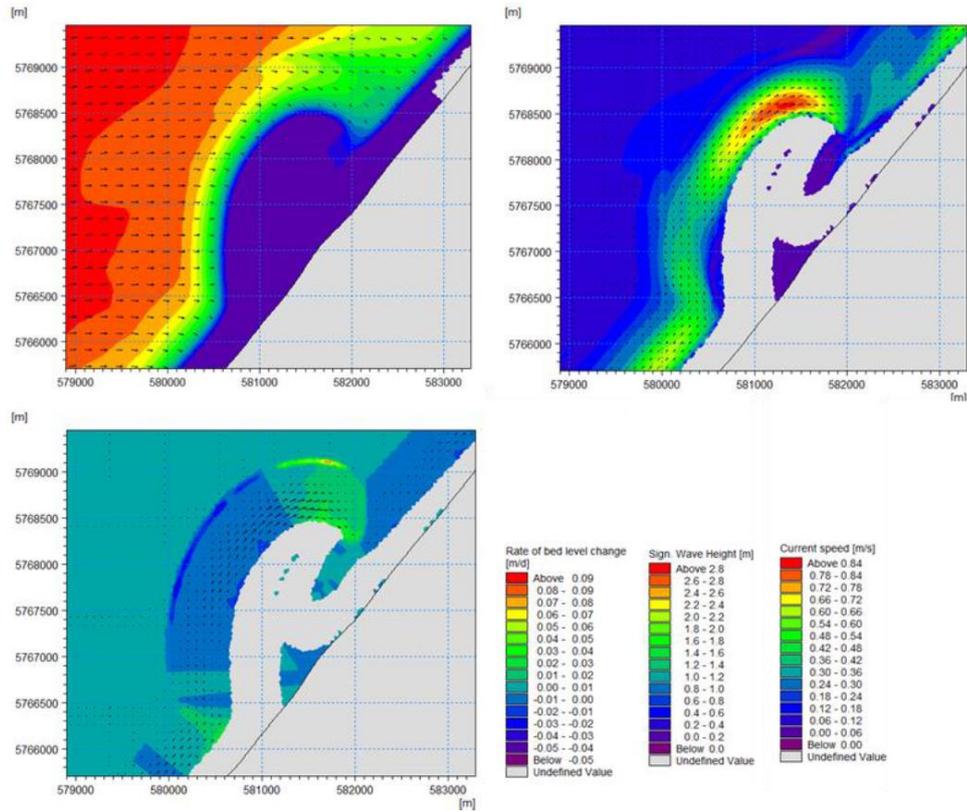


Figura 10-6 Risultati del modello, in termini di: distribuzione dell'altezza d'onda, velocità di corrente e "rate of bed level change"

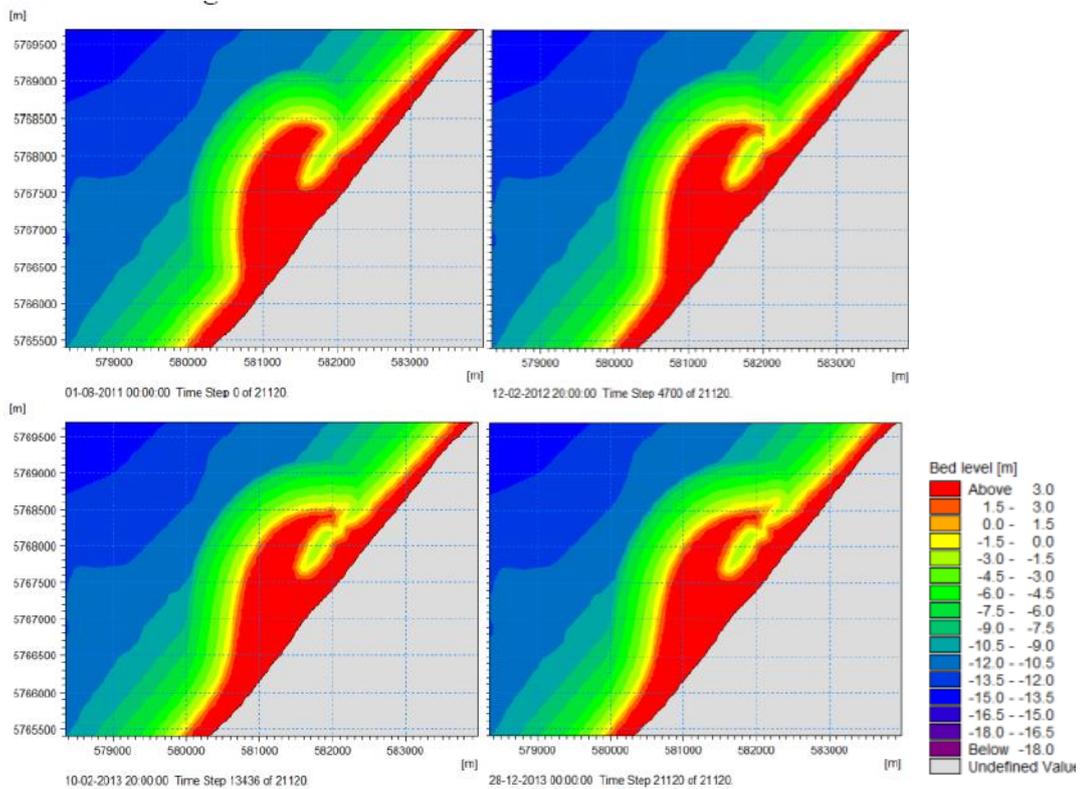


Figura 10-7 Evoluzione del Sand Engine 4 momenti diversi: Agosto 2011 (in alto a sinistra), Febbraio 2012 (in alto a destra), Febbraio 2013 (in basso a sinistra) e Dicembre 2013 (in basso a destra)

La capacità del modello di riprodurre l'evoluzione del biennio 2011-2013 occorsa nel tratto di litorale oggetto dell'intervento di Sand Engine si è rivelata buona, anche utilizzando semplificazioni significative (per limitare parzialmente gli elevati oneri computazionali richiesti inizialmente, è stato infatti trascurato l'effetto delle correnti di marea nelle dinamiche di trasporto). Il modello calibrato è stato quindi successivamente impiegato per la simulazione delle dinamiche attese nel lungo periodo (fino a 20 anni, Figura 10-8).

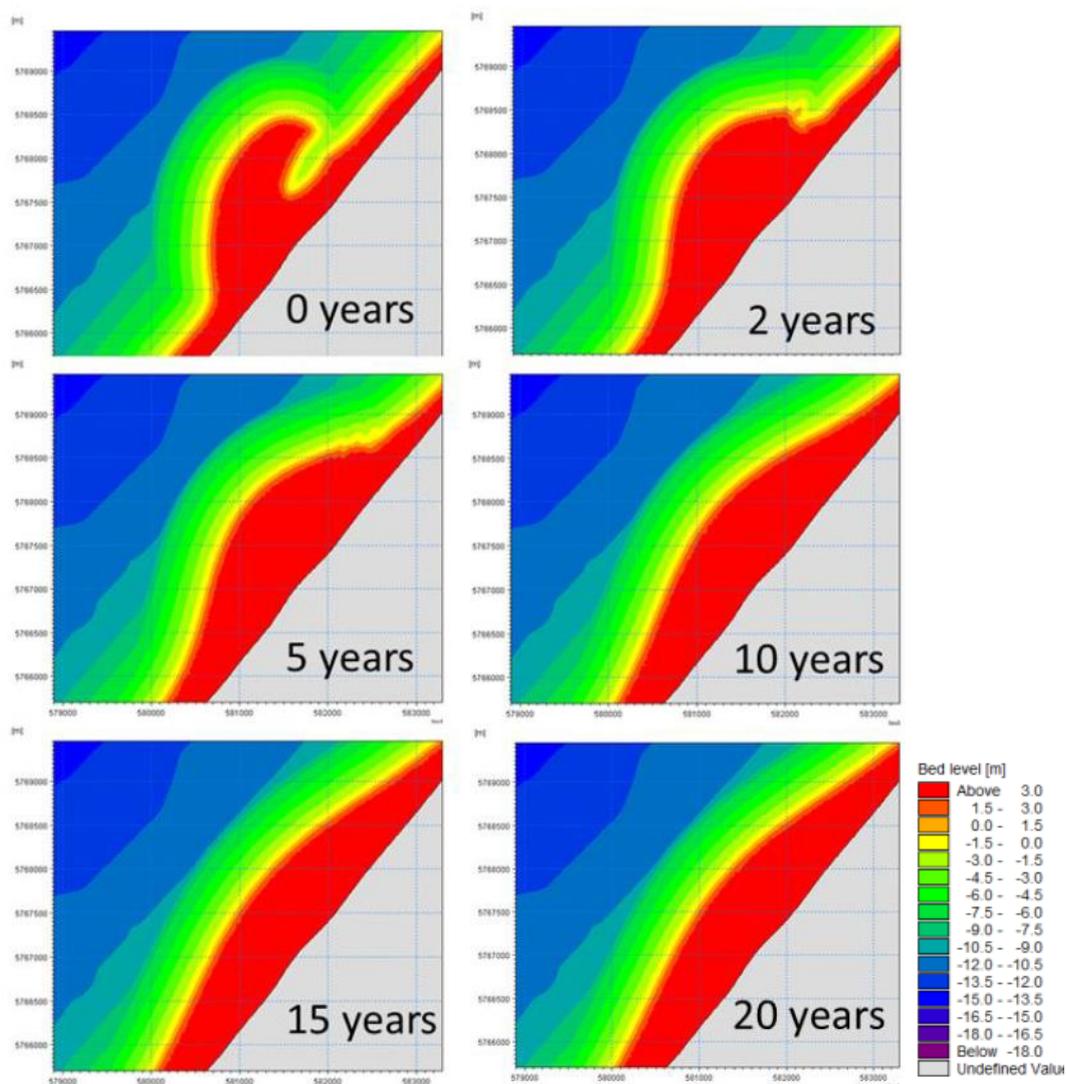


Figura 10-8 Evoluzione a medio-lungo termine del Sand Engine

In virtù della capacità di rispondere ai requisiti tecnico-scientifici richiesti e a seguito dei promettenti risultati ottenuti nell'applicazione relativa al Sand Engine olandese, il modulo MIKE 21 Shoreline Morphology è stato ritenuto idoneo per essere impiegato nelle simulazioni del Sand Engine sul litorale pisano. Per l'applicazione specifica, sono risultate necessarie estensive attività di calibrazione e validazione, che saranno illustrate in seguito. In parallelo, come richiesto da Eni, è stata sviluppata la modalità di accoppiamento del processo di subsidenza alle dinamiche simulate dal modello. Quest'ultima attività risulta tuttora in corso ed i risultati saranno oggetto del report finale del progetto.

10.4 Implementazione e simulazione del sand engine sul litorale pisano

I risultati del modello di evoluzione della linea di riva, illustrati alla sezione 8, hanno evidenziato che il tratto di costa oggetto di studio è caratterizzato da un sostanziale equilibrio in termini evolutivi, sebbene ci siano delle aree che presentano alcune criticità in termini erosivi. Nello specifico tali aree, 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, come evidenziato in Figura 9-1.

In riferimento a tali aree è stato condotto un approfondimento modellistico (sezione 9) che prevede l'implementazione di un ripascimento di tipo tradizionale, caratterizzato da un volume di sedimenti relativamente contenuto (circa 10'000 m³), a compensazione della perdita di sedimenti stimata, per il litorale di Calambrone, a causa della realizzazione della Darsena Europa.

Di seguito, viene presentata un'analisi dell'efficacia di un metodo di ripascimento non convenzionale, caratterizzato da volumi significativamente maggiori (da 100'000 m³ a 200'000 m³), con l'obiettivo non solo di mitigare i fenomeni erosivi presenti nella zona di Calambrone, ma anche di "nutrire" il tratto di costa più a Nord fino al litorale di Marina di Pisa (non oggetto del presente 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.

Attraverso l'utilizzo del modello MIKE21 SM è possibile valutare la durata del Sand Engine, ovvero la velocità di smantellamento del volume di ripascimento, la sua lunghezza di influenza, nonché analizzare gli effetti sull'evoluzione del tratto immediatamente a sud di Marina di Pisa. Tra i vari obiettivi, di grande importanza è la verifica della capacità dei sedimenti progressivamente smantellati dal Sand Engine di raggiungere il litorale di Marina di Pisa a nord, e le tempistiche di questo processo.

10.4.1 Descrizione dell'intervento

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. In Figura 10-9 è riportata una rappresentazione delle due configurazioni di sand engine mentre in Tabella 10-1 ne sono riportate le caratteristiche geometriche.

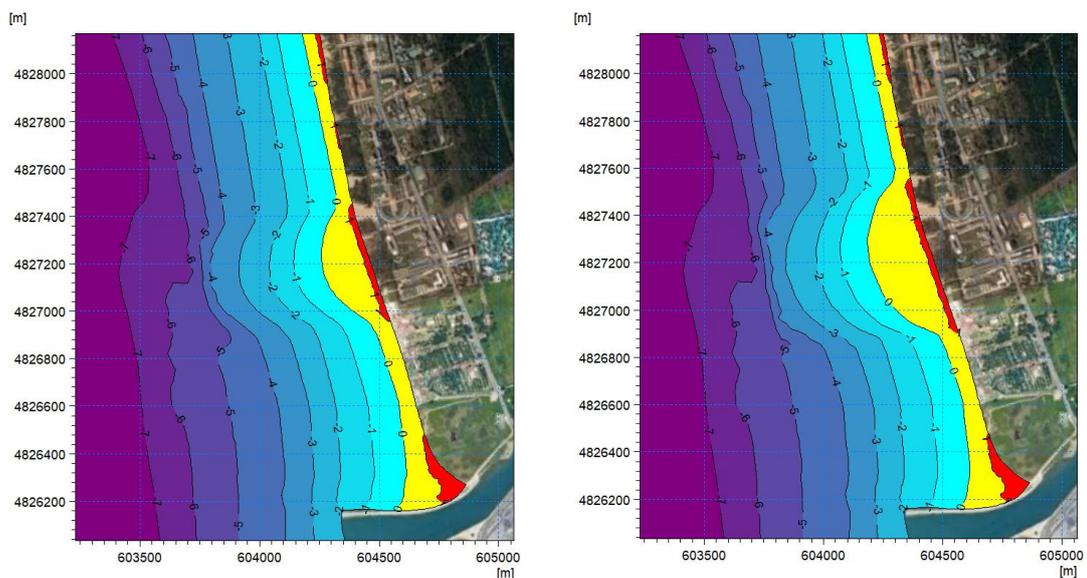


Figura 10-9 Ipotesi di Sand Engine nella configurazione da 100'000m³ (a sinistra) e 200'000m³ (a destra)

Tabella 10-1 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 |

Si è ipotizzato che il profilo trasversale di ripascimento mantenga localmente la stessa pendenza del profilo di spiaggia attuale e che venga utilizzata sabbia con caratteristiche granulometriche analoghe a quelle esistenti.

10.4.2 Estensione del modello e batimetria

Il MIKE 21 Shoreline Morphology Model, è stato implementato su un dominio di calcolo sufficientemente esteso da riprodurre i fenomeni costieri che caratterizzano l'area oggetto di studio. In particolare, il dominio è delimitato a sud dalla darsena Europa, nella nuova configurazione di progetto, e a Nord dal litorale di marina di Pisa. Il limite offshore è stato posto intorno alla batimetrica dei 12m.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP, ed ai rilievi batimetrici disponibili. Il dominio di calcolo è caratterizzato da due contorni aperti: Nord ed Offshore, in corrispondenza dei quali sono applicate delle specifiche condizioni al contorno dettagliate nel seguito. Il contorno Sud è stato impostato come chiuso poiché risulta delimitato dai moli in progetto della Darsena Europa. In Figura 10-10 è illustrata l'estensione del dominio del modello con l'indicazione dei contorni aperti insieme con la mesh di calcolo.

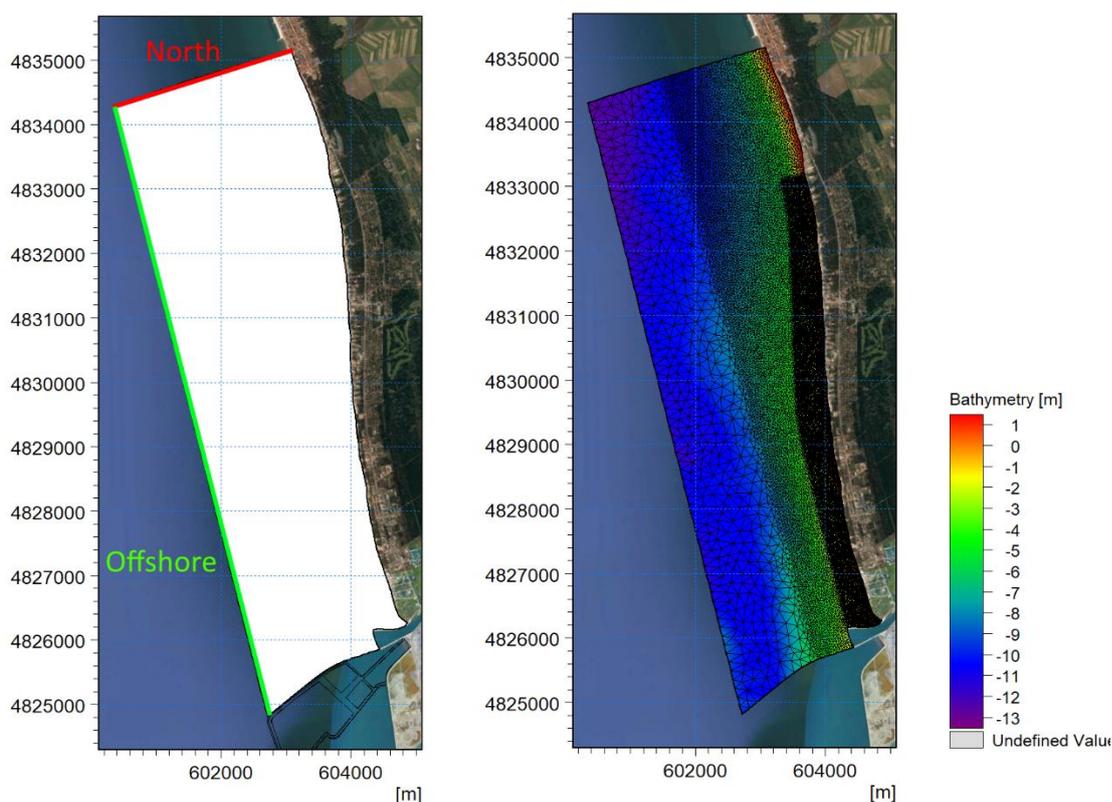


Figura 10-10 Estensione del dominio di calcolo e dati batimetrici utilizzati

La mesh di calcolo è stata costruita utilizzando l'approccio a maglia flessibile non strutturata, che permette di variare la risoluzione incrementandola nelle zone dove risulta necessario avere un dettaglio maggiore. Nel caso specifico, al largo è stata utilizzata una risoluzione, intesa come lunghezza media del lato del triangolo costituente la mesh, di circa 150m; nell'avvicinamento a costa la risoluzione è gradualmente maggiore, fino ad essere pari a circa 10 m nella zona di maggiore interesse, la zona dei frangenti (surf zone) ove si concentra la quasi totalità delle dinamiche di trasporto sedimentario. La mesh di calcolo è caratterizzata da un numero di elementi pari a circa 47'000, ottenuta mediante uno specifico tool interno al pacchetto MIKE.

10.4.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno del modello ibrido devono essere specificate, per ognuno dei tre contorni aperti del modello, in riferimento ai tre moduli MIKE 21 SW, HD ed ST. In altre parole, le condizioni al contorno vanno specificate in termini di moto ondoso, livelli, correnti e trasporto di sedimenti.

Per quanto riguarda il modulo d'onda (MIKE 21 SW) i dati sono stati derivati dal modello di hindcast realizzato illustrato al capitolo 5 e nello specifico in riferimento alle simulazioni che considerano la presenza della Darsena Europa.

Da tale modello è stato possibile estrarre per l'intera lunghezza della condizione al contorno offshore, i dati del moto ondoso in termini di altezza d'onda significativa (H_s), periodo di picco (T_p), direzione media di provenienza (MWD) e deviazione standard direzionale (DSD). Tali parametri, disponibili per il periodo 1979-2021, sono stati poi applicati al modello ibrido. Il contorno Nord è stato invece settato come "lateral boundaries". In corrispondenza di una condizione al contorno di tipo "lateral boundary" il modello calcola una soluzione semplificata delle equazioni lungo il contorno (approccio monodimensionale) a partire dalle caratteristiche dell'onda nel punto di incontro tra il contorno laterale e quello offshore ed in funzione del profilo batimetrico lungo il contorno laterale stesso. Tale condizione al contorno consente quindi alle onde di propagarsi da e verso l'esterno del dominio di calcolo senza influenzare il risultato all'interno del dominio stesso.

Le condizioni al contorno idrodinamiche, relative al modulo MIKE 21 HD, sono state impostate in termini di livelli della superficie marina. Nel caso specifico sono stati assunti trascurabili, ai fini del trasporto litoraneo sulle scale temporali di interesse, sia il vento, sia l'oscillazione di marea. Ai contorni aperti del modello è stato pertanto impostato un livello marino costante (nel tempo e nello spazio) pari al livello medio mare corretto automaticamente dal modello in funzione dell'effetto dell'onda incidente sui livelli in corrispondenza della zona dei frangenti. Questo approccio, pur nelle semplificazioni adottate, permette di simulare con oneri computazionali elevati ma compatibili con le tempistiche del progetto l'evoluzione del litorale per periodi anche molto lunghi (fino a 20 anni).

Le condizioni al contorno in termini di trasporto di sedimenti, relative al modulo MIKE 21 ST, sono state specificate in modo tale da garantire un gradiente di capacità di trasporto nullo in caso di flusso uscente dal dominio di calcolo e un trasporto in grado di non determinare alcuna variazione del fondo lungo il contorno in caso di flusso entrante nel dominio di calcolo.

10.4.4 Input al MIKE 21 Shoreline Morphology Module

Il MIKE 21 Shoreline Morphology Module, come illustrato nella sezione 10.2 calcola l'evoluzione della linea di riva una volta note tutte le caratteristiche del moto ondoso ed idrodinamiche, in riferimento ad un numero finito di strisce perpendicolari alla linea di costa. Per ognuna delle strisce viene risolta una sorta di bilancio volumetrico. Al fine di effettuare questo calcolo risulta quindi necessario predisporre una mappa, attraverso la quale una parte del dominio di calcolo (quella di cui di interesse per l'evoluzione della linea di riva) viene suddiviso in numero finito di strisce perpendicolari alla linea di costa, ognuna delle quali caratterizzate da un codice. I punti che formano la linea di costa, si muoveranno quindi all'interno della striscia di appartenenza, sulla base di risultati calcolati dallo Shoreline Module.

Nel caso specifico, è stato individuato un sotto dominio che è stato successivamente suddiviso in 122 strisce perpendicolari alla linea di costa, ognuna delle quali è contraddistinta da un codice (da 1 a 122). Il codice 1 è relativo alla striscia immediatamente a Nord della foce scolmatore, mentre il codice 122 è relativo alla striscia più a Nord. In Figura 10-11 è riportata la mappa delle strisce fornita in input al modello MIKE21 SM.

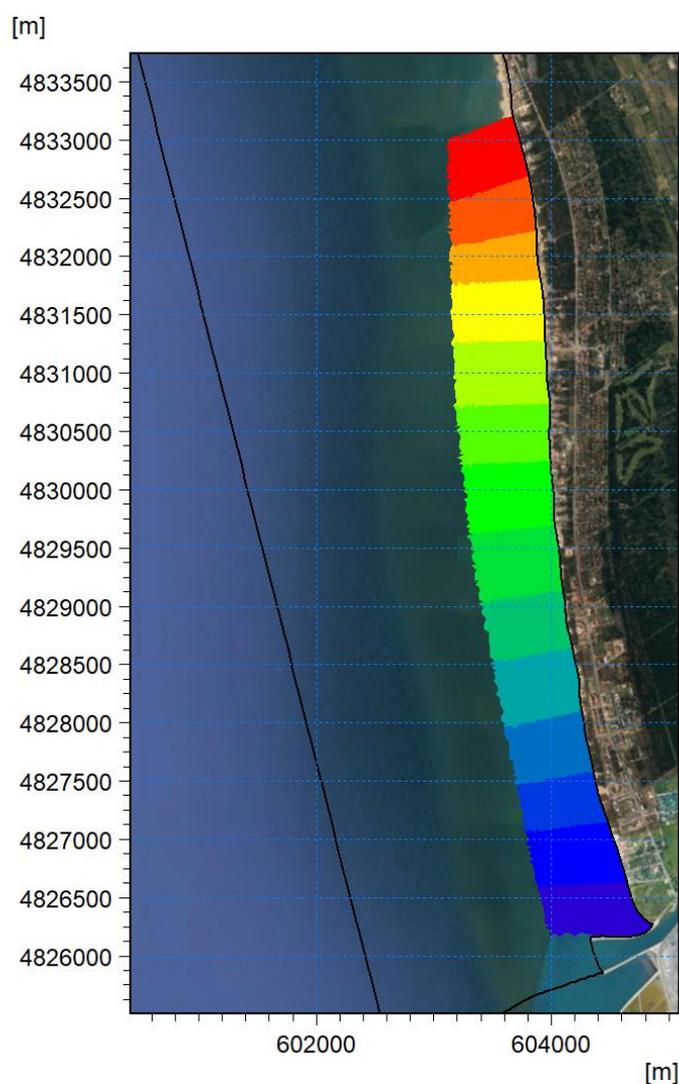


Figura 10-11 Mappa delle strisce fornita in input al MIKE 21 Shoreline Morphology model

Anche per il modello ibrido è stato necessario definire le caratteristiche del fondale marino dal punto di vista sedimentologico. In particolare, come per il modello LITLINE, si è fatto riferimento al D50 ed alla “sediment gradation” s. D50, sediment gradation e rugosità al fondo figurano a tutti gli effetti tra i parametri di taratura del modello numerico Ibrido. Nello specifico, il sedimento è stato impostato facendo riferimento ad una granulometria caratterizzata da un diametro medio d50 costante pari a 0.2 mm e da un parametro indicativo della variabilità del fuso (il cosiddetto “grading”, corrispondente alla radice quadrata del rapporto tra il d84 ed il d16), pari a 1.5. Tale valore è stato assunto sulla base dell’analisi delle curve granulometriche a disposizione.

10.4.5 Risultati delle simulazioni

Il MIKE21 SM è stato utilizzato per la simulazione dell'evoluzione della linea di riva a medio-lungo termine in riferimento a 3 configurazioni: Assenza di Sand Engine, Sand Engine 1 e Sand Engine 2. Le simulazioni sono state predisposte per un periodo di 10 anni, nell'ipotesi che il clima meteomarinario futuro possa essere assimilabile a quello degli ultimi 10 anni a disposizione.

Le simulazioni permettono di ottenere per ogni step di calcolo i risultati relativi a ciascuno dei moduli che lo compongono. Nello specifico si possono ottenere gli output delle principali grandezze di: moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione), idrodinamiche (livelli idrici e velocità di corrente) e di trasporto (capacità di trasporto e rate di erosione/deposizione) in tutti i punti del dominio di calcolo.

Lo Shoreline Morphology Module consente invece di ricavare l'evoluzione della linea di costa nel tempo insieme con il trasporto sedimentario longshore.

Nel caso in esame, visto il lungo periodo coperto dalla simulazione (10 anni) ed il notevole peso dei files di risultati, è stato deciso di salvare i risultati secondo le modalità seguenti:

- sono stati salvati con passo giornaliero i risultati monodimensionali dello Shoreline Morphology Module in termini di: Shoreline change (ovvero spostamento della linea di costa rispetto all'istante iniziale), posizione della linea di costa e trasporto longitudinale;
- sono stati salvati con passo annuale i risultati bidimensionali dello Shoreline Morphology Module in termini di mappe di Bed level (batimetria aggiornata);
- sono stati salvati in riferimento alle mareggiate più significative i risultati dei moduli HD (in termini di livelli e correnti) e SW (in termini di altezza e direzione dell'onda).

Stato attuale e presenza di Sand Engine 1 (100'000 m³)

In questo paragrafo sono illustrati i risultati della simulazione relativa allo Scenario di Sand Engine da 100'000 m³. Nello specifico le immagini di Figura 10-12 e Figura 10-13 illustrano rispettivamente i campi di altezza d'onda e di velocità di corrente in riferimento ad una mareggiata significativa. I risultati sono riportati esclusivamente in riferimento alla zona del Sand Engine e confrontati con quelli relativi allo scenario 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.

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.

Le immagini da Figura 10-14 a Figura 10-18 illustrano l'evoluzione del litorale in diversi istanti temporali (dopo 1, 2, 5 e 10 anni) insieme alla configurazione iniziale. Al fine di facilitare la

comprensione dei fenomeni evolutivi, sono presentati in parallelo i risultati delle simulazioni con la presenza del mega ripascimento e quelli relativi allo scenario naturale. Viceversa, in Figura 10-19 è riportato il grafico di evoluzione del Sand Engine, ovvero la differenza delle linee di costa tra la simulazione con e senza il ripascimento.

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.

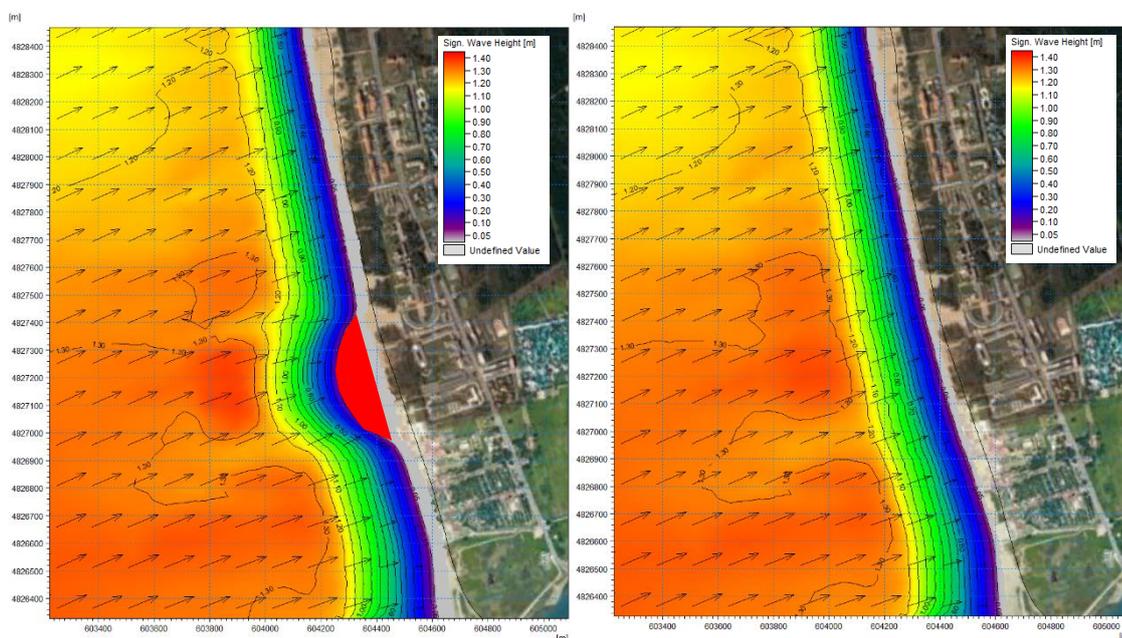


Figura 10-12 Campi di altezza d'onda relative ad una mareggiata rappresentativa in assenza di Sand Engine (a destra) ed in presenza del Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra). In rosso è riportata l'estensione iniziale del Sand Engine

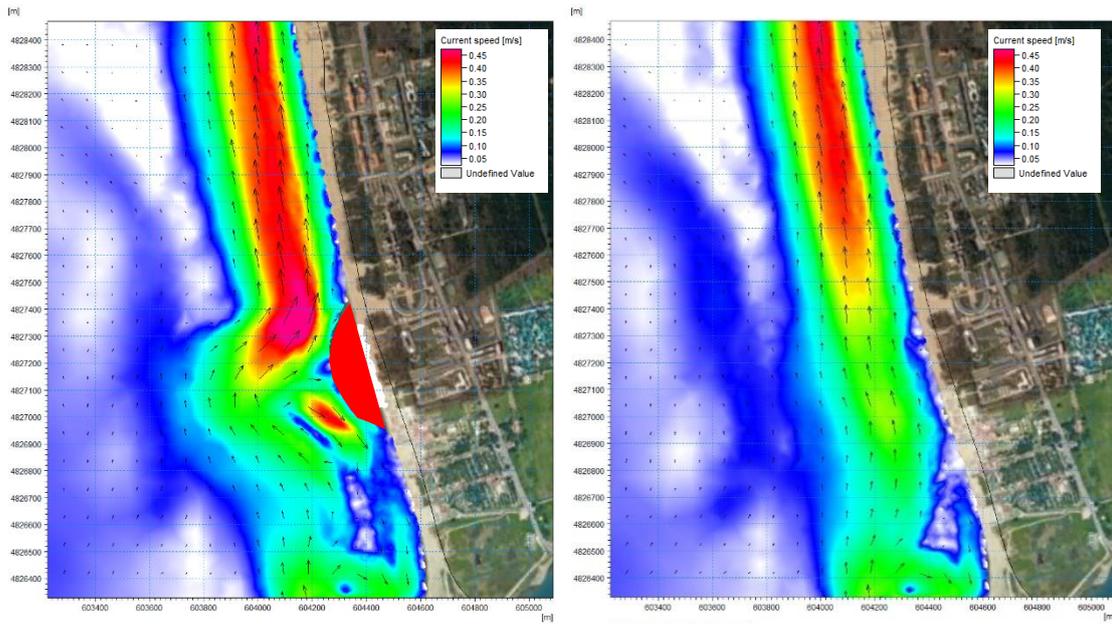


Figura 10-13 Campi di velocità di corrente in assenza di Sand Engine (a destra) ed in presenza del Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra). In rosso è riportata l'estensione iniziale del Sand Engine

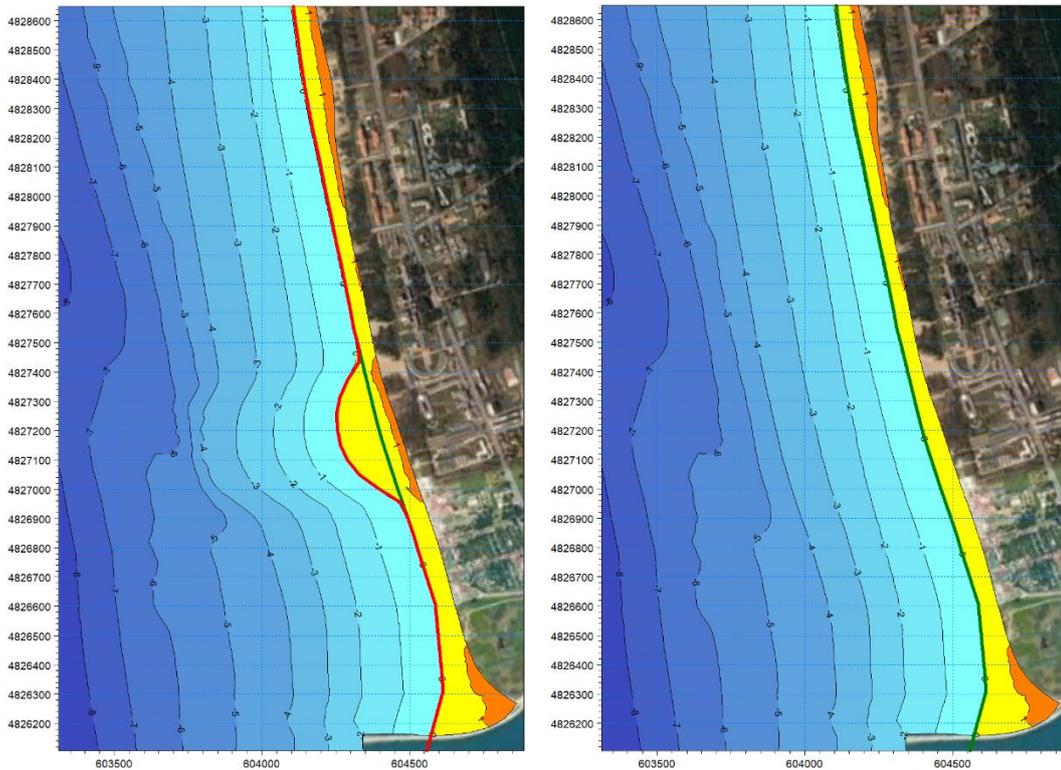


Figura 10-14 Batimetria all'istante iniziale della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

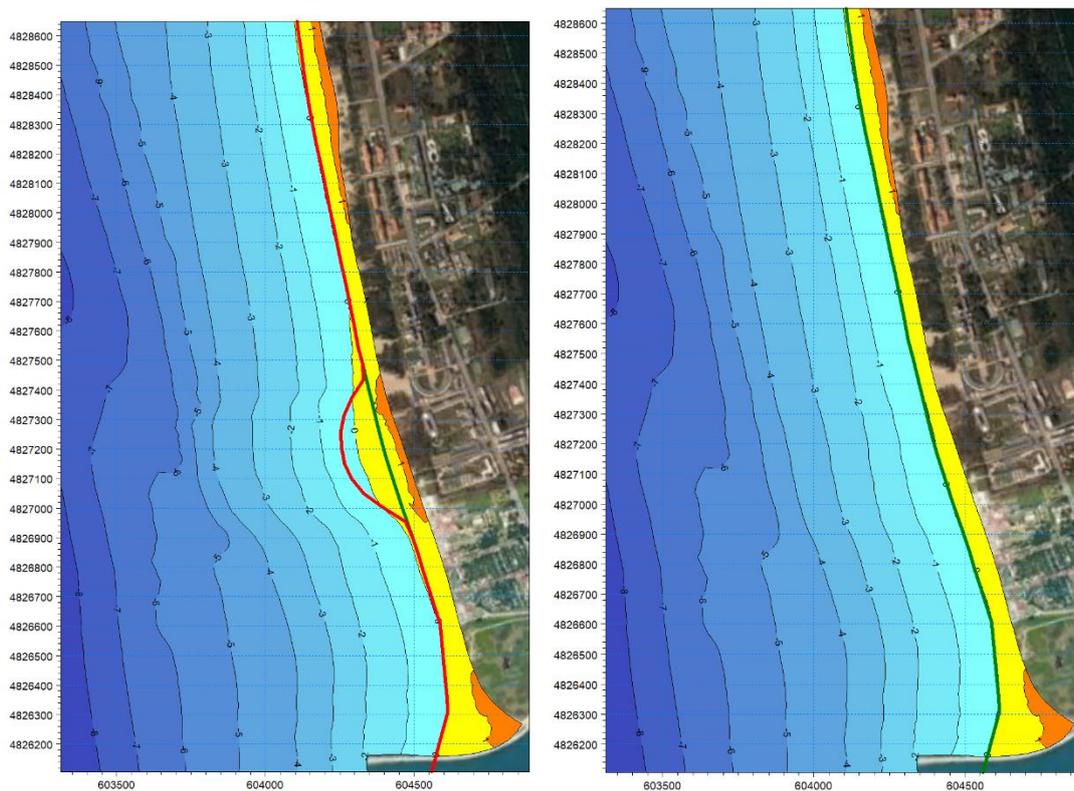


Figura 10-15 Batimetria dopo 1 anno dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

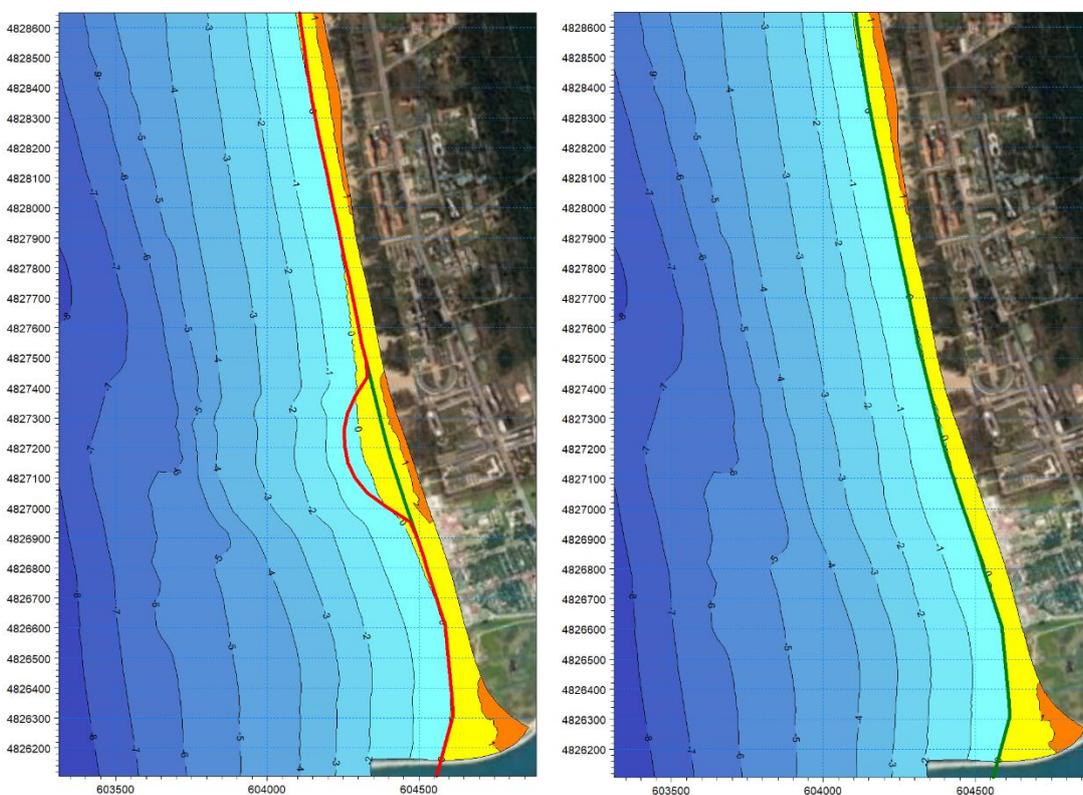


Figura 10-16 Batimetria dopo 2 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

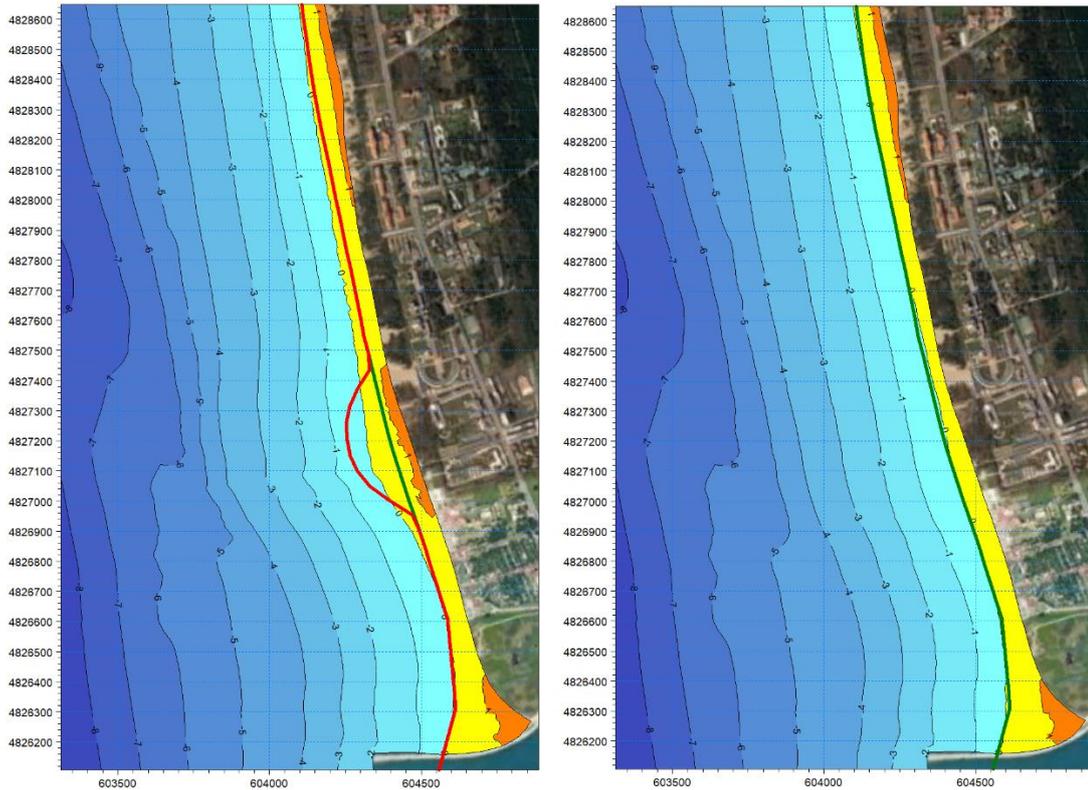


Figura 10-17 Batimetria dopo 5 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

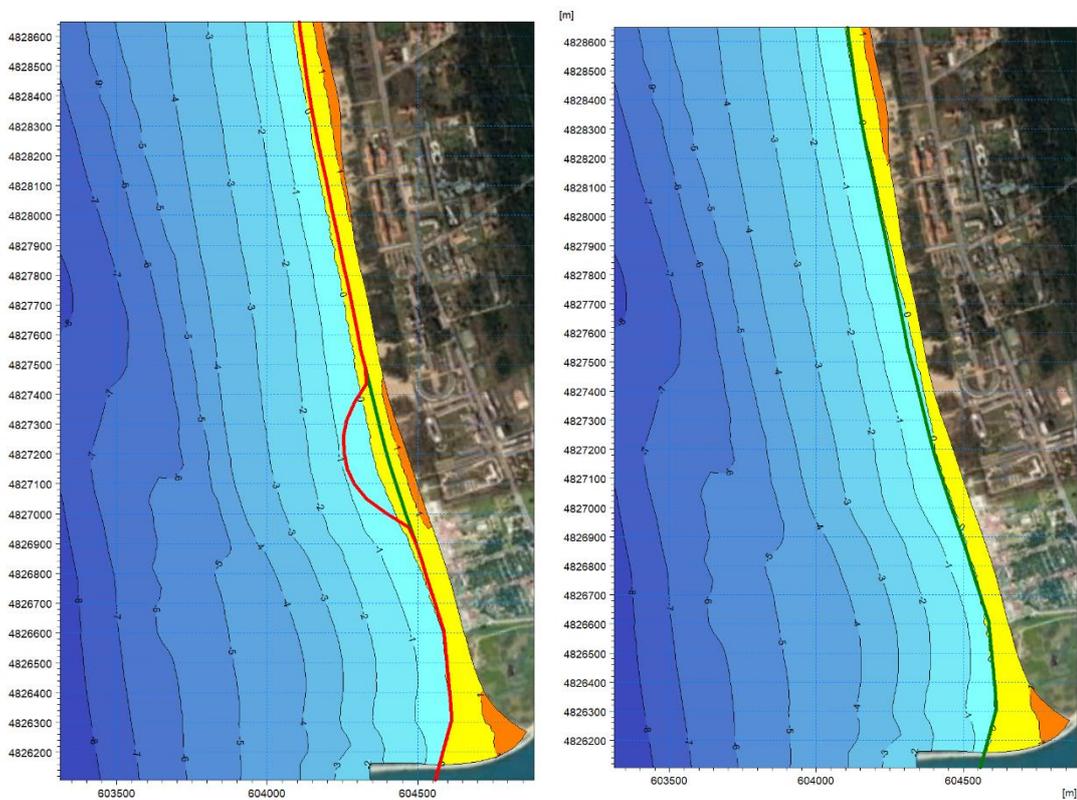


Figura 10-18 Batimetria dopo 10 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 100'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

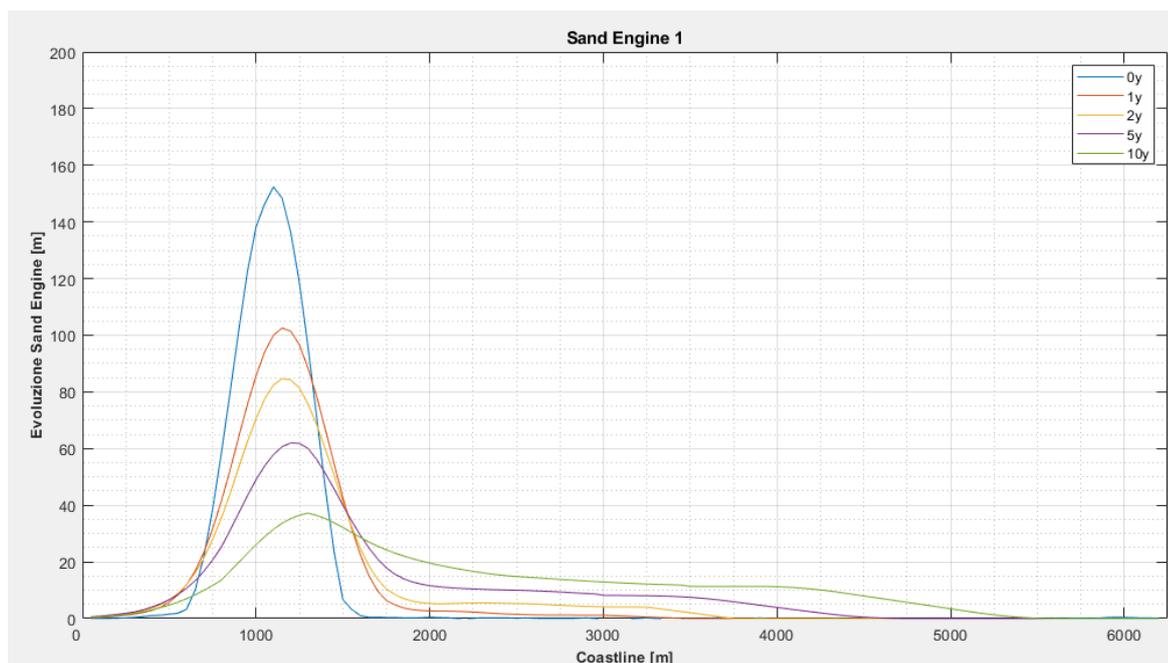


Figura 10-19 Grafico di evoluzione del Sand Engine da 100'000 m³

Stato attuale e presenza di Sand Engine 2 (200'000 m³)

In questo paragrafo sono illustrati i risultati della simulazione relativi allo Scenario di Sand Engine da 200'000 m³. Nello specifico le immagini di Figura 10-20 e Figura 10-21 illustrano rispettivamente i campi di altezza d'onda e di velocità di corrente in riferimento ad una mareggiata significativa. Le immagini da Figura 10-23 a Figura 10-26 illustrano l'evoluzione del litorale in diversi istanti temporali (dopo 1, 2, 5 e 10 anni) insieme alla configurazione iniziale, viceversa in Figura 10-27 è riportato il grafico di evoluzione del Sand Engine, ovvero la differenza delle linee di costa tra la simulazione con e senza il ripascimento.

I risultati sono come atteso simili a quelli relativi allo scenario di Sand Engine 1. In questo caso ovviamente il volume di sedimenti più elevato determina un impatto diverso sull'evoluzione della linea di costa.

Anche in questo caso mediante un'analisi combinata delle immagini e del grafico è possibile apprezzare lo smantellamento della cuspidine 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.

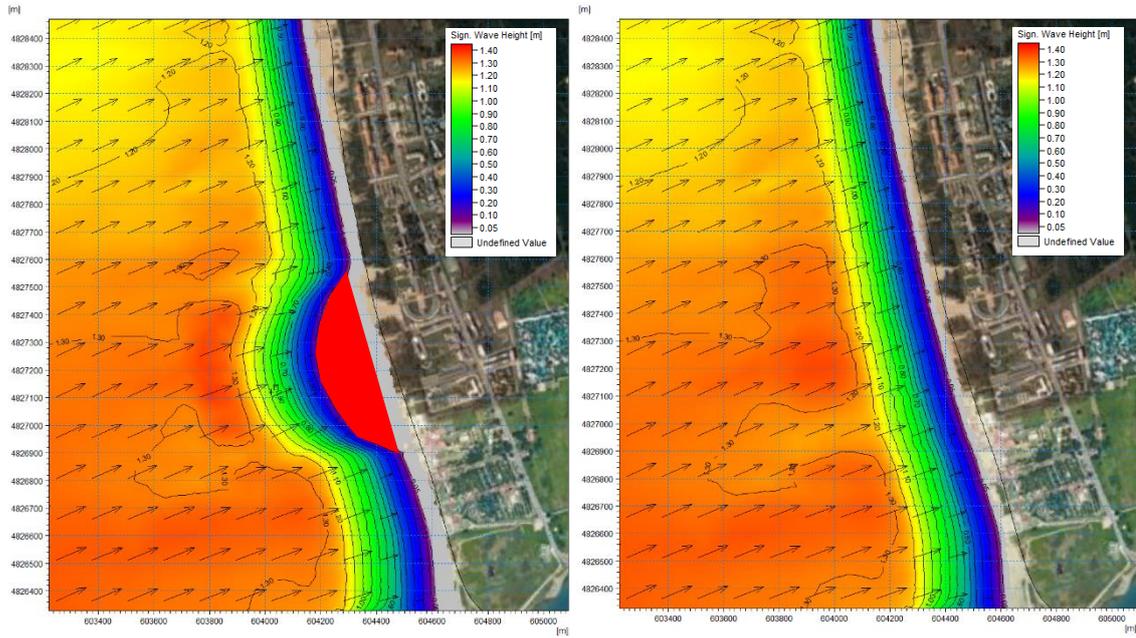


Figura 10-20 Campi di altezza d'onda relative ad una mareggiata rappresentativa in assenza di Sand Engine (a destra) ed in presenza del Sand Engine da 200'000 m³ (a sinistra). In rosso è riportata l'estensione iniziale del Sand Engine

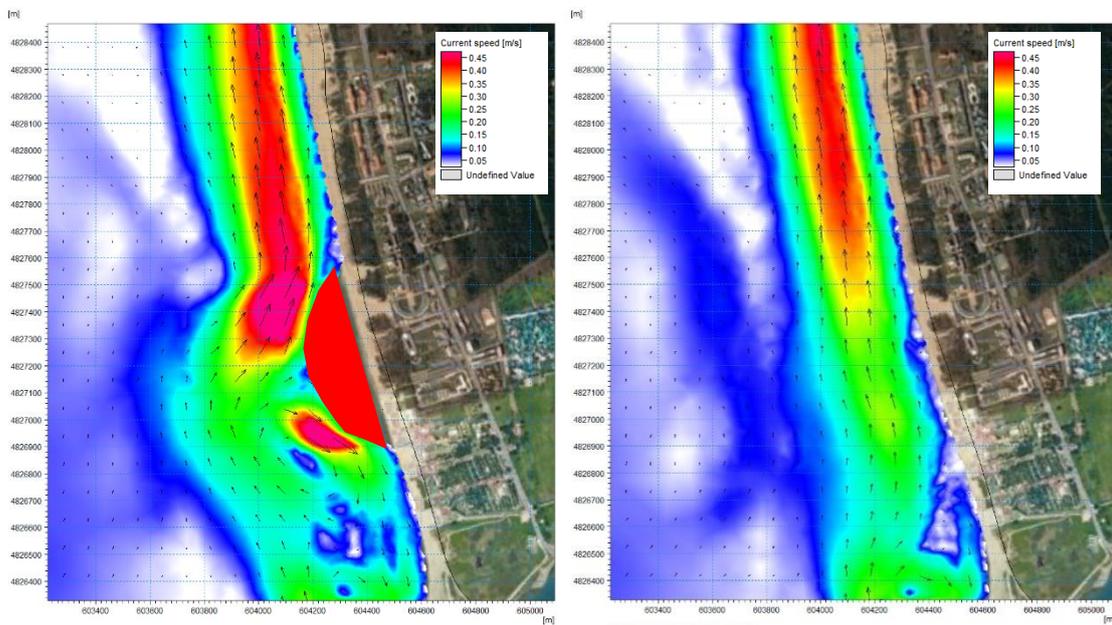


Figura 10-21 Campi di velocità di corrente. In assenza di Sand Engine (a destra) ed in presenza del Sand Engine da 200'000 m³ (a sinistra). In rosso è riportata l'estensione iniziale del Sand Engine

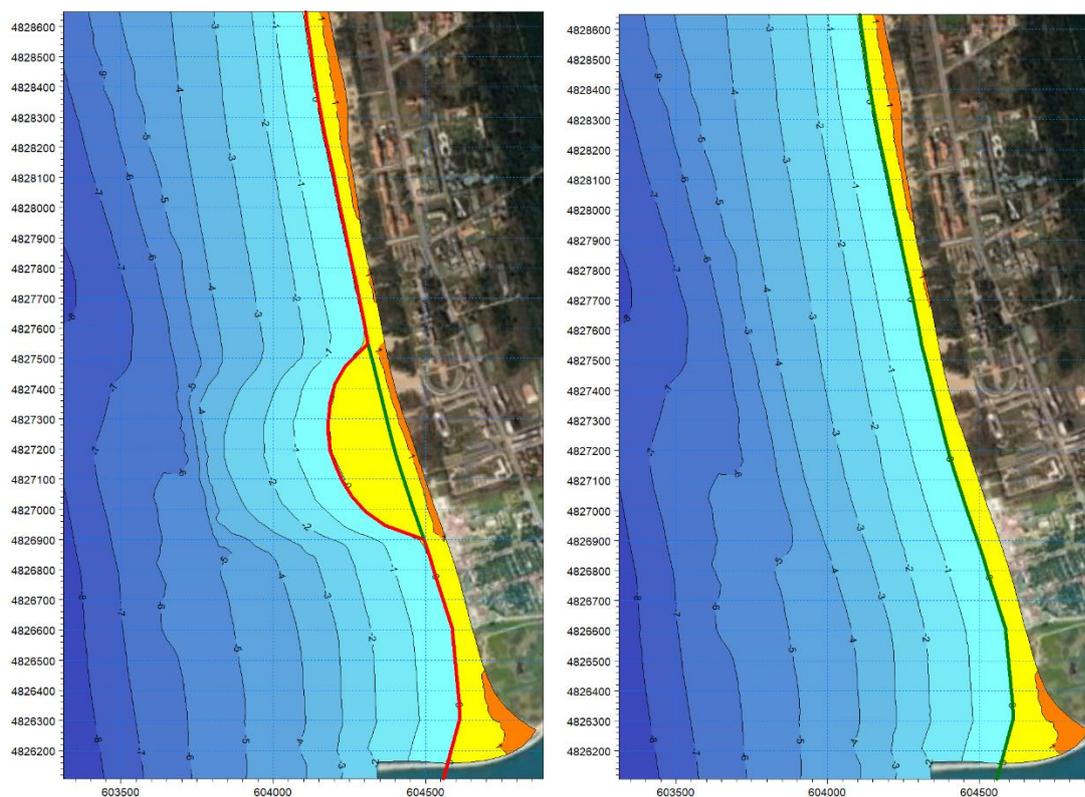


Figura 10-22 Batimetria all'istante iniziale della simulazione, con Sand Engine da 200'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

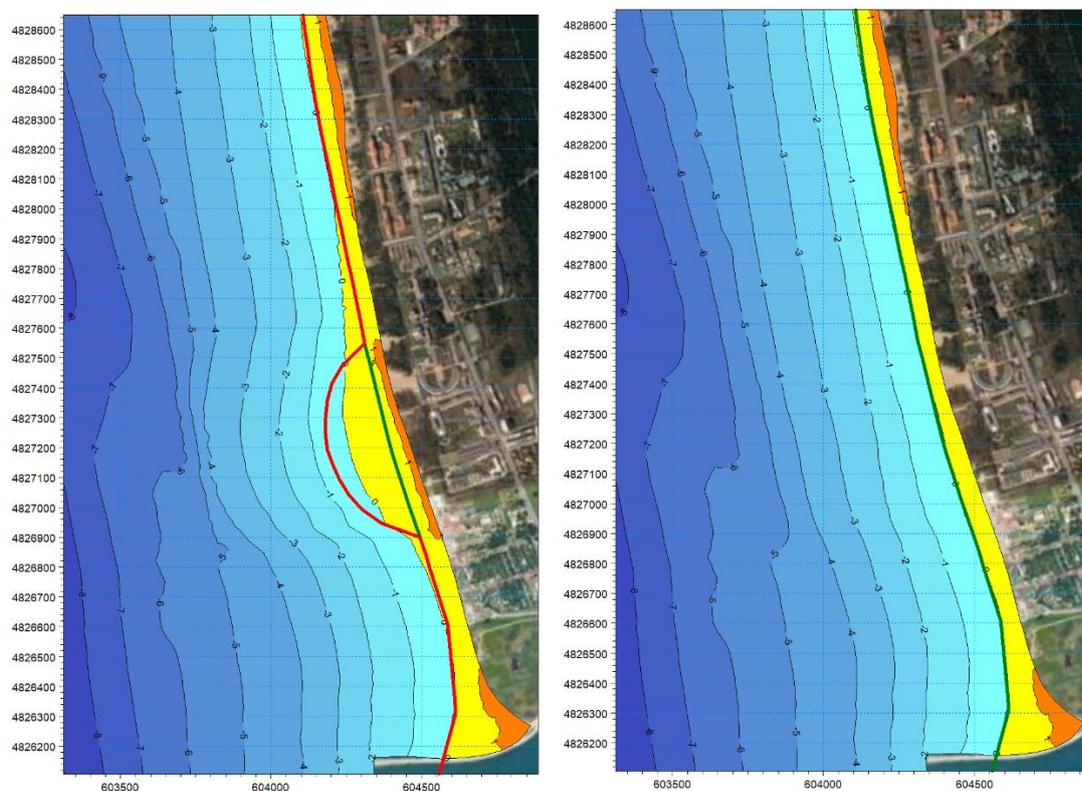


Figura 10-23 Mappa di Batimetria dopo 1 anno dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 200'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

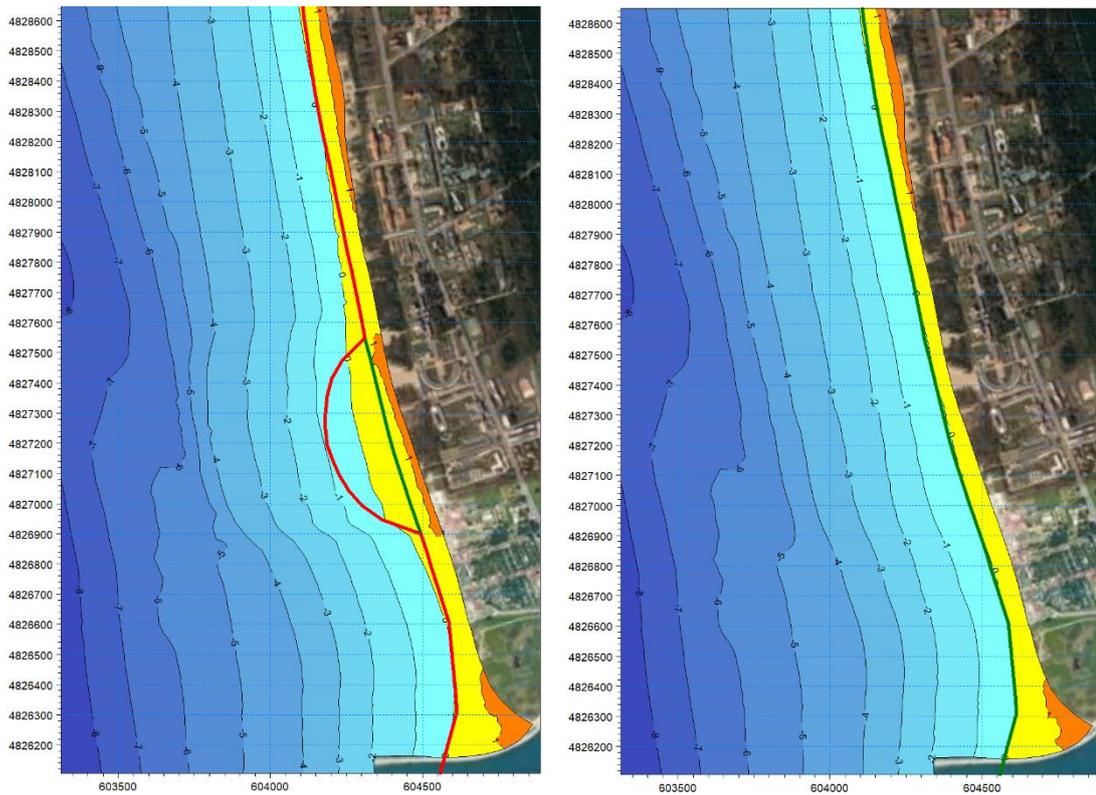


Figura 10-24 Mappa di Batimetria dopo 2 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 200'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

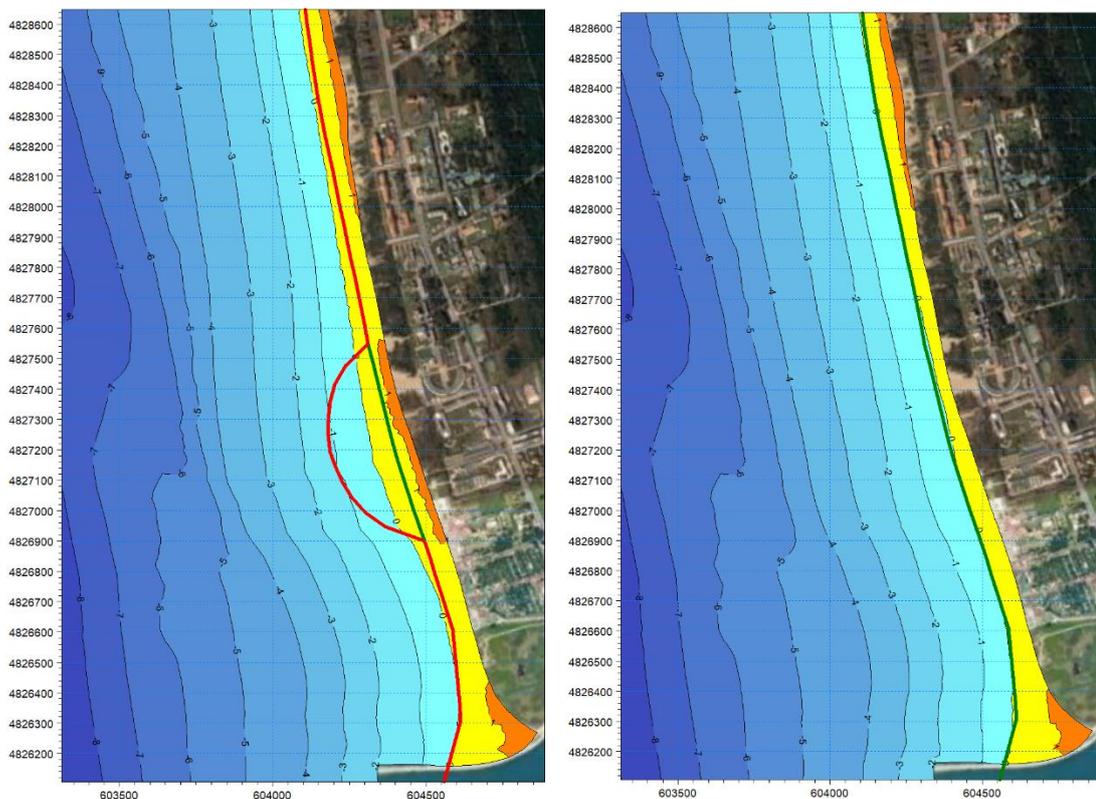


Figura 10-25 Mappa di Batimetria dopo 5 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 200'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate rispettivamente le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

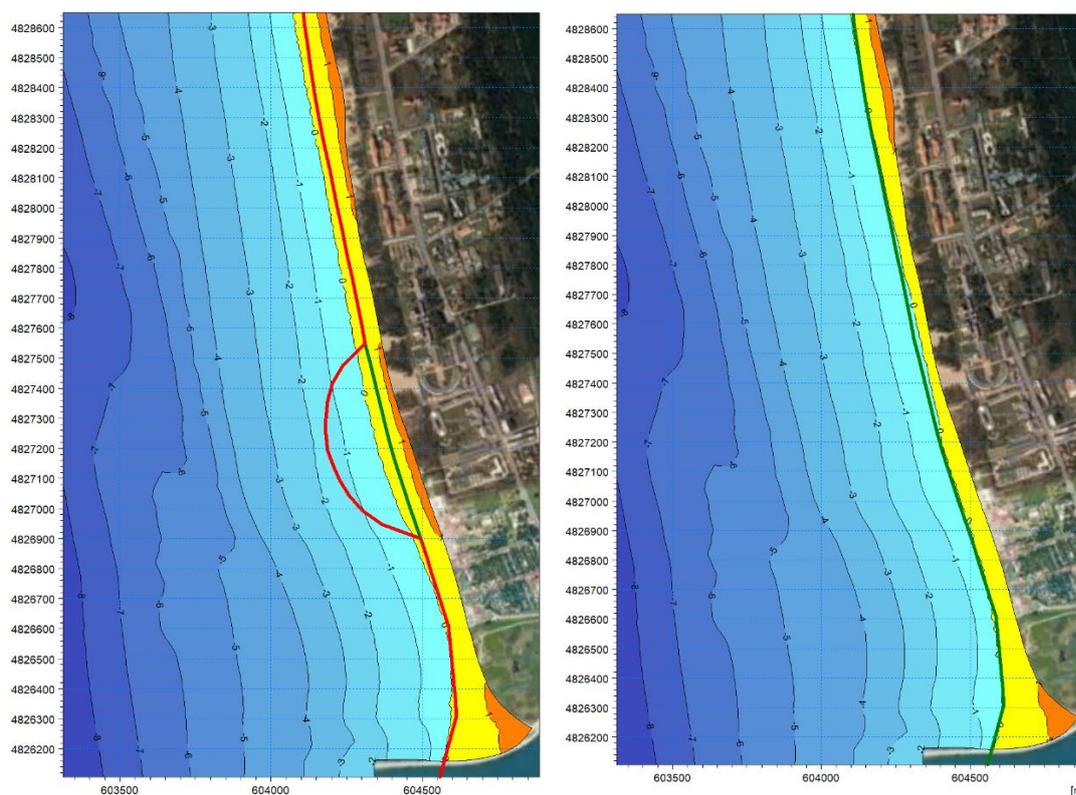


Figura 10-26 Mappa di Batimetria dopo 10 anni dall'inizio della simulazione, con Sand Engine da 200'000 m³ (a sinistra) e senza Sand Engine (a destra). In rosso ed in verde scuro sono rappresentate le linee di riva iniziali in presenza e assenza del ripascimento

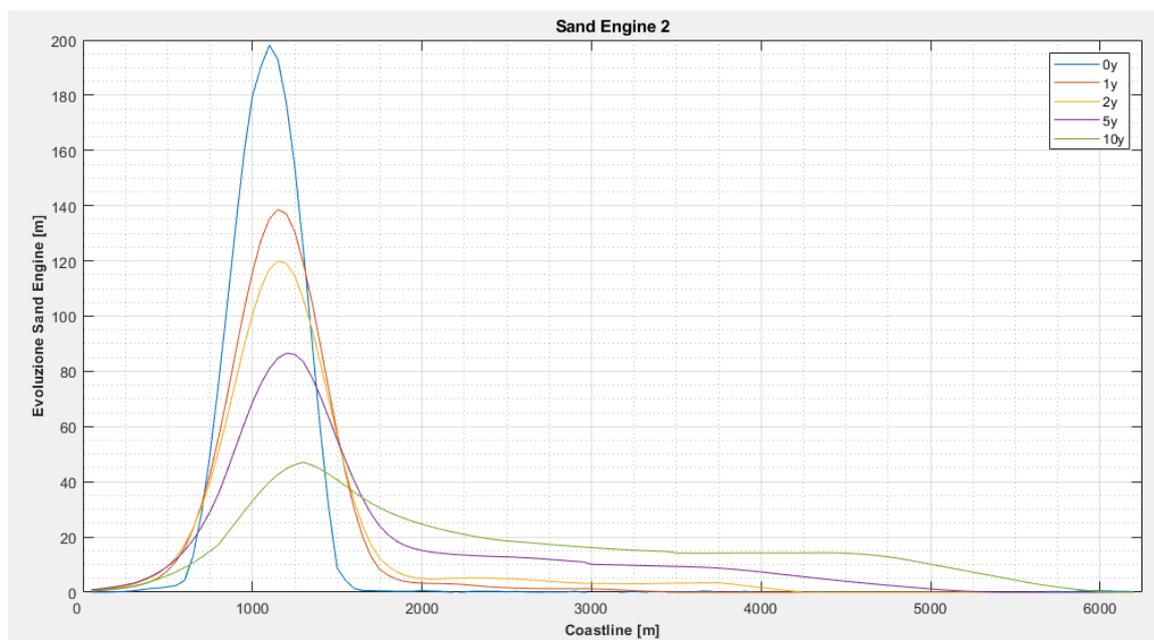


Figura 10-27 Grafico di evoluzione del Sand Engine da 200'000 m³

11 Sintesi dello studio

Oggetto dello studio sono le attività di analisi e modellazione numerica volte a valutare gli effetti del progetto denominato Darsena Europa sul litorale pisano. Le attività sono state predisposte con l'ausilio della modellistica numerica sviluppata da DHI, con l'obiettivo di simulare e comprendere le dinamiche di stato attuale e valutare le differenze con la configurazione di progetto. Di seguito si propone una sintesi delle principali attività di studio.

11.1 Propagazione del moto ondoso ed analisi dei risultati a costa

La prima attività di studio ha riguardato l'analisi del clima ondoso a costa nei due scenari in presenza ed assenza della Darsena Europa, al fine di quantificare le differenze. A tal fine, i dati meteorologici al largo (serie dal 1979 al 2021), che fanno riferimento al database di ricostruzione storica MWM (Mediterranean Wind Wave Model) sono stati propagati verso costa mediante un modello di propagazione implementato tramite l'ausilio del codice di calcolo MIKE21 SW. Nell'implementazione di tale modello si è posta particolare attenzione alle secche della Meloria, caratterizzate da valori di batimetria fino a -2m. Le simulazioni sono state condotte, come detto, sia in riferimento alla configurazione di stato attuale che a quella di progetto. L'analisi del clima ondoso a costa (Figura 11-1) è stata effettuata in 7 punti (da C1, ubicato in prossimità della foce dello scolmatore del fiume Arno, fino a C7, ubicato in prossimità della foce del fiume Morto).

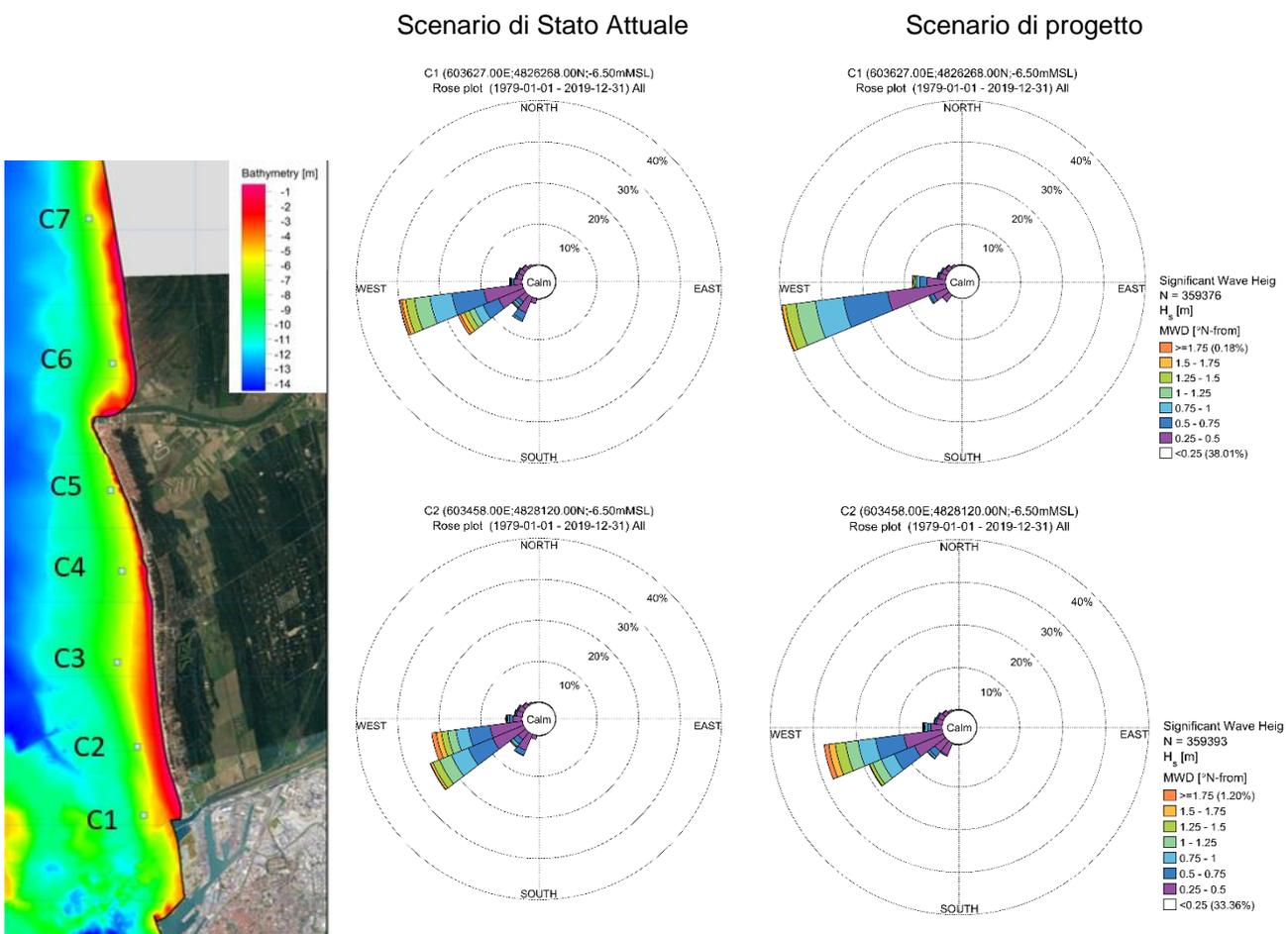


Figura 11-1 Ubicazione dei punti e rose del clima ondoso nei punti C1 e C2 in riferimento allo scenario attuale ed a quello di progetto

L'analisi del moto ondoso in presenza ed assenza dell'opera ha permesso di evidenziare quanto segue:

- la realizzazione delle opere in progetto determina una riduzione significativa dell'energia proveniente da Sud-Ovest limitatamente al tratto più a sud (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°;
- il clima ondoso nel punto C2 risulta ancora influenzato dalla realizzazione delle opere di progetto, seppure in misura minore. 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.

11.2 Quantificazione ed analisi del trasporto litoraneo

Successivamente è stata condotta un'analisi volta a quantificare ed analizzare il trasporto litoraneo limitatamente ai punti C1-C2. I risultati ottenuti dalle simulazioni condotte mediante l'applicazione del numerico LITDRIFT, parte del pacchetto Littoral Processes (LITPROC) di DHI, hanno permesso di stimare l'andamento del trasporto longshore medio annuo (lordo, netto) lungo i profili analizzati sia nella configurazione di stato attuale che in quella di progetto. Le risultanze di tale attività sono illustrate in Figura 11-2.



Figura 11-2 Distribuzione del trasporto netto nello scenario attuale (a destra) e progetto (a sinistra) nei due transetti C1 e C2

Nello specifico si può affermare 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.
- in riferimento allo scenario di progetto, nella configurazione di layout vecchio, il trasporto netto medio annuo risulta diretto debolmente verso sud (3'500 m³/anno) nel punto C1, mentre risulta diretto verso nord (22'900 m³/anno) nel punto 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 2 km 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.

11.3 Analisi ed evoluzione della linea di riva

Un'ulteriore attività predisposta è la simulazione dell'evoluzione della linea di riva, sempre volta a quantificare le differenze tra la configurazione in assenza e presenza della Darsena Europa. A tal fine è stato implementato il codice di calcolo LITLINE di Littoral Processes FM. Le risultanze di tale analisi sono sintetizzate nel grafico di Figura 11-3.

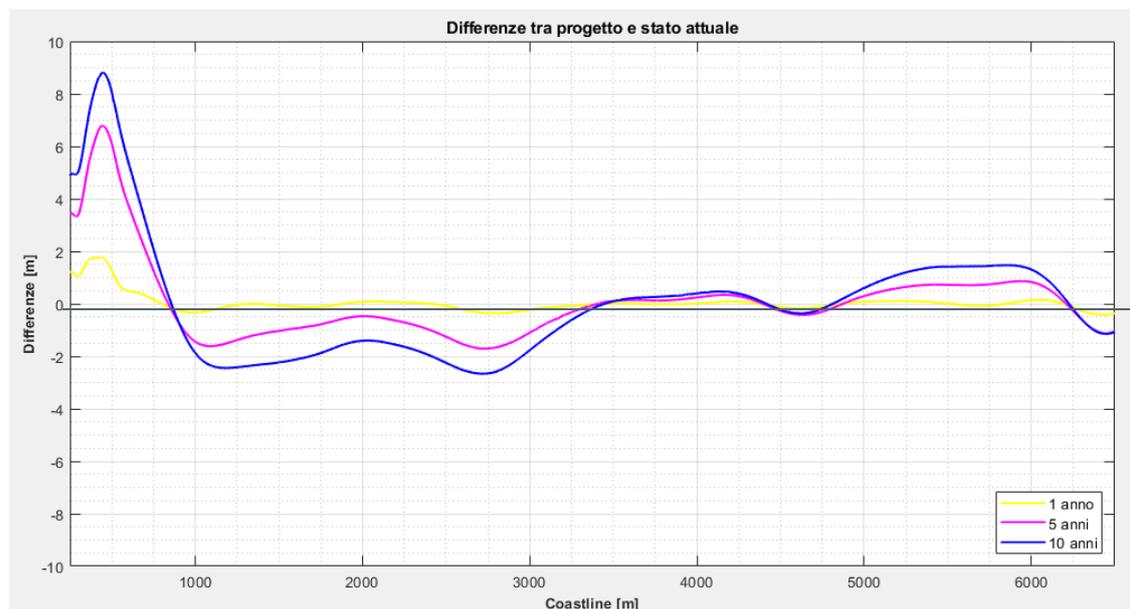


Figura 11-3 Differenze tra evoluzione della linea di riva nella configurazione di progetto ed in quella di stato attuale

Si può affermare quanto segue:

- 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 circa a Nord del pennello di foce. L'incremento di tale avanzamento risulta essere pari a circa 2 m, 6 m e 9 m rispettivamente dopo 1 anno, 5 anni e 10 anni;
- il tratto di costa da circa 1000 m a circa 3000 m a Nord del pennello di foce risulta viceversa caratterizzato da un arretramento maggiore rispetto alla configurazione attuale: dopo 1 anno le differenze non risultano apprezzabili, mentre la variazione è quantificabile fino ad un massimo di 2 m dopo 5 anni e di 3 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.

11.4 Valutazione dell'efficacia dell'implementazione di un ripascimento tradizionale

Le attività condotte hanno evidenziato che il tratto di costa oggetto di studio è caratterizzato da un sostanziale equilibrio in termini evolutivi. 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. A fronte di tali evidenze si è ritenuto opportuno ipotizzare un ripascimento di volume minimo pari a 10'000 m³, 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.

I risultati dell'evoluzione della linea di costa sono presentati in Figura 11-4 (dove per semplicità di lettura sono riportati anche quelli relativi alla configurazione in assenza di 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.

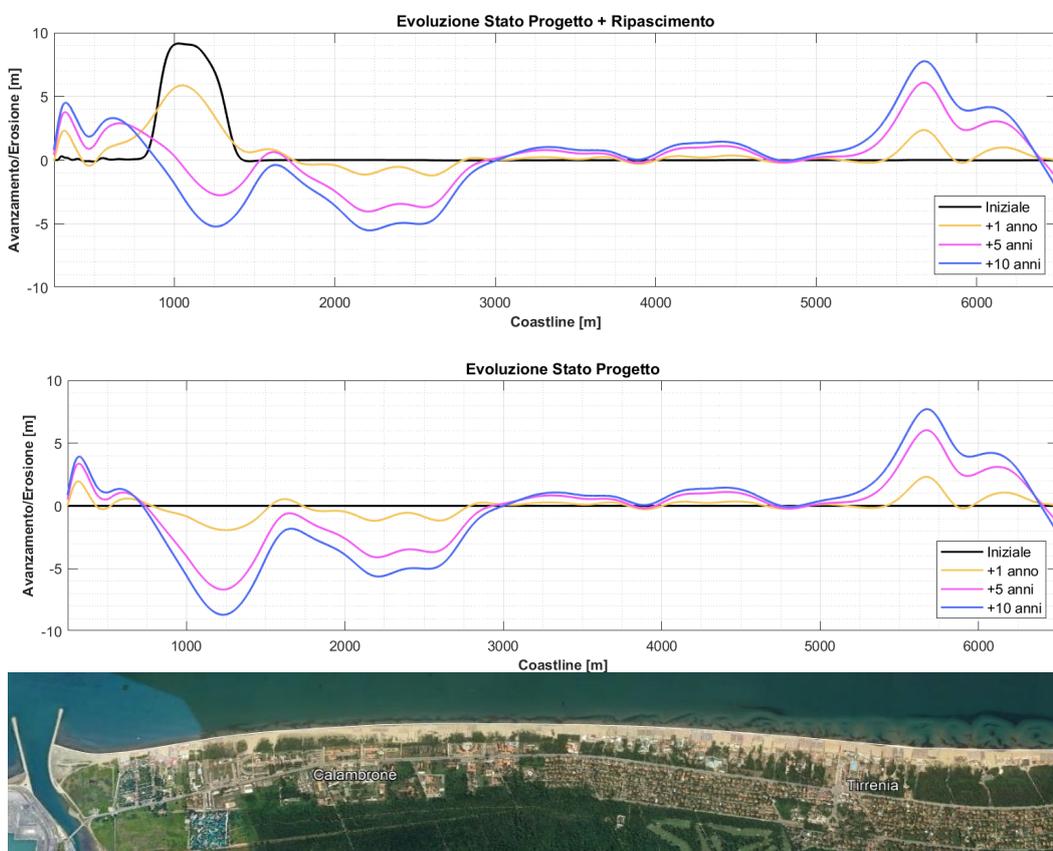


Figura 11-4 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva – configurazione di progetto (Darsena Europa) comprensivo del ripascimento ipotizzato a Calambrone

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

In ultimo è stata valutata l'efficacia di un ripascimento non convenzionale del tipo "Sand Engine" in alternativa a quello tradizionale. 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. 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.

Al fine di modellare tale intervento è stato utilizzato un nuovo modello della suite MIKE Powered by DHI denominato MIKE 21 Shoreline Morphology Model. Tale modello, integrando diversi moduli esistenti del pacchetto MIKE, è in grado di combinare in un unico strumento modelli bidimensionali per la simulazione delle onde, correnti e trasporto e un modello monodimensionale per la descrizione dell'evoluzione della linea di riva.

Le simulazioni hanno permesso di ottenere i risultati delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione), idrodinamiche (livelli idrici e velocità di corrente) e di trasporto (capacità di trasporto e rate di erosione/deposizione) in tutti i punti del dominio di calcolo, nonché l'evoluzione della linea di costa nel tempo.

Nei grafici di Figura 11-5 e Figura 11-6 è riportata l'evoluzione del Sand Engine, ovvero la differenza delle linee di costa tra la simulazione con e senza Sand Engine. Tali grafici mostrano in maniera chiara lo smantellamento della cuspidine 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 rate di smantellamento è, come atteso, molto elevato nei primi anni e via via diminuisce nel tempo.

Nello specifico, in relazionale al Sand Engine da 100'000 m³, si può affermare che:

- l'estensione trasversale iniziale del ripascimento, di circa 150m, si riduce a 100m dopo 1 anno fino ad arrivare a circa 40m dopo 10 anni;
- la lunghezza di influenza risulta piuttosto limitata nel primo anno, ma cresce nei periodi successivi. Il tratto di costa a nord risulta influenzato per circa 500m il primo anno e per circa 3.5 Km dopo 10 anni.

Per quanto riguarda il Sand Engine da 200'000 m³ si può affermare che:

- l'estensione trasversale iniziale del ripascimento, di circa 200m, si riduce a 140m dopo 1 anno fino ad arrivare a circa 50m dopo 10 anni;
- la lunghezza di influenza risulta piuttosto limitata nel primo anno, ma cresce nei periodi successivi. Il tratto di costa a nord risulta influenzato per circa 800m il primo anno e per circa 4.2 Km dopo 10 anni.

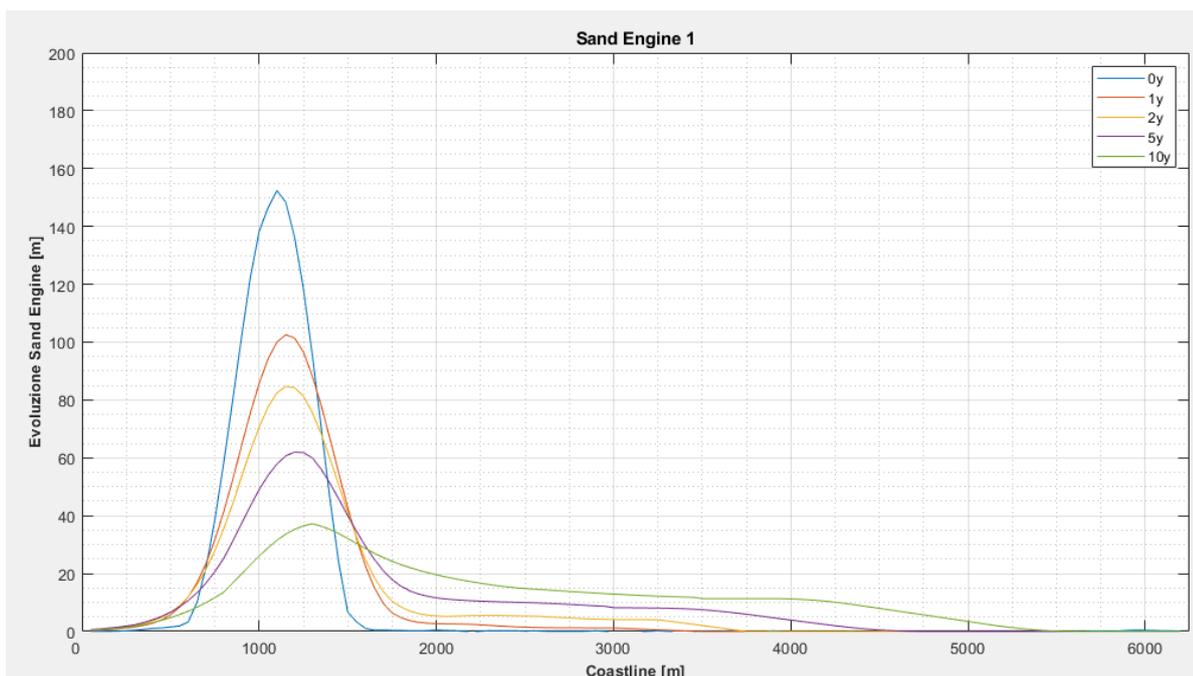


Figura 11-5 Grafico di evoluzione del Sand Engine da 100'000 m³

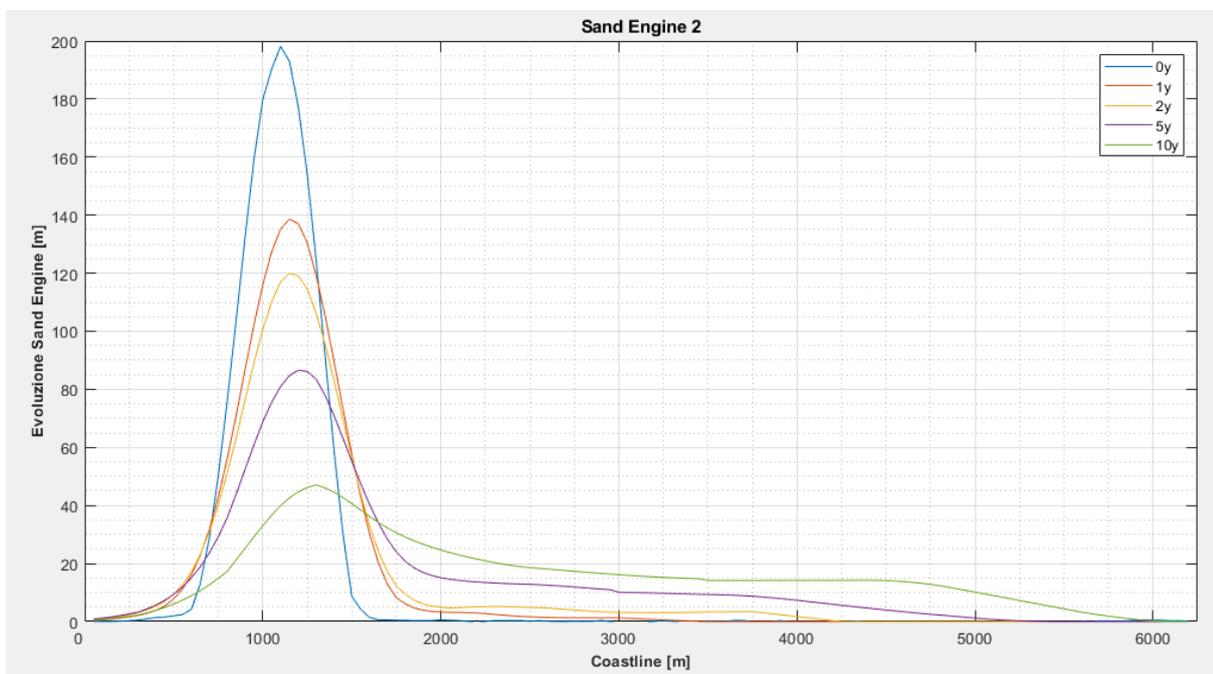


Figura 11-6 Grafico di evoluzione del Sand Engine da 200'000 m³

12 Conclusioni

Il presente elaborato 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.

13 Bibliografia

- [1] G. Contento, L. Donatini, G. Lupieri, A. Pedroncini and L. Cusati, "MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea," in *18th International Conference on Ships and Shipping Research*, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9, 2015.
- [2] A. Pedroncini, G. Contento, L. Donatini, L. Cusati, G. Lupieri, H. Hansen and R. Bolanos Sanches, "Mediterranean Wind Wave Model (MWM): a 40 year hindcast database of wind and wave conditions and a base for relocatable operational forecast models," 2019.
- [3] DHI, "MIKE 21 SW - Spectral Wave Module, Scientific Documentation," MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [4] ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, "Rete Mareografica Nazionale (RMN)," [Online]. Available: <https://www.mareografico.it/>.
- [5] DHI, "MIKE C-MAP, Extraction of World Wide Bathymetry Data and Tidal Information, Scientific Documentation," MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [6] DHI, "LITPACK Littoral Processes FM, Scientific Documentation," MIKE by DHI, Hørsholm, 2021.
- [7] S. Cappucci, D. Bertoni, L. Cipriani, G. Boninsegni and G. Sarti, *Assessment of the Anthropogenic Sediment Budget of a Littoral Cell System (Northern Tuscany, Italy)*, *Water* 2020, 12, 3240. <https://doi.org/10.3390/w12113240>, 2020.



ALLEGATI



ALLEGATO A – MWM

Descrizione Tecnica



MWM: Mediterranean Wind Wave Model

General description of the models' chain

The models and datasets used for the development of the MWM database are:

- the *CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)* global re-analysis dataset, produced and freely published by NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (Saha et al, 2010; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>), hourly (re-forecast) data with a space resolution of 0.5°; these data are used as initial (IC) and boundary conditions (BC) of the *WRF-ARW model* (below);
- the atmospheric model *WRF-ARW – version 3.4.1 (Weather Research and Forecast - Advanced Research WRF)*, model developed by NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Skamarock and Klemp, 2007; Michalakes et al, 2001; Michalakes et al, 2005); *WRF-ARW* is presently considered among the best state-of-the-art non-hydrostatic meteorological models; it is supported by a massive worldwide community that contributes to its local use and development (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>; <http://www.wrf-model.org/index.php>);
- the wave model *MIKE 21 Spectral Waves (SW)* developed by DHI (former Danish Hydraulic Institute) (Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004). *MIKE 21 SW* is among the state of the art wave models, widely used in thousands of offshore and coastal applications worldwide.

In the following a description of the *CFSR* dataset, the *WRF-ARW* and the *MIKE 21 SW* model is given, with specific interest to the implementation adopted in MWM.

CFSR Dataset

The *CFSR* dataset (Fig. A.1) is the result of a long and complex process performed by NCEP, an ensemble of nine weather prediction centers in the United States belonging to the *NWS (National Weather Service)* of the *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*. The simulation, completed in 2011, is based on a global atmospheric numerical model including atmosphere-ocean and sea-ice couplings, with a systematic ingestion of both conventional (point) and satellite observations with data assimilation procedures.

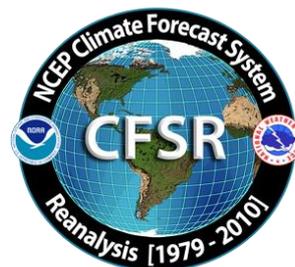


Figure A.1

The *CFSR* now covers a 35-year period from 1979 to 2013 (included) and is continuously updated with new recent data. The simulations were performed as 9 hours forecast simulations, initialized 4 times a day (at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00) between the 6-hourly re-analysis frames. The

results of these simulations, gathered in the CFSR dataset, consist in complete atmospheric data over ocean and lands with a one hour time resolution and a 0.5° horizontal resolution, while the vertical resolution changes greatly amongst the atmospheric variables, spanning from the single surface value up to values at 64 different isobaric levels.

MWM dataset ingest the 6-hourly CFSR data, specifically the *ds093.0* dataset.

Chawla et al (2013) presented a thorough analysis of the *CFSR* dataset against satellite and oceanic buoys data. The final goal of that study is the use of the U_{10} wind data from the *CFSR* dataset as the forcing term of *WWIII* to generate wave fields at global scale, without any assimilation of wave data. The analysis of the *CFSR* dataset shown in that paper includes the intrinsic performance of the model in terms of the seasonal and annual variability of the percentiles. A moving average is applied to smooth the altimeter data from the satellites and from the buoys. The normalized percentiles ("...normalized with the wind speeds at corresponding percentiles from the altimeters") computed over the satellite tracks exhibit an oscillatory behavior, never below 0.93 or 0.90 in the Northern and Southern hemisphere respectively. From that analysis, the wind and wave *CFSR* and *WWIII* data compare very well with satellite data in terms of normalized percentiles. The Q-Q plots at selected offshore buoys are generally good or very good, with some unexpected variations from case to case for some buoys close to the coast, with even a contradictory behavior between U_{10} and H_s in some locations.

The analysis of the wind field of the *CFSR* dataset is far beyond the scope of the present work but still some checks have been done in specific cases, like the event of November 1999 in Trieste (Italy). The performance of a local area model is directly related to the information contained in the global model used as boundary and initial conditions; Fig. A.2 after Contento et al (2014) shows the wind speed for the case of November 1999 in Trieste (Northern Adriatic Sea - Italy); the red dots are experimental data by NOAA (<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>); the yellow line corresponds to the re-analysis data *CFSR d093.0* (Saha et al, 2010; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>) interpolated at the same position of the station; the blue dots are related to a fully certified and verified measurement station of the Regional Agency for the Environment Protection (ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>) located few meters far from the station used by NOAA (<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>); the cyan line corresponds to the present hindcast dataset (model *WRF-ARW*). It is rather evident that the *CFSR* dataset ingests the experimental data from NOAA but there are some non-negligible discrepancies between the two experimental datasets (private communication with ARPA FVG-OSMER - Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia Region, Italy). In this case the local model *WRF-ARW* is able to develop the local wind field and matches correctly the measurement by ARPA, irrespective of the wrong assimilated data as BC and IC; this, however, cannot be always guaranteed.

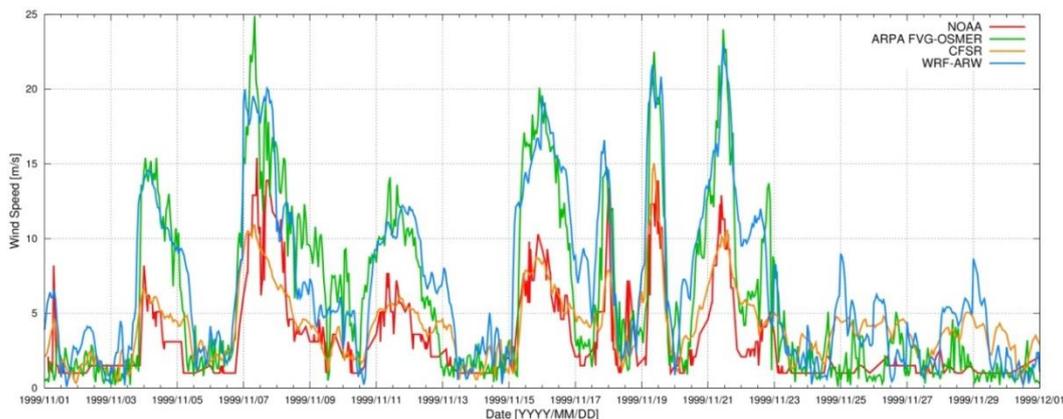


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>) (red line) and from ARPA-FVG OSMER (<http://www.osmer.fvg.it/home.php>) (blue line). Model data from CFSR (Saha et al, 2010) (yellow line) and the present simulations with WRF-ARW (cyan line) are overlapped.

The scope of these checks was solely to verify the sensitivity of the CFSR wind pattern to a complex steep geographic area facing the sea. The eastern coast of the Adriatic Sea is just an example among many others. The availability of certified wind data from the local Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>) related to ground stations and to a fixed station in the middle of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea <http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>), helped a lot in defining the set-up of the local area meteorological model. The aim of the set-up process was to let the model WRF-ARW develop mesoscale and local weather structures, thus using a domain large enough to develop these structures, but at the same time avoiding the use of too large a domain that may lead to a model drift from the experimental data. These undesired effects were observed along the entire Adriatic Sea, specifically on the eastern side (Contento et al, 2011; Contento et al, 2014).

WRF-ARW meteorological model

The WRF model is an open source mesoscale to microscale atmospheric model developed by the American atmospheric research center NCAR in cooperation with many other meteorological institutions. It is largely used worldwide for both atmospheric research and forecast or hindcast purposes due to its ability to perform atmospheric simulations over a wide range of length scales spanning from less than 1 kilometer to thousands of kilometers. This flexibility is further increased by its capability of performing two way coupled nested runs.

The WRF modelling system includes a pre-processor system (WPS), a data assimilation system (WRF-DA) and the dynamic solver. During this work the ARW dynamic solver, developed and maintained by the Mesoscale and Microscale Meteorology Division of NCAR, has been used. The ARW dynamic core is a fully compressible and non-hydrostatic model, based on a terrain-following hydrostatic pressure vertical coordinate system and on an Arakawa C-grid staggered evaluation of the vector quantities. The solver uses high order time integration and 3-D advection schemes.

The WRF model works internally with NetCDF files, a self-describing and machine-independent data format particularly suitable for the manipulation of long arrays of scientific data.

A WRF-ARW model run is a quite complex process, since it involves several different steps to be run in a precise order. First of all, WRF requires boundary and initial conditions; these conditions can be supplied by the GRIB files obtained from the CFSR dataset files described in CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010.” [Online] Available at <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>

GRIB files needed to cover completely the whole simulated period must be fed to the model to complete the simulation process successfully.

Moreover, since the atmosphere behaviour is strongly dependent on the soil characteristics, detailed data about these characteristics must be fed to the model too in order to let it develop the local weather phenomena correctly. However, there is no need to produce this type of data since suitable 30" resolved geographic data are included in the default WRF pre-processing (WPS). Since these data are time-independent they need to be downloaded only once, and they remain valid for every simulation unlike the GRIB files. Actually, some of the parameters contained in the geographic data cannot be considered as completely time-independent; in fact, some of the parameters show a time dependence which, however, is limited to seasonal changes, e.g. the

reduced vegetation cover in winter. The possible seasonal variability of the geographical parameters is included in the geographical data archive of WPS.

A complete WRF-ARW simulation needs the WPS (*WRF Pre-processor System*) to be run before the numerical solver (*wrf.exe*). The WPS pre-processor system deals with both the domain set-up and the preliminary input manipulations; it is composed by three main executables carrying out different tasks:

- *geogrid.exe* is responsible for the definition of the horizontal grid as well as for the interpolation of the geographic data on the user-defined grid. When performing nested runs, the *geogrid.exe* run produces a NetCDF file *geo_em.dxx.nc* containing the grid and geographic data for each domain, where *xx* stands for the code of the domain (01, 02, ...).
- *ungrib.exe* is responsible for the decoding of the input GRIB files used as initial and boundary conditions. The GRIB files, which need to be linked to the work directory of WPS by means of the script *link_grib.csh*, are “ungribbed” and rewritten in an intermediate format suitable for further manipulations, excluding all the fields not needed for the following model run.
- *metgrid.exe* is responsible for the horizontal interpolation of the intermediate input files produced by *ungrib.exe* on the grid defined by *geogrid.exe*. Moreover, the geographic data contained in the *geo_em* files are ingested by *metgrid* and written on its output files. The output of *metgrid.exe* is in fact composed by the NetCDF files *met_em.dxx.YYYY-MM-DD_HH:00:00.nc*, each containing the interpolated boundary conditions and geographic data for the *xx* domain and for every timestep of the supplied GRIB files. In the case considered, as the CFSR dataset is composed of hourly data, the produced *met_em* files are hourly spaced too.

The whole WPS process is controlled by a single external configuration file: *namelist.wps*, which contains the user specified parameters defining the time length and the domain of the simulation as well as the time and space resolutions.

An additional manipulation is needed before launching the actual solver: the NetCDF data produced by *metgrid.exe* must be vertically interpolated onto the user-defined vertical levels of the WRF simulation. This task is performed by the *real.exe* executable, which, despite actually being a pre-processing routine, is not included in the WPS system. The *real.exe* run finally produces the NetCDF files needed by the bare solver: *wrfinput_dxx* and *wrfbdy_dxx*, containing respectively, for each of the nested domains under simulation, the initial condition inclusive of the domain geographic data and the boundary conditions forcing the domain over time.

The last step of a WRF-ARW model simulation is the *wrf.exe* solver run which performs the numerical integration and produces the final output files *wrfout_dxx_YYYY-MM-DD_HH:MN:SS*, one for each simulated domain and for every temporal frame in the total simulated period. Each *wrfout* file contains therefore the complete atmospheric variables set calculated by the ARW solver for every point of the user defined simulation 3-D grid at a single temporal frame.

Both *real.exe* and *wrf.exe* are controlled by *namelist.input*, an external configuration file gathering the user defined parameters regarding the vertical resolution of the simulation, the atmosphere microphysical parameters and, again, the time / length scales and resolutions of the simulation.

A script that makes all steps involved automatic in a WRF-ARW simulation procedure, from the set-up of the configuration files to the archiving of output files, was developed and tested extensively.

The above depicted working scheme is summarized in Figure A.3:

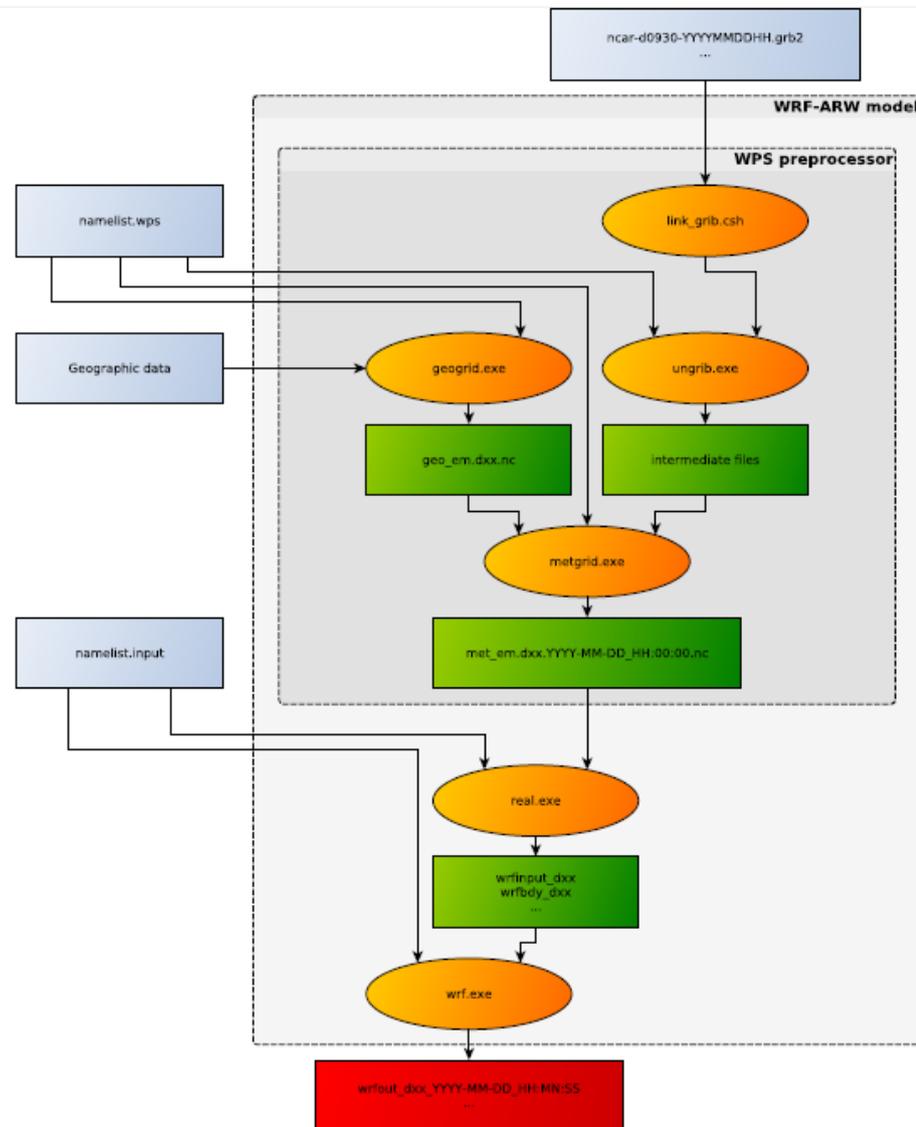


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

WRF-ARW domains, resolution, set-up in MWM

The preliminary set-up and tuning of the met-ocean models chain was performed simulating the month of November 1999, chosen for the remarkable number of very intense storms occurred over the Mediterranean Sea. The second step, before running the entire period 1979-2013, was done simulating one complete year, from November 1999 to October 2000, relying on 41 ground stations along the Mediterranean coast and 25 wave buoys for comparison. The results obtained in these steps are summarized in Contento et al. (2014), Contento et al. (2012-2014) and Donatini (2013).

The two-steps set-up started with the meteorological model *WRF-ARW*, adopting different configurations (domain size, resolution, run length, spin-up time) and comparing the wind speed and direction with observational data from ground stations. Since the *CFSR* (Saha et al, 2010) re-analysis dataset reproduces large scale events correctly, after several tests the final decision was to adopt three relatively small, overlapping domains, which cover respectively the Western, Eastern and Central Mediterranean Sea (Fig. A.4). Hereafter these domains will be referred as MEW, MEE and MEC respectively. The wind field obtained from the 3 domains was merged in a

single dataset by a bi-linear interpolation on a Lat-Lon grid and by a linear blending of the results inside the two overlapping zones (Fig. A.4).

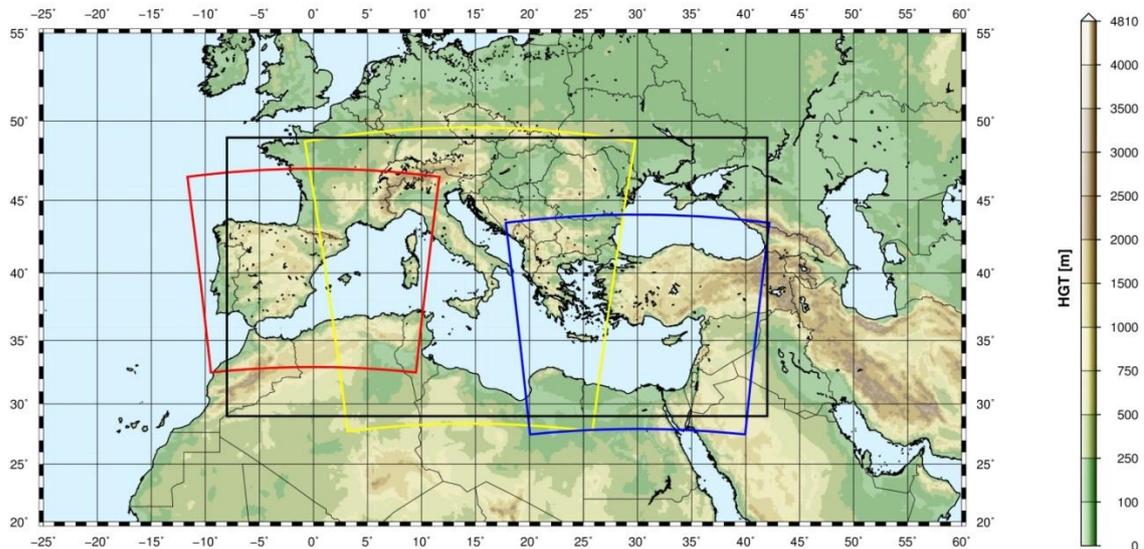


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

The horizontal resolution of *WRF-ARW* was set to 10.53 km, with a grid ratio to the *CFSR* re-analysis data of 1:5 approximately. An additional domain (ITN) with a resolution of 3.51 km was run over Northern Italy as a nested domain of MEC.

The time length of the model run, in terms of hours simulated continuously between two consecutive model initializations with *CFSR* frames, proved to be among the most important parameters that influence the quality of the results. Keeping a small run length reduces the risk of model drift. On the other hand, shortening it excessively may lead to a too constrained behavior of the model, which prevents the correct development of the mesoscale weather structures. The problem of the model drift proved to be particularly tough over the Adriatic Sea where the orography is rather complex and the North-Eastern wind (Bora) can occasionally reach the speed of 150 km/h or more in very narrow zones.

A spin-up time window was used in order to let the model *WRF-ARW* ingest and process the coarser initial conditions from *CFSR*, thus letting it evolve and develop local weather structures. This spin-up window was overlapped with the tail of the previous run so that the data of the simulation during the spin-up window were discarded. The time length of this overlapping window is typically of few hours.

The Mediterranean Sea is a very complex basin from the meteorological point of view, with violent storms usually characterized by a short duration. The two examples given below show the importance of resolving the large space and time gradients of the variables.

Fig. A.5 shows a typical winter wind pattern (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The reference distance of these large variations is of 1° at most.

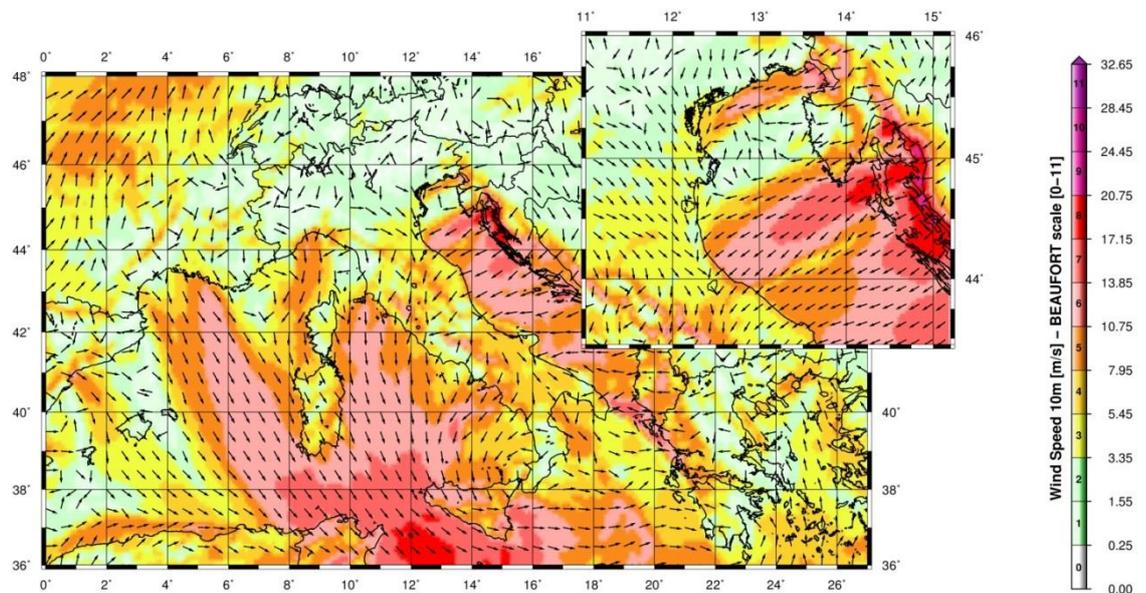


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure shows a zoom over the Northern part of the Adriatic Sea (Istria peninsula).

Fig. A.6 (Contento et al., 2011) shows the time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste that caused the loss of two human lives and damages in the main harbor. The squall lasted about 10 min reaching more than 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW* run at that time by some of the authors of this work for ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>. The black line corresponds to the measurement at the station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [<http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>]. The station is a fixed pole in the middle of the Gulf of Trieste. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s. This situation is not uncommon in the Adriatic zone, mostly during the summer, with violent fronts from North and North-West then rotating to North-East.

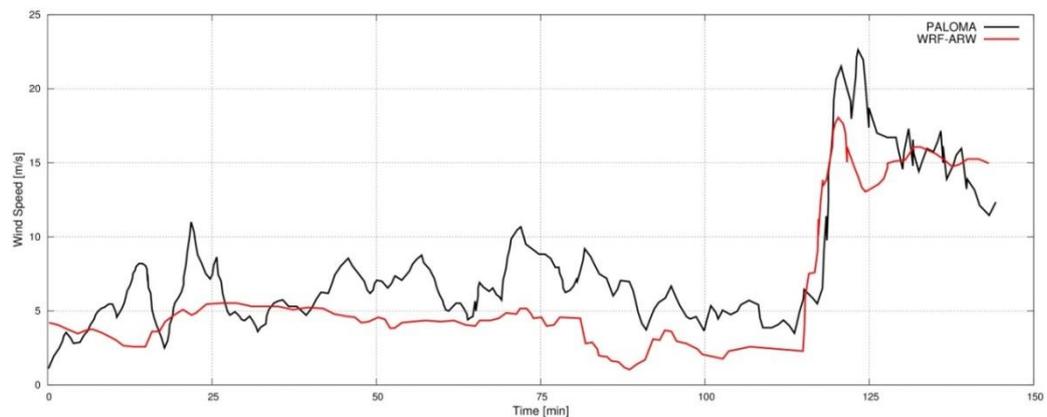


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black line corresponds to the measurement at the measurements station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [<http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>]. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s.

MIKE 21 SW wave model

The wave modeling system includes the state of the art third generation spectral wind-wave model MIKE 21 SW, developed by DHI. MIKE 21 SW simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swell in offshore and coastal areas.

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction
- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth

The discretization of the governing equation in geographical and spectral space is performed using cell-centered finite volume method. In the geographical domain, an unstructured mesh technique is used. The time integration is performed using a fractional step approach where a multisequence explicit method is applied for the propagation of wave action.

For the production of the MWM database, the fully spectral formulation has been adopted, based on the wave action conservation equation, as described in e.g. Komen et al. and Young where the directional-frequency wave action spectrum is the dependent variable.

The time integration of the governing equations is done by using a dynamically determined time step. The time step is determined in order to verify the stability criteria (CFL number).

The only driving force is represented by the two components of wind fields U10 and V10, (x and y component of wind at the elevation of 10m). The process by which the wind transfers energy into the water body for generating waves is controlled by a uncoupled air-sea interaction.

The spectral discretization adopted in the wave model has been deeply investigated and the final configuration is able to guarantee at the same time a high level of accuracy of the results and a reasonable computational effort.

The model domain covers the whole Mediterranean Sea but the spatial resolution is not the same everywhere: while in the offshore areas the spatial resolution is around 0.1° , when approaching the coast the spatial resolution increases up to around 0.03° .

The wave model is forced by the wind fields coming from the WRF Atmospheric models, illustrated above. The wave model generated results in terms of wave parameters (Significant Wave Height, Wave Periods, Wave Directions, etc.) over the whole domain and, in addition, spectral parameters in predefined output locations have been stored, too.

MIKE 21 SW domain, resolution, set-up in MWM

The model domain, covering the entire Mediterranean Sea, is illustrated in Figure A.7.

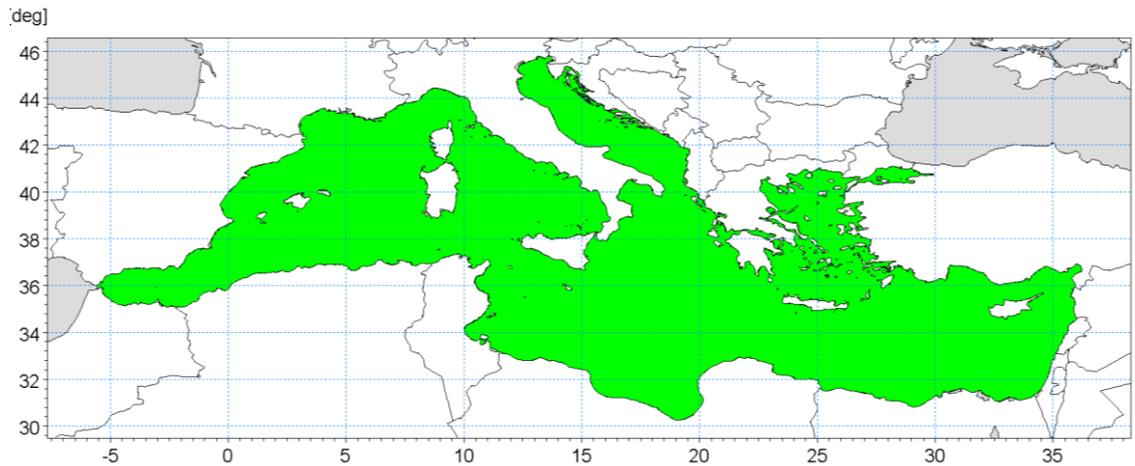


Figure A.7 Wave model domain filled in green

The unstructured mesh, generated over the entire domain by means of a specific tool included in MIKE 21 package, is characterized by different resolutions (in terms of mean length of triangle sides) over the domain. In particular the following criteria have been adopted:

- a coarser resolution of 0.1° (about 10 Km) is used for offshore areas;
- a finer resolution of 0.03° (about 3 Km) has been adopted in shallow water areas, where bathymetry is less than 100m depth or, in coastal areas characterized by very steep profiles, where the distance from the coastline is less than $5\div 10$ Km.

Figure A.8 illustrates the computational mesh of the Mediterranean wave model.

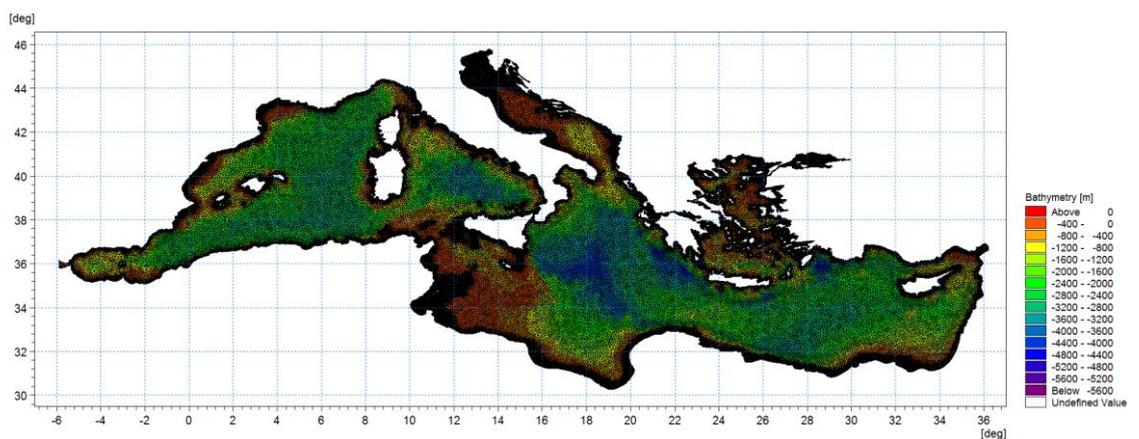


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

Figure A.9 illustrates a detail of the above computational mesh, with special focus on the Adriatic Sea.

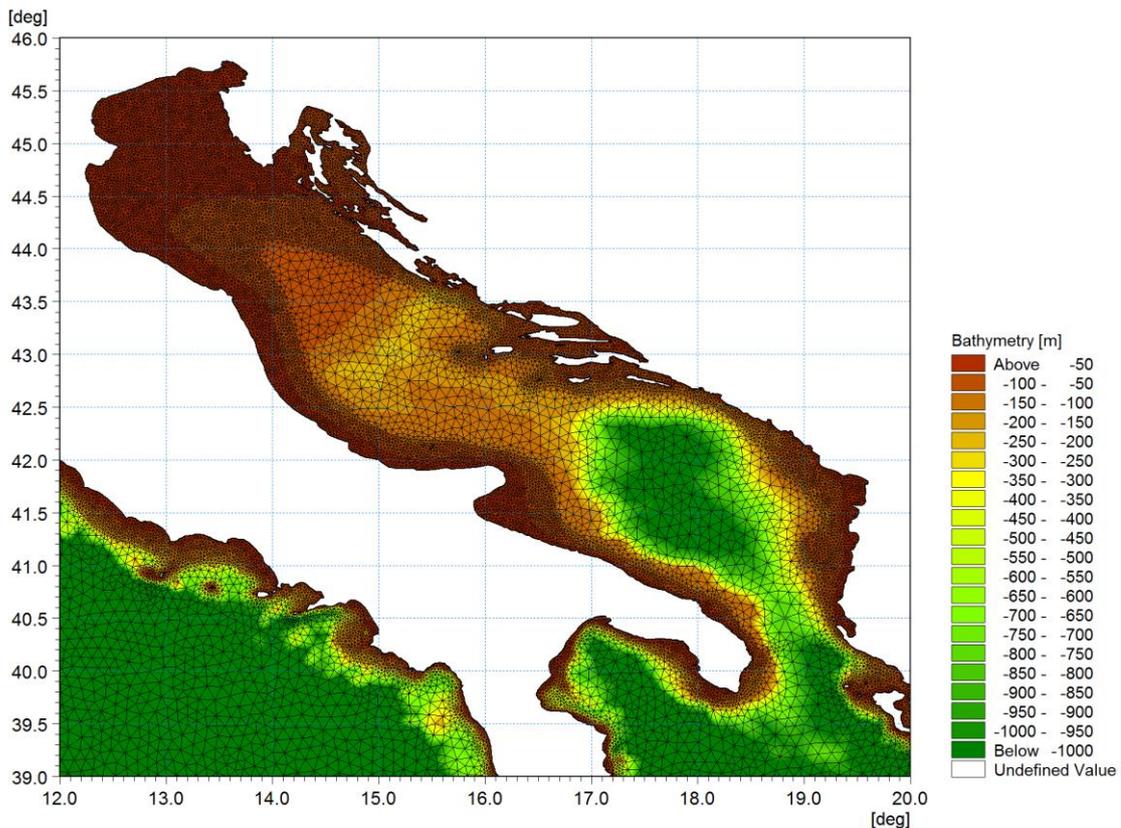


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

Scatter bathymetry data have been derived from GEBCO_08 database. The GEBCO_08 Grid is a 30 arc-second grid of global elevations and it is a continuous terrain model for ocean and land. The grid was generated by combining quality-controlled ship depth soundings with interpolation between sounding points guided by satellite-derived gravity data.

The gridded data are stored in a netCDF data file. Grids are stored as one dimensional arrays of 2-byte signed integer values. The complete data sets provide global coverage. Each data set consists of 21,600 rows x 43,200 columns, resulting in a total of 933,120,000 data points. The data start at the Northwest corner of the file, i.e. for the global file, position 89°59'45"N, 179°59'45"W, and are arranged in latitudinal bands of 360 degrees x 120 points/degree = 43,200 values. The data range eastward from 179°59'45"W to 179°59'45"E. Thus, the first band contains 43,200 values for 89°59'45"N, then followed by a band of 43,200 values at 89°59'15"N and so on at 30 arc-second latitude intervals down to 89°59'45"S. Data values are pixel centred registered, they refer to elevations at the centre of grid cells.

Figure A.10 illustrates GEBCO_08 scatter data for the entire area of the Mediterranean Sea.

GEBCO scatter data have not been used in the whole domain of the Mediterranean Sea. Following a detailed check of agreement and discrepancies between GEBCO database and nautical charts, it has been assumed to limit the use of GEBCO database for offshore areas (up to 500 m water depth) and to use nautical charts for shallower water areas (mainly coastal areas).

The nautical charts database which has been used is the CM93/3 database from CMAP.

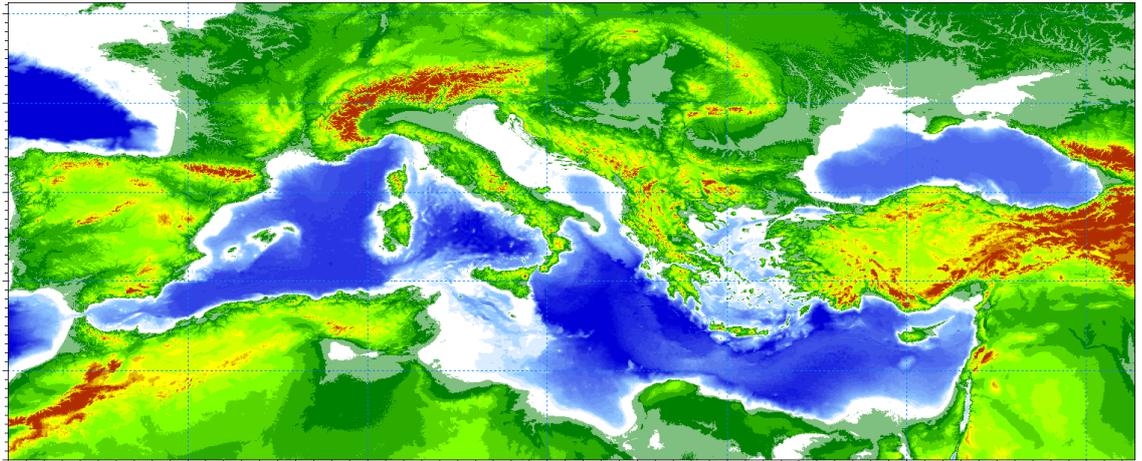


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

The number of discrete frequencies and directions form the so called “spectral resolution”, which is a key parameter for wave models in general. The number of discrete frequencies and directions should in fact be high enough to properly represent the “real shape” of the wave spectrum and, on the other hand, it can’t be too high, since it would lead to unacceptable computational times and memory consumption.

In terms of frequency range, the minimum frequency f_{min} (which corresponds to the maximum wave period T_{max} , according to the common relation $f = \frac{1}{T}$) should be able to capture the longest wave periods that can occur in the Mediterranean Sea.

The analysis of ordinary and extreme waves in the Mediterranean Sea (from available data of wave buoys) has highlighted that almost all the wave energy associated to waves in the Mediterranean Sea are associated to wave periods between 1.5 seconds and 20 seconds.

In addition, a logarithmic distribution for the discrete frequencies acts better than a simple linear distribution, since most of the wave periods are concentrated below 8-10 seconds. A number of frequencies around 30 is widely considered as adequate for a proper discretization of wave energy spectra in the Mediterranean Sea. The following formulation has therefore been adopted:

$$f_n = 0.04 \cdot 1.1^n,$$

where n goes from 0 to 29 (30 frequencies in total). The discrete frequencies range from 0.04 Hz to 0.63 Hz (from 1.6s to 25.0s of Mean Wave Period T_m).

Also the choice of the number of discrete directions (directional discretization) is the result of detailed investigations and tests. In particular, a high number of wave model tests, each one characterized by a different spectral resolution (directional), i.e. by a different number of discrete directions have been setup and run.

Few examples of the results of the above model tests are illustrated from Figure A.11 to Figure A.13 in terms of short time series of wave heights extracted at 3 different locations where also measurements were available (La Spezia wave buoy, Ponza wave buoy, Cetraro wave buoy).

In all the below test cases, it appears that the two time series of wave height characterized by 24 and 36 discrete directions are almost coincident. Higher discrepancies can be found for a much limited number of discrete directions (12). After a high number of tests, the 24 directions solution has been assumed as a very good compromise between accuracy of results and computational time (the computational time of the wave model is linearly dependent on the number of discrete directions).

Provided that wave directions can vary within the 360° rose, the directional resolution of the wave model is $360^\circ/24 = 15^\circ$

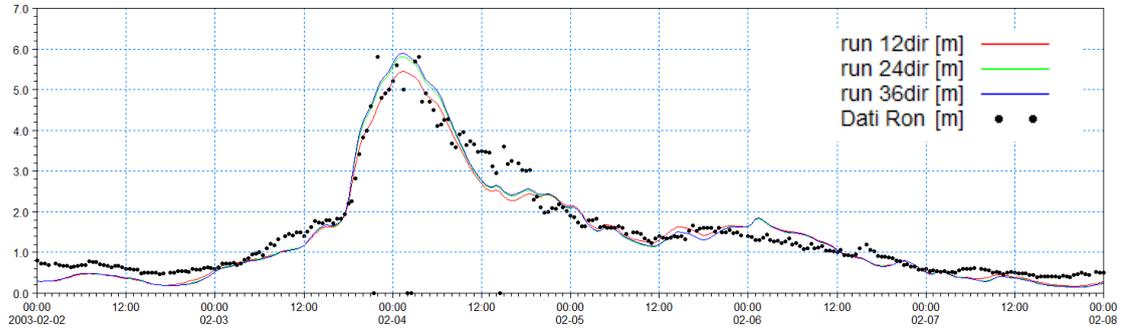


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

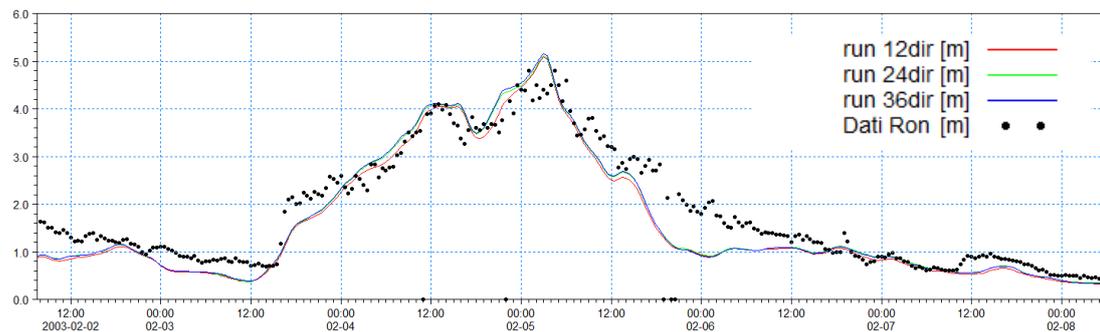


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

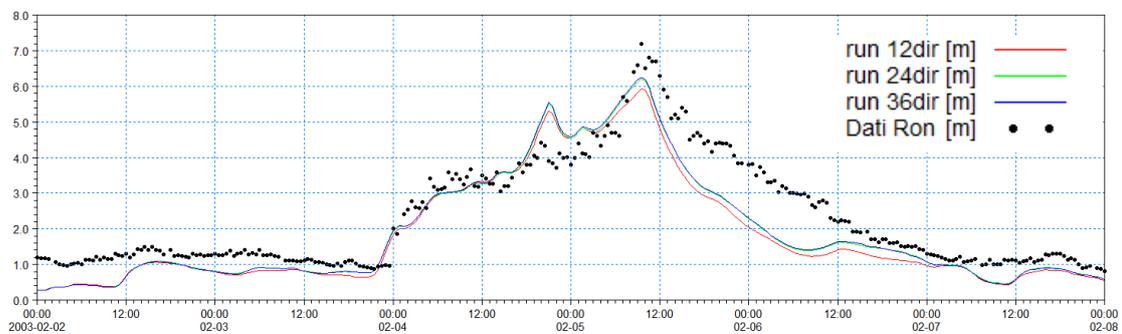


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

Available products of the MWM database

The results of the wind and wave model are stored, in the whole domain, in terms of wind parameters and wave parameters averaged over the wave period (“phase averaged results”). In particular, the following hourly time series are available:

- Wind speed, WS [m/s]
- Wind direction, WD [deg]
- Significant Wave height, Hs [m]
- Mean wave period, Tm [s]
- Peak wave period, Tp [s]
- Zero crossing period, Tz [s]
- Mean wave direction, MWD [deg]
- Peak wave direction, PWD [deg]
- Directional standard deviation, DSD [deg]

In addition, hourly spectral results (in terms of wave energy associated to the frequency-direction bins) are saved on a regular grid with an equidistant spatial resolution of 0.1° .

Figure A.14 and Figure A-15 illustrate respectively an example of phase averaged results over a portion of Mediterranean Sea (Hs) and an local example of spectral results.

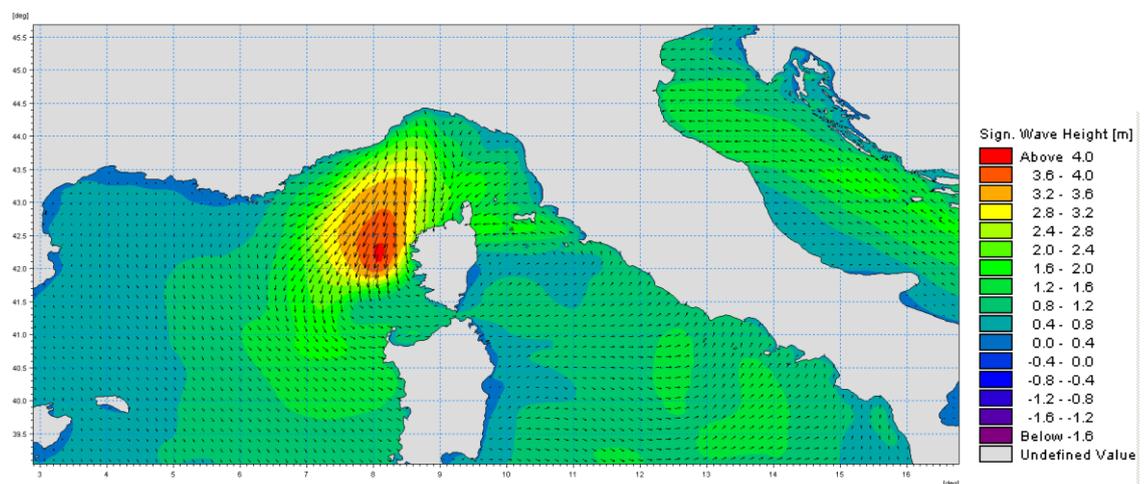


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

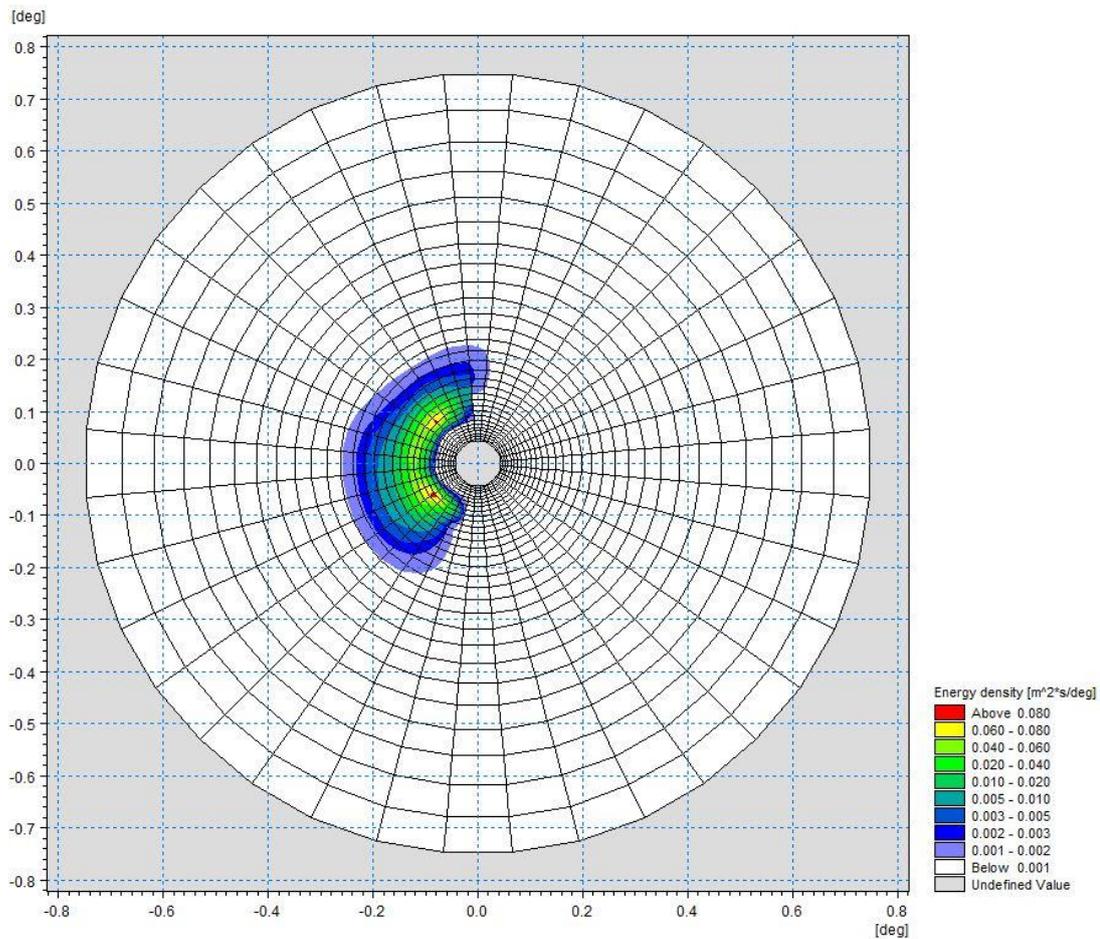


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

References

Arduin, F., Bertotti, L., Bidlot, J.R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J.M., Wittmann, P., 2007, Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 526-541.

Athanassoulis, G., Stefanakos, Ch., Cavaleri, L., Ramieri, E., NoEL, C., Lefevre, J.M., Gaillard, P., 2004, RTP 10.10 / WW_MEDATLAS Scientific Report.

Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings, 16th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.569-587.

Bolaños-Sanchez, R., Sanchez-Arcilla, A., Cateura, J., 2007, Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modeling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems* 65:336-353.

Cavaleri, L., Bertotti, L., 2004, Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. *Tellus*, Vol. 56, pp. 167-175.

Cavaleri, L., 2005, The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea – the calibration phase. *Advances in Geosciences*, Vol. 2, pp. 255-257.

Cavaleri, L., Sclavo, M., 2006, The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol.53, pp. 613-627.

Chawla, A., Spindler, D.M., Tolman, H.L., 2013, Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds, *Ocean Modelling*, Vol. 70, pp. 189-206.

Contento, G., Lupieri, G., Venturi, M. Ciuffardi, T., 2011, A medium-resolution wave hindcast study over the Central and Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16(2), pp. 181–201.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, Feudale, L, Pedroncini, A., Cusati, L.A., 2014, A state-of-the-art met-ocean model chain for wind&wave hindcast over the Mediterranean and Black Seas: implementation, tuning and validation against field data, accepted for presentation at the 21th Symposium Theory and Practice of Shipbuilding SORTA 2014, Oct. 2-4, 2014, Baška, Island of Krk, Croatia.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, 2012-2014, Project SEAPOL - Sistema modellistico ad Elevata risoluzione per l'Analisi storica e la Previsione del moto Ondoso nel mar Ligure, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Technical Reports codes SEAPOL_UT_1.1.0 to SEAPOL_UT_5.1.0.

Donatini, L., 2013, Implementation of a state-of-art met-ocean model chain for hindcast wave simulations over the Mediterranean Sea and comparison of results with field data, Master Degree Thesis, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Italy.

Donatini, L., Lupieri, G., Contento, G., 2014, A medium resolution wind&wave hindcast study for the Mediterranean Sea, Journal Paper, under review.

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Krusemann, P., Meerburg, A., Mueller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973, Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe, A(8)*, 12, 95 pp.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H., Barnett, T.P., 1985. Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parametrizations of the nonlinear energy transfer for applications in wave models. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 15, pp. 1378–1391.

ISPRA (formerly APAT), 2004, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Dipartimento Tutela Acque Marine ed Interne, Servizio difesa delle coste, Analisi preliminare dei dati marini lungo le coste italiane – Atlante delle coste – Il moto ondoso al largo delle coste italiane, Technical Report (in Italian). http://www.apat.gov.it/site/_files/Atlante_coste/Introduzione.pdf.

Janssen, P.A.E.M., Abdalla, S., Hersbach, H., Bidlot, J.R., 2007: Error Estimation of Buoy, Satellite, and Model Wave Height Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. **24**, pp. 1665–1677. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH2069.1>

Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J., Skamarock, W., 2001, Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. *Developments in Teracomputing. In Proceedings of the 9th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, 269-276.

Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., Wang, W., 2005, The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. In *Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzyński. World Scientific, 56 - 168.

Ponce del León, S., Guedes Soares, C., 2008, Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 920-929.

Puertos del Estado, Spain, 2009, – (http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/), private communication.

Queffeuou, P., 2004, Long term validation of wave height measurements from altimeters. *Marine Geodesy*, Vol. 27, 495-510.

Queffeuou, P., Croizé-Fillon, D., 2010, Global altimeter SWH data set, version 7, Technical Report, Ifremer, ftp://ftp.ifremer.fr/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter_wave_merge__7.0.pdf

Queffeuou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series. Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington, USA. (<http://www.aviso.oceanobs.com/en/courses/ostst/ostst-2009-seattle/posters/>).

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Wollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., VanDelst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010, *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 91, 1015–1057.

Skamarock WC, Klemp JB, 2007, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *J. Comp. Phys.* Special issue on environmental modeling.

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Tolman, H.L., 2002a. Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modelling*, Vol. 4, pp. 269–289.

Tolman, H.L., 2002f, Validation of WAVEWATCH III, version 1.15 for a global domain. Tech. Note 213, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 33p.

Tolman, H.L., 2008, http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/workshops/Altimeter_workshop_08/Coastal_Alt_Presentations/18_Tolman_Sig_Wave_Ht.pdf

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P.A.E.M., (1984). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Young, I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.

WAMDI-group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, (1988) "The WAM model – a third generation ocean wave prediction model", *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810

General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) – www.gebco.net

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/

Ole Baltazar Andersen (1995), Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry, J. of Geophys. Res., 100, C12, p. 25249-25260

Doodson, A. T., Warburg, H. D., 1941 "Admiralty manual of tides"

Web references

ARPA-FVG OSMER, [Online] <http://www.osmer.fvg.it/home.php>

ARW Online Tutorial." [Online] Available at
<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>

CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010." [Online] Available at
<http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>

NOAA, Hourly/Sub-Hourly Observational Data." [Online] Available at
<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>

The Weather Research&Forecasting Model Website." [Online] Available at <http://www.wrf-model.org/index.php>

ALLEGATO B
MIKE 21
Descrizione Tecnica



MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,
aree costiere ed offshore



INDICE

| | | |
|---|---|----|
| 1 | PREMESSA | 1 |
| 2 | MODULO D'ONDA (SW)..... | 4 |
| 3 | MODULO IDRODINAMICO (HD FM) | 10 |
| 4 | MODULO TRASPORTO SOLIDO - SEDIMENTI NON COESIVI (ST)..... | 15 |
| 5 | MODULO SHORELINE MORPHOLOGY – (SM) | 17 |

1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

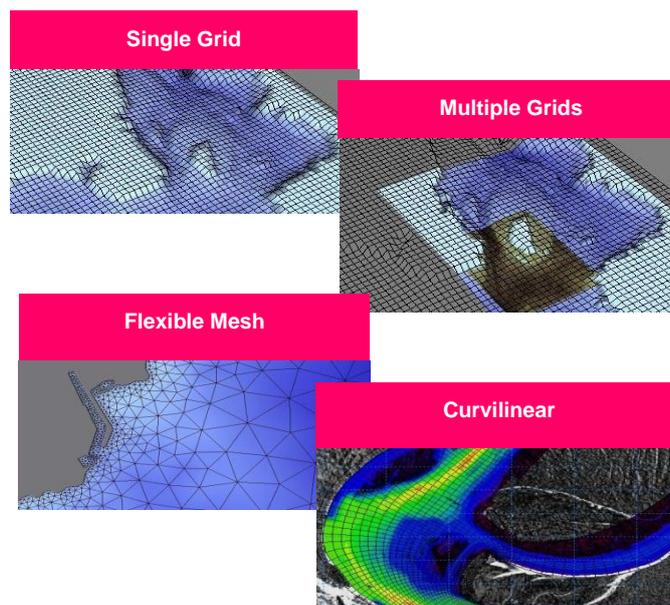
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

| Breve descrizione dei moduli MIKE 21 | |
|---|---|
| Modulo | Descrizione |
| PP (Pre and Post Processing) | Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di MIKE 21. |
| HD (Hydrodynamics) | Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici anche in presenza di strutture complesse. |
| AD (Advection – Dispersion) | Il modulo simula trasporto, dispersione e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. Può essere utilizzato per studi di dispersione di soluti non reagenti o caratterizzati da decadimento lineare o eccesso di temperatura o salinità. |
| ST (Sand Transport) | E' il modulo avanzato per il trasporto solido di materiale non coesivo generato da correnti o dall'azione combinata di onde e correnti. ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale. |
| MT (Mud Transport) | Modulo multifrazione e multistrato in grado di descrivere l'erosione, il trasporto e la rideposizione di materiale coesivo e di sedimenti misti coesivi e non. Particolarmente adatto per studi di dispersione di sedimento conseguenti a dragaggi dei fondali. |
| SM (Shoreline Morphology) | Questo modulo combina la modellistica di dettaglio 2D per onde e correnti in un modello morfologico, consentendo di simulare in modo stabile e robusto l'evoluzione della linea di riva in ambiente 2D. |
| OS (Oil Spill) | Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento. |
| PA/PT (Particle Tracking) | Simula il trasporto e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. E' utilizzato in particolare per analisi di rischio, versamenti accidentali e monitoraggio delle attività di dragaggio. Utilizza un approccio Lagrangiano. |
| SW (Spectral Waves) | Modulo di propagazione spettrale di onde <i>sea</i> ed onde <i>swell</i> in aree offshore e costiere. Permette di simulare rifrazione, diffrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, riflessione semplice utilizzando un approccio con maglia FM. E' il modulo d'onda oggi più utilizzato per applicazioni costiere e offshore. |
| BW (Boussinesq Wave) | E' il modulo d'onda più completo, in grado di simulare anche gli effetti di riflessione in ogni direzione e di diverso ordine; per questo viene utilizzato per le analisi di agitazione ondosa all'interno di bacini portuali. Include i fenomeni idrodinamici ed utilizza una maglia quadrata. |
| MA (Mooring Analysis) | Questo modulo consente di calcolare le tensioni delle linee di ormeggio insieme con i movimenti che la nave ormeggiata può avere nei suoi 6 gradi di libertà (surge, sway, heave, roll, pitch e yaw), in relazione a diverse tipologie di forzanti: onda, vento e corrente. |
| ECOLab (Ecological Modelling) | Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti. |
| ABMLab | Modulo avanzato per modellizzazione "agent based". |

2 MODULO D'ONDA (SW)

MIKE 21 SW rappresenta lo stato dell'arte tra i modelli numerici spettrali di nuova generazione per vento ed onde sviluppato da DHI. Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere e offshore.

MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima è basata sulla "wave action conservation equation" sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda, è basata su una parametrizzazione della "wave action conservation equation" introdotta nel dominio delle frequenze. Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una mesh di calcolo non strutturata.

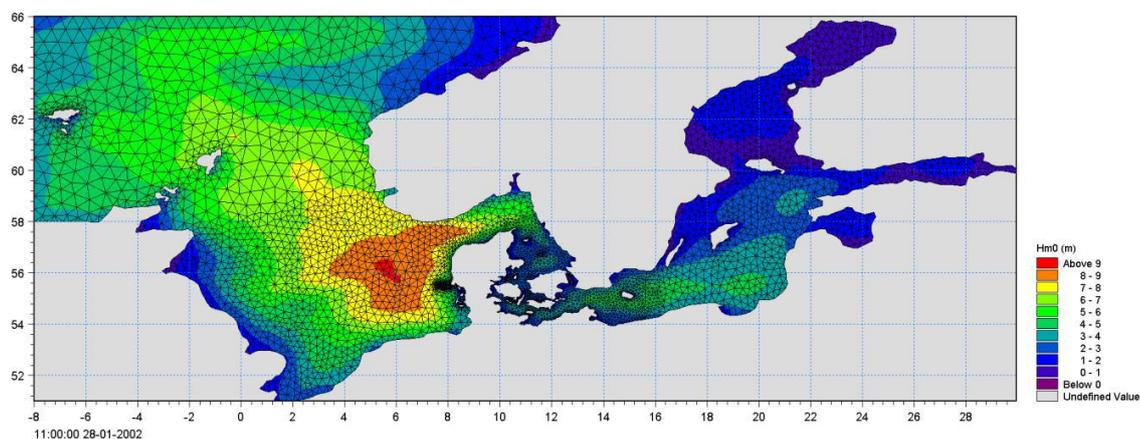
Il modello, nella formulazione "fully spectral", include i seguenti fenomeni fisici:

- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice;

MIKE 21 SW è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteo marini off-shore (boe ondometriche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.



MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un'opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall'azione del moto ondoso. I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di radiation stress forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l'utilizzo di altri moduli del pacchetto MIKE21.



EQUAZIONI DEL MODELLO

Fully spectral formulation

L'equazione alla base di MIKE 21 SW è la "wave action balance equation", sviluppata in coordinate cartesiane e sferiche. Tale equazione, in coordinate cartesiane, è indicata di seguito:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

dove $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ è la "density action", t è il tempo, $\bar{x} = (x, y)$ rappresenta le coordinate cartesiane, $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ è la velocità di propagazione di gruppo delle onde in quattro dimensioni (x, y, θ, σ) . S è il termine di generazione di energia. Le celerità dell'onda sono date dalle equazioni della cinematica lineare:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} d \right) - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right)$$

dove s ed m sono le coordinate spaziali rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda θ , d è la profondità, \bar{k} è il vettore del numero di onde di magnitudo k , \bar{U} è il vettore di velocità di corrente.

Il termine di generazione, S , a secondo membro della “ wave action balance equation” è dato da:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Dove S_{in} rappresenta il trasferimento di quantità di moto dovuta al vento, S_{nl} il contributo dovuto all'interazione non lineare tra onde, S_{ds} la dissipazione dovuta al white capping, S_{bot} la dissipazione dovuta all'attrito col fondo e S_{surf} la dissipazione dovuta al frangimento.

Il contributo del vento è basato sulla quasi-linear theory of wind-wave generation (Janssen's 1989, 1991), dove la quantità di moto trasferita dal vento alla superficie libera non dipende solo dalle tensioni del vento ma anche dallo stato di mare stesso. Il contributo legato all'interazione non lineare tra onde è approssimato mediante l'approccio DIA (Hasselmann et al. 1985). Il termine di generazione relativo alla dissipazione da white capping è basato sulla teoria di Hasselmann (1974) e Janssen (1989). La dissipazione dovuta all'attrito col fondo è modellata usando l'approccio di Johnson e Kofoed-Hansen (2000), che dipende dal moto ondoso e dalle caratteristiche dei sedimenti. Il frangimento è basato sull'approccio di Battjes e Janssen (1978) e Eldeberky e Battjes (1996).

Directional decupled parametric formulation

Questa formulazione del modello è basata su una parametrizzazione della “ wave action balance equation” (Holthuijsen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1$$

dove $m_0(x, y, \theta)$ e $m_1(x, y, \theta)$ sono rispettivamente i momenti di ordine zero e ordine uno della “action spectrum” $N(x, y, \sigma, \theta)$. $T_0(x, y, \theta)$ e $T_1(x, y, \theta)$ sono i termini di generazione basati sulla action spectrum. I momenti $m_n(x, y, \theta)$ sono definiti dall'equazione:

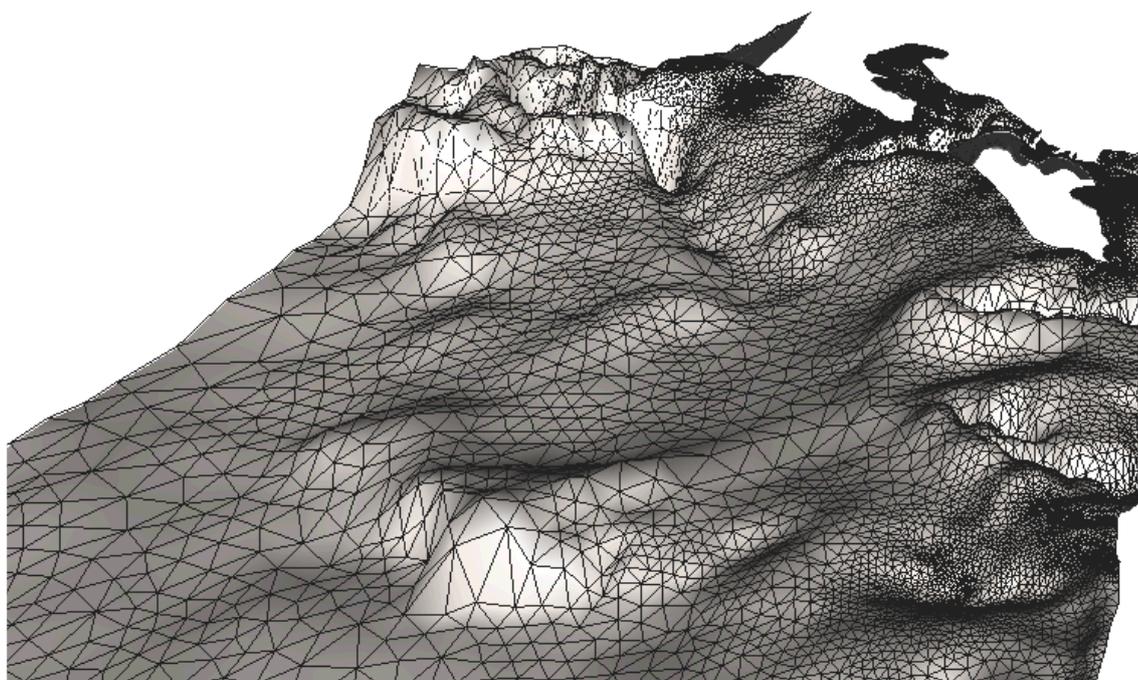
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

I termini di generazione T_0 e T_1 tengono conto dell'effetto del vento (solo per la modalità stazionaria) attraverso una relazione empirica (Johnson 1998) della dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo e al frangimento, e dell'effetto di interazione onde-correnti.

TECNICHE DI SOLUZIONE

La discretizzazione spaziale e spettrale è effettuata utilizzando un metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il dominio delle frequenze può essere discretizzato sia in maniera lineare che logaritmica.

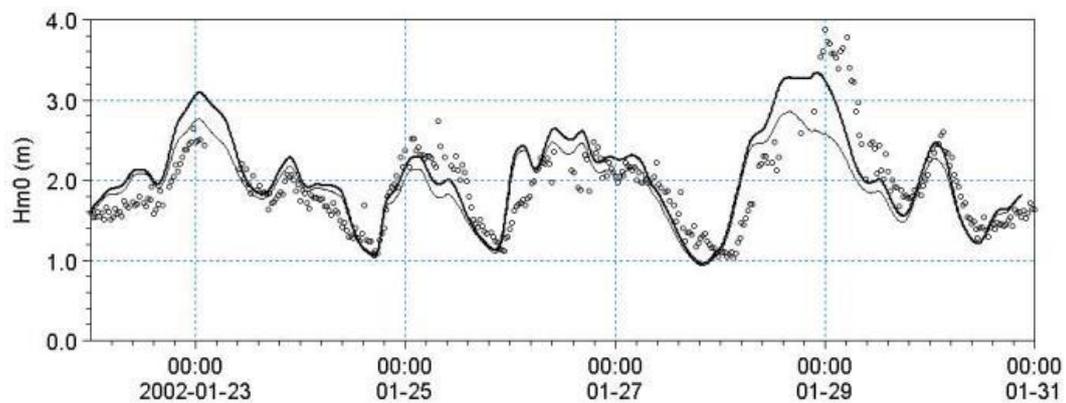
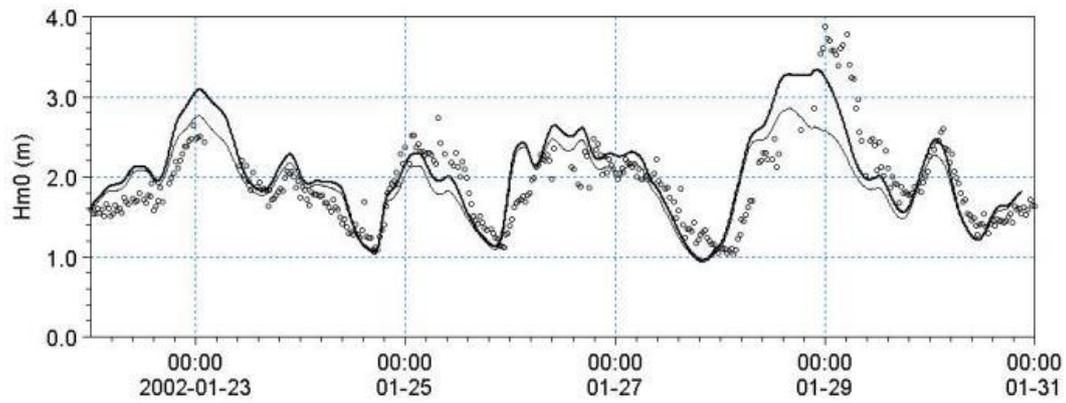
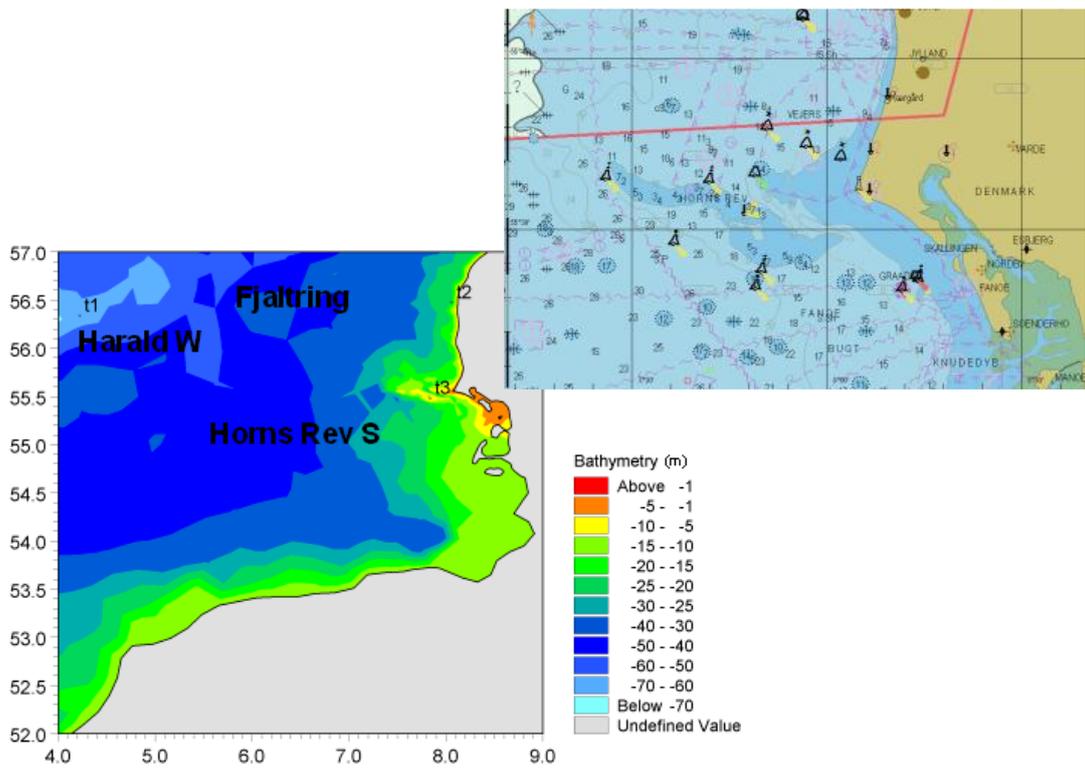
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.



INPUT AL MODELLO

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

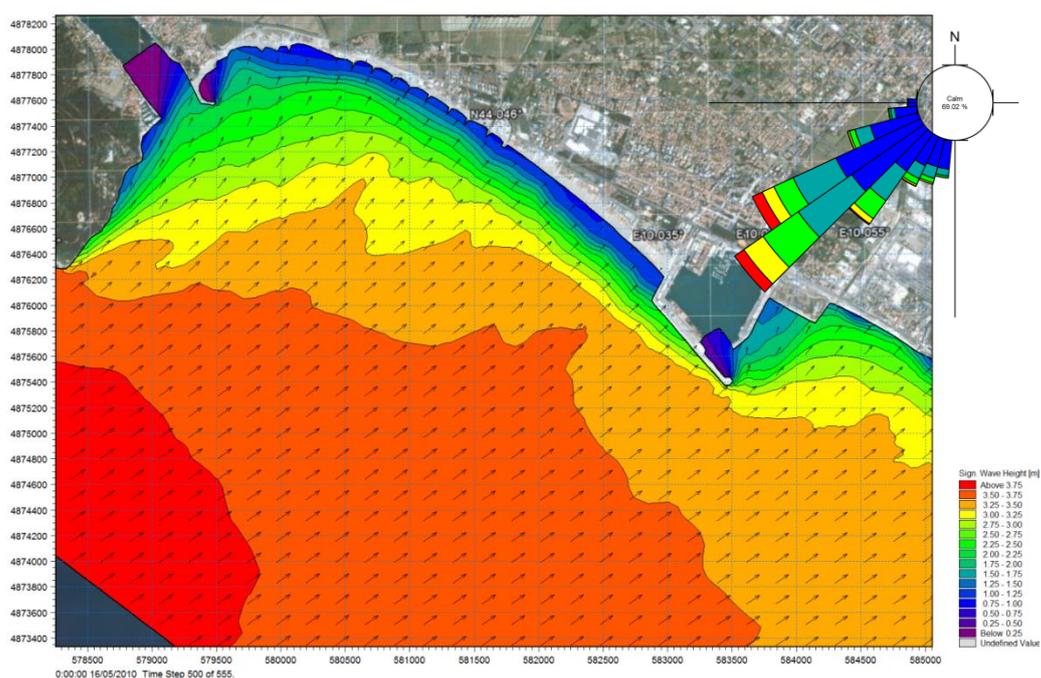
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).



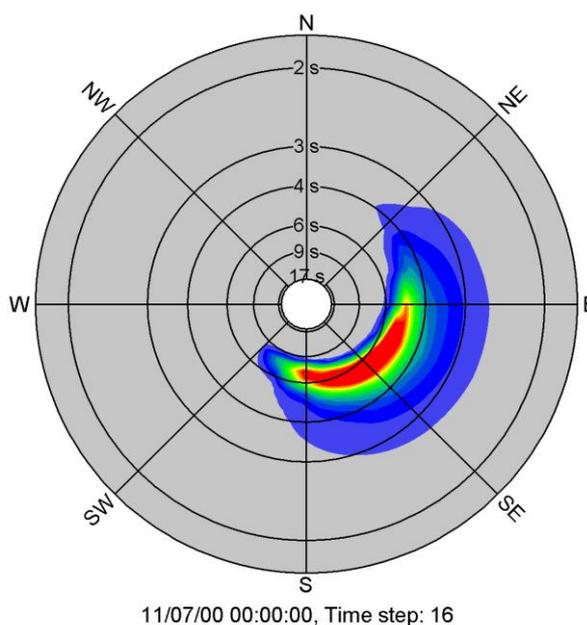
OUTPUT DEL MODELLO

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun time step, si dividono essenzialmente nelle seguenti categorie.

- parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa H_m0 , periodo di picco T_p , Periodo medio T_{01} , periodo di zero up crossing T_{02} , Periodo dell'energia T_{-10} , Direzione di picco PWD , Direzione media MWD , Deviazione standard direzionale σ , Tensore dei radiation stress S_{xx} S_{xy} S_{yy} . Se il modello è utilizzato in modalità fully spectral, ciascuna delle variabili sopra riportate possono essere suddivise in componente swell e wind sea. La divisione può essere effettuata mediante l'introduzione di una soglia fissa o dinamica;



- output spettrali: spettro combinato frequenza-direzione, spettro direzionale, spettro di frequenza.



3 MODULO IDRODINAMICO (HD FM)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. MIKE 21 HD FM può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di sedimenti) richiedono la risoluzione contestuale degli aspetti idrodinamici.

In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- flooding and drying;
- gradienti di densità;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/evaporazione;
- moto ondoso (attraverso i radiation stress);
- apporti puntuali (pozzi e sorgenti).

Il modulo idrodinamico, utilizzato assieme al modulo di trasporto TR, è utilizzato per simulare la dispersione di sostanze disciolte o in sospensione. Analogamente, il modulo idrodinamico può essere accoppiato al modulo di qualità delle acque ed idro-ecologia (ECO Lab) per gli studi ed applicazioni nel settore ecologico.

Inoltre, il modulo HD può essere utilizzato insieme ai moduli Sand Transport e Mud Transport per simulare il trasporto rispettivamente di materiale non coesivo e coesivo.

Nelle aree costiere, laddove il trasporto è in gran parte dominato dalle correnti indotte dal moto ondoso, il modulo idrodinamico può essere forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'utilizzo del modulo SW (Spectral Wave).

EQUAZIONI DEL MODELLO

Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica.

Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità. La densità non dipende dalla pressione ma dai soli gradienti di temperatura e salinità. Per il modello 3D, la superficie libera è modellata utilizzando l'approccio di trasformazione delle coordinate sigma o combinato sigma-z. A seguire si presentano in coordinate cartesiane, le equazioni utilizzate.

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Equazione della quantità di moto lungo la componente x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

Equazione della quantità di moto lungo la componente y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Il calcolo degli scambi di temperatura (T) e di salinità (s) è modellato secondo le equazioni generali del trasporto:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \hat{H} + s_s S$$

I termini di diffusività orizzontale sono definiti da:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

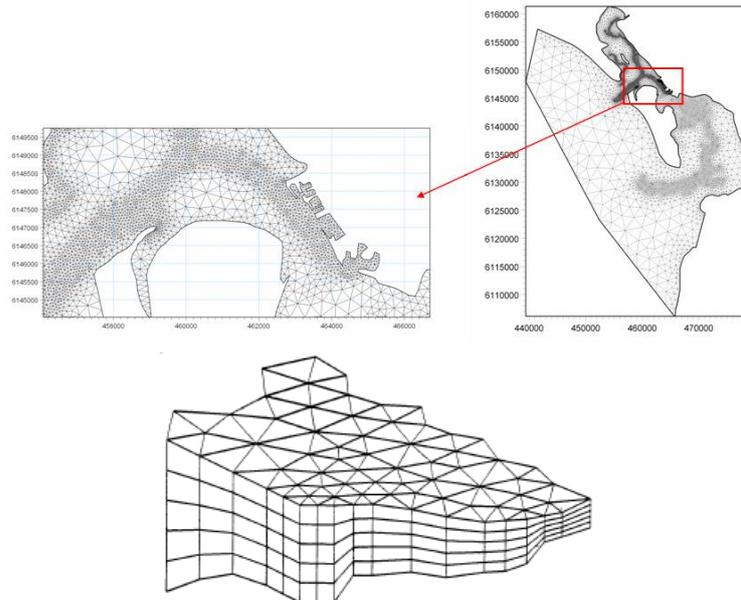
Le equazioni per l'idrodinamica bidimensionale sono ottenute integrando le equazioni lungo la verticale. Possono essere considerati anche gli scambi termici con l'atmosfera.

Symbol list

| | |
|-------------------|---|
| t | <i>time</i> |
| x, y, z : | <i>Cartesian coordinates</i> |
| u, v, w : | <i>flow velocity components</i> |
| T, s : | <i>temperature and salinity</i> |
| D_v : | <i>vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient</i> |
| \hat{H} : | <i>source term due to heat exchange with atmosphere</i> |
| S : | <i>magnitude of discharge due to point sources</i> |
| T_s, s_s : | <i>temperature and salinity of source</i> |
| F_T, F_s, F_c : | <i>horizontal diffusion terms</i> |
| D_h : | <i>horizontal diffusion coefficient</i> |
| h : | <i>depth</i> |

TECNICHE DI SOLUZIONE

La versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

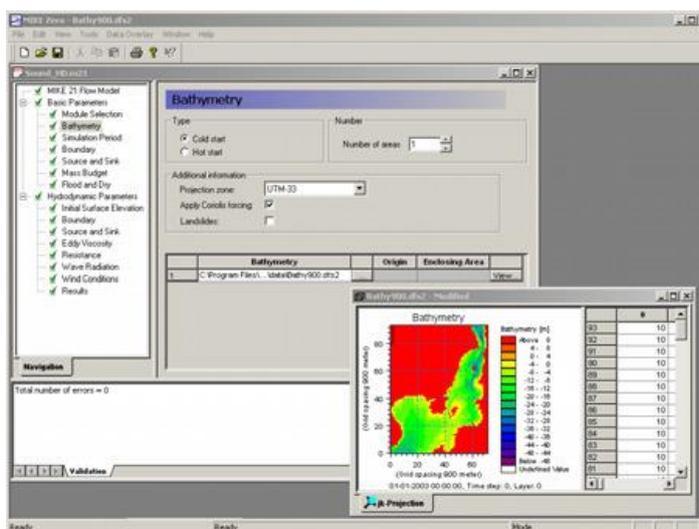


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

INPUT AL MODELLO

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).

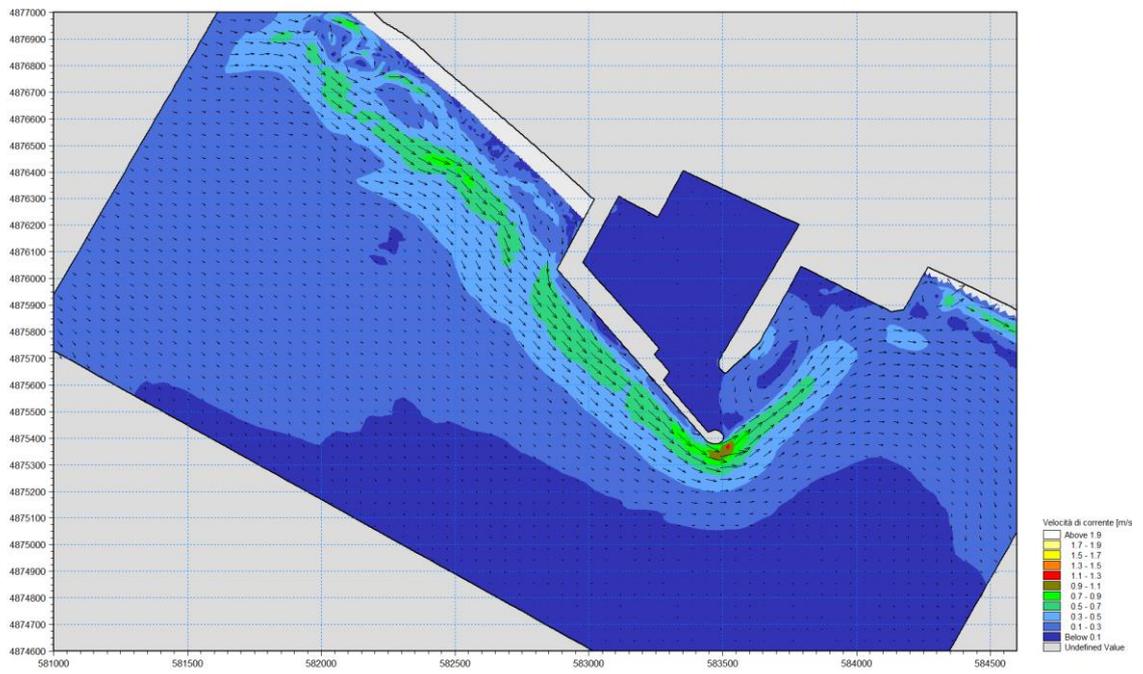


OUTPUT DEL MODELLO

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazioni da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascuna cella/elemento di calcolo (griglia classica o flessibile), è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- densità, temperatura e salinità;
- velocità di corrente e direzione;
- velocità del vento;
- pressione atmosferica.



4 MODULO TRASPORTO SOLIDO - SEDIMENTI NON COESIVI (ST)

ST (Sand Transport) è il modulo di MIKE 21 per il calcolo della capacità di trasporto di sedimenti non coesivi, per effetto dell'azione combinata onde-correnti o delle sole correnti. MIKE 21 ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale. In ambito fluviale MIKE 21 ST può essere sostituito dal MIKE 21 C che, utilizzando una griglia di calcolo curvilinea, rappresenta lo stato dell'arte tra i codici di calcolo per la morfologia fluviale.

Il modulo ST calcola il trasporto solido sulla base delle simulazioni idrodinamiche effettuate con il modulo HD ed eventualmente delle simulazioni di moto ondoso effettuate con SW. Per effettuare simulazioni a fondo mobile è possibile includere il feedback degli effetti dell'idrodinamica e della propagazione del moto ondoso sulla batimetria utilizzando i moduli HD, SW ed ST in maniera accoppiata.

Il modulo ST può essere applicato per la quantificazione della capacità di trasporto laddove il moto ondoso e/o le correnti causano trasporto di sedimenti non coesivi. ST può essere utilizzato per applicazioni a larga scala oppure a scala locale, laddove si desidera studiare l'impatto di strutture costiere sulla dinamica litoranea con risoluzioni dell'ordine del metro. Aree di applicazione tipiche sono: gestione e protezione dei litorali; ottimizzazione di layout portuali; studi di insabbiamento dei bacini portuali, morfologia costiera etc.



TECNICHE DI SOLUZIONE

Il modulo ST di MIKE 21 presenta due diverse implementazioni numeriche a seconda che sia utilizzato in modalità "solo correnti" o modalità combinata onde-correnti.

Modalità combinata onda-corrente - approccio quasi 3D

Nel caso di effetto combinato di moto ondoso e correnti, i valori del trasporto solido sono calcolati attraverso la generazione di una tabella (Sediment Table) creata precedentemente alla simulazione. La generazione della tabella si basa su un approccio quasi-3D (metodo STP), tenendo conto delle condizioni locali di moto ondoso, del profilo di corrente e delle caratteristiche

sedimentologiche. Nel modello possono essere inclusi alcuni effetti secondari che possono avere una influenza sul trasporto solido, quali: la formazione di ripples, la pendenza del fondale, l'undertow, l'asimmetria del moto ondoso, lo streaming.

Per approccio "quasi 3D" si intende la possibilità di considerare (parametrizzandoli) alcuni aspetti tipicamente tridimensionali del trasporto solido anche se il calcolo del trasporto stesso viene effettuato attraverso un metodo, l'STP, che si basa su un approccio tipicamente 2D.

In particolare il modello tiene conto:

della caratterizzazione del profilo di corrente lungo la verticale: il valore di velocità di corrente mediato, preso in input da ST, viene ridistribuito lungo la verticale in modo tale da effettuare correttamente il calcolo del trasporto tenendo conto del reale profilo verticale di corrente;

della discretizzazione dell'onda infra-periodo: l'intero periodo dell'onda viene suddiviso in diversi step, per ciascuno dei quali viene effettuato il calcolo del trasporto.

Modalità "solo corrente"

Il modulo ST nella modalità "pure currents" offre la possibilità di includere il calcolo esplicito del trasporto in sospensione, attraverso la risoluzione dell'equazione di avvezione dispersione. In pratica, vengono tenuti in considerazione quegli effetti del trasporto che non si esauriscono nell'ambito di ciascuno step di calcolo del modello (formulazione di non-equilibrio, lag).

INPUT AL MODELLO

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- dati idrodinamici (livelli e campi di corrente calcolati con HD);
- dati di moto ondoso (campi di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione calcolati con SW);
- dati sedimentologici (diametro medio variabilità del fuso);
- parametri morfologici (tra cui la frequenza di upgrade della batimetria).

Input fondamentale per il modello è la cosiddetta "Sediment Table", un database che include i valori di capacità di trasporto calcolati al variare di: profondità, altezza dell'onda, velocità della corrente, granulometria del materiale di fondo ecc., in un range ipotizzato per tali grandezze. Durante la simulazione vera e propria, il modulo MIKE 21 ST "legge" le condizioni locali delle grandezze di interesse e preleva le informazioni dalla Sediment Table, calcolando il valore di capacità di trasporto da associare alla singola cella per interpolazione a partire dalle condizioni più prossime. La Sediment Table deve essere generata utilizzando l'apposito applicativo "Generation of Q3D Sediment Tables".

OUTPUT DEL MODELLO

In output vengono rappresentati il campo vettoriale della capacità di trasporto (direzione ed entità del trasporto) i tassi di sedimentazione/erosione del fondo e, nel caso di simulazione a fondo mobile, le variazioni effettive della batimetria.

5 MODULO SHORELINE MORPHOLOGY – (SM)

In questa sezione è illustrato il modello MIKE 21 Shoreline Morphology, un modello che combina in un unico strumento un approccio numerico bidimensionale per la caratterizzazione delle onde, correnti e trasporto di sedimenti e un approccio monodimensionale per la simulazione della posizione della linea di riva nel tempo. Nello specifico, il modello integra al suo interno i quattro moduli (elencati di seguito) che operano in maniera simultanea ed interagiscono tra di loro ad ogni step di calcolo:

- MIKE 21 SW – modulo d’onda;
- MIKE 21 HD – modulo idrodinamico;
- MIKE 21 ST – modulo di trasporto di sedimenti;
- MIKE 21 SM – modulo di evoluzione della linea di riva.

MIKE 21 SW (Spectral Waves) è il modello utilizzato per risolvere la propagazione delle onde in aree costiere ed offshore. Il modello è stato sviluppato dal DHI ed è in grado di simulare i fenomeni che hanno luogo nella propagazione del moto ondoso da largo verso riva. Tale modello, risolve la cosiddetta “Wave action balance equation” in riferimento ad una maglia triangolare non strutturata. Questo aspetto risulta fondamentale perché permette di utilizzare una maglia di calcolo variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, shoaling, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell’onda incidente su distanze relativamente limitate.

MIKE 21 HD (HydroDynamics) è il modello utilizzato per risolvere la generazione e propagazione delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso. Il modello risolve la cosiddetta “non-linear shallow water equations” in riferimento alla stessa maglia di calcolo utilizzata per il modello d’onda. Nello specifico, il modello idrodinamico viene forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l’applicazione di MIKE21 SW e consente di ottenere la distribuzione delle principali variabili idrodinamiche, quali: velocità di corrente, direzione della corrente e livelli.

MIKE 21 ST (Sand Transport) è il modello utilizzato per calcolare, una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (D50) e di variabilità del fuso (sediment gradation), la capacità di trasporto dovuta all’azione combinata di onde e correnti. Il modello inoltre permette di calcolare, in funzione dei gradienti di capacità di trasporto, i volumi erosi o depositati per ciascun elemento della mesh di calcolo.

MIKE 21 SM (Shoreline Module) è infine il modulo che, sulla base delle caratteristiche dell’onda, idrodinamiche e del trasporto variabili nel tempo e nel dominio di calcolo, fornisce l’evoluzione della linea di riva. Il modello divide l’intero dominio di calcolo in un numero finito di “strisce” perpendicolari alla linea di costa. Per ognuna delle strisce viene risolta l’equazione riportata di seguito, denominata “one-line modified equation”:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{vol}{dA_z}$$

dove dn rappresenta l’avanzamento o l’arretramento della linea di riva (*shoreline*) lungo la perpendicolare alla linea di costa nell’intervallo temporale dt ; vol è il volume accumulato/eroso nell’intera striscia durante l’intervallo temporale e dA_z rappresenta l’area della striscia proiettata sul piano verticale come mostrato nella Figura 5-1.

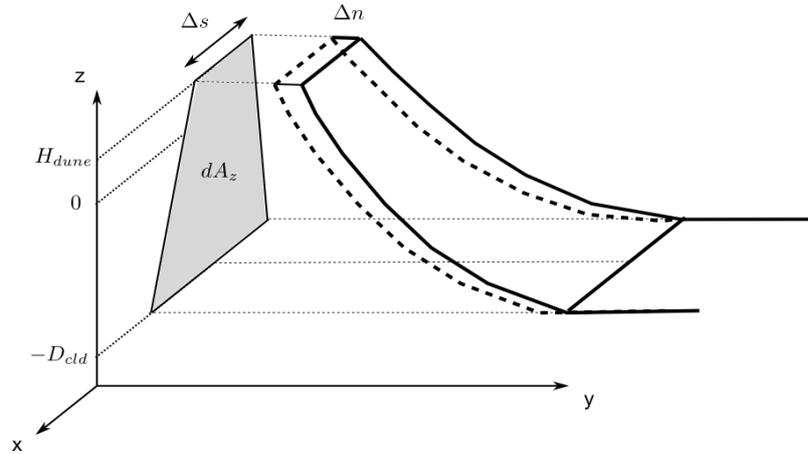


Figura 5-1 Schema della one-line modified equation

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. I moduli d'onda ed idrodinamico sono inoltre accoppiati dinamicamente, ovvero nella propagazione dell'onda si utilizzano la distribuzione dei livelli e delle correnti generate dal modulo idrodinamico e viceversa il calcolo delle variabili idrodinamiche è influenzato dai campi di altezza d'onda (in termini di *radiation stress*). Lo schema funzionale del modello è illustrato in Figura 5-2.

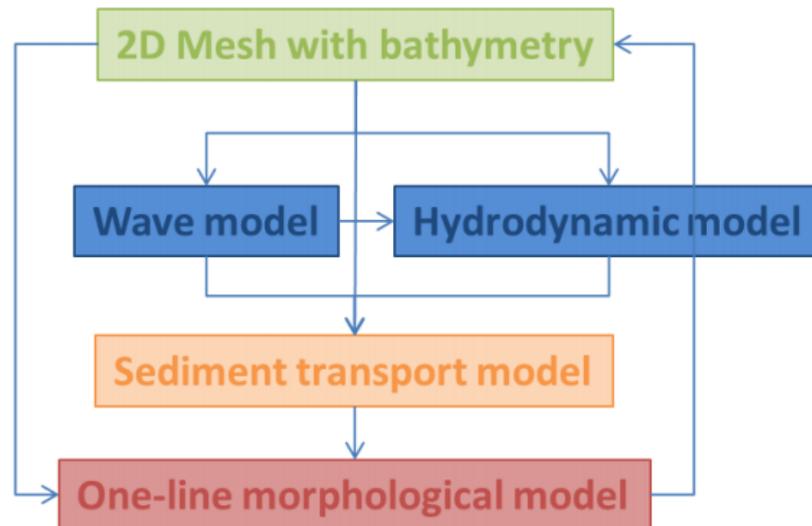


Figura 5-2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model

ALLEGATO C
Littoral Process
Descrizione Tecnica



LITPACK

Sistema modellistico integrato per lo studio dei processi di dinamica costiera





INDICE

| | | |
|---|---------------------|---|
| 1 | PREMESSA | 1 |
| 2 | IL METODO STP | 2 |
| 3 | LITDRIFT | 3 |
| 4 | LITLINE | 5 |

1 PREMESSA

La pianificazione e la messa in opera di interventi e strategie di gestione della costa, a scala sia locale che regionale, richiede un'approfondita conoscenza dei processi fisici che controllano i fenomeni di erosione e sedimentazione. LITPACK comprende un insieme di moduli ad una linea sviluppati ad hoc per l'analisi e simulazione delle differenti fenomenologie caratteristiche della fascia costiera, risultando uno strumento di grande supporto ed efficacia nelle attività di pianificazione degli interventi di difesa della costa e di supporto alla progettazione.

I diversi moduli di LITPACK sono generalmente utilizzati in affiancamento a MIKE 21 nell'affrontare uno studio sulle dinamiche costiere. L'approccio monodimensionale di LITPACK consente infatti di condurre analisi rapide su una notevole quantità di dati (intero insieme del clima ondoso di un sito per il calcolo dell'orientazione di equilibrio della costa e del trasporto annuo complessivo) o su orizzonti temporali estesi (evoluzione della linea di costa).

In presenza di opere complesse o di fenomeni prettamente bidimensionali è però necessario affiancare a LITPACK un modello quale MIKE 21 che consente di simulare in 2 dimensioni, ad elevato dettaglio, le trasformazioni del moto ondoso, le correnti ed il trasporto solido.

I principali campi di applicazione sono:

- supporto alla progettazione e verifica di opere di difesa costiera;
- previsione dell'evoluzione della linea di costa;
- ottimizzazione di interventi di ripascimento;
- studio dell'evoluzione di profili longitudinali e trasversali;
- analisi dell'interrimento di canali;
- analisi dell'evoluzione morfologica presso condotte sul fondale.

Tutti i moduli di LITPACK, fondati su un approccio deterministico, sono basati sul metodo STP, la cui formulazione permette di calcolare il trasporto di sedimenti non coesivi nella modalità combinata onde-correnti. Di seguito è riportata una tabella con una breve descrizione di tutti i moduli.

| Breve descrizione dei moduli LITPACK | |
|---|---|
| Modulo | Descrizione |
| PP (Pre and Post Processing) | Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di LITPACK. |
| STP | E' il modulo di base per il calcolo puntuale della capacità di trasporto solido di materiale non coesivo per effetto di onde e correnti. |
| LITDRIFT | E' il modulo che permette il calcolo del trasporto solido long-shore relativo ad un singolo evento o su base annuale (trasporto lordo e netto) lungo un profilo trasversale. Il modulo calcola la trasformazione dell'onda lungo il profilo e la relativa capacità di trasporto solido longshore. |
| LITLINE | E' il modulo per lo studio dell'evoluzione della linea di costa sul lungo periodo. Utilizzando il clima ondoso ed una rappresentazione della costa mediante linea di riva e profili trasversali, il modulo è in grado di prevedere l'evoluzione della linea di costa nel tempo, considerando anche la presenza di opere di difesa e di apporti solidi fluviali. |

2 IL METODO STP

Il metodo STP permette di calcolare il trasporto di sedimenti non coesivi nella modalità combinata onde-correnti e rappresenta la base di tutti i moduli di LITPACK.

Il metodo STP risolve l'equazione della diffusione verticale di sedimenti con step di integrazione temporale contenuti nel periodo dell'onda, permettendo di ottenere una soluzione dettagliata del trasporto in condizioni di corrente ed onde frangenti e non.

La capacità di trasporto viene calcolata separatamente per quanto riguarda il trasporto di fondo ed il trasporto in sospensione. Il trasporto del materiale non coesivo di fondo è calcolato secondo le equazioni di *Engelund e Fredsoe (1976)*. Tali equazioni, estese per il calcolo del trasporto in modalità combinata onde correnti, consentono di calcolare il trasporto di fondo attraverso la formulazione adimensionale del bed shear stress, θ . In sostanza il trasporto di fondo corrisponde al *bed shear stress* istantaneo in condizioni non stazionarie.

$$\theta = \frac{U_f^2}{(1-s) \cdot gd}$$

dove:

U_f^2 = shear velocity

s = densità relativa

g = accelerazione di gravità

d = diametro del sedimento

Il trasporto solido in sospensione è calcolato attraverso la concentrazione di sedimenti, C, data dalla equazione della diffusività verticale turbolenta:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

dove:

w = velocità di sedimentazione

ε_s = viscosità turbolenta.

La condizione al contorno di fondo è data dalla concentrazione di fondo C_b al livello $z=2d$. C_b è calcolata in funzione di ε in accordo con la teoria di *Bagnold (1954)*, secondo cui una certa concentrazione di sedimenti al fondo è necessaria per trasferire gli sforzi di taglio (shear stress) al fondo attraverso l'interazione sedimento-sedimento.

Il trasporto solido in sospensione, q_s , viene calcolato come il prodotto della concentrazione di sedimenti, C, e la corrente media di circolazione, U_{mean} , mediata sul periodo dell'onda T (*Hedegaard et al. 1988*).

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{0 \ 2d}^D C \cdot U_{mean} dy dt$$

3 LITDRIFT

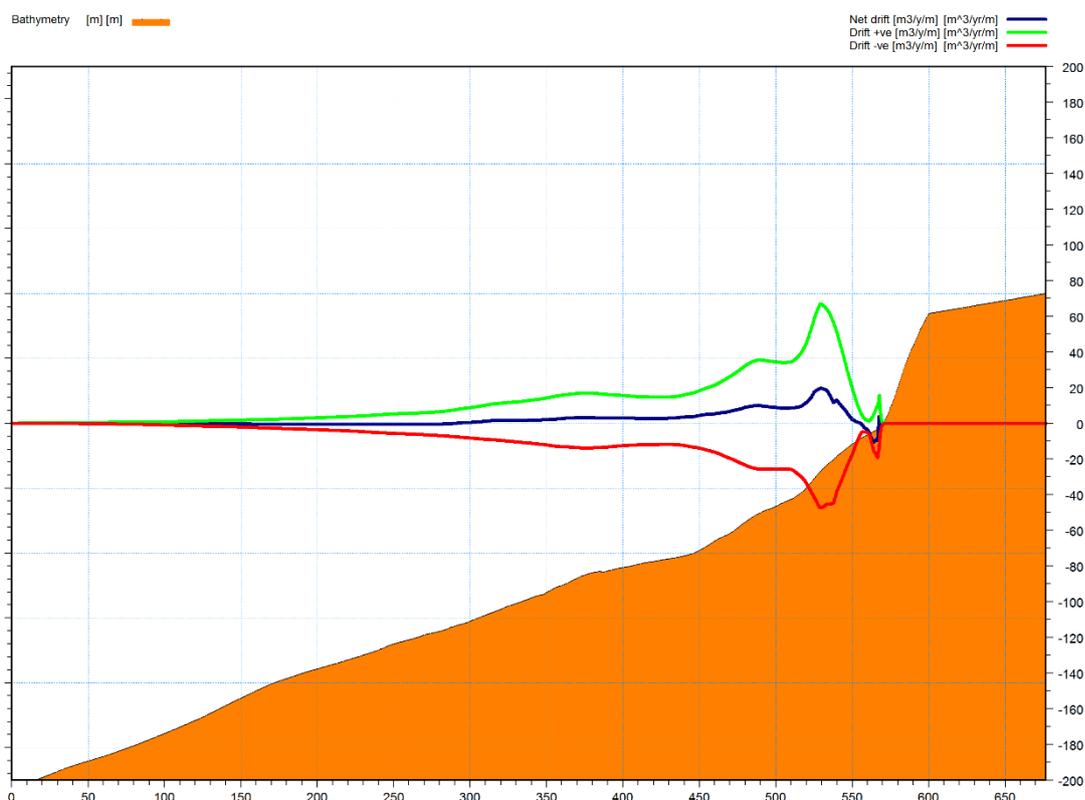
LITDRIFT è un modello numerico per il calcolo deterministico del trasporto solido long-shore lungo un profilo di costa trasversale, si compone essenzialmente di due parti:

- un modello idrodinamico;
- un modello di trasporto, STP.

Il modello idrodinamico permette di simulare nel dettaglio la distribuzione di altezza d'onda significativa, il set-up e le correnti longshore relative ad un profilo trasversale di costa. Il modello risolve l'equazione di conservazione della quantità di moto nelle direzioni longitudinali e trasversali alla costa e tiene conto di tutti i fenomeni legati alla propagazione dell'onda: shoaling, rifrazione, frangimento, attrito col fondo e permette di considerare onde regolari ed irregolari.

Il modello di trasporto, attraverso il metodo STP, permette di calcolare la distribuzione della capacità trasporto long-shore lungo il profilo trasversale per stati di mare regolari ed irregolari.

LITDRIFT viene generalmente applicato per calcolare, su base annuale e/o a scala di mareggiata, il trasporto long-shore netto e lordo lungo un profilo trasversale. Il modulo inoltre permette di calcolare l'orientazione di equilibrio di un tratto di costa e di individuare le onde più significative in termini di incidenza nel bilancio di trasporto solido annuo.



INPUT DEL MODELLO

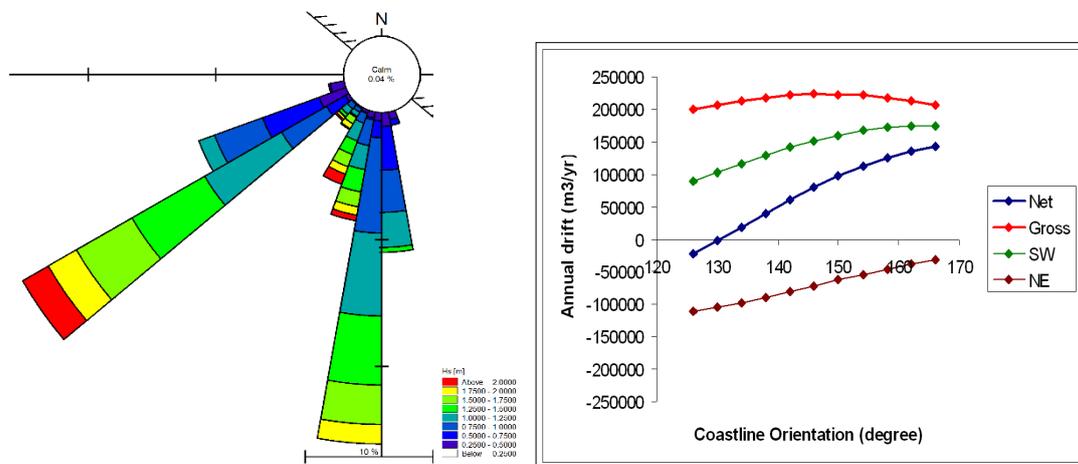
Il modello richiede in input:

- profilo trasversale di batimetria con informazioni relative alla scabrezza ed alle caratteristiche dei sedimenti (D50, velocità di sedimentazione);
- livelli di riferimento;
- clima ondoso: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- eventuali correnti di marea.

OUTPUT DEL MODELLO

Gli output forniti dal modello sono:

- distribuzione cross-shore di: livelli, altezza e direzione d'onda , trasporto in sospensione e di fondo, trasporto cumulato;
- distribuzione cross-shore del trasporto annuo;
- rosa del trasporto;
- curva Q-alfa per la determinazione della direzione di zero-trasporto.



4 LITLINE

LITLINE è il modulo per lo studio dell'evoluzione della linea di costa sul lungo periodo e rappresenta uno strumento particolarmente utile per il supporto alla progettazione e l'ottimizzazione di diverse opere costiere.

Sulla base dei risultati di LITDRIFT, calcolati in diverse sezioni, LITLINE simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto solido litoraneo. L'evoluzione della linea di costa viene calcolata risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti.

$$\frac{\partial y_c}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q_{sou}}{h_{act} \Delta x}$$

dove:

y_c = distanza dalla *baseline*;

h_{act} =profondità di chiusura;

Q = trasporto *long-shore* espresso in volume;

x = posizione nella direzione *long-shore*;

Q_{sou} = termine legato agli eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento.

L'equazione viene risolta utilizzando la tecnica delle differenze finite. LITLINE permette di introdurre nel calcolo sia l'effetto di strutture (come ad esempio: pennelli, rivestimenti e scogliere) sia l'effetto di eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento.

INPUT DEL MODELLO

Il modello richiede in input:

- posizione della linea di costa rispetto alla *baseline* con informazioni relative alla profondità di chiusura, posizioni di eventuali dune etc.
- profili trasversali di batimetria;
- clima ondoso: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- livelli e eventuali correnti di marea;
- posizione e dimensioni di eventuali strutture.

OUTPUT DEL MODELLO

Il modello fornisce in output la posizione della linea di riva ad ogni istante, i tassi di trasporto solido longshore ed i volumi di bypass o depositati.

