COMUNE DI SESTRI LEVANTE

Piazza Matteotti, 3 – 16039 Sestri Levante (GE)

INTERVENTI PER IL MIGLIORAMENTO DELLA RESILIENZA DELL'AREA DELLA BAIA DEL SILENZIO NEI CONFRONTI DELLE AZIONI DEGLI EVENTI ONDOSI ESTREMI

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE METEOMARINA
Analisi configurazioni di progetto per la protezione della Baia del Silenzio, Sestri Levante

(a cura di Università di Genova – DICCA Dipartimento Di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale)

R02

Genova, 25 marzo 2021
aggiornamento 16 aprile 2021

STUDIOELB INGEGNERI ASSOCIATI

Corso Torino 17/6 sc. A - 16129 GENOVA GE Tel. 010.5740568 - Fax 010.4211052
e-mail: inge@studioelb.it - PEC: studio@pec.studioelb.it - C.F. e P. IVA: 01933110

Firmato digitalmente da
Riccardo Giammarini
O = Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova
T = Ingegnere
C = IT

Università di Genova

DICCA DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA E AMBIENTALE

Analisi configurazioni di progetto per la protezione della Baia del Silenzio, Sestri Levante

Relazione Finale

Aprile 2021

Committente:
Comune di Sestri Levante

Relatori:
Prof. Ing. Giovanni Besio
Ing. Francesco Enrile

Relazione n. 20175/2021

Sommario

1 Analisi degli Eventi Estremi **6**
1.1 Area di studio e dati utilizzati 6
1.2 Metodologia di calcolo dei parametri d'onda 7
1.3 Previsioni a lungo termine 7
1.4 Risultati 9

2 Analisi degli interventi di protezione della Baia **13**
2.1 Agitazione ondosa all'interno della Baia 13
2.1.1 Discussione dei risultati dell'agitazione ondosa 14
2.1.2 Configurazione C 15
2.1.3 Configurazione C2 17
2.1.4 Configurazione E 20
2.2 Processi di dispersione e ricambio delle acque 22
2.2.1 Discussione dei risultati dei processi di dispersione 22

3 Conclusioni **33**

Elenco delle figure

1 Sinistra: foto satellitare della costa ligure; la Baia del Silenzio è identificata tramite un triangolo rosso. Destra: ingrandimento della zona di studio. . . . 6
2 Punto hindcast utilizzato per le analisi dei dati di onde e vento. 6
3 Scatter plot di H_s e θ_m per le mareggiate POT, raggruppate tramite metodo *k-means*. Le linee tratteggiate in rosso mostrano la direzione media interpolata sulle mareggiate di ciascun gruppo. 9
4 Funzione di autocorrelazione per i marosi afferenti al settore di libeccio (figura di sinistra) e scirocco (settore di destra). 9
5 Curve di $\mu_{T_p|H_s}$ e $\sigma_{T_p|H_s}$ per i dati d'onda nel punto hindcast 000264. Pannello di sinistra: $\mu_{T_p|H_s}$ (media condizionata); pannello di destra: $\sigma_{T_p|H_s}$ (varianza condizionata). 10
6 qq-plots degli estremi per il settore di libeccio (sinistra) e per il settore di scirocco (destra). 10
7 Environmental contour lines per il settore di libeccio (sopra) e per il settore di scirocco (sotto). In grigio, i dati totali di H_s e T_p nel punto 000264. In nero, i dati estremi relativi alle mareggiate provenienti dai due settori selezionati tramite *k-means*. 11
8 Risultato della propagazione del moto ondoso dal punto hindcast del DICCA alla costa di Sestri Levante. 12
9 Differenza dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione C e lo Stato Attuale (C-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto. 15
10 Differenza della risalita dell'onda sulla costa tra la Configurazione C e lo Stato Attuale (C-SA). Valori negativi indicano una diminuzione del valore di run-up atteso. 16
11 Differenza dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione C2 e lo Stato Attuale (C2-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto. 17

12 Differenza percentuale (1 corrisponde al 100%) dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione C2 e lo Stato Attuale (C2-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto. 18
13 Differenza della risalita dell'onda sulla costa tra la Configurazione C2 e lo Stato Attuale (C2-SA). Valori negativi indicano una diminuzione del valore di run-up atteso. 19
14 Differenza dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione E e lo Stato Attuale (E-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto. 20
15 Differenza della risalita dell'onda sulla costa tra la Configurazione E e lo Stato Attuale (E-SA). Valori negativi indicano una diminuzione del valore di run-up atteso. 21
16 Localizzazione della sezione di controllo per la valutazione dei flussi in corrispondenza dell'imboccatura della baia. 24
17 Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 5 anni. 26
18 Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 5 anni. 26
19 Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 25 anni. 27
20 Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 25 anni. 27
21 Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 5 anni. 28
22 Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 5 anni. 28
23 Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 25 anni. 29
24 Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 25 anni. 29
25 Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di bonaccia. 30
26 Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di bonaccia. 30
27 Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di libeccio e T_R=5 anni. 31
28 Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di libeccio e T_R=25 anni. 31
29 Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di scirocco e T_R=5 anni. 32
30 Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di scirocco e T_R=25 anni. 32
31 Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di bonaccia. . 33

Elenco delle tabelle

1 Tempo di residenza per i vari scenari presi in esame e differenze con lo stato attuale. 23

Premessa

Nell'ambito della convenzione di collaborazione scientifica tra il Comune di Sestri Levante e il dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università degli Studi di Genova, stipulata in data 7 maggio 2019, dal titolo *"Modellazione numerica della circolazione costiera e valutazione di ricadute in termine di protezione civile allinterno della Baia di Sestri Levante"*, era previsto il supporto da parte del DICCA per l'identificazione e la verifica di eventuali soluzioni progettuali relative a interventi di protezione della Baia del Silenzio. Il presente documento riporta le risultanze delle attività svolte dal DICCA in merito all'analisi di diverse possibili soluzioni progettuali per quanto riguarda la difesa della Baia del Silenzio dagli eventi di mareggiata. In particolare vengono riportati i risultati del confronto tra diverse soluzioni progettuali in termine di moto ondoso residuo all'interno della baia, risalita del moto ondoso lungo la battigia e di dinamica della dispersione per la soluzione progettuale indicata dalla committenza. Inoltre si riporta anche l'analisi degli eventi estremi per il moto ondoso al largo della Baia necessario per le attività di progettazione dei manufatti di protezione della costa. L'analisi degli eventi estremi e quindi della caratterizzazione dell'altezza d'onda significativa e del periodo di picco per diversi periodi di ritorno, è stato possibile grazie all'utilizzo dei dati meteo-marini di ricostruzione (hindcast) del DICCA.

1 Analisi degli Eventi Estremi

1.1 Area di studio e dati utilizzati

Il sito di interesse per il presente studio è la Baia del Silenzio, una delle due insenature (assieme alla Baia delle Favole) su cui si affaccia il centro storico di Sestri Levante, comune facente parte della Città Metropolitana di Genova (Liguria, Italia). In Figura 1 si riportano due fotografie satellitari atte ad identificare la posizione di Sestri Levante lungo la costa ligure.



Figura 1: Sinistra: foto satellitare della costa ligure; la Baia del Silenzio è identificata tramite un triangolo rosso. Destra: ingrandimento della zona di studio.

I dati climatici di interesse sono quelli caratterizzanti i regimi d'onda che insistono sull'area di studio. 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 statistiche successivamente sviluppate e riportate nel paragrafo 1.3. In particolare, sono stati impiegati i dati anemometrici e ondametrici ricostruiti numericamente dal DICCA [dicca.unige.it/hindcast] (Mentaschi et al., 2013b,a, 2015).

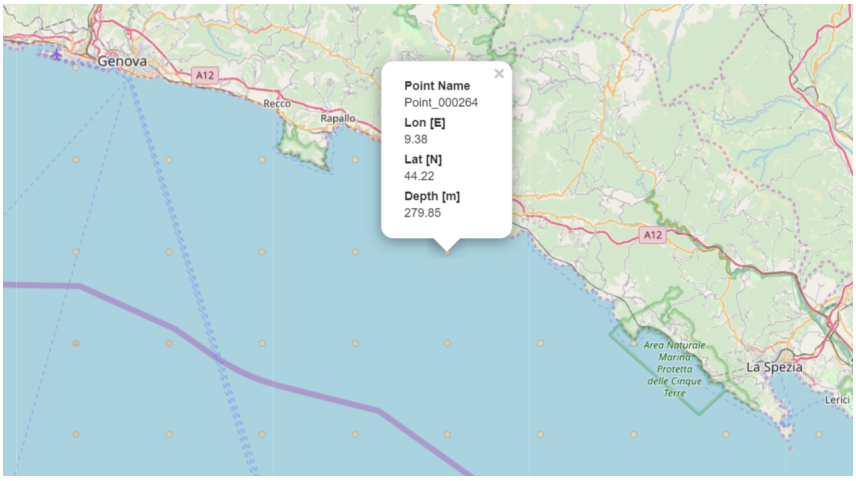


Figura 2: Punto hindcast utilizzato per le analisi dei dati di onde e vento.

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 2018. 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 (Skamarock et al., 2008), mentre le simulazioni della generazione e propagazione del moto ondoso sono state realizzate

con il modello d'onda WavewatchIII v3.18 (Tolman, 2009; Tolman et al., 2013) implementato con la stessa risoluzione del modello meteorologico all'interno del 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 (Cassola et al., 2015, 2016; Mentaschi et al., 2013b,a, 2015).

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 di altezza d'onda significativa (H_s), periodo medio e di picco (T_m e T_p), direzione di propagazione media e di picco (θ_m e θ_p), oltre a parametri di secondaria importanza per le successive analisi. In particolare, per il presente studio, sono stati utilizzati i dati salvati nel punto maglia Point_000264 (cfr. Figura 2), essendo lo stesso il nodo più prossimo all'area di studio.

1.2 Metodologia di calcolo dei parametri d'onda

In primo luogo, a partire dal dataset completo di dati meteo-marini, sono stati selezionati gli stati di mare più intensi, su cui sono successivamente state sviluppate le cosiddette *analisi ai valori estremi*. Tale selezione si è avvalsa del metodo "Peak Over Threshold" (comunemente abbreviato in POT). L'analisi POT richiede innanzitutto di fissare un valore di soglia sulla variabile da analizzare. In secondo luogo, si identificano i dati che eccedano la soglia suddetta, e si raggruppano in funzione del cosiddetto *tempo di interarrivo*, definito come il tempo minimo necessario affinché distinti gruppi di dati sopra-soglia (detti "eccedenze") siano identificati come eventi separati. Ovvero, qualora l'ultima eccedenza di un gruppo di dati sopra-soglia e la prima eccedenza del gruppo successivo siano separate da un tempo superiore al tempo di interarrivo, i due gruppi vengono considerati come fenomeni distinti, viceversa si intendono come facenti parte del medesimo evento (in questo caso, della medesima mareggiata, Lang et al., 1999).

Nel caso degli stati di mare, la variabile principale sui cui effettuare le analisi ai valori estremi è l'altezza d'onda significativa (H_s), definita come la media del terzo di onde più alto all'interno di un dato stato di mare. Per la presente analisi, la serie di H_s è quella definita nel punto hindcast 000264. La soglia è stata fissata pari al novantaseiesimo percentile della distribuzione iniziale di H_s, mentre il tempo di interarrivo è stato posto pari a 24 ore (ovvero, mareggiate distinte si verificano a distanza di almeno un giorno l'una dall'altra). Una volta selezionate le singole mareggiate, le stesse sono state caratterizzate tramite altezza d'onda significativa massima, e periodo e direzione (medi e di picco) ad essa associati.

Una volta definito il dataset di mareggiate di riferimento, si è provveduto a separare gli eventi in funzione della loro direzionalità, al fine di poter valutare i fenomeni indotti da marosi caratterizzati da diverse direzioni di incidenza, caratteristiche del paraggio dell'area di Sestri Levante. Il suddetto raggruppamento di dati si è avvalso di una tecnica automatica di selezione denominata *k-means*, un algoritmo di clustering partizionale che permette di suddividere un insieme di oggetti (o vettori) in un dato numero di gruppi sulla base dei loro attributi. L'obiettivo è quello di minimizzare la varianza all'interno di ciascun gruppo, ognuno identificato con un centroide o punto medio della stessa dimensione dei dati originali (MacQueen et al., 1967) Nel caso specifico, le caratteristiche utilizzate per il raggruppamento delle mareggiate sono θ_m e H_s, al fine di riconoscere e ripartire quelle con caratteristiche tipiche degli eventi di scirocco (onde provenienti da Sud-Est) e libeccio (onde provenienti da Sud-Ovest).

1.3 Previsioni a lungo termine

Le previsioni a lungo termine permettono di ovviare all'impredicibilità che caratterizza i fenomeni naturali, mitigandone l'impatto grazie al calcolo delle loro probabilità di accadimento

(e, nel caso della progettazione di opere civili, agli accorgimenti adottati di conseguenza). La conoscenza del clima ondoso all'interno della Baia del Silenzio per diversi tempi di ritorno risulta quindi di cruciale importanza per la valutazione della sua fruibilità e della salute ecologica della medesima.

A partire dalle serie storiche dei dati di H_s, è possibile stimare i rispettivi valori che ricorrano mediamente ogni T_r anni, detto T_r "tempo di ritorno" (o "periodo di ritorno"): esso è definito come l'intervallo medio di tempo in cui il valore di una variabile aleatoria (come per l'appunto H_s) sia uguagliato o superato almeno una volta.

La previsione a lungo termine ha lo scopo di valutare la probabilità che una variabile aleatoria si manifesti con determinate intensità, ossia, determinarne la frequenza di accadimento tramite l'impiego di opportune distribuzioni di probabilità. La suddetta probabilità è correlata al tempo di ritorno tramite la relazione:

$$F_x(X_i) = 1 - \frac{m}{T_r} \tag{1}$$

dove $F_x(X_i)$ viene definita come la probabilità che la variabile aleatoria X si verifichi con valori superiori ad un preciso valore x_i e m rappresenta l'intervallo di campionamento degli eventi X_i selezionati. L'ipotesi alla base di questo tipo di analisi è che i dati da cui si estraggono le suddette distribuzioni siano tra loro indipendenti, e siano pertanto rappresentativi di un campione estratto casualmente da una ipotetica popolazione di infiniti elementi. Fatta questa assunzione, è ragionevole ipotizzare che il comportamento statistico del campione sia rappresentativo di quello della popolazione. I valori associati alla probabilità $F_X(x_i)$ sono infine calcolati sulle distribuzioni modellate a partire dall'analisi statistica dei dati empirici.

Nel presente studio, le analisi suddette sono state effettuate in relazione ai dati di altezza d'onda e periodo di picco delle mareggiate estratte tramite metodo POT. Per quanto concerne H_s, per la modellazione dei dati si è fatto riferimento ad una distribuzione Weibull, la cui funzione di ripartizione si definisce come:

$$F_x = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right)^{\xi} \tag{2}$$

essendo ξ e σ i parametri di forma e scala della distribuzione, dette x le eccedenze di H_s rispetto alla soglia prefissata.

Un'analisi congiunta è stata dunque effettuata per caratterizzare la struttura di dipendenza esistente tra H_s e T_p, avvalendosi della nota teoria delle cosiddette "environmental contour lines", che permette di definire i periodi d'onda sulla base della probabilità condizionata che lega questi ultimi alle altezze d'onda (Haver and Winterstein, 2009). In prima analisi, si definiscono media e varianza (μ e σ) di T_p in funzione di H_s:

$$\begin{cases} \mu_{T_p|H_s} = a_1 + a_2 \log(H_s + a_3) \\ \sigma_{T_p|H_s} = b_1 + b_2 \exp\left(b_3 \left(H_s^{b_4}\right)\right) \end{cases} \tag{3}$$

Infine, i periodi legati a tempi di ritorno elevati sono calcolati in funzione delle statistiche precedentemente calcolate:

$$T_p = \exp\left(\mu_{T_p|H_s} + \sigma_{T_p|H_s} T_p^*\right); \tag{4}$$

dove T_p^* si riferisce al periodo di picco nello spazio Gaussiano in funzione di una particolare probabilità F_x.

Per quanto riguarda le direzioni di incidenza al picco, si è scelto di effettuare un'interpolazione lineare sui dati facenti parte i singoli settori direzionali identificati tramite *k-means*.

1.4 Risultati

Il risultato della ripartizione delle mareggiate in funzione della loro direzionalità si può osservare in Figura 3, che mostra come gli eventi selezionati tramite metodo POT si ripartiscano in due gruppi distinti. In particolare, sono visibili due gruppi distinti, caratterizzati da mareggiate provenienti da S-SE (punti colorati in nero) e SW (punti colorati in grigio), e ascrivibili pertanto ai settori di libeccio e scirocco.

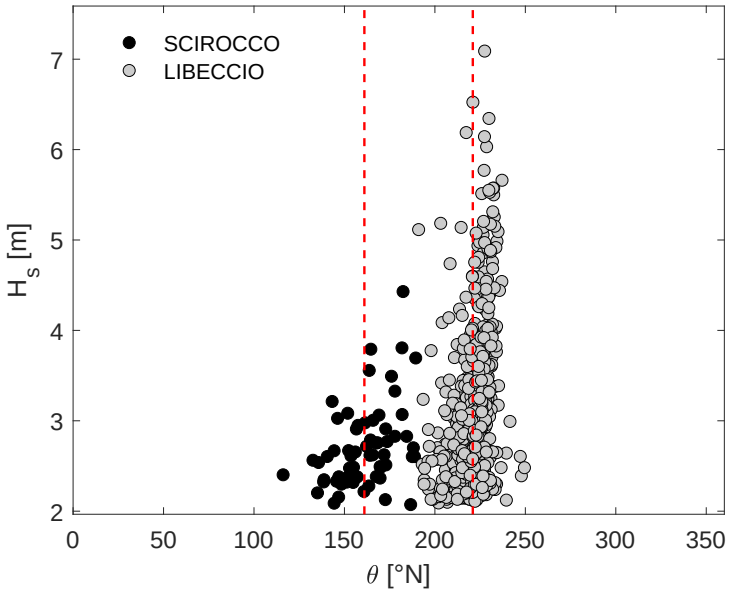


Figura 3: Scatter plot di H_s e θ_m per le mareggiate POT, raggruppate tramite metodo *k-means*. Le linee tratteggiate in rosso mostrano la direzione media interpolata sulle mareggiate di ciascun gruppo.

È bene precisare come, in virtù degli eventi estratti, non sia conveniente utilizzare un numero maggiore di clusters, poichè ciò porterebbe ad un numero di marosi esiguo per ciascun gruppo (cluster) identificato, con conseguenti ripercussioni sulla bontà dell'interpolazione della curva di Weibull.

I gruppi di eventi considerati rispondono alla condizione di indipendenza dei dati, come evidenziato dalle rispettive funzioni di autocorrelazione mostrate in Figura 4.

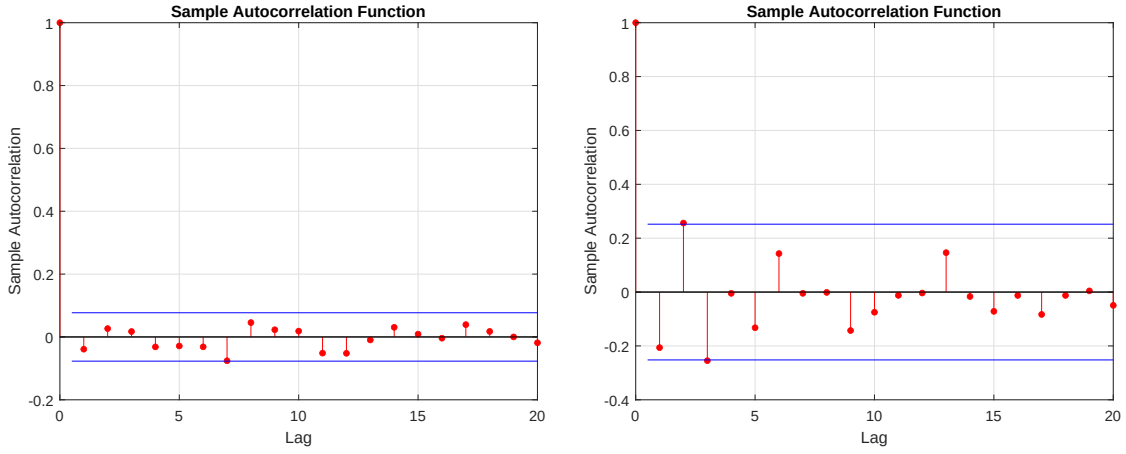


Figura 4: Funzione di autocorrelazione per i marosi afferenti al settore di libeccio (figura di sinistra) e scirocco (settore di destra).

La Figure 5 mostra le interpolazioni delle curve espresse in Equazione (3) per i dati di H_s e T_p contenuti nel punto hindcast 000264. In Figura 6 si riportano invece i qq-plots degli estremi per i due settori direzionali considerati, che mostrano come i quantili empirici dei dati estratti siano ben allineati ai quantili calcolati tramite la distribuzione di Weibull, a conferma di come la medesima sia atta a modellare i dati ed a calcolarne i periodi di ritorno di interesse progettuale.

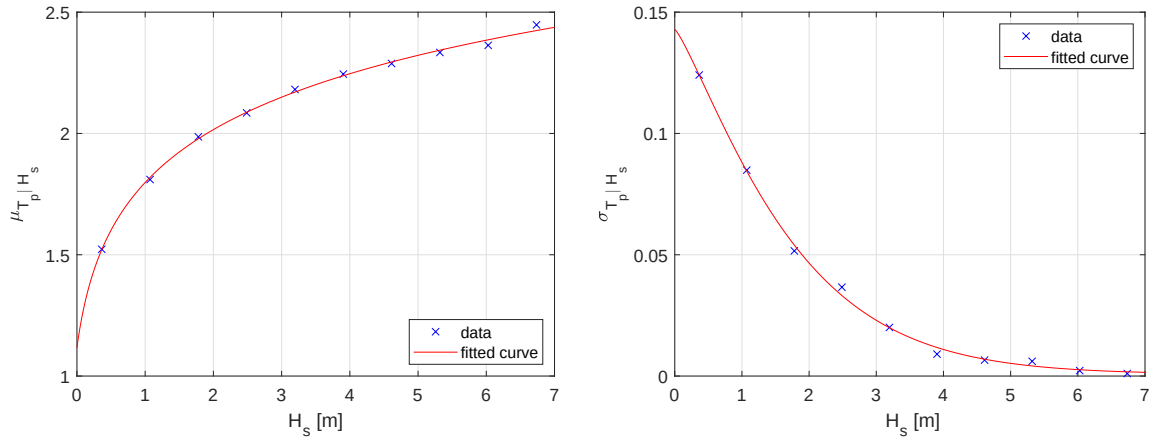


Figura 5: Curve di $\mu_{T_p|H_s}$ e $\sigma_{T_p|H_s}$ per i dati d'onda nel punto hindcast 000264. Pannello di sinistra: $\mu_{T_p|H_s}$ (media condizionata); pannello di destra: $\sigma_{T_p|H_s}$ (varianza condizionata).

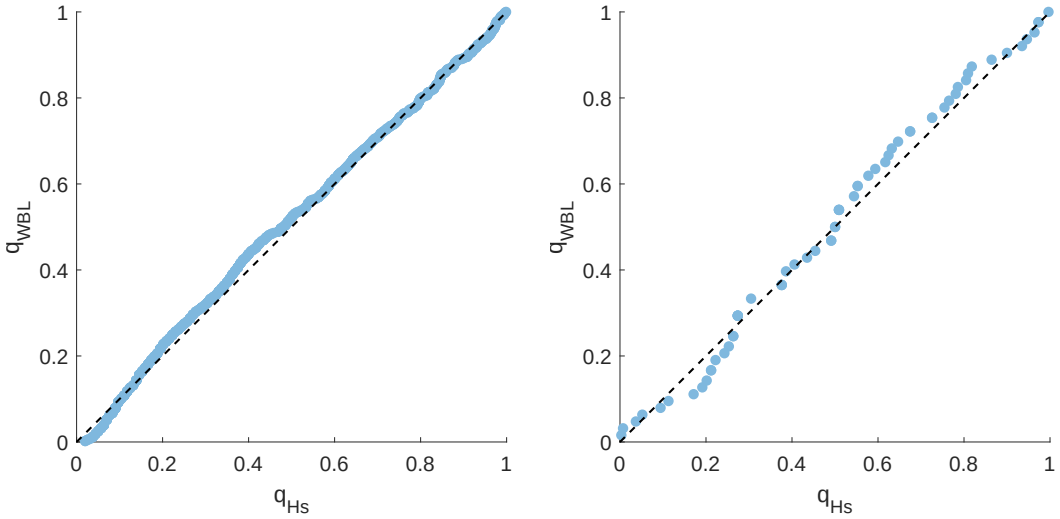


Figura 6: qq-plots degli estremi per il settore di libeccio (sinistra) e per il settore di scirocco (destra).

Infine, in Figura 7, si mostrano le isolinee (ovvero le "environmental contour lines") per i due settori considerati e per quattro diversi periodi di ritorno (in diversi colori), ritenuti di rilevante interesse progettuale, ovvero 5, 25, 50, 100 anni.

Le isolinee rappresentano curve di iso-probabilità. Ne consegue che, teoricamente, sia possibile identificare infinite coppie di H_s e T_p associate ad un assegnato periodo di ritorno. Risulta quindi una scelta del progettista l'identificazione della coppia H_s-T_p più adeguata per la rappresentazione dello stato di mare con cui realizzare le necessarie verifiche per le diverse strutture costiere. Vengono quindi allegati al presente rapporto i file contenenti le coppie H_s-T_p per i diversi periodi di ritorno e per le diverse direzioni di provenienza della mareggiate.

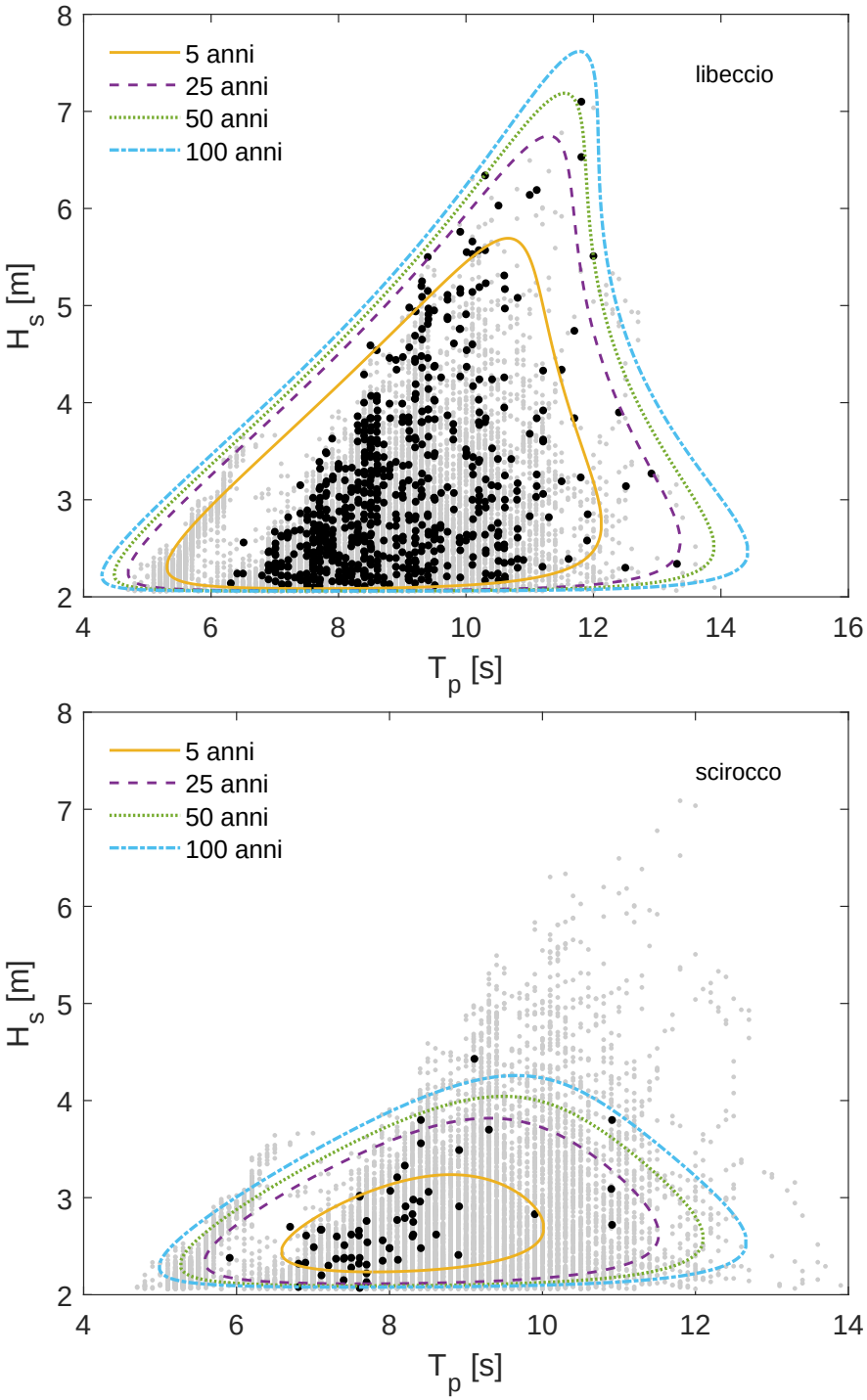


Figura 7: Environmental contour lines per il settore di libeccio (sopra) e per il settore di scirocco (sotto). In grigio, i dati totali di H_s e T_p nel punto 000264. In nero, i dati estremi relativi alle mareggiate provenienti dai due settori selezionati tramite *k-means*.

Secondo indicazioni ricevute dai progettisti si procede quindi alla propagazione dell'onda di progetto dal punto di hindcast utilizzato per le analisi degli eventi estremi fino al piede della struttura di protezione. L'onda di progetto è stata fornita dai progettisti e i suoi valori caratteristici sono pari a H_s=7.2 metri e T_p=12 secondi e con una direzione di provenienza pari a 220°N, corrispondente a un evento di libeccio. Per il calcolo della propagazione dal largo verso riva è stato utilizzato il codice numerico SWAN in modalità stazionaria,

con impostazione di uno spettro JONSWAP in corrispondenza del contorno del dominio di calcolo. I risultati della propagazione restituiscono quindi i seguenti valori caratteristici del moto ondoso: H_s=5.27 metri, T_p=12 secondi, T_m=9.3 secondi, direzione di provenienza di picco θ_p=215°N, direzione di provenienza media θ_m=219.5°N (cfr. figura 8).

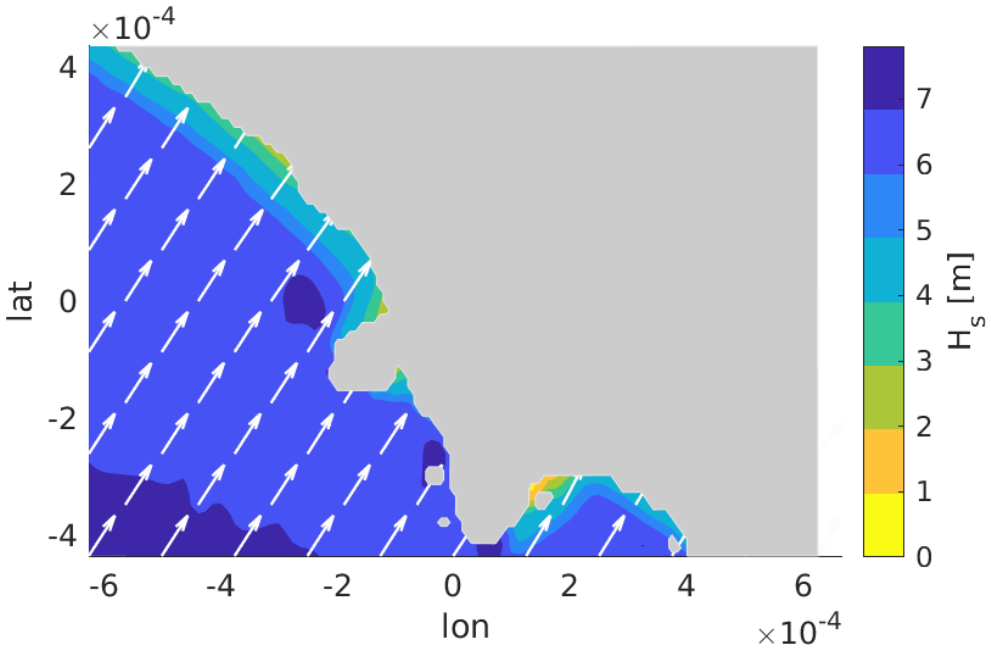


Figura 8: Risultato della propagazione del moto ondoso dal punto hindcast del DICCA alla costa di Sestri Levante.

2 Analisi degli interventi di protezione della Baia

L'analisi dell'efficacia di eventuali interventi di protezione della Baia del Silenzio è stata eseguita utilizzando lo stesso approccio dello studio sviluppato nel caso dell'analisi dello stato attuale valutando sia gli aspetti relativi all'agitazione ondosa all'interno della baia con relativa analisi dell'inondazione costiera (run-up), sia gli aspetti relativi alla dispersione all'interno della Baia tramite un confronto tra i tempi di residenza per la configurazione di progetto scelta e la configurazione dello stato attuale. Infine, sempre ai fini di meglio comprendere i processi dispersivi e di trasporto di sedimenti tra la Baia e il mare aperto, è stato analizzato il profilo di velocità in prossimità dell'imboccatura della baia compresa tra i due moli oggetto degli interventi di progetto.

2.1 Agitazione ondosa all'interno della Baia

Al fine di valutare l'agitazione ondosa all'interno della Baia del Silenzio è stato deciso di impiegare lo stesso codice numerico utilizzato per le valutazioni realizzate durante lo studio della configurazione corrispondente allo stato attuale in grado di riprodurre sia i fenomeni di diffrazione, che si vengono a generare in seguito all'interazione del moto ondoso con le strutture di protezione della Baia stessa, sia la dinamica di inondazione costiera dovuta alla risalita del moto ondoso sulla spiaggia oggetto dello studio. Infine, il modello adottato permette anche di valutare l'inviluppo delle altezze d'onda che si verificano durante un evento di mareggiata e quindi di valutare il grado di agitazione ondosa a tergo dei moli di protezione della Baia. Come descritto nello studio precedente, la scelta è ricaduta sul modello numerico XBeach utilizzato prevalentemente per simulare i processi costieri. XBeach è stato utilizzato in modalità non idrostatica, ovvero risolvendo le equazioni del moto su acqua bassa, tenendo conto dei fenomeni non lineari e accoppiando le stesse ad un termine di correzione della pressione idrostatica. Le equazioni "Non-Linear Shallow-Water" (NLSWE) sono risolte prendendo in considerazione velocità Lagrangiane delle particelle fluide, ovvero sommando alla velocità Euleriana del campo la velocità dello Stokes drift.

Il modello numerico è stato quindi implementato su tre possibili configurazioni di progetto previste dai progettisti le cui informazioni di dettaglio sono state fornite nell'ambito della presente convenzione. Le soluzioni di progetto analizzate corrispondono quindi alle soluzioni *C*, *C2* ed *E*, che prevedono diverse realizzazioni di opere di difesa per una protezione maggiore della Baia e della spiaggia presente al suo interno. Le informazioni progettuali sono state utilizzate quindi per impostare le griglie di calcolo del modello al fine di tenere in conto delle mutate condizioni plano-altimetriche delle opere di difesa (allungamento del molo di ponente e realizzazione di una barriera soffolta in prossimità dell'imboccatura della Baia). Il modello così implementato viene forzato con tre mareggiate passate estratte dalle ricostruzioni storiche realizzate dal DICCA che rappresentano eventi significativi anche per l'impatto che hanno avuto sulle costruzioni prospicienti la Baia stessa. Queste mareggiate sono quelle avvenute dal 27 ottobre al 2 novembre 2008, dal 30 dicembre al 5 gennaio 2010 e dal 27 ottobre al 2 novembre 2018. Al fine di valutare l'agitazione ondosa per scopi di protezione civile, si fornisco in output due tipi di dato. Il primo riguarda la valutazione dell'inviluppo dei massimi di altezza d'onda, ovvero i valori massimi di elevazione della superficie libera che si hanno durante l'intera estensione della mareggiata. Il secondo dato riguarda invece il valore di run-up, ovvero di risalita dell'onda sulla spiaggia durante l'evento. Per una maggiore comprensione dell'effetto delle diverse configurazioni di opere in relazione alla protezione della Baia dagli eventi di mareggiata, sono state calcolate le differenze in termini di agitazione del moto ondoso e di risalita del moto ondoso rispetto alla configurazione attuale già analizzata nella precedente convenzione. In questa maniera è stato possibile realizzare delle mappe di confronto soluzione "progettuale-stato attuale" di rapida ed efficace lettura per una analisi

delle diverse soluzioni progettuali. Si riportano di seguito quindi i risultati ottenuti per le diverse configurazioni progettuali sulla base delle simulazioni delle mareggiate storiche.

2.1.1 Discussione dei risultati dell'agitazione ondosa

I risultati relativi all'agitazione residua all'interno della Baia (figure 9-11-14) e della risalita del moto ondoso sulla spiaggia emersa (figure 10-13-15) rivelano come gli effetti più significativi in termini di mitigazione del rischio si ottengano con la configurazione C; la realizzazione della configurazione $C2$ permette di ottenere effetti sensibili soprattutto in condizioni di mare proveniente da libeccio. Inoltre la soluzione $C2$ ha il pregio di essere meno onerosa rispetto alla soluzione C, presentando comunque effetti abbastanza simili. Inoltre la realizzazione delle soluzione $C2$ non pregiudica una eventuale futura realizzazione della configurazione C. Per quanto riguarda la configurazione E, invece, gli effetti di mitigazione non sono apprezzabili come nei casi precedenti. Si ritiene che la limitata efficacia di tale soluzione risieda nelle dimensioni limitate dell'intervento, in quanto una barriera sommersa per poter avere un effetto significativo sulla propagazione del moto ondoso deve avere dimensioni trasversali significative con larghezze dell'ordine di metà lunghezza d'onda (le lunghezze d'onda, in funzione del periodo delle onde, potrebbero essere comprese comprese circa tra 10 e 40 metri). Le stesse osservazioni possono essere realizzate per quanto riguarda i valori della risalita del moto ondoso sulla spiaggia emersa, ottenendo maggiori effetti per le mareggiate provenienti dai settori di Sud-Ovest (libeccio) e in particolare nella parte di ponente della Baia. Infine è da sottolineare come risultati nell'ordine della variazione di ± 30 cm dell'inviluppo della massima altezza d'onda rientrino in una distribuzione statistica del carattere random della rappresentazione del moto ondoso all'interno del modello numerico (non si riportano i risultati ottenuti in seguito alla realizzazione di diverse simulazioni delle stesse condizioni di moto ondoso per la verifica di questo aspetto).

2.1.2 Configurazione C

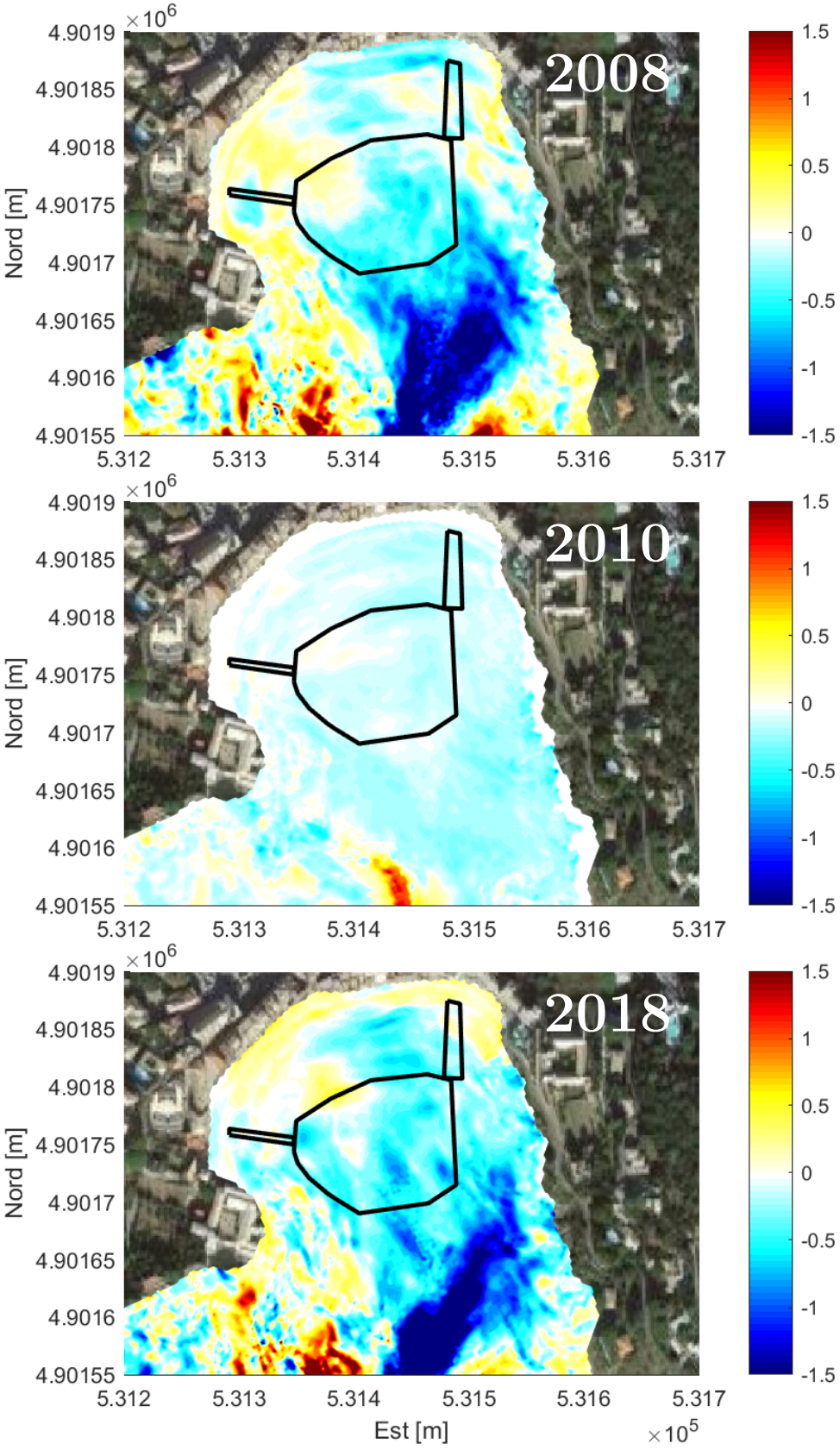


Figura 9: Differenza dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione C e lo Stato Attuale (C-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto.

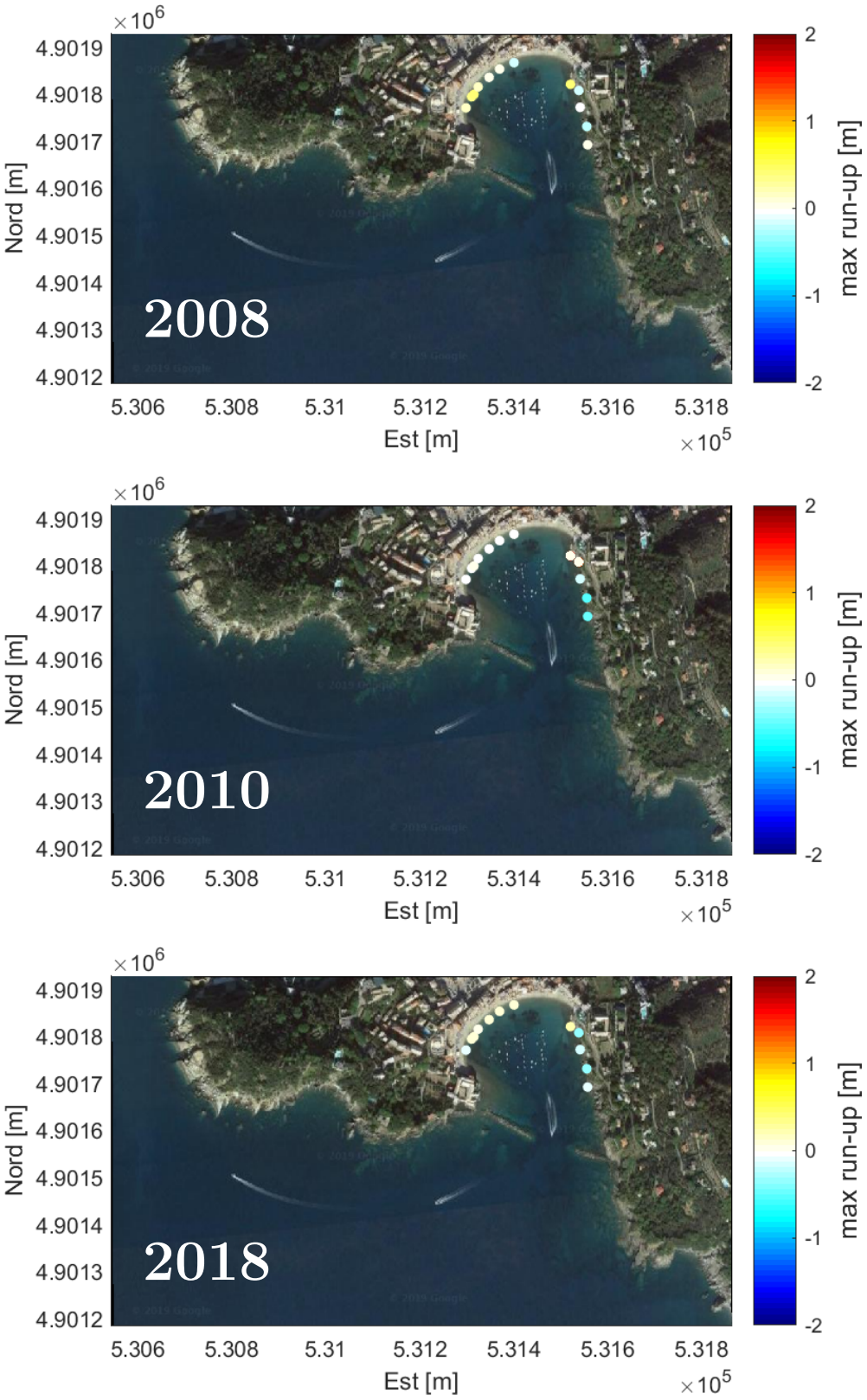


Figura 10: Differenza della risalita dell'onda sulla costa tra la Configurazione C e lo Stato Attuale (C-SA). Valori negativi indicano una diminuzione del valore di run-up atteso.

2.1.3 Configurazione C2

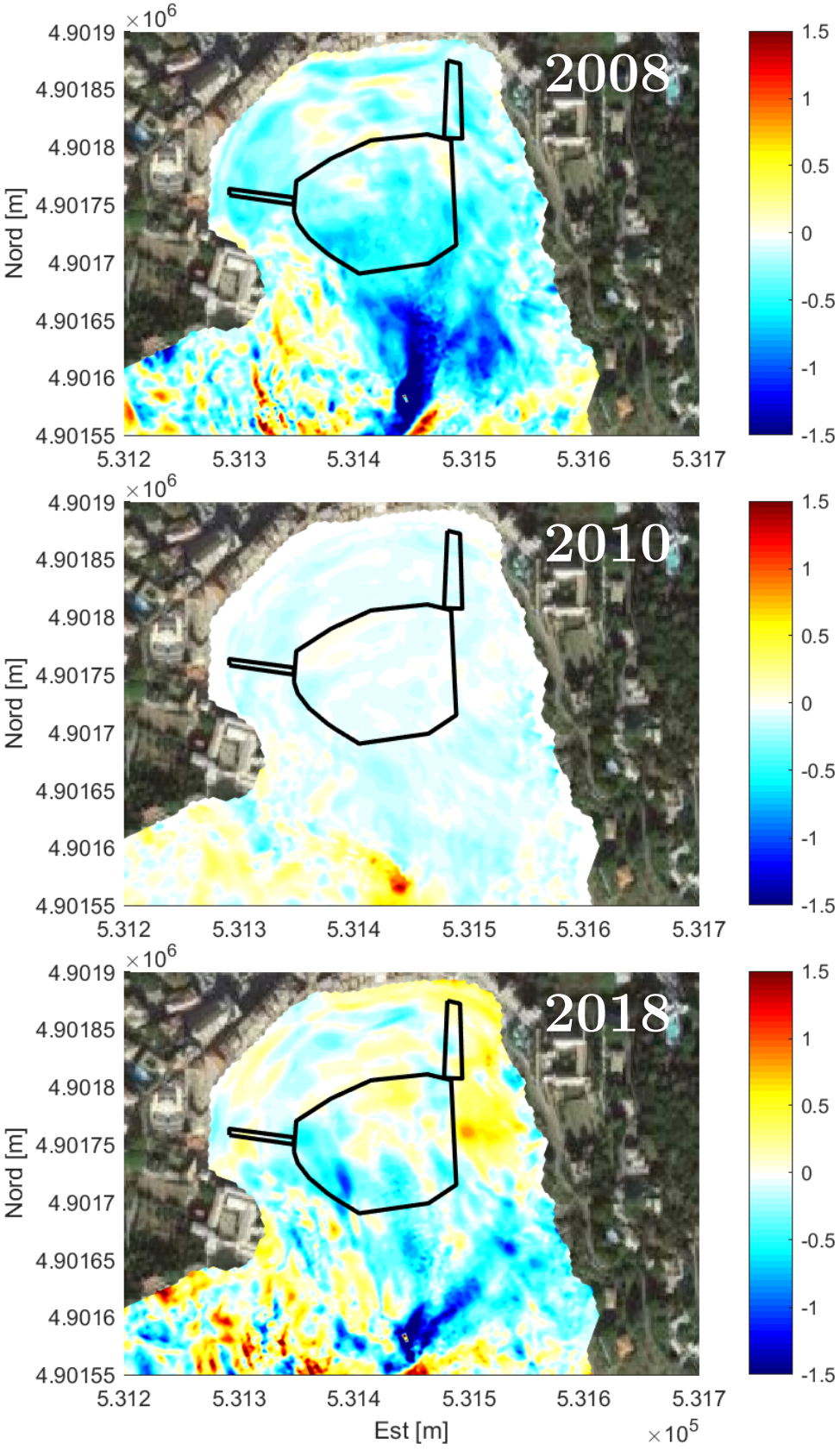


Figura 11: Differenza dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione C2 e lo Stato Attuale (C2-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto.

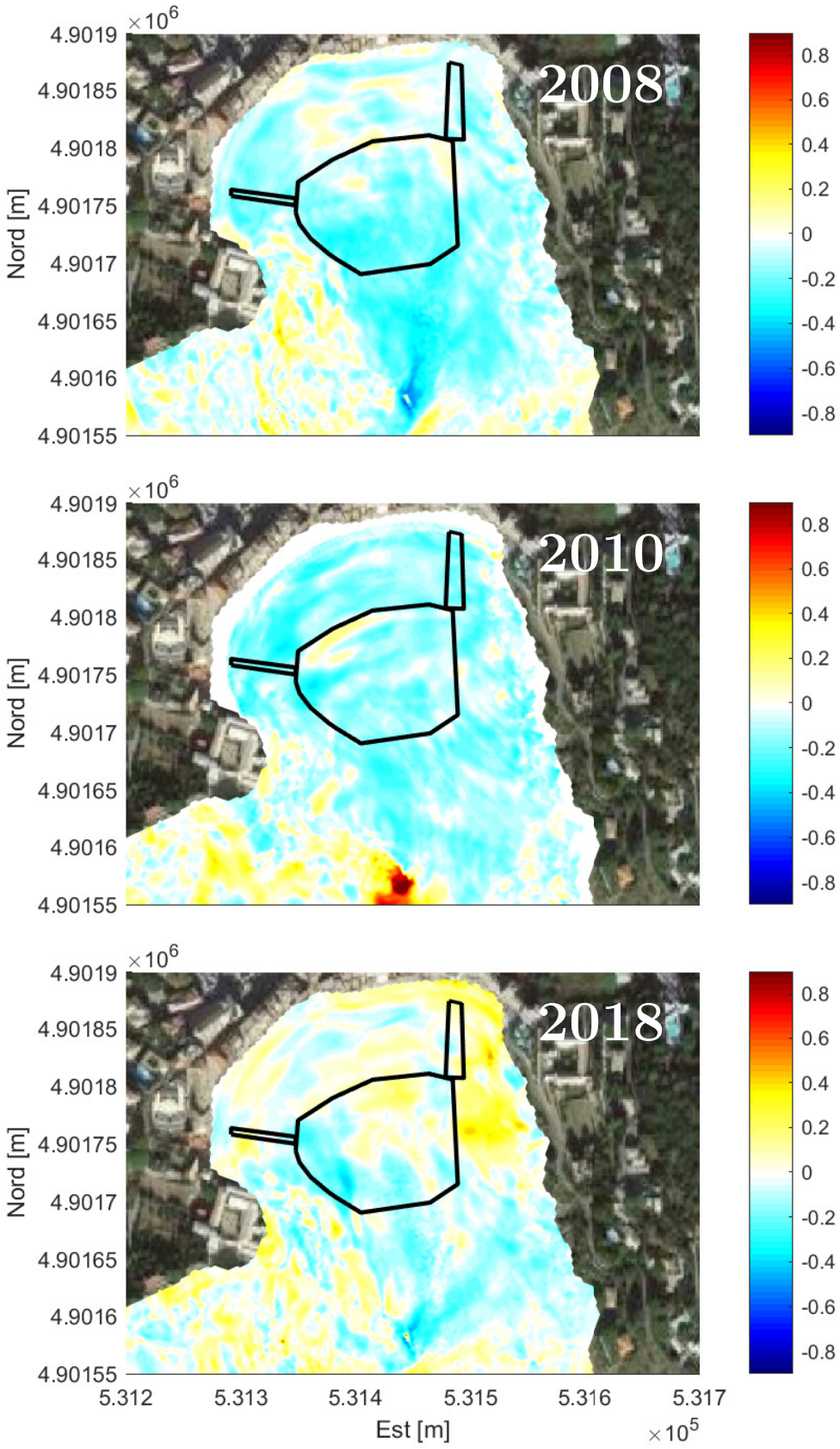


Figura 12: Differenza percentuale (1 corrisponde al 100%) dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione C2 e lo Stato Attuale (C2-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto.

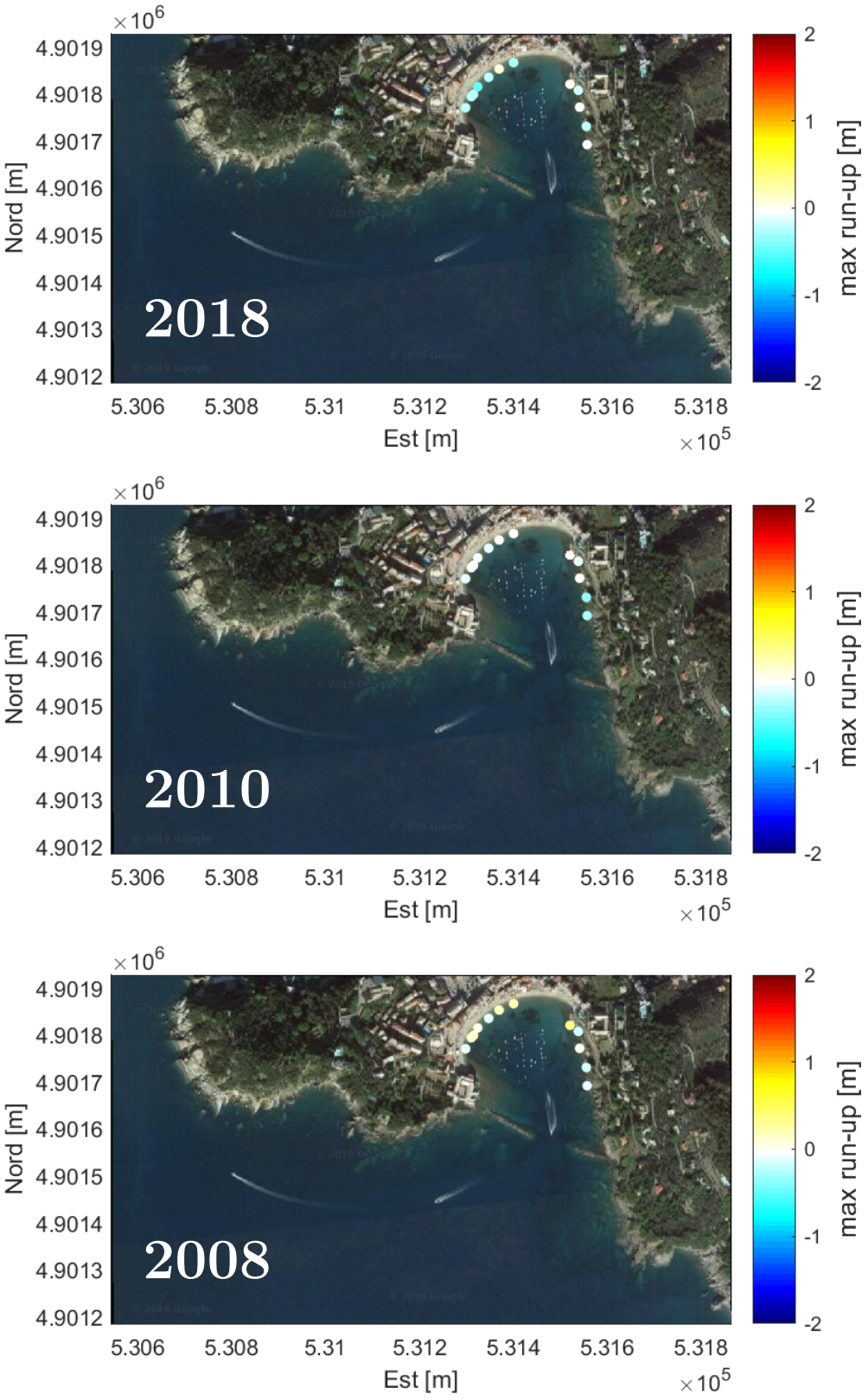


Figura 13: Differenza della risalita dell'onda sulla costa tra la Configurazione C2 e lo Stato Attuale (C2-SA). Valori negativi indicano una diminuzione del valore di run-up atteso.

2.1.4 Configurazione E

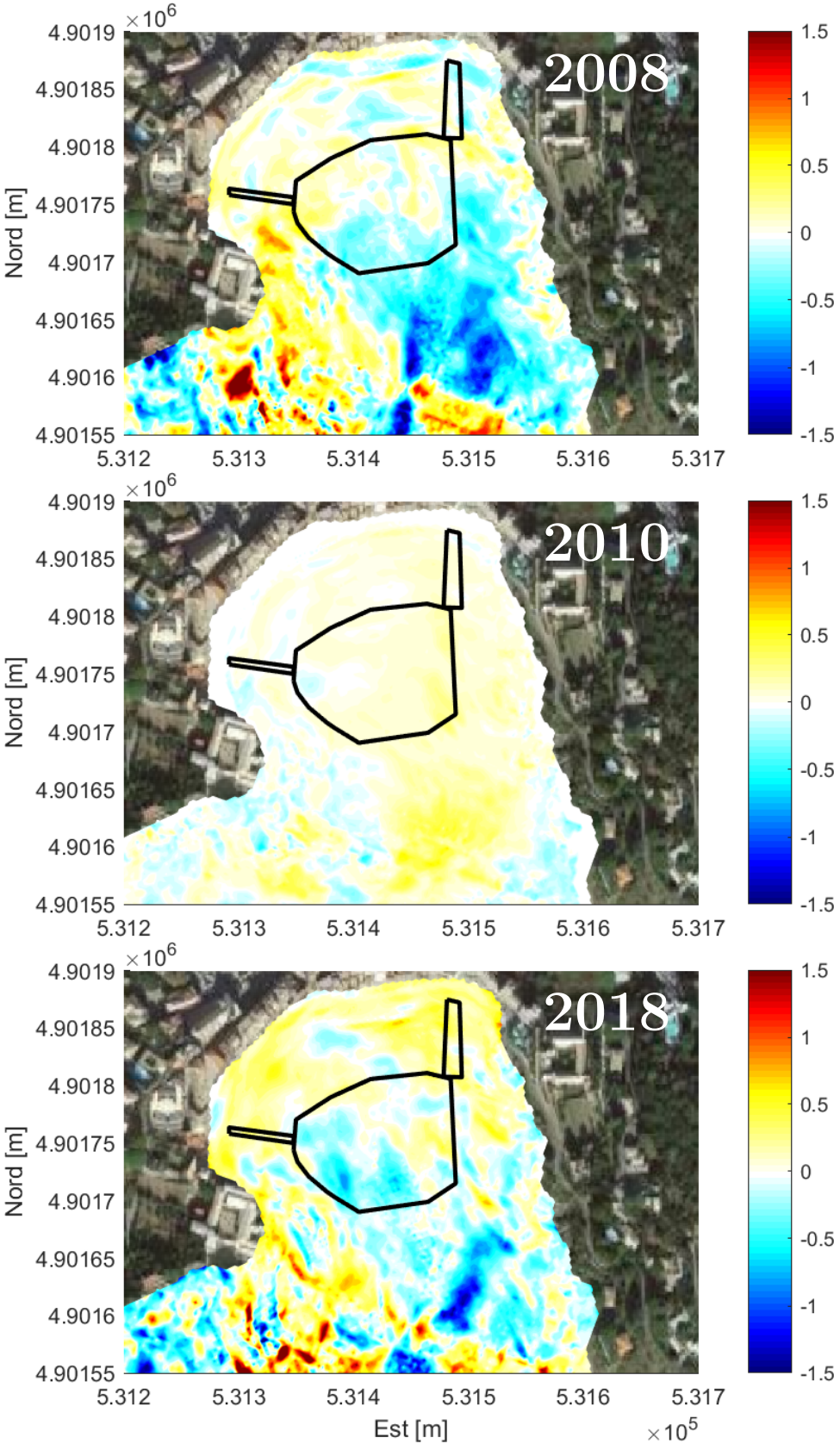


Figura 14: Differenza dell'inviluppo delle altezze d'onda tra la Configurazione E e lo Stato Attuale (E-SA). Valori negativi indicano una diminuzione delle condizioni di altezza d'onda nella configurazione di progetto.

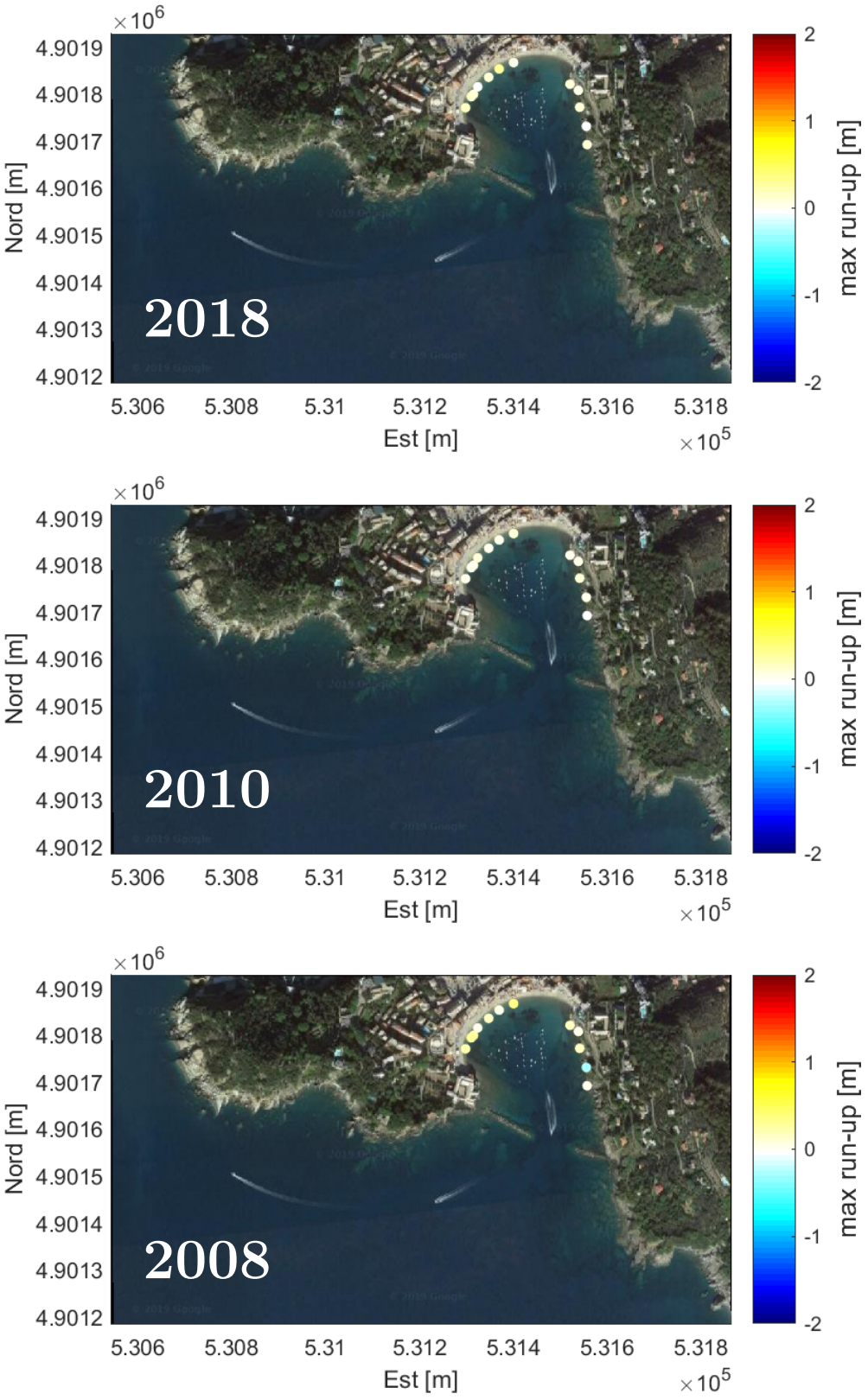


Figura 15: Differenza della risalita dell'onda sulla costa tra la Configurazione E e lo Stato Attuale (E-SA). Valori negativi indicano una diminuzione del valore di run-up atteso.

2.2 Processi di dispersione e ricambio delle acque

Lo studio dell'idrodinamica all'interno della baia è stato condotto mediante l'uso del codice di calcolo Delft3D-Flow. Tale codice di calcolo Open Source è ampiamente utilizzato all'interno della comunità scientifica grazie alla sua affidabilità comprovata da studi pubblicati su riviste internazionali (si veda per esempio Elias et al., 2000). Tale codice di calcolo risolve le Reynolds Averaged Navier Stokes Equations (RANS):

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + (\boldsymbol{U} \cdot \nabla)\boldsymbol{U} = -\frac{1}{\rho_0}\nabla P + \boldsymbol{g} + \nu \nabla^2 \boldsymbol{U} + \nabla \cdot \boldsymbol{T^R} \tag{6}$$

dove $\boldsymbol{U}$ è la velocitá media del fluido in esame, $\boldsymbol{U} = (U, V, W)$, P la pressione, ρ_0 la densità di riferimento del fluido, $\boldsymbol{g}$ l'accelerazione di gravità $\boldsymbol{g} = (0, 0, -g)$, ν la viscosità cinematica e $\boldsymbol{T^R}$ il tensore di Reynolds che descrive le fluttuazione di velocità all'interno del fluido stesso.

Sulla base della soluzione idrodinamica di cui all'equazione (6), è anche possibile valutare il trasporto di un tracciante passivo atto a descrivere possibili inquinanti. Tale dinamica viene descritta risolvendo l'equazione di convezione diffusione, ovvero:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \boldsymbol{U} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \tag{7}$$

dove C rappresenta la concentrazione del tracciante passivo che vogliamo simulare e D rappresenta il coefficiente di dispersione, assunto isotropo nel presente studio. Delft3D permette la soluzione accoppiata delle due precedenti equazioni e, dunque, uno studio completo dei problemi all'interno della zona di interesse.

In particolare, la zona in oggetto presenta una forzante mareale che può ritenersi del tutto modesta. Nel seguito dello studio si considerano uno scenario di bonaccia, dove la sola forzante del sistema è costituita dall'escursione di marea, due scenari di libeccio, con mareggiate aventi tempo di ritorno di 5 e 25 anni, e due scenari di scirocco, aventi anch'essi mareggiate con tempi di ritorno di 5 e 25 anni. Nel caso di bonaccia, le velocità prodotte a seguito dell'escursione mareale risultano essere inferiori al centimetro al secondo. Pertanto, la forzante principale risulta essere la corrente lungocosta che si instaura nella zona prospiciente la linea di riva, generata da un moto ondoso con attacco non ortogonale alla costa, tipica degli scenari di libeccio e scirocco. Questo tipo di fenomeno può essere studiato approfonditamente con Delft3D nel momento in cui si accoppia ad esso un modello di propagazione del moto ondoso. Il modello utilizzato è SWAN (Simulating Waves Nearshore Booij et al., 2003). Tale codice di calcolo è di tipo "spettrale" e risolve l'evoluzione dello spettro di energia del moto ondoso nello spazio e nel tempo, risolvendo la cosiddetta "wave-action equation":

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \tag{8}$$

dove N rappresenta la "action density", ovvero la densità di energia divisa dalla relativa frequenza $N = E/\sigma$, σ la frequenza relativa, θ la direzione e c_x e c_y le rispettive velocità di propagazione nelle due direzioni.

L'accoppiamento delle tre equazioni precedenti permette lo studio completo della dinamica dell'area di interesse.

2.2.1 Discussione dei risultati dei processi di dispersione

I risultati ottenuti nella presente sezione sono stati sviluppati per avere una stima della qualità delle acque all'interno della baia tramite l'analisi dell'evoluzione spazio-temporale

di un ipotetico contaminante unitario uniformemente distribuito all'interno dello specchio acqueo racchiuso dalle strutture di protezione in massi. L'analisi dell'evoluzione nel tempo dei campi di corrente e la stima del tempo di residenza del bacino t_{res} (definito come tempo in cui si ha il rinnovo dell'acqua compresa in una certa zona della baia, ovvero il tempo che viene impiegato per abbattere del 60% la concentrazione di contaminante iniziale; tale quantità è variabile in ogni punto della maglia di calcolo) hanno quindi permesso di identificare dei vortici (strutture del moto) in grado di intrappolare in maniera più o meno efficace la sostanza contaminante e quindi di alterare la qualità dell'acqua in maniera sensibile sotto alcune condizioni.

La analisi è stata condotta tenendo in conto cinque scenari di riferimento: il primo riguarda una condizione di bonaccia, in cui è presente unicamente una escursione di livello mareale tipica delle condizioni estive. La seconda riguarda un condizione di circolazione indotta da onde di libeccio aventi tempo di ritorno di 5 e 25 anni. La terza condizione riguarda una circolazione indotta da onde di scirocco aventi analogamente tempo di ritorno di 5 e 25 anni. Nel seguito vengono riportati i risultati del tempo di residenza per i diversi scenari meteo-marini per la configurazione di progetto $C2$. Si riporta quindi prima il grafico del valore del tempo di residenza in ore e successivamente la differenza tra il tempo di residenza ottenuto nella configurazione progettuale $C2$ e lo stato attuale (figure 17-18 libeccio T_R=5 anni; figure 19-20 libeccio T_R=25 anni; figure 21-22 scirocco T_R=5 anni; figure 23-24 scirocco T_R=25 anni; figure 25-26 bonaccia).

Valori positivi indicano un aumento del tempo di residenza e quindi del tempo necessario per il ricambio dell'acqua all'interno della Baia. È possibile notare come il restringimento dell'imboccaura della Baia porti a valori del tempo di residenza maggiori rispetto alla configurazione dello stato attuale. Tale risultato non è inaspettato in quanto riducendo la sezione utile per il flusso interno-esterno della Baia aumenta di conseguenza il tempo necessario per poter realizzare il ricambio completo dell'acqua presente all'interno della Baia stessa.

Dai risultati ottenuti è possibile osservare come il tempo di residenza vari significativamente a seconda dei casi analizzati. In condizioni di bonaccia il tempo di residenza massimo per le zone più interne della baia supera anche i 20 giorni. Nei casi di libeccio e scirocco, il tempo di residenza varia tra le 100 e le 90 ore massime a seconda del caso analizzato e il picco non viene più raggiunto nella zona più interna della baia in prossimità della linea di riva come avveniva nel caso di bonaccia, ma si ritrova localizzato subito a tergo delle strutture di protezione in massi in quanto l'interazione del moto ondoso e delle correnti litoranee provoca la formazione di una coppia di vortici in corrispondenza delle estremità dei pennelli che tendono a intrappolare eventuali contaminanti. Nel resto della baia invece la dinamica risulta maggiormente attiva rispetto al caso di bonaccia, presentando i valori minori del tempo di residenza nel caso degli eventi provenienti da scirocco, come riassunto in tabella 1, ove sono riportati i tempi di residenza per i diversi scenari. Tali valori sono da considerarsi indicativi della condizione più sfavorevole in quanto è stato preso come riferimento il valore maggiore derivato dai risultati delle simulazioni.

Scenario	Tempo residenza t_{res} [h] $C2$	Δt [h] $C2$ - SA
Libeccio - 5 anni	100	+30
Libeccio - 25 anni	80	+10
Scirocco - 5 anni	90	+50
Scirocco - 25 anni	60	+30
Bonaccia	600	+100

Tabella 1: Tempo di residenza per i vari scenari presi in esame e differenze con lo stato attuale.

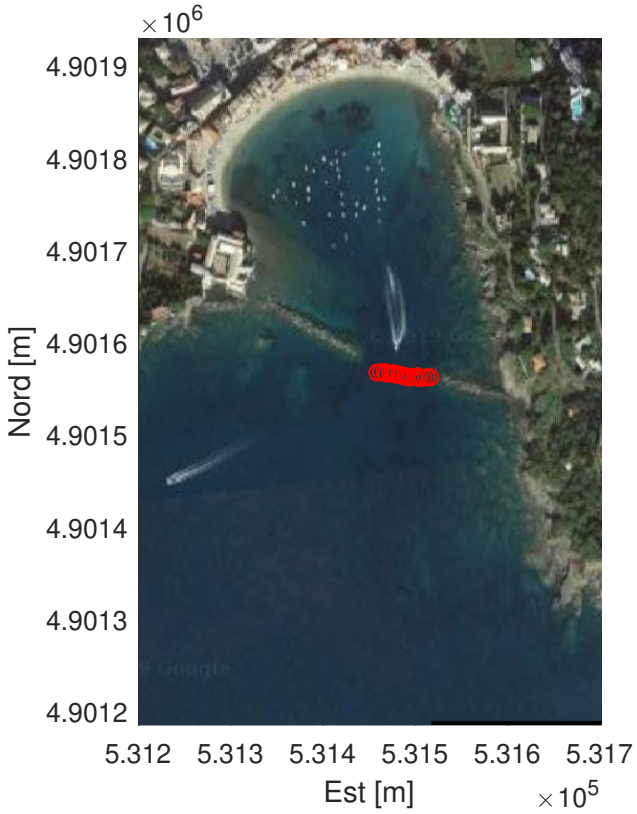


Figura 16: Localizzazione della sezione di controllo per la valutazione dei flussi in corrispondenza dell'imboccatura della baia.

Tali risultati sono confermati anche dalle analisi dei valori delle velocità che si vengono a realizzare in corrispondenza dell'imboccatura della Baia durante gli scenari meteo-marini analizzati. Nella figura 16 viene riportata la localizzazione della sezione di controllo su cui sono state realizzate le medie delle velocità sia lungo la verticale che lungo la sezione stessa. In particolare, il calcolo è stato condotto applicando la formula:

$$\overline{U} = \frac{1}{L}\int_0^L u\ dx \qquad \overline{V} = \frac{1}{L}\int_0^L v\ dx \tag{9}$$

dove L è la lunghezza totale della sezione di controllo e u e v sono le velocità in direzione est e nord, rispettivamente, mediate sulla verticale.

Il valore così ottenuto è stato riportato in funzione del tempo della simulazione nella configurazione di progetto $C2$ e nella configurazione dello Stato Attuale (figure 27-28 per i casi di libeccio; figure 29-30 per i casi di scirocco; figura 31 per il caso di bonaccia). I risultati mostrano chiaramente come nella configurazione di progetto $C2$ vi sia una riduzione generalizzata delle componenti della corrente specialmente nei casi di mareggiate provenienti da libeccio, mentre nei casi da scirocco tale differenza risulta meno marcata. I grafici riportati mostrano un andamento a gradino in quanto le condizioni di moto ondoso sono state aggiornate su base oraria, generando quindi medie sulla sezione anch'esse variabili su base oraria. Si noti come nel caso di libeccio il decremento della velocità media $\overline{U}$ dallo stato attuale alla soluzione $C2$ sia dovuto allallungamento della scogliera di ponente che ripara la zona della bocca prima esposta alla corrente generate dal moto ondoso.

Il caso di scirocco mostra volori di velocità $\overline{U}$ opposti a quelli di libeccio in quanto la corrente indotta dal moto ondoso ha direzione opposta alla precedente. In questo caso, la scogliera di levante, che non viene alterata dallintervento $C2$, non pu influire sul valore

di velocità mediato sulla sezione. Pertanto, in codizioni di scirocco lintervento $C2$ non ha particolari effetti per quanto riguarda le velocità nellintorno della bocca.

Si noti come in figura 29 (condizioni di scirocco con T_R=5 anni), la condizione $C2$ possa addirittura incrementare il modulo della velocità. Sebbene questa permanga ad un valore inferiore rispetto a quello che si ottiene per il tempo di ritorno di 25 anni, l'allungamento della scogliera di ponente, in condizione di scirocco, si comporta non come un deviatore verso il mare aperto rispetto alla corrente lungocosta (effetto che si verifica nel caso di libeccio), ma, bensì, come un ostacolo che provoca una variazione di direzione ma non funzionale alla limitazione delle velocità nella bocca. Questo effetto risulta essere presente, ma più contenuto, nel caso del tempo di ritorno di 25 anni (figura 30) ove tali differenze risultano essere meno evidenti. In generale, comunque, le velocità risultano essere sempre inferiori ai 6 centimetri al secondo, non destando particolare preoccupazione per quanto riguarda le problematiche di stabilità delle scogliere.

Come già evidenziato nella prima analisi delle dinamiche di dispersione della Baia nello Stato Attuale, riportate nel precedente elaborato, rimane l'indicazione di preservare un varco il più possibile pervio in corrispondenza della radice del molo di ponente al fine di incentivare lo scambio tra interno ed esterno delle Baia non solo attraverso l'imboccatura al fine di mitigare eventuali periodi persistenti di condizioni di bonaccia e ristagno delle acque.

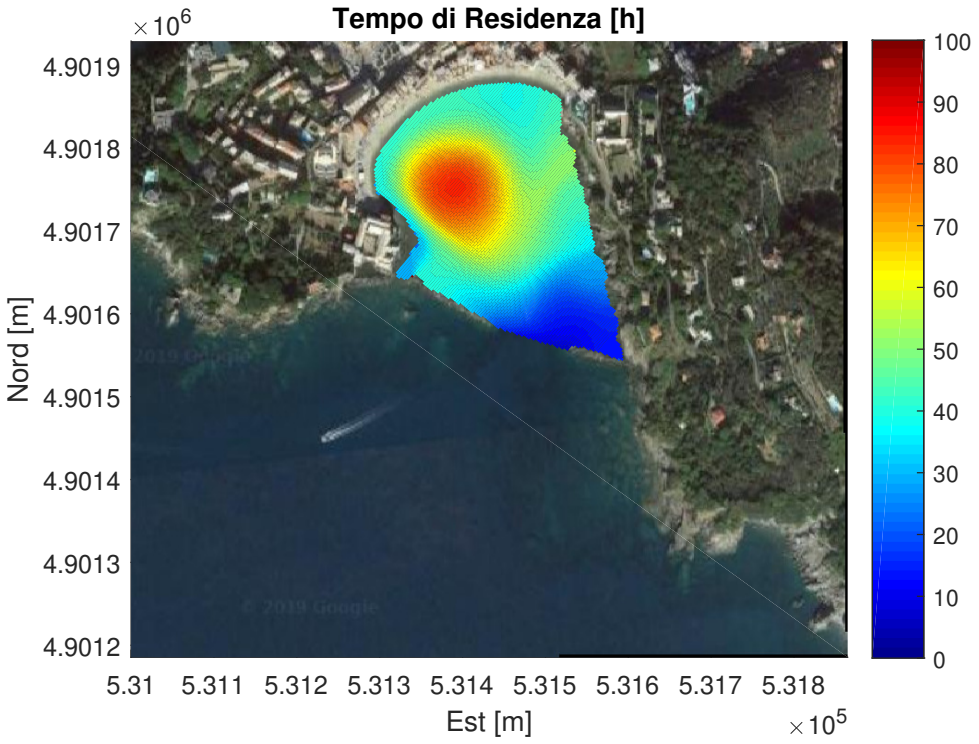


Figura 17: Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 5 anni.

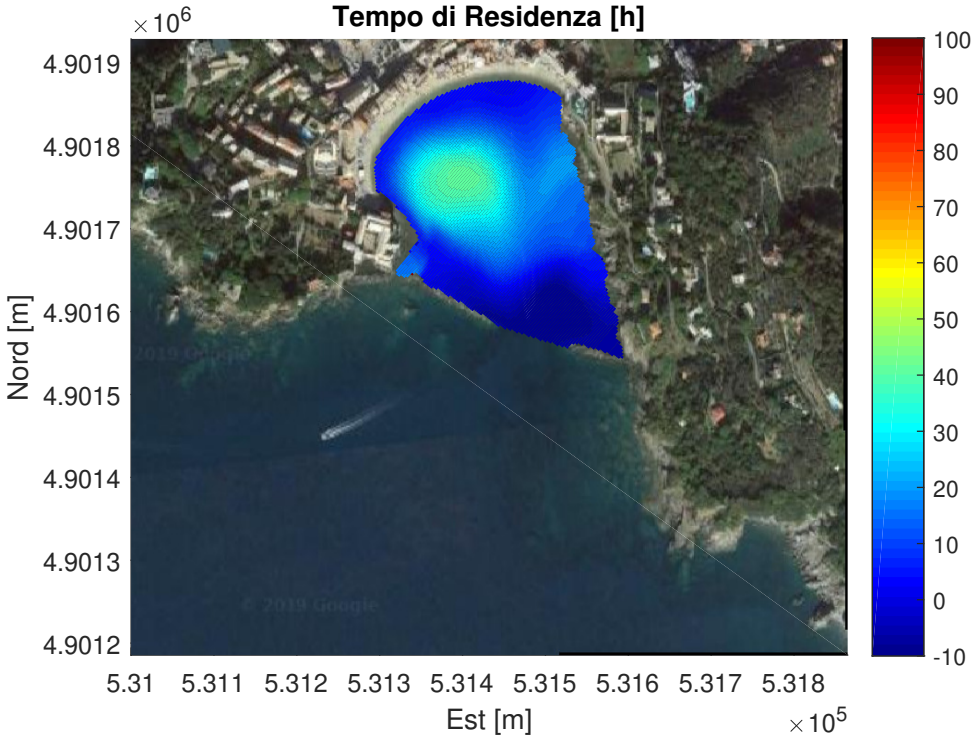


Figura 18: Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 5 anni.

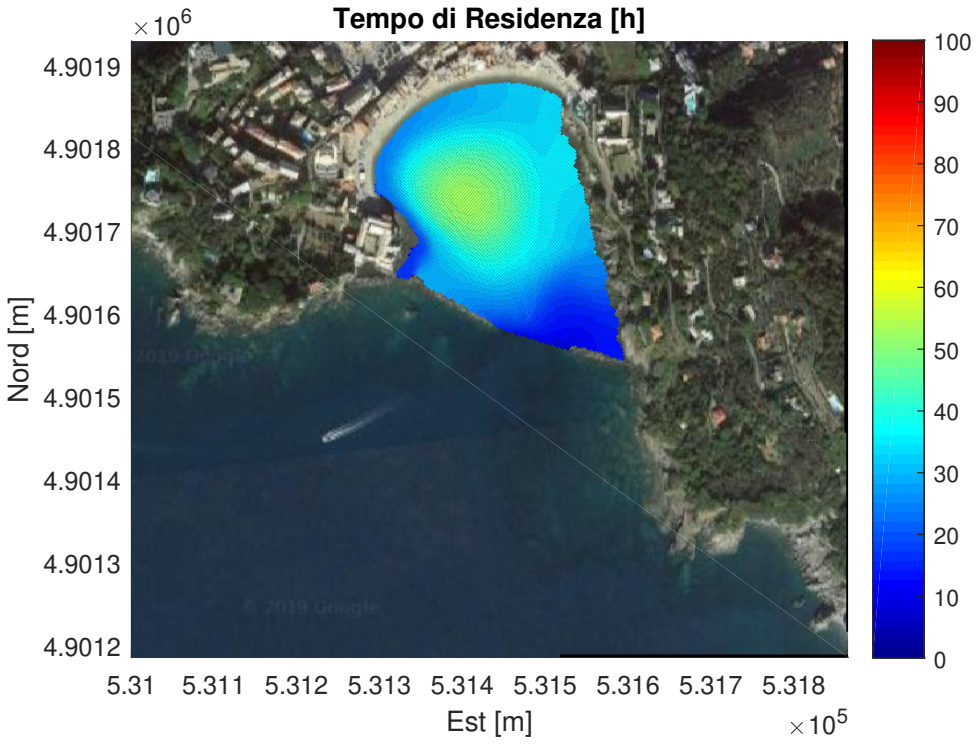


Figura 19: Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 25 anni.

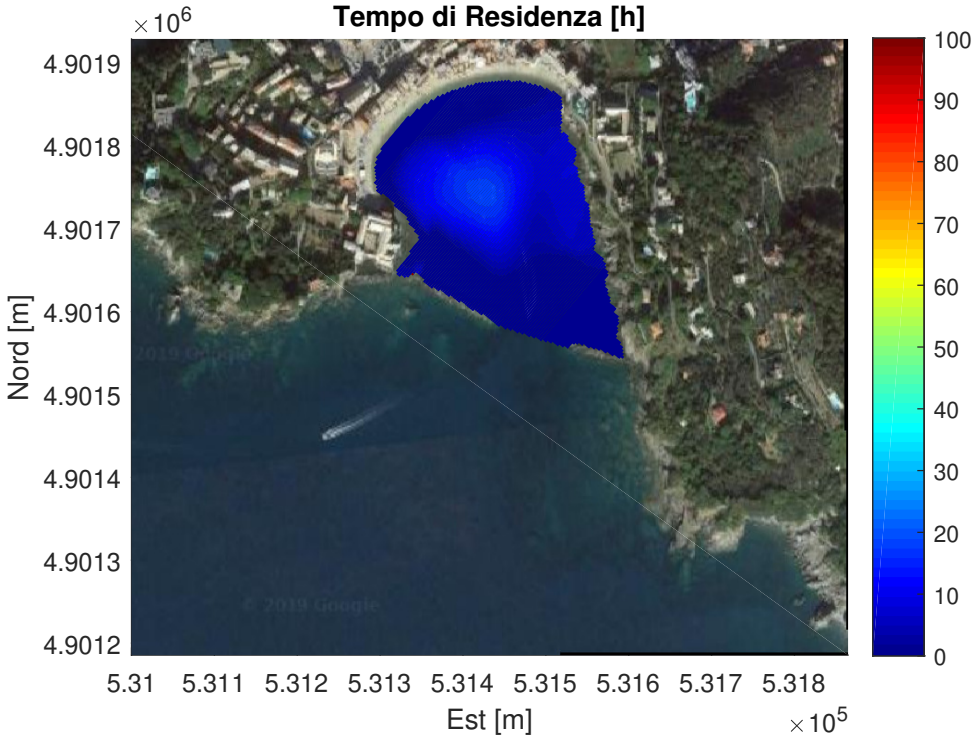


Figura 20: Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di libeccio con un tempo di ritorno di 25 anni.

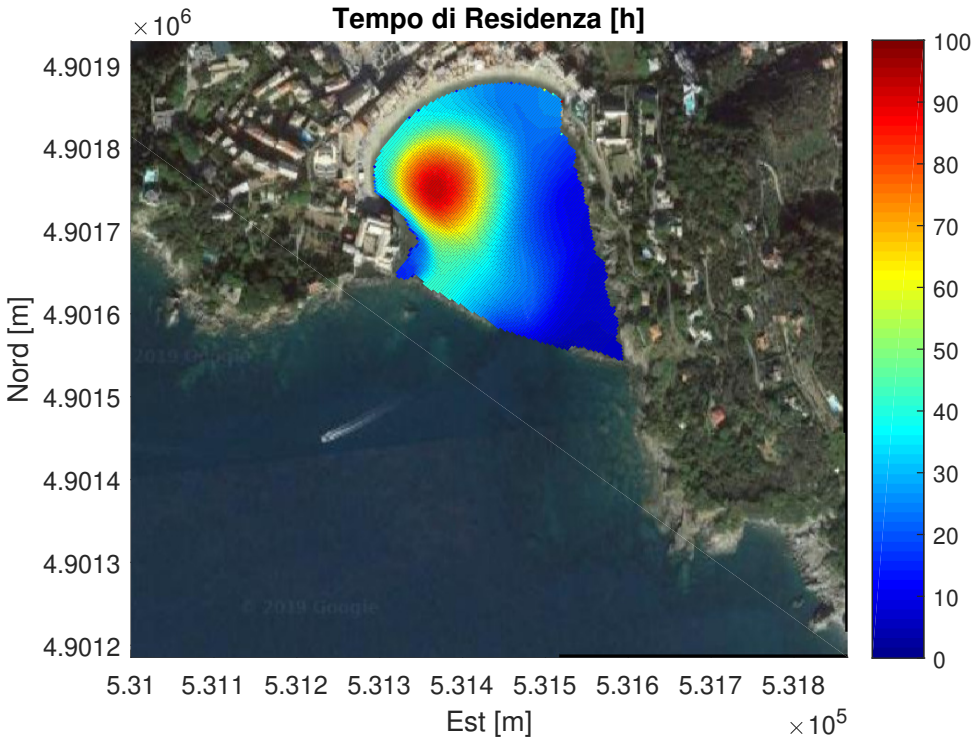


Figura 21: Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 5 anni.

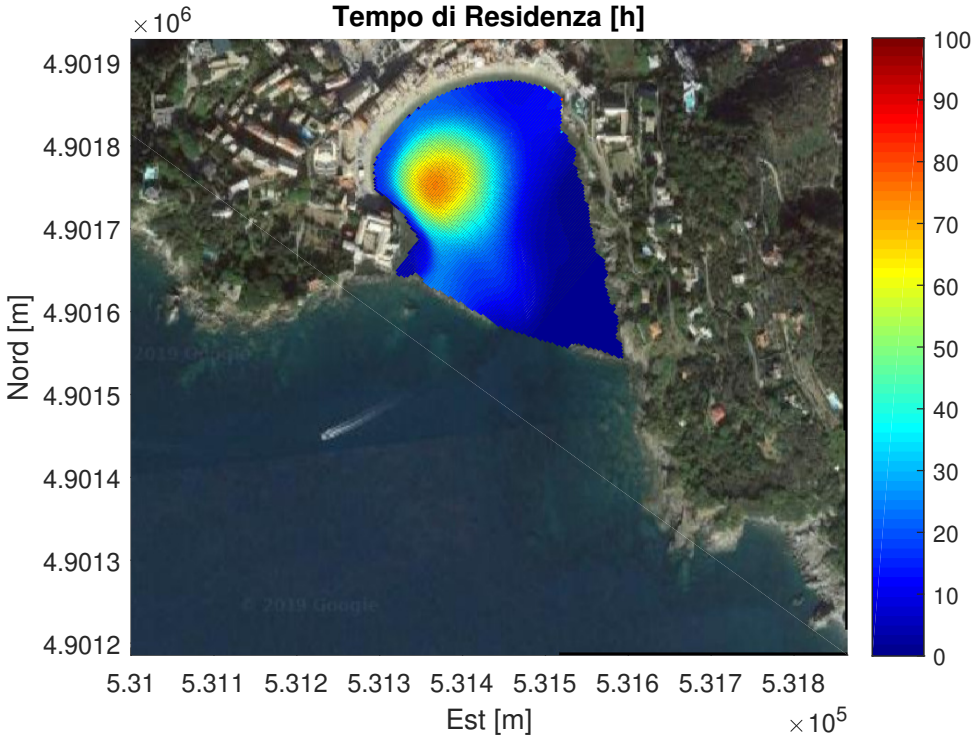


Figura 22: Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 5 anni.

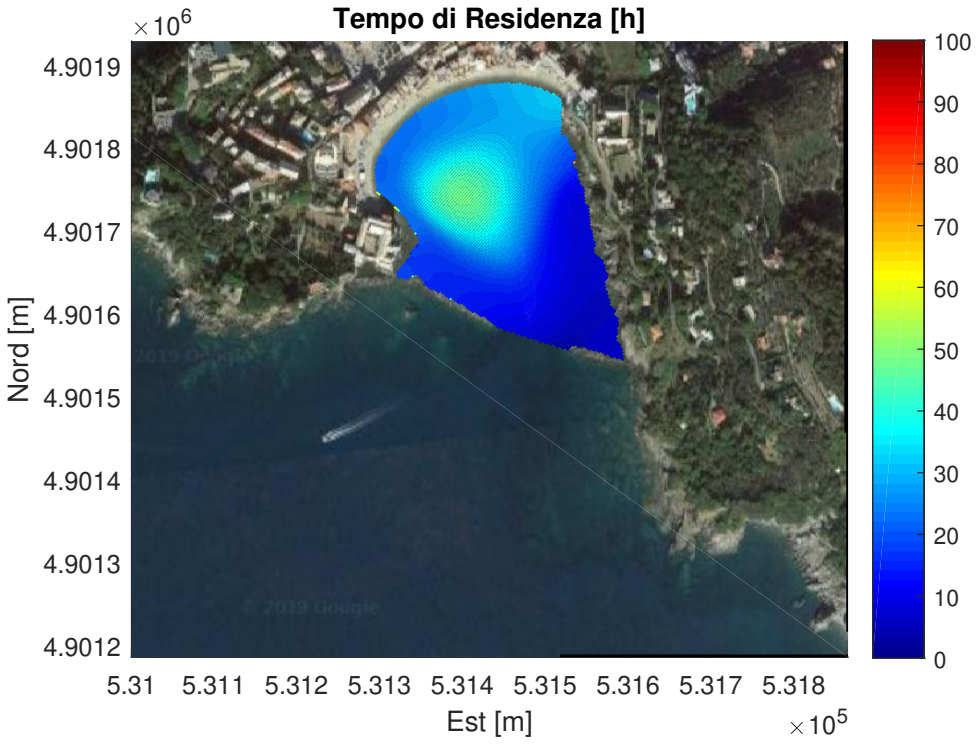


Figura 23: Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 25 anni.

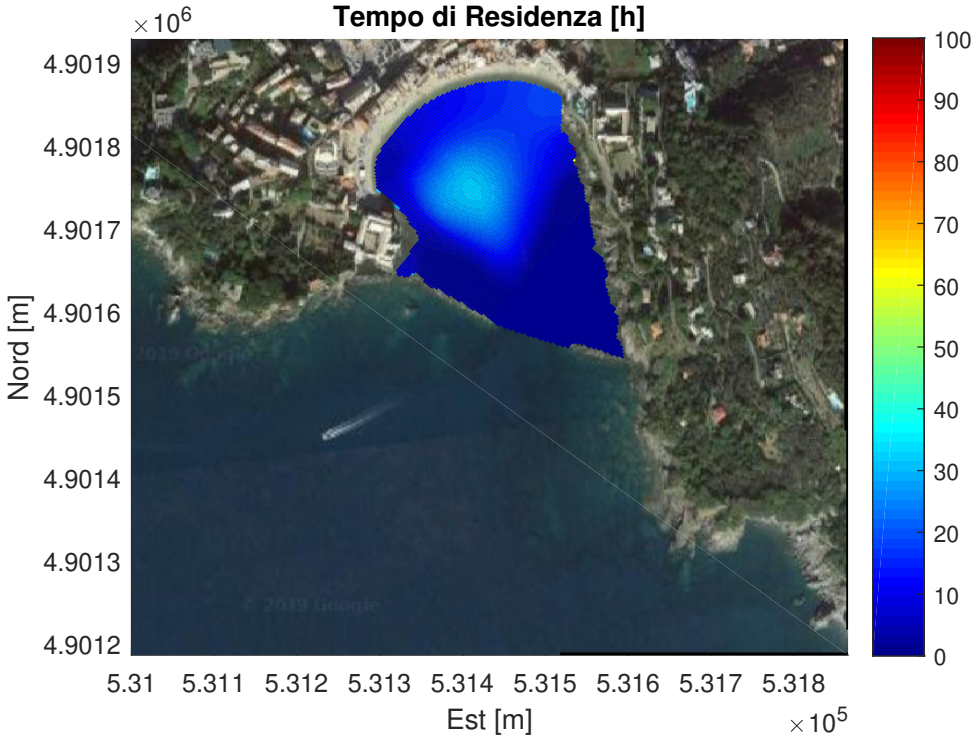


Figura 24: Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di scirocco con un tempo di ritorno di 25 anni.

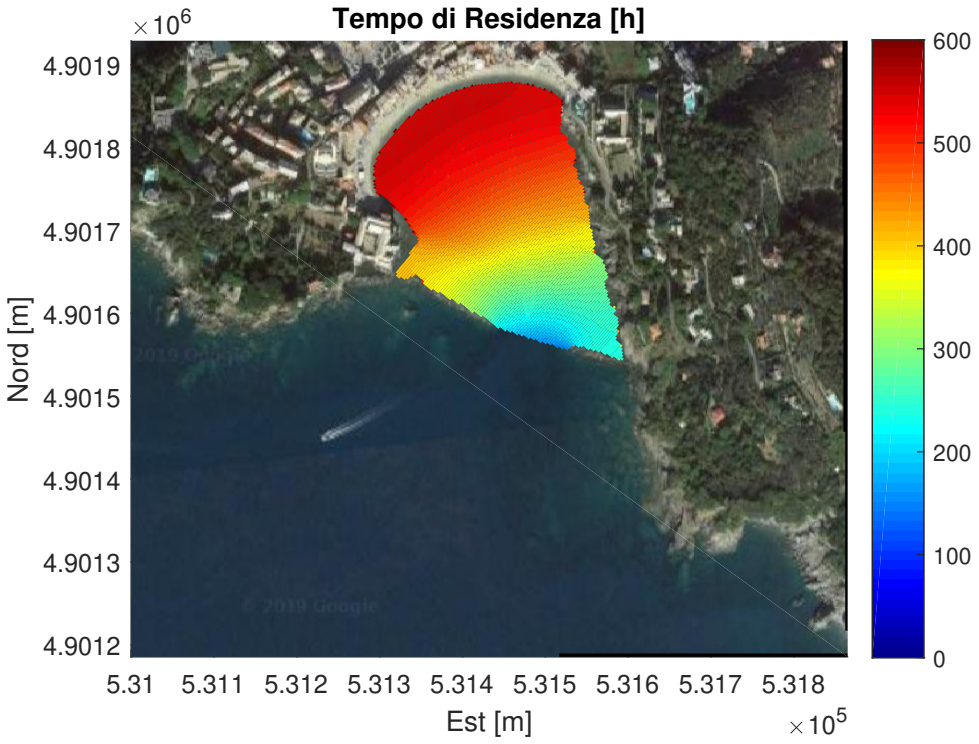


Figura 25: Tempo di residenza (residence time) nelle condizioni di bonaccia.

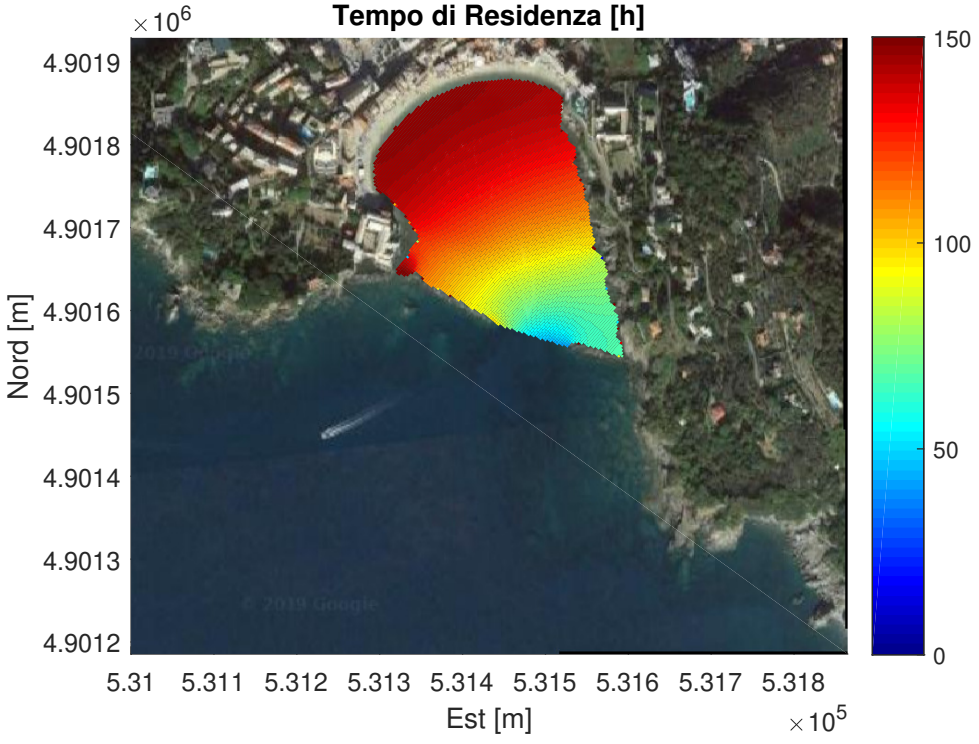


Figura 26: Differenza del tempo di residenza (residence time) tra la configurazione C2 e lo Stato Attuale nelle condizioni di bonaccia.

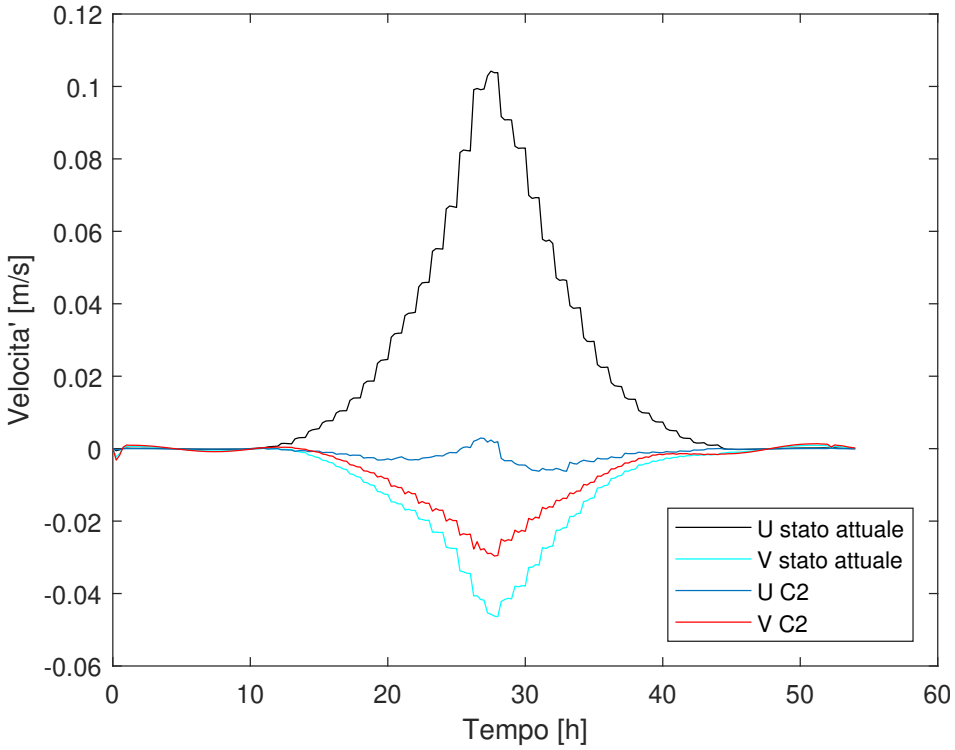


Figura 27: Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di libeccio e T_R=5 anni.

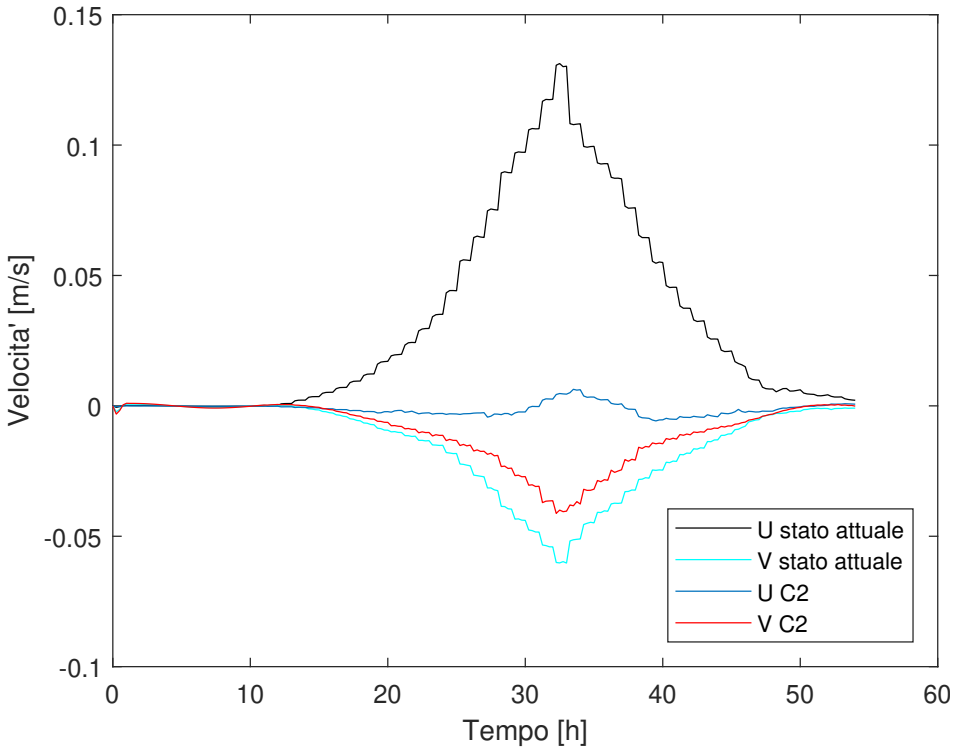


Figura 28: Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di libeccio e T_R=25 anni.

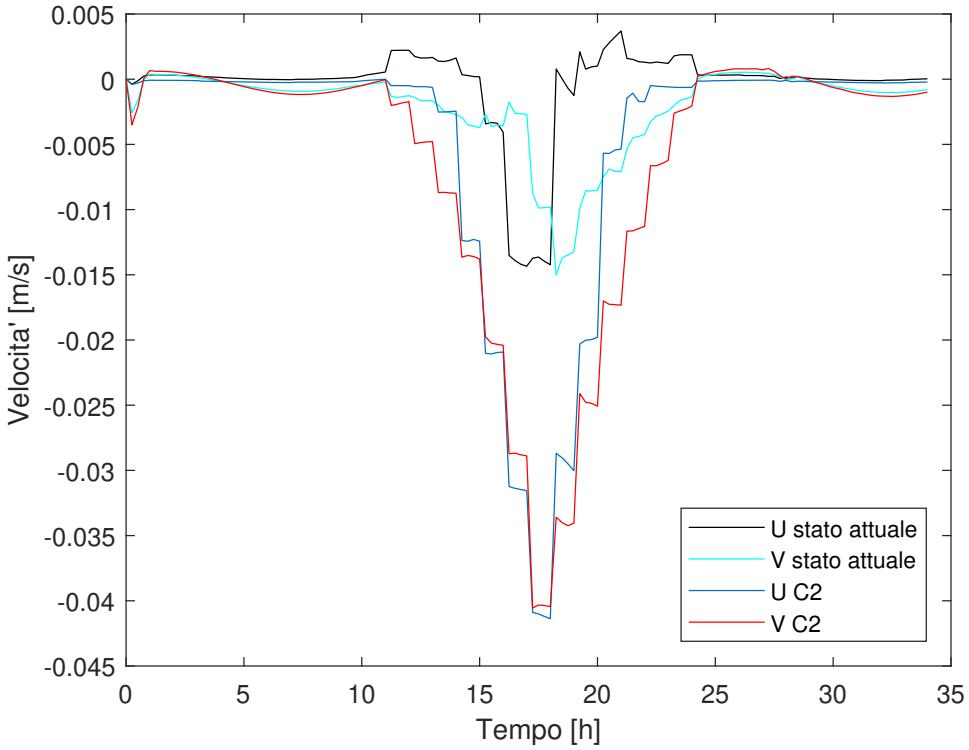


Figura 29: Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di scirocco e T_R=5 anni.

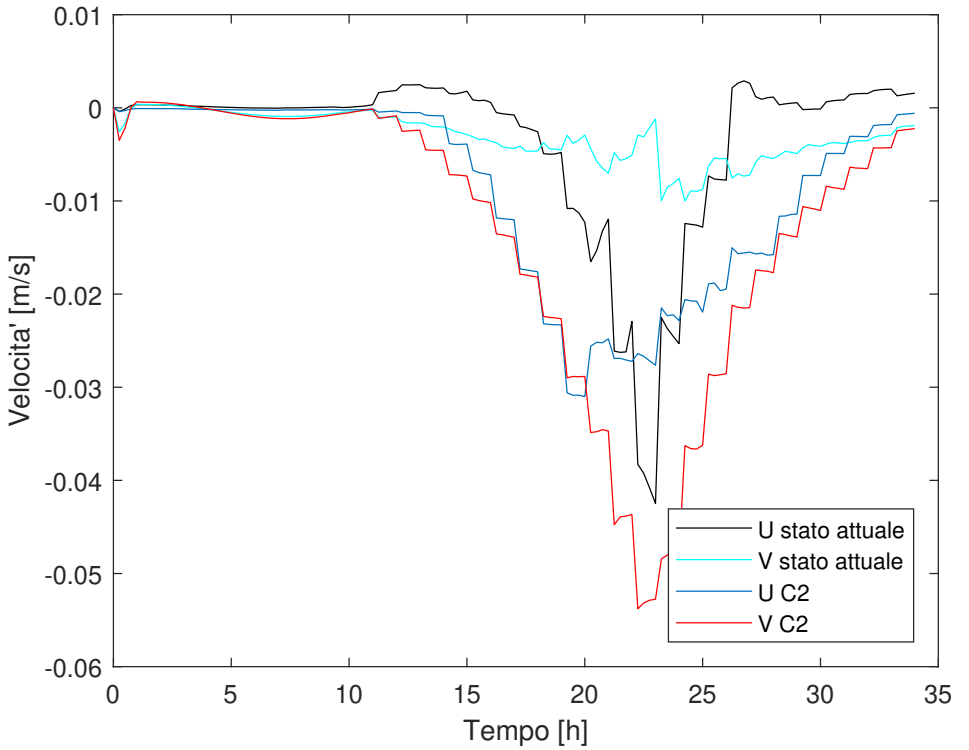


Figura 30: Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di scirocco e T_R=25 anni.

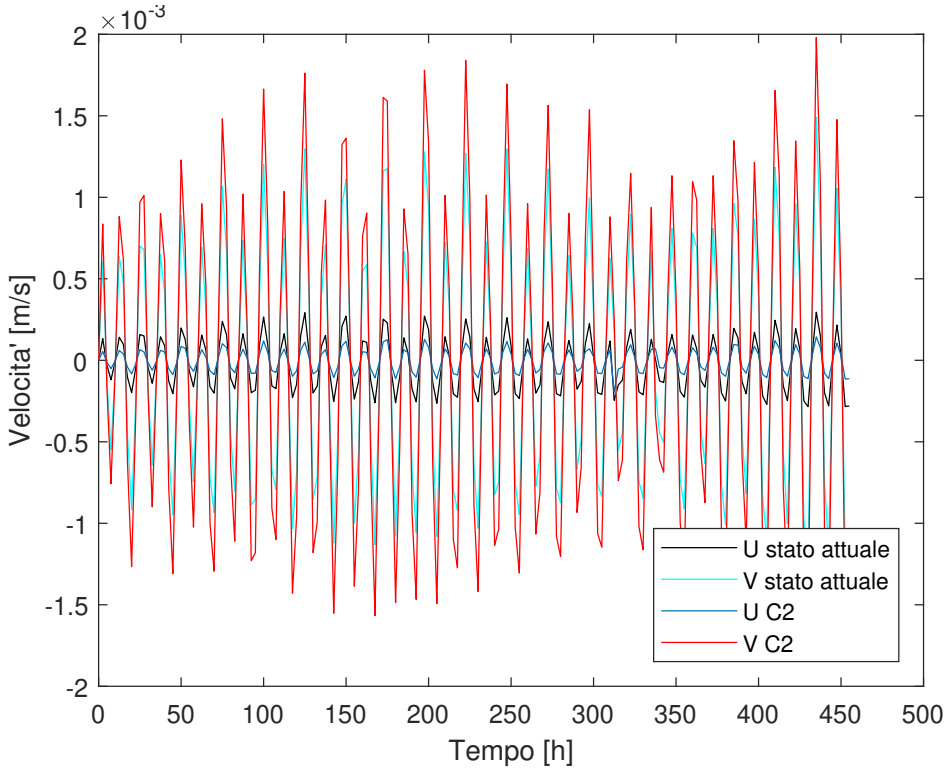


Figura 31: Media delle velocità longitudinali U e latitudinali V, realizzata lungo la verticale e la direzione trasversale (cfr. figura 16) per le condizioni di bonaccia.

3 Conclusioni

La presente relazione ha lo scopo di valutare l'efficacia di alcune soluzioni progettuali nei confronti della protezione della fascia costiera prospiciente la Baia del Silenzio. L'analisi delle soluzioni progettuali mostra come le proposte C e $C2$ risultino quelle maggiormente funzionali nei confronti dell'abbattimento della penetrazione del moto ondoso all'interno della Baia del Silenzio. La diminuzione dell'altezza dell'inviluppo massimo nell'area della Baia e del run-up sulla spiaggia mostrano come sia la soluzione C che la soluzione $C2$ apportino dei sostanziali benefici dal punto di vista dell'agitazione ondosa. La soluzione $C2$, sebbene più contenuta sia in termini di allungamento della scogliera di ponente che di benefici in termini di altezza d'onda massima nella Baia, risulta raggiungere un buon compromesso tra le diverse istanze. In particolare, il restringimento della bocca determina un aumento del tempo di residenza della Baia e quindi una diminuzione dello scambio col mare aperto. Tale aumento del tempo di residenza è testimoniato in special modo dalla variazione delle velocità medie lungo la bocca. Esse decrescono rispetto allo stato attuale e si differenziano tra mareggiate di libeccio e di scirocco. La soluzione progettuale $C2$ risulta comportarsi da deviatore della corrente lungocosta andando a proteggere limboccatura della Baia in caso di libecciate. Le mareggiate di scirocco generano una corrente di direzione opposta, rendendo il prolungamento della scogliera di ponente un ostacolo per detta corrente e i benefici in termini di velocità media all'imboccatura marginali. Tuttavia, tali velocità rimangono sempre inferiori ai sei centimetri al secondo, non destando particolari preoccupazioni per la stabilità delle opere in progetto.

In generale, si ritengono entrambe le soluzioni progettuali C e $C2$ benefiche nei confronti della protezione della costa dal moto ondoso e, in particolare, la soluzione $C2$ un buon compromesso tra riduzione dell'impatto delle mareggiate sulla costa. L'aumento dei tempi di residenza ll'interno della Baia comporterà una dinamica più lenta rispetto alla configurazione dello stato attuale. Il caso peggiore, ovvero quello di bonaccia, dovrebbe presentare compor-

tamento comunque analogo allo stato attuale, in quanto sia nella configurazione che in quella di progetto $C2$ i tempi di residenza sono maggiori rispetto a una eventuale permanenza di una condizione di bonaccia prolungata, ovvero non vi è fisicamente il tempo di sviluppare l'effettivo tempo di residenza completo per la condizione di bonaccia (ci si aspetta infatti che le condizioni di calma siano comunque interrotte su tempistiche più contenute rispetto ai 20 e più giorni previsti). In condizioni di forzante ondoso, invece, i tempi di residenza aumentano meno significativamente e comunque all'interno della baia viene a crearsi una circolazione che comunque innesca il ricambio delle acque.

Riferimenti bibliografici

Booij, N., Ris, R., and Holthuijsen, L. (2003). A third-generation wave model for coastal regions. *J. Geophys. Res.*, 104:7649–7666.

Cassola, F., Ferrari, F., and Mazzino, A. (2015). Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: analysis of the sensitivity to resolution and microphysics parameterization schemes. *Atmospheric Research*, 164-165:210–225.

Cassola, F., Ferrari, F., Mazzino, A., and Miglietta, M. (2016). The role of the sea on the flash floods events over liguria (northwestern italy). *Geophysical Research Letters*, 43(7):3534–3542.

Elias, E. P. L., Walstra, D. J. R., Roelvink, J. A., Stive, M. J. F., and Klein, M. D. (2000). *Hydrodynamic Validation of Delft3D with Field Measurements at Egmond*, pages 2714–2727. .

Haver, S. and Winterstein, S. R. (2009). Environmental contour lines: A method for estimating long term extremes by a short term analysis. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 116:116–127.

Lang, M., Ouarda, T., and Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of hydrology*, 225(3-4):103–117.

MacQueen, J. et al. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, volume 1, pages 281–297. Oakland, CA, USA.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., and Mazzino, A. (2013a). Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea. *Journal of Coastal Research*, SI 65:1551–1556.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., and Mazzino, A. (2013b). Why NRMSE is not completely reliable for forecast/hindcast model test performances. In *Proc of: EGU General Assembly*, Wien, Austria.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., and Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of WavewatchIII in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, 90:82–94.

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W., and Powers, J. (2008). A description of the advanced research wrf version 3. Technical note tn-468+str. 113 pp, NCAR.

Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. Technical report, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Tolman, H. L., Banner, M. L., and Kaihatu, J. M. (2013). The NOPP operational wave model improvement project. *Ocean Modelling*, 70:2–10.