Analisi Idro e Morfodinamica in un tratto di costa sito all'interno del Comune di Ceriale (SV)

Report tecnico

Ing. Francesco De Leo
Prof. Ing. Giovanni Besio

Firmato digitalmente da:
GIOVANNI BESIO
Università degli Studi di Genova
Firmato il: 20-02-2023 12:24:38
Seriale certificato: 865134
Valido dal 28-12-2020 al 28-12-2023

Genova, 20/02/2023

Firmato digitalmente da:
FRANCESCO DE LEO
Università degli Studi di Genova
Firmato il: 20-02-2023 12:30:46
Seriale certificato: 783839
Valido dal 25-09-2020 al 25-09-2023

PREMESSA

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università degli Studi di Genova (nel seguito denominato DICCA; https://dicca.unige.it/) ha sottoscritto un accordo di collaborazione con il Comune di Ceriale, rappresentato dal T.P.O. Area Lavori Pubblici Architetto Diego Rubagotti, al fine di caratterizzare l'idrodinamica costiera in prossimità della foce della Carendetta di Pineo (Comune di Ceriale, SV).

Oggetto della collaborazione è valutare come un'opera di difesa ivi collocata, costituita da due "pennelli" ai lati della foce, interagisca con l'idrodinamica indotta dal moto ondoso e dalle escursioni di marea, e come questo si riverberi sul trasporto solido litoraneo e, di conseguenza, sulle possibili dinamiche evolutive della costa in loco.

Il presente report sintetizza i dati utilizzati, le analisi svolte e relativi risultati dello studio.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

SOMMARIO

1. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO 5
2. DATI UTILIZZATI 8
3. ANALISI DELLA GRANULOMETRIA LOCALE 13
4. ANALISI DELLA CLIMATOLOGIA METEOMARINA 17
4.1 ANALISI DEL CLIMA ONDOSO 17
4.2 ANALISI DEI REGIMI MAREALI 20
4.3 SELEZIONE DELLE MAREGGIATE SIGNIFICATIVE 22
5. MODELLO MORFODINAMICO UTILIZZATO 24
6. RISULTATI 27
ALLEGATI 33

Figura 1. Localizzazione dell'area di studio. Nel riquadro di sinistra è mostrata la costa tra Albenga e Ceriale. Il riquadro di destra mostra un inciso sulla foce della Carendetta (Sistema di Riferimento cartografico o RS: WGS-84; analogo SR è adottato nelle figure successive)..... 5
Figura 2. Foto scattate da un aggetto immediatamente a ponente del sito di progetto. Il riquadro in verde identifica la foto scattata verso Nord-Est (ossia verso levante in virtù dell'orientazione della costa); il riquadro in rosso identifica la foto scattata verso Sud-Ovest (i.e., verso ponente)..... 6
Figura 3. Foto scattata nel tratto terminale della Carendetta; lato monte rispetto all'attraversamento ferroviario (data: 27/10/2022). 7
Figura 4. Area di studio e ubicazione del nodo 000320 in cui sono definiti i parametri ondametrici (triangolo bianco bordato in blu). L'ubicazione della foce della Carendetta di Pineo è mostrata con la stella verde. 9
Figura 5. Linea di costa (in rosso) e dati batimetrici (transettature in giallo) utilizzati per lo studio. 10
Figura 6. Campione granulometrico prelevato sul lato dx della spiaggetta (a valle dell'attraversamento ferroviario). 12
Figura 7. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla destra idrografica della Carenda (lato monte). 14
Figura 8. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla sinistra idrografica della Carenda (lato monte). 14
Figura 9. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla destra idrografica della Carenda (lato mare). 15
Figura 10. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla sinistra idrografica della Carenda (lato mare). 15
Figura 11. Schema delle diverse classazioni dei sedimenti. Da sx a dx in figura, da materiale ben classato a materiale poco classato. 16
Figura 12. Serie di H_s ricostruite nel nodo 000320 nel periodo 1979 – 2020. 18

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

Figura 13. Istogrammi di frequenza dei valori di Hs nel nodo hindcast 000320. L'area della superficie di ogni rettangolo coincide con la frequenza associata alla classe cui il rettangolo si riferisce (intervallo di H_s)....18
Figura 14. Boxplots (o "diagrammi a scatola") mensili dei dati di H_s nel nodo 00320. I riquadri in blu delimitano i percentili 25 e 75 della distribuzione dei dati, le linee tratteggiate congiungono i valori minimo e massimo al netto dei dati estremi (rari), rappresentati in rosso come outliers. 19
Figura 15. Diagramma polare dei dati di H_s nel nodo 000320. Le linee circolari concentriche sono associate a diversi livelli di frequenza di occorrenza dei dati (da 0% a 20%). Direzioni espresse secondo la convenzione nautica....19
Figura 16. Oscillazioni mareali in corrispondenza del nodo 000320 ricostruite tramite il software TPXO.3....21
Figura 17. Variazione dell'angolo compreso tra la direzione normale al fronte d'onda e la normale uscente da costa per la mareggiata C. La linea tratteggiata in rosso indica la profondità sul bordo del dominio di X-Beach. 23
Figura 18. Schema di funzionamento del modello X-Beach. 24
Figura 19. Batimetria all'interno del dominio computazionale di X-Beach (). 26
Figura 20. Spessore di sedimento erodibile sulla terraferma (in blu) e nell'area sommersa (in giallo) per la configurazione di progetto. Il riquadro di destra evidenzia il sito di progetto....26
Figura 21. Sopralzo idrico rispetto al livello del medio mare nel dominio computazionale del modello. Le coordinate in figura denotano esclusivamente l'estensione del dominio, riferendosi al sistema di riferimento del modello utilizzato (non geo-referito). Mareggiata A. 28
Figura 22. Correnti generate in prossimità dell'area di progetto. Pannello di sinistra: stato attuale; pannello di destra: configurazione di progetto (campi mediati su un intervallo pari a 15 minuti). Le frecce indicano la direzione della corrente litoranea, i colori ne indicano le intensità (vedi scala metrica sul lato destro in figura). Mareggiata A. 29
Figura 23. Aree soggette a deposito (in rosso) ed erosione (in blu) alla fine della mareggiata A. Pannello di sinistra: configurazione attuale. Pannello di destra: configurazione progettuale. 29
Figura 24. Correnti generate in prossimità dell'area di progetto per la mareggiata B (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 22)....31
Figura 25. Aree soggette a deposito (in rosso) ed erosione (in blu) alla fine della mareggiata B (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 23)....31
Figura 26. Correnti generate in prossimità dell'area di progetto per la mareggiata C (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 22)....32
Figura 27. Aree soggette a deposito (in rosso) ed erosione (in blu) alla fine della mareggiata C (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 23)....32

Tabella 1. Codici utilizzati per identificare i campioni di sedimento nell'area di progetto. 11
Tabella 2. Valori di d_{50} [mm] risultanti dai campioni di sedimento raccolti nel sito di progetto. 13
Tabella 3. Caratteristiche delle mareggiate considerate al picco. La dicitura "off-shore" indica i dati estratti nel nodo 000320; la dicitura "sotto-costa" indica i dati propagati sui bordi della maglia computazionale (vedi la Figura 19 più avanti nel testo). 23

1. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

Il presente studio interessa il tratto focivo del canale detto "Carendetta di Pineo" (de seguito abbreviato in Carendetta a favor di sintesi), localizzato lungo il tratto di costa che si snoda tra i comuni di Albenga e Ceriale, ambedue parte della Provincia di Savona (SV). Il sito in cui la Carendetta sfocia a mare è evidenziato tramite il riquadro rosso in Figura 1.



Figura 1. Localizzazione dell'area di studio. Nel riquadro di sinistra è mostrata la costa tra Albenga e Ceriale. Il riquadro di destra mostra un inciso sulla foce della Carendetta (Sistema di Riferimento cartografico o RS: WGS-84; analogo SR è adottato nelle figure successive).

La foce della Carendetta si affaccia su di un tratto costiero fortemente antropizzato: vi insiste infatti la linea ferroviaria, protetta per l'intero perimetro esposto da una barriera a massi sciolti aderente a riva (altresì detta *revetment*), come ben visibile nei pannelli laterali di Figura 2. Di fatto, il tratto terminale della Carendetta attraversa un sottopassaggio ferroviario, così come successivamente mostrato in Figura 3.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it



Figura 2. Foto scattate da un aggetto immediatamente a ponente del sito di progetto. Il riquadro in verde identifica la foto scattata verso Nord-Est (ossia verso levante in virtù dell'orientazione della costa); il riquadro in rosso identifica la foto scattata verso Sud-Ovest (i.e., verso ponente).

Al fine di prevenire l'occlusione della galleria ad opera del trasporto solido litoraneo lato mare, è prevista la progettazione di due barriere distaccate da costa a protezione delle sponde della foce della Carendetta. Il layout di progetto e lo schema dello stato attuale dell'area di progetto sono riportati rispettivamente negli Allegati A2 e A1.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it



Figura 3. Foto scattata nel tratto terminale della Carendetta; lato monte rispetto all'attraversamento ferroviario (data: 27/10/2022).

Per valutare l'efficacia di un'opera siffatta, è imprescindibile eseguire un'analisi che permetta di quantificare i volumi di sedimento movimentati dal fondale marino ad opera dell'azione di onde e maree (se rilevanti), ovvero il cosiddetto trasporto solido litoraneo. I pattern associati al trasporto solido litoraneo sono infatti determinanti nel modellare la forma di coste e spiagge[1]. A tal proposito, si osservino le foto riportate nei pannelli di Figura 2, scattate in prossimità del sito di progetto: è facilmente intuibile come lato ponente (i.e, Sud-Ovest) vi sia una tendenza accrescitiva della spiaggia a ridosso del revetment, la quale invece non si riscontra lato levante (Nord-Est). Questo fenomeno è indicativo delle direzioni preferenziali del trasporto solido litoraneo, il quale tende a "risalire" la costa in direzione Albenga-Ceriale in virtù dell'orientamento della linea di riva e del clima ondoso a cui è esposta (prevalentemente onde da Scirocco e Mezzogiorno; si osservi infatti che la costa in loco è parzialmente schermata da stati di mare che si propaghino al largo dal settore di Libeccio). Maggiori dettagli sul clima ondoso locale sono forniti nel seguito (Paragrafo 0).

I dati e le analisi riportate nel seguito servono lo scopo poc'anzi introdotto: valutare come la realizzazione dei due pennelli costieri impatti sul trasporto litoraneo in virtù di diverse condizioni meteomarine.

[1] Komar, P. D. (1977). Beach processes and sedimentation.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

2. DATI UTILIZZATI

I dati propedeutici allo studio proposto sono essenzialmente di due tipi:

- Dati inerenti al clima meteo-marino locale, quali parametri ondametrici (altezza e periodo d'onda etc.) e dati relativi alle escursioni mareali;
- Dati inerenti alla morfologia della costa, in particolare la posizione della linea di riva (associata a quota 0 m sul livello del medio mare), la batimetria dell'area (ovvero i punti quotati del fondale marino all'interno dell'area di studio), informazioni sulla distribuzione granulometrica dei sedimenti in loco (tipo di materiale, quale sabbia, ghiaia etc.).

Per quanto attiene ai dati ondametrici, il presente lavoro si è avvalso dei dati forniti dal servizio hindcast del DICCA (http://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html). Le serie di dati storici sono state ricostruite tramite simulazioni numeriche della fisica dell'atmosfera e dei processi di generazione e propagazione del moto ondoso e costituiscono la base su cui poggiano le analisi successivamente sviluppate. Le serie di dati sono state ricostruite dal DICCA sulla base dei dati di re-analisi atmosferica del NCEP Climate Forecast System Reanalysis, CFSR, per il periodo compreso tra il primo gennaio 1979 e il 31 dicembre 2010 e sul dataset CFSv2 per il periodo compreso tra il primo gennaio 2011 e il 31 dicembre 2020. Le forzanti atmosferiche sono state quindi risolte su una maglia di calcolo con una risoluzione di circa 0.1° sia in longitudine che in latitudine con il modello meteorologico WRF-ARW versione 3.3.1[2], mentre le simulazioni della generazione e propagazione del moto ondoso sono state realizzate con il modello d'onda WavewatchIII v3.14[3], implementato con risoluzione variabile dal largo verso costa su tutto il Mar Mediterraneo. Il modello meteorologico e quello del moto ondoso sono stati ottimizzati e validati in maniera estensiva e opportuna per la simulazione dei processi all'interno del bacino del Mediterraneo[4].

Le uscite del modello della dinamica del moto ondoso sono salvate su tutti i punti della maglia di calcolo a cadenza oraria per tutto il periodo della simulazione e contengono i valori dei seguenti parametri:

[2] Skamarock, W. C. (2008). A description of theadvanced research WRF version 3. Tech. Note, 1-96.

[3] Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. Technical note, MMAB Contribution, 276(220).

[4] Lira-Loarca, A., Cáceres-Euse, A., De-Leo, F., & Besio, G. (2022). Wave modeling with unstructured mesh for hindcast, forecast and wave hazard applications in the Mediterranean Sea. Applied Ocean Research, 122, 103118.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

- altezza d'onda significativa (H_s): è la media del terzo di onde più alte all'interno di un dato stato di mare (della durata di ca. 20 minuti);
- periodo medio (T_m): è il periodo medio tra i periodi delle onde che costituiscono lo stato di mare;
- periodo di picco (T_p): è il periodo associato all'onda più energetica tra quelle che costituiscono lo stato di mare;
- direzione media (θ_m): è la media delle direzioni di propagazione delle onde che costituiscono lo stato di mare;
- direzione di picco(θ_p): è la direzione dell'onda associata al periodo di picco.

Vi sono inoltre parametri di secondaria importanza per il presente lavoro, che vengono pertanto omessi. Per quanto riguarda le direzioni, queste sono espresse secondo la convenzione nautica, ovvero sono indicative della provenienza delle onde; ad esempio, direzioni pari a 0°N e 360°N indicano onde che si propagano da Nord a Sud, 90°N da Est a Ovest, 180°N da Sud a Nord etc.

Per questo studio, sono stati utilizzati i dati salvati in corrispondenza del punto maglia Point 000320, la cui ubicazione è mostrata in Figura 4 (coordinate Lon/Lat pari a 8,3613/44,04, SR: WGS-84).

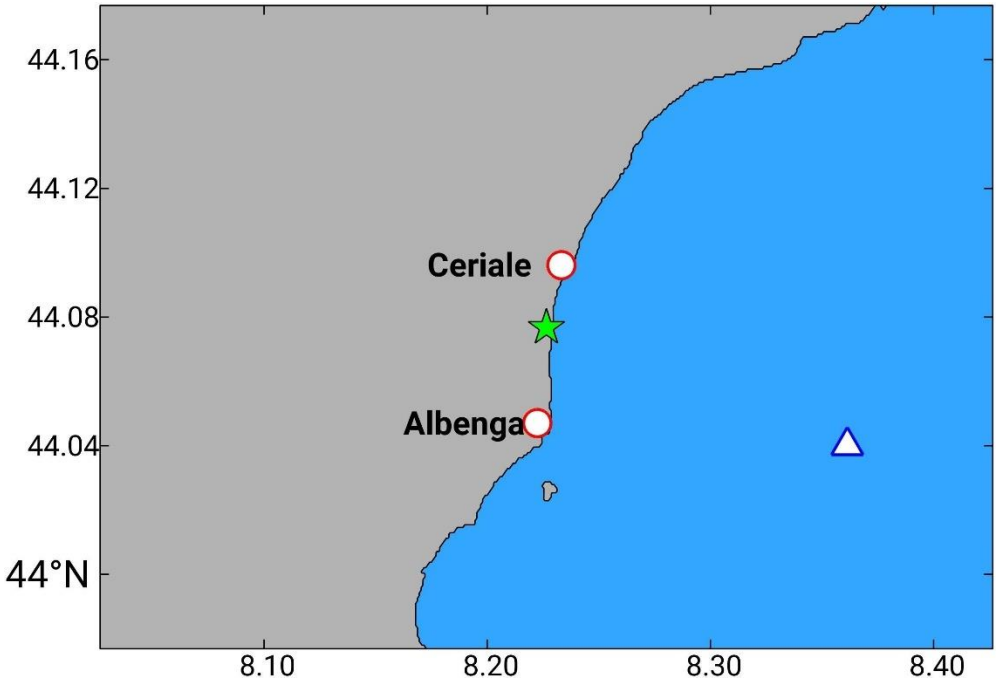


Figura 4. Area di studio e ubicazione del nodo 000320 in cui sono definiti i parametri ondametrici (triangolo bianco bordato in blu). L'ubicazione della foce della Carendetta di Pineo è mostrata con la stella verde.

Le oscillazioni mareali in corrispondenza del nodo hindcast sono state ricostruite tramite il Software di Previsione di Marea (TPXO.3) fornito dall'Università dello Stato dell'Oregon[5]. Tale software permette di calcolare le oscillazioni della quota idrometrica attorno al livello del medio mare sulla base delle principali componenti mareali, quali M_2 ed S_2 (rispettivamente lunare e solare semi-diurne), le cosiddette *overtides* legate a M_2 (M_4 ed M_6), le componenti diurne solare (S_1) e lunare (O_1), oltre ad un numero ridotto di altre componenti in grado di spiegare la quasi totalità della variabilità di livello indotta dalle maree. Giova ricordare come, in assenza di effetti legati alla geometria della costa (quali ad esempio la risonanza per onde che si propaghino all'interno di canali), il regime di marea dipende esclusivamente dal moto relativo dei gravi, le cui periodicità sono note: pertanto, fissato un periodo di riferimento, è sufficiente conoscere la posizione di un punto sul globo terreste al fine di derivare in modo deterministico le oscillazioni di livello attese con ridotto margine di incertezza.

Per quanto concerne ai dati di batimetria, è stato utilizzato un dataset composito, avvalendosi dei dati sotto-costa forniti dall'Ufficio Tecnico del Comune di Ceriale, integrati con i dati batimetrici a più bassa risoluzione dell'Istituto Idrografico della Marina Militare (https://www.marina.difesa.it) al fine di coprire tutta l'area di studio (si noti che i dati sotto-costa da soli non presentano sufficiente estensione per l'implementazione del modello numerico; vedansi a tal proposito la Figura 5 e le immagini nel Paragrafo 5). , per la definizione della linea di costa ci si è avvalsi dei dati del GeoPortale della Regione Liguria (https://geoportal.regione.liguria.it/).



Figura 5. Linea di costa (in rosso) e dati batimetrici (transettature in giallo) utilizzati per lo studio.

[5] Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. Journal of Atmospheric and Oceanic technology, 19(2), 183-204.

Infine, le informazioni sulla tipologia di sedimento sono state derivate a partire dai campioni di materiale sciolto prelevati in loco. In particolare, sono stati estratti no. quattro campioni del peso di ca. 3 kg l'uno sui due lati opposti del canale (destra e sinistra idrografica, dette dx e sx rispettivamente), dei quali due a monte e due a valle (i.e., lato mare) dell'attraversamento ferroviario. Le ubicazioni dei punti di prelievo del materiale corrispondono orientativamente ai punti dei rilievi fotografici di cui all'Allegato A1; la nomenclatura utilizzata nel seguito è riportata in Tabella 1. Figura 6 mostra, infine, una frazione setacciata del campione MDX.

Tabella 1. Codici utilizzati per identificare i campioni di sedimento nell'area di progetto.

Codice Punto	Ubicazione	Punto corrispondente nell'Allegato A1
CDX	Campione prelevato nel canale a monte dell'attraversamento ferroviario – dx idrografica	2
CSX	Campione prelevato nel canale a monte dell'attraversamento ferroviario – sx idrografica	3
MDX	Campione prelevato sulla spiaggetta a valle dell'attraversamento ferroviario – dx idrografica	5
MSX	Campione prelevato sulla spiaggetta a valle dell'attraversamento ferroviario – sx idrografica	6

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it



Figura 6. Campione granulometrico prelevato sul lato dx della spiaggetta (a valle dell'attraversamento ferroviario).

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

3. ANALISI DELLA GRANULOMETRIA LOCALE

L'analisi della granulometria assume un ruolo fondamentale ai fini della modellazione della morfodinamica costiera. Infatti, il comportamento di una spiaggia può variare significativamente a seconda delle dimensioni dei grani che la costituiscono: ad esempio, una spiaggia a granulometria fine (e.g., ghiaia fine, sabbia) tende a subire l'arretramento della parte sommitale a discapito di un accumulo nella parte sommersa al piede del profilo della spiaggia stessa. Al contrario, mareggiate che impattino su spiagge caratterizzate da granulometrie più grossolane quali, ad esempio, ciottoli, tendono a formare una berma (ovvero un accumulo di materiale sulla parte emersa della spiaggia) a causa dei processi di infiltrazione e delle pressioni interstiziali che sono presenti tra i vuoti dei singoli grani.

Pertanto, sono state effettuate diverse analisi sui quattro campioni di materiale raccolto nel sito di progetto. Per ogni campione, sono state derivati tre sotto-campioni del peso di ca. 1 kg cadauno, ed è stata eseguita una setacciatura avvalendosi di un set di setacci a maglie variabili tra 63 µm e 31,5 mm. Per ciascun campione, è stata dunque calcolata la curva granulometrica secondo la procedura esplicata dal British Standard Institution[6]; infine, le curve sono state calcolate per i campioni totali (ovvero, i campioni di partenza di peso pari a 3 kg), al fine di derivare un'analisi di sensitività sui diametri significativi risultanti del materiale.

In particolare, in Tabella 2 si riportano i risultati relativi a d_{50} [mm] per i singoli campioni e sotto-campioni analizzati. Il diametro d_{50} è definito come la più piccola maglia del setaccio attraverso la quale passa approssimativamente la corrispondente percentuale di materiale (ovvero il 50%; la medesima notazione è usata per le altre frazioni). Le curve granulometriche ottenute per i campioni totali sono riportate nelle figure da Figura 7 a Figura 10; le curve dei singoli sotto-campioni sono invece mostrate negli Allegati.

Tabella 2. Valori di d_{50} [mm] risultanti dai campioni di sedimento raccolti nel sito di progetto.

CDX - 1	**CDX - 2**	**CDX - 3**	**CDX - TOT**
5,43	6,02	7,51	6,20
CSX - 1	**CSX - 2**	**CSX - 3**	**CSX - TOT**
1,49	1,23	1,29	1,34
MDX - 1	**MDX - 2**	**MDX - 3**	**MDX - TOT**
5,83	7,29	5,37	6,22
MSX - 1	**MSX - 2**	**MSX - 3**	**MSX - TOT**
3,61	3,78	3,70	3,71

[6] ISO, I. (2016). Geotechnical investigation and testing—Laboratory testing of soil—Part 4: Determination of particle size distribution.

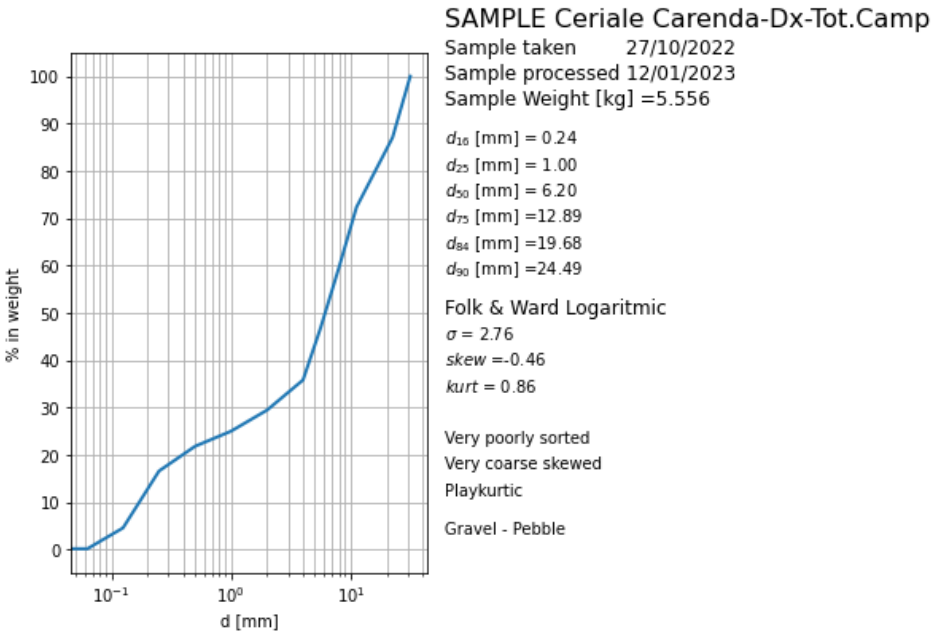


Figura 7. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla destra idrografica della Carenda (lato monte).

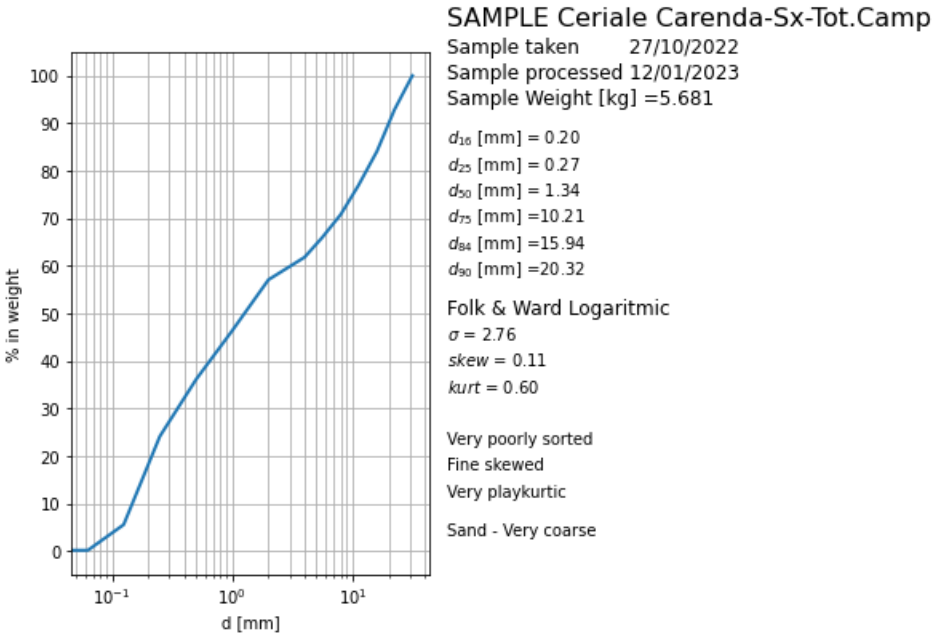


Figura 8. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla sinistra idrografica della Carenda (lato monte).

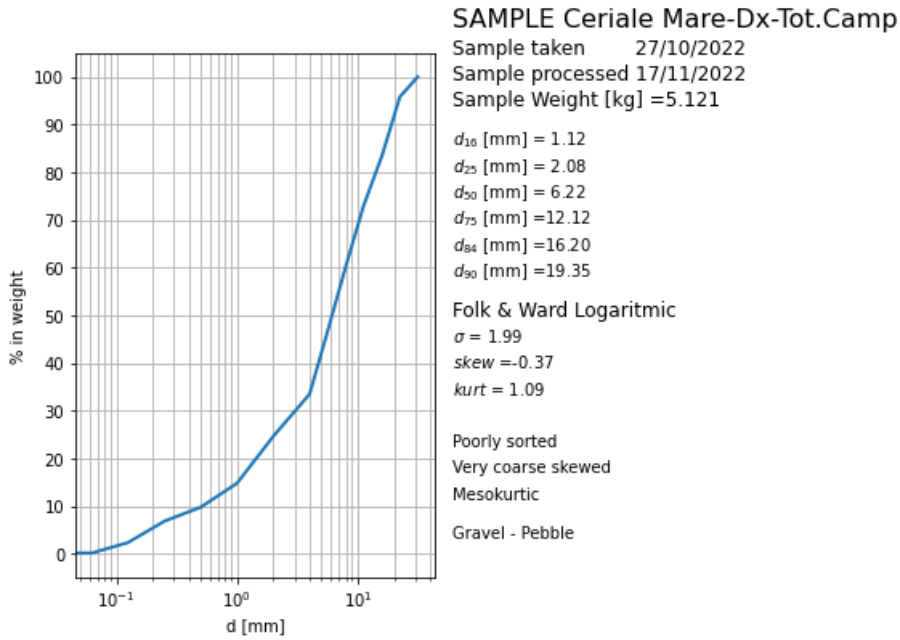


Figura 9. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla destra idrografica della Carenda (lato mare).

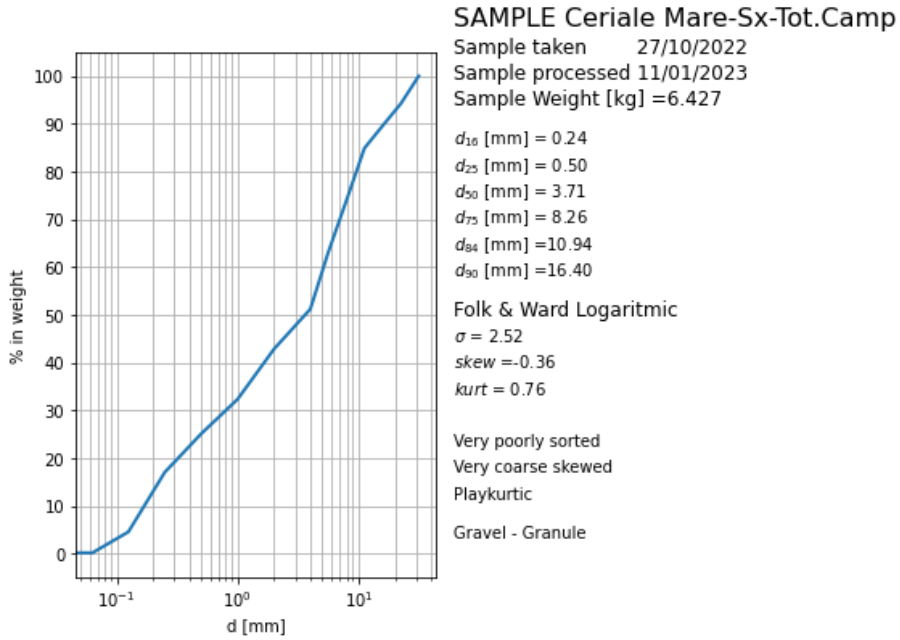


Figura 10. Curva granulometrica del campione totale prelevato sulla sinistra idrografica della Carenda (lato mare).

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

I risultati dei diametri significativi mostrano elevata variabilità; i valori di d_{50} variano infatti tra ≈1,3 mm, caratteristici di sabbie grossolane, a ≈6,2 mm, il quale indica ghiaia[7]. Sul lato a monte dell'attraversamento ferroviario, è in effetti facile osservare una marcata variabilità tra i lati idrografici destro e sinistro, essendo il primo associato a granulometria più grossolana (vedi Figura 3). La situazione è invertita lato mare, sebbene le differenze in questo caso siano più marginali ed associate alla presenza di due sassi di ragguardevoli dimensioni (come si evince dalle curve riportate nell'Allegato A3).

Tale variabilità è senz'altro da imputarsi alla elevata eterogeneità del materiale presente in loco, classificabile come "poco classato" (o "*poorly sorted*", secondo la locuzione anglosassone ben schematizzata in Figura 11). Essendo presenti numerose frazioni granulometriche, nessuna delle quali in quantità prevalente, i campioni possono risultare in diametri caratteristici molto variabili a seconda che vi ricadano o meno frazioni grossolane.

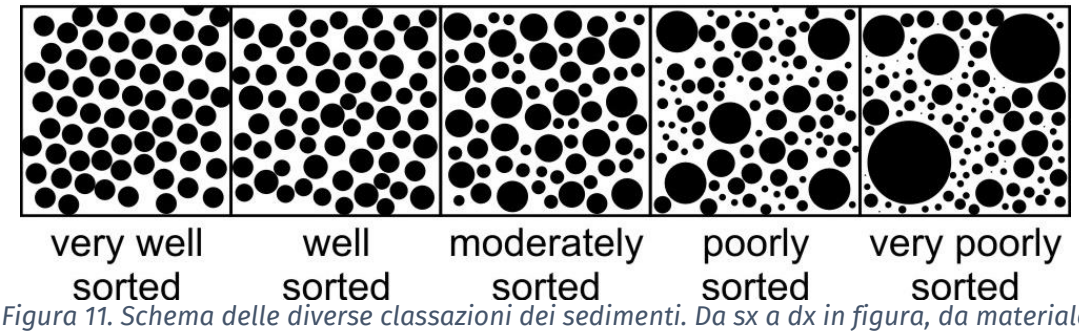


Figura 11. Schema delle diverse classazioni dei sedimenti. Da sx a dx in figura, da materiale ben classato a materiale poco classato.

Nel prosieguo del presente studio, si sono utilizzano i risultati relativi al campione MSX (d_{50} = 3,71 mm; d_{90} = 16,4 mm), in quanto ricadono all'intervallo definito dagli estremi degli altri campioni analizzati.

[7] La classificazione del materiale segue quella di Wentworth:
Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. The journal of geology, 30(5), 377-392.

4. ANALISI DELLA CLIMATOLOGIA METEOMARINA

4.1 ANALISI DEL CLIMA ONDOSO

La serie di altezze d'onda ricostruite nel nodo hindcast 000320 (periodo 1979-2020) sono mostrate in Figura 12. Il clima ondoso locale si presenta di media intensità, restituendo un valore medio per H_s pari a ca. 0.74 m, mentre i valori massimi si assestano intorno ai 5 m con picchi prossimi ai 6 m (sebbene associati ad eventi piuttosto infrequenti; vedi gli istogrammi in Figura 13). Sono ovviamente riscontrabili marcate oscillazioni stagionali nella climatologia locale; si vedano a tal proposito i boxplots riportati in Figura 14, i quali mostrano valori più intensi durante i mesi invernali (dicembre, gennaio, febbraio), e condizioni mediamente più calme durante i mesi estivi (da giugno a settembre). Considerazioni del tutto analoghe possono essere spese in relazione ai periodi d'onda T_m e T_p.

In Figura 15 si riporta infine un diagramma polare dei dati d'onda: valori di H_s associati a diverse classi di intensità sono riportati in relazione alla frequenza di occorrenza per i rispettivi valori di θ_m, espressi secondo la convenzione nautica: le direzioni sono indicative della provenienza delle onde; ad esempio, direzioni pari a 0°N e 360°N indicano onde che si propagano da Nord a Sud, 90°N da Est a Ovest, 180°N da Sud a Nord etc. Dall'analisi del diagramma appare chiaro come il clima ondoso al largo della costa di Ceriale sia prevalentemente bimodale: la maggior parte degli stati di mare è ascrivibile al settore di Libeccio e Mezzogiorno (ca. Il 15% dei dati totali), ossia onde che si propagano da S/SW a N/NE (θ_m compreso nel terzo quadrante, i.e., $\theta_m \in [180°N;270°N]$); a tale settore sono inoltre associate onde d elevate intensità, come mostrato dalla scala di colore degli intervalli di H_s (i.e., i riquadri verdi). Si riscontrano inoltre un picco di dati relativi ad onde da N-NE (settore di Tramontana/Grecale), ed un consistente gruppo di dati afferenti al settore di Scirocco ($\theta_m \approx 135°N$; frequenza prossima al 5%).

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

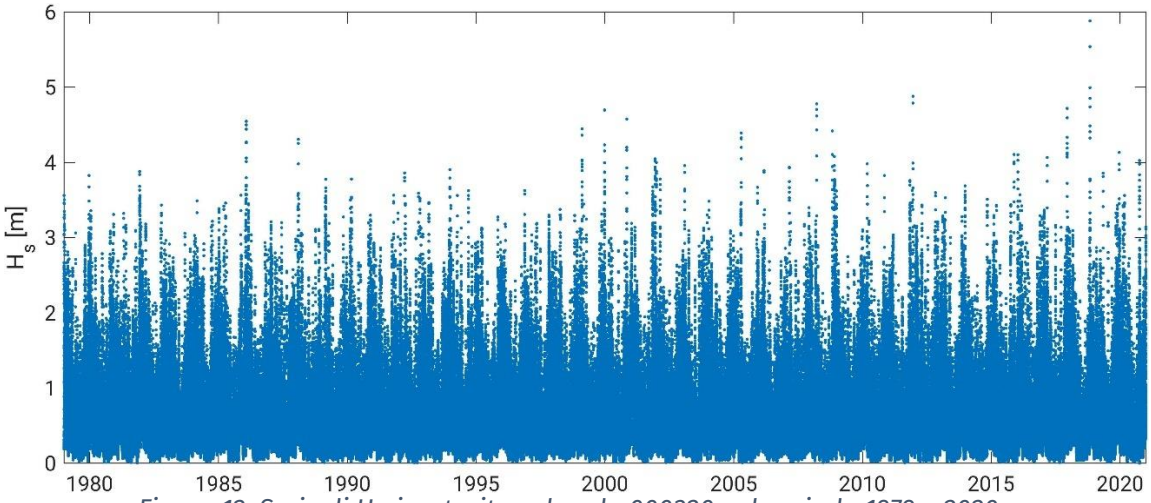


Figura 12. Serie di H_s ricostruite nel nodo 000320 nel periodo 1979 – 2020.

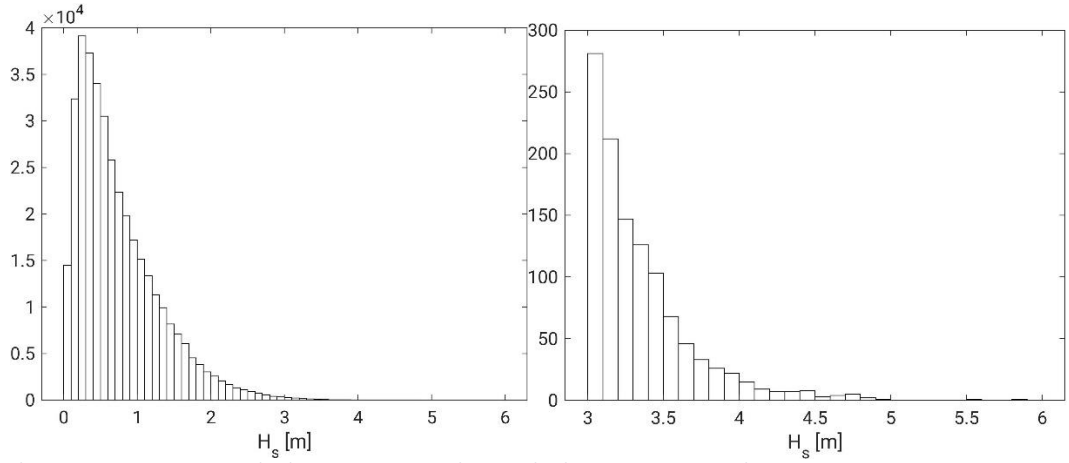


Figura 13. Istogrammi di frequenza dei valori di Hs nel nodo hindcast 000320. L'area della superficie di ogni rettangolo coincide con la frequenza associata alla classe cui il rettangolo si riferisce (intervallo di H_s).

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

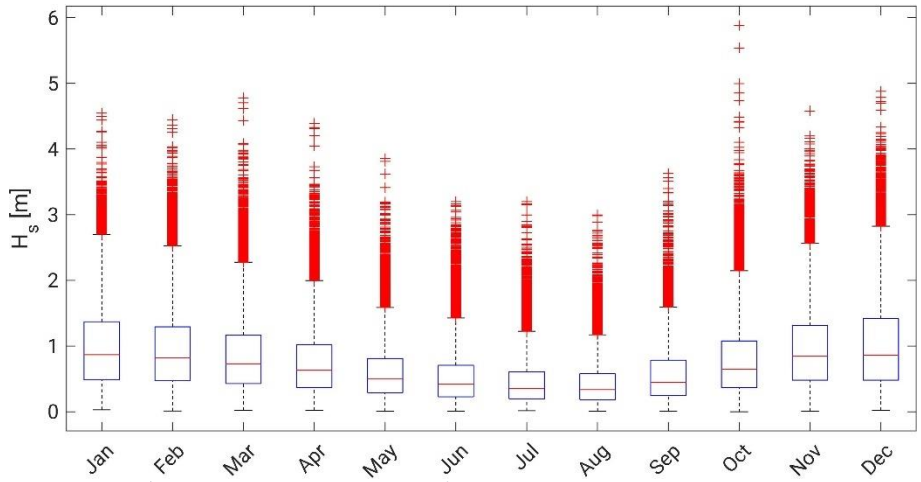


Figura 14. Boxplots (o "diagrammi a scatola") mensili dei dati di H_s nel nodo 00320. I riquadri in blu delimitano i percentili 25 e 75 della distribuzione dei dati, le linee tratteggiate congiungono i valori minimo e massimo al netto dei dati estremi (rari), rappresentati in rosso come outliers.

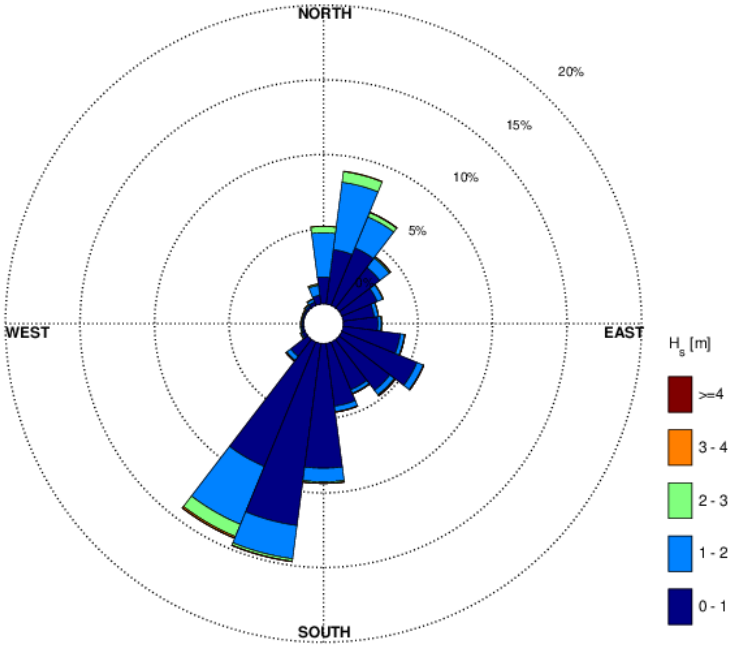


Figura 15. Diagramma polare dei dati di H_s nel nodo 000320. Le linee circolari concentriche sono associate a diversi livelli di frequenza di occorrenza dei dati (da 0% a 20%). Direzioni espresse secondo la convenzione nautica.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

4.2 ANALISI DEI REGIMI MAREALI

L'analisi delle oscillazioni mareali (Δη) nell'area di interessa si è avvalsa dei dati ricostruiti in corrispondenza del nodo hindcast tramite il software TPXO.3 Le serie di η sono state ricostruite su base annua, il che permette di utilizzare fattori correttivi standardizzati per la correzione nodale dei segnali[8] (suddetta correzione è necessaria per filtrare le oscillazioni periodiche del segnale legate a fasi dell'ellisse lunare aventi periodicità di ca. 18.6 anni).

Un esempio relativo all'anno 2019 è visibile in Figura 16, la quale mostra anche un inciso della durata di due settimane (pannello inferiore), che permette di apprezzare i cicli di *spring* e *neap tides* legati alla posizione della luna rispetto al sole durante il moto di rivoluzione.

Dall'analisi dei pannelli appare chiaro come il regime mareale risulti essere misto con prevalenza semi-diurna, con due picchi di acqua alta giornalieri che risultano amplificati in corrispondenza della spring tide, minimizzati al contrario durante la neap tide. Tale considerazione trova riscontro nell'analisi del fattore di frequenza F, calcolato come[9]:

$$F = \frac{A_{K_1} + A_{O_1}}{A_{M_2} + A_{S_2}}$$

Dove *A* indica l'ampiezza dell'onda di marea. Il fattore *F* assume valore superiore a 3 nel caso di regime diurno, inferiore a 0.25 nel caso di regime semi-diurno. Nel sito in esame, *F* risulta essere pari a 0.46.

L'escursione media mareale, intesa come la distanza tra la quota minima e massima di η per un'onda di marea, risulta essere pari a ≈0.18 m su base annua, equivalenti a ca. 10 cm di sovralzo idrico rispetto alla quota del medio mare. Questo risultato è coerente con l'ampiezza dell'onda M_2, pari a ca. 8 cm (si osservi infatti che nel caso di regimi completamente semi-diurni è prassi comune calcolare l'escursione media di mare come il doppio dell'ampiezza di M_2).

L'entità di tali variazioni non rappresenta un elemento rilevante ai fini delle analisi morfodinamiche oggetto del presente studio; pertanto, il contributo mareale viene omesso nel prosieguo del lavoro.

[8] Foreman, M. G. G., & Henry, R. F. (1989). The harmonic analysis of tidal model time series. Advances in water resources, 12(3), 109-120.
[9] Bosboom, J., & Stive, M. J. (2021). Coastal dynamics.

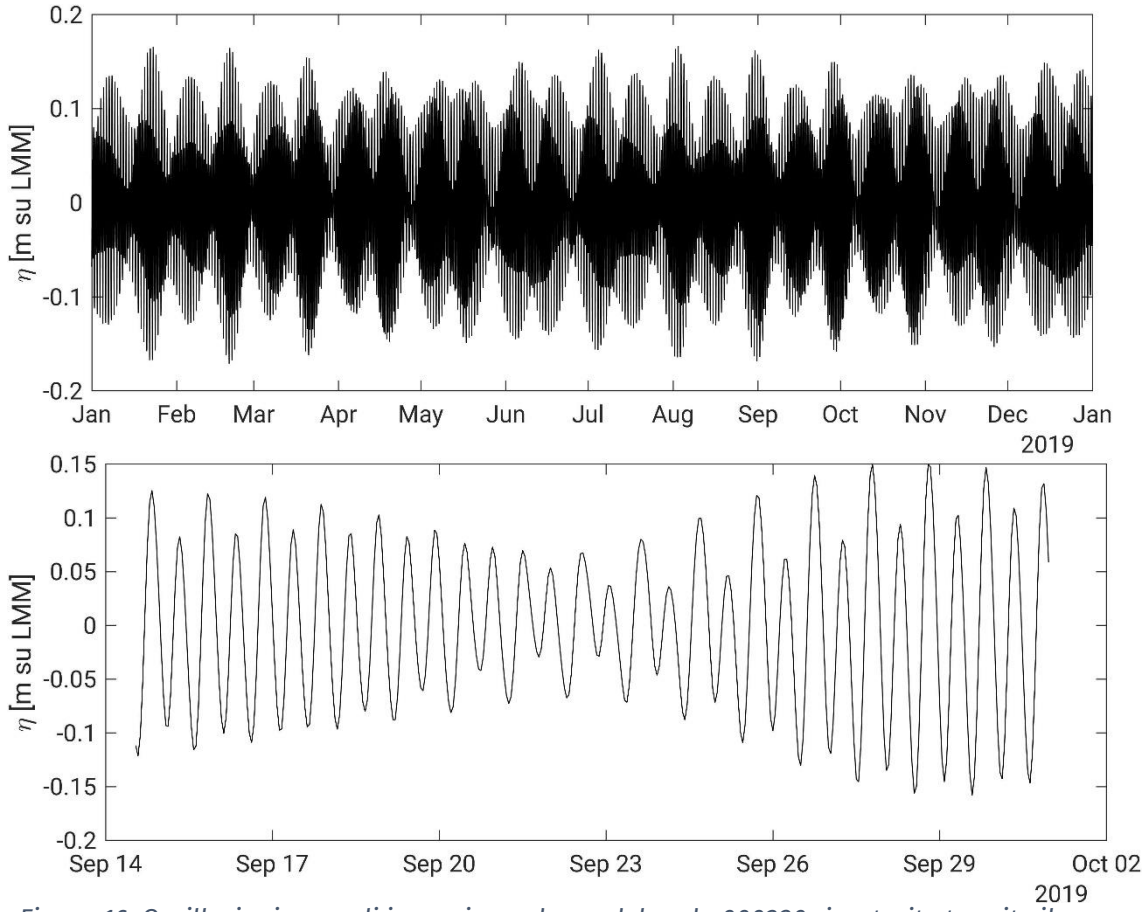


Figura 16. Oscillazioni mareali in corrispondenza del nodo 000320 ricostruite tramite il software TPXO.3.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

4.3 SELEZIONE DELLE MAREGGIATE SIGNIFICATIVE

A seguito delle considerazioni spese nel precedente paragrafo, le forzanti ambientali di rilievo per lo studio proposto si riducono ai soli stati di mare (ovvero, l'agitazione ondosa). A partire dai dati definiti nel nodo 000320, sono dunque state selezionate tre mareggiate provenienti dai settori direzionali maggiormente significativi per il tratto di costa analizzato, ovvero Scirocco e Mezzogiorno. Si osservi infatti come le onde da Libeccio, che pur rappresentano la maggior parte dei dati, giungano a costa marcatamente ridimensionate a causa dei fenomeni di rifrazione e diffrazione, essendo gli stessi al contrario marginali nei confronti di onde che attacchino la costa "frontalmente", come nel caso di onde da Scirocco (e, in minor misura, onde da Mezzogiorno).

Per la selezione delle mareggiate, la serie di dati di H_s è stata scansionata da una finestra temporale mobile di durata assegnata; quando il picco di H_s ricadesse al centro della finestra, la rispettiva serie era selezionata come mareggiata. Tale approccio consente di selezionare evoluzioni di stati di mare caratterizzate da elevata simmetria, ovvero, rispettivamente, una fase crescente ed una fase decrescente a monte ed a valle del picco della mareggiata. Le mareggiate sono successivamente state filtrate al fine di eliminare quelle non significative, ovvero quelle associate a stati di mare ininfluenti e/o direzioni di propagazione tali da allontanarle da riva (ad esempio, gli stati di mare da tramontana, pur frequenti, non sono stati considerati).

Una volta selezionati i picchi delle tre mareggiate ritenute significative, se ne sono calcolate le rispettive caratteristiche alla profondità del dominio del modello morfodinamico, avvalendosi di un modello *shoaling/rifrazione* basato sulla teoria dell'onda lineare. Le caratteristiche delle mareggiate estratte al largo (nodo 000320) ed i corrispettivi valori in prossimità della costa sono elencate in Tabella 3.

La scelta delle suddette mareggiate permette di considerare condizioni climatiche fra loro differenti: due mareggiate da Scirocco a crescente intensità (la B e la A), ed una mareggiata da Mezzogiorno (la C). Come si può notare, le direzioni di propagazione non sono significativamente modificate nel corso della propagazione sotto-costa. Tale risultato non deve sorprendere: la rifrazione tende infatti a ruotare i fronti d'onda a profondità più basse rispetto a quelle di chiusura del modello morfodinamico (si veda a titolo di esempio la curva in Figura 17). Sarà questo, pertanto, a risolvere le complesse dinamiche litoranee che si instaurano in prossimità della costa emersa.

Le mareggiate così calcolate sono state successivamente utilizzate per forzare il modello X-Beach (Paragrafo 5).

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

Tabella 3. Caratteristiche delle mareggiate considerate al picco. La dicitura "off-shore" indica i dati estratti nel nodo 000320; la dicitura "sotto-costa" indica i dati propagati sui bordi della maglia computazionale (vedi la Figura 19 più avanti nel testo).

Mareggiata	Data del picco	profondità	H_s [m]	T_m [m]	θ_m [m]	Direzione media
A	31/1/1986 – 15:00	Offshore	4,55	8,3	124	SE-NW
		Sotto-costa	4,28		124,3	
B	04/11/2011 – 23:00	Offshore	3,44	7,4	133	SE-NW
		Sotto-costa	3,32		132,9	
C	02/10/2020 – 15:00	Offshore	3,51	7,2	172	S-N
		Sotto-costa	3,38		171,2	

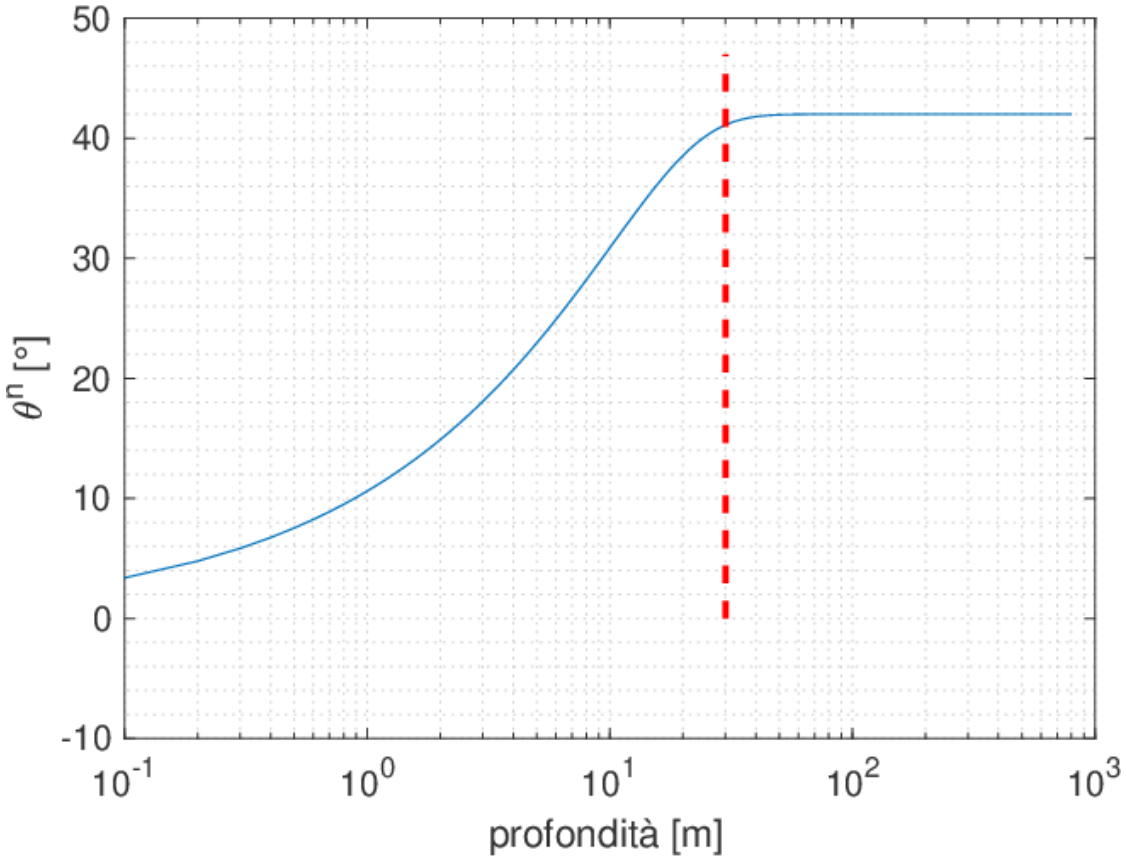


Figura 17. Variazione dell'angolo compreso tra la direzione normale al fronte d'onda e la normale uscente da costa per la mareggiata C. La linea tratteggiata in rosso indica la profondità sul bordo del dominio di X-Beach.

5. MODELLO MORFODINAMICO UTILIZZATO

La scelta del modello numerico per gli studi di correnti ed evoluzione morfodinamica della spiaggia è ricaduta sul codice di calcolo XBeach[10](https://oss.deltares.nl/web/xbeach/), un modello bidimensionale che risolve la propagazione delle onde di mare (periodi nell'ordine dei secondi), onde lunghe dette di *infra-gravità* (periodi nell'ordine dei minuti), le correnti indotte ed il trasporto dei sedimenti e le variazioni morfologiche sotto-costa di spiagge soggette all'azione di marosi aventi assegnate caratteristiche.

Ogni singola componete è risolta da un apposito modulo che riceve e trasmette informazioni agli altri moduli, così come mostrato in Figura 18. In particolare, sono inclusi i processi di trasformazione delle onde corte (rifrazione, shoaling e frangimento) e trasformazione delle onde di infra-gravità (generazione, propagazione e dissipazione); processi morfodinamici, i quali comprendono il trasporto di sedimenti dal fondo per trascinamento e sospensione (frazioni più fini), la formazione di barre sommerse ed erosione del fronte dunale. È inoltre possibile includere gli effetti legati alla presenza di vegetazione sommersa e delle strutture rigide.

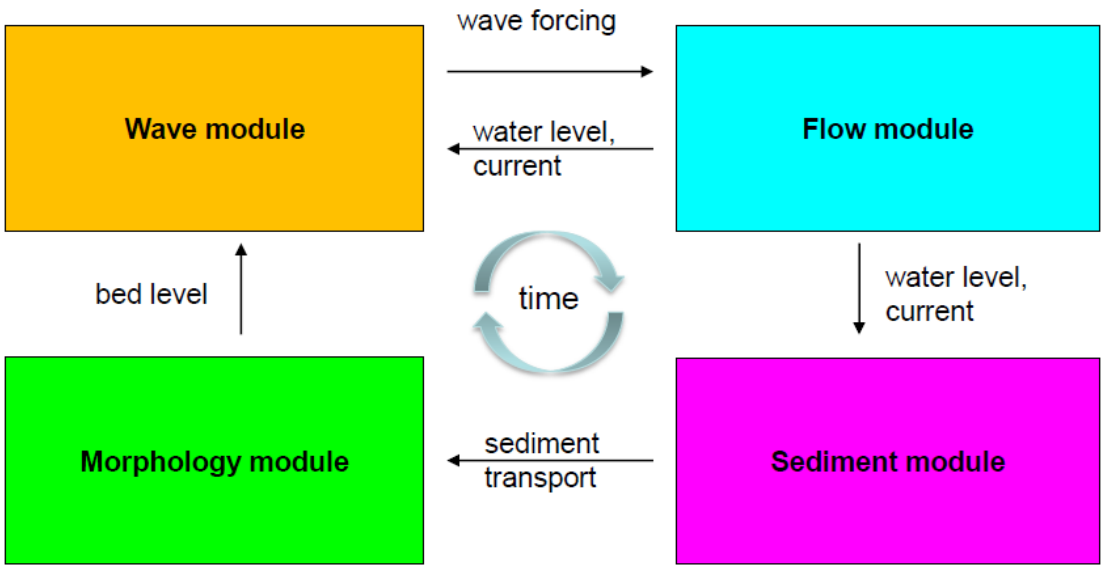


Figura 18. Schema di funzionamento del modello X-Beach.

[10] Roelvink, D., Reniers, A. J. H. M., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). XBeach model description and manual. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Tecnhology. Report June, 21, 2010.

Il modello può essere implementato in tre modalità di funzionamento distinte:

- *Stazionario*: indicato per valutare le variazioni morfodinamiche attese nel lungo periodo (ovvero, decorrenti su scale temporali di mesi) in risposta a stati di mare di bassa/media intensità; non permette di risolvere l'idrodinamica costiera;

- *Surf-beat*: permette la risoluzione dell'idrodinamica costiera per onde lunghe e le evoluzioni morfodinamiche a scala di mareggiata (ore/giorni);

- *Non-idrostatico*: permette la risoluzione dell'idrodinamica costiera per tutte le onde di uno stato di mare (onde lunghe ed onde corte); non ancora pienamente operativo per le analisi di trasporto solido (comunicazione personale con il Dott. McCall del gruppo di sviluppo del modello).

Giova infine rammentare come il modello sia stato ampiamente validato con una serie di casi analitici, di laboratorio e di test sul campo da parte dell'Università di Delft e del gruppo olandese Deltares (https://www.deltares.nl/en/).

Nel presente lavoro, volendo verificare il comportamento della costa in risposta a determinate mareggiate, ci si è avvalsi della modalità Surf-beat; è stata sviluppata una maglia computazionale per la propagazione delle mareggiate selezionate a costa, interpolando sui rispettivi nodi computazionali i valori di profondità associati ai dati batimetrici (vedi Figura 19). La maglia computazionale presenta risoluzione variabile tra 30 m e 2 m in direzione cross-shore, e degradante da 20 m e 2 m in direzione long-shore, raggiungendo massima risoluzione in prossimità del sito di progetto. Successivamente, si è imposta la condizione di inerodibilità per i nodi a costa assumendo uno spessore nullo di sedimento movimentabile, in virtù della mantellata a protezione della ferrovia; analogo accorgimento è stato adottato in corrispondenza dei nodi sui due pennelli per la sola configurazione di progetto. Al contrario, nel resto del dominio (ovvero, sul fondale marino), si è assunto un "serbatoio" di sedimento erodibile pari a 5 m. Figura 20 mostra le suddette condizioni per l'area interessate dal progetto.

Il modello è stato dunque forzato per le due diverse configurazioni progettuali (con e senza pennelli emersi a protezione della foce), per le tre mareggiate selezionate come spiegato nel Paragrafo 0. Le mappe di corrente per le due configurazioni (con e senza pennelli), sono dunque state poste a confronto al fine di valutare l'impatto dei pennelli sull'idrodinamica locale. Infine, per il calcolo dell'evoluzione morfodinamica della costa, e per valutare l'interazione dei pennelli con i pattern di trasporto solido litoraneo, sono stati forniti al modello i dati inerenti al materiale presente sul fondale, descritti attraverso i valori di d_{50} e d_{90} precedentemente calcolati (vedi Paragrafo 3).

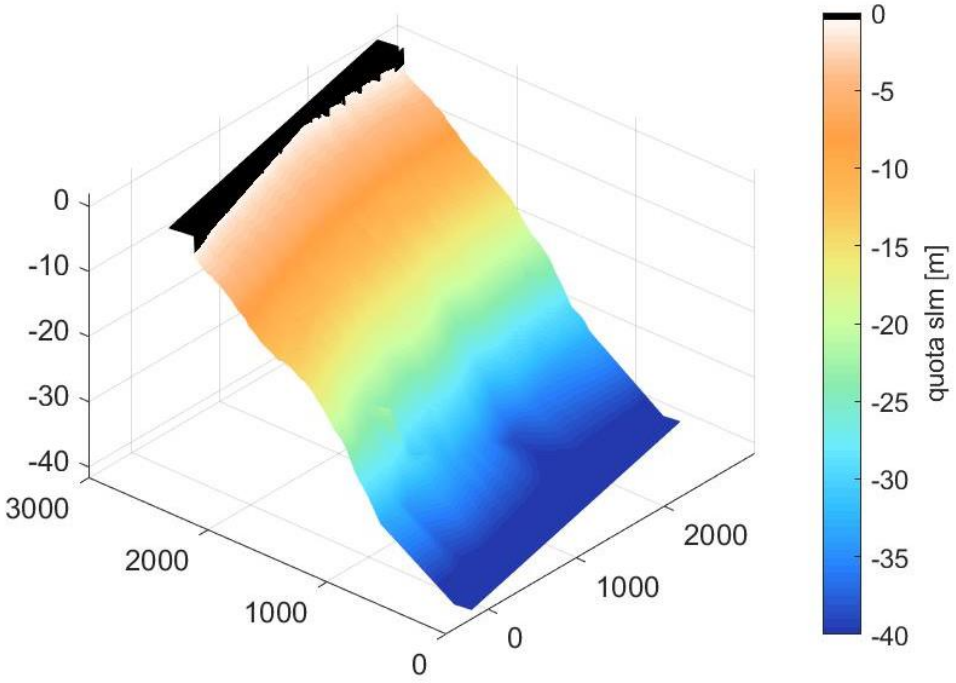


Figura 19. Batimetria all'interno del dominio computazionale di X-Beach ().

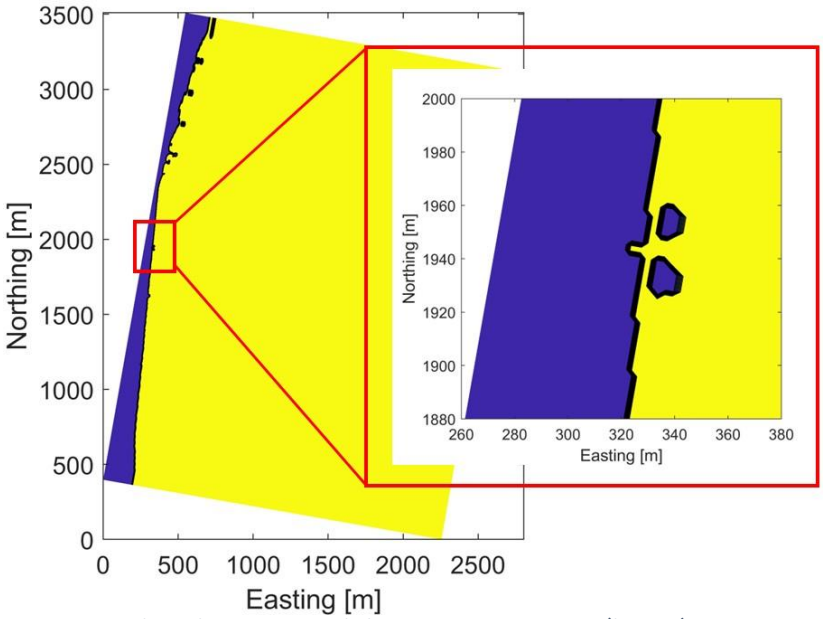


Figura 20. Spessore di sedimento erodibile sulla terraferma (in blu) e nell'area sommersa (in giallo) per la configurazione di progetto. Il riquadro di destra evidenzia il sito di progetto.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

6. RISULTATI

I risultati delle simulazioni di X-Beach forniscono, ad intervalli di cinque minuti (intervallo di tempo che può essere impostato a piacere), i seguenti parametri:

- *globalx*: coordinate Est del dominio computazionale di X-Beach [m];
- *globaly*: coordinate North del dominio computazionale di X-Beach [m];
- *globaltime*: istanti temporali nei quali sono estratte le risultanze del modello; l'intervallo tra istanti successivi è pari a 5 minuti;
- *H*: altezza dell'inviluppo delle onde corte [m];
- *u*: componente x della corrente Lagrangiana mediata sulla profondità [m/s];
- *v*: componente y della corrente Lagrangiana mediata sulla profondità [m/s];
- *zs*: quota della superficie libera rispetto al livello del medio mare [m];
- *zb*: quota del fondale rispetto al livello del medio mare [m];
- *sedero*: aree di erosione/deposito legate al trasporto solido dei sedimenti [m].

Tali parametri sono salvati e compressi in appositi file in formato *netcdf*, allegati alla presente relazione (Allegato A4).

In Figura 21 viene mostrata l'escursione del pelo libero rispetto al livello del medio-mare in corrispondenza del picco della mareggiata A. Come si evince dalla mappa riportata in figura, in prossimità della riva si assiste ad un abbassamento del livello a discapito di un rialzo sulla costa. Tali fenomeni sono facilmente inquadrabili come *wave set-up* e *set-down*, ovvero perturbazioni del livello di quiete indotte dalla propagazione del moto ondoso su basse profondità. L'intensità di queste variazioni è variabile lungo la costa, presentando valori più marcati nella parte centrale del dominio (si osservi la distribuzione del colore giallo in figura). Questo si verifica in virtù delle direzioni di propagazione delle onde (cfr. Tabella 3) rispetto all'orientazione media della riva, la quale presenta un cambio di pendenza nel tratto a Nord (i.e., coordinate superiori a $\approx 1.2 \times 10^4$ m nel sistema di riferimento del modello), che amplifica lo smorzamento delle onde incidenti a causa della rifrazione dei rispettivi fronti.

La direzione delle onde si riverbera ovviamente anche sulle correnti litoranee indotte, le quali tendono a risalire la costa da Sud a Nord, così come mostrato nelle immagini riportate in Figura 22 per le configurazioni attuale e progettuale al picco della mareggiata. In questo caso, si può notare come la presenza dei due pennelli modifichi in modo tangibile il campo di corrente, essendo le velocità risultanti significativamente ridotte rispetto alla configurazione attuale in prossimità della foce della Carendetta.

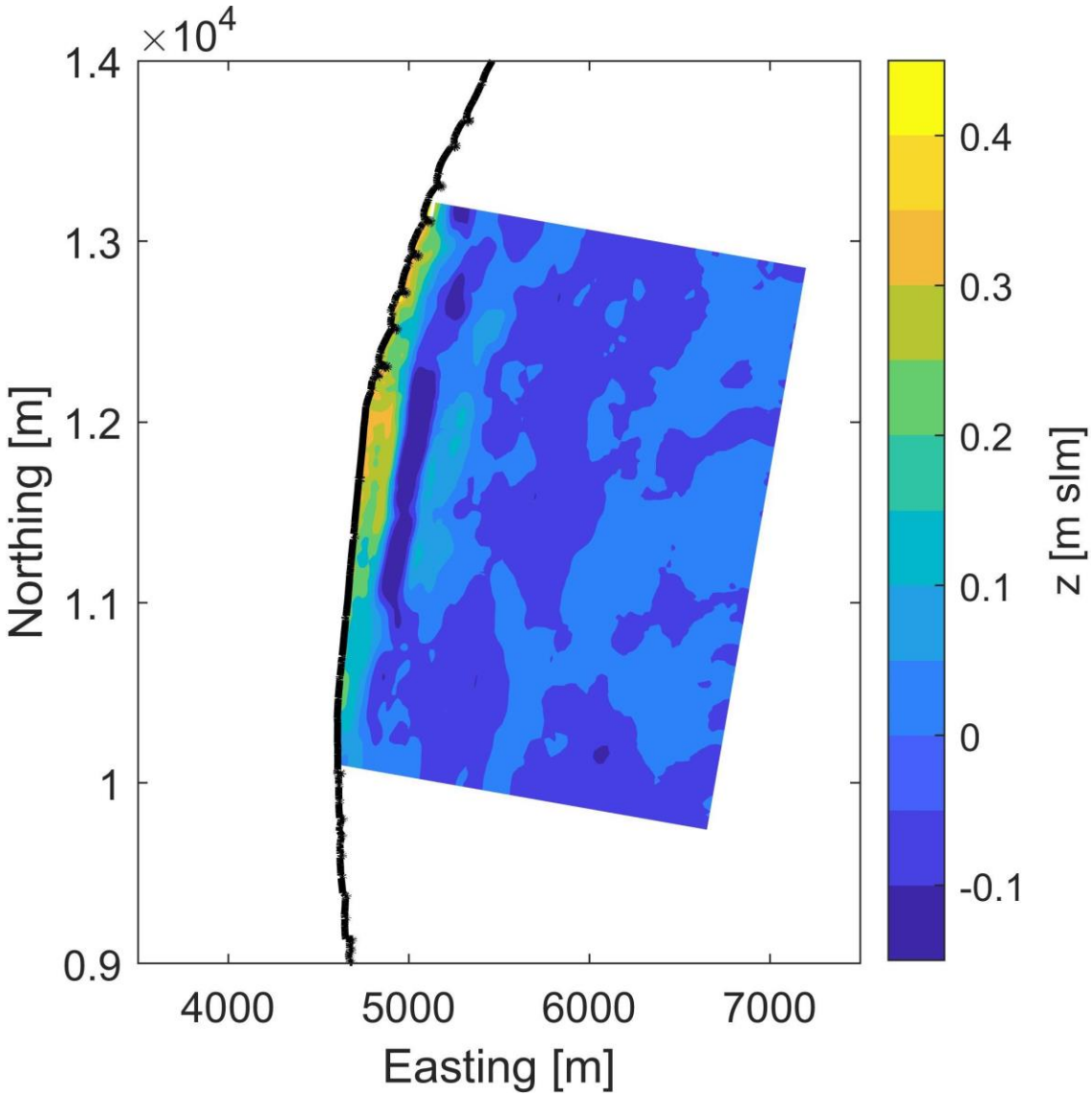


Figura 21. Sopralzo idrico rispetto al livello del medio mare nel dominio computazionale del modello. Le coordinate in figura denotano esclusivamente l'estensione del dominio, riferendosi al sistema di riferimento del modello utilizzato (non geo-referito). Mareggiata A.

Le differenze si riflettono sui pattern di erosione e deposito del sedimento: i risultati per la configurazione attuale (pannello di sinistra in Figura 23) evidenziano il classico pattern di erosione degli strati sommitali della quota sommersa (evidenziati in blu) a discapito di un deposito (evidenziato in rosso) al largo della zona dei frangenti delle onde. Tale tendenza, in assenza degli ostacoli rappresentati dai pennelli, si verifica anche in prossimità della foce della Carendetta. Al contrario, il deposito di materiale

in tale area è inibito dal pennello Sud nel caso della configurazione progettuale (pannello di destra in Figura 23), il quale costituisce un ostacolo al deposito di materiale escavato, che avviene pertanto nell'area ad esso prospiciente.

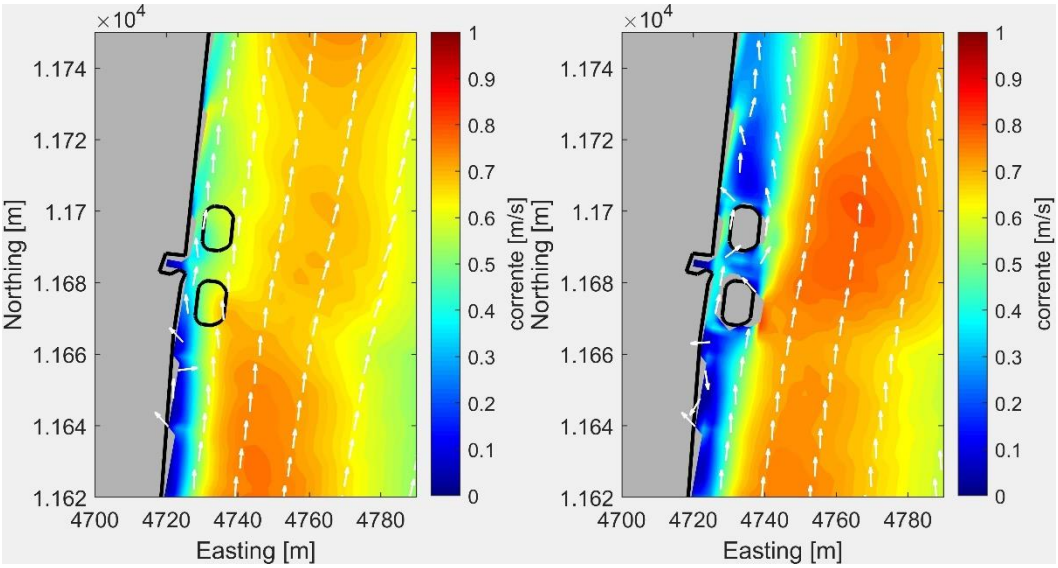


Figura 22. Correnti generate in prossimità dell'area di progetto. Pannello di sinistra: stato attuale; pannello di destra: configurazione di progetto (campi mediati su un intervallo pari a 15 minuti). Le frecce indicano la direzione della corrente litoranea, i colori ne indicano le intensità (vedi scala metrica sul lato destro in figura). Mareggiata A.

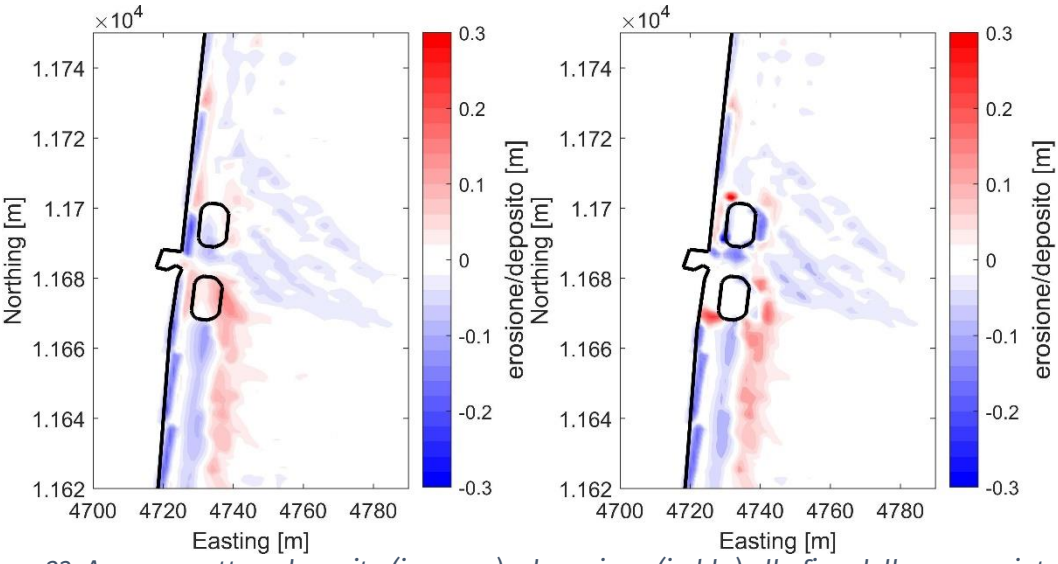


Figura 23. Aree soggette a deposito (in rosso) ed erosione (in blu) alla fine della mareggiata A. Pannello di sinistra: configurazione attuale. Pannello di destra: configurazione progettuale.

Considerazioni del tutto analoghe possono essere spese in riferimento alle mareggiate B e C. In particolare, vale la pena focalizzarsi sulle differenze nei campi di corrente tra le configurazioni attuale e di progetto, piuttosto che sui campi di corrente risultanti tra le diverse mareggiate: infatti, le velocità sono calcolate per istanti temporali *puntuali*, essendo dunque caratterizzate da elevata variabilità. Ad esempio, il campo di corrente mostrato in Figura 26 per la mareggiata C risulta essere amplificato rispetto a quanto mostrato in Figura 22 per la mareggiata A. Tuttavia, si rileva come le maggiori intensità degli stati di mare in input al modello si riverberino infine sulle quantità di materiale solido movimentato; si confrontino a tal proposito i pannelli in Figura 23 (mareggiata A) e Figura 27 (mareggiata C).

I risultati presentati mostrano una chiara tendenza: in presenza dei pennelli, si verificano depositi di materiale localizzati a Sud della foce e a Nord del pennello posto a protezione del lato sinistro idrografico. Quest'ultimo pattern può essere spiegato alla luce delle correnti che, per talune condizioni ambientali, risultano essere amplificate nell'area a tergo dei due manufatti, i quali rappresentano infatti un restringimento di sezione nell'area di progetto. In tal caso, si possono generare degli scavi ridotti ai piedi del pennello Nord, con conseguente deposito nella zona d'ombra dello stesso rispetto alla direzione della corrente, dove si instaurano strutture vorticose che favoriscono il deposito del materiale.

È lecito assumere che suddetta condizione si verifichi in particolar modo nel corso di mareggiate intense (seppur non eccezionali), come quelle utilizzate per il presente studio. Per stati di mare meno energetici, certamente più frequenti, è ragionevole assumere esclusivamente un parziale deposito di sedimento nell'area a Sud della foce della Carendetta, che favorisca ulteriormente l'aggetto di materiale a levante del pennello Sud, in linea con i pattern evidenziati nelle aree limitrofe.

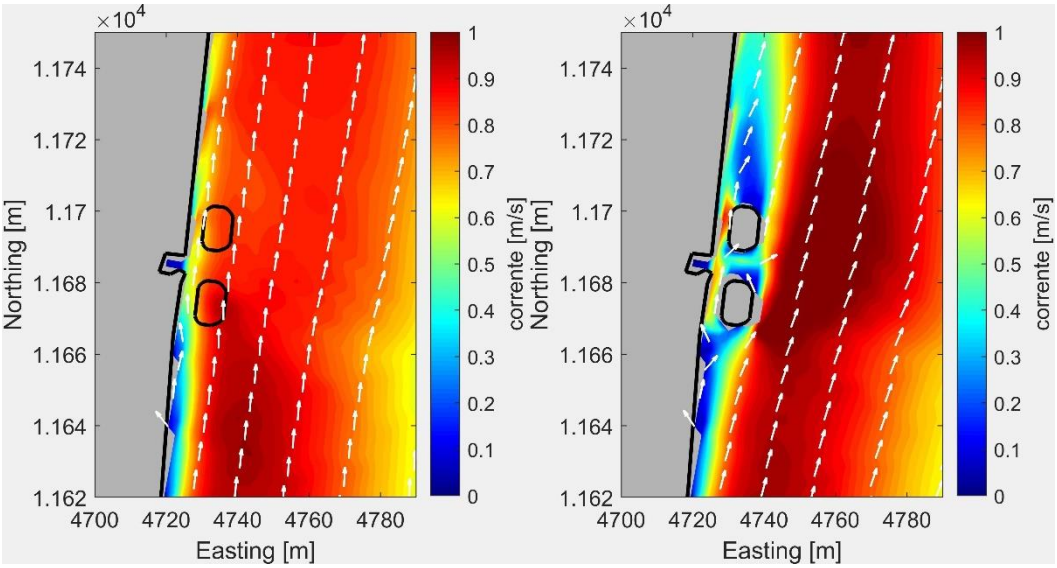


Figura 24. Correnti generate in prossimità dell'area di progetto per la mareggiata B (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 22).

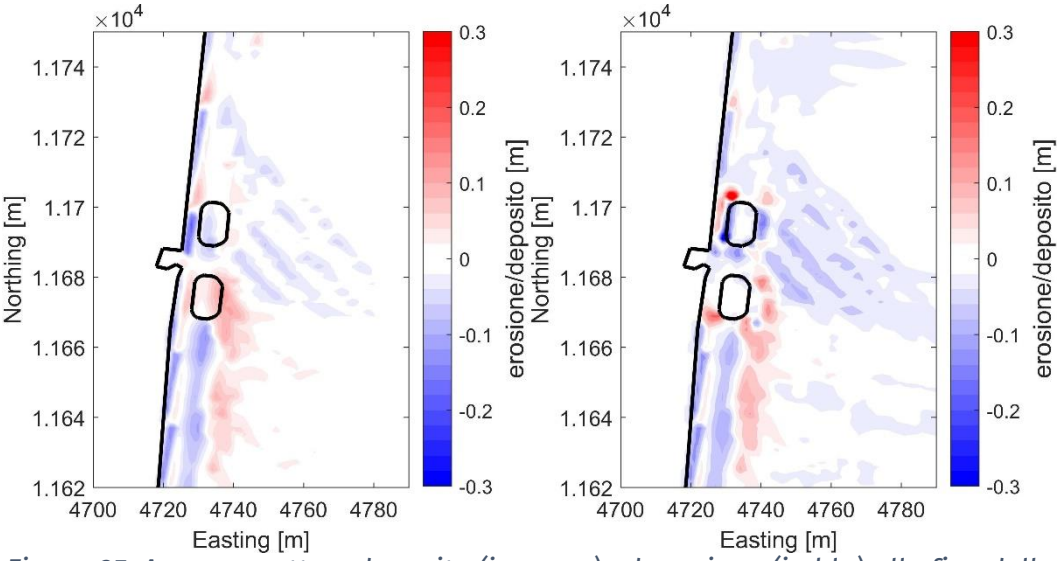


Figura 25. Aree soggette a deposito (in rosso) ed erosione (in blu) alla fine della mareggiata B (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 23).

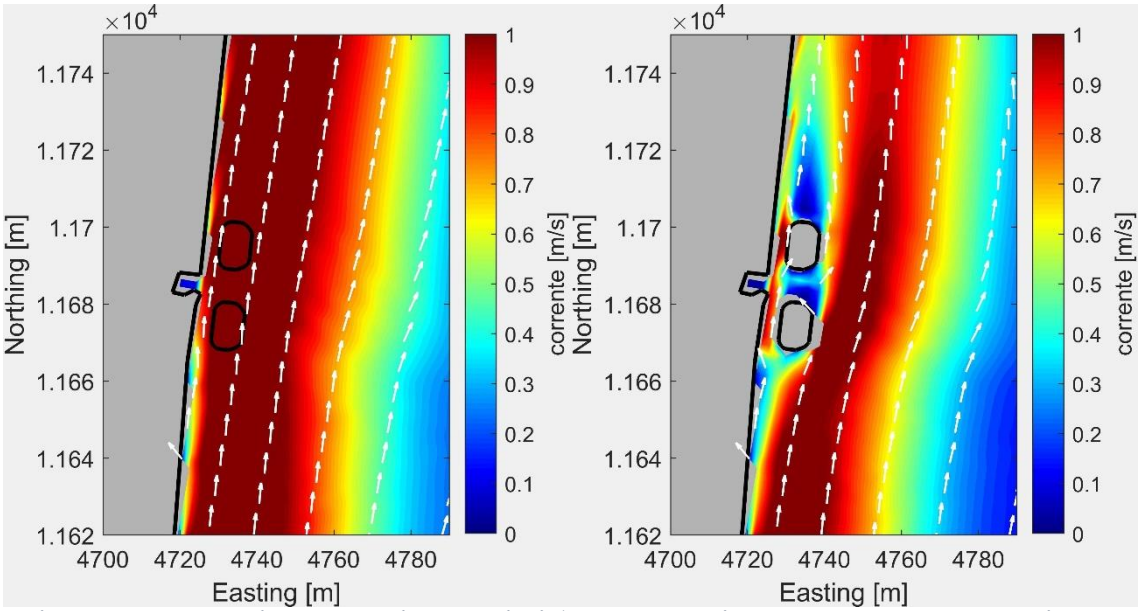


Figura 26. Correnti generate in prossimità dell'area di progetto per la mareggiata C (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 22).

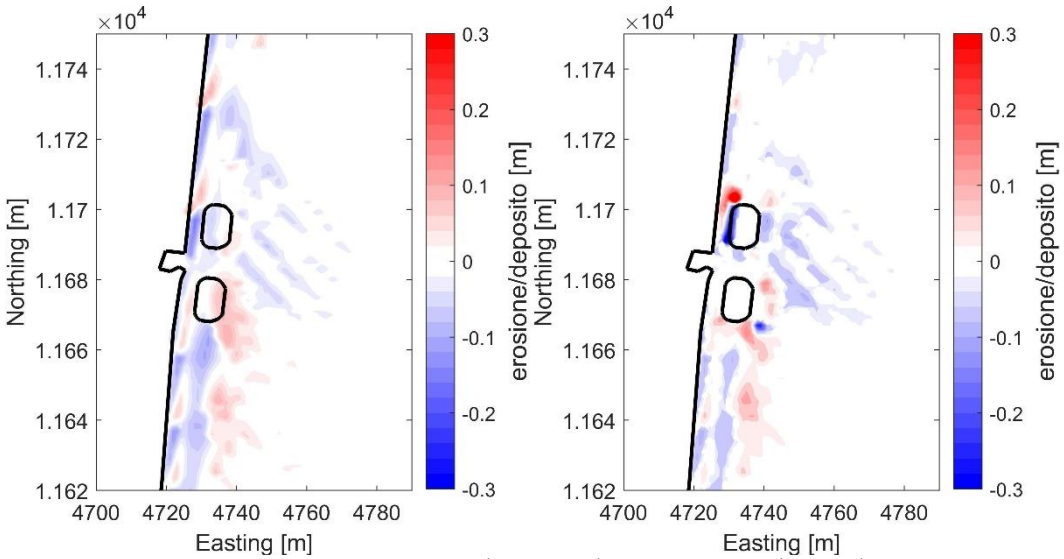


Figura 27. Aree soggette a deposito (in rosso) ed erosione (in blu) alla fine della mareggiata C (per i dettagli sulle figure si faccia riferimento alla Figura 23).

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it

ALLEGATI

A1. Planimetria del tratto focivo della Carendetta di Pineo allo stato attuale:
Vedi documento “13_0987_04-05-012N-00_PlanSdF”.

A2. Planimetria del tratto focivo della Carendetta di Pineo da progettazione definitiva dell’opera di protezione costiera:
Vedi documento “14_0987_04-05-013N-00_PlanSdP”.

A3. Curve granulometriche dei campioni prelevati lungo la Carenda:
Vedi documento “Analisi_gran_Carenda.pdf”

A4. Risultati delle simulazioni di X-Beach:
Vedi cartella “XB_output.tar.gz”. Le etichette *A* e *P* indicano la configurazione attuale e progettuale, rispettivamente, mentre i numeri 1, 2 e 3 indicano le mareggiate A, B e C.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
dicca.unige.it
P. IVA 00754150100

+39 010 3352491
Via Montallegro 1, 16145 Genova
direttore@dicca.unige.it