Geoscape Società Cooperativa
SpinOff dell'Università di Genova
Sede legale Via Varese 2 – CAP 16122 (Ge)
Sede operativa Corso Europa 26 – CAP 16132 (Ge)
Pec: geoscape@pec.geoscape.it
Mail: info@geoscape.it
P.IVA: 02594600997

10/01/2022

Servizio specialistico propedeudico alla progettazione di opere di miglioramento e resilienza del lungomare del Prino e Piazzale Lamboglia CUP: D57H21001220001 CIG: ZF933FF3D3

Relazione modellistica

Geoscape

Sommario

1. Premessa 1
2. Generalità sulla modellistica costiera applicata 1
3. Modo ondoso 2
3.1. Dati meteomarini di riferimento 3
3.2. Analisi ai valori estremi 3
3.3. Risultati 6
4. Risultati modello 2DH 7
4.1. Libeccio con tempo di ritorno decennale – stato dell'arte 7
4.2. Scirocco con tempo di ritorno decennale – stato dell'arte 13
4.3. Libeccio con tempo di ritorno decennale – progetto 19
4.4. Scirocco con tempo di ritorno decennale – progetto 25
4.5. Libeccio con tempo di ritorno decennale – variante progetto con accorciamento pennello B 30
4.6. Scirocco con tempo di ritorno decennale – variante progetto con accorciamento pennello B 36
4.7 Inondazione pre e post.opera 41
4.8 Variazione della linea di riva post opera 43
5. Bibliografia citata 46

1. Premessa

Il Comune di Imperia ha dato incarico a Geoscape s.c.a.r.l. di fornire il servizio specialistico propedeutico alla progettazione definitiva degli interventi di "**RESILIENZA ED OPERE DI MIGLIORAMENTO E RESILIENZA LUNGOMARE DEL PRINO E PIAZZALE LAMBOGLIA – AFFIDAMENTO INCARICO PER STUDIO AMBIENTALE – CUP: D57H21001220001 CIG: ZF933FF3D3"**
Il presente documento presenta i risultati dello studio modellistico nel tratto di litorale investigato. Lo scopo dell'indagine è quello di definire i principali aspetti idrodinamici dell'area, con particolare riferimento al progetto di mitigazione del rischio idraulico.
A tale scopo il lavoro è stato suddiviso in due fasi distinte ma complementari tra loro: la prima indirizzata alla caratterizzazione dell'assetto costiero attuale mediante modello 2DH (XBEACH), allo scopo di analizzare gli aspetti idrodinamici del litorale, la seconda volta a comprovare l'efficacia dell'intervento previsto da progetto utilizzando lo stesso modello matematico.

2. Generalità sulla modellistica costiera applicata

La modellistica costiera rappresenta uno strumento innovativo nel campo del coastal management, e di notevole supporto per gli interventi di ingegneria costiera. In questo studio è stato utilizzato il modello XBeach (eXtreme Beach), un modello numerico 1D/2DH open-source per la simulazione dell'idro-morfodinamica costiera, distribuito da Deltares (www.deltares.nl), ed ampiamente apprezzato dalla comunità tecno-scientifica internazionale (Roelvink et al., 2009; Bolle et al., 2011). Inoltre, la scelta è stata corroborata anche dal fatto che sono note diverse applicazioni lungo tratti di costa ligure, alcune delle quali anche riportate in letteratura scientifica internazionale (Mucerino et al. 2019; Carpi et al. 2020; Mucerino et al. 2021; Carpi et al. 2021). Dal punto di vista tecnico, il modello risolve coppie di equazioni sul piano orizzontale, relative a propagazione delle onde, correnti, trasporto sedimentario, variazioni del fondale, variazioni spettrali delle onde e correnti al contorno (Roelvink et al., 2015). Per quanto riguarda la simulazione dei processi idrodinamici, XBeach possiede tre differenti opzioni: i) Stationary wave model: utile, ad esempio, per simulare i processi morfodinamici in condizioni di relativa bassa energia; ii) Surfbeat mode: indicato quando l'attenzione è portata sui fenomeni idro-morfodinamici nearshore (es. correnti costiere, zona di swash); iii) Non-hydrostatic mode (1D)(McCall et al., 2014): particolarmente indicato nel caso di spiagge caratterizzate da un'accentuata acclività, come ad esempio le spiagge ghiaiose. Questa breve introduzione al modello è da intendersi solo come una rapida introduzione allo strumento impiegato, per ulteriori informazioni tecniche e/o approfondimenti, si rimanda alla consultazione del manuale tecnico stilato da Roelvink et al. (2019).

Per quanto concerne l'implementazione di XBeach 2DH lungo la porzione di litorale investigato, è stata creata una griglia di calcolo di dimensione 1km x 3 km, con una maglia a risoluzione variabile di 5 x 10 m. L'ampiezza del dominio di computazionale permette di simulare lo sviluppo del moto ondoso tenendo debitamente in considerazione le dinamiche al contorno, consentendo quindi di simulare il più fedelmente possibile la propagazione del moto ondoso e, in conseguenza, l'idrodinamismo costiero.

3. Modo ondoso

In questo paragrafo vengono riportati i risultati dello studio finalizzato alla caratterizzazione del clima meteomarino mediante le analisi ai valori estremi (EVA) condotte in prossimità del tratto di costa in esame a partire da un punto di hindcast situato al largo del tratto di litorale stesso. L'obiettivo è stato quello di calcolare le caratteristiche di onda (altezza significativa e periodo di picco) associate a specifici periodi di ritorno per determinati settori direzionali.

3.1. Dati meteomarini di riferimento

I dati meteo-marini utilizzati provengono dal servizio hindcast del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università degli Studi di Genova (DICCA, www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html). L'hindcast fornisce i principali parametri ondametrici sulla base di intervalli orari nell'arco temporale 1979-2019. Tali dati, definiti per tutto il Mar Mediterraneo con una risoluzione pari a circa 10 Km sia in longitudine che in latitudine, hanno già conosciuto ampia validazione (Mentaschi et al., 2013, 2015) e questo rende possibile il loro impiego all'interno delle analisi presentate. Per il presente studio, è stato utilizzato il punto 000390 (Longitudine: 8.1067, Latitudine: 43.8600). Nell'ambito della corrente indagine si sono utilizzati i parametri d'onda riportati in Tabella 1.

Variabile	**Simbolo**	**Unità di misura**
Altezza signicativa	Hs	[m]
Periodo medio	Tm	[s]
Periodo di picco	Tp	[s]
direzione media di provenienza	θm	[°] latitudine
direzione di provenienza al picco	θp	[°] latitudine

Tabella 1. parametri d'onda utilizzati

3.2. Analisi ai valori estremi

L'analisi degli eventi estremi (EVA) trova il suo fondamento nella prima metà del secolo scorso, ma solo alla fine degli anni '50, con la pubblicazione del testo di Gumbel "*Statistics of Extremes*" (1958), la teoria degli eventi estremi conosce le sue prime applicazioni pratiche in campo ingegneristico.

Dei due approcci storicamente applicati allo studio dei fenomeni estremi, *block maxima* (BM) e *peak over thresholds* (POT), all'interno del presente lavoro si è preferito adottare il secondo che prevede la modellizzazione di tutti i valori (eccedenze) che superano una soglia prestabilita (*threshold*); benché l'approccio POT conosca oggi un largo impiego e permetta la generazione di un numero di dati maggiormente consistente, esso introduce un fonte di incertezza determinata dall'altezza della soglia da utilizzare.

Il fine di questa tipologia di analisi è quello di stimare, a partire da una serie storica di dati, le grandezze associate a determinati tempi di ritorno di un fenomeno (definendo quest'ultimo come l'intervallo temporale medio intercorrente tra il verificarsi di due eventi successivi di uguale o superiore entità rispetto a ad un dato valore) attraverso un processo di estrapolazione statistica.

La serie di valori oltre la soglia viene modellata tramite un'apposita distribuzione di probabilità che permette, una volta calcolati i parametri della distribuzione stessa, di risalire alle altezze d'onda riferite a definiti periodi di ritorno di interesse.

$$(1)\ F_x = 1 - \frac{1}{\lambda Tr}$$

All'interno dell'equazione 1 il parametro λ rappresenta il numero medio eventi annui e *Tr* il tempo di ritorno considerato. A partire dal quantile di interesse F_x, è possibile pertanto risalire in maniera univoca all'altezza d'onda desiderata.

Nel presente lavoro la selezione dei fenomeni ondosi impiegati nelle EVA è stata realizzata scansionando la serie iniziale dei dati attraverso una finestra temporale dell'ampiezza di 24h: qualora il massimo valore di Hs ricada al centro della finestra giornaliera tale valore viene assunto come picco della mareggiata (De Leo et al., 2020). I picchi ondosi ottenuti dal precedente processo sono stati ripartiti per settori direzionali utilizzando la direzione media di provenienza θm.

Per il processo di ripartizione si è deciso di utilizzare la tecnica del K-means clustering. L'algoritmo K-means (MacQueen, 1967) costituisce uno dei più semplici algoritmi di apprendimento non supervisionato utilizzati nella risoluzione dei problemi di classificazione. Il procedimento prevede il raggruppamento di un'insieme di dati in un numero finito di gruppi (o clusters), definiti a priori. Il principio di base è quello di definire un numero k di centroidi o punti medi, dimensionalmente analoghi ai dati originali.

L'insieme degli eventi estremi da considerarsi per le successive analisi, e ripartito all'interno dei rispettivi cluster definiti nel punto precedente, è stato selezionato imponendo come valore si soglia il 95° percentile della distribuzione iniziale. La teoria delle EVA (Balkema e de Hann, 1974; Picklands, 1975) dimostra che le eccedenze possono essere approssimate mediante una distribuzione di probabilità del tipo *Generalized Pareto Distribution,* il cui impiego incontra peraltro ampio sostegno all'interno della letteratura scientifica (Coles et al., 2001).

$$(2)\ \text{Distribuzione GPD}: F(x)(x;\mu;\sigma;\xi) = \begin{cases} 1 - \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma_\mu}\right)^{1/\xi} & \text{for } \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-(x-\mu)/\sigma_\mu} & \text{for } \xi = 0 \end{cases}$$

Nell'equazione (2) la variabile *x* rappresenta eccedenze di soglia per il settore considerato, mentre, ξ costituisce il cosiddetto parametro di forma del modello: per ξ < 0 la distribuzione è limitata superiormente, mentre per ξ > 0 e ξ =0 (ξ→0) la distribuzione non ha limite superiore finito. Il pedice che accompagna il parametro di scala σ nella formula ne sottolinea la dipendenza dalla soglia prescelta. I parametri ξ e σ, sono i parametri della distribuzione da stimare in funzione della serie di dati a disposizione.

Affinché i modelli elaborati risultino validi è necessario che siano soddisfatte precise ipotesi statistiche: i dati utilizzati nella loro formulazione devono osservare una distribuzione poissoniana, ovvero una distribuzione di probabilità discreta che descrive una frequenza di accadimento causale nel tempo. A tal proposito si è optato per l'utilizzo di un test della bontà di adattamento del chi-quadrato (Snedecor and Cochran, 1989) al fine di determinare se il campione osservato derivi da una distribuzione di Poisson.

I dati considerati non devono inoltre essere autocorrelati, ovvero l'intensità con cui questi si presentano deve mostrare una distribuzione casuale all'interno della serie stessa. L'ipotesi di non autocorrelazione è stata verificata attraverso il test di Mann–Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) basato sulla correlazione fra ranghi e sequenze di una serie temporale.

$$(3)\ S=\sum_{i=1}^{(n-1)}\sum_{j+1}^{(n)} sgn(X_j-X_i)$$

Data una serie univariata di dati $\{X_i,\ i = 1, 2\ldots, n\}$ siano X_i e X_j i valori assunti dalla serie i, j e n la lunghezza della serie temporale e

$$sgn(\theta)=\begin{cases} 1 \text{ if } \theta>0 \\ 0 \text{ if } \theta>0 \\ -1 \text{ if } \theta<0 \end{cases}$$

Il valore S (3) approssima una distribuzione gaussiana per $n \geq 8$, con varianza e media note (4)

$$(4)\ \sigma^2=\frac{n(n-1)(2n+5)-\sum_{i=1}^{m} T_i i(i-1)(2i+5)}{18}$$

Dove T_i è il numero dei valori uguali tra loro nella serie storica e m rappresenta i gruppi di valori uguali presenti nella serie storica.

$$(4)\begin{cases} E(\tau)=\dfrac{-2}{3(N-1)} \\ var(\tau)=\dfrac{20N^3-74N^2+54N+148}{45(N-1)^2(N-2)^2} \end{cases}$$

Pertanto, la statistica test standardizzata Z (5) è stata confrontata con una distribuzione normale standardizzata al livello di confidenza prefissato.

$$(5)\ Z=\begin{cases} \dfrac{S-1}{\sigma} \text{ se } S>0 \\ 0 \text{ se } S>0 \\ \dfrac{S+1}{\sigma} \text{ if } S<0 \end{cases}$$

Analogamente al test di adattamento sopra descritto anche in questo caso è possibile calcolare il p-value relativo al valore del test al fine di validare o sconfessare la presenza di autocorrelazione. Il soddisfacimento delle condizioni sopra citate mostra che gli eventi selezionati tramite POT non violano la condizione cosiddetta iid, ovvero i dati non sono auto-correlati e risultano casualmente distribuite e possono pertanto essere correttamente impiegati per il calcolo dei periodi di ritorno.

In ultimo la bontà dei modelli fittati separatamente per i settori di interesse è tasta testata attravrso il test di Anderson-Darling secondo la formulazione proposta da Choulakian & Stephens (2001) al fine di stabilire se la serie di dati utilizzata afferisce effettivamente ad una distribuzione di Pareto.

Una volta calcolati i valori di H_s associati ai tempi di ritorno desiderati, i periodi di progetto sono stati desunti confrontando i modelli empirici proposti rispettivamente da Boccotti (1997) e Goda (2003), che permettono il calcolo del periodo d'onda a partire dal relativo valore di H_s:

$$(6)\begin{cases} T=8.5\pi\sqrt{\dfrac{H_s}{4g}} \\ T=3.3\,H_s^{0.63} \end{cases}$$

3.3. Risultati

Le analisi ai valori estremi hanno permesso di stimare le altezze d'onda relative ai tempi di ritorno assegnati che vanno da 1 a 50 anni. Gli eventi sono stati modellizzati in funzione dei settori direzionali individuati dal processo di k-means clustering. Per ogni valore sono stati calcolati anche i valori corrispondenti ai livelli inferiori e superiori dell'intervallo di confidenza. Al fine delle simulazioni modellistiche, volte a determinare i massimi livelli di energia del moto ondoso nei punti prestabiliti, sono stati considerati i parametri d'onda relativi a tempo di ritorno cinquantennale.

		Hs [m]			**Tp [s] (Boccotti)**		
θ [N°]	**Return time [y]**	**Est**	**Lo**	**Up**	**Est.**	**Lo**	**Up**
120	10	3.96	3.64	4.27	8.49	8.14	8.82
220	10	4.83	4.69	4.98	9.38	9.23	9.51

Tabella 2. Parametri d'onda cinquantennali, calcolati per Libeccio (220 °N) e Scirocco (120 °N)

4. Risultati modello 2DH

In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti mediante le simulazioni modellistiche dei diversi scenari di progetto (paragrafi 4.3., 4.4., 4.5., 4.6.), comparati con lo stato dell'arte (paragrafi 4.1., 4.2.). In particolare, i risultati sono riferiti alle simulazioni di moto ondoso incidente proveniente dalle direttrici sud-ovest (Libeccio) e sud-est (Scirocco), che rappresentano gli eventi di mareggiata che tipicamente si abbattono sull'area in esame (sezione 3). Si è optato per le simulazioni di eventi con tempo di ritorno decennale, il che rappresenta un compromesso tra eventi di bassa intensità (tempo di ritorno annuale) ed eventi estremi (tempo di ritorno cinquantennale).

4.1. Libeccio con tempo di ritorno decennale – stato dell'arte

Per via dell'orientazione della costa, questa risulta meno esposta alle ondazioni provenienti da sud-ovest, seppur tali eventi non sono assolutamente da trascurare per via della loro frequenza e delle implicazioni idro-morfodinamiche ad essi associate. Vediamo dunque quali sono le caratteristiche idro-morfodinamiche riscontrate, allo stato dell'arte, nel caso di un evento meteo-marino con

direttrice di provenienza sudoccidentale e tempo di ritorno decennale. In Figura 1 viene illustrato il pattern idrodinamico che va a svilupparsi nel settore più occidentale del tratto di costa in esame. L'orientazione dei vettori mostra chiaramente un flusso diretto da sud verso nord, evidentemente influenzato dalle strutture presenti. Inoltre, si evidenzia chiaramente la genesi di una corrente di ritorno (rip current) adiacente al pennello B. Spostandoci in direzione levante troviamo il tratto di litorale compreso tra i pennelli B e D (Figura 2). Anche in questo caso è evidente l'effetto delle strutture presenti. Si mette in evidenza un flusso in entrata nella piccola baia artificiale in prossimità del pennello D, che va a ruotare in senso antiorario sino ad impattare i pennelli C e D, per poi generare un flusso in uscita verso il largo. Anche in questo caso tale flusso può essere indicato come una rip current. Sempre in direzione levante troviamo la porzione di litorale compresa tra i pennelli D ed E (Figura 3). Come oramai già assodato, anche in questo caso troviamo un idrodinamismo fortemente influenzato dalle opere presenti, caratterizzato da una classica dinamica cellulare che vede l'instaurarsi di flussi in entrata a tergo delle strutture (pennelli D ed E) che poi convergono generando un flusso in uscita in direzione del mare aperto (in questo caso non chiaramente identificabile come rip current). L'ultima porzione di spiaggia verso est, compresa tra i pennelli E ed F (Figura 4), mostra l'instaurarsi di un flusso in entrata adiacente al pennello E che, seguendo il perimetro della cella stessa, va ad innescare un flusso in uscita adiacente al pennello F. In quest'ultimo caso, per il flusso in uscita, si può parlare di una dinamica ascrivibile ad una rip current.

In generale, il flusso "esterno" alle opere, ovvero oltre le testate dei pennelli, mostra una direzione ovest-est, chiaramente compatibile con un moto ondoso proveniente dalla direttrice sudoccidentale.

Per finire analizziamo i risultati in termini di processi di erosione e accumulo (Figura 5). I processi di erosione/accumulo appaiono evidentemente associati all'idrodinamismo locale, a sua volta guidato dalle strutture presenti. I processi erosivi appaiono sostanzialmente associati alla presenza dei pennelli, i quali generano processi di erosione a tergo degli stessi, alternati a fenomeni di accumulo dovuti alla rideposizione dei sedimenti presi in carico dal trasporto litorale. Si notano fenomeni erosivi accentuati in prossimità delle testate dei pennelli (in particolare pennelli D ed E), evidentemente dovuti anche ai fenomeni riflettivi innescati dall'interazione opera-onda (la testata dei pennelli rappresenta per definizione un punto di concentrazione dell'energia del moto ondoso).

Per quanto concerne la spiaggia emersa si osserva come i fenomeni erosivi più intensi si vadano ad innescare lungo il tratto di costa più orientale, compreso tra i pennelli D ed F. Risulta chiaramente

intuibile come ciò sia dovuto ai processi di riflessione associati alla presenza del muraglione posto a protezione del lungomare.

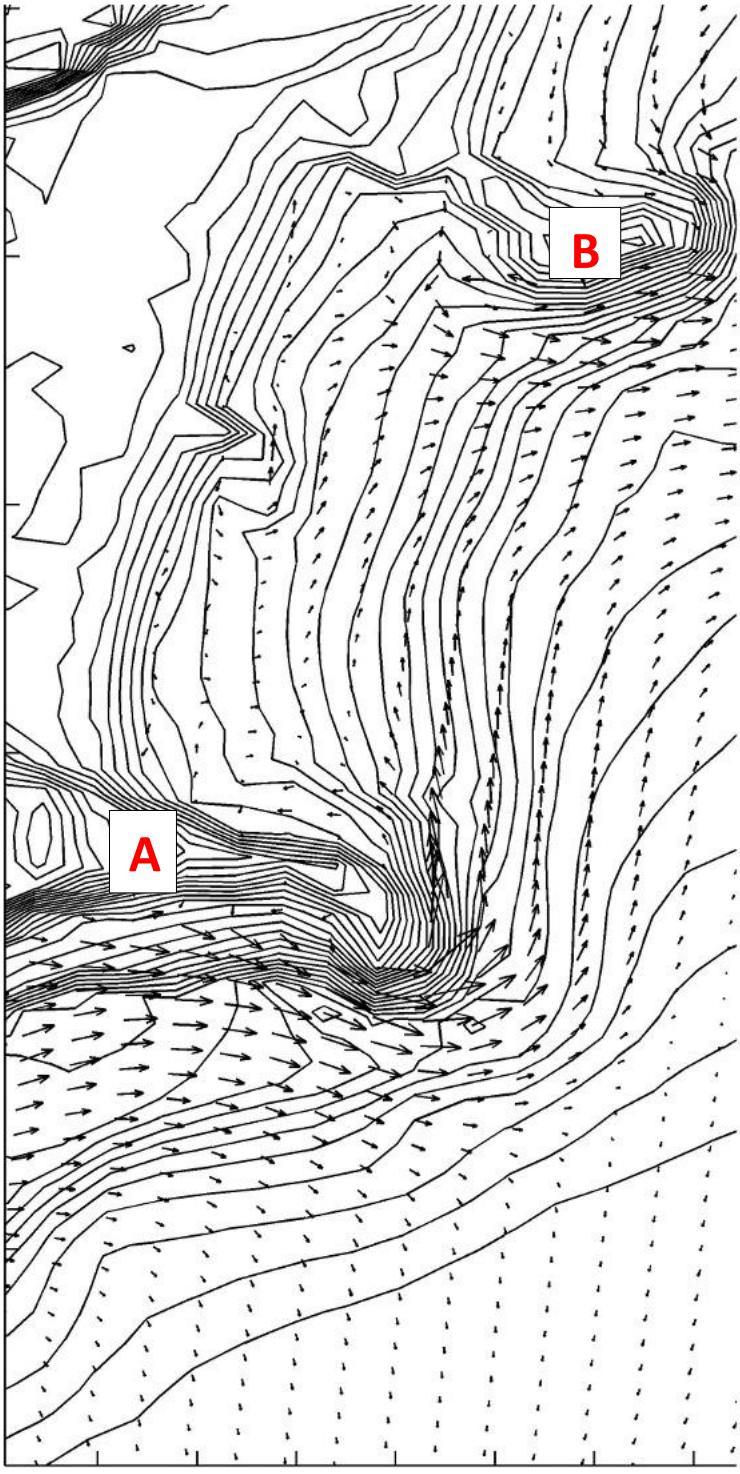


Figura 1. Libeccio con tempo di ritorno decennale, settore occidentale.

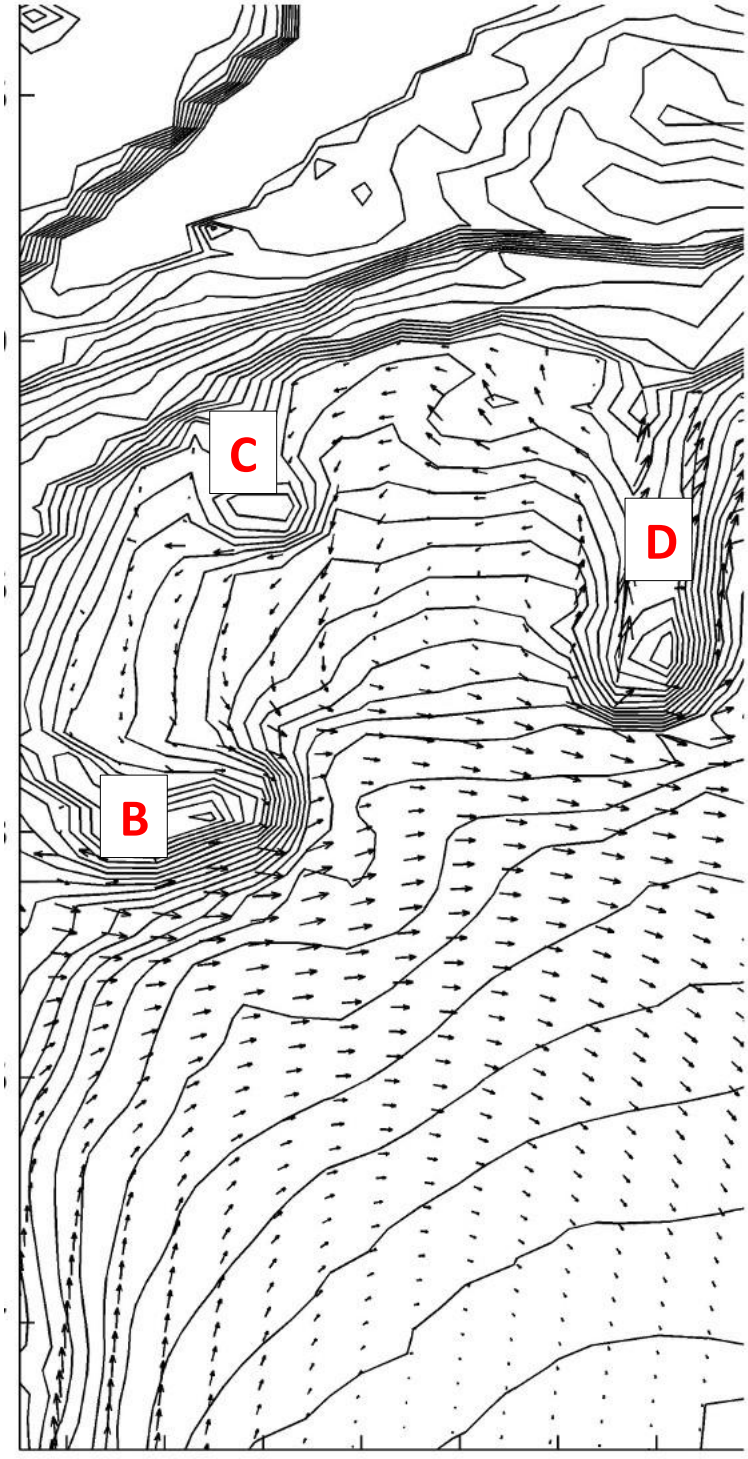


Figura 2. Libeccio con tempo di ritorno decennale, settore centro-occidentale.

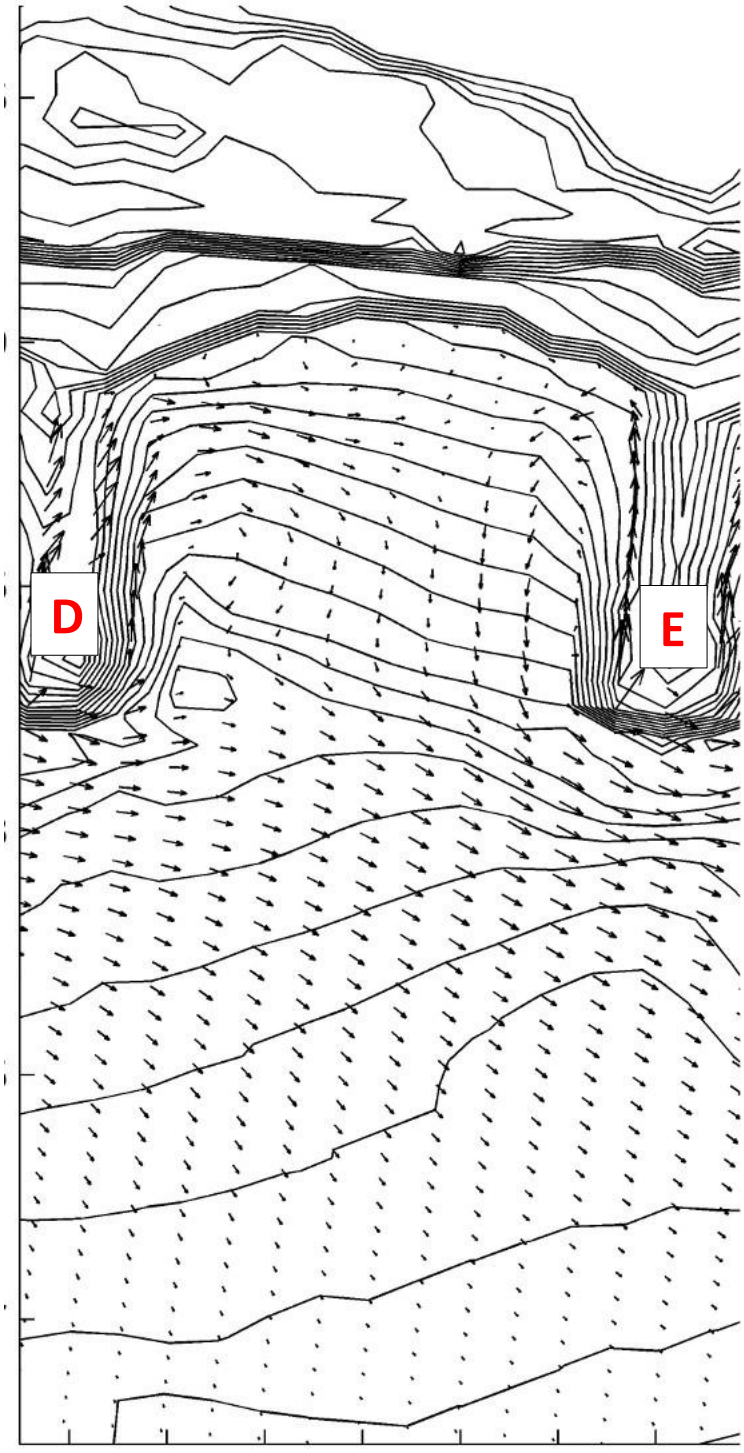


Figura 3. Libeccio con tempo di ritorno decennale, settore centro-orientale.

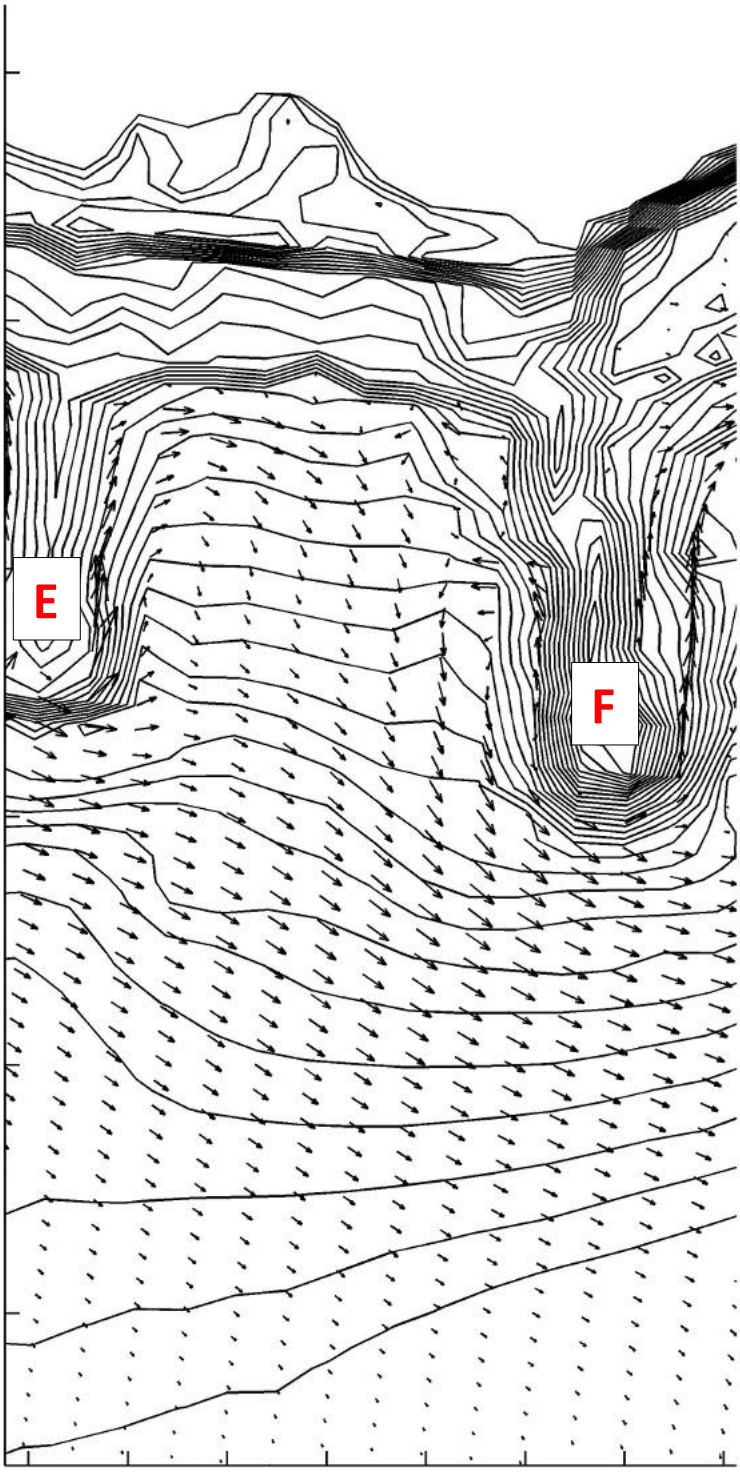


Figura 4. Libeccio con tempo di ritorno decennale, settore orientale.

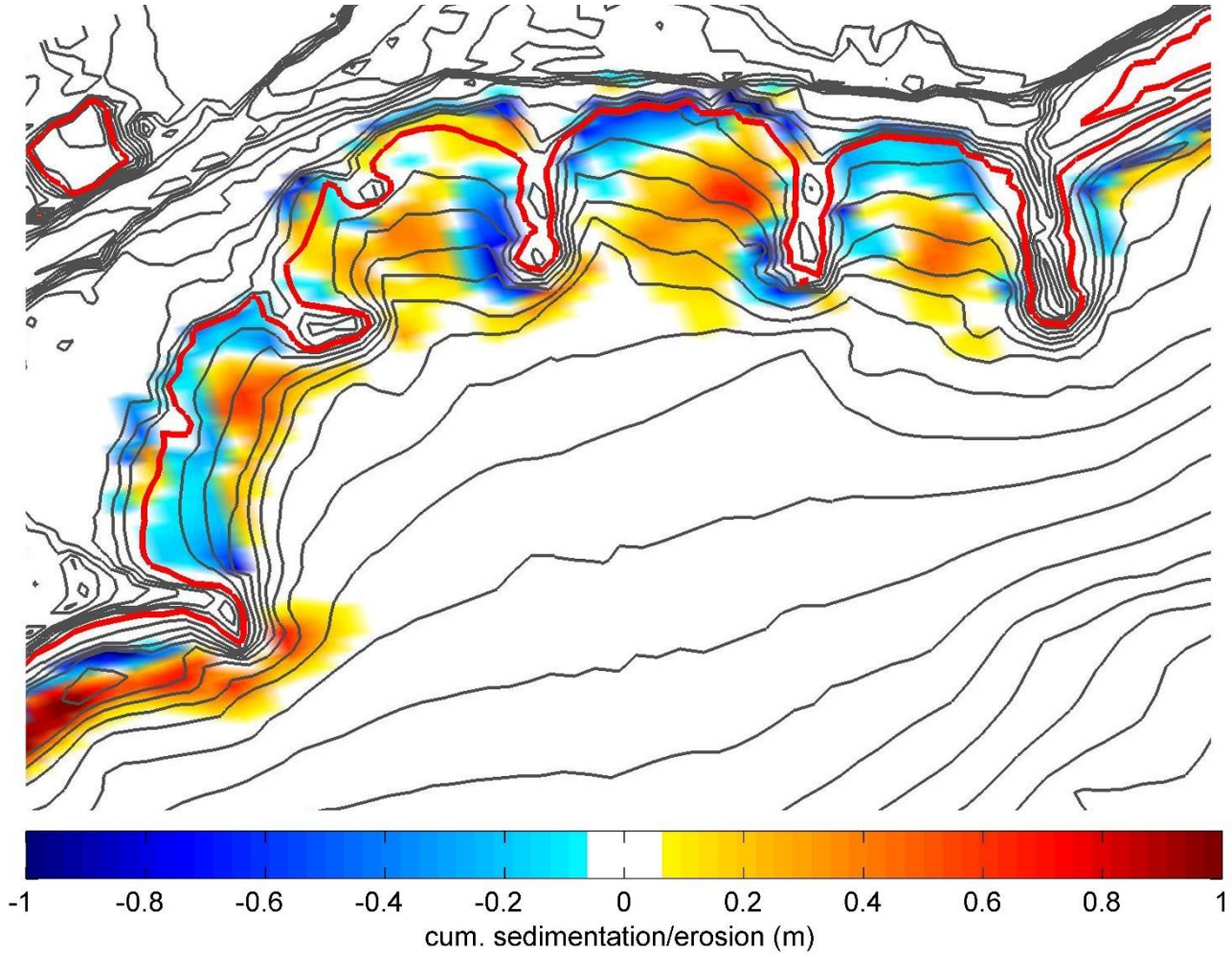


Figura 5. Processi di erosione e accumulo nel caso di Libeccio con tempo di ritorno decennale.

4.2. Scirocco con tempo di ritorno decennale – stato dell'arte

Il tratto di costa in esame, per via della sua orientazione, risulta particolarmente esposto ai marosi provenienti da sudest. Da ovest verso est troviamo la porzione di litorale compresa tra i pennelli A e B (Figura 6), dove risulta evidente la presenza di flussi in uscita verso il mare aperto, evidentemente generati dall'assetto morfologico (artificiale) della costa. Inoltre, vista l'esposizione ai marosi di scirocco, si intuisce anche il ruolo giocato dalla riflessione del moto ondoso sulle strutture rigide immediatamente a ridosso della spiaggia. Per quanto concerne i flussi in uscita a tergo dei pennelli, questi possono essere classificati senza dubbio come rip currents vere e proprie, dovute alla presenza di un ostacolo rigido (pennello) che intercetta e dirige flusso verso il largo. Immediatamente a est troviamo la porzione di spiaggia compresa tra i pennelli B e D (Figura 7). Anche in questo caso è evidente una dinamica costa-largo, particolarmente influenzata anche dalla

presenza del pennello C. Si intuisce la sostanziale presenza di due sub-celle, rispettivamente tra i pennelli B-C e C-D. Evidente la presenza di due rip currents adiacenti ai pennelli B e D che vanno a congiungersi in uscita per via dell'orientazione stessa dei pennelli che ne dirigono il flusso. Anche tra i pennelli D ed E (Figura 8) si osserva un assetto costa-largo delle correnti, con la genesi di una evidente rip current a tergo del pennello D, con flusso in uscita in direzione sudovest. Una dinamica sostanzialmente sovrapponibile si evidenzia anche nel settore orientale, compreso tra i pennelli E ed F (Figura 9). È evidente la presenza di un consistente flusso in uscita in direzione sudovest. In generale si può dunque affermare che l'idrodinamismo costiero associato ad un moto ondoso con direttrice di provenienza sudovest mostra uno schema di sviluppo marcatamente costa-largo. Queste osservazioni vengono confermate anche osservando i risultati in termini di processi di erosione e accumulo. In Figura 10 si nota come i processi erosivi siano generalmente più estesi e marcati di quanto osservato nel caso del Libeccio. Anche i processi erosivi sulla spiaggia emersa appaiono più marcati. Anche questo aspetto si spiega facilmente considerando l'orientazione della costa rispetto al moto ondoso incidente, che va a generare importanti fenomeni di riflessione sulle strutture rigide immediatamente alle spalle della spiaggia.

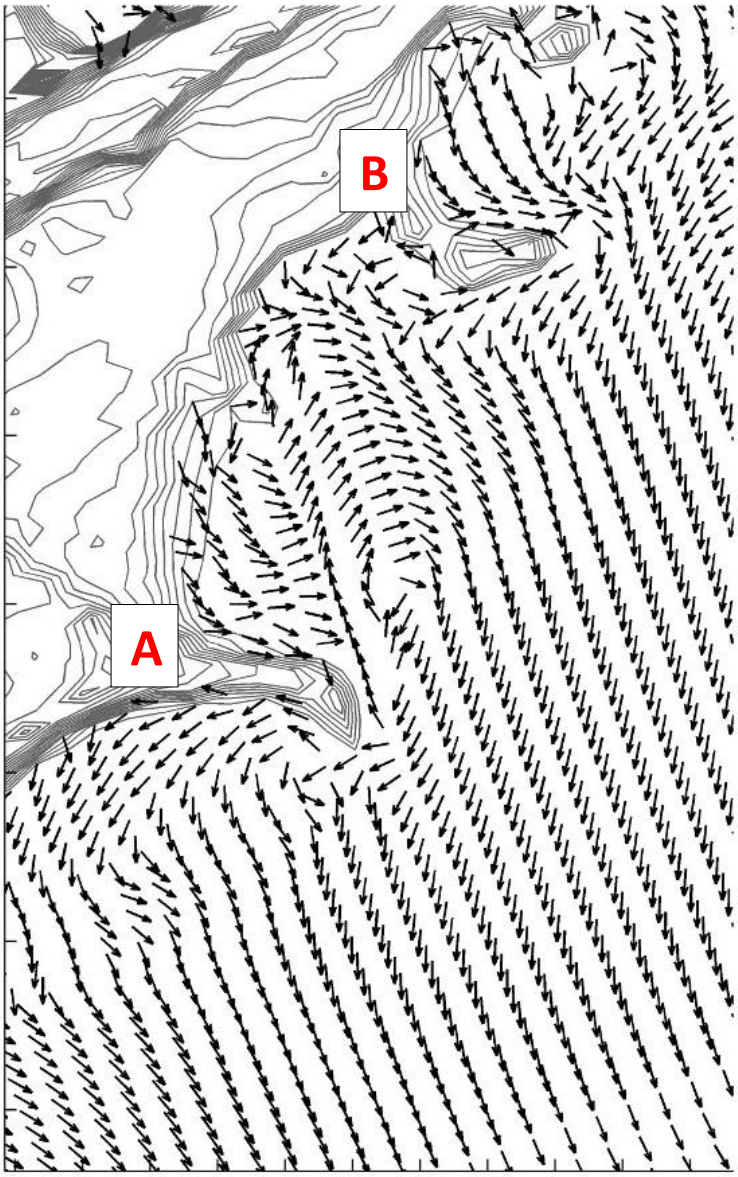


Figura 6. Scirocco con tempo di ritorno decennale, settore occidentale.

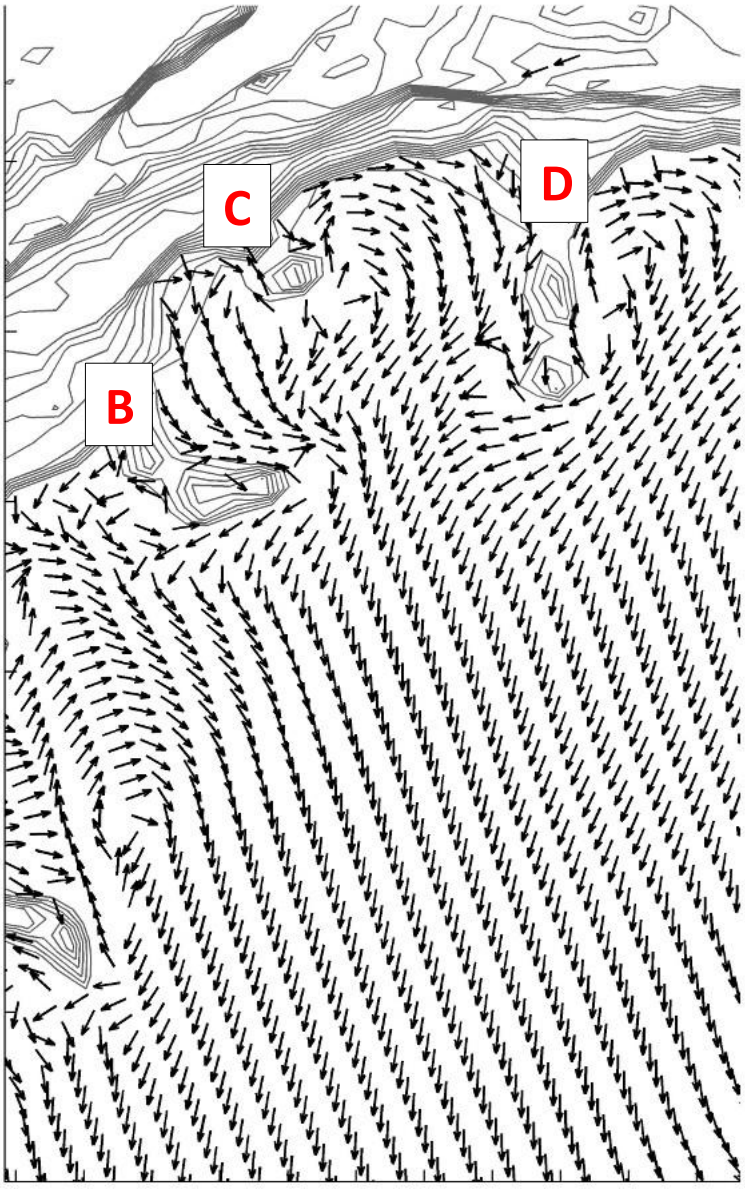


Figura 7. Scirocco con tempo di ritorno decennale, settore centro-occidentale.

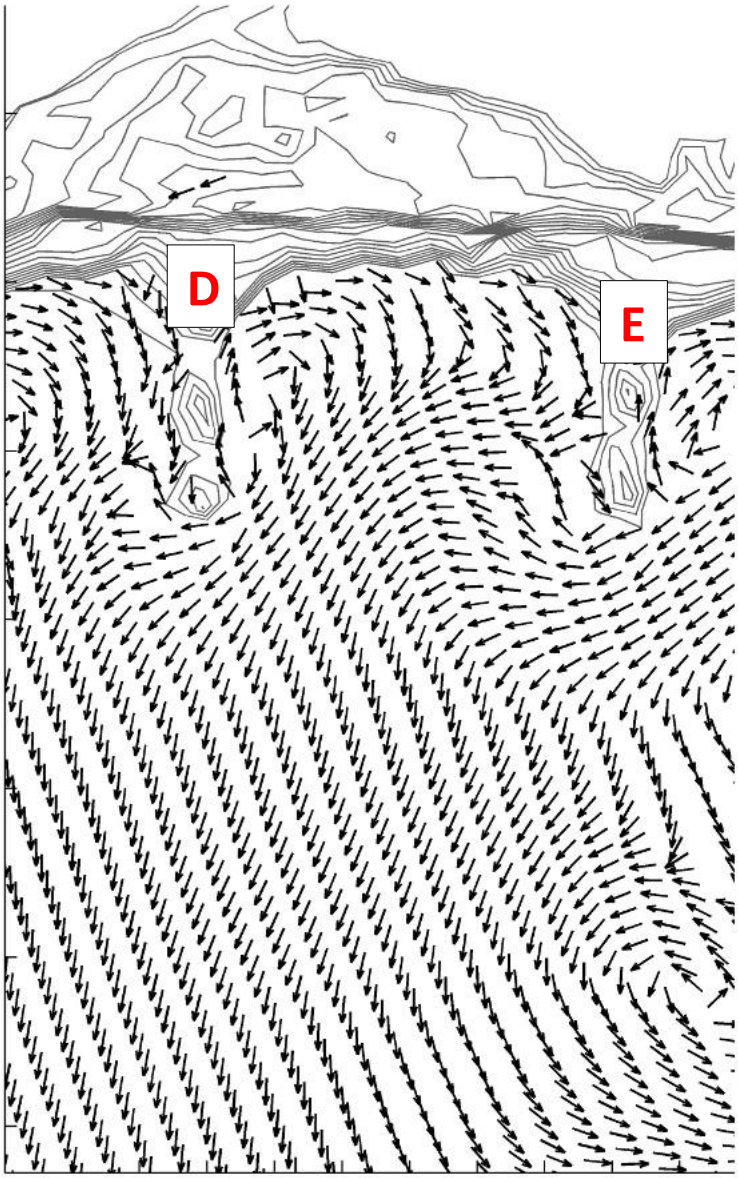


Figura 8. Scirocco con tempo di ritorno decennale, settore centro-orientale.

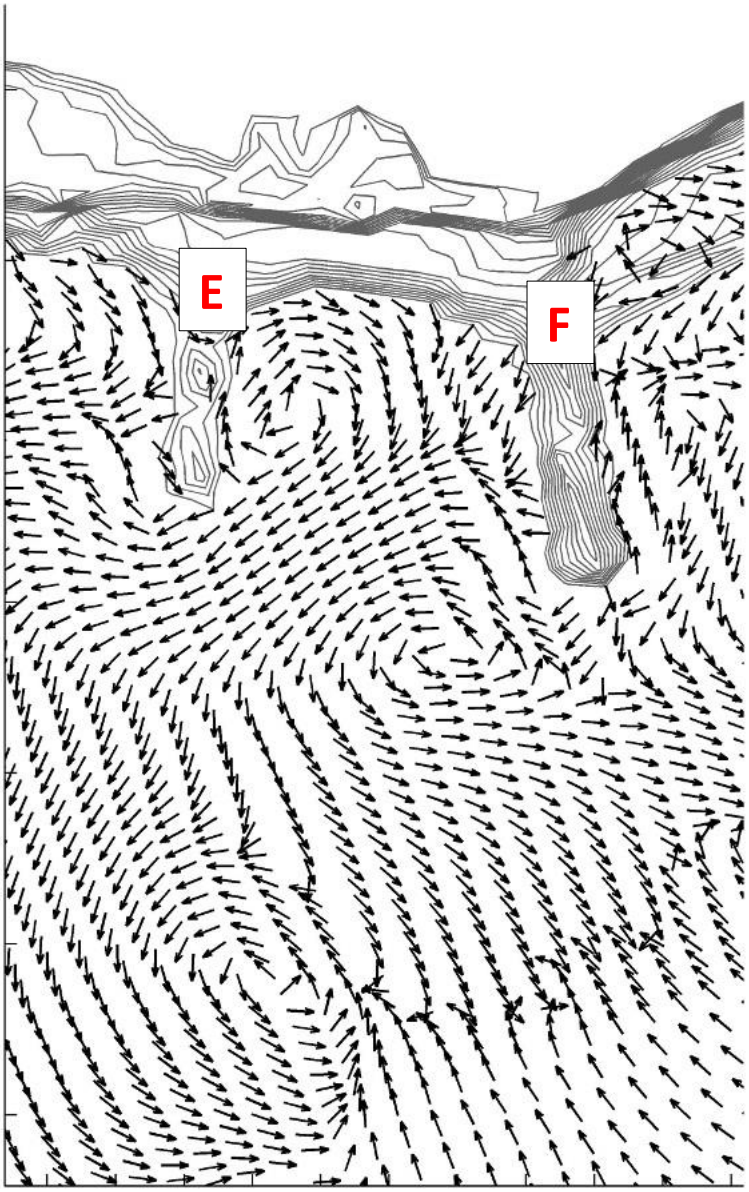


Figura 9. Scirocco con tempo di ritorno decennale, settore orientale.

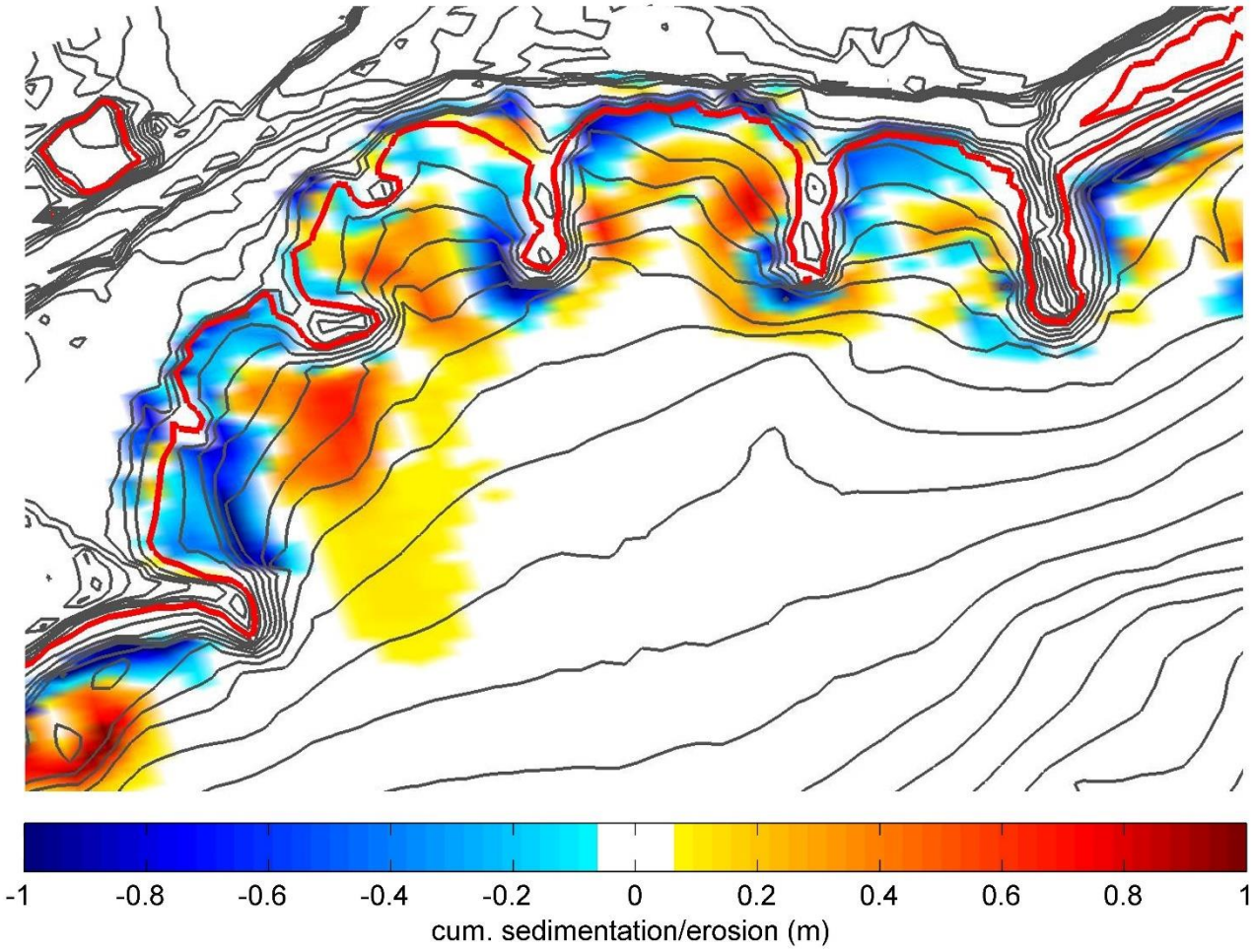


Figura 10. Processi di erosione e accumulo nel caso di Scirocco con tempo di ritorno decennale.

4.3. Libeccio con tempo di ritorno decennale – progetto

Il progetto prevede il "raddrizzamento" del pennello B, l'eliminazione del pennello C, la posa di due barriere isola a sostituzione dei pennelli D ed E, il prolungamento del pennello F. Dal punto di vista idrodinamico sono evidenti gli effetti del nuovo assetto costiero (Figure 11, 12, 13, 14). Il settore occidentale (Figura 11) è quello che forse, dal punto di vista idrodinamico, mostra le differenze minori rispetto allo stato dell'arte. Tuttavia si evidenzia come il raddrizzamento del pennello B porti differenze in termini di sviluppo delle correnti, in particolare sembra generarsi un pattern di circolazione cellulare maggiormente definito. Questo per via del raddrizzamento del pennello B, il quale previene la deviazione del flusso verso nord-est in ragione di un suo "ripiegamento" verso sud-ovest. Spostandoci verso est troviamo la porzione centro-occidentale del litorale (Figura 12). Si nota in maniera evidente l'assenza del pennello C che non influenza più la circolazione litorale. Si

nota la formazione di una rip current in uscita verso il largo. Troviamo dunque le due barriere isola (Figura 13), le quali portano ad una decisa modifica nell'assetto idrodinamico. I risultati mostrano come a ridosso delle isole, tra le stesse e la linea di riva, si instaurino dei flussi convergenti in direzione delle isole stesse. Si tratta di una dinamica tipicamente associata al processo di formazione di morfologie cuspidate e tomboli, il che è propriamente l'effetto ricercato con la posa di tali strutture. All'estremità orientale (Figura 14) troviamo l'ultima modifica a progetto, ovvero il prolungamento del pennello F, al quale si associa una dinamica costa-largo evidentemente associata all'effetto di chiusura (in particolare considerando i marosi provenienti da sudovest), rispetto al tratto di costa in oggetto, del pennello stesso. Le dinamiche descritte trovano riscontro anche nei risultati ottenuti in termini di processi di erosione ed accumulo (Figura 15). Risulta infatti evidente,

in particolare, l'accumulo di sedimenti a ridosso delle barriere isola, a confermare l'effetto tombolo generato dalle strutture stesse.

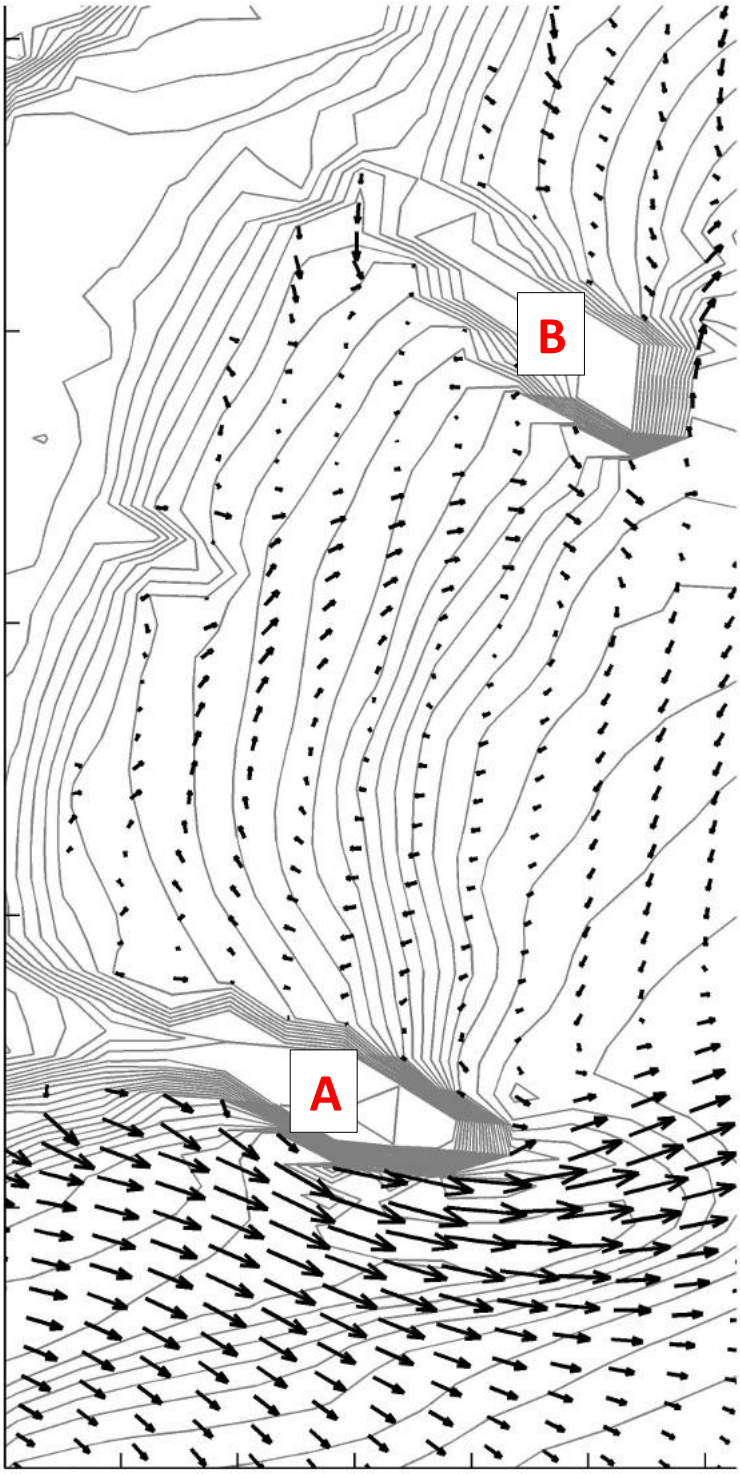


Figura 11. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore occidentale.

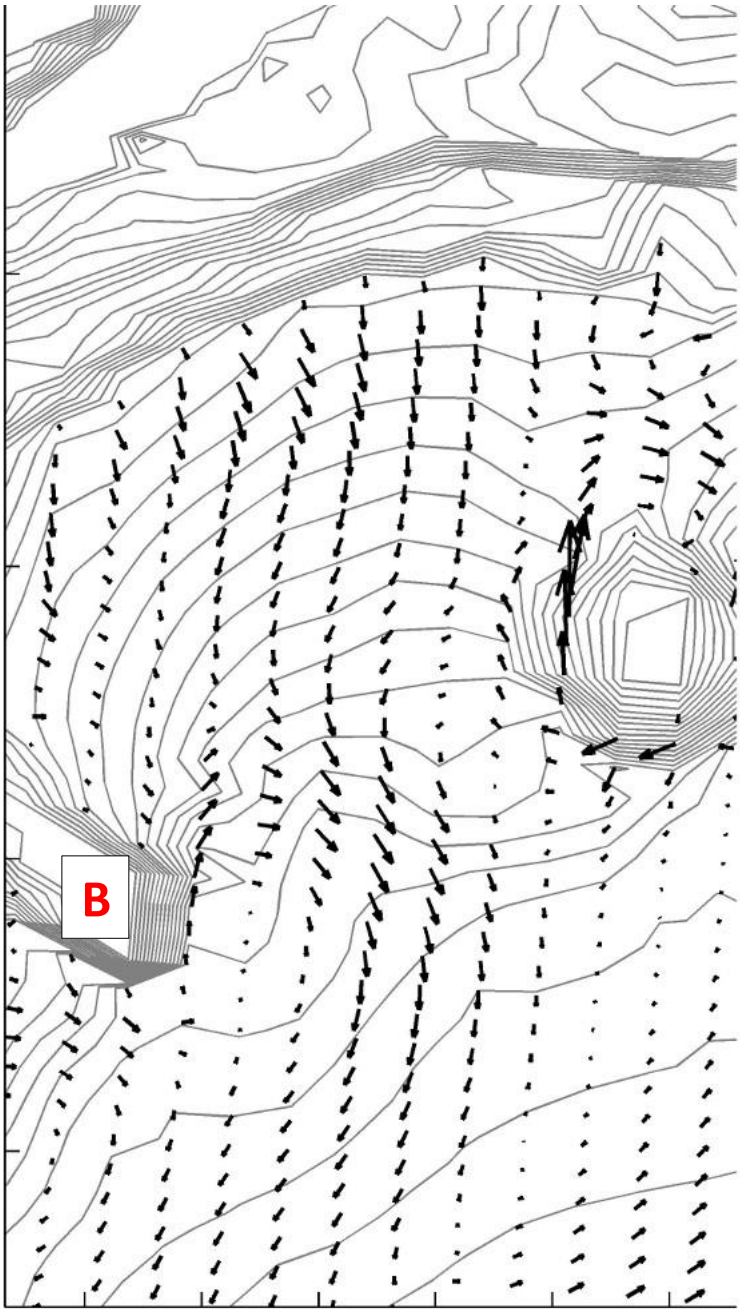


Figura 12. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-occidentale.

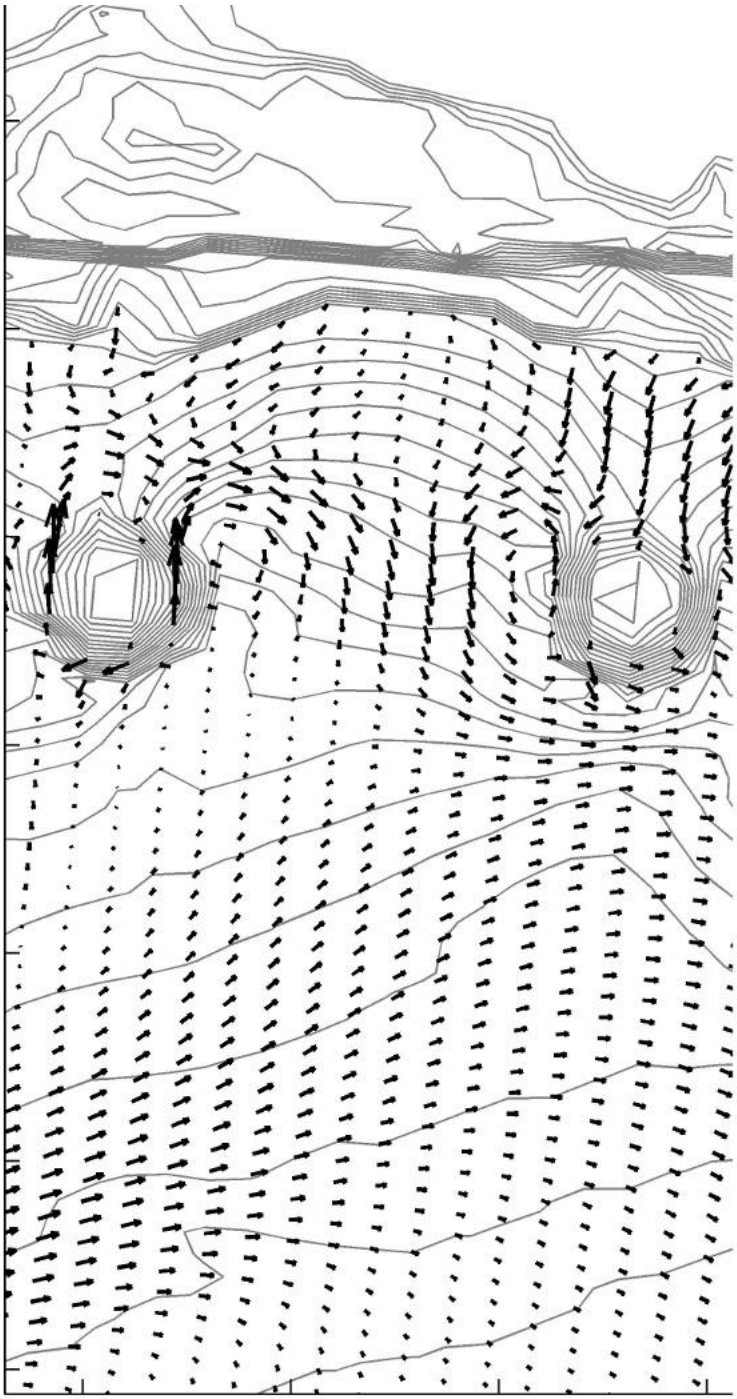


Figura 13. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-orientale.

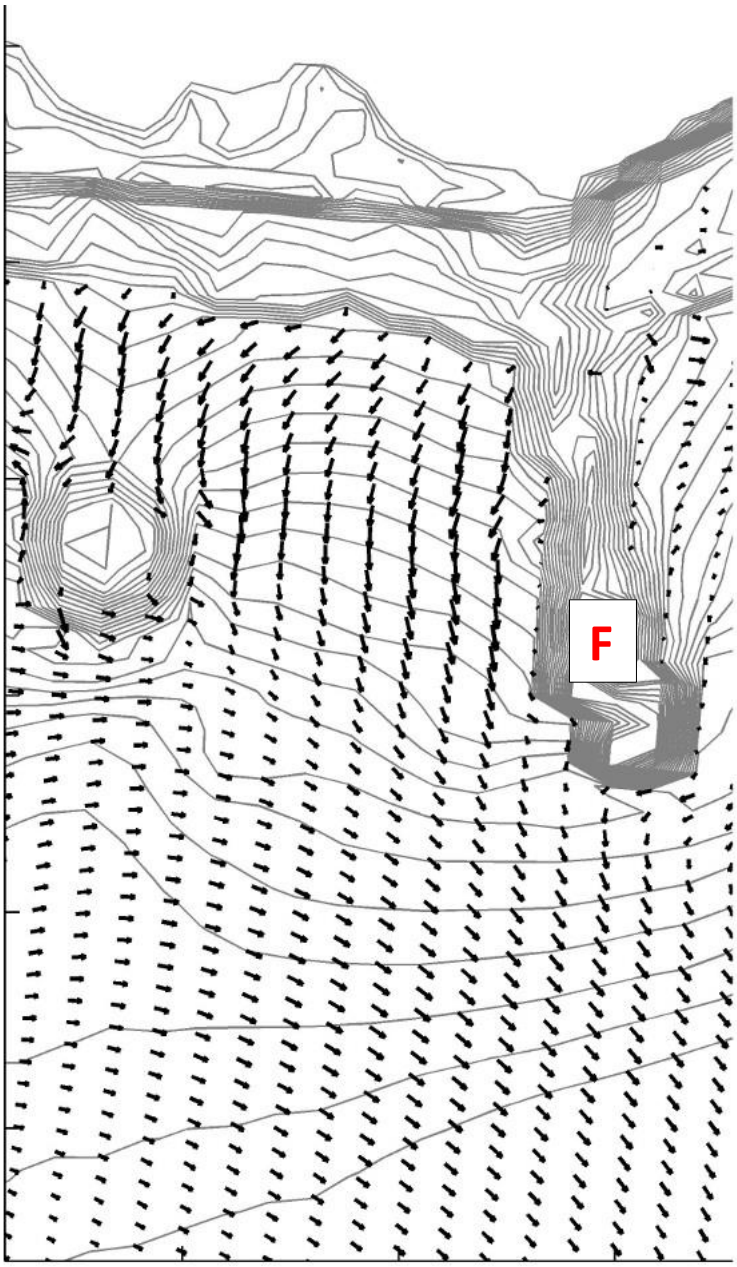


Figura 14. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore orientale.

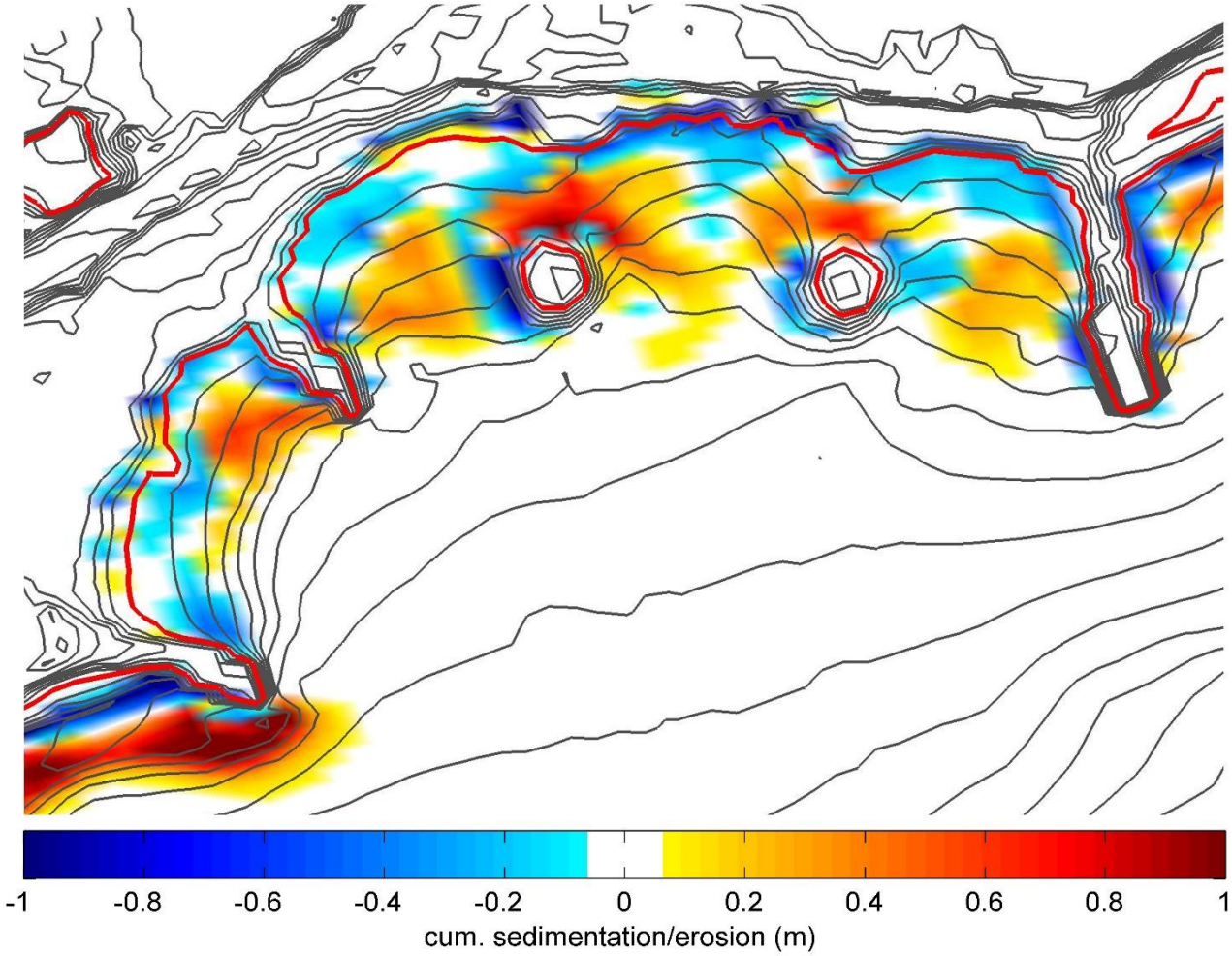


Figura 15. Processi di erosione e accumulo nel caso di libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto.

4.4. Scirocco con tempo di ritorno decennale – progetto

Anche nel caso del mare di scirocco, i risultati mostrano come il nuovo assetto costiero porti ad una modifica nello schema di sviluppo dei processi idrodinamici. Come osservato per il libeccio, il settore occidentale (Figura 16) è forse quello dove si riscontra il minor impatto delle modifiche strutturali. Il raddrizzamento del pennello B porta comunque ad un consolidamento della dinamica costa-largo all'interno della cella in questione. Spostandoci verso est troviamo dunque i settori centro-occidentale e centro-orientale (Figure 17 e 18). La rimozione del pennello C e la posa delle barriere isola mostra invece evidenti effetti sullo sviluppo delle correnti litoranee. A ridosso delle barriere isola si evidenzia la classica dinamica ad essa associata, con convergenza delle correnti in seguito ai fenomeni di diffrazione del moto ondoso sulle opere stesse (come osservato per il libeccio). Il pattern idrodinamico generale risulta comunque di tipo costa-largo, coerentemente con un moto ondoso con incidenza "ortogonale" alla costa. Risulta evidente lo sviluppo di alcune rip currents ben

definite (Figure 17, 18 e 19). In particolare, nel settore orientale (Figura 19) risulta molto evidente la presenza di una rip currents sostenuta dalla presenza del pennello F che, per via del prolungamento, tende ad avere una maggiore efficacia in termini di direzionamento del flusso. I risultati sono confermati anche mettendo in relazione l'idrodinamismo osservato con i risultati in termini di processi di erosione-accumulo (Figura 20). In particolare, come già evidenziato per il libeccio, risultano evidenti i processi di accumulo tra le barriere isola e la linea di riva (effetto tombolo) generati dalla rideposizione dei sedimenti presi in carico dalle correnti che vanno a convergere a tergo delle strutture stesse.

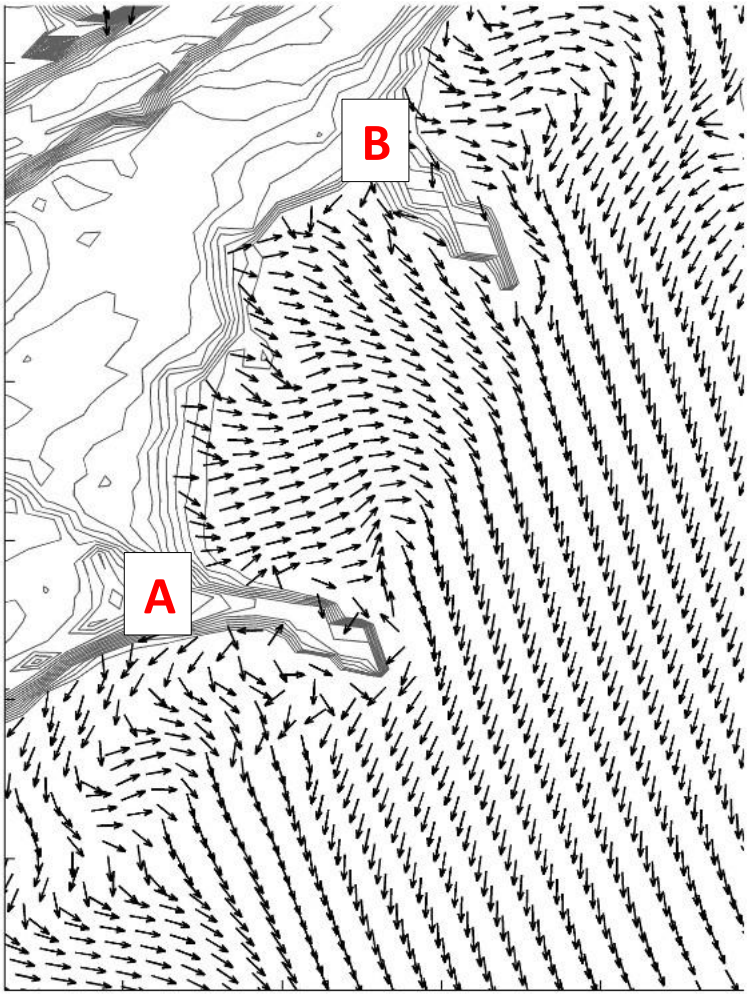


Figura 16. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore occidentale.

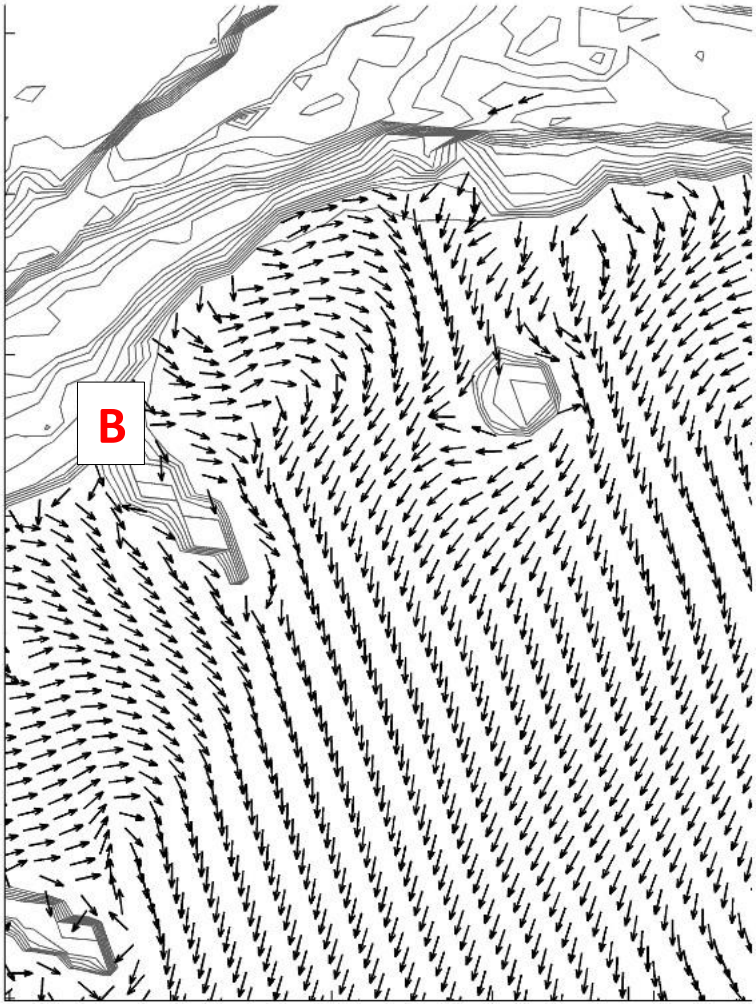


Figura 17. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-occidentale.

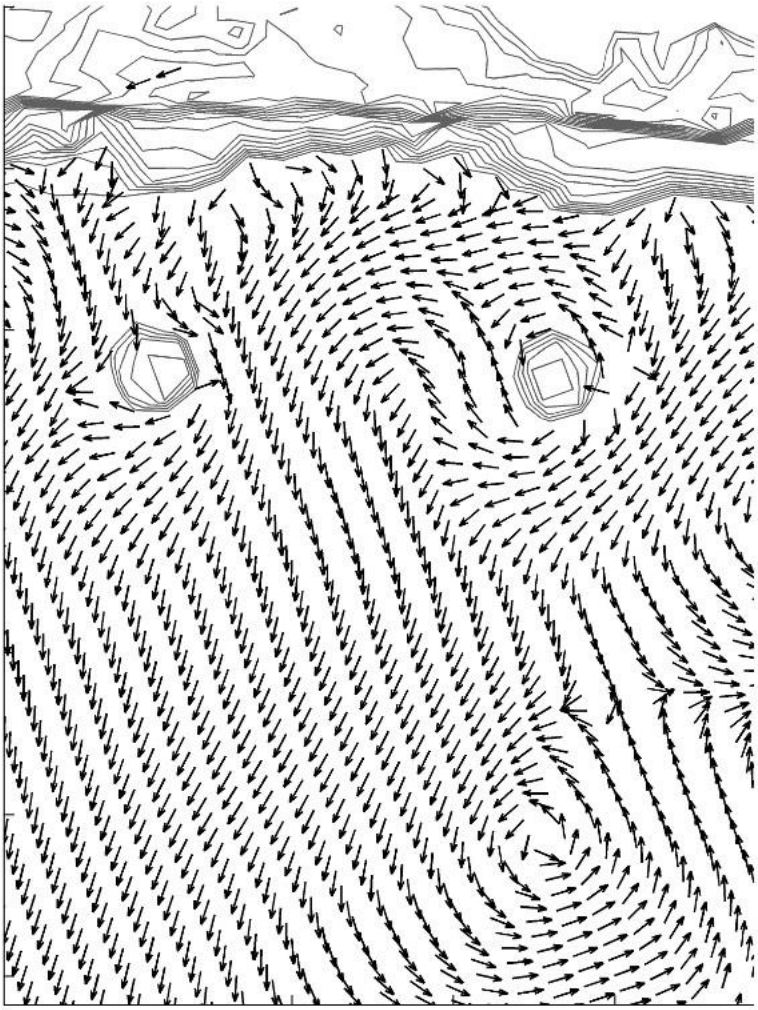


Figura 18. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-orientale.

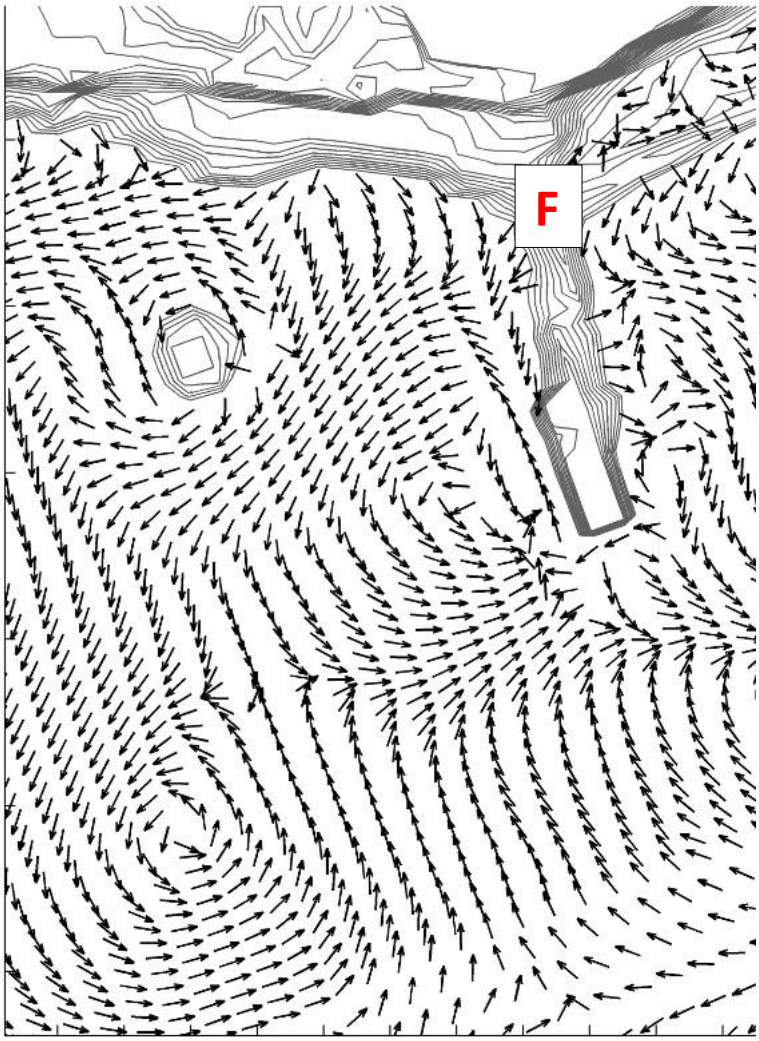


Figura 19. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore orientale.

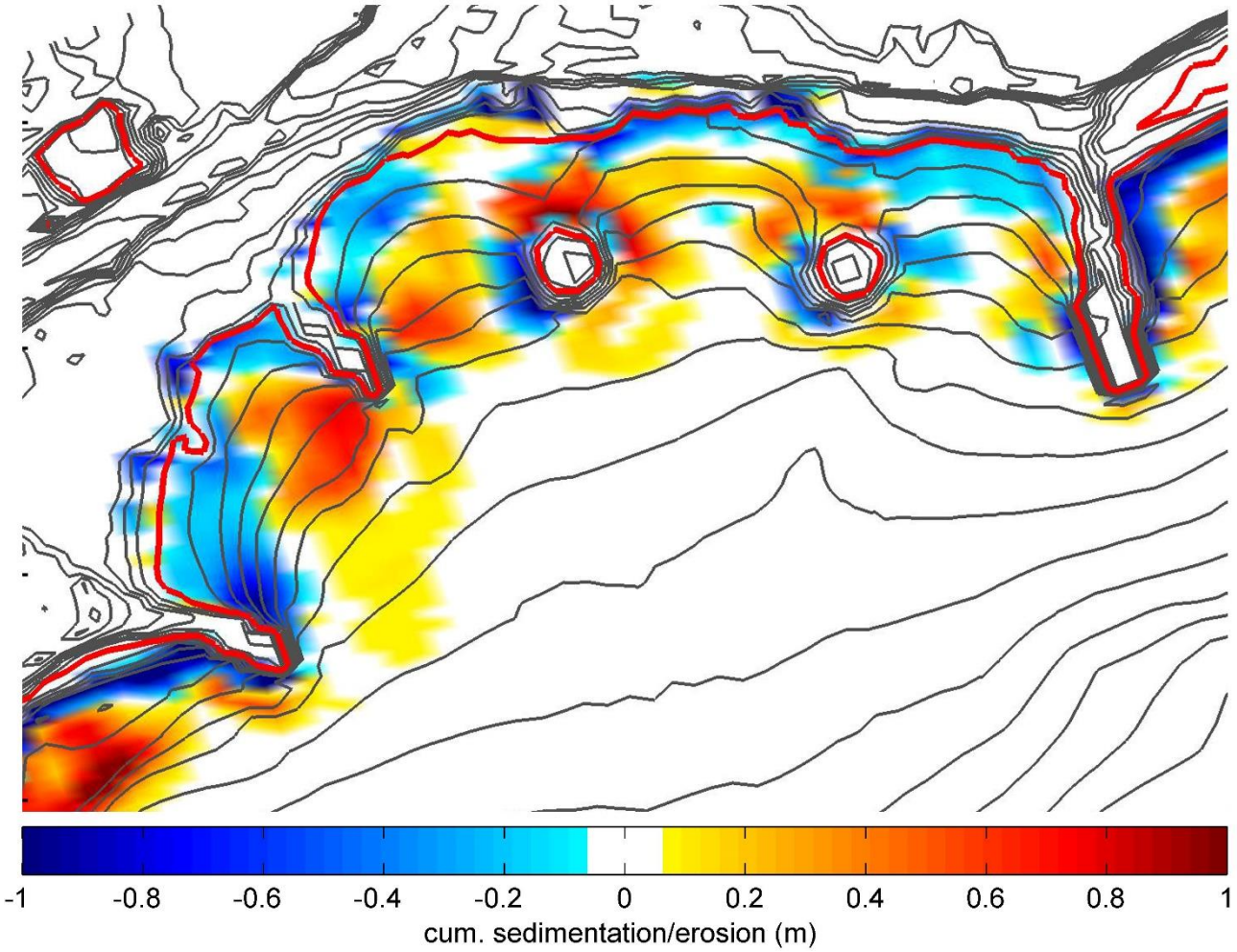


Figura 20. Processi di erosione e accumulo nel caso di scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto.

4.5. Libeccio con tempo di ritorno decennale – variante progetto con accorciamento pennello B

In questo caso, e nel paragrafo successivo (4.6.) per lo scirocco, i risultati sono riferiti ad uno scenario di progetto che prevede, come unica modifica rispetto allo scenario simulato nei paragrafi 4.3. e 4.4., l'accorciamento del pennello B, considerando una sua troncatura al punto dell'attuale ripiegamento verso est. I risultati sotto riportati mostrano come tale modifica induca sostanzialmente ad un maggior scambio idrico tra le aree poste ai due rispettivi lati del pennello stesso. Questo si apprezza chiaramente in Figura 21 e 22. Il risultato e dunque quello di non avere una cella "chiusa" tra i pennelli A e B, ma di favorire un maggior flusso tra i settori adiacenti. Per quanto riguarda l'idrodinamismo nei settori centro-orientale ed orientale, come coerentemente ci si potrebbe aspettare, non vi sono differenze significative rispetto ai risultati descritti nel paragrafo 4.3..

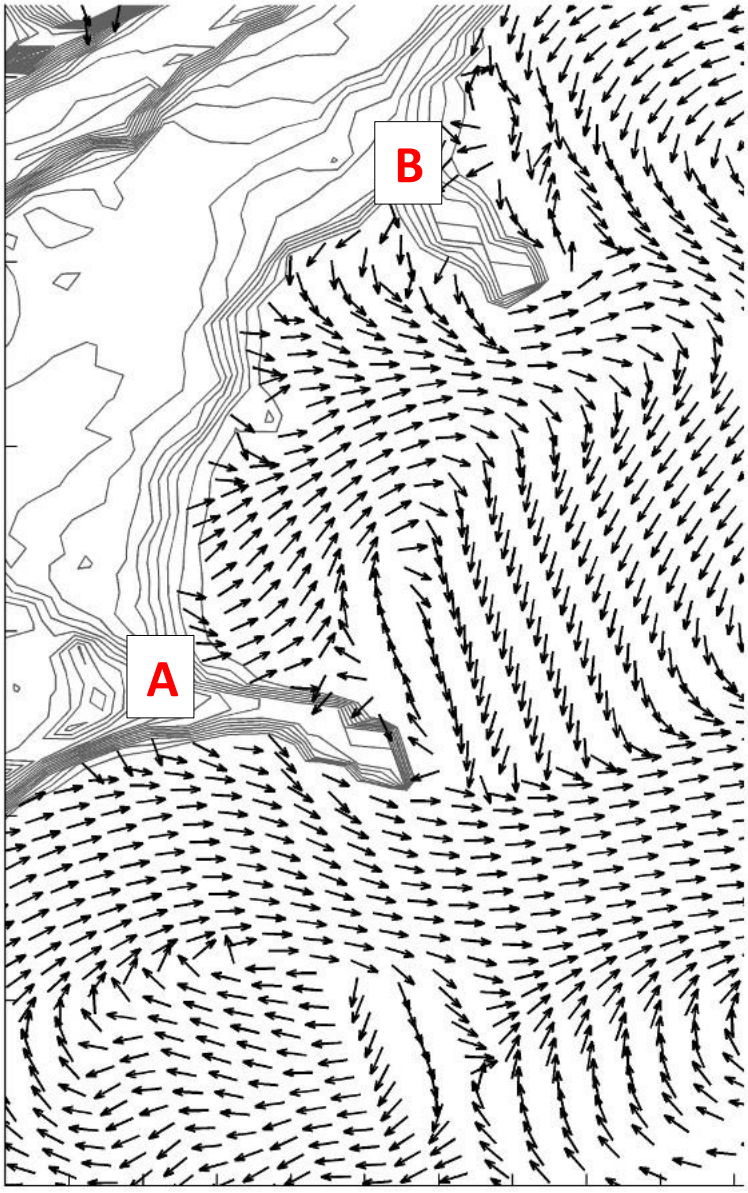


Figura 21. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore occidentale (accorciamento pennello B).

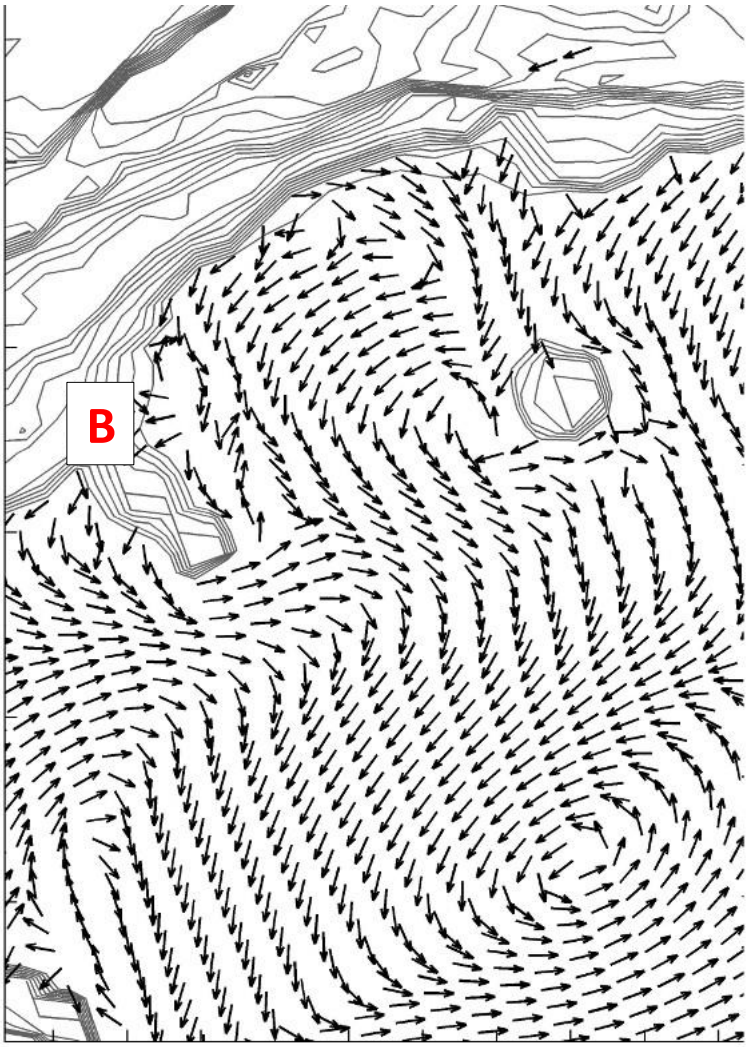


Figura 22. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-occidentale (accorciamento pennello B).

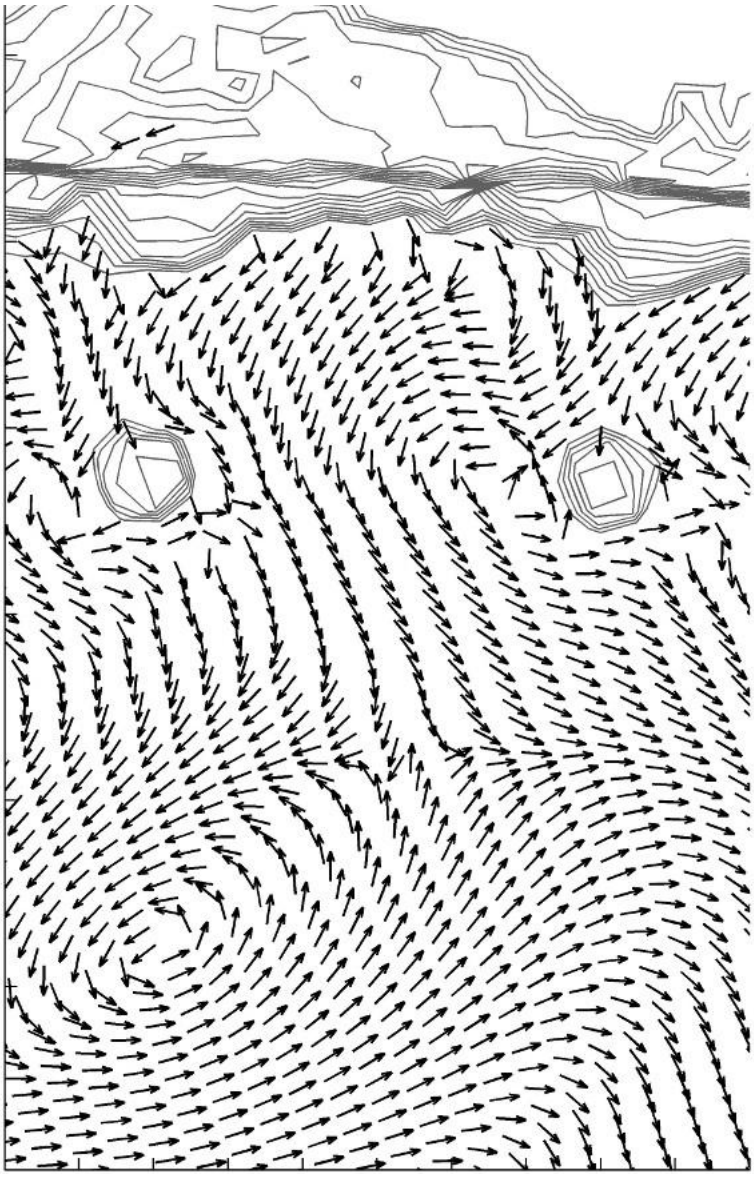


Figura 23. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-orientale (accorciamento pennello B).

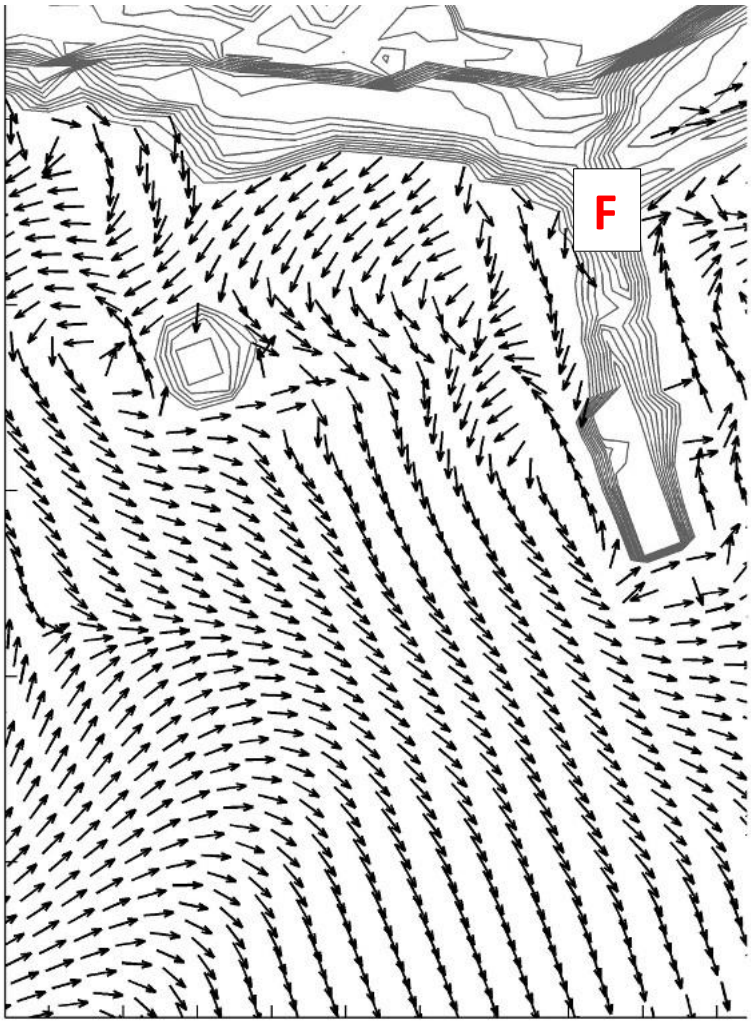


Figura 24. Libeccio con tempo di ritorno decennale, progetto - settore orientale (accorciamento pennello B).

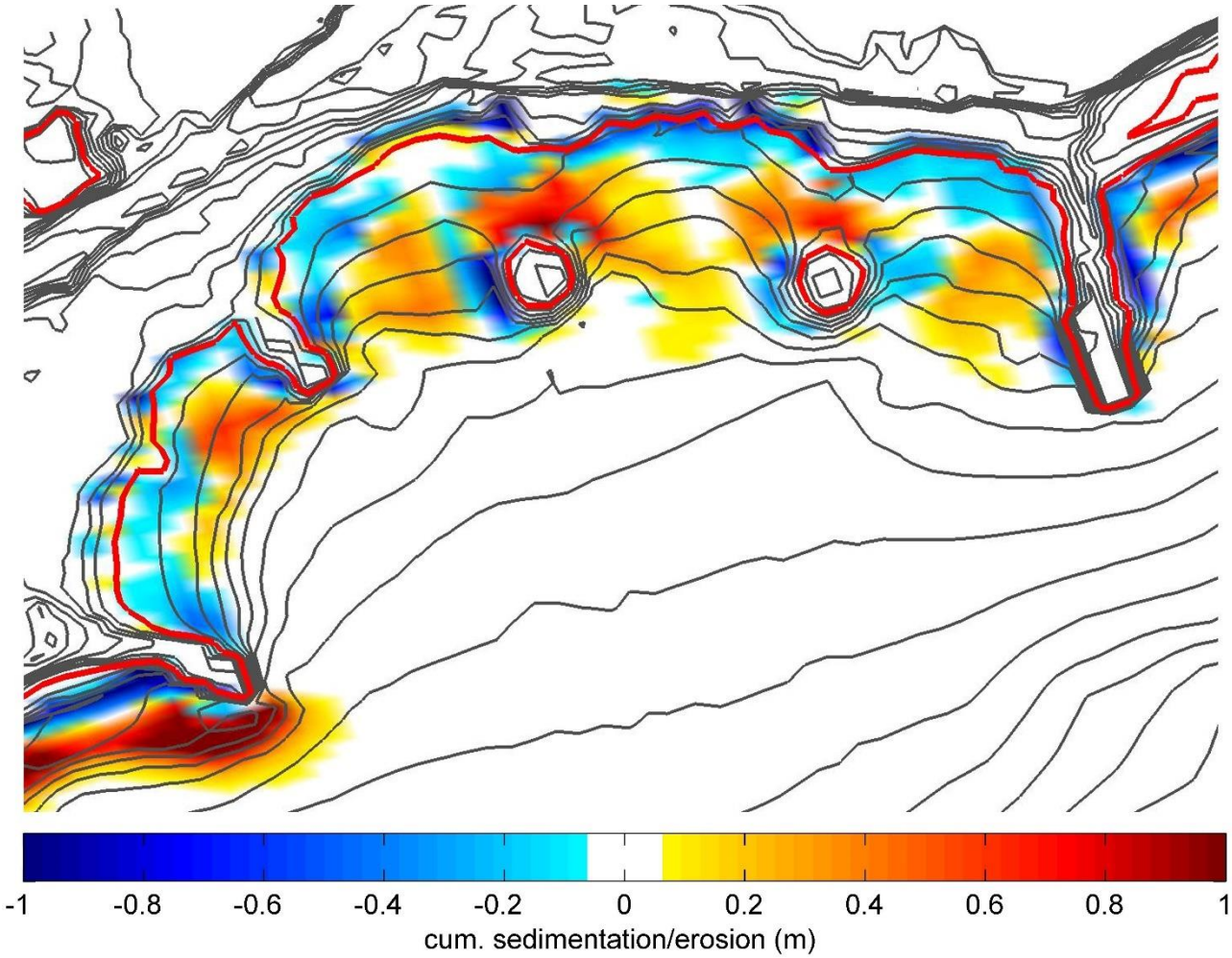


Figura 25. Processi di erosione e accumulo nel caso di libeccio con tempo di ritorno decennale, Progetto con accorciamento pennello B.

4.6. Scirocco con tempo di ritorno decennale – variante progetto con accorciamento pennello B

Anche per quanto concerne lo scirocco, i risultati di seguito riportati illustrano come l'accorciamento del pennello B porti come effetto ad un accentuato scambio tra i due settori adiacenti (Figure 26 e 27). Si conferma quindi quanto osservato del caso dell'idrodinamismo costiero indotto dal moto ondoso proveniente da libeccio. La differenza risiede nel verso del flusso che, per via della diversa direzione di provenienza del moto ondoso, risulta opposto. Mentre nel caso del libeccio si osserva un flusso che scavalca il pennello B e si dirige in direzione est (Figure 21 e 22), nel caso di moto ondoso proveniente da scirocco si osserva un flusso che si dirige verso ovest. Si conferma dunque l'effetto di riduzione del confinamento della cella compresa tra i pennelli A e B. Per quanto riguarda i settori non direttamente interessati da tale modifica strutturale non si osservano differenze significative rispetto a quanto osservato e descritto nel paragrafo 4.4..

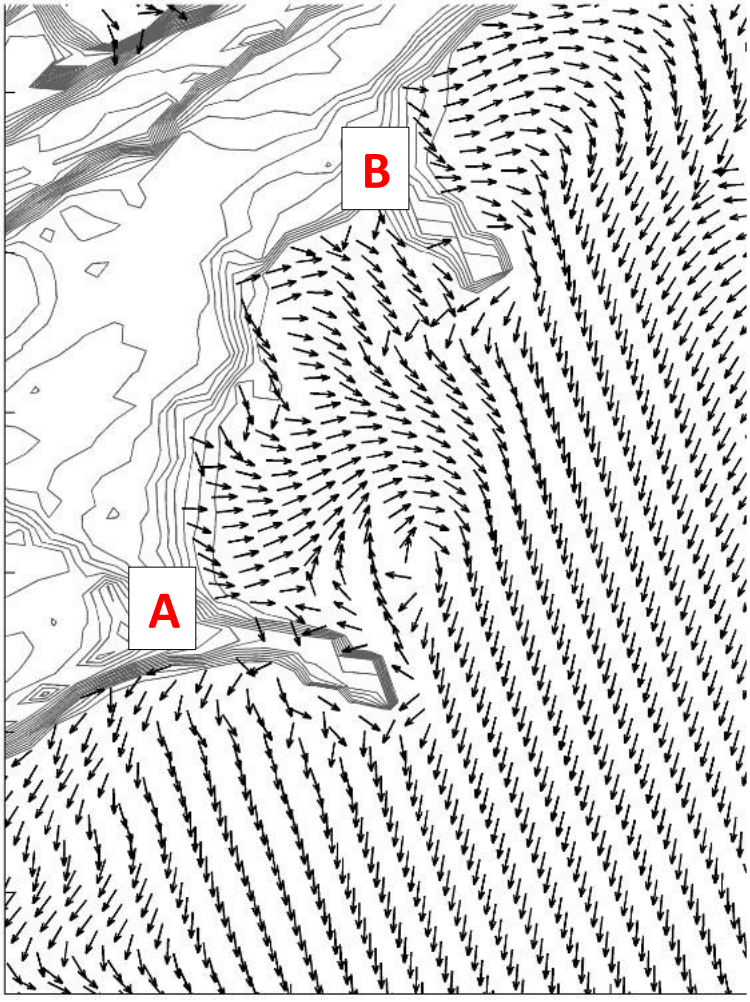


Figura 26. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore occidentale (accorciamento pennello B).

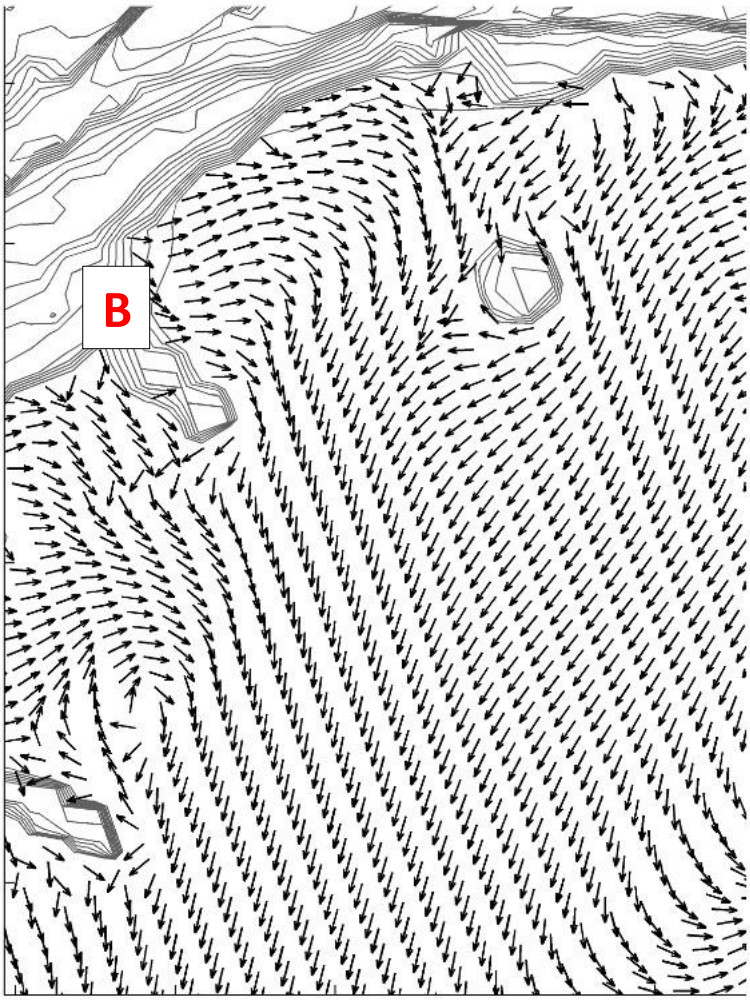


Figura 27. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-occidentale (accorciamento pennello B).

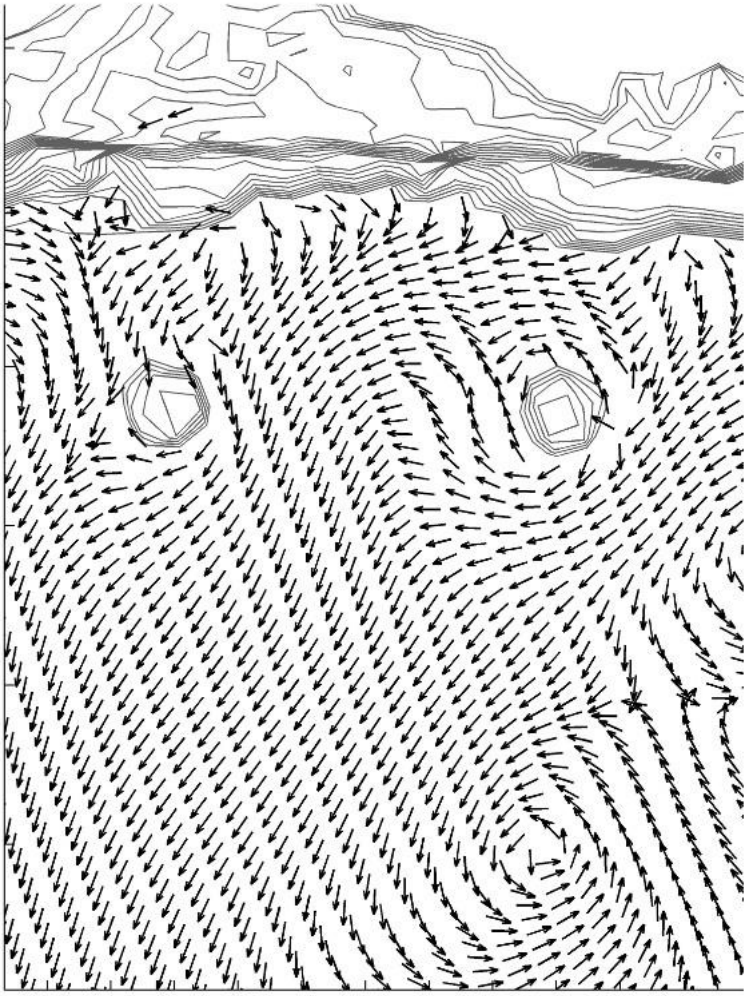


Figura 28. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore centro-orientale (accorciamento pennello B).

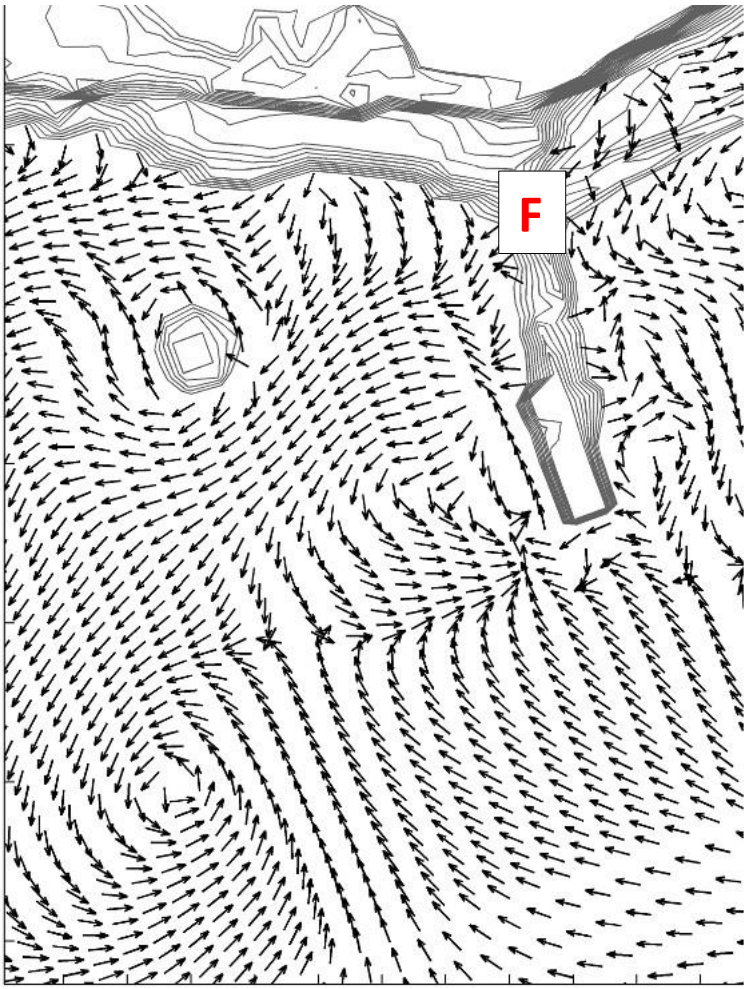


Figura 29. Scirocco con tempo di ritorno decennale, progetto - settore orientale (accorciamento pennello B).

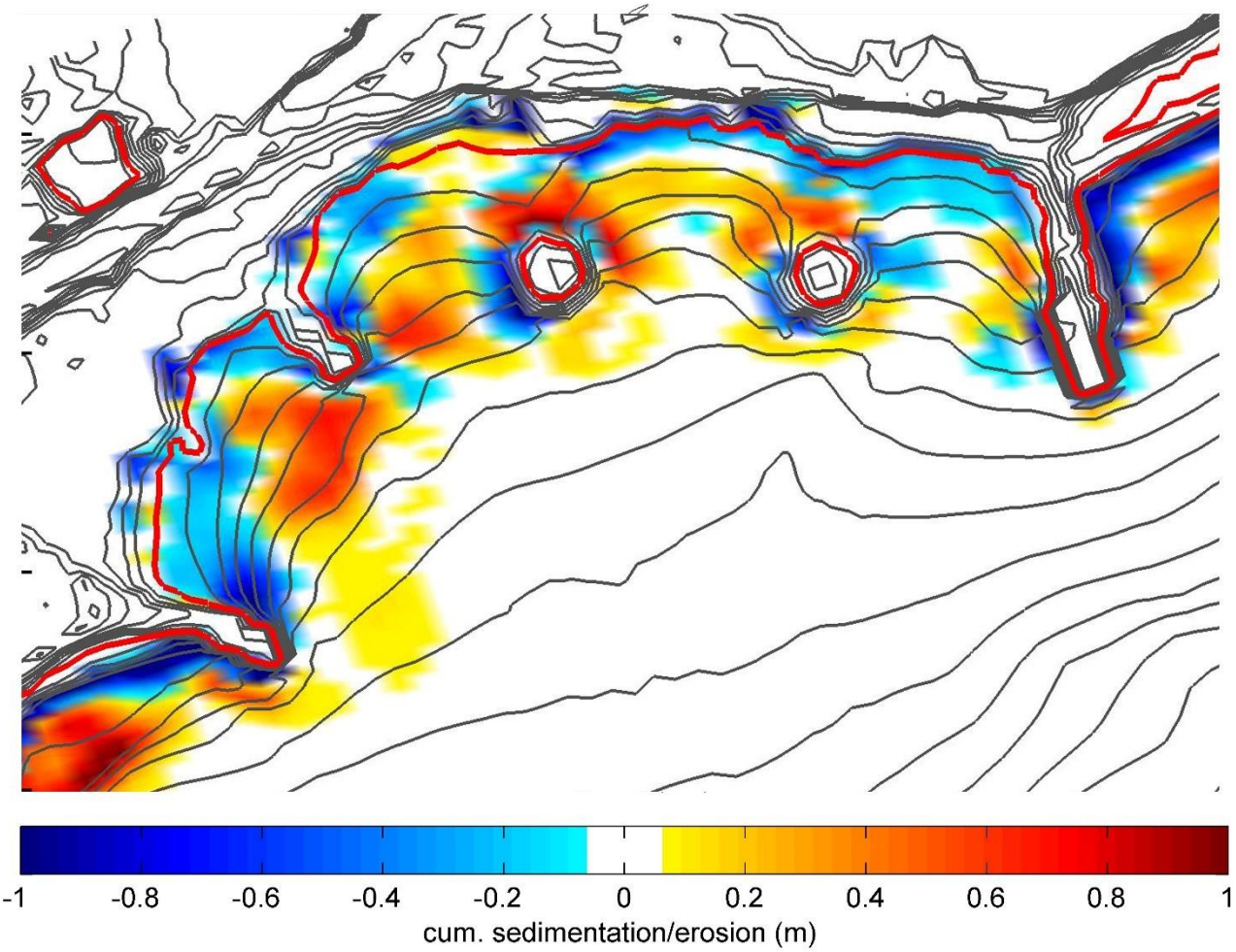


Figura 30. Processi di erosione e accumulo nel caso di scirocco con tempo di ritorno decennale, Progetto con accorciamento pennello B.

4.7 Inondazione pre e post.opera

In riferimento al servizio richiesto è stata valutata l'efficacia dell'intervento previsto dal progetto considerando le nuove opere e un ripascimento in ghiaia di 50000 m3. Il materiale è stato versato su una superficie di 25000 m3 lungo tutta la spiaggia emersa e fino alla profondità di circa 2,5 metri (Figura 31).

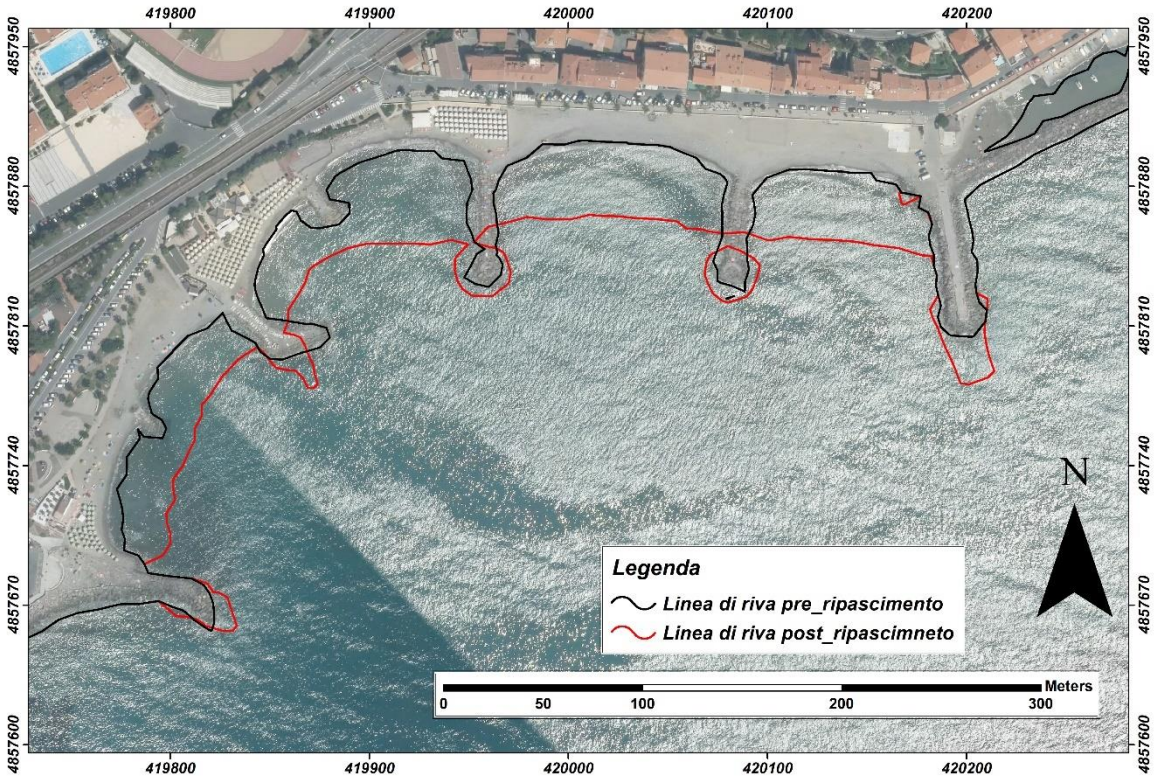


Figura 31 variazione della linea di riva pre-ripascimento e post ripascimento

Dalla figura 31 si evince un discreto avanzamento del litorale tra 25 e 38 metri; nell'area di ponente si osserva un minor avanzamento della linea di riva rispetto al settore di levante; questo è dovuto alle differenti quote batimetriche emerse dal rilievo effettuato dalla ditta Geologia Verticale.

Sulla base di questi risultati è stata effettuata una valutazione di tipo modellistico della variazione del **livello di inondazione** confrontando lo stato dell'arte (pre-ripascimento) con lo stato di progetto (post-ripascimento) per gli stati di mare di Libeccio e Scirocco con tempo di ritorno cinquantennale (Figura 32 e 33). L'analisi ha evidenziato una riduzione della vulnerabilità costiera rispetto allo stato dell'arte riducendo l'ingressione marina lungo il litorale fino a 25 metri, di media, per l'asse orizzontale.

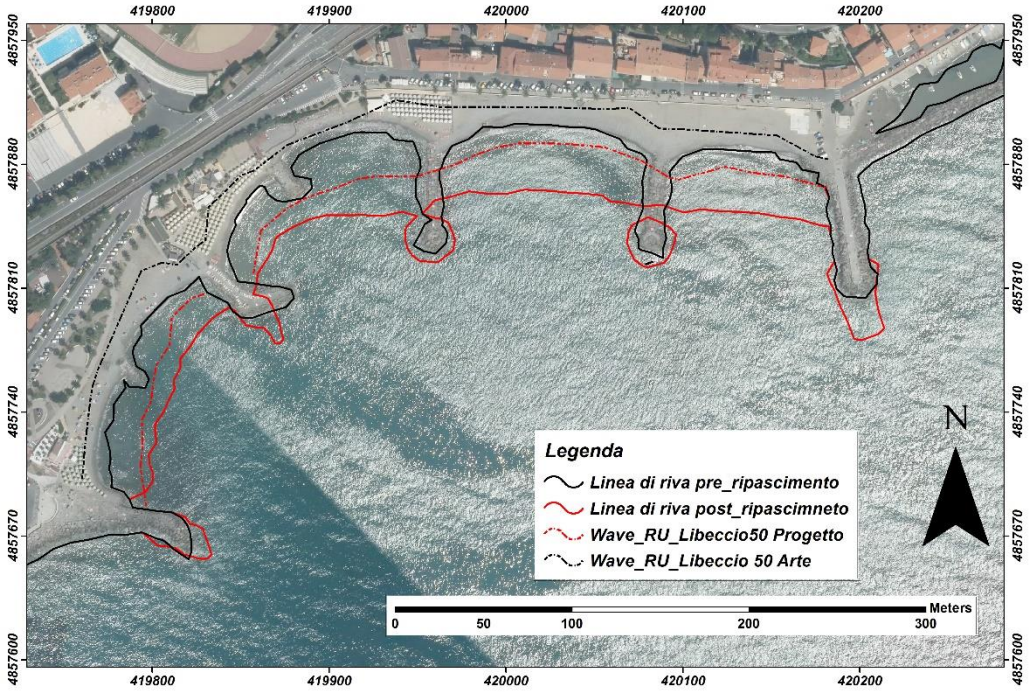


Figura 32 variazione del livello d'inondazione per Libeccio TR50

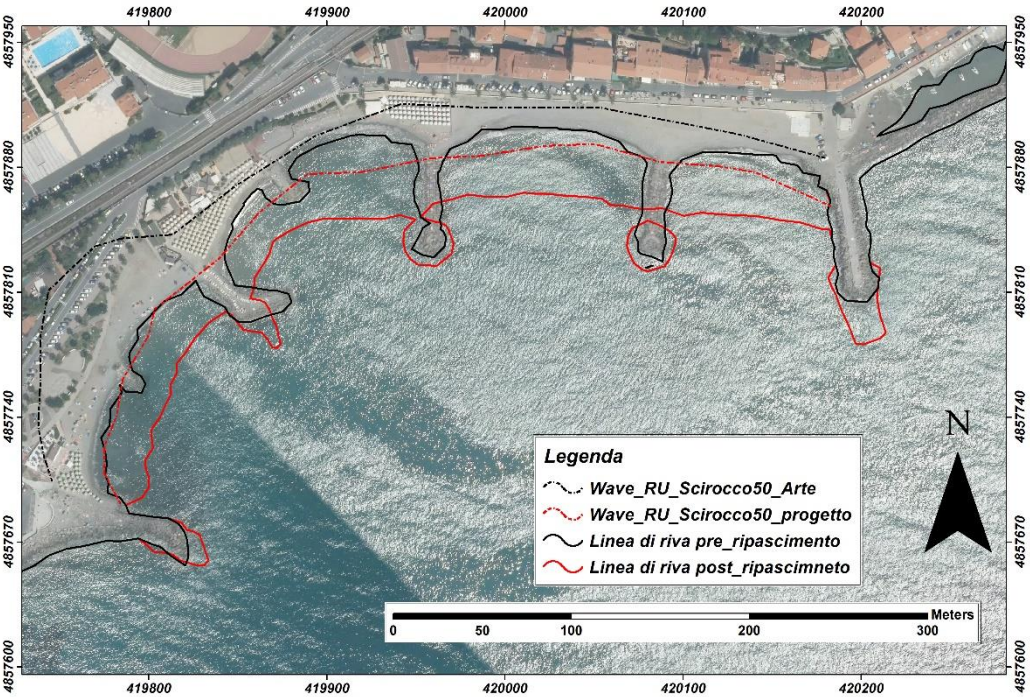


Figura 33 variazione del livello di inondazione per Scirocco TR50

4.8 Variazione della linea di riva post opera

Dopo aver delineato la nuova linea di riva ottenuta in seguito all'opera di ripascimento si è proceduto, con un approccio di tipo modellistico, alla valutazione di quali variazioni essa possa subire ad opera dei marosi. La spiaggia, post ripascimento, è stata esposta nel modello ad ondazione con tempo di ritorno sia decennale che cinquantennale di modo da confrontare le possibili variazioni sia in caso di eventi di media intensità che in caso di eventi estremi. Seguendo lo schema finora adottato, si è proceduto ad analizzare distintamente gli effetti del moto ondoso proveniente in un primo caso da sud-ovest (Libeccio) (Figura A) ed in un secondo caso da sud-est (Scirocco) (Figura B).

In entrambi i casi è evidente come la nuova linea di riva rimanga pressoché immutata in quasi tutta l'area studio mostrando, rispetto alle previsioni dei fenomeni di erosione/accumulo precedentemente discusse, una sostanziale discrepanza di magnitudine. Previsioni che fanno però riferimento alla granulometria attuale della spiaggia. Questa discrepanza va infatti attribuita al diverso materiale scelto per il ripascimento ovvero la ghiaia. Tale materiale, appartenendo ad una classe granulometrica caratterizzata da un diametro medio apprezzabilmente maggiore, oppone per natura una migliore resistenza al trasporto ad opera del moto ondoso.

Notiamo inoltre come le uniche variazioni rilevanti si verificano nella cella delimitata dalle due piattaforme isola a progetto, le quali andranno a sostituire i pennelli attualmente presenti, precedentemente denominati "Pennello D" e "Pennello E". Oltre a quanto finora detto è possibile notare come i processi di erosione/accumulo, pur fortemente ridotti, siano coerenti nella dinamica con quanto precedentemente descritto, nonostante la differenza di materiale. Sia pre che post ripascimento si evidenzia infatti una leggera tendenza al sequestro nella parte centrale della spiaggia contestualmente ad una tendenza al deposito sul lato nord della piattaforma isola sostitutiva del Pennello D. Ciò si confà alla previsione di effetto tombolo precedentemente esposta.

Più nel dettaglio, nel caso di marosi provenienti da Libeccio, come già più volte evidenziato l'orientamento della costa ne determina un parziale ridossamento. La variazione della linea di riva nella porzione delimitata dalle piattaforme isola (Pennello D ed E) in seguito ad un evento con tempo di ritorno decennale è infatti minima; maggiore ma sempre contenuta la variazione in seguito ad un evento estremo. Inoltre, eccetto che per la suddetta porzione, nel resto dell'area studio non vi è alcun effetto apprezzabile sulla posizione della linea di riva anche in caso di evento straordinario.

Nel caso dello Scirocco, infine, la situazione cambia di poco. Infatti, troviamo nuovamente fenomeni di erosione/accumulo compatibili con effetto tombolo sempre nella stessa zona descritta nel caso precedente. Tuttavia, come è facile immaginare, onde provenienti da questa direzione sono più impattanti sulla stabilità dell'arenile, sia che si valutino tempi di ritorno decennali che cinquantennali. Ciò detto la variazione, per quanto maggiore che da Libeccio, si mantiene piuttosto contenuta. Unico nuovo elemento evidenziabile ma solo in caso di evento estremo, un modesto processo erosivo ai danni della parte centrale delle prime due baie da ponente, delimitate rispettivamente dai pennelli A-B e B-D.

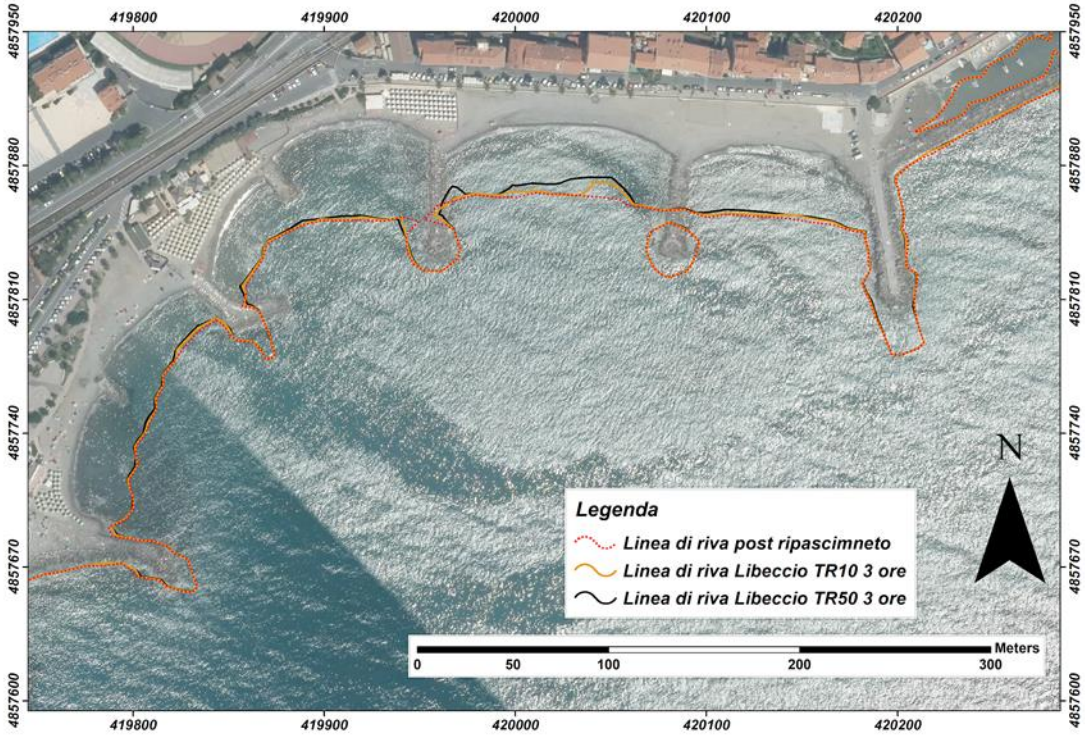


Figure 34 Posizione della linea di riva post ripascimento ed in seguito a ondazione proveniente da Libeccio con tempo di ritorno di 10 e 50 anni

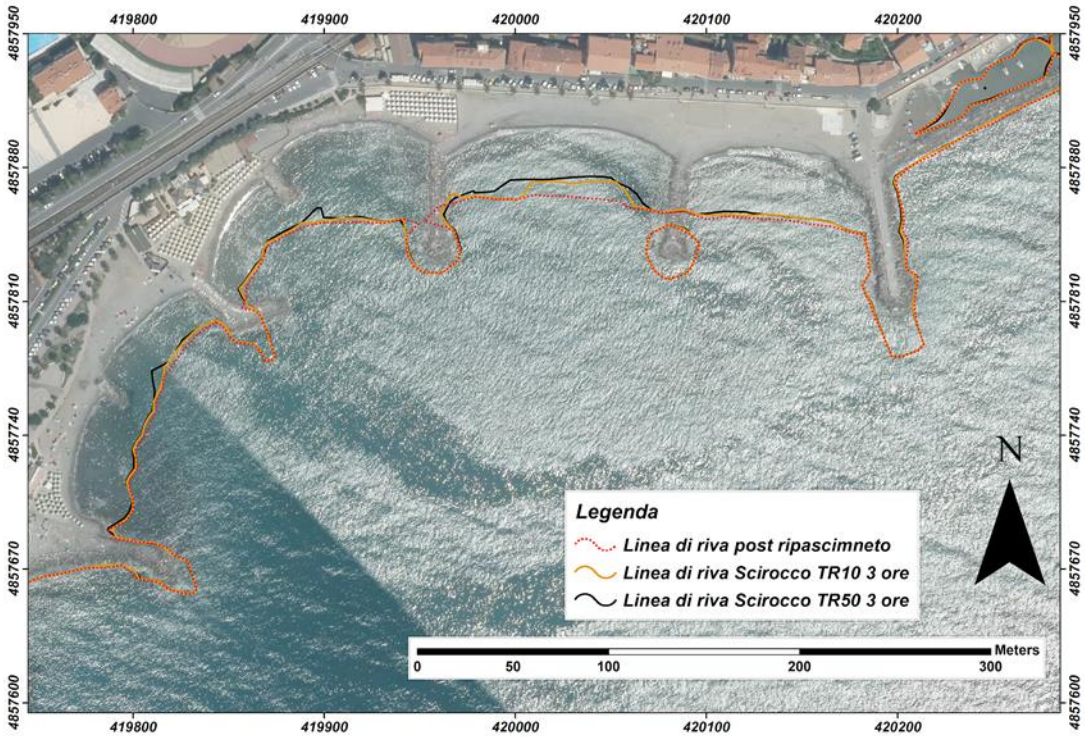


Figure 35 Posizione della linea di riva post ripascimento ed in seguito a ondazione proveniente da Scirocco con tempo di ritorno di 10 e 50 anni.

In fede

Luigi Mucerino



5. Bibliografia citata

Bolle, A., Mercelis, P., Roelvink, D., Haerens, P., & Trouw, K. (2011). Application and validation of XBeach for three different field sites. Coastal Engineering Proceedings, 1(32), sediment-40.

Carpi, L., Mucerino, L., Besio, G., Corradi, N., & Ferrari, M. (2020). MAREGOT project experience: Integrated approach to understanding coastal dynamics behaviour. In 2019 IMEKO TC19 International Workshop on Metrology for the Sea: Learning to Measure Sea Health Parameters, MetroSea (pp. 167-171).

Carpi, L., Bicenio, M., Mucerino, L., & Ferrari, M. (2021). Detached breakwaters, yes or not? A modelling approach to evaluate and plan their removal. Ocean & Coastal Management, 210, 105668.

McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T. G., Roelvink, J. A., Almeida, L. P., Davidson, M., & Russell, P. E. (2014). Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. Coastal Engineering, 91, 231-250.

Mucerino, L., Albarella, M., Carpi, L., Besio, G., Benedetti, A., Corradi, N., Firpo M. & Ferrari, M. (2019). Coastal exposure assessment on Bonassola bay. Ocean & coastal management, 167, 20-31.

Mucerino, L., Carpi, L., Schiaffino, C. F., Pranzini, E., Sessa, E., & Ferrari, M. (2021). Rip current hazard assessment on a sandy beach in Liguria, NW Mediterranean. Natural Hazards, 105(1), 137-156.

Regione Liguria. PIANO DI TUTELA DELL'AMBIENTE MARINO E COSTIERO (PTAMC), 2020. Ambito Costiero 17 – unità fisiografiche Cinque Terre e Muzzerone (ART. 41 LEGGE REGIONALE N° 20/2006).

Roelvink, D. (2011). A guide to modeling coastal morphology, volume 12. World Scientific.

Roelvink, D., Van Dongeren, A., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., De Vet, L., Nederhoff, K., and Quataert, E. (2019). XBeach technical reference: Kingsday release. Delft, The Netherlands: Deltares, Technical report.

Balkema, A., de Haan, L., 1974. Residual Life Time at Great Age. The Annals of Probability. 2(5):792-804

Boccotti, P. (1997). Idraulica marittima. UTET Universita.

Choulakian, V., & Stephens, M. A. (2001). Goodness-of-fit tests for the generalized Pareto distribution. Technometrics, 43(4), 478-484.

Coles, S., J. Bawa, L. Trenner, and P. Dorazio (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values, Volume 208. Springer

De Leo, F., S. Solari, and G. Besio (2020). Extreme wave analysis based on atmospheric pattern classication: an application along the italian coast. Natural Hazards and EarthSystem Sciences 20 (5), 1233{1246}.

Goda, Y. (2003). Revisiting wilson's formulas for simplied wind-wave prediction. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering 129 (2), 93{95.

Gumbel, E. J. (1958). Statistics of extremes. Columbia university press.

Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods, 4th edition, Charles Griffin, London.

MacQueen, J. et al. (1967). Some methods for classication and analysis of multivariate observations. In Proceedings of the fth Berkeley symposium on mathematical statisticsand probability, Volume 1, pp. 281{297. Oakland, CA, USA

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013). Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea. Journal of Coastal Research, (65 (10065)), 1551-1556.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. Ocean Modelling, 90, 82-94.

Pickands III, J. (1975). Statistical inference using extreme order statistics. the Annals of Statistics, 119-131.