



**REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO INDUSTRIALE PER
LA PRODUZIONE DI SOLFATO DI POTASSIO E
CLORURO DI SODIO RICRISTALLIZZATO DALLA
KAINITE**

PROGETTO PRELIMINARE DELLE OPERE DI PRESA ACQUE DI MARE E
SCARICO SALAMOIE A SERVIZIO DELL'IMPIANTO INDUSTRIALE

**All.1.3. Studio idraulico - marittimo del paraggio interessato
dalle condotte sottomarine**

Palermo: 18.03.2016

Codice Elaborato:
ITKSMR_PS_PC1.3

Supervisione per la Italkali - Società
Italiana Sali Alcalini S.p.A.

Dott. Chim. Francesco Lanzino

Redatto da:



Indice

1	Premessa	1
2	Fonti di informazione	2
3	Descrizione del paraggio	3
4	Caratterizzazione dei venti	5
5	Caratterizzazione del moto ondoso al largo	8
5.1	Dati ondametrici a disposizione	8
5.2	Analisi del clima ondoso	10
6	Previsione degli eventi estremi di moto ondoso al largo	13
6.1	Individuazione delle mareggiate: Peak Over Threshold	13
6.2	Distribuzioni di probabilità degli eventi estremi di moto ondoso e test statistico di Kolmogorov-Smirnov	14
6.2.1	Distribuzione di Gumbel	14
6.2.2	Distribuzione di Weibull	15
6.2.3	Distribuzione Generalized Extreme Value	15
6.2.4	Test di Kolmogorov-Smirnov	15
6.3	Adattamento delle distribuzioni di probabilità alle mareggiate	16
6.4	Stima dell'altezza d'onda al largo per fissati tempi di ritorno	22
7	Propagazione del moto ondoso da largo all'area della condotta sottomarina	26
7.1	Il modello <i>Simulating WAves Nearshore</i>	26
7.2	Mesh di calcolo e condizioni al contorno	28
7.3	Caratteristiche del moto ondoso nell'area della condotta	30
8	Studio del trasporto solido	32
8.1	Modello matematico per il trasporto solido	32
8.2	Calcolo della profondità di chiusura	35
8.2.1	Formula di Hallermeier	35
8.3	Analisi dei risultati	37
9	Verifica di massima delle sollecitazioni idrauliche per la condotta di presa e per la condotta di scarico	43
9.1	Premessa	43
9.2	L'ambiente fisico	44

9.3	Determinazione del tipo di tubazione per la formazione delle condotte	44
9.4	Modalità di posa	46
9.5	Valutazione delle forze idrodinamiche indotte dal moto ondoso sulla condotta sottomarina	46
9.6	Calcolo di massima della condotta sottomarina di presa	49
10	Sintesi dei risultati e conclusioni	53

1 Premessa

Il presente studio ed i calcoli in esso riportati sono stati realizzati a supporto della redazione di un rapporto preliminare ambientale, finalizzato all'attivazione della procedura di *scoping* ex art. 21 D.Lgs. 152/06 presso il Ministero dell'Ambiente (ordine n. SF0014 del 11/01/2016), mirante alla realizzazione di un impianto di produzione di solfato di potassio e cloruro di sodio ricristallizzato che l'Italkali (società italiana sali alcalini s.p.a.) intende realizzare nel territorio di Realmonte.

Il processo industriale dell'impianto per il suo funzionamento, necessità di acqua e fine del ciclo di produzione è previsto lo scarico a mare di salamoia.

Il progetto prevede :

- l'adduzione di acqua marina all'impianto industriale con una condotta di presa connessa ad un impianto di sollevamento, il cui tracciato si sviluppa a mare per circa 1300,00 m e a terra dalla spiaggia per circa 1880,00 m fino a raggiungere l'impianto di produzione posto a quota 72,00 s.l.m.m.;
- per lo scarico della salamoia è prevista una condotta di scarico che seguendo lo stesso tracciato della condotta di presa raggiungerà la batimetrica di -8,00 m sotto il l.m.m.

Al fine di verificare le condotte sottomarine sia per la stabilità delle stesse e sia per la qualità delle acque marina da aspirazione con la condotta sottomarina, in relazione alle caratteristiche sedimentologica dei fondali è stato messo a punto uno studio idraulico – marittimo volto alla valutazione del clima ondoso del paraggio di Realmonte interessato dall'opera in progetto.

Lo studio inoltre è stato rivolto alle determinazione degli eventi ondoso estremi da assumere a base di calcoli di verifica di stabilità delle condotte sottomarina.

2 Fonti di informazione

Il presente studio è stato redatto sulla base delle informazioni desunte dalle fonti di seguito riportate. In particolare, le informazioni cartografiche necessarie per la stesura del presente studio sono state desunte dalle seguenti carte:

- Carta Nautica dell'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiana "Stretto di Sicilia - Sicilia - Rada di Porto Empedocle" (scala 1:20000, 1994);
- Carta Nautica dell'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiana "Stretto di Sicilia - Sicilia - Da Sciacca a Licata" (scala 1:100000, 1993).

Lo studio del clima meteomarinò è stato redatto sulla base delle seguenti informazioni:

- dati ondametrici ricavati dal modello di rianalisi dell'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), chiamato *ERA-Interim*, il quale copre un periodo dal 1979 fino al presente;
- dati anemometrici ricavati dal modello di rianalisi dell'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), chiamato *ERA-Interim*, il quale copre un periodo dal 1979 fino al presente.

Lo studio relative alla tipologia dei sedimenti è stato redatto sulla base delle seguenti carte:

- Consiglio Nazionale delle Ricerche - Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica – "Atlante delle Spiagge Italiane" Foglio 266 Sciacca (scala 1:100000, 1995);
- Consiglio Nazionale delle Ricerche - Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica – "Atlante delle Spiagge Italiane" Foglio 271 Agrigento (1:100000, 1995).

3 Descrizione del paraggio

Il sito in esame si presenta a largo di Realmonte (AG), in particolare nel paraggio tra Capo Rossello e Pergole, i due promontori che “abbracciano” l’area in esame.

Nella Figura 3.1 è possibile individuare l’asse della condotta, che parte dalla linea di costa fino ad arrivare alla batimetrica di profondità 15 m, dove è stata posta l’opera di presa.

L’oggetto dello studio è la zona interessata dalla posa della condotta sottomarina relativa all’opera di presa e all’opera di scarico dell’impianto.

L’area analizzata ricade a cavallo tra le unità fisiografiche costiere 10 (Punta Bianca - Capo Rossello) e 11 (Capo Rossello - Capo San Marco) (Figura 3.1). Tali unità costiere si presentano, nella zona di interesse, con tratti a costa bassa e sabbiosa.

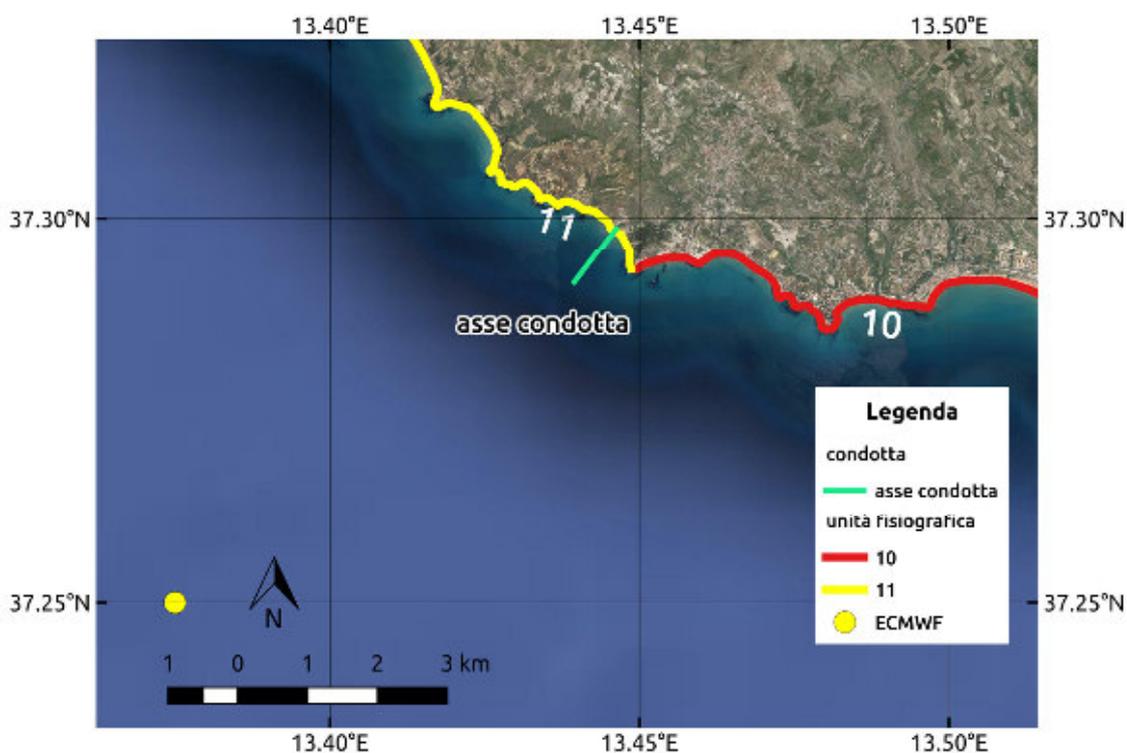


Figura 3.1: Inquadramento geografico dell’area oggetto di studio e delle unità fisiografiche 10 e 11 di interesse (coordinate WGS84).

Come illustrato nella Figura 3.2, si rileva che per il paraggio in esame si possono distinguere due settori di traversia principali: il primo risulta ampio all'incirca 70°, essendo compreso tra le direzioni 155°N e 225°N, e il secondo risulta ampio 20°, essendo compreso tra le direzioni 275°N e 295°N. All'interno dei suddetti settori, il valore maggiore di *fetch* geografico è rilevabile nella direzione 147.5°N pari a 884 km e valore medio di circa 500 km, mentre nel secondo settore di traversia si rileva il *fetch* geografico massimo pari a 1371 km nella direzione 274.5°N e minimo pari a 848 km nella direzione 293.5°N.

Si evidenzia, come la determinazione dell'area di generazione tramite i *fetch* geografici sopra descritti risulta limitante, in quanto non tiene conto del fatto che il vento non trasmette energia alla superficie del mare solo lungo la sua direzione di provenienza, ma anche secondo direzioni ad essa limitrofe.

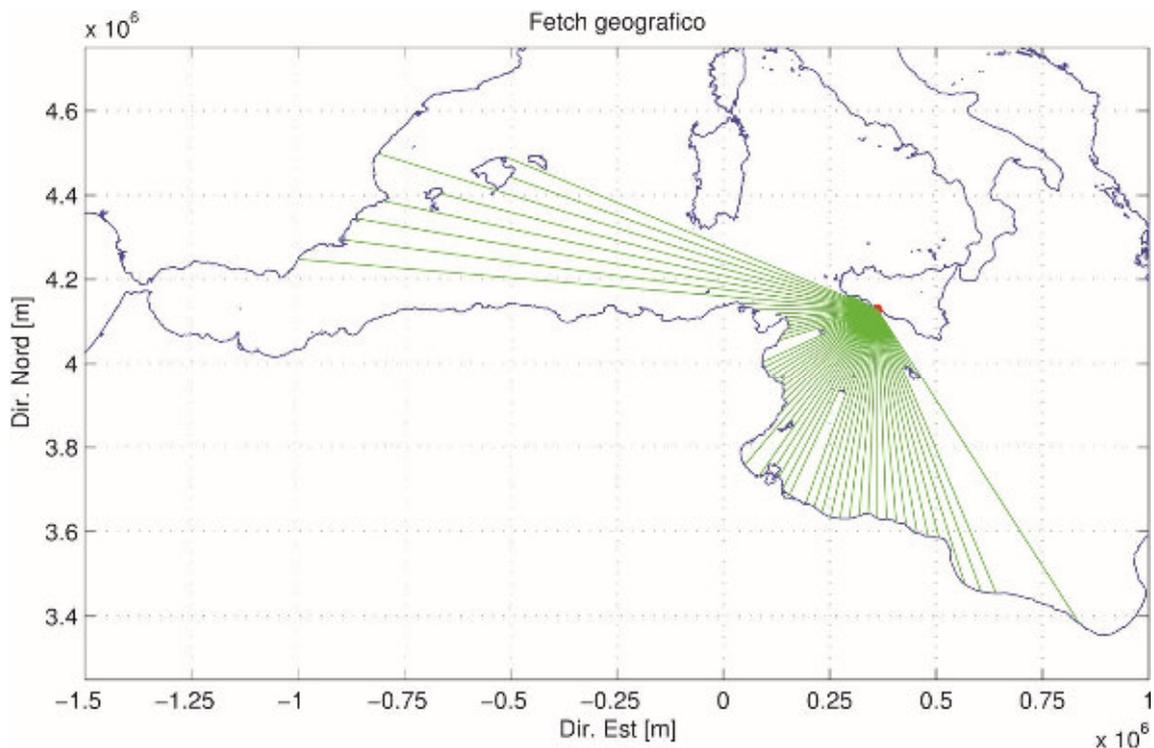


Figura 3.2: *Fetch* geografico del paraggio in esame.

4 Caratterizzazione dei venti

La caratterizzazione dei venti al largo del paraggio in esame è stata condotta sulla base dei dati anemometrici del progetto di rianalisi dell'ECMWF. In particolare, è stata utilizzata la serie temporale della variabile "10 m wind speed", disponibile da gennaio 1979 a dicembre 2015 nel punto avente coordinata 13.375°E - 37.25°N (Figura 3.1), ovvero al largo del paraggio in esame (Figura 4.1).

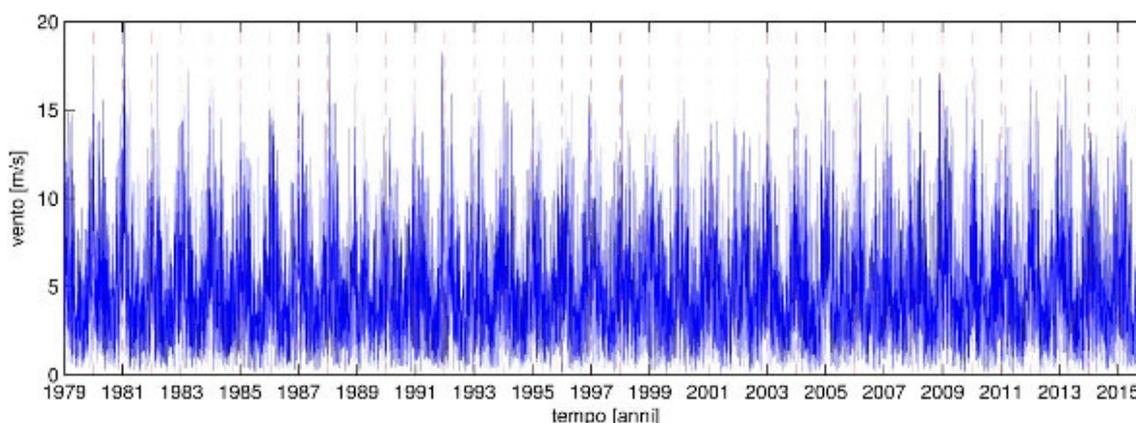


Figura 4.1: Serie temporale di dati anemometrici utilizzati per la caratterizzazione del regime dei venti nel periodo 01/01/1979-31/12/2015.

A partire da tali dati è stata analizzata la persistenza dei venti, come mostrato nelle Figure 4.2, 4.3 e 4.4 rispettivamente l'intera serie temporale, per la stagione estiva e quella invernale. Si evince come il regime ventoso sia caratterizzato da una predominanza di venti provenienti da Nord-Ovest (NO) sia in termini di frequenza che di valore massimo di velocità, tuttavia è considerevole anche il contributo proveniente dalla direzione diametralmente opposta (SE) in termini di valore di velocità, anche se pur meno frequenti.

Si rimanda all'Allegato A per la persistenza mese per mese dei venti, dalla quale si evince che la componente proveniente da Sud-Est risulta essere molto meno frequente durante i mesi estivi, mentre la componente NO mantiene la sua frequenza anche durante tali mesi.

vento 01Jan1979 – 31Dec2015 N=54056

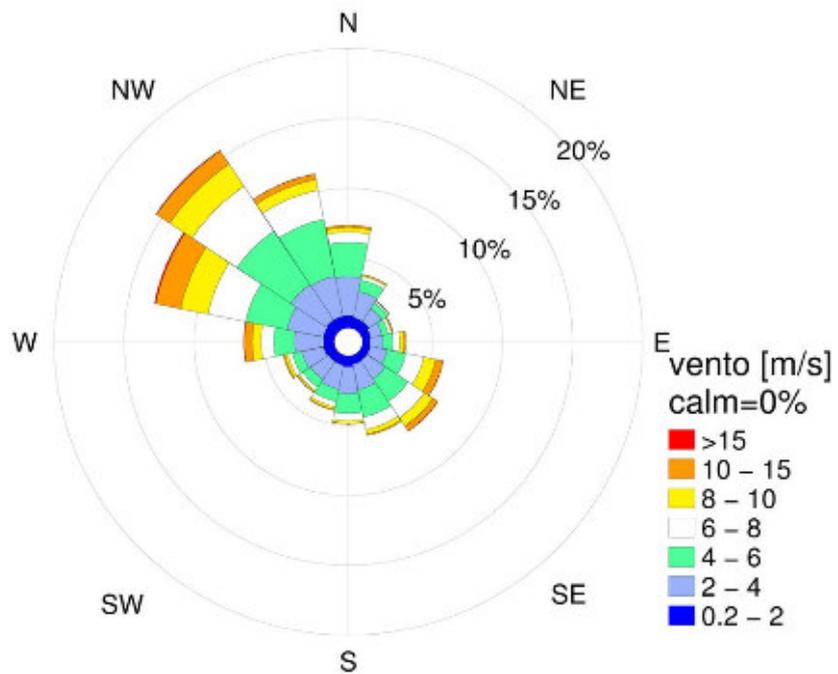


Figura 4.2: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame.

vento Mag–Sett N=27232

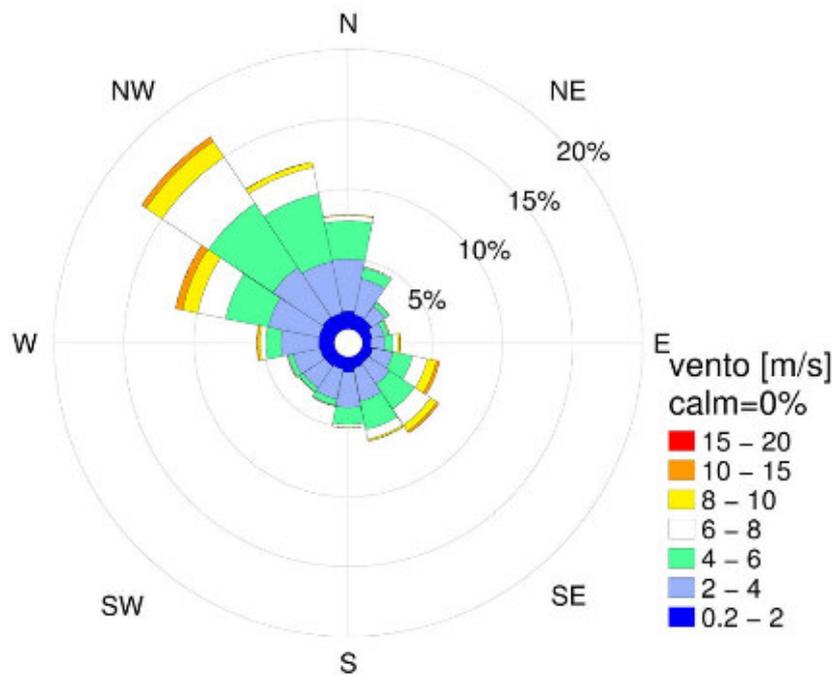


Figura 4.3: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nella stagione estiva.

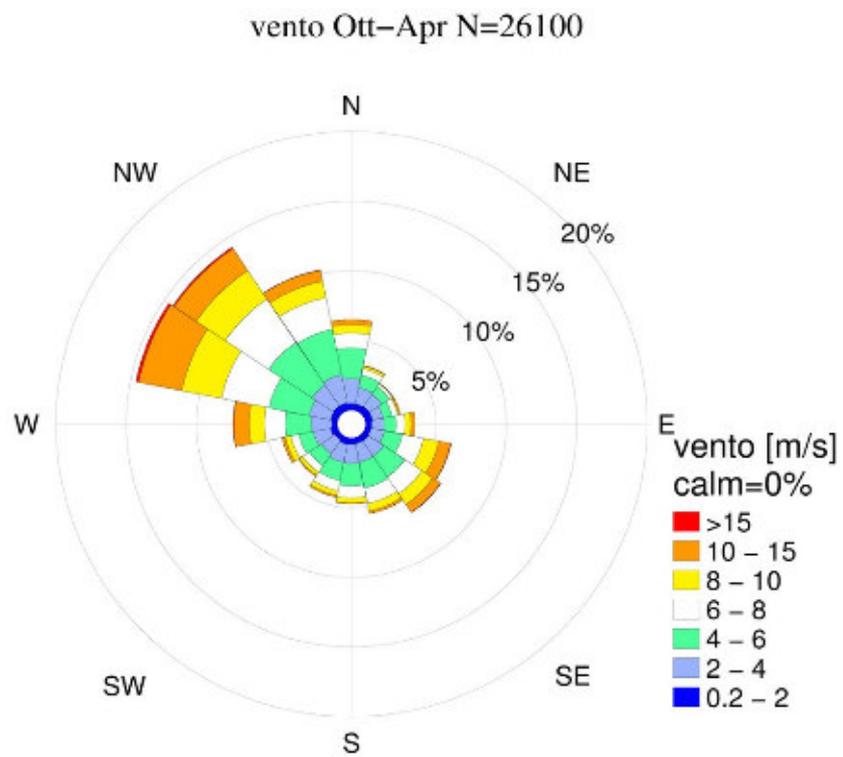


Figura 4.4: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nella stagione invernale.

5 Caratterizzazione del moto ondoso al largo

Com'è noto, le forzanti meteomarine che rivestono maggiore interesse ai fini dello studio dell'evoluzione dei litorali sono i venti, le correnti, le onde e le escursioni di marea. Tuttavia nel caso in esame per la definizione dello stato del mare, si può senz'altro affermare che bisogna anzitutto analizzare le forzanti più significative dal punto di vista energetico, e quindi individuare la direzione prevalente del flusso energetico e il clima ondoso che si riscontra al largo del paraggio.

Il tratto di costa in esame risulta privo di boe ondometriche che possano rappresentare il clima ondoso al largo nella sua interezza. Infatti la boa ondometrica gestita dall'ISPRA più prossima all'area in esame è quella di Mazara del Vallo, distante oltre 85 km. Per tale motivo si è scelto di utilizzare i dati ondometrici determinati dal modello ondometrico di rianalisi dell'ECMWF, disponibili dal 1979 in poi.

5.1 Dati ondometrici a disposizione

ECMWF ha supportato la creazione e lo sviluppo del progetto ERA-INTERIM, il quale, avendo rimpiazzato il vecchio progetto di rianalisi ERA-40, compie una rianalisi delle condizioni di atmosfera (venti) e superficie libera a scala globale a partire dall'anno 1979 al presente. I dati vengono acquisiti da radar altimetrici, processati da modelli ondometrici di terza generazione (detti WAM) e successivamente vengono sottoposti a controlli che ne assicurano la loro consistenza (Dee et al., 2011).

Sotto questo contesto si è scelto di utilizzare la serie di dati ondometrici disponibili presso l'ECMWF relativi alla coordinata 13.375°E - 37.25°N (Figura 3.1), riferiti al periodo 01/01/1979 – 31/12/2015. Nelle Figure 5.1, 5.2 e 5.3 sono riportate rispettivamente le altezze d'onda significative H_S , periodo di picco T_P e direzione media delle onde.

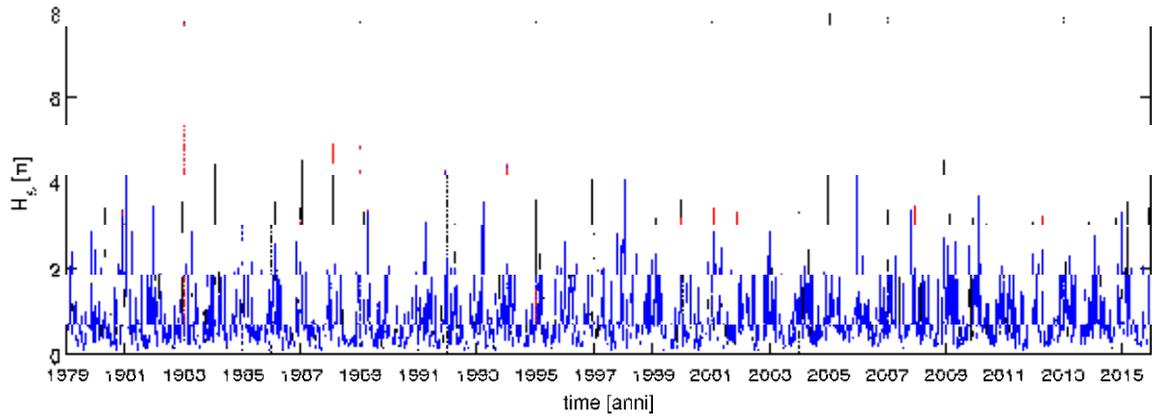


Figura 5.1: dati ondametrici di altezza d'onda significativa H_s ECMWF, coordinata 13.375°E - 37.25°N.

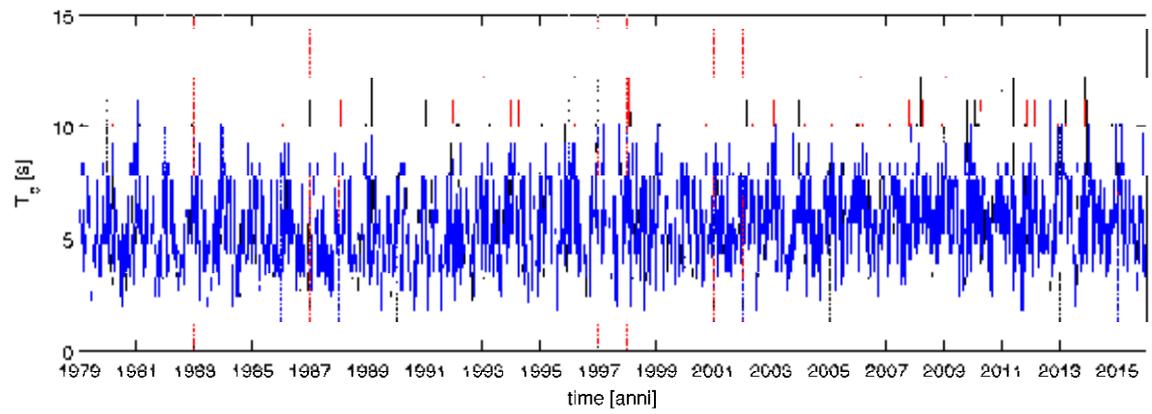


Figura 5.2: dati ondametrici di periodo di picco T_p ECMWF, coordinata 13.375°E - 37.25°N.

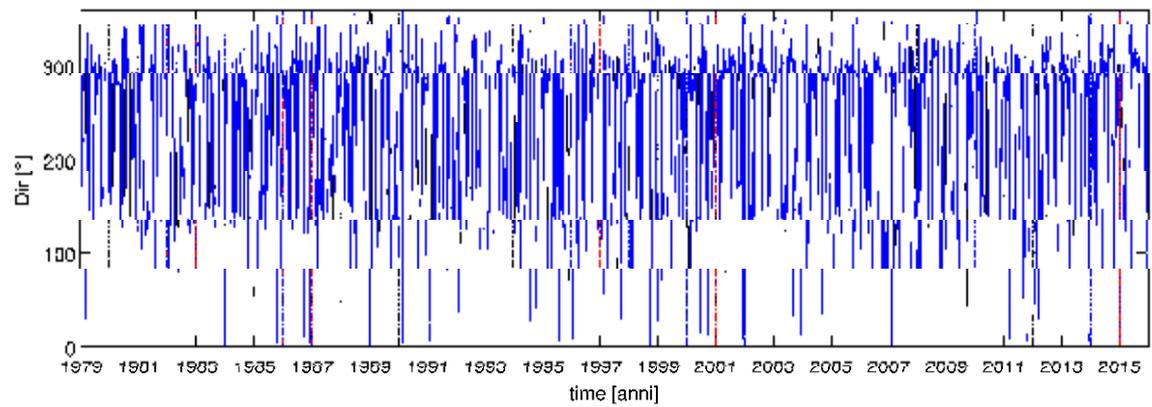


Figura 5.3: dati ondametrici di direzione media delle onde ECMWF, coordinata 13.375°E - 37.25°N.

5.2 Analisi del clima ondoso

Le suddette serie storiche sono state sintetizzate riportando la frequenza di eventi per classe di altezza d'onda per ogni direzione di provenienza.

Dalla Figura 5.4 è possibile osservare che il regime medio annuo è caratterizzato principalmente dal moto ondoso proveniente dalle direzioni Ovest-Nordovest e Nordovest, che si manifesta con i valori massimi di H_s e più frequenti, mentre secondariamente dalle direzioni Ovest, Sud-Est e Sud-Sudest.

L'analisi stagionale (Figure 5.5 e 5.6) mostra come la direzione Ovest-Nordovest mantenga la sua predominanza anche nelle stagioni calde, confermando anche un certo legame con l'andamento stagionale dei venti, descritto precedentemente nella sezione 4.

Dalle suddette analisi è possibile individuare i settori più importanti per la descrizione del moto ondoso al largo del paraggio in esame, riportate in Tabella 5.1.

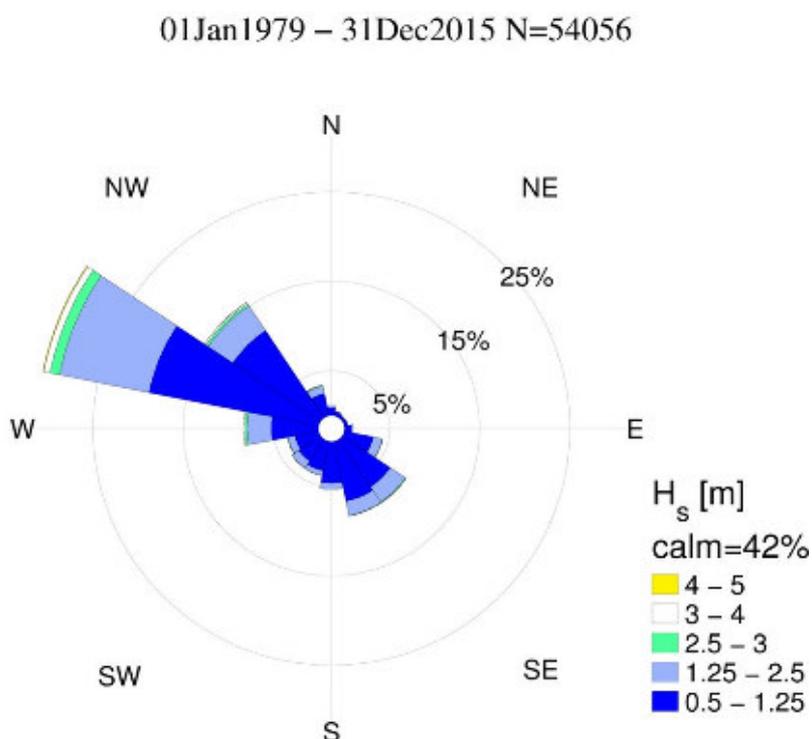


Figura 5.4: Persistenza delle onde per l'intera serie temporale ondometrica ECMWF 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame.

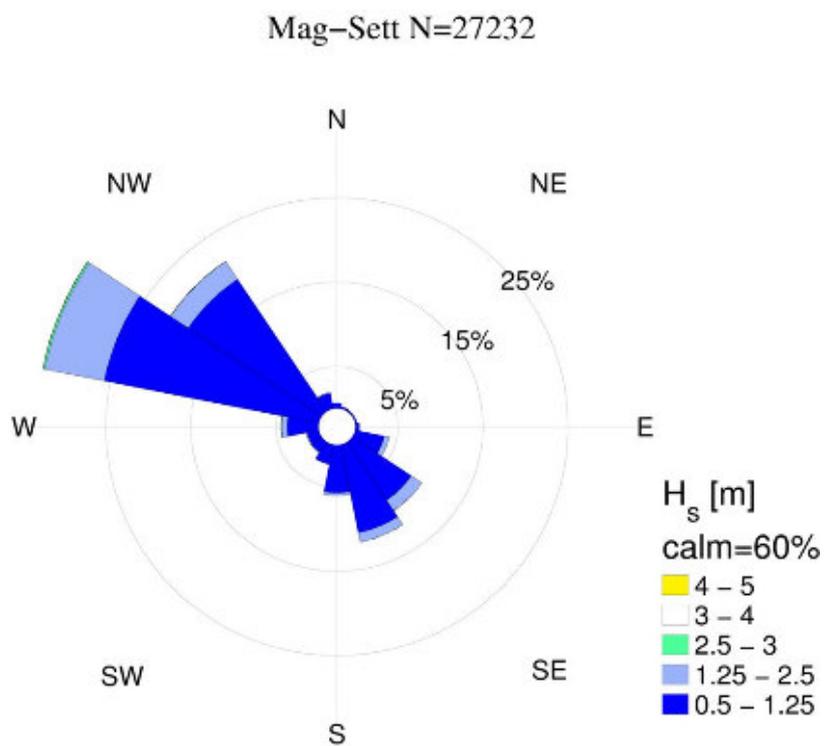


Figura 5.5: Persistenza delle onde per l'intera serie temporale ondometrica ECMWF 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nella stagione estiva.

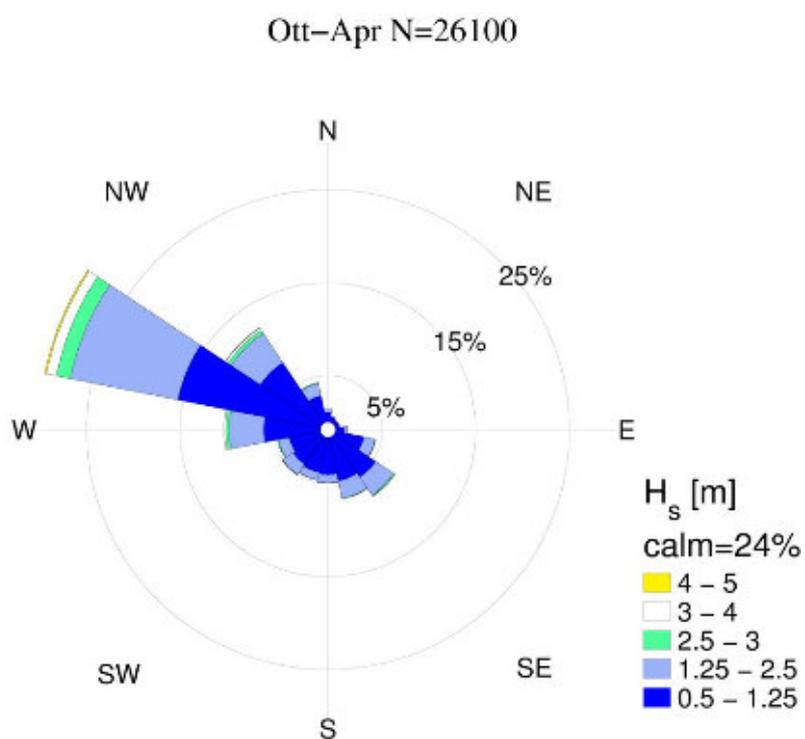


Figura 5.6: Persistenza delle onde per l'intera serie temporale ondometrica ECMWF 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nella stagione invernale.

Tabella 5.1: I settori più importanti per la descrizione del moto ondoso al largo del paraggio in esame.

nome	settore [°]		Dir
A	123.75	146.25	SE
B	146.25	168.75	SSE
C	168.75	191.25	S
D	191.25	213.75	SSO
E	213.75	236.25	SO
F	236.25	258.75	OSO
G	258.75	281.25	O
H	281.25	303.75	ONO
I	303.75	326.25	NO
L	326.25	348.75	NNO

6 Previsione degli eventi estremi di moto ondoso al largo

Come precedentemente detto, a causa dell'assenza di rilievi diretti del moto ondoso in prossimità del paraggio in esame, il clima meteomarinario, come illustrato nel capitolo precedente, è stato determinato utilizzando i dati di output della griglia del modello ondometrico di rianalisi dell'ECMWF, posto in prossimità della zona di interesse.

Per ogni serie di dati ondometrici analizzata si è studiato l'andamento degli eventi estremi, tramite l'adattamento di particolari funzioni di distribuzione, dette "asintotiche del massimo valore". Queste funzioni si adattano bene ad interpretare l'andamento di variabili casuali che rappresentano i valori massimi di un ulteriore insieme di dati. In particolare, sono state prese in esame le distribuzioni di Gumbel, Weibull e GEV (acronimo dell'inglese *Generalized extreme value*). Ovviamente tale analisi non può essere condotta direttamente sulla serie di dati di partenza, da cui, infatti, deve essere estratta una sotto-serie che rappresenta i cosiddetti "eventi estremi", ovvero, in questo caso, le mareggiate. Le mareggiate sono state selezionate utilizzando il metodo *Peak Over Threshold* (Leadbetter, 1991). Infine, delle distribuzioni di probabilità trovate è stata verificata la bontà di adattamento tramite il test di Kolmogorov-Smirnov.

6.1 Individuazione delle mareggiate: Peak Over Threshold

Il metodo Peak Over Threshold (POT) è basato nella definizione di "evento estremo", ovvero il valore massimo di una mareggiata superante una soglia predeterminata (s), che abbia almeno una durata minima (d_{min}) e che sia non dipendente da un evento vicino nel tempo (al fine di avere eventi non autocorrelati), quindi separati da un determinato tempo di calma (d_{calma}). Quindi, una mareggiata è definita quando una serie di valori H_S eccede la soglia s per almeno un tempo d_{min} , ed un successivo evento viene definito quando i valori di H_S stanno al di sotto della soglia per la durata d_{calma} .

Per il presente studio è stato posto $s = 1.5$ m, $d_{min} = 12$ ore e $d_{calma} = 12$ ore.

I grafici riportanti l'individuazione delle mareggiate per ogni direzione significativa (riportata nella Tabella 5.1) e per il caso omnidirezionale sono riportati nell'allegato A.

Nella Figura 6.1 è sintetizzata l'individuazione degli eventi estremi tramite il metodo POT, tramite numerosità differenziate per classi di ampiezza pari a 0.25 m e per direzione.

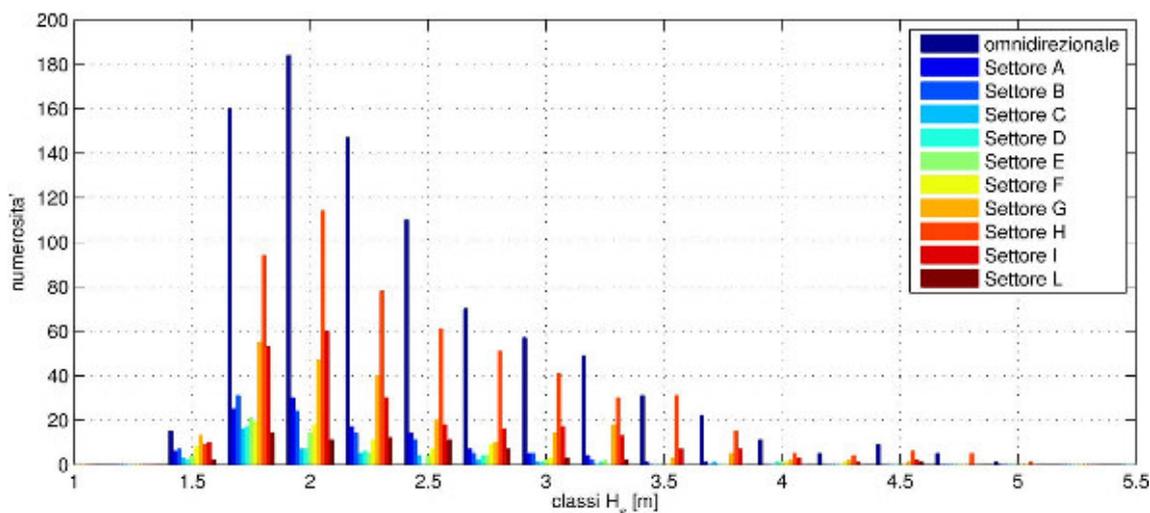


Figura 6.1: Distribuzioni per classi di ampiezza 0.25 m e per direzioni delle mareggiate individuate nella serie storica di H_s analizzata tramite POT.

6.2 Distribuzioni di probabilità degli eventi estremi di moto ondoso e test statistico di Kolmogorov-Smirnov

Per la previsione degli eventi estremi di moto ondoso sono state adattate le seguenti distribuzioni di probabilità degli eventi estremi ai dati analizzati e la loro bontà di adattamento è stata verificata tramite il test di Kolmogorov-Smirnov.

6.2.1 Distribuzione di Gumbel

La funzione di ripartizione della distribuzione di Gumbel per i massimi valori ha la seguente espressione:

$$F_{X_{max}}(x) = e^{-e^{-\frac{x-b}{a}}} \quad (6.1)$$

dove a è il parametro di dispersione, b è il parametro di posizione e x è la variabile stocastica oggetto dell'analisi. Tali parametri sono stati stimati tramite il metodo della massima verosimiglianza:

$$a = \bar{x} - \frac{\sum x_i e^{-x_i/a}}{\sum e^{-x_i/a}} \quad (6.2)$$

$$b = a \ln \left[\frac{n}{\sum e^{-x_i/a}} \right] \quad (6.3)$$

ove x_i è l' i -esimo valore della serie di numerosità pari ad n .

6.2.2 Distribuzione di Weibull

La distribuzione di Weibull è una distribuzione di probabilità continua definita sui numeri reali positivi e la sua funzione di ripartizione, limitata superiormente ($x \leq \gamma$), ha la seguente forma:

$$F_{X_{max}}(x) = e \left[-\left(\frac{\gamma-x}{\lambda}\right)^\alpha \right] \quad (6.4)$$

nella quale $\gamma \geq 0$ è il parametro di posizione, $\alpha > 0$ è la misura di dispersione (o parametro di forma) e γ è il limite superiore della variabile stocastica.

Analogamente alla distribuzione di Gumbel, i suddetti parametri sono calcolati con il metodo della massima verosimiglianza.

6.2.3 Distribuzione Generalized Extreme Value

Le suddette leggi di distribuzione asintotiche possono essere considerate come casi particolari della distribuzione Generalized Extreme Value (GEV), la cui funzione di ripartizione ha la seguente forma:

$$F_{X_{max}}(x) = e \left\{ -\left[1 - \frac{k(x-\epsilon)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\} \quad (6.5)$$

dove α rappresenta il parametro di scala, ϵ il parametro di posizione e k il parametro di forma.

Analogamente alla distribuzione di Gumbel, i suddetti parametri sono calcolati con il metodo della massima verosimiglianza.

6.2.4 Test di Kolmogorov-Smirnov

Il test di Kolmogorov-Smirnov si basa sull'ammettere che data una qualsiasi ipotesi statistica H_0 , esiste sempre una ipotesi alternativa H_1 , anche se non esplicitamente formulata, la quale può (non necessariamente) coincidere con la negazione di H_0 . Un test statistico è una procedura che consente di misurare,

sulla base delle osservazioni di cui si dispone, la validità dell'ipotesi H_0 di fronte all'alternativa H_1 e di decidere se accettarla o meno.

Quindi si fissa l'ipotesi H_0 che la distribuzione si adatti al campione e si calcola la quantità

$$D_n = \max\{F_i - P(x_i)\}, \forall i = 1, \dots, N \quad (6.6)$$

avendo indicato con F_i la frequenza di Weibull relativa al valore x_i , $P(x_i)$ la probabilità (Weibull, Gumbel o GEV) relativa al valore x_i .

Fissato il livello di significatività (convenzionalmente si utilizzano i valori 5% o 1%), si confronta D_n con il valore teorico critico D_n^* (valore che si trova tabellato in funzione del numero di osservazioni iniziali e della significatività scelta): se $D_n \leq D_n^*$ l'ipotesi di buon adattamento alla serie di dati della distribuzione scelta può essere accettata (con il livello di significatività scelto); mentre se $D_n > D_n^*$ invece l'ipotesi viene rifiutata.

6.3 Adattamento delle distribuzioni di probabilità alle mareggiate

L'adattamento delle distribuzioni di probabilità determinate alle serie dei massimi delle mareggiate è stato valutato sia attraverso una verifica grafica sia utilizzando il test statistico di Kolmogorov-Smirnov.

Nelle Figure da 6.2 a 6.12 sono riportati i confronti grafici delle serie di frequenze di eventi estremi con le distribuzioni di probabilità adattati per il caso omnidirezionale e per le direzioni riportate nella Tabella 5.1.

In Tabella 6.1 sono riportati i risultati del test statistico di Kolmogorov-Smirnov per assegnato livello di significatività pari al 5%.

I risultati dei test e dei confronti grafici suddetti mostrano come la distribuzione GEV mostri un buon adattamento alla serie dei dati per ognuna delle direzioni considerate.

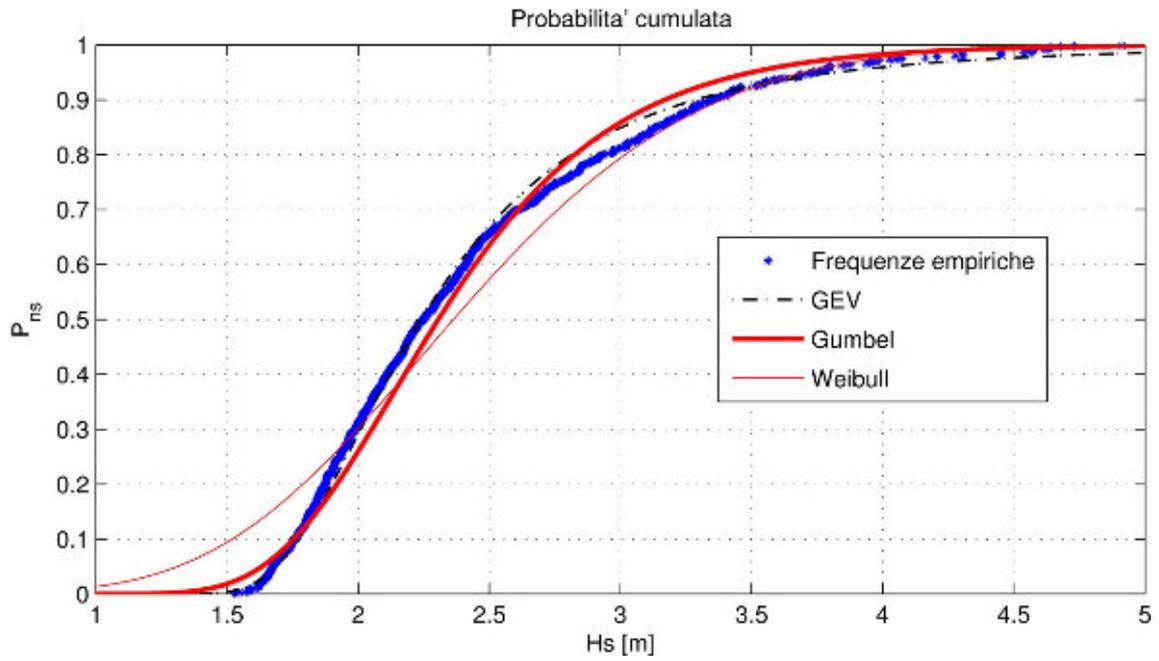


Figura 6.2: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per il caso omnidirezionale.

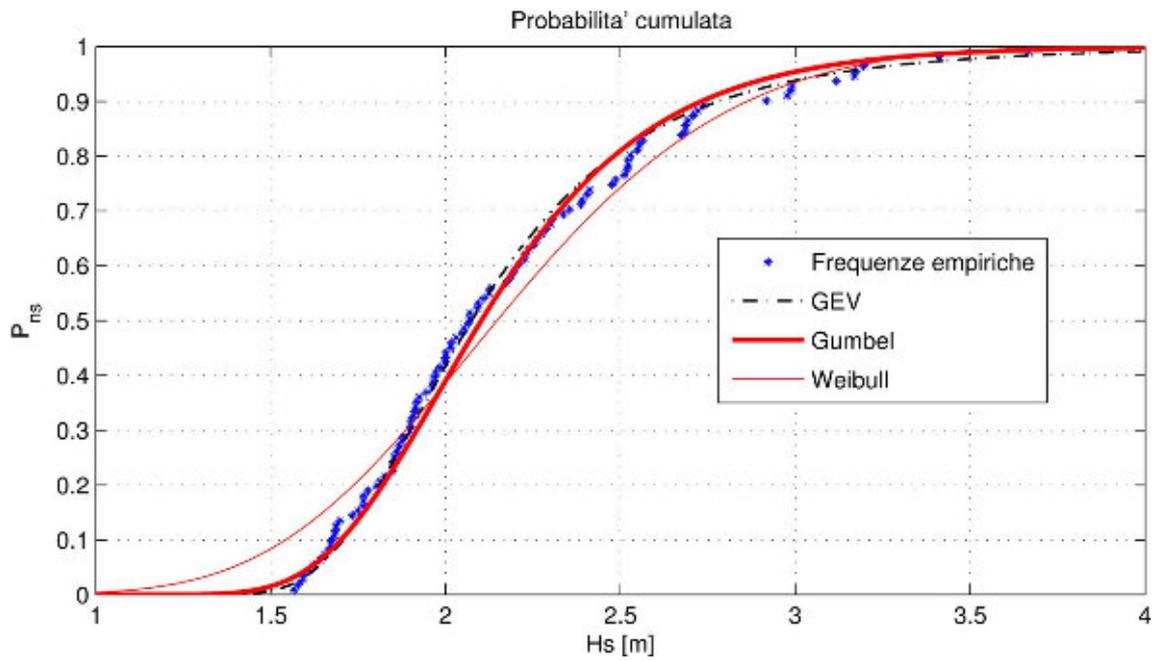


Figura 6.3: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione SE (A).

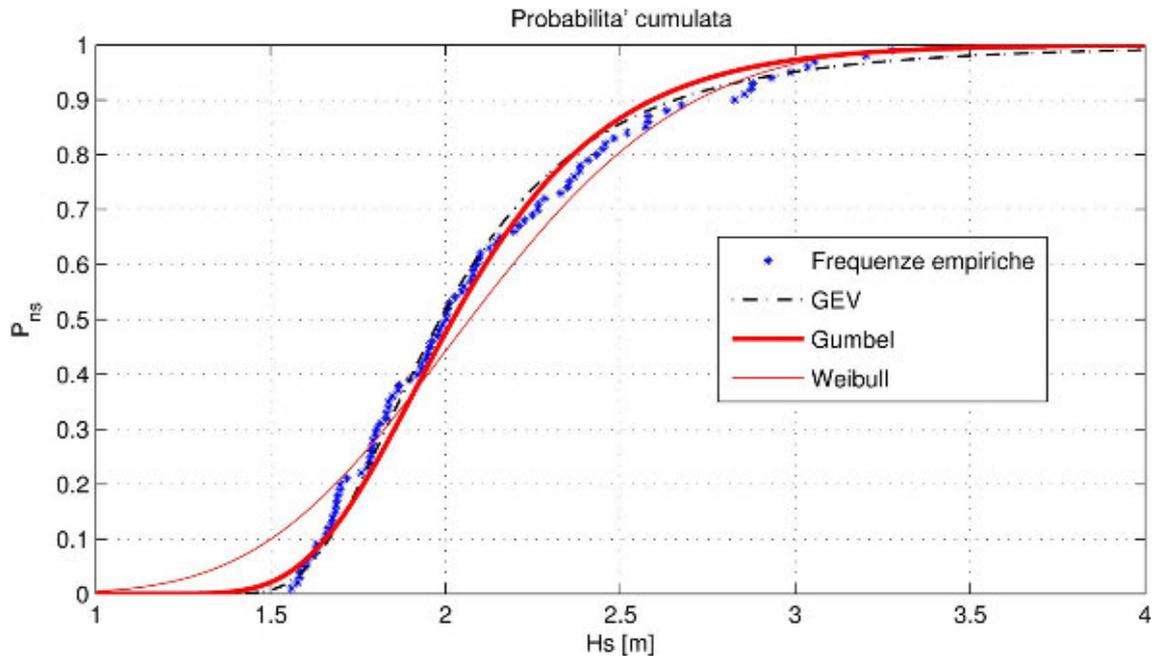


Figura 6.4: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione SSE (B).

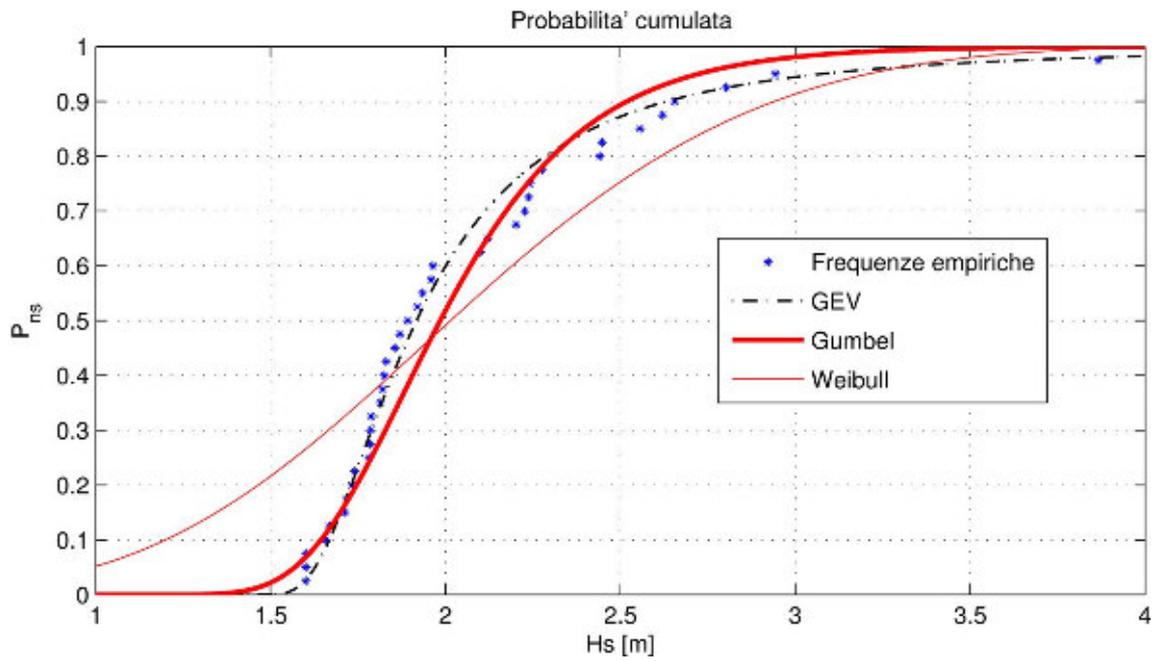


Figura 6.5: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione S (C).

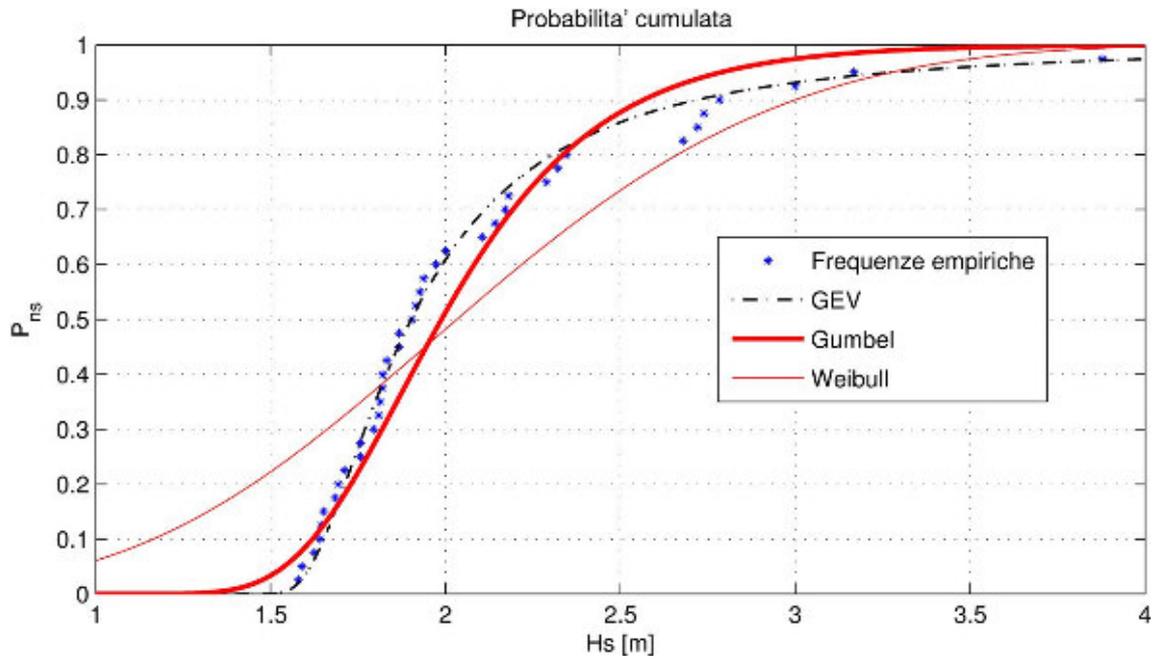


Figura 6.6: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione SSO (D).

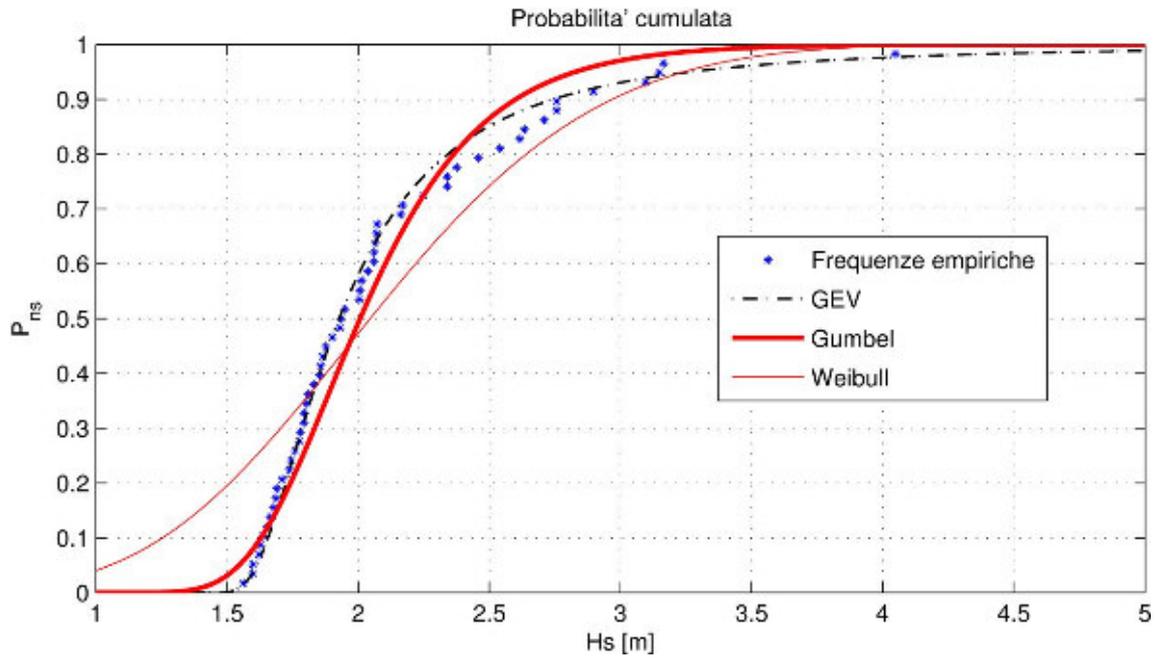


Figura 6.7: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione SO (E).

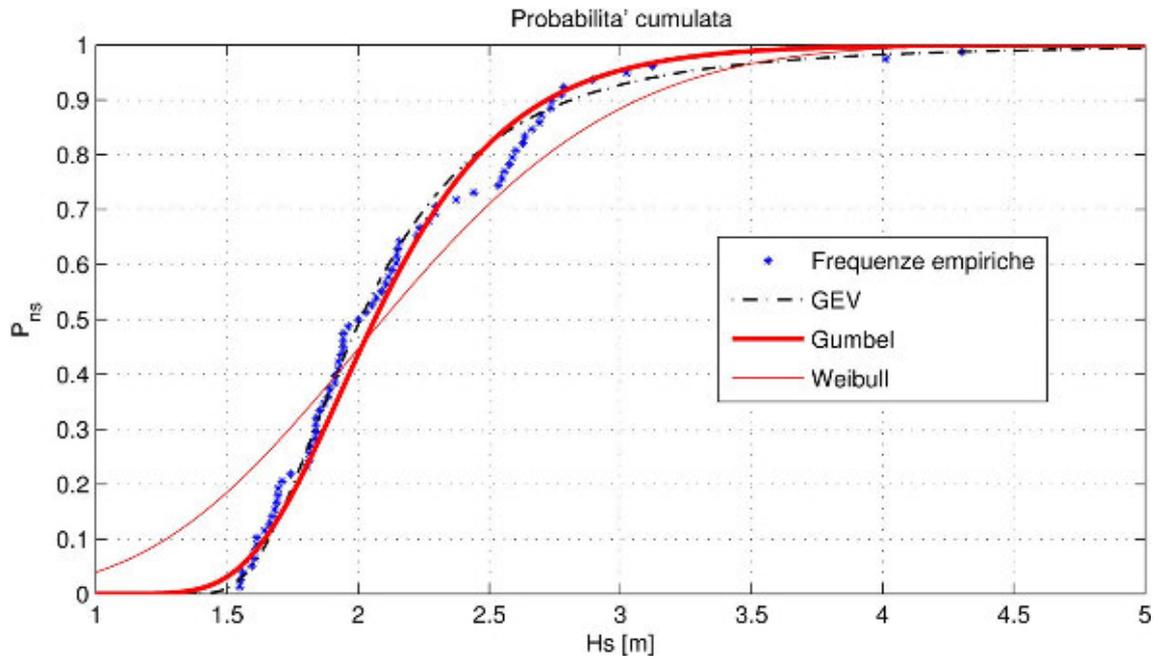


Figura 6.8: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione OSO (F).

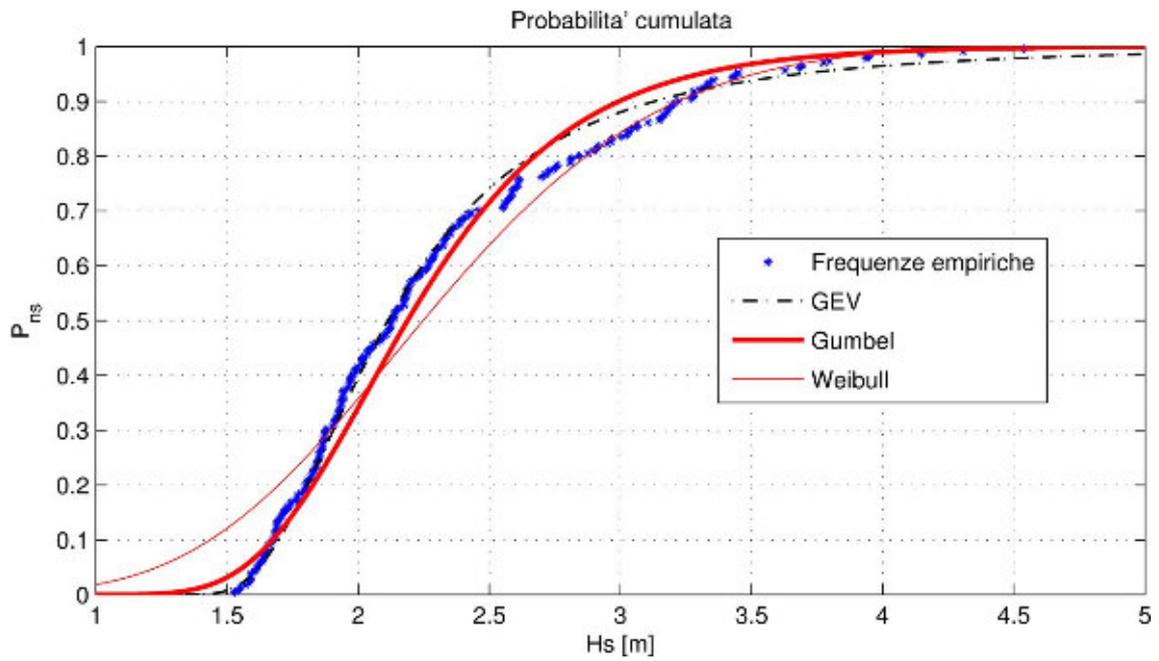


Figura 6.9: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione O (G).

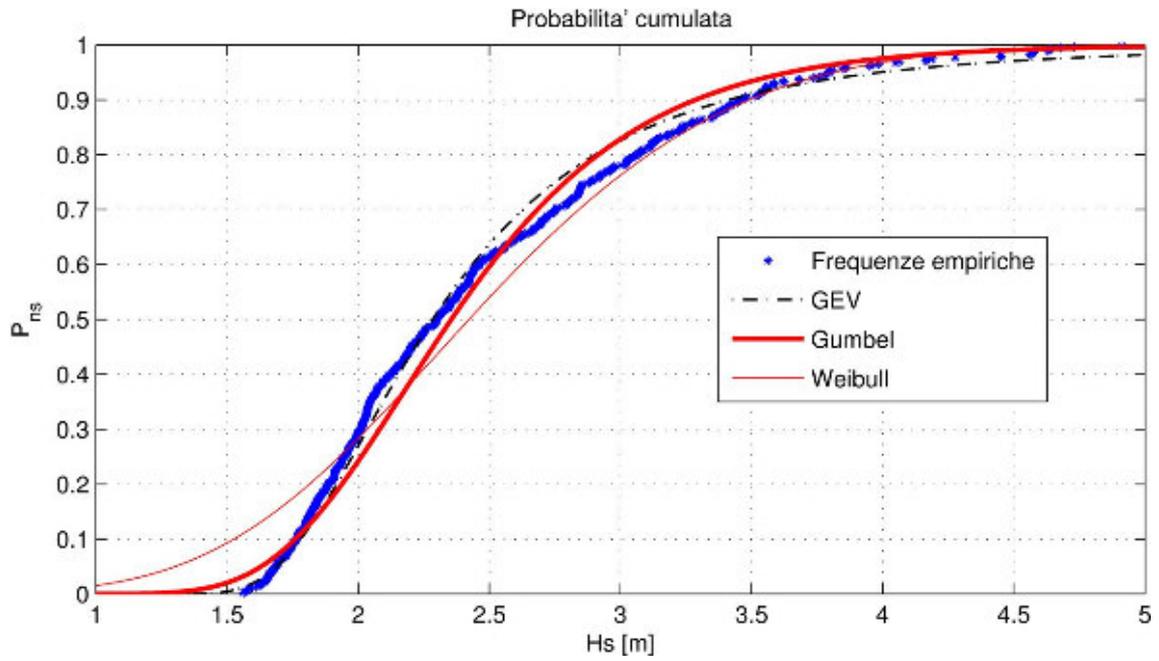


Figura 6.10: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione ONO (H).

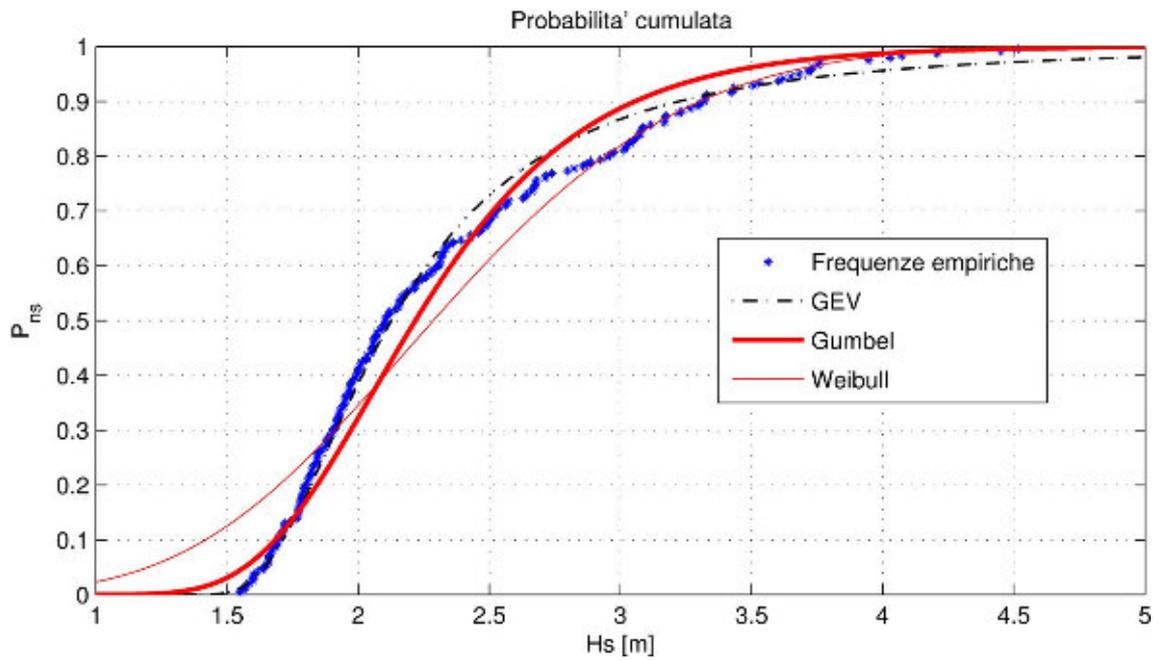


Figura 6.11: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione NO (I).

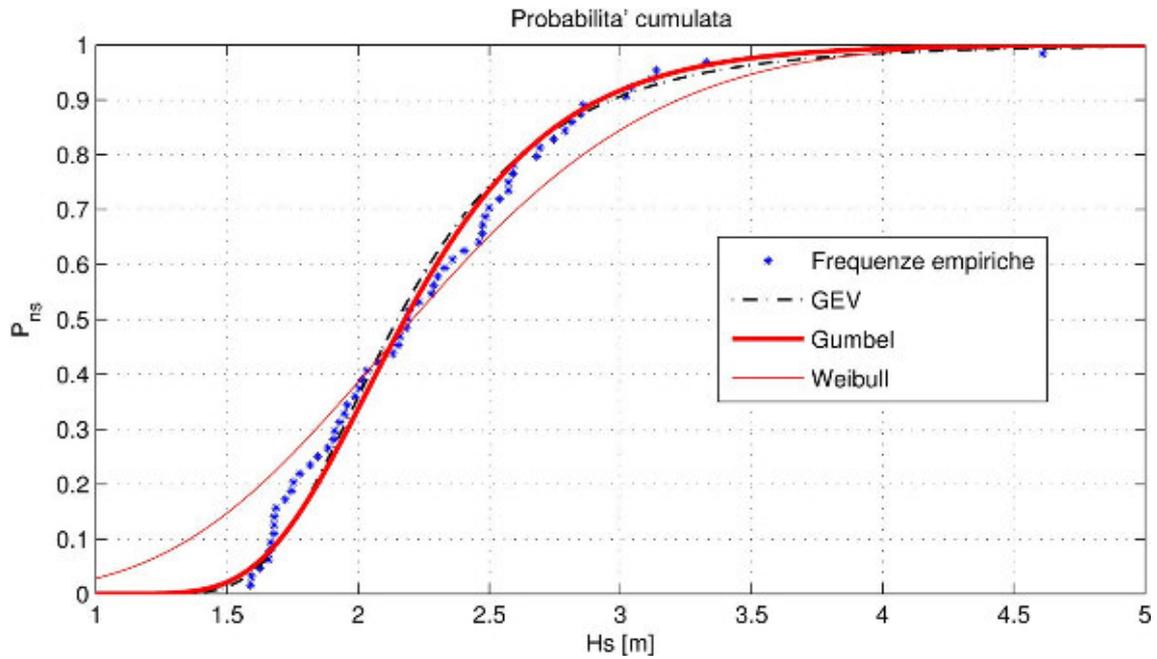


Figura 6.12: Confronto grafico della serie di frequenze degli eventi estremi con le distribuzioni di probabilità per la classe di direzione ONO (L).

Tabella 6.1: Risultati del test di Kolmogorov-Smirnov sulla bontà di adattamento delle distribuzioni di probabilità, per fissato livello di significatività pari a 0.05.

Direzione °N	D_n			D_n^*
	Gumbel	Weibull	GEV	
omnidirez	0.121	0.057	0.039	0.046
135	0.110	0.056	0.053	0.128
157.5	0.127	0.073	0.069	0.135
180	0.266	0.141	0.091	0.213
202.5	0.259	0.149	0.073	0.213
225	0.225	0.114	0.062	0.177
247.5	0.206	0.102	0.091	0.152
270	0.134	0.083	0.058	0.089
292.5	0.116	0.082	0.058	0.058
315	0.142	0.098	0.061	0.087
337.5	0.182	0.078	0.089	0.168

6.4 Stima dell'altezza d'onda al largo per fissati tempi di ritorno

Per quanto attiene alla determinazione dell'altezza d'onda di progetto H_s , essa viene scelta in base ad un prefissato periodo di ritorno. Quindi l'altezza d'onda significativa di progetto si può ricavare dopo aver calcolato il numero medio di osservazioni all'anno:

$$\lambda = \frac{\text{numero di dati estremi}}{\text{numero di anni di osservazione}} \quad (6.7)$$

e, quindi la frequenza associata al periodo di ritorno prefissato come:

$$F_{TR} = 1 - \frac{1}{\lambda \cdot T_R} \quad (6.8)$$

Inoltre è necessario associare ad ogni altezza d'onda un periodo di picco. In particolare è possibile esprimere il periodo di picco in funzione dell'altezza d'onda mediante la seguente relazione di tipo monomio:

$$T_p = \alpha \cdot H_s^\beta \quad (6.9)$$

in cui α e β sono due coefficienti che possono essere stimati applicando il metodo dei minimi quadrati linearizzando opportunamente la (6.9). Tale procedimento è stato eseguito su tutta la serie di dati H_s ed il risultato grafico è riportato in Figura 6.13. I valori dei coefficienti α e β risultano essere rispettivamente pari a 6.372 e 0.2736.

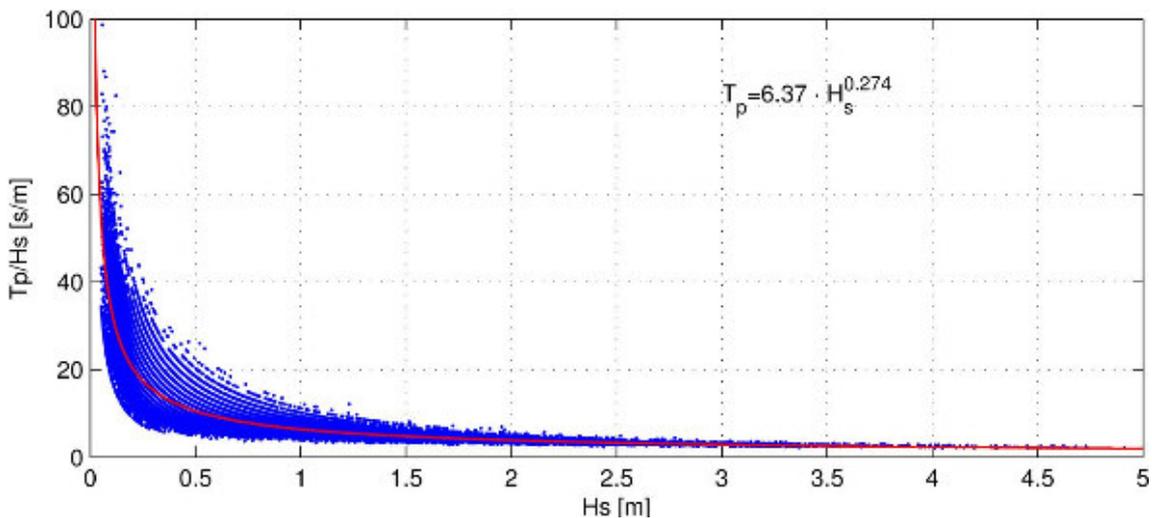


Figura 6.13: Legame tra il periodo di picco T_p e l'altezza d'onda significativa H_s .

Nelle Tabella 6.2 e Figura 6.14 sono riportate le altezze d'onda significativa valutate per diversi tempi di ritorno per ognuna delle serie considerate.

Tabella 6.2: Valori delle altezze d'onda per fissati tempi di ritorno per le varie direzioni prese in esame.

Settore	T_R [anni]	H_S [m]	T_P [s]	Settore	T_R [anni]	H_S [m]	T_P [s]
omni	5	5.6	10.2	SE	5	3.0	8.6
omni	10	6.5	10.7	SE	10	3.3	8.8
omni	30	8.3	11.4	SE	30	3.9	9.2
omni	50	9.3	11.7	SE	50	4.2	9.4
omni	75	10.2	12.0	SE	75	4.4	9.6
omni	100	10.9	12.2	SE	100	4.6	9.7
SSE	5	2.8	8.4	S	5	2.3	8.0
SSE	10	3.1	8.7	S	10	2.7	8.3
SSE	30	3.8	9.2	S	30	3.4	8.9
SSE	50	4.1	9.4	S	50	3.9	9.3
SSE	75	4.4	9.6	S	75	4.4	9.5
SSE	100	4.7	9.7	S	100	4.7	9.8
SSO	5	2.3	8.0	SO	5	2.6	8.3
SSO	10	2.8	8.4	SO	10	3.1	8.6
SSO	30	3.8	9.2	SO	30	4.1	9.4
SSO	50	4.4	9.6	SO	50	4.8	9.8
SSO	75	5.1	9.9	SO	75	5.5	10.1
SSO	100	5.6	10.2	SO	100	6.0	10.4
OSO	5	2.8	8.5	O	5	4.1	9.4
OSO	10	3.3	8.8	O	10	4.8	9.8
OSO	30	4.1	9.4	O	30	6.4	10.6
OSO	50	4.5	9.6	O	50	7.2	11.0
OSO	75	5.0	9.9	O	75	8.0	11.3
OSO	100	5.3	10.0	O	100	8.7	11.5
ONO	5	5.3	10.1	NO	5	4.4	9.5
ONO	10	6.2	10.5	NO	10	5.3	10.1
ONO	30	8.0	11.2	NO	30	7.3	11.0
ONO	50	9.0	11.6	NO	50	8.5	11.4
ONO	75	9.8	11.9	NO	75	9.6	11.8
ONO	100	10.5	12.1	NO	100	10.5	12.1
NNO	5	2.9	8.5				
NNO	10	3.2	8.8				
NNO	30	3.9	9.2				
NNO	50	4.2	9.4				
NNO	75	4.4	9.6				
NNO	100	4.6	9.7				

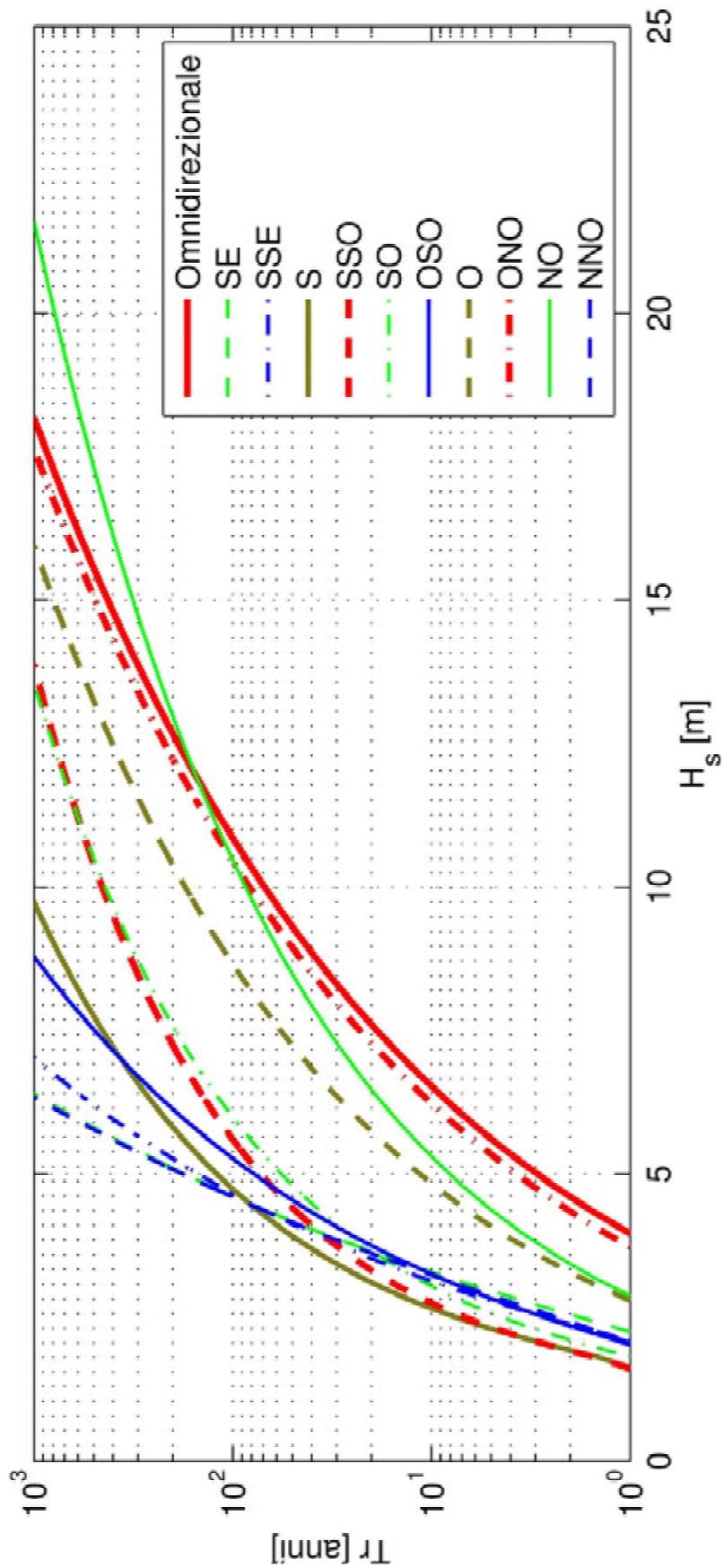


Figura 6.14: Valori delle altezze d'onda per fissati tempi di ritorno per le varie direzioni prese in esame.

7 Propagazione del moto ondoso da largo all'area della condotta sottomarina

L'analisi degli eventi ondosi estremi, dalla quale si desume la cosiddetta onda di progetto caratterizzata da un fissato tempo di ritorno, è stata condotta utilizzando i dati dell'ECMWF.

Sono state ricavate le serie delle altezze massime delle mareggiate per fissate classi di direzione di provenienza. Le classi di provenienza, di ampiezza 22.5° , prese in considerazione sono state centrate nelle direzioni 135°N , 157.5°N , 180°N , 202.5°N , 225°N , 247.5°N , 270°N , 292.5°N , 315°N e 337.5°N , da cui, data la configurazione geografica, è prevedibile, come peraltro illustrato nei capitoli precedenti, che provengano i marosi energeticamente più importanti, e che quindi sono stati analizzati.

La stima del moto ondoso nella zona interessata dall'opera di presa e scarico è stata eseguita mediante l'utilizzo del modello SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), modello bidimensionale di propagazione spettrale del moto ondoso basato sulla risoluzione delle equazioni della cosiddetta *spectral wave action balance* (Booij et al., 1999).

Nei successivi paragrafi vengono prima illustrati sinteticamente il modello spettrale SWAN, quindi vengono presentati i risultati ottenuti.

7.1 Il modello *Simulating WAVes Nearshore*

SWAN è un modello di onde di terza generazione che descrive l'evoluzione dello spettro di densità di energia in arbitrarie condizioni di vento, correnti e batimetria. La sua implementazione fisica e gli algoritmi di calcolo numerico sono stati sviluppati e studiati appositamente per superare le tradizionali difficoltà incontrate nell'applicazione di un modello d'onda in zone costiere caratterizzate da scarsa profondità.

SWAN è stato sviluppato e viene aggiornato continuamente all'interno del Dipartimento di Meccanica dei Fluidi della Facoltà di Ingegneria Civile e Scienze Geologiche della *Delft University of Technology* (Paesi Bassi). I suoi file sorgenti sono scritti in Fortran, sono di pubblico dominio e quindi scaricabili gratuitamente dal sito della Delft University (www.swan.tudelft.nl).

Inoltre, SWAN è un modello parallelo e consente di sfruttare al meglio le potenzialità dei calcolatori in quanto può essere utilizzato in modalità di calcolo parallelo a memoria condivisa, parallelo a memoria distribuita ed ovviamente in modalità seriale.

In termini matematico-numeric, il modello SWAN risolve la seguente relazione, chiamata “*wave action balance*”:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_{gx} + U_x)N}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy} + U_y)N}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{\sigma} (S_{in} + S_{nl4} + S_w + S_b + S_{brk}) \end{aligned} \quad (7.1)$$

ove $N(t, x, y, \sigma, \theta) = E/\sigma$ è la cosiddetta *wave action*, E è la energia delle onde, t il tempo, x e y sono le coordinate planimetriche, θ la direzione di propagazione delle onde e σ la frequenza angolare. U_x e U_y sono, rispettivamente, le componenti di \mathbf{U} , vettore velocità mediato nel tempo e sulla profondità. c_{gx} , c_{gy} and c_θ sono le velocità di propagazione dell’energia nel piano, mentre c_σ è la velocità nel piano spettrale. I termini a secondo membro della (7.1) rappresentano i termini di energia perduta o acquisita. S_{in} è l’acquisizione di energia dal vento, S_{nl4} è il trasferimento di energia dovuto alle interazioni *four-wave*, S_w è la perdita di energia dovuta al *white-capping*, S_b è la perdita di energia per attrito al fondo e S_{brk} è la dissipazione di energia dovuta al frangimento dell’onda. Siccome le simulazioni effettuate nel presente studio coprono una regione piuttosto vicino alla costa S_{in} , S_w e S_b sono state trascurate, mentre il termine S_{brk} è stato modellato seguendo l’approccio di Battjes e Janssen (1978).

Fra le varie limitazioni del modello SWAN è bene citare che non vengono calcolate le correnti indotte dalle onde, che eventualmente devono essere fornite come input, e che i fenomeni di diffrazione e di riflessione non vengono modellati. Inoltre SWAN è specificatamente designato per applicazioni costiere e, quindi, su scala oceanica modelli come WAM e WW3 risultano più efficaci.

7.2 Mesh di calcolo e condizioni al contorno

Integrando i dati disponibili desunti dalla cartografia nautica, sono state ricostruite le batimetrie di calcolo su un dominio a maglia non strutturata di tipo triangolare.

Il dominio è stato discretizzato in 7524 nodi e 14628 elementi di calcolo triangolari (Figura 7.1). La dimensione dei triangoli è stata calcolata tramite funzione di densità basata sulle profondità, e quindi indirettamente sulla lunghezza d'onda. Gli elementi di calcolo sono stati tramite triangolazione di Delaunay. Il triangolo più piccolo ha una dimensione di 10 metri, mentre la profondità massima è pari a 50 metri.

Le condizioni al contorno prevedono l'ingresso degli spettri di moto ondoso in tre segmenti, identificati dai nodi riportati nella Tabella 7.1.

Tabella 7.1: Nodi che identificano i segmenti in cui vengono imposte le condizioni al contorno del dominio di calcolo del modello spettrale di propagazione del moto ondoso SWAN (coordinate ED50-UTM33N).

Nodo #	Coordinata E [m]	Coordinata N [m]	Profondità [m]
1	355232.72	4126331.47	48.5
62	356633.18	4128540.53	32.7
4513	362534.95	4121702.14	50.2
6067	364276.07	4124448.55	31.7

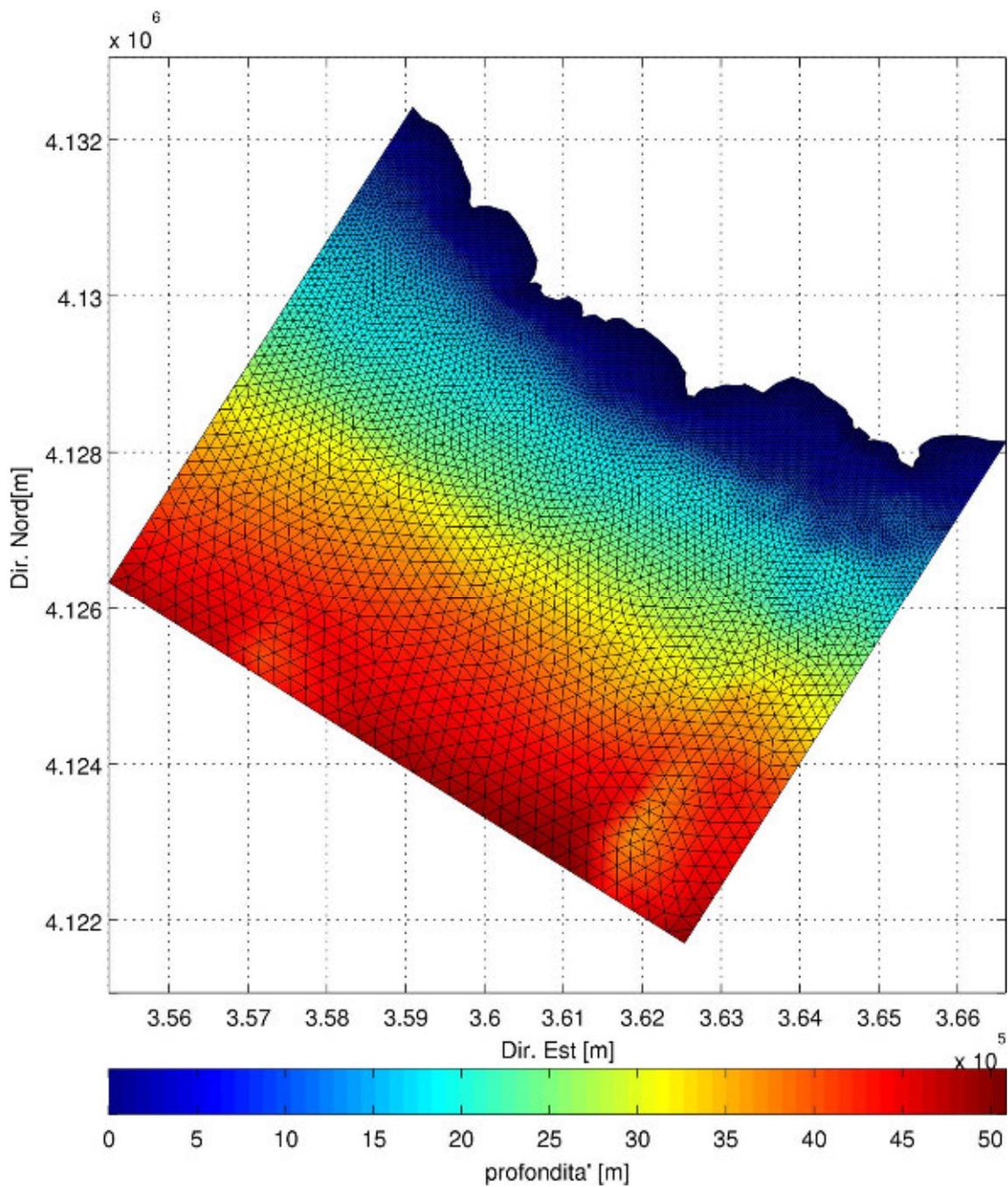


Figura 7.1: Dominio di calcolo utilizzato per il modello SWAN con indicazione delle batimetriche (coordinate ED50-UTM33N).

7.3 Caratteristiche del moto ondoso nell'area della condotta

Tramite il modello di propagazione spettrale illustrato precedentemente è stato valutato il clima ondoso nell'area di studio. I vari grafici delle simulazioni sono riportate nell'Allegato A.

L'asse della condotta, individuate nella Figura 3.1, è stata suddivisa in 11 punti corrispondenti alle profondità da 2 a 12 metri. Le rispettive coordinate sono riportate nella Tabella 7.2. Per ogni punto sono stati estratti i relativi valori di H_S output del modello di propagazione, per le varie classi di direzione e per i vari T_R (Tabella 7.3).

Si rileva come le condizioni più gravose siano da imputare al moto ondoso proveniente dalla direzione al largo 292.5°N.

Tabella 7.2: Individuazione di 11 punti della condotta sottomarina, a varie profondità (coordinate ED50-UTM33N)

nome punto	profondità [m]	X [m]	Y [m]
A	2	362167.23	4129132.46
B	3	362073.91	4129045.42
C	4	361979.01	4128956.91
D	5	361885.50	4128869.69
E	6	361823.44	4128811.80
F	7	361771.01	4128762.90
G	8	361724.13	4128719.18
H	9	361680.08	4128678.09
I	10	361635.95	4128636.93
L	11	361591.50	4128595.47
M	12	361546.94	4128553.91
N	13	361502.22	4128512.20
O	14	361457.37	4128470.37
P	15	361407.74	4128424.07

Tabella 7.3: Altezze significative (H_S), estratte dal modello SWAN, sugli 11 punti che identificano l'asse della condotta sottomarina.

Dir [°N]	T_R [anni]	Punti della condotta a varie profondità [m]													
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P
135	5	1.1	1.4	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9
135	10	1.1	1.4	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0
135	30	1.1	1.5	1.8	2.1	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5
135	50	1.1	1.5	1.9	2.3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
135	75	1.1	1.5	1.9	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
135	100	1.1	1.5	1.9	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7
157.5	5	1.1	1.5	1.9	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
157.5	10	1.1	1.5	1.9	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
157.5	30	1.1	1.6	2.0	2.5	2.7	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
157.5	50	1.1	1.6	2.0	2.6	2.9	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
157.5	75	1.1	1.6	2.1	2.6	3.0	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
157.5	100	1.1	1.6	2.1	2.6	3.0	3.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.4
180	5	1.1	1.5	1.8	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
180	10	1.1	1.5	1.9	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
180	30	1.1	1.6	2.0	2.5	2.8	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
180	50	1.1	1.6	2.1	2.6	3.0	3.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
180	75	1.1	1.6	2.1	2.7	3.1	3.4	3.6	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
180	100	1.1	1.6	2.1	2.8	3.2	3.5	3.7	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
202.5	5	1.1	1.6	1.9	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2
202.5	10	1.1	1.6	2.0	2.3	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5
202.5	30	1.1	1.6	2.1	2.7	3.0	3.2	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
202.5	50	1.2	1.6	2.2	2.8	3.2	3.6	3.8	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
202.5	75	1.2	1.7	2.2	2.9	3.4	3.8	4.1	4.3	4.5	4.6	4.6	4.7	4.7	4.7
202.5	100	1.2	1.7	2.2	2.9	3.4	3.9	4.2	4.5	4.8	4.9	5.0	5.1	5.1	5.1
225	5	1.1	1.6	2.0	2.4	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
225	10	1.1	1.6	2.1	2.5	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
225	30	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	3.4	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
225	50	1.2	1.7	2.2	2.9	3.3	3.7	4.0	4.2	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
225	75	1.2	1.7	2.3	2.9	3.4	3.8	4.2	4.5	4.7	4.8	4.9	5.0	5.0	5.0
225	100	1.2	1.7	2.3	2.9	3.5	3.9	4.3	4.6	4.9	5.0	5.2	5.3	5.3	5.3
247.5	5	1.1	1.6	2.1	2.4	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4
247.5	10	1.1	1.6	2.1	2.5	2.7	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
247.5	30	1.2	1.7	2.2	2.7	3.1	3.3	3.4	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
247.5	50	1.2	1.7	2.2	2.8	3.2	3.5	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
247.5	75	1.2	1.7	2.2	2.8	3.3	3.6	3.8	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
247.5	100	1.2	1.7	2.2	2.9	3.3	3.7	3.9	4.1	4.2	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
270	5	1.2	1.7	2.2	2.7	3.0	3.1	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
270	10	1.2	1.7	2.2	2.8	3.2	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
270	30	1.2	1.7	2.3	3.0	3.4	3.8	4.1	4.4	4.5	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7
270	50	1.2	1.8	2.3	3.0	3.5	4.0	4.3	4.6	4.9	5.1	5.2	5.3	5.4	5.4
270	75	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.0	4.4	4.8	5.1	5.3	5.5	5.7	5.8	5.9
270	100	1.2	1.8	2.4	3.1	3.6	4.1	4.5	4.9	5.2	5.5	5.7	5.9	6.1	6.2
292.5	5	1.2	1.7	2.2	2.7	3.0	3.1	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
292.5	10	1.2	1.7	2.3	2.9	3.2	3.5	3.5	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
292.5	30	1.2	1.8	2.3	3.0	3.5	3.9	4.2	4.4	4.5	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
292.5	50	1.2	1.8	2.4	3.1	3.6	4.0	4.3	4.6	4.8	5.0	5.1	5.2	5.2	5.2
292.5	75	1.2	1.8	2.4	3.1	3.6	4.1	4.5	4.8	5.1	5.3	5.5	5.6	5.7	5.8
292.5	100	1.3	1.8	2.4	3.1	3.7	4.1	4.5	4.9	5.2	5.4	5.6	5.8	5.9	6.0
315	5	1.2	1.6	1.8	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6
315	10	1.2	1.7	2.0	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
315	30	1.2	1.8	2.3	2.7	3.0	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
315	50	1.2	1.8	2.3	2.9	3.2	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
315	75	1.2	1.8	2.4	3.0	3.4	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
315	100	1.3	1.8	2.4	3.0	3.5	3.8	4.0	4.1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
337.5	5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
337.5	10	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
337.5	30	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
337.5	50	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
337.5	75	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
337.5	100	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

8 Studio del trasporto solido

Per quanto riguarda i meccanismi di trasporto solido che possono interessare il sito in studio è opportuno precisare che l'area analizzata ricade a cavallo tra le unità fisiografiche costiere 10 (Punta Bianca - Capo Rossello) e 11 (Capo Rossello - Capo San Marco) (Figura 8.1). Tali unità costiere si presentano nella zona di interesse con tratti a costa bassa sabbiosa.

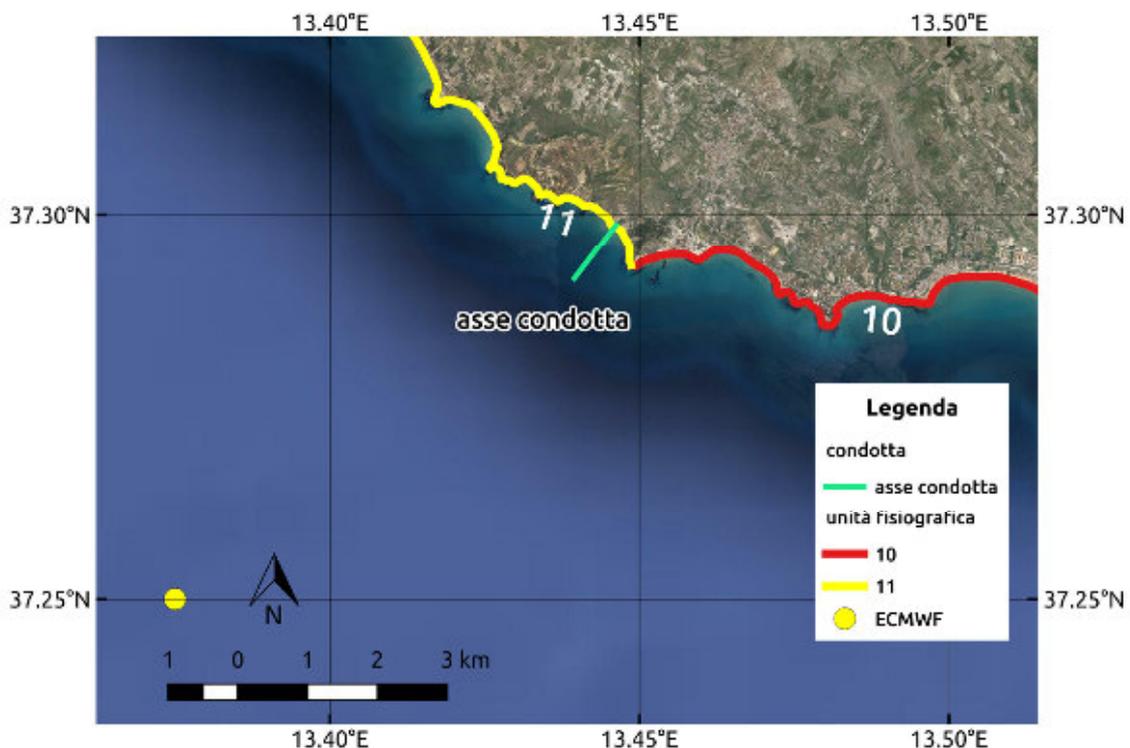


Figura 8.1: Inquadramento geografico delle unità fisiografiche 10 e 11 di interesse

8.1 Modello matematico per il trasporto solido

Per facilitare la comprensione dei meccanismi del fenomeno e la loro variabilità in funzione della profondità può essere utile ricordare qualche nota nozione sulla cinetica delle particelle fluide in seno alla massa liquida, sede di un moto ondoso regolare. In *acque profonde* ($h > L/2$) le traiettorie si discostano molto poco da circonferenze il cui diametro decresce rapidamente lungo la verticale. In questo caso, quindi, gli effetti del moto ondoso sul fondo sono trascurabili e il materiale presente, molto fine, si muove seguendo le leggi della sedimentazione. È necessario, tuttavia, osservare che la suddetta

limitazione $h/L > 1/2$, deve essere assunta con opportuna cautela poiché la velocità e le pressioni a tali profondità raggiungono in effetti più dell'8% del loro valore in superficie.

In acque intermedie ($L/20 < h < L/2$) il fenomeno è molto più complesso, specialmente se il fondo ha una inclinazione non trascurabile. Dalla teoria di *Stokes* al primo ordine di approssimazione per onde di piccola altezza in liquido perfetto e profondità h , costante si può dedurre facilmente che le traiettorie delle particelle liquide assumono la forma di ellissi sempre più schiacciate e meno ampie man mano che ci si approssima al fondo. In corrispondenza di questo, com'è ovvio, le ellissi degenerano in segmenti la cui lunghezza varia con l'altezza dell'onda e la profondità relativa. Secondo tale teoria la lunghezza $D_{0,max}$ di questo segmento è data da:

$$D_{0,max} = \frac{H}{\sin(k \cdot h)} \quad (8.1)$$

con:

- H := l'altezza dell'onda
- $k = (2 \pi)/L$:= numero d'onda
- h := profondità locale
- L := lunghezza dell'onda.

La lunghezza d'onda è stata calcolata attraverso la soluzione, per ogni punto del dominio di calcolo, della legge di dispersione lineare:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (8.2)$$

La velocità massima, in corrispondenza dello strato limite al fondo, della particella liquida che percorre con moto oscillante tale segmento è:

$$u_{0,max} = \frac{\pi \cdot H}{T \sinh(h \cdot k)} \quad (8.3)$$

Tale velocità risulta tanto più grande quanto maggiore è il periodo che interviene implicitamente anche nel numero d'onda k .

Quando $u_{0,max}$ raggiunge il valore limite di erosione del materiale di fondo, si comincia ad osservare l'inizio del moto dei granuli per intervalli di tempo

generalmente minori del periodo dell'onda in traiettorie oscillatorie e simmetriche rispetto ad una posizione di equilibrio.

È necessario ancora ribadire che, per le ipotesi fatte, poiché l'assetto delle velocità e degli spostamenti è simmetrico nello spazio e nel tempo, non si determina un trasporto di massa ma ci si trova nella fase di formazione di ondulazioni sabbiose sul fondo, i *vortex ripple*.

Il problema dell'inizio del trasporto solido di fondo sotto l'azione del moto ondoso è stato ampiamente descritto da diversi autori che hanno proposto numerosi criteri empirici o teorico-sperimentali basati sull'interpretazione delle interazioni che hanno luogo, allo strato limite di fondo tra il fluido sede di un moto ondoso di assegnate caratteristiche e le particelle di fondo.

Il punto in cui si innesca il trasporto solido in prossimità del fondo può essere valutato per mezzo del calcolo dell'azione di trascinamento (τ) connessa al moto ondoso:

$$\tau = \rho \cdot u_*^2 \quad (8.4)$$

dove la velocità di attrito risulta legata alla velocità al fondo $u_{0,max}$ dalla relazione (Nielsen, 1992):

$$\tau = u_{0,max} \cdot \sqrt{0.5 \cdot f_w} \quad (8.5)$$

con l'indice di resistenza dell'onda (Jonsson et al., 2005):

$$f_w = \begin{cases} \frac{2}{Re} & Re \leq 3 \cdot 10^5 \\ 3.34 \cdot 10^{-3} + 1.05 \cdot 10^{-9} \cdot Re, & 3 \cdot 10^5 < Re < 1 \cdot 10^6 \\ 0.024 Re^{-0.123} & 1 \cdot 10^6 \leq Re \end{cases} \quad (8.6)$$

e con il numero di Reynolds dell'onda:

$$Re = \frac{u_{0,max} \cdot H}{2 \cdot \nu \cdot \sinh(2\pi h/L)} \quad (8.7)$$

ove ν è la viscosità cinematica dell'acqua.

Tale tensione tangenziale al fondo deve essere confrontata con la tensione tangenziale critica, e cioè il minimo valore di tensione che innesca il processo di trasporto solido:

$$\tau_c = \theta_c \cdot \rho \cdot (s - 1) \cdot D \cdot g \quad (8.8)$$

dove:

- θ_c := è il parametro di Shields Critico [-] (Nielsen, 1992)
- $s = \frac{\rho_s}{\rho}$:= è la densità relativa del materiale solido
- ρ_s := è la densità del solido

- ρ_s := la densità dell'acqua
- g := è l'accelerazione di gravità
- D := è il diametro dei sedimenti

Pertanto quando $\tau = \tau_c$ ed il materiale solido sul fondo inizia a spostarsi, dalle precedenti relazioni si può calcolare il diametro dei grani che inizia a muoversi sotto per quelle determinate condizioni di mare:

$$D = \frac{u_*^2}{\theta_c (s - 1)g} \quad (8.9)$$

I risultati del modello matematico sono riportati nelle Figure 8.4 e 8.5. Tali risultati sono stati ottenuti rispettivamente per due stati di mare rappresentati da: altezza d'onda superata 12 ore all'anno (H_{12h}) e quella superata 4 giorni all'anno (H_{4day}). Tali stati di mare, non eccezionali, consentono di dedurre informazioni su eventi di frequenza ordinaria che potrebbero aumentare il contenuto di sedimenti nell'acqua prelevata.

8.2 Calcolo della profondità di chiusura

È stata calcolata la profondità di chiusura per avere come supporto una semplice definizione dei limiti entro cui le onde non riescono a provocare variazioni di profondità rilevanti e, quindi, non vi è alcuno significativo trasporto netto di sedimenti tra la costa e il largo.

8.2.1 Formula di Hallermeier

La formula di Hallermeier (1981) è la formula nota in letteratura per il calcolo della profondità di chiusura, ed ha la seguente forma:

$$d_{in} = 2.28 H_{S,12} - 68.5 \left(\frac{H_{S,12}^2}{gT^2} \right) \quad (8.10)$$

dove $H_{S,12}$ è l'altezza d'onda significativa effettiva che viene superata per 12 ore all'anno, ovvero l'altezza d'onda significativa che ha una probabilità di superamento annuale pari a 0.137%, mentre T è il periodo d'onda associato ad $H_{S,12}$ e g l'accelerazione di gravità.

Il calcolo è stato condotto per ogni anno analizzato, ed nella Figura 8.2 sono riportati i valori risultanti anno per anno, mentre nella Figura 8.3 sono le

batimetriche alla profondità di chiusura minima e massima. Si riscontra che l'opera di presa, posta ad una profondità di 12 m, è al di fuori della profondità di chiusura massima risultante dalla serie storica analizzata.

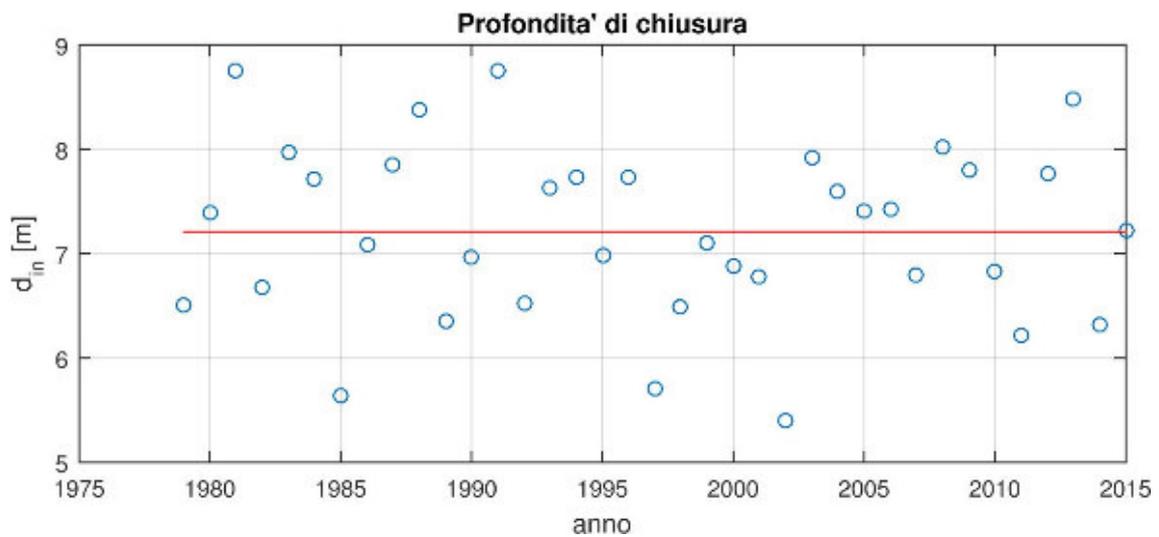


Figura 8.2: Profondità di chiusura al variare degli anni; la linea rossa rappresenta la media dei valori.

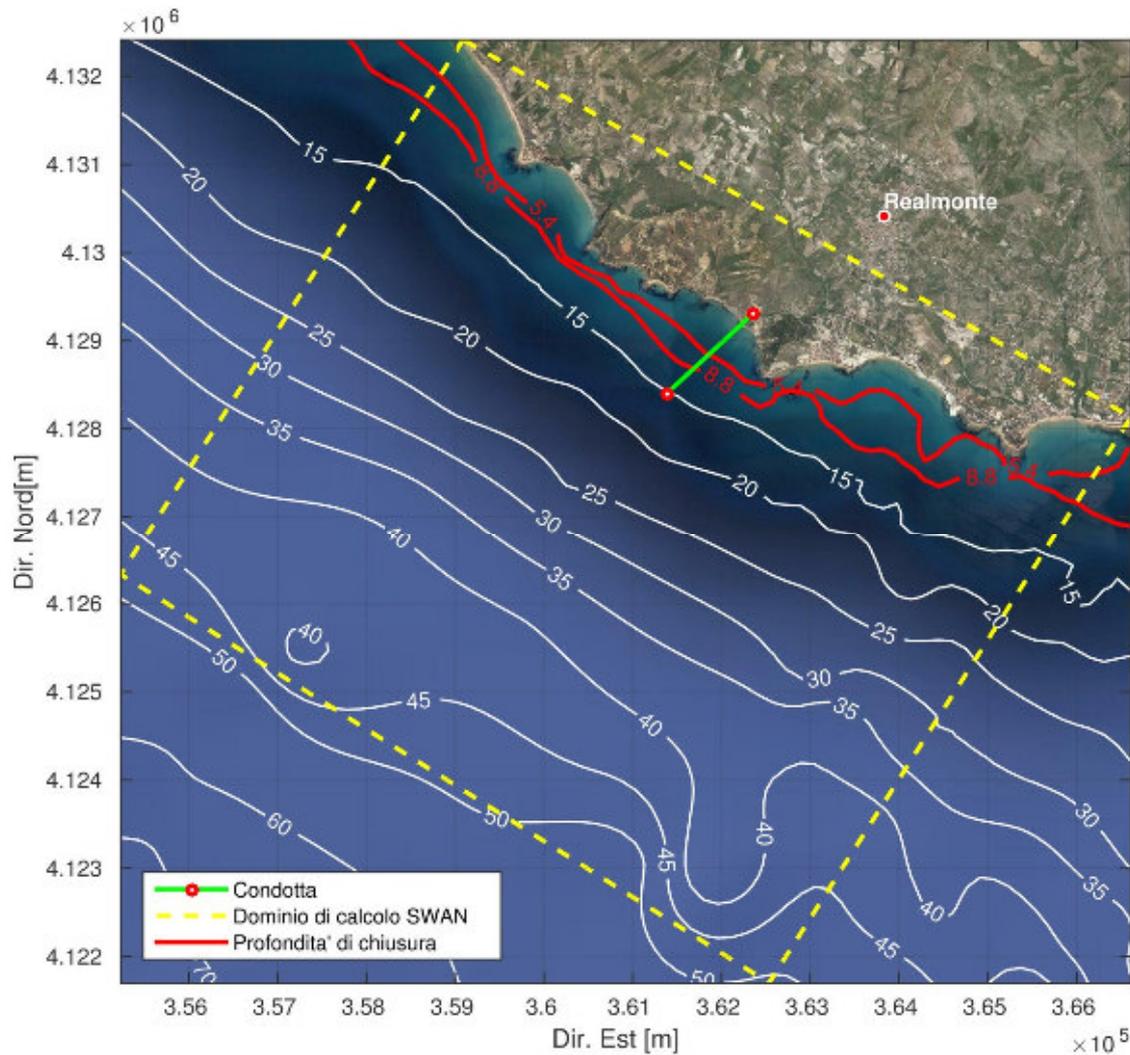


Figura 8.3: Inquadramento geografico della profondità di chiusura minima e massima (coordinate ED50-UTM33N).

8.3 Analisi dei risultati

Il modello semplificato di trasporto solido qui utilizzato permette di trarre alcune utili informazioni sulla quantità di sedimenti mobilitati in prossimità dell'imbocco della condotta di presa. Per lo stato di mare rappresentato da H_{12h} , si può osservare che l'imbocco della condotta di presa ricade entro la zona in cui iniziano ad essere mobilitati i sedimenti compresi tra 0.5 e 0.75 mm (Figura 8.4). Per lo stato di mare rappresentato da H_{4day} , si può osservare che l'imbocco della condotta di presa ricade entro la zona in cui iniziano ad essere mobilitati i sedimenti compresi tra 0.25 e 0.5 mm (Figura 8.5). Purtroppo tali sedimenti vengono mobilitati al di fuori della zona dei frangenti, come mostrato

in Figura 8.7 per un T_R pari a 10 anni e direzione media di attacco del moto ondoso pari a 292.5°N , direzione che risulta essere la più gravosa (per le altre direzioni vedi l'allegato A). La zona dei frangenti è la zona in cui viene mobilitata la più grande quantità di sedimenti. Nella Figura 8.7 è rappresentata tale zona, attribuendo un indice di possibilità di frangimento per dato stato di mare.

Le uniche informazioni reperibili in letteratura sulla composizione dei sedimenti, sono riportate in Figura 8.6, e tratte dall'Atlante delle Coste Italiane. Purtroppo l'imbocco della condotta di presa ricade al di fuori dell'area in cui sono disponibili le informazioni sui sedimenti.

Conseguentemente si è ritenuto di dislocare l'opera di presa su un fondale di -15,00 m s.l.m.m..

Tale profondità garantisce le caratteristiche delle acque marine aspirate dal punto di vista della torbidità e quindi del funzionamento del processo produttivo dell'impianto.

In fase di progettazione definitivo sarà esplicitata uno studio sedimentologica dei fondali interessati dalle condotte.

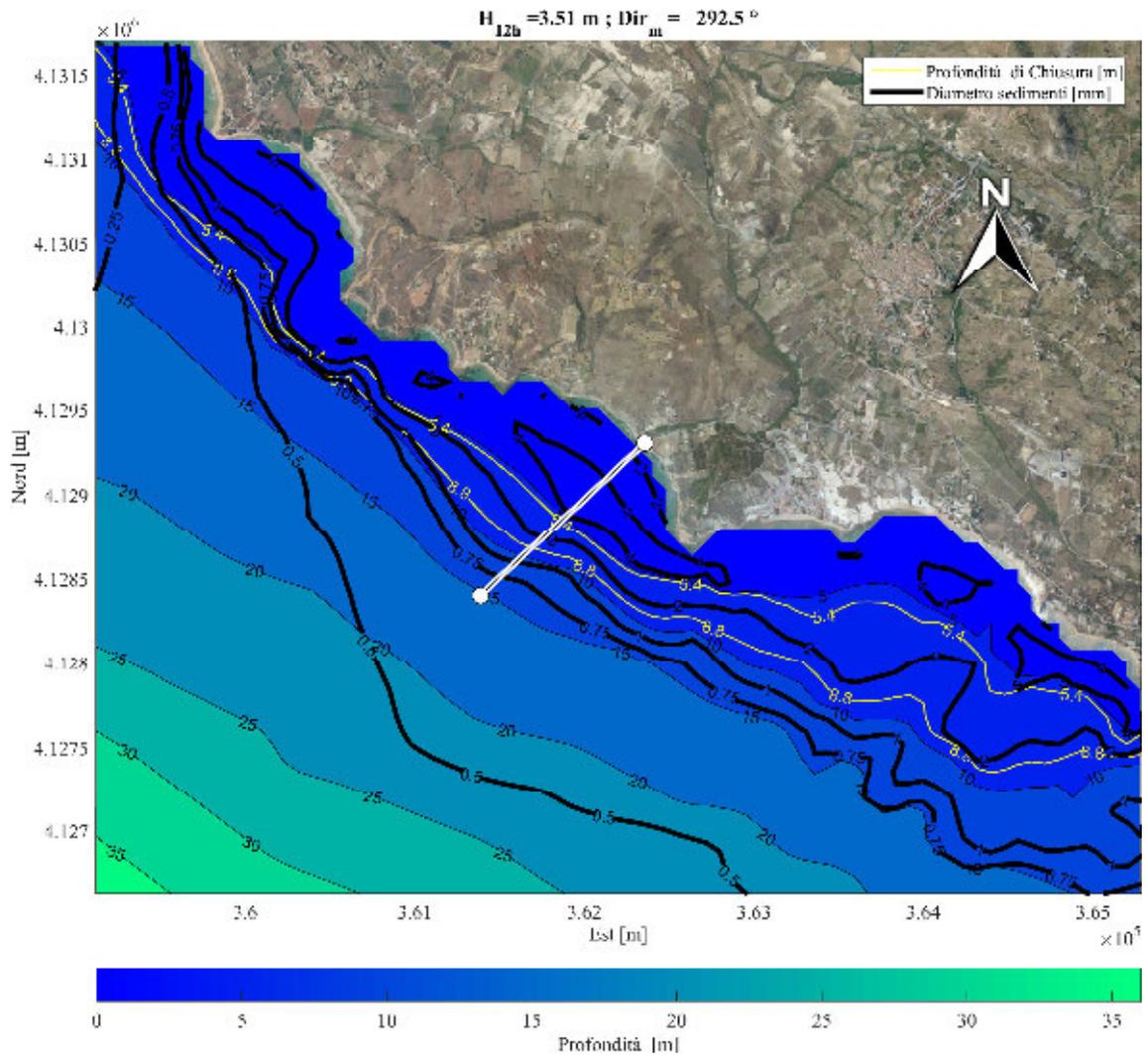


Figura 8.4: Curve isodiametrali - Le linee in grassetto rappresentano le curve a egual valore di diametro dei grani in moto incipiente per dato stato di mare (H_{12h}); la linea bianca rappresenta l'asse della condotta; le curve gialle rappresentano le profondità di chiusura massima e minima durante gli anni di osservazione.

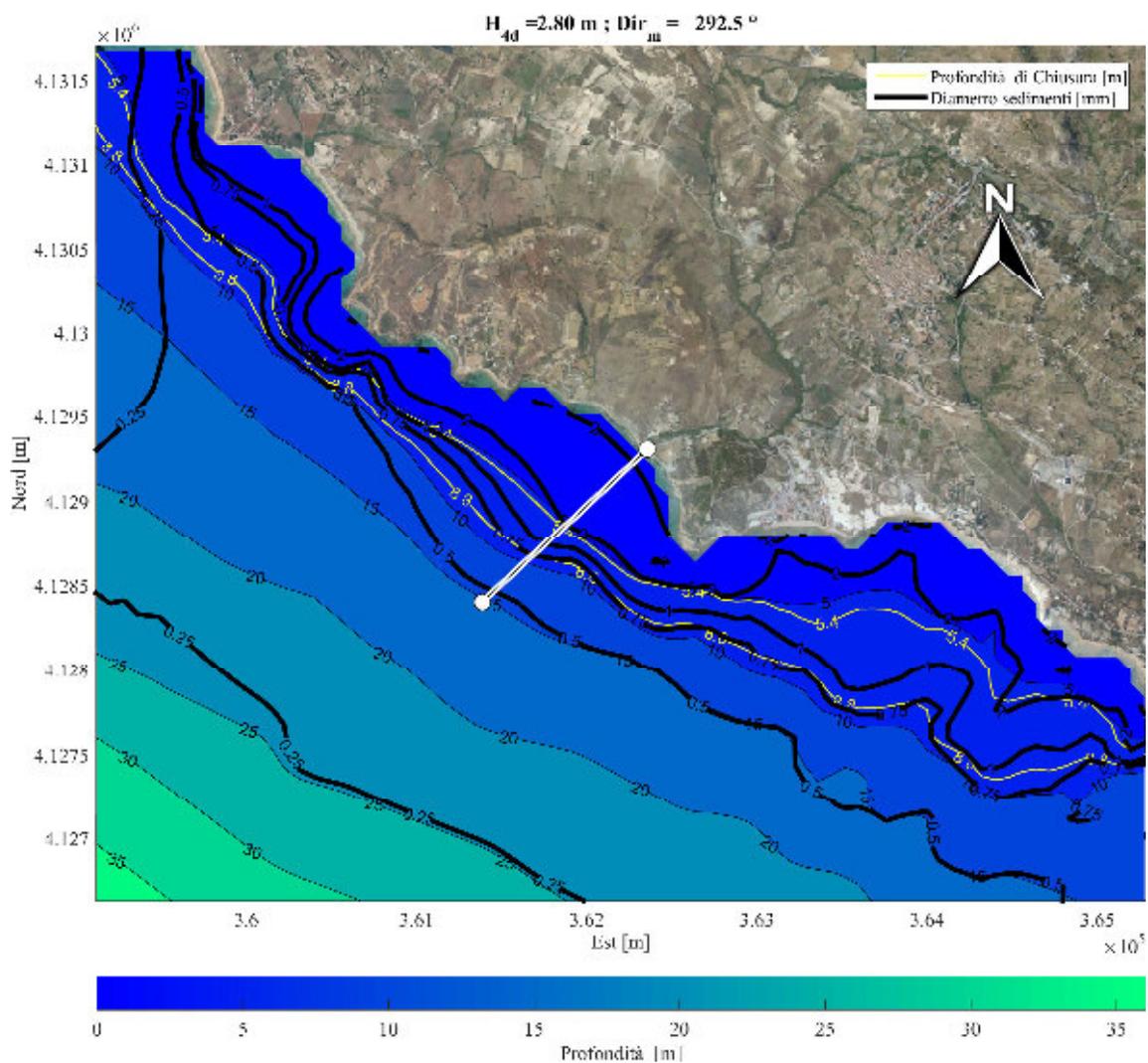


Figura 8.5: Curve isodiametrali - Le linee in grassetto rappresentano le curve a egual valore di diametro dei grani in moto incipiente per dato stato di mare (H_{4day}); la linea bianca rappresenta l'asse della condotta; le curve gialle rappresentano le profondità di chiusura massima e minima durante gli anni di osservazione.

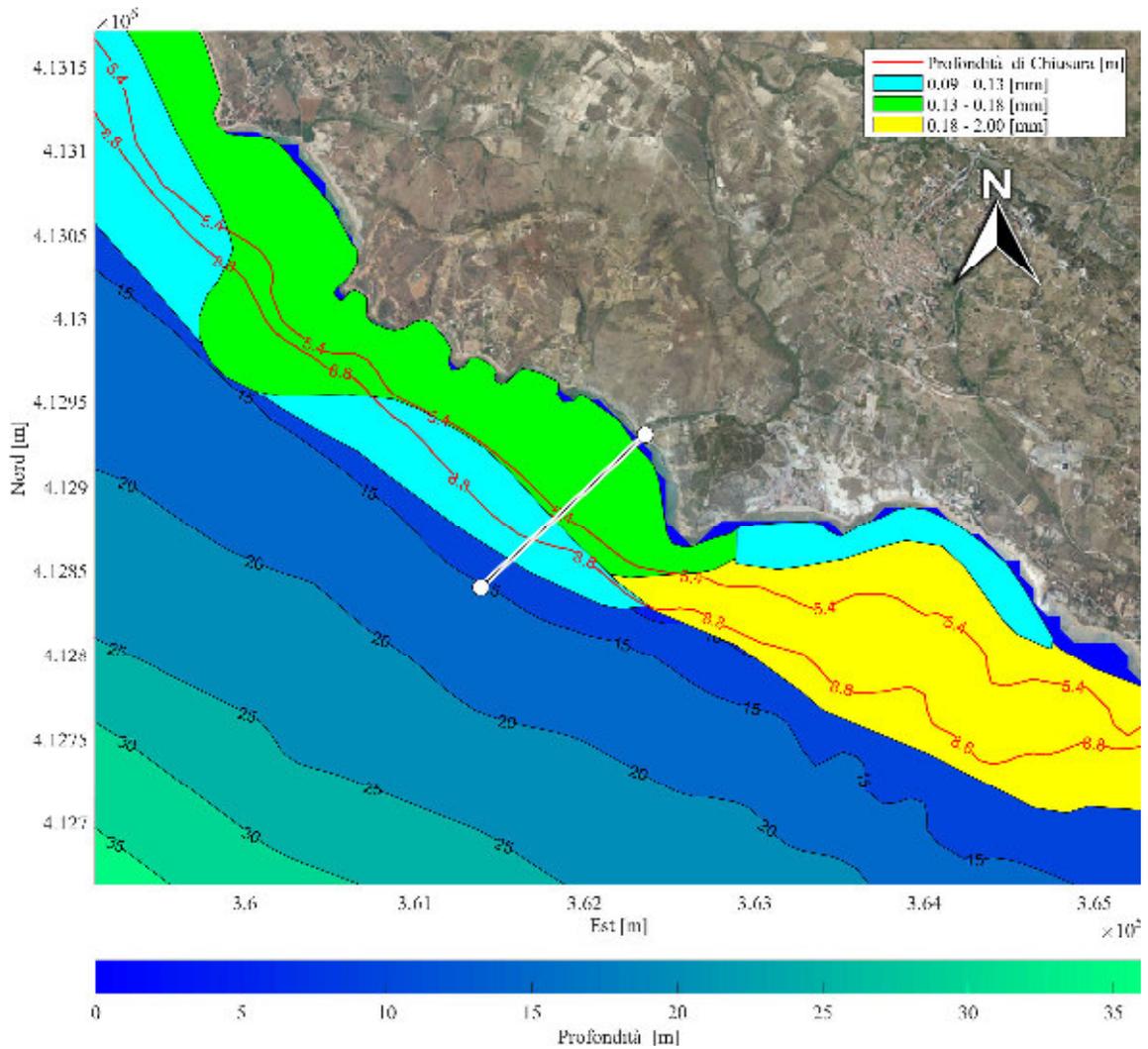


Figura 8.6: Informazioni sui sedimenti desunte dall'Atlante delle Coste – diametro medio dei sedimenti. Le curve in rosso rappresentano le profondità di chiusura massima e minima degli anni di osservazione.

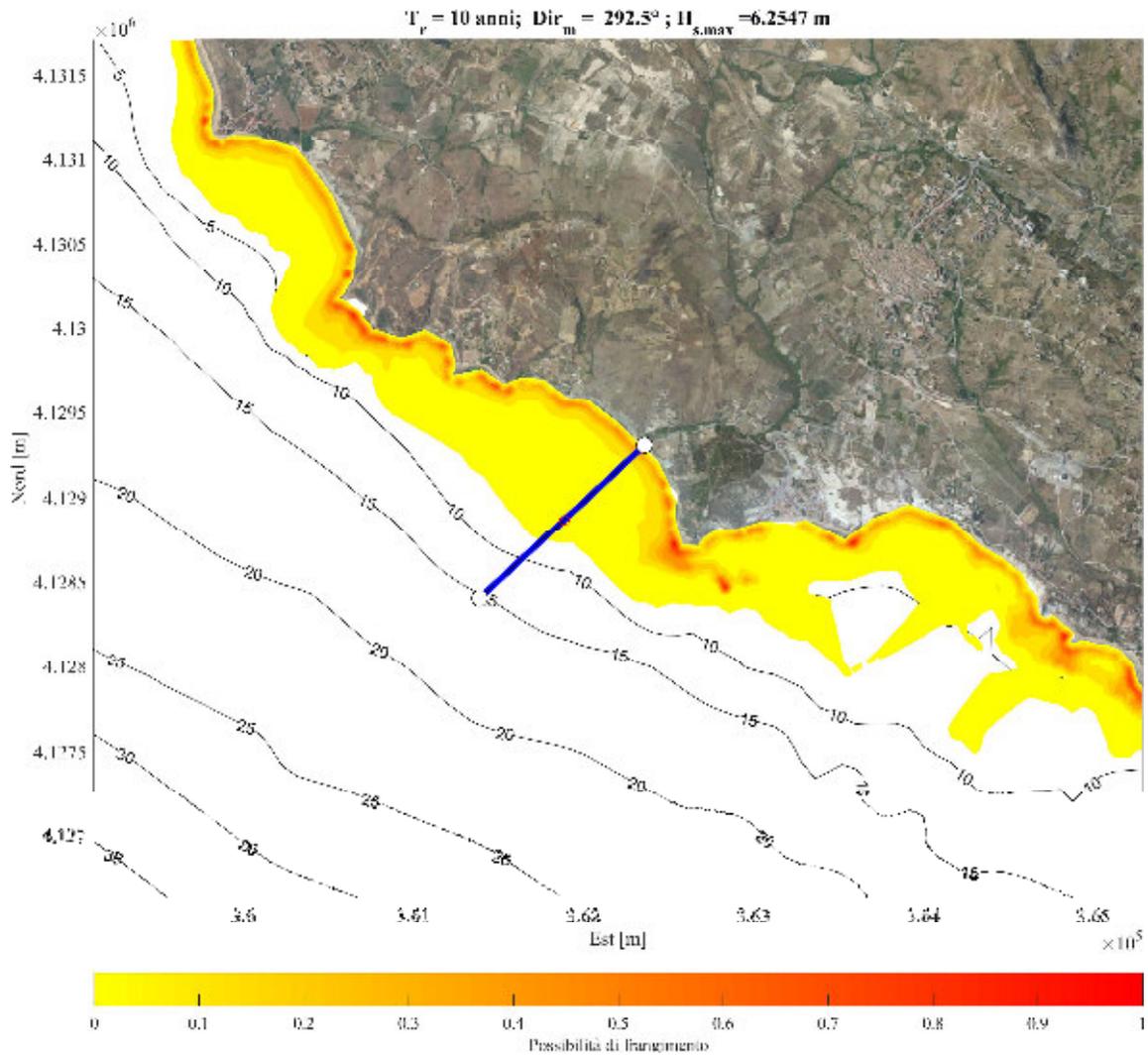


Figura 8.7: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

9 Verifica di massima delle sollecitazioni idrauliche per la condotta di presa e per la condotta di scarico

9.1 Premessa

Una condotta sottomarina in esercizio è sottoposta all'azione del moto ondoso, delle correnti e di ogni altro fenomeno legato all'ambiente.

A questi fattori naturali si deve aggiungere l'azione conseguente ad alcune attività umane come, ad esempio, la pesca a strascico, l'ancoraggio dei natanti, ecc.

Di norma, per le condotte sottomarine, l'effetto del moto ondoso più gravoso da assumere a base dei calcoli, viene scelto, con tempi di ritorno compreso tra i 30 ed i 50 anni. In questo studio preliminare, a vantaggio di sicurezza, si è assunto per tutti i calcoli, un tempo di ritorno $T_R = 50$.

Per quanto riguarda le correnti al fondo (di carattere permanente, quali ad esempio le correnti di marea, di compensazione, ecc.) non è possibile dare dei criteri generali di previsione, essendo questi fenomeni strettamente legati alle condizioni intrinseche di luogo. In linea di larga massima, si può affermare che nel nostro paese (su fondali sabbiosi o melmosi) queste raramente superano i 50 cm/s, in modesta profondità.

In genere le correnti più intense sono però quelle cosiddette di *long-shore*, quelle cioè che si sviluppano parallelamente alla costa e sono conseguenti a mareggiate che la investono obliquamente.

È evidente che la concomitanza degli eventi, mareggiata e corrente deve essere assunta a base delle verifiche.

Nello studio idraulico-marittimo sono stati determinati, per vari tempi di ritorno, i valori delle altezze d'onda significative H_s ed il periodo di picco T_p per diverse direzioni d'attacco del moto ondoso.

La progettazione delle condotte sottomarine, dal punto di vista statico, dipende dalla corretta previsione delle forze dinamiche esercitate dal moto ondoso sulle medesime. C'è da dire che una valutazione analitica dei fenomeni provocati dal moto ondoso non è completamente determinabile, pertanto occorrerà fare delle semplificazioni ed approssimazioni che però non inficiano il

risultato sotto l'aspetto pratico, purché si adottino adeguati coefficienti di sicurezza.

Occorre prestare attenzione al fatto che la condotta dovrà essere stabile, cosicché ciascun elemento, considerato come struttura a se stante risulti ancora stabile. In caso contrario, è possibile che la condotta tenda, con le violente mareggiate a spostarsi a poco a poco dal suo posizionamento originale arcuandosi fino al collasso.

Pertanto è di estrema importanza il tipo di condotta la tecnologia di posa e naturalmente il terreno di sedime ed i presidi occorrenti (ricoprimenti, giunzioni, ancoraggi, etc.) volti ad assicurare l'assoluta stabilità del manufatto, in presenza della immancabile dinamica dei fondali.

9.2 L'ambiente fisico

Dalle notizie assunte, dalla relazione geologica e dalla cartografia esistente, i fondali presentano la stratigrafia caratterizzata da uno strato sommitale di sabbia di potenza variabile entro qualche metro, di un sottostante livello di potenza variabile di sabbie o frammenti calcarenitici variamente cementati. Ulteriori indagini sedimentologiche saranno necessarie a supporto delle future fasi di progettazione.

9.3 Determinazione del tipo di tubazione per la formazione delle condotte

In definitiva i parametri principali che nella fattispecie debbono essere considerati per valutare la realizzazione delle opere a mare riguardano:

- la consistenza del fondo;
- le caratteristiche morfologiche del tracciato;
- le correnti;
- la scelta del tipo di tubazione in ordine alla pur conveniente tecnologia di posa, al rivestimento protettivo, alla conservazione delle caratteristiche idrauliche, alla occorrenza di presidi per la stabilità ed al mantenimento della integrità funzionale delle opere.

Per quanto riguarda la natura, la consistenza del fondo e le caratteristiche morfologiche del tracciato, la situazione intrinseca ed estrinseca del luogo si presenta, sulle generali, con andamento altimetrico uniforme e in riguardo alla

natura dei fondali non emergono situazioni particolarmente precarie per la stabilità delle condotte.

I fondali sabbiosi inducono a scegliere tipi di condotte costituite da tubazioni di agevole movimentazione, di facile collegamento e comportanti tecnologie di posa che limitino al minimo operazioni subacquee e richiedono in definitiva contenuti tempi di esecuzione.

Circa i rivestimenti protettivi tenendo presente la loro rilevanza in relazione alla attività della piccola fauna marina dei bassi fondali (balani, litodomi e animali perforatori in genere dei rivestimenti bituminosi, per cui in tali tratti è necessario anche sotto questo profilo il ricoprimento delle condotte con uno strato di almeno 60 cm di sabbia); appare di gran lunga preferibile l'adozione di tubazioni non esigenti rivestimenti di presidio, quali quelle in resine.

Per quanto concerne le tecnologie di posa e con riferimento alle esperienze disponibili delle costruzioni esistenti di condotte subacquee di grandi diametri risulta ormai certa la preferenza da accordarsi allo assemblaggio di condotte galleggianti da porsi successivamente a tratti più o meno lunghi; ciò comporta tubazione con tipi di giunzioni semplici di tipo non sfilabile, di notevole elasticità longitudinale ed adeguata resistenza alla trazione.

In definitiva da quanto sopra il tipo di tubazione più conveniente per la formazione delle condotte subacquee di che trattasi può riconosceri in quelle in PEAD. Questo materiale presenta sugli altri i seguenti vantaggi:

a) leggerezza, hanno peso specifico $0.945+0.65 \text{ g/cm}^3$ contro i 7.8 g/cm^3 dell'acciaio.

La leggerezza comporta una seconda economia nelle spese di trasporto e di posa e semplifica le tecnologie di movimentazione.

b) facilità e conseguente rapidità di posa in opera: dovute alla maneggevolezza dei tubi e alla loro lunghezza di fabbricazione (fino 12m) generalmente maggiore di quella di altri materiali; alla facilità di collegare per saldatura i tubi fra loro o con tubi di altro materiale; alla facile lavorabilità con poche attrezzature;

c) eccellente resistenza chimica in condizioni ambientali largamente variabili.
d) basso coefficiente di scabrezza che influisce favorevolmente sulla perdita di carico e rende difficile la formazione di incrostazioni e di depositi solidi lungo le pareti;

e) ottimi isolanti

f) elevata resistenza alla abrasione provocata da sostanze abrasivi presenti in elevate concentrazioni nelle acque di scarico.

g) proprietà meccaniche soddisfacenti per il normale impiego dei tubi.

Ciò del resto, nel caso in esame, attese le semplificazioni e l'affidabilità delle tecniche di giunzione e posa per le condotte sottomarine, nel complesso, coincide con l'economia della scelta.

9.4 Modalità di posa

Con riferimento alle positive esperienze in esecuzioni simili, si prevedono le seguenti modalità di posa:

a) preparazione delle sedi di posa in escavo, dalla battigia alla profondità di circa -15.00 m, in modo da assicurare una conveniente copertura, sulla generatrice superiore, a presidio dalle azioni indotte dal moto ondoso e degli altri fattori esterni (pesca, traffico marittimo, ancore, ecc.);

b) spianamento e regolarizzazione del fondo marino, con eventuali risanamenti per i tratti di consistenza eccessivamente molle, ed eliminazione di eventuali asperità ricadenti nella fascia di lavoro ad evitare danneggiamenti nella delicata fase di posa;

c) approntamento dei blocchi affondatori in c.a., (come risulta dai grafici di progetto);

d) assemblaggio delle tubazioni mediante saldatura per formazione di tratti di condotta, di lunghezza variabile che varate successivamente e dislocate sempre in galleggiamento controllato, saranno successivamente posate in opera mediante affondamento controllato e infine giuntate in opera ai tratti precedenti mediante giunzioni a flangia, eseguite a mezzo sommozzatore.

9.5 Valutazione delle forze idrodinamiche indotte dal moto ondoso sulla condotta sottomarina

Le forze idrodinamiche che agiscono su una condotta, in prossimità del fondo, investita da un'onda sono principalmente tre (rappresentate in Figura 9.1), che si indicheranno come qui di seguito:

F_i = forza d'inerzia

F_d = forza di trascinamento (*drag*)

F_l =forza di risalita (*lift*)

Detto P_L il peso immerso della condotta, compreso il suo rivestimento e l'eventuale zavorra, si ha stabilità se:

$$\lambda = \frac{F_i + F_d}{F_f} \leq 0.9 \quad (9.1)$$

dove con F_f viene indicata la forza di attrito pari a:

$$F_f = \mu(P_i - F_l) \quad (9.2)$$

e con μ il coefficiente di attrito tra condotta e fondo.

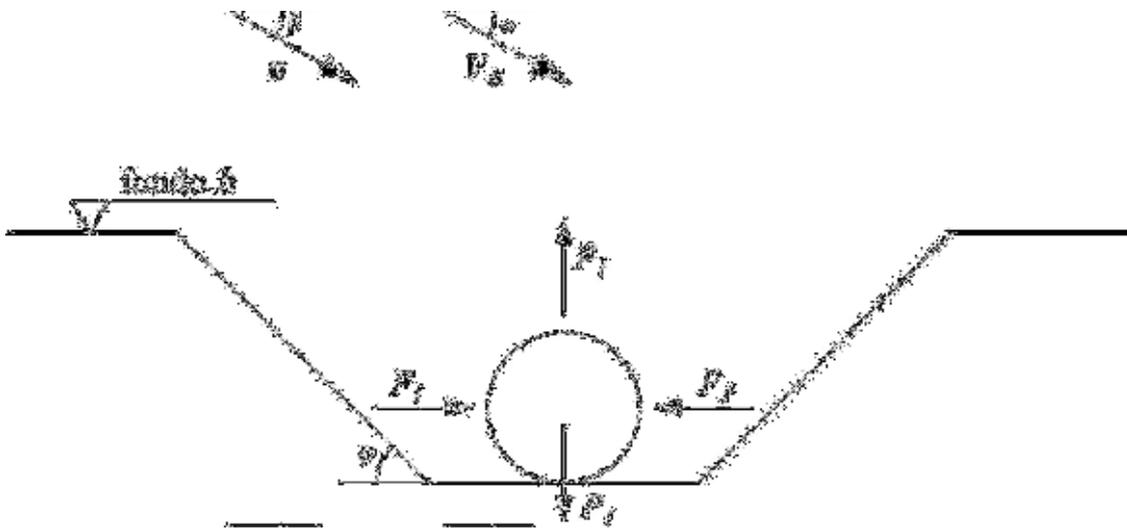


Figura 9.1: schema delle forze agenti sulla condotta.

Tale valore è in genere compreso tra 0.3 e 1.5, per prudenza e specialmente in assenza di sperimentazione diretta, conviene assumere valori compresi tra 0.5 e 0.6.

In realtà, solo su fondali assai consistenti la condotta rimane appoggiata al fondo. Su fondali costituiti da fanghi limo-argillosi l'interramento spontaneo frequentemente supera il 30-50%: ciò risulta a favore della stabilità.

Al passaggio dell'onda però, le varie componenti non raggiungono il valore massimo nello stesso istante, o meglio nella stessa fase, poiché, come meglio verrà illustrato in seguito, F_d e F_l sono legate alla velocità massima delle particelle liquide, mentre F_i è legata all'accelerazione massima delle stesse.

Amnesso dunque che al fondo, durante la mareggiata considerata, esista una corrente V_0 di direzione normale alla condotta, secondo le *equazioni di Morison*, risulta il seguente sistema di equazioni:

$$F_l = C_l \rho \cdot \pi \cdot \frac{D_e^2}{4} \cdot a_x \cdot \cos(\alpha) \quad (9.3)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot D_e \cdot [u_x \cdot \cos(\alpha) + V_t \cdot \cos(\beta)] \cdot |(u_x \cdot \cos(\alpha) + V_t \cdot \cos(\beta))| \quad (9.4)$$

$$F_l = \frac{1}{2} C_L \cdot \rho \cdot D_e \cdot [u_x \cdot \cos(\alpha) + V_t \cdot \cos(\beta)]^2 \quad (9.5)$$

ove:

α := angolo tra condotta e onde;

β := angolo tra corrente e onde;

C_l := coefficiente di inerzia;

C_D := coefficiente di *drag*;

C_l := coefficiente di *lift*;

D_e := diametro esterno della condotta;

u_x := la velocità orbitale orizzontale del moto ondoso al fondo;

a_x := accelerazione orbitale orizzontale del moto ondoso al fondo;

u_z := la velocità orbitale verticale del moto ondoso al fondo.

In particolare, V_t rappresenta la velocità apparente della corrente, ovvero corretta per tenere conto della posa in trincea:

$$V_t = (1 - 0.305 s) V_0 \quad (9.6)$$

con s pari alla profondità di scavo.

$$u_x = \frac{H}{2} \sigma \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \sigma \cdot t) \quad (9.7)$$

$$u_z = \frac{H}{2} \sigma \cdot \frac{\sinh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \sigma \cdot t) \quad (9.8)$$

$$a_x = \frac{H}{2} \sigma^2 \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \sigma \cdot t) \quad (9.9)$$

9.6 Calcolo di massima della condotta sottomarina di presa

L'onda di progetto utilizzata per il dimensionamento di massima dei blocchi di ancoraggio e di quelli di appesantimento è stata estratta dallo studio idraulico marittimo in corrispondenza dell'ultimo punto della condotta sottomarina di presa (punto P della Tabella 7.2) alla profondità di 15 sotto il livello medio marino. I parametri di onda sono sintetizzati nella seguente tabella:

Tabella 9.1: Risoluzione delle equazioni di Morison per l'onda di progetto.

T_R [anni]	H_s [m]	T_p [s]	h [m]
50	5.38	10.1	15

I calcoli delle velocità orbitali (Vedi Figura 9.2) mostrano come in asse alla condotta le velocità verticali risultano modeste, infatti alla profondità assegnate ci troviamo in condizioni idrauliche di *acque intermedie* ($L = 110.38 \text{ m}$; $\frac{L}{20} < h = 15 \text{ m} < \frac{L}{2}$).

Nella Figura 9.3 sono rappresentati gli andamenti temporali delle forze F_i , F_d e la forza verticale F_l . La forza massima orizzontale per il punto considerato vale:

$$\max(F_i + F_d) = 1.17 \text{ kN/m}$$

La forza di attrito massima è:

$$F_{fmax} = \mu \cdot [P_i - \max(F_l)] = 1.31 \text{ kN/m}$$

Il peso immerso del sistema condotta per unità di lunghezza è dato da:

$$P_i = P_t + P_{app} + P_{anc} - (S_i + S_{ianc} + S_{iapp}) \quad (9.10)$$

dove:

P_t := Peso alleggerito della condotta sottomarina per unità di lunghezza;

P_{app} := Peso dei blocchi di appesantimento per unità di lunghezza;

P_{anc} := Peso dei blocchi di ancoraggio per unità di lunghezza;

S_i := Spinta idrostatica sulla condotta per unità di lunghezza;

S_{ianc} := Spinta idrostatica sui blocchi di ancoraggio per unità di lunghezza;

S_{iapp} := Spinta idrostatica sui blocchi di appesantimento per unità di lunghezza.

In fase di progettazione preliminare la condotta sottomarina più esposta sarà collocato in opera con l'ausilio di collari in ghisa del peso di circa 210 kg posti a interasse pari a 6,00 m e ancorati ai fondali con blocchi di ancoraggio del peso di 3,9 t posti ad interasse di 48,00 m..

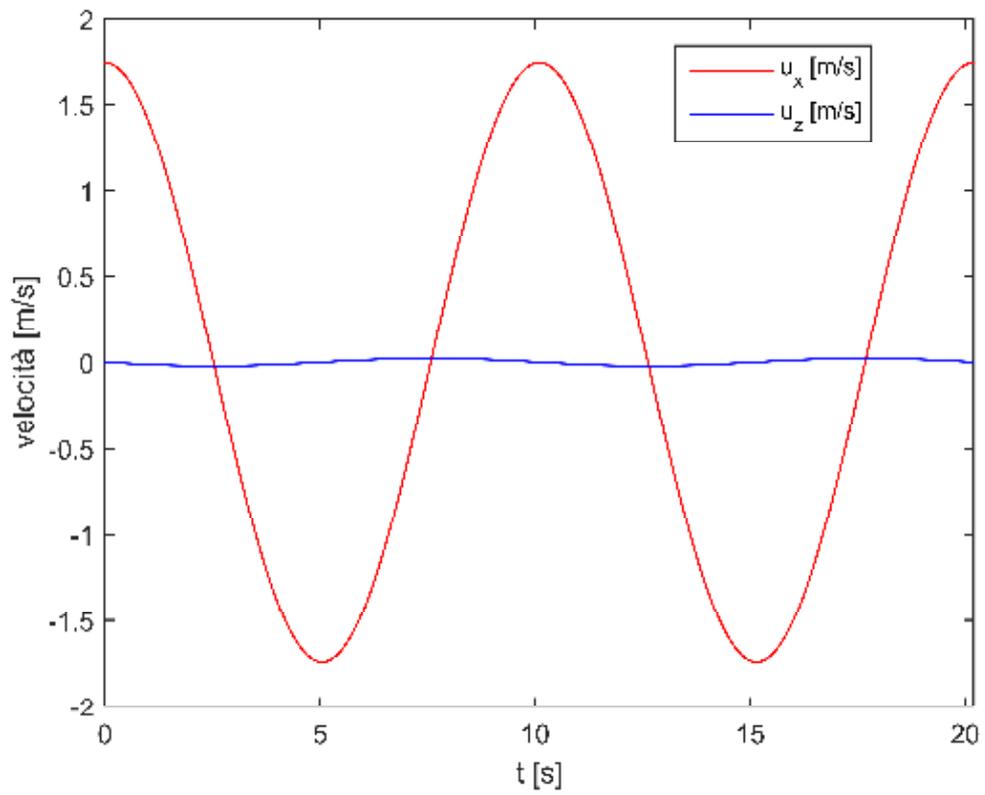


Figura 9.2: Velocità orbitali orizzontale (u_x) e verticale (u_z) in asse alla tubazione dell'onda di progetto.

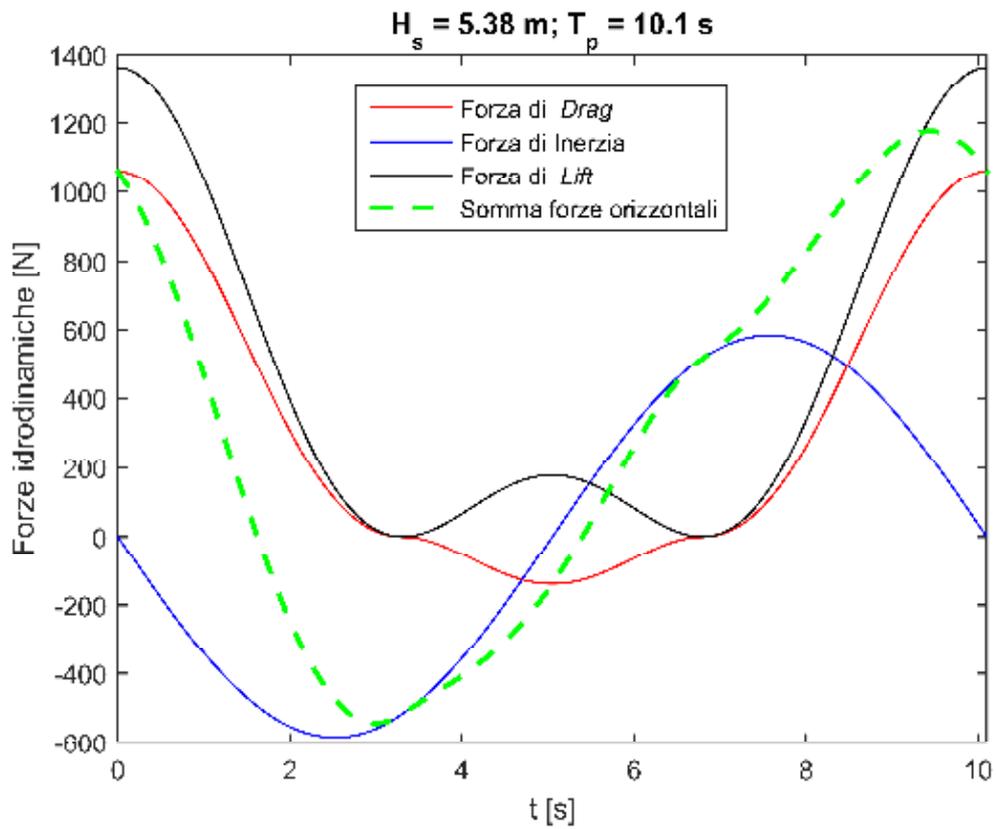


Figura 9.3: Rappresentazione grafica delle forze agenti sulla tubazione relativamente ad un tempo pari al periodo di picco (T_p) dell'onda di progetto.

10 Sintesi dei risultati e conclusioni

Il presente studio è stato condotto allo scopo di individuare il clima ondoso al largo del paraggio di Realmonte, a supporto dello studio di fattibilità di un impianto di produzione di solfato di potassio e cloruro di sodio ricristallizzato.

Si è preliminarmente analizzato il clima meteomarinico. In particolare, per quanto attiene alla caratterizzazione del regime dei venti, l'analisi di persistenza effettuata sulla base del database di rianalisi dell'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), ha mostrato come il regime ventoso sia caratterizzato da una predominanza di venti proveniente dal settore di Nord-Nord-Ovest a quello di Ovest-Nord-Ovest, sia in termini di frequenza che in termini di massima velocità.

Per quanto concerne la caratterizzazione del clima ondoso a largo del paraggio in esame, a causa della mancanza di dati ondometrici direzionali misurati, ci si è basati sui dati di rianalisi dell'ECMWF.

L'analisi dei dati ondometrici ha mostrato come il regime medio annuo del moto ondoso sia caratterizzato da una predominanza di marosi provenienti da Ovest-Nord-Ovest, che peraltro risultano anche i più significativi dal punto di vista energetico.

In particolare, l'analisi degli eventi estremi a largo condotta sui dati ondometrici ha mostrato come le direzioni di provenienza del moto ondoso che presentano i maggiori valori di altezza d'onda siano quelle di 297.5°N e 315°N, che, per un tempo di ritorno pari a 50 anni presentano rispettivamente altezze d'onda pari a 9 m e 8.5 m.

Utilizzando i risultati dell'analisi degli eventi estremi condotta sulla base dei dati ondometrici ECMWF al largo del paraggio in esame, ed usando il modello di propagazione spettrale SWAN, si sono ricavate le altezze d'onda nello specchio acqueo sovrastante le opere di presa e scarico del suddetto impianto di produzione.

Successivamente, sulla base del modello idraulico di propagazione del moto ondoso, è stato effettuato lo studio del trasporto solido nella zona in esame utilizzando un modello matematico semplificato e verificando che l'opera di presa sia al di fuori dalla zona di maggiore agitazione del moto ondoso.

Infine, sono state dimensionate le opere di presa e scarico, sulla base delle forzanti di moto ondoso computate dall'applicazione del modello di propagazione del moto ondoso SWAN e per un tempo di ritorno pari a 50 anni.

Sulla scorta delle indagini batimetriche e sedimentologiche che saranno effettivamente preliminare alla stesura del progetto definitivo saranno eseguite le verifiche di stabilità delle condotte sottomarina tenendo conto del moto ondoso e delle correnti.

Allegato A

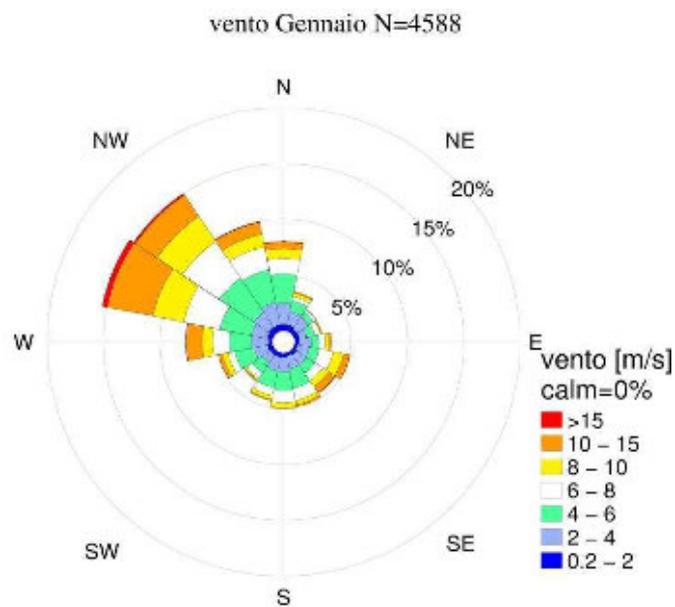


Figura A.1: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Gennaio.

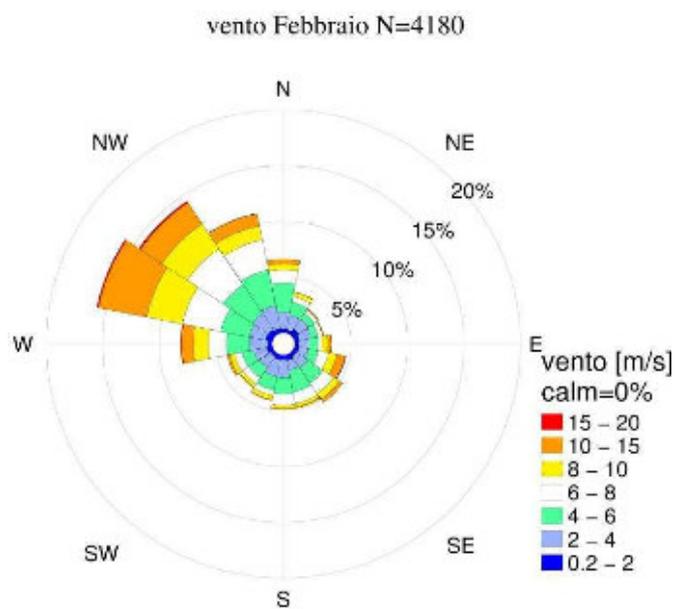


Figura A.2: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Febbraio.

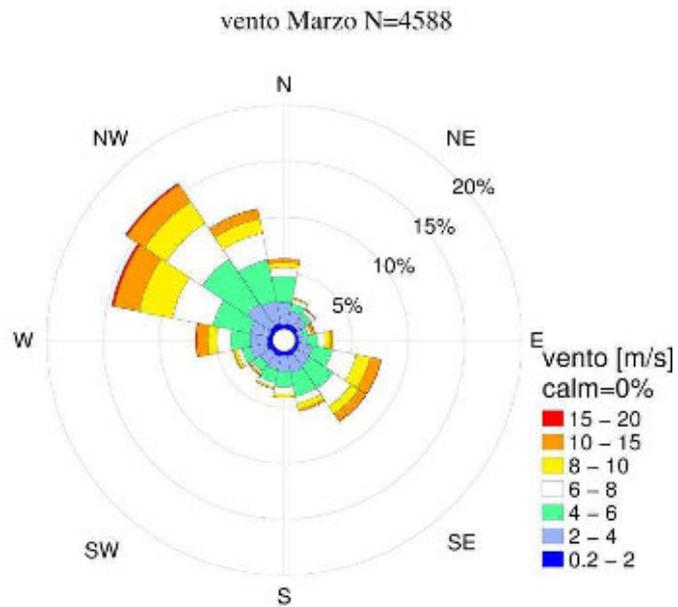


Figura A.3: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Marzo.

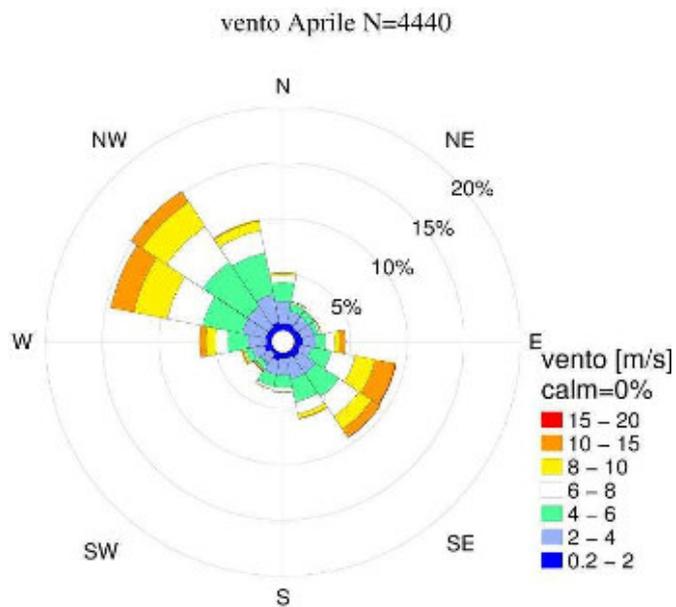


Figura A.4: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Aprile.

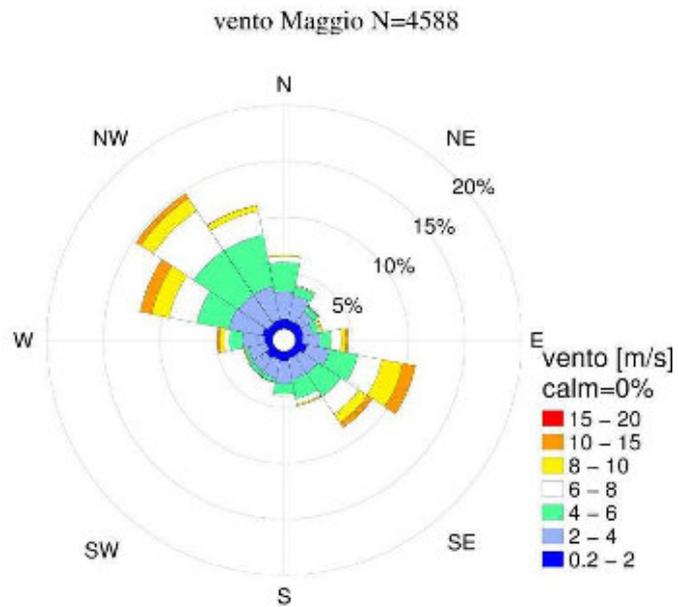


Figura A.5: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Maggio.

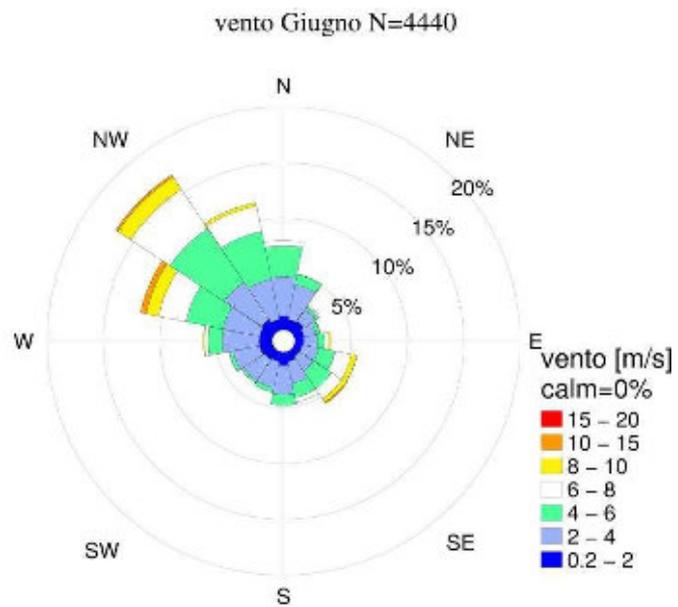


Figura A.6: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Giugno.

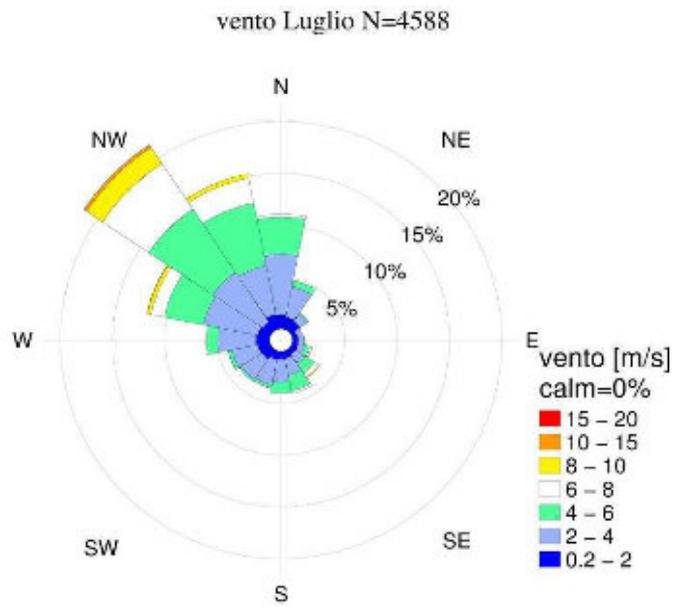


Figura A.7: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Luglio.

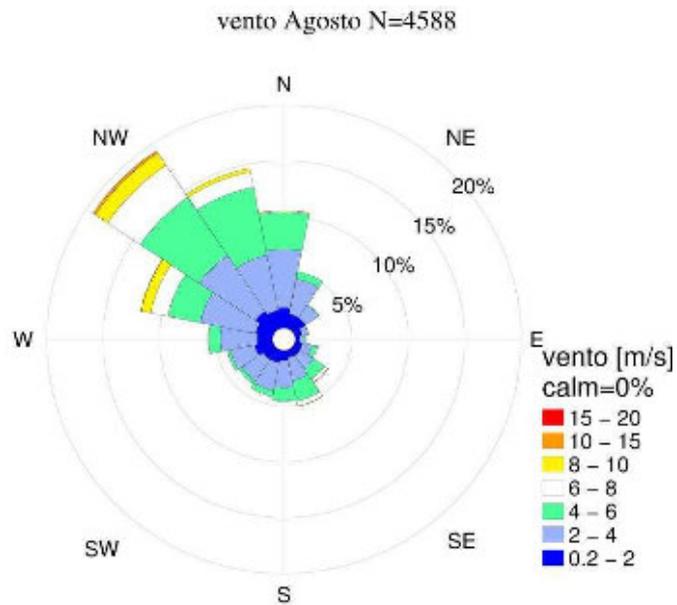


Figura A.8: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Agosto.

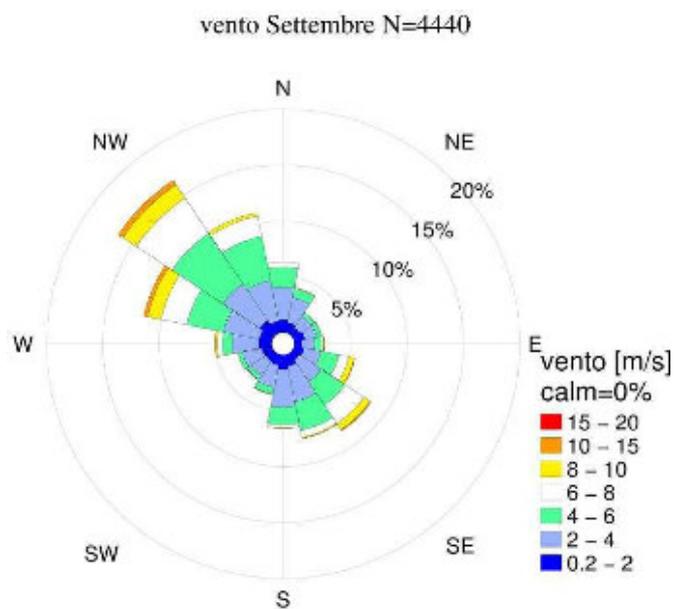


Figura A.9: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Settembre.

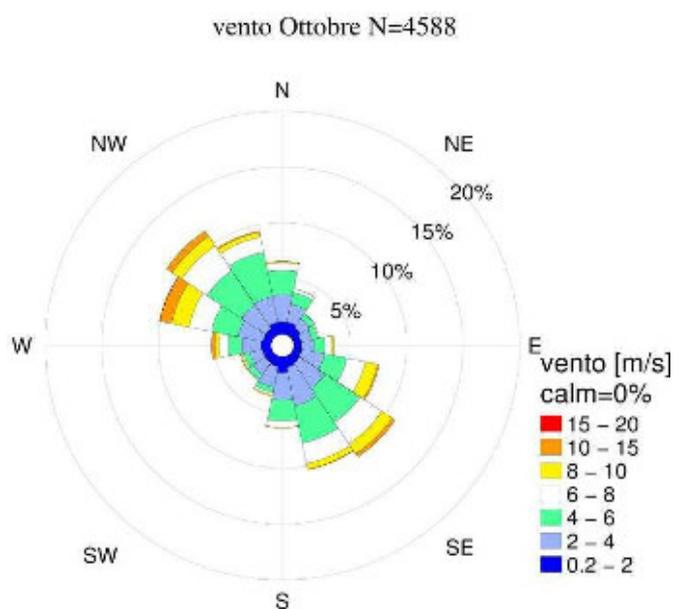


Figura A.10: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Ottobre.

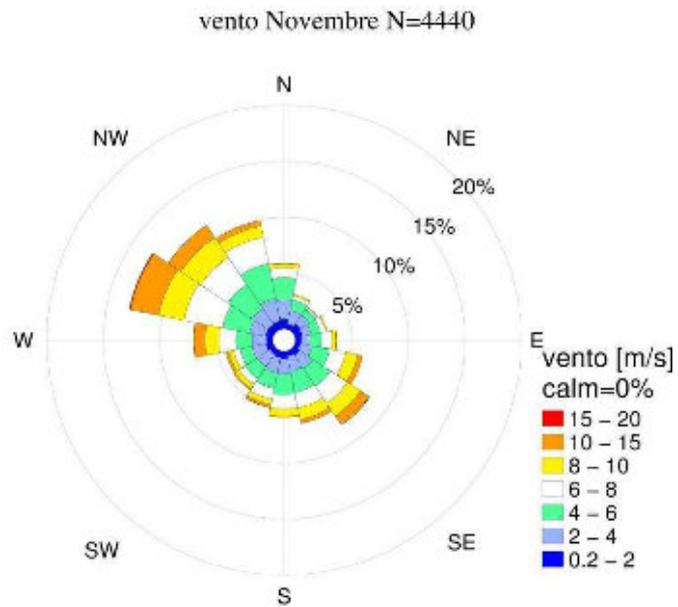


Figura A.11: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Novembre.

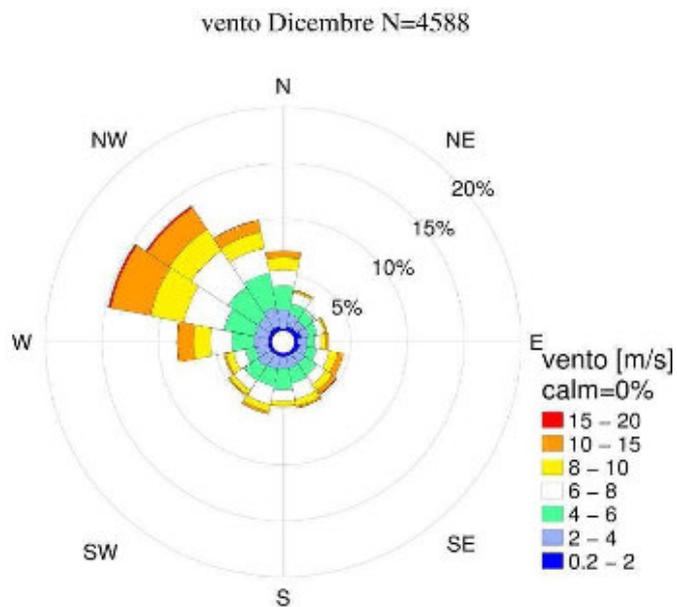


Figura A.12: Persistenza dei venti per l'intera serie temporale anemometrica 1979-2015 del punto preso al largo della zona in esame, nel mese di Dicembre.

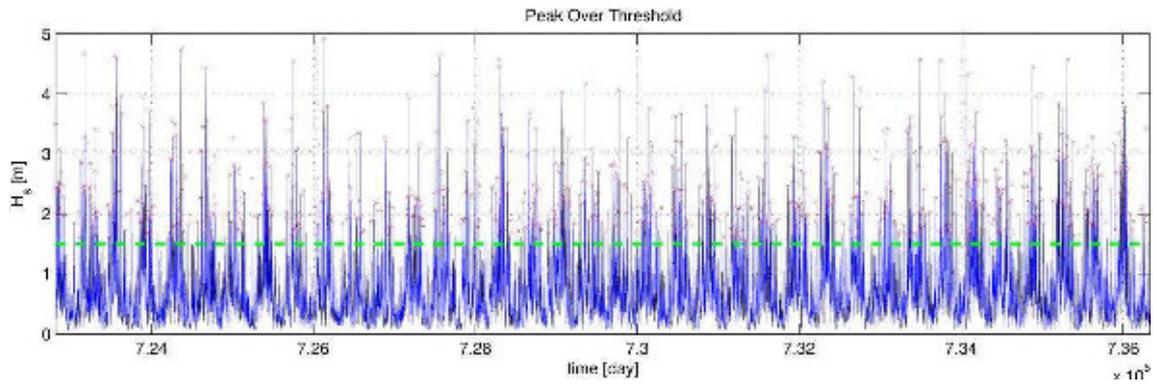


Figura A.13: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica omnidirezionale.

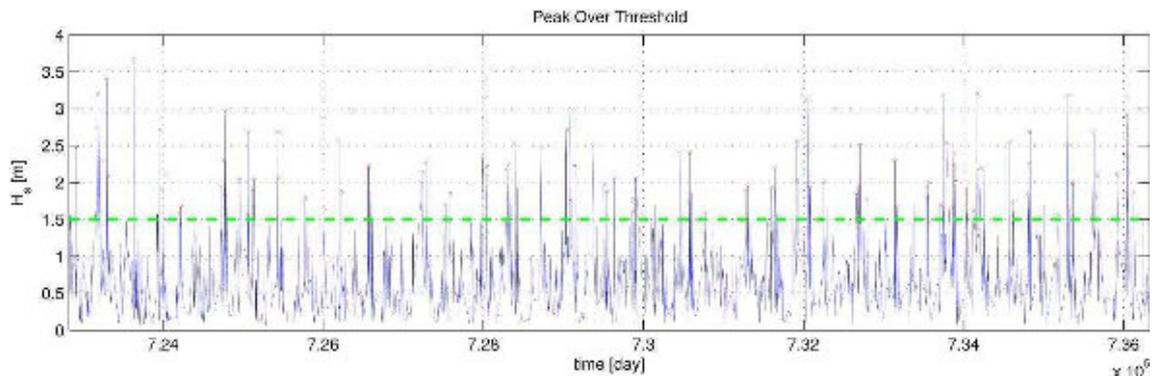


Figura A.14: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione A (SE).

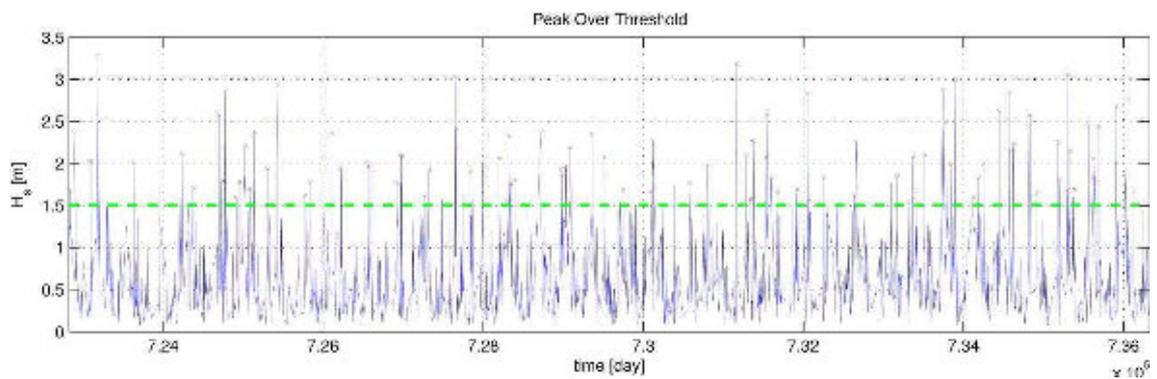


Figura A.15: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione B (SSE).

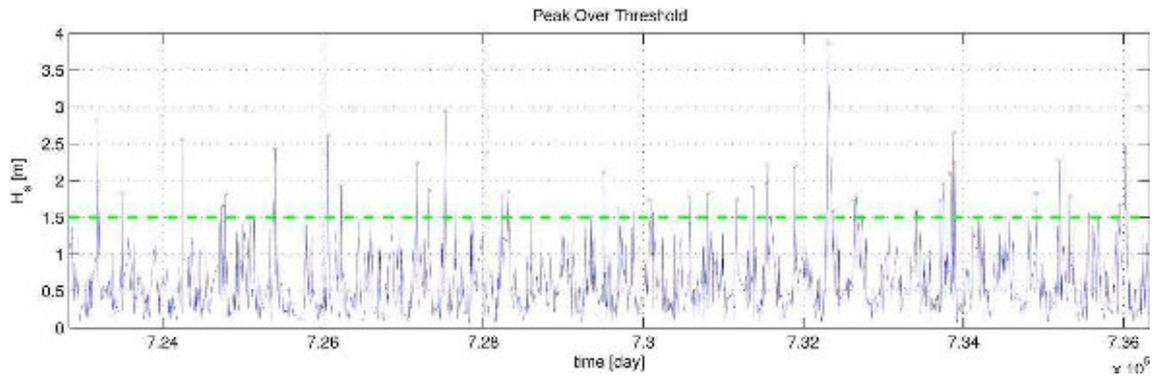


Figura A.16; Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione C (S).

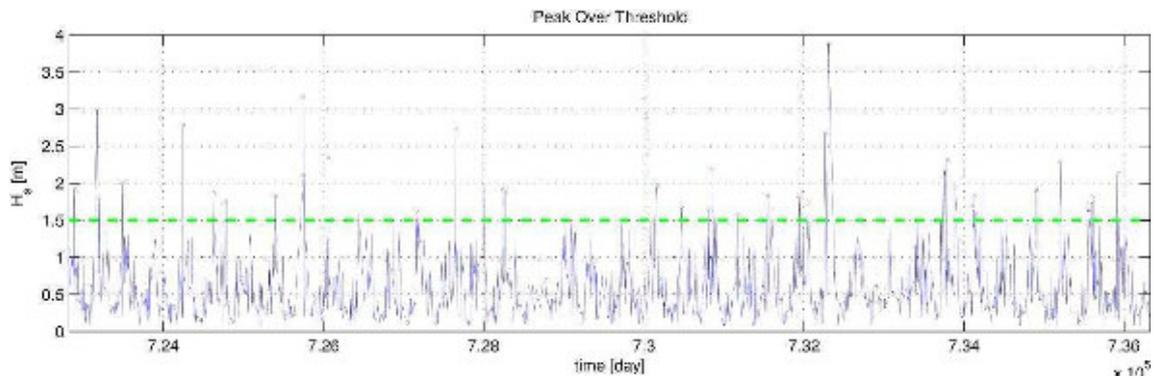


Figura A.17: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione D (SSO).

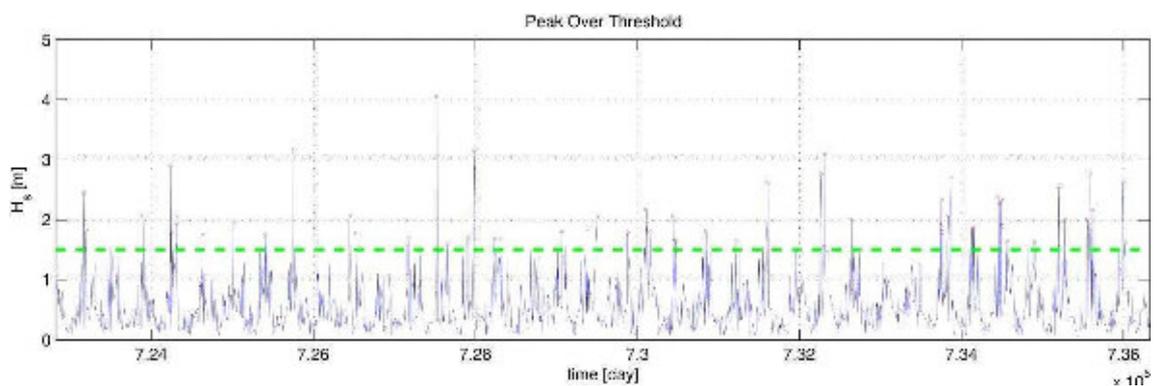


Figura A.18: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione E (SO).

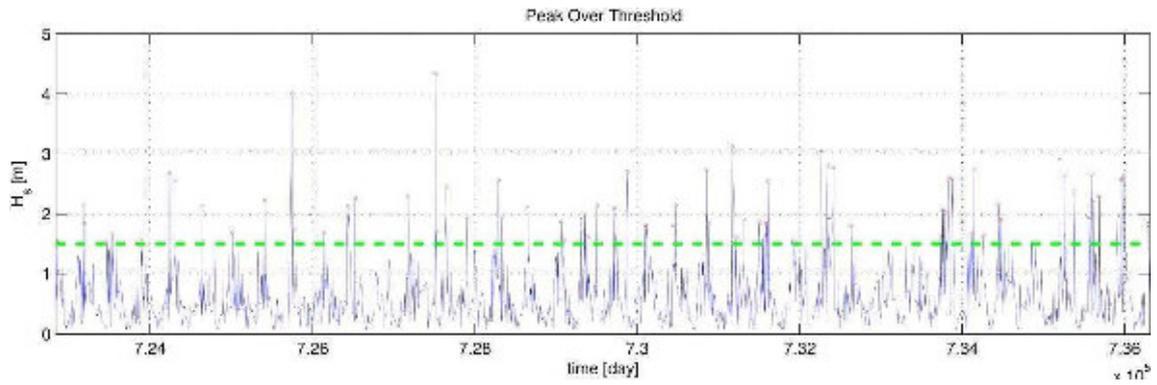


Figura A.19: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione F (OSO).

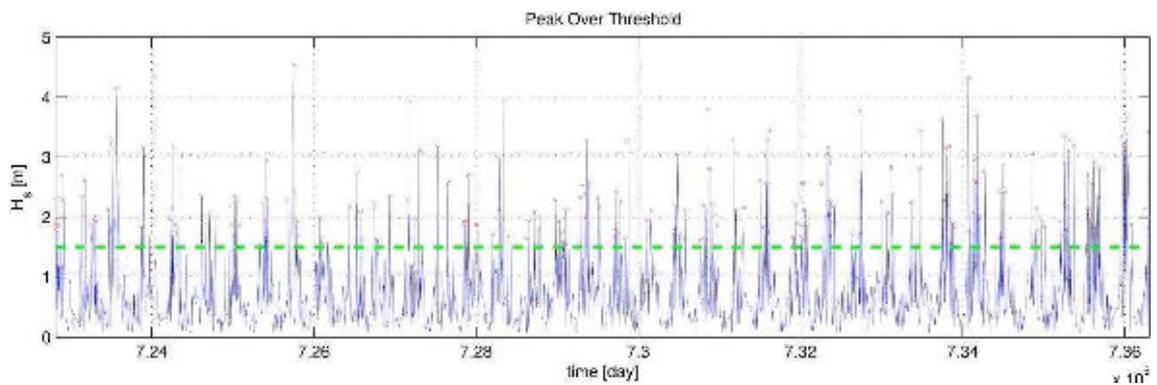


Figura A.20: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione G (O).

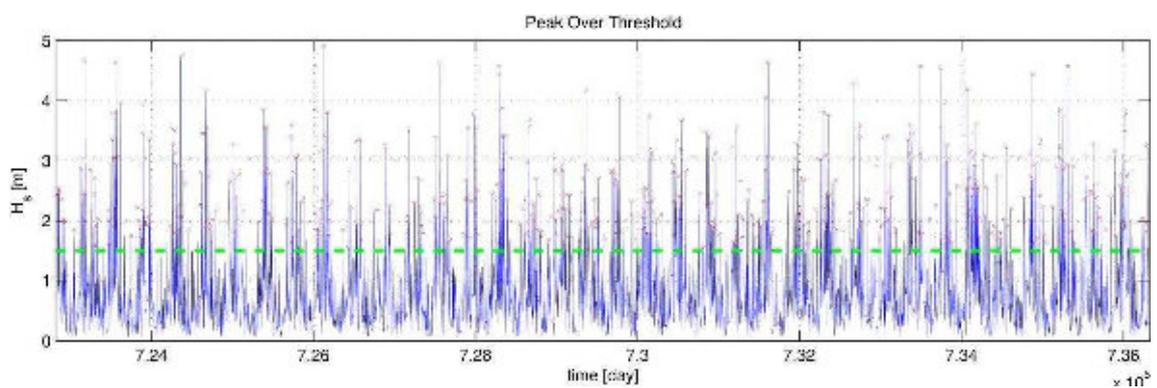


Figura A.21: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione H (ONO).

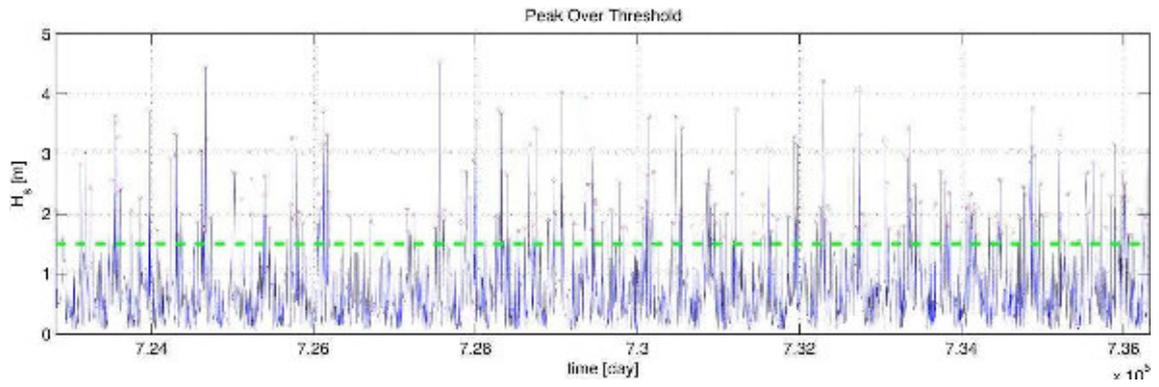


Figura A.22: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione I (NO).

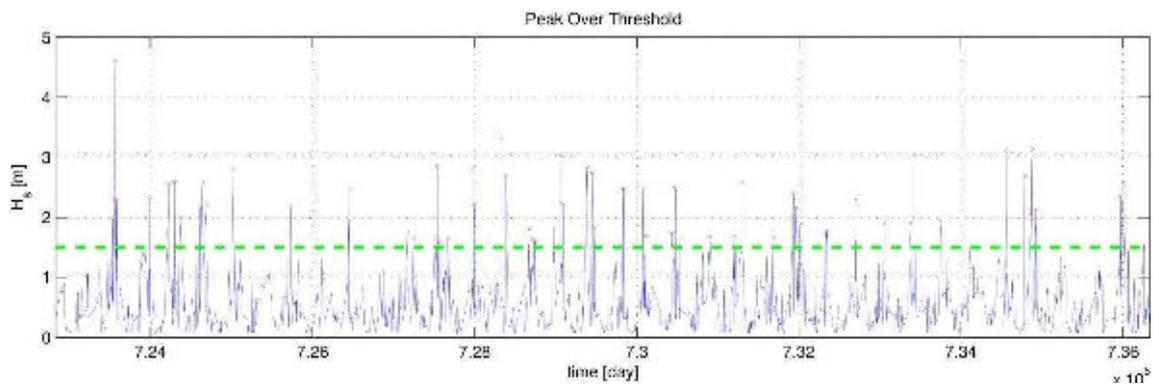


Figura A.23: Selezione degli eventi estremi tramite il metodo POT per la serie ondometrica per la direzione L (NNO).

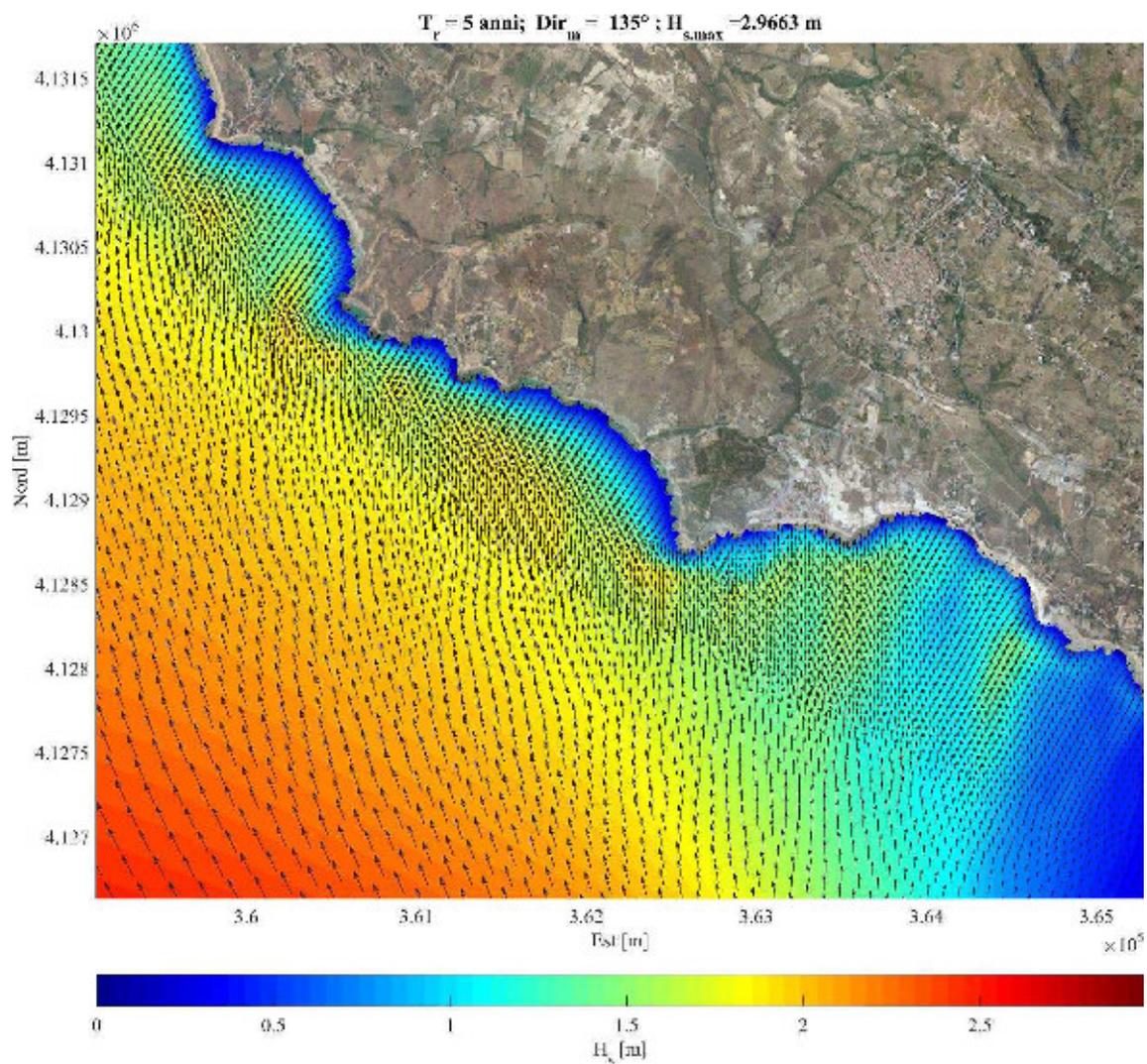


Figura A.24: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $135^\circ N$ – $T_r = 5$ anni.

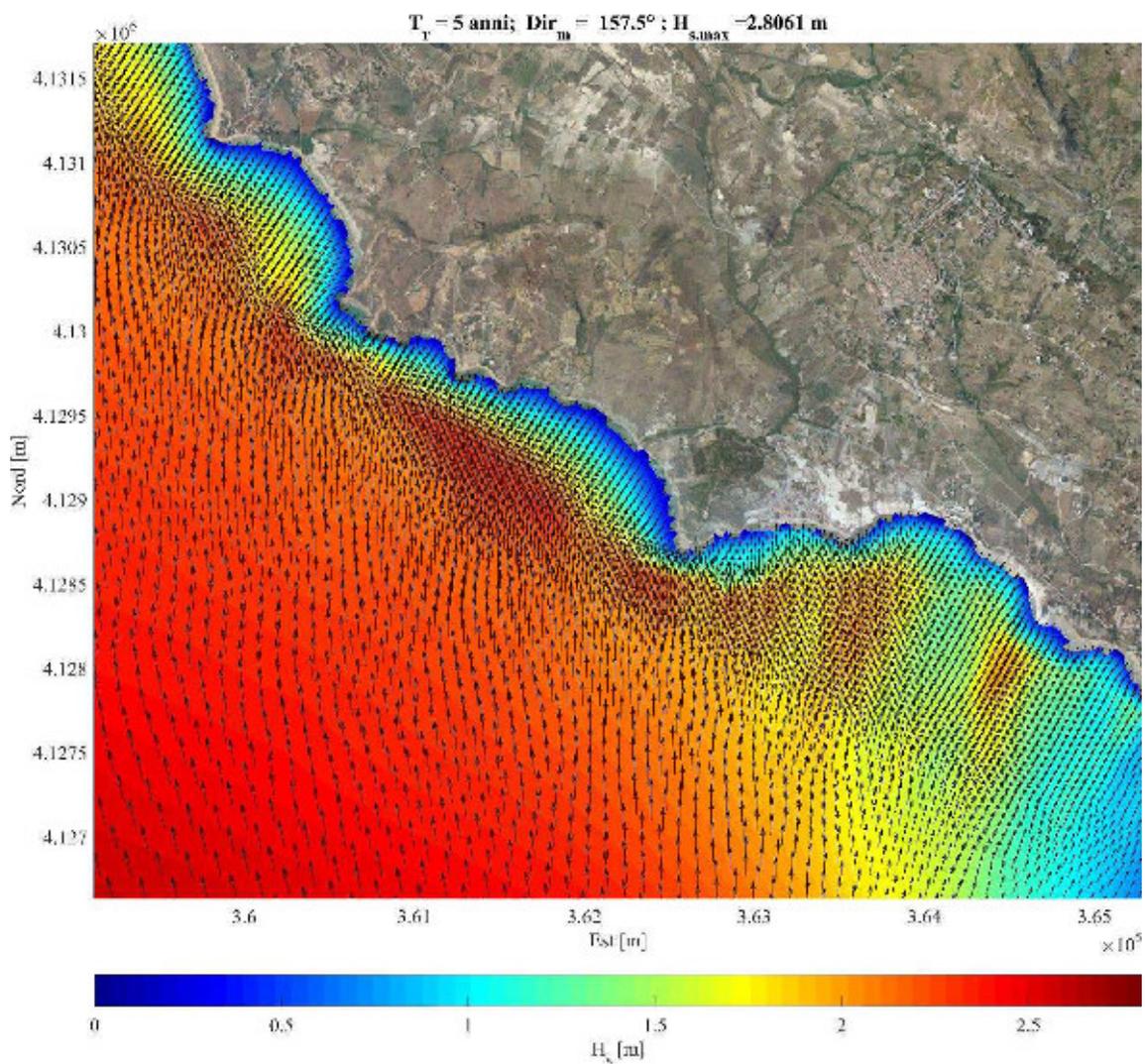


Figura A.25: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $157.5^\circ N - Tr = 5 \text{ anni}$.

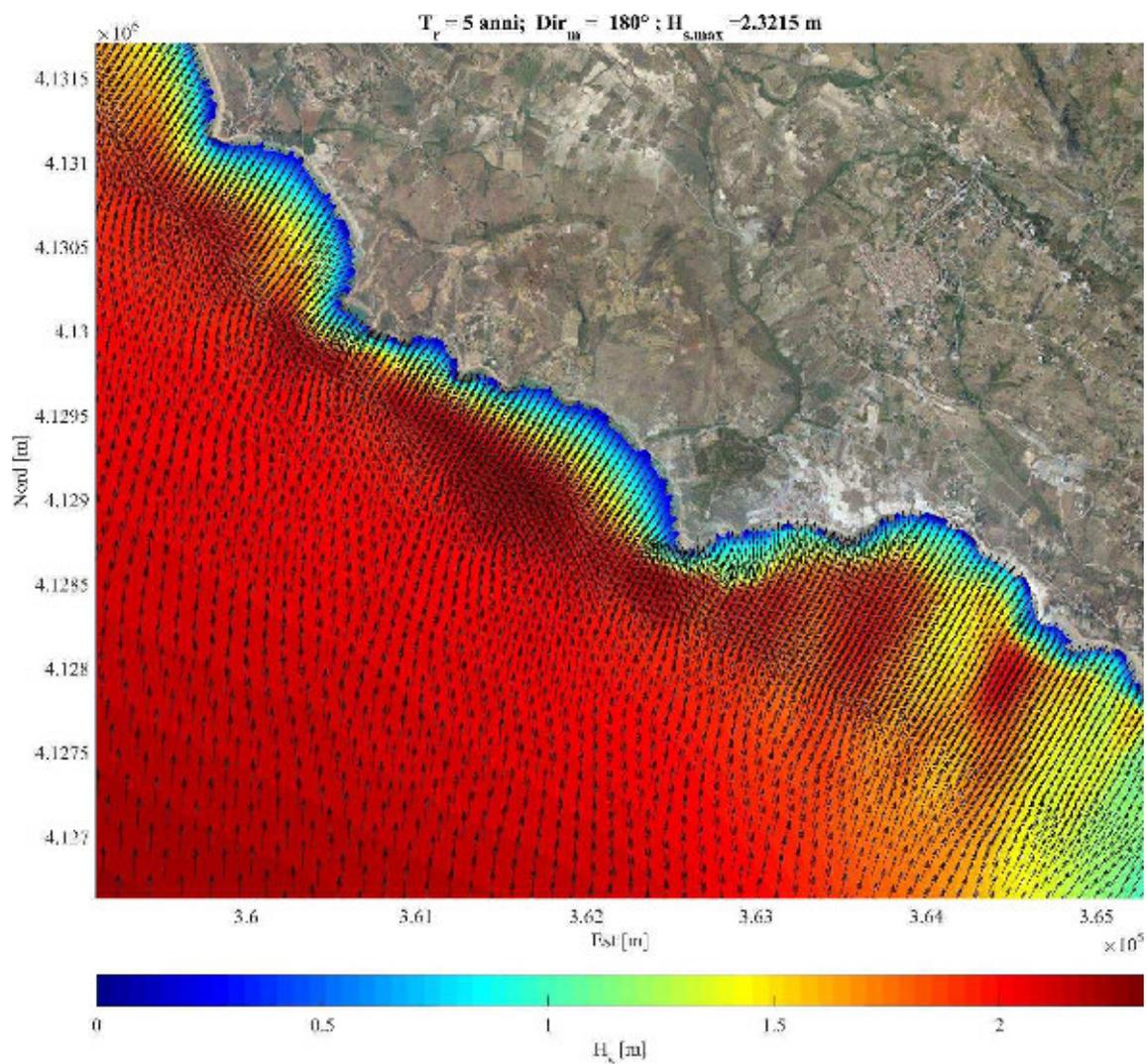


Figura A.26: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 180°N – $T_r = 5$ anni.

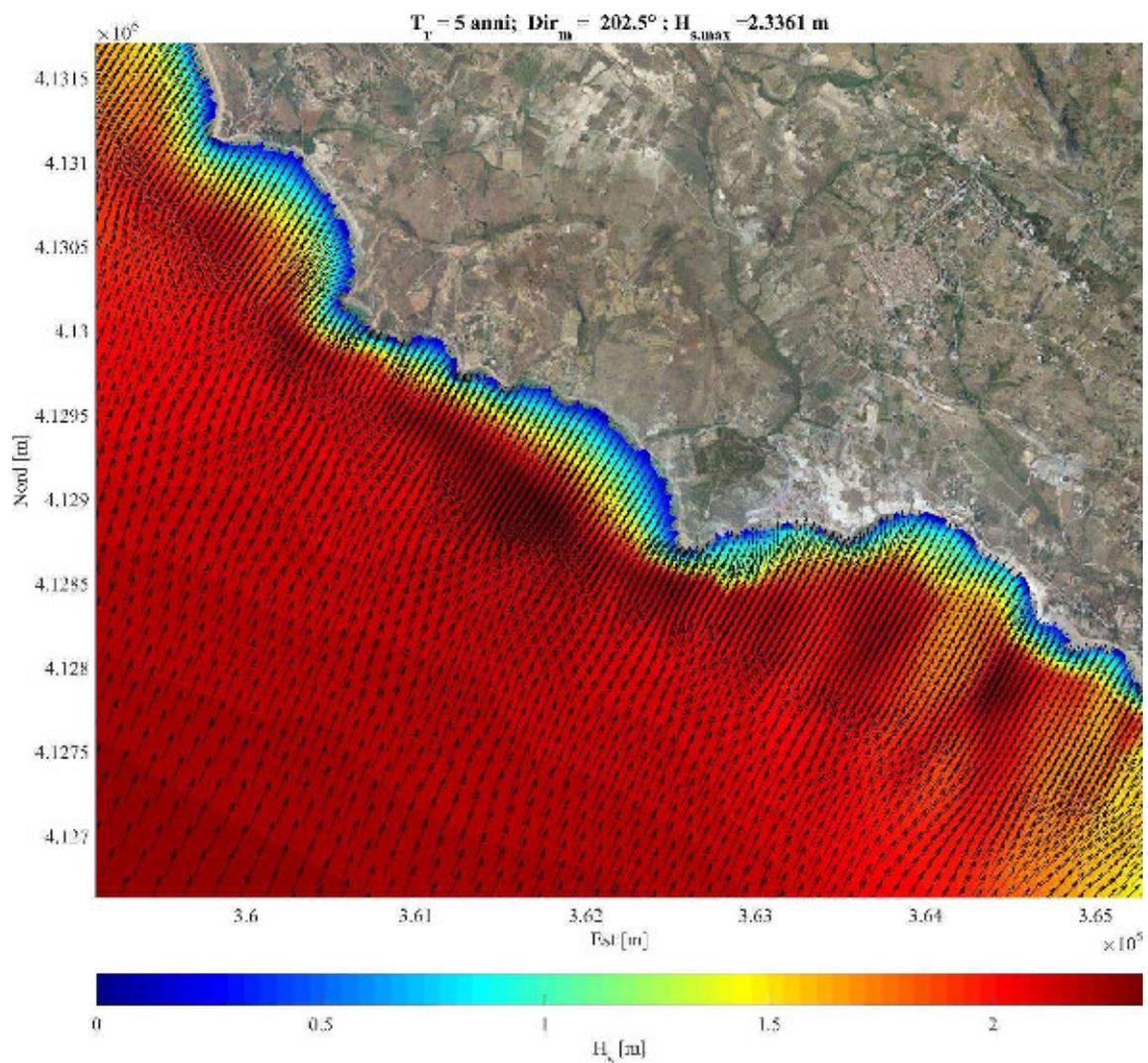


Figura A.27: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 202.5°N – $T_r = 5$ anni.

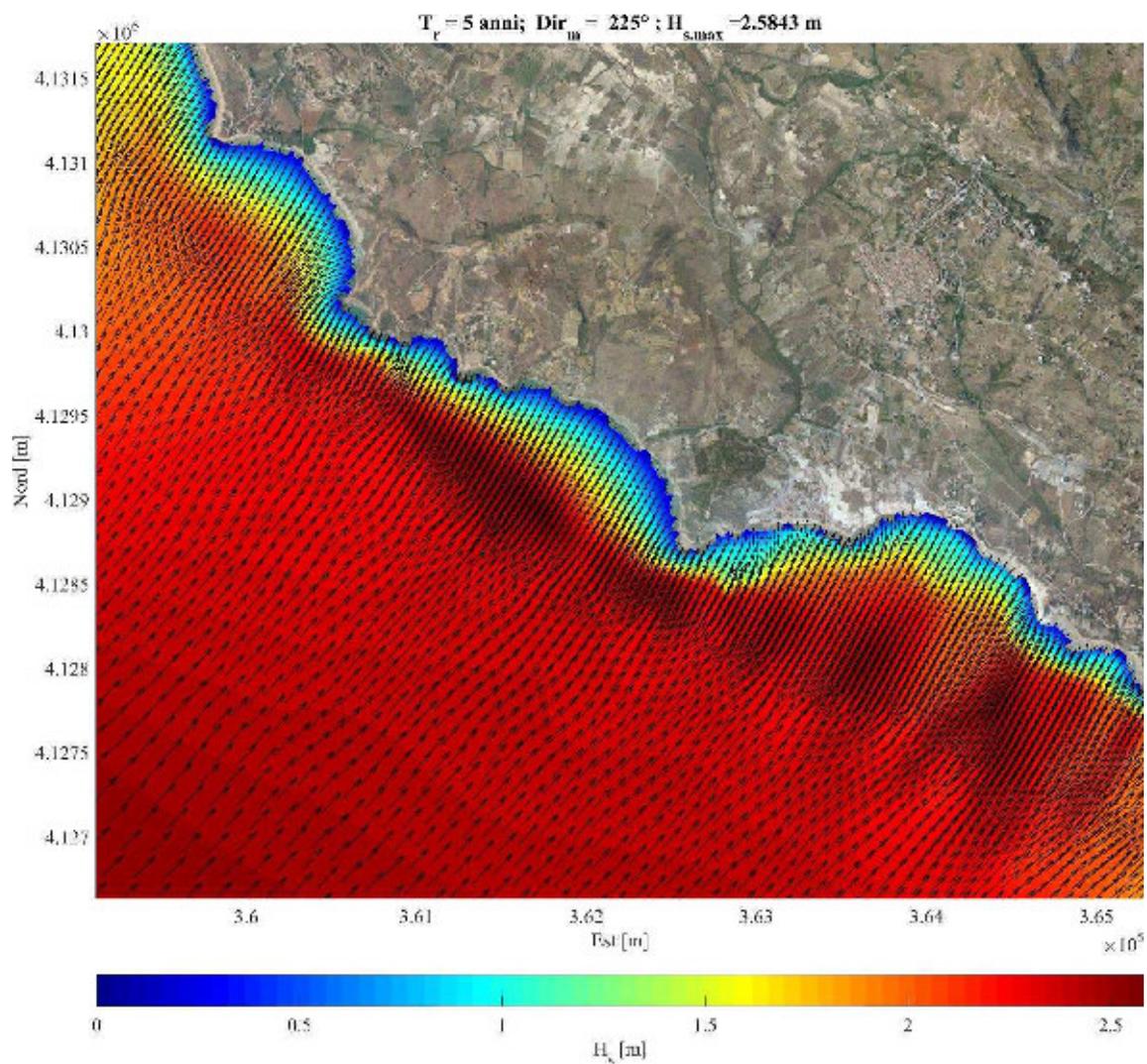


Figura A.28: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 225°N – $T_r = 5$ anni.

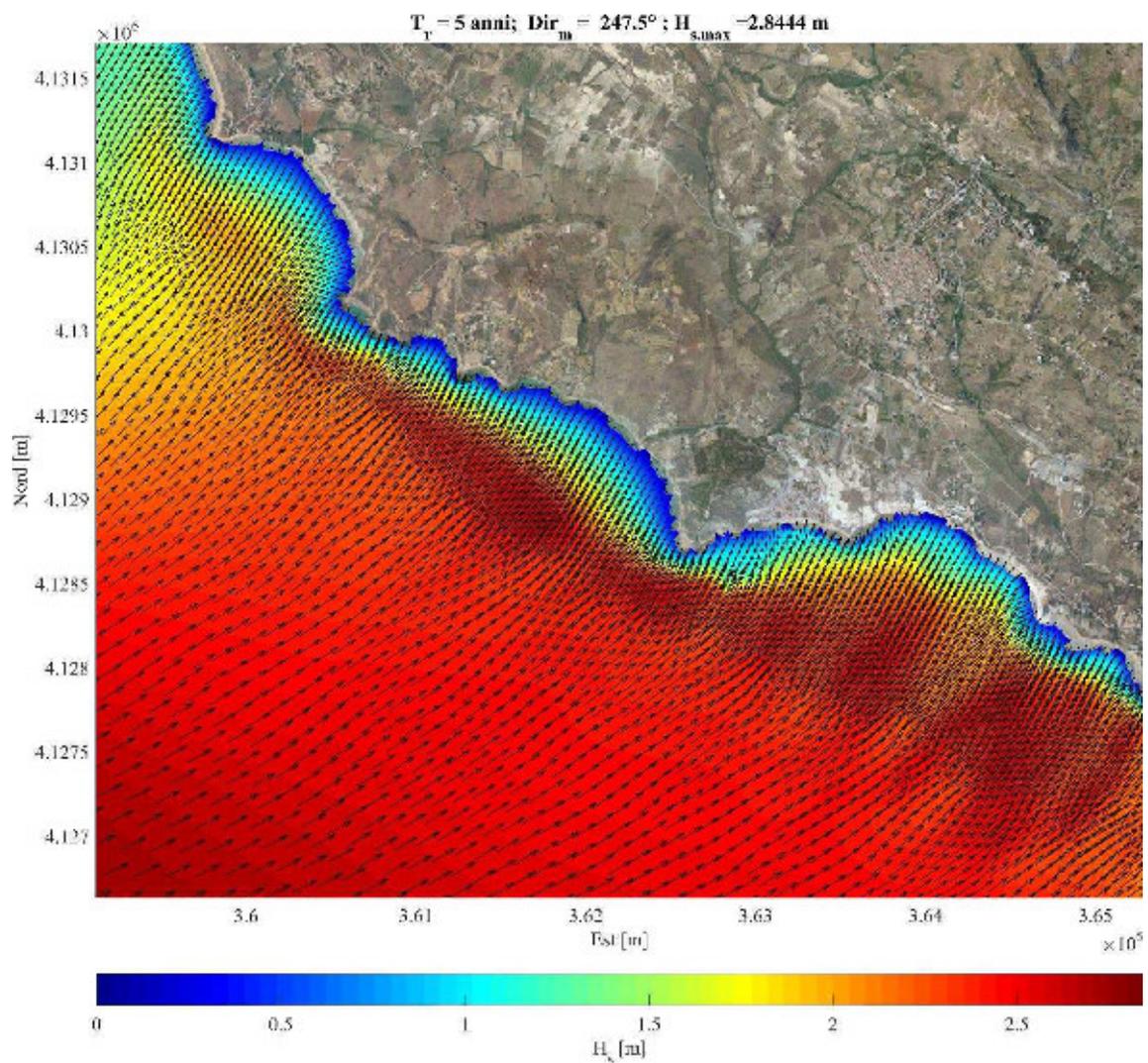


Figura A.29: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 247.5°N – $T_r = 5$ anni.

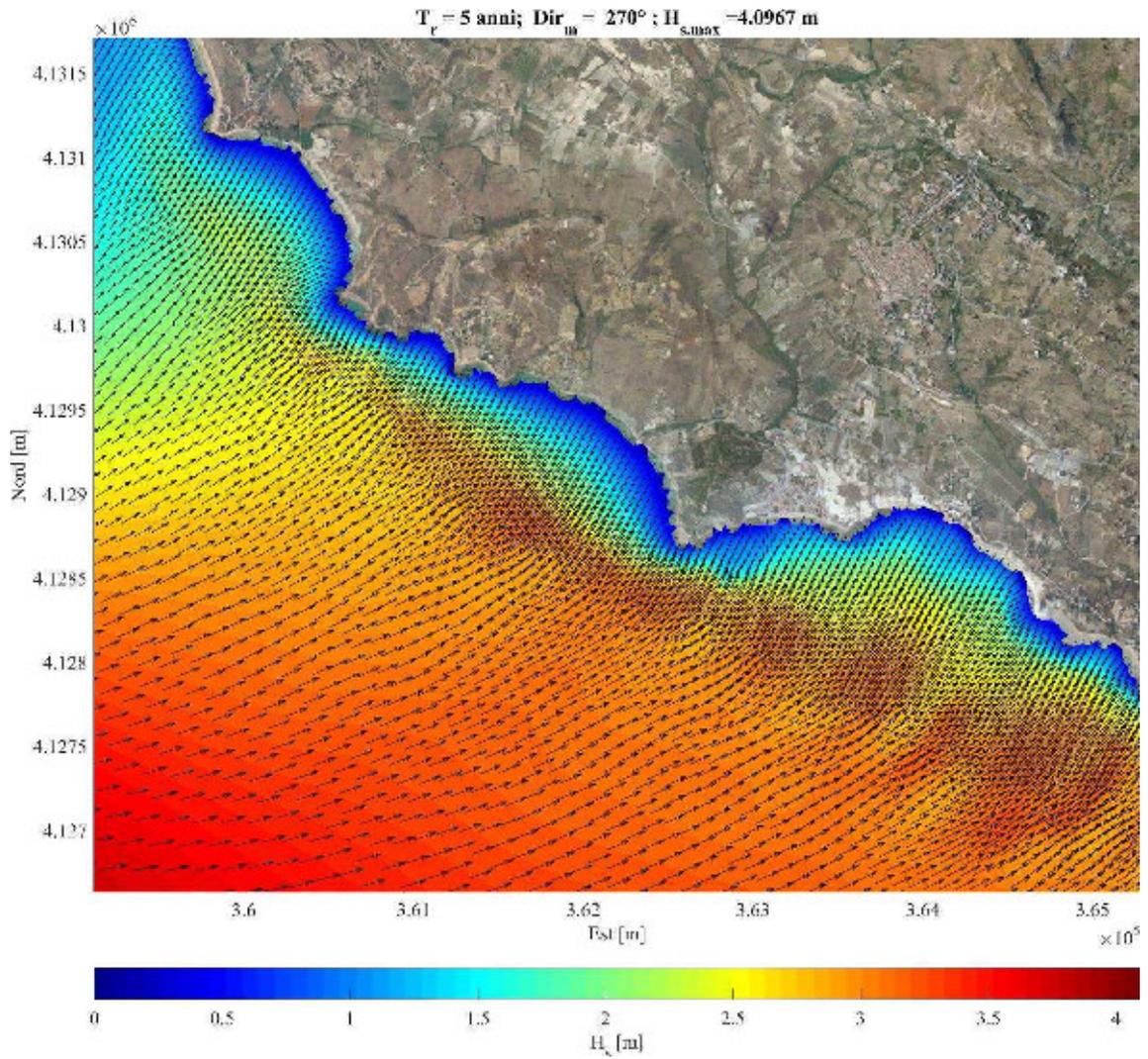


Figura A.30: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 270°N – $T_r = 5$ anni.

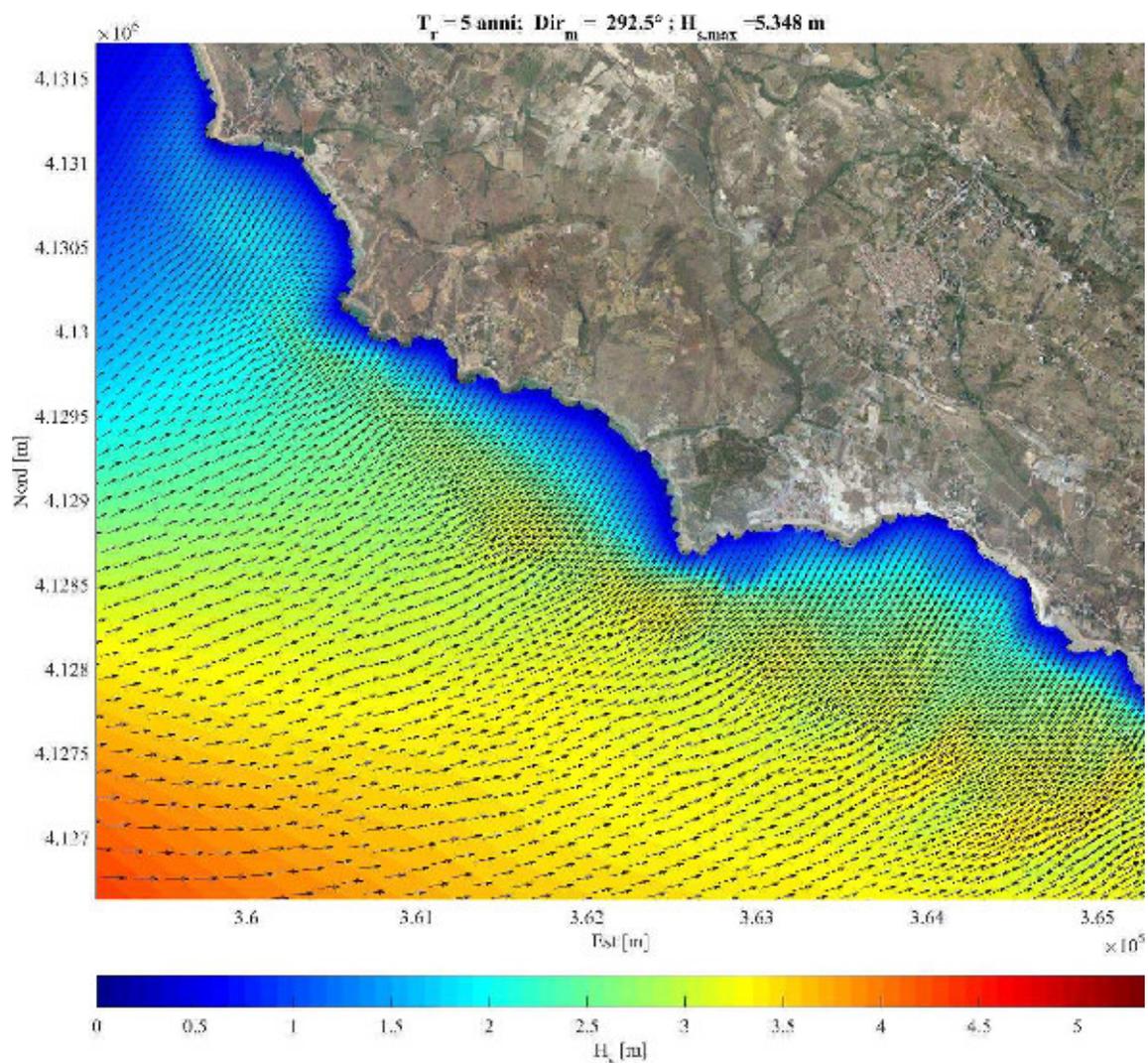


Figura A.31: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 292.5°N – $T_r = 5$ anni.

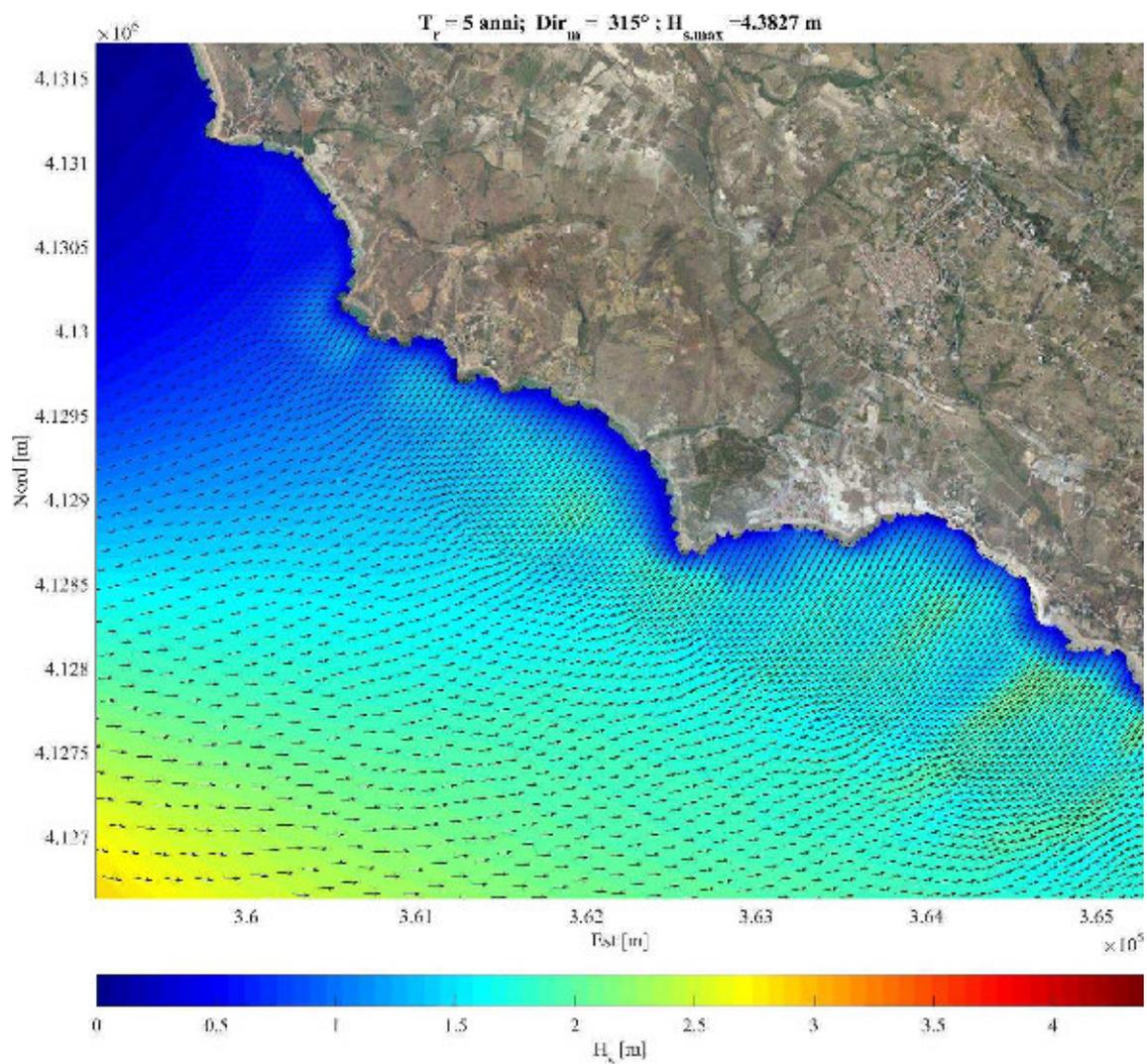


Figura A.32: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $315^\circ N$ – $T_r = 5$ anni.

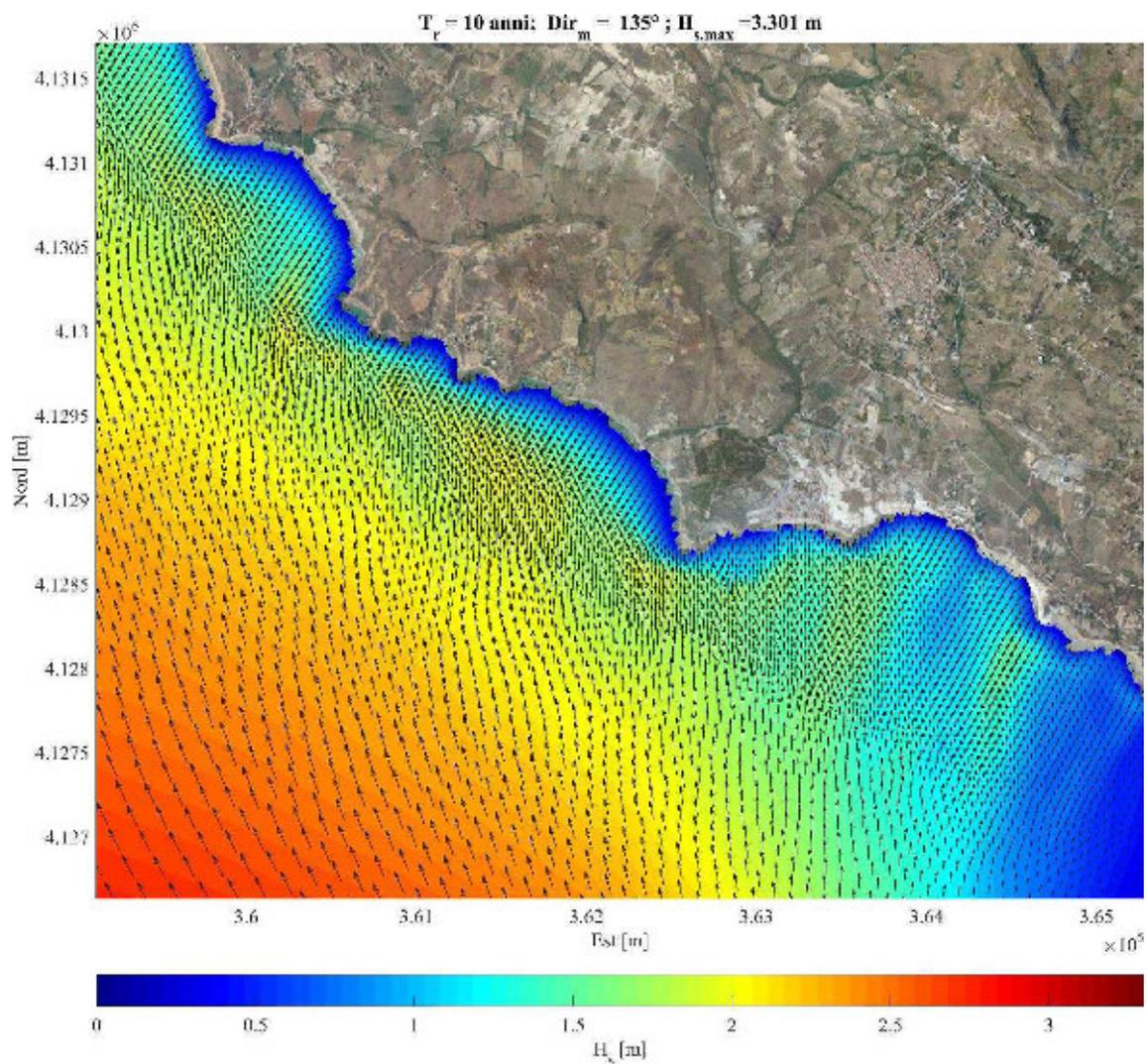


Figura A.33: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $135^\circ N$ – $T_r = 10$ anni.

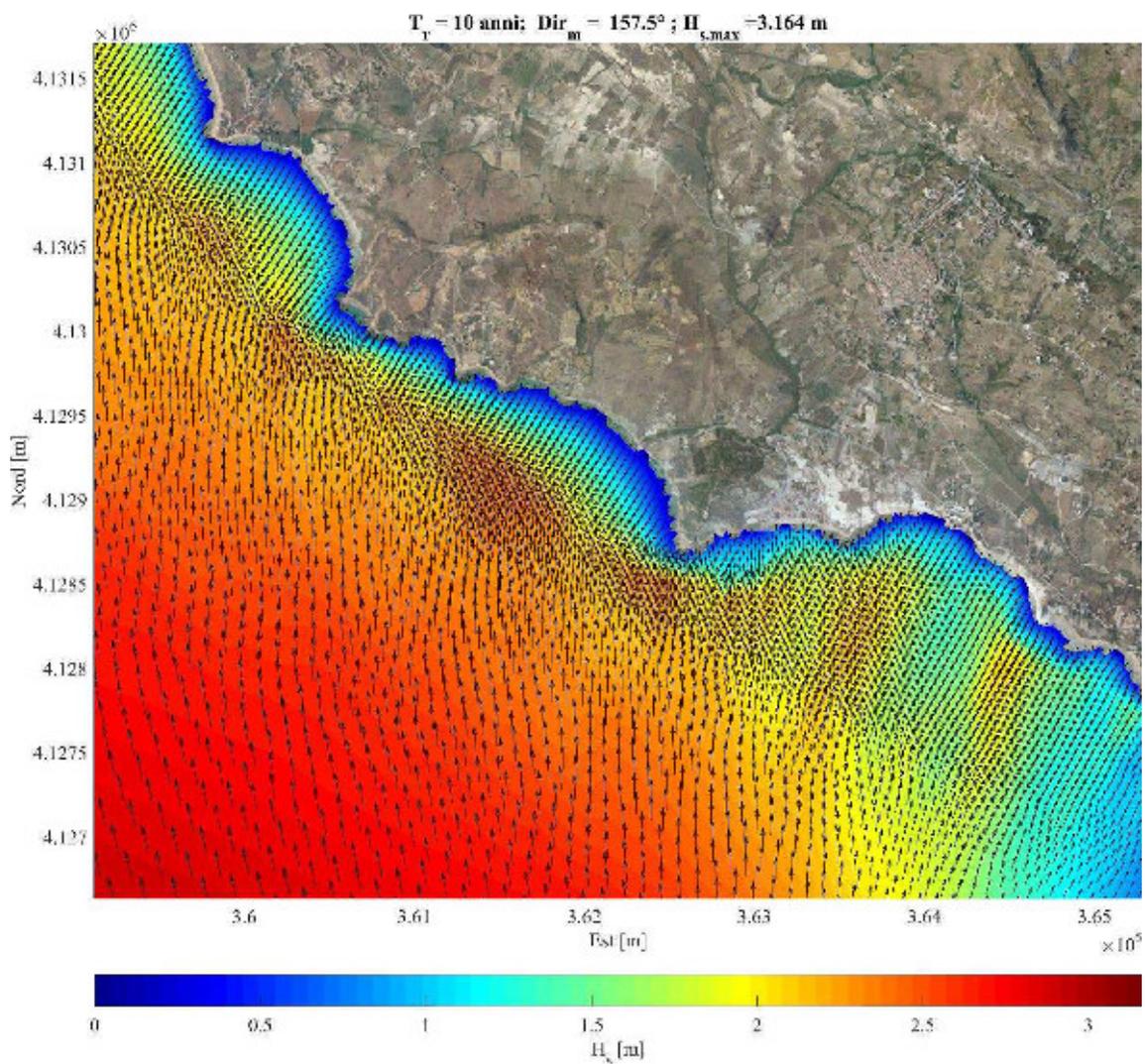


Figura A.34: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $157.5^\circ N$ – $T_r = 10$ anni.

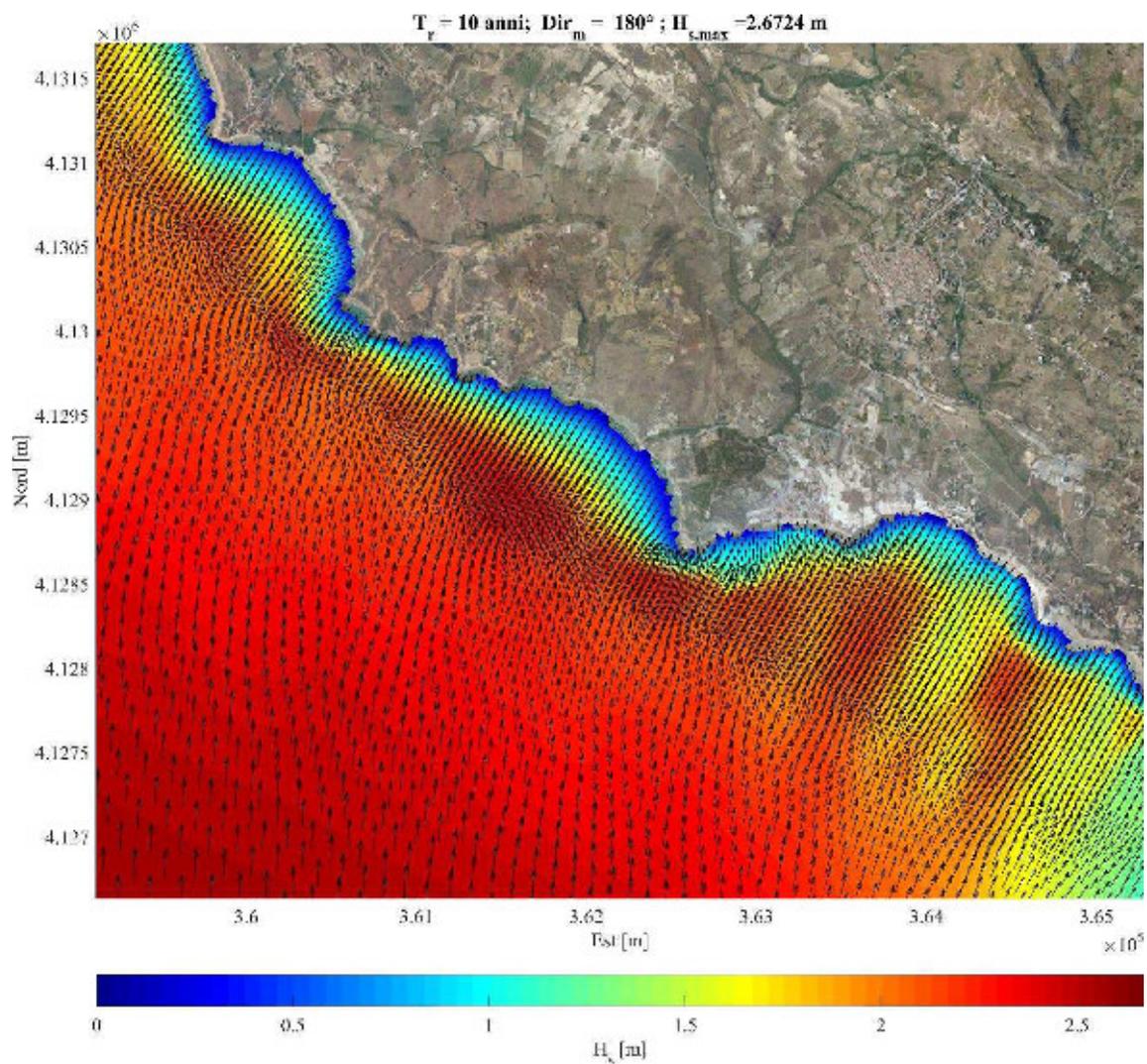


Figura A.35: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $180^\circ N$ – $T_r = 10$ anni.

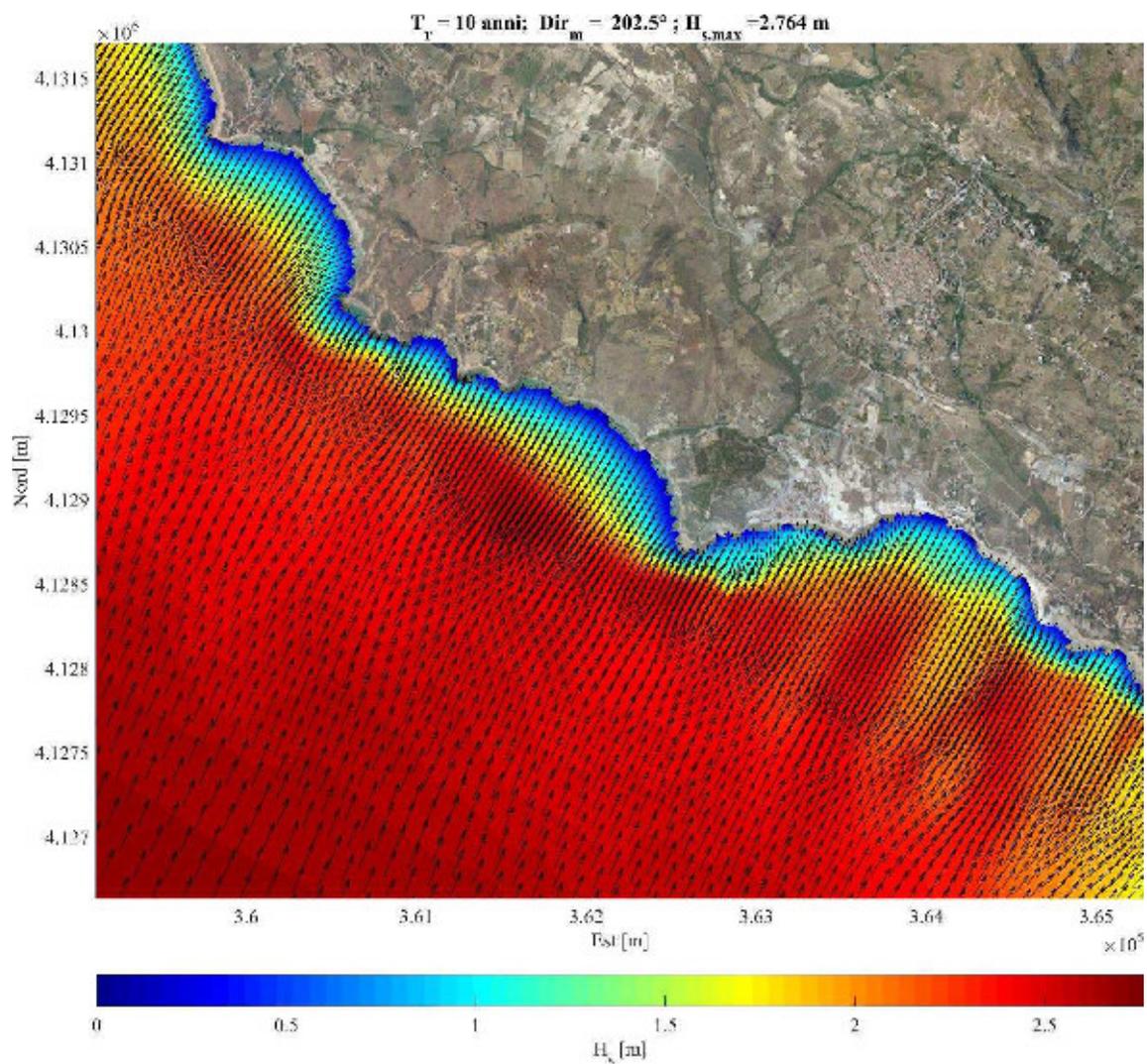


Figura A.36: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $202.5^\circ N$ – $Tr = 10$ anni.

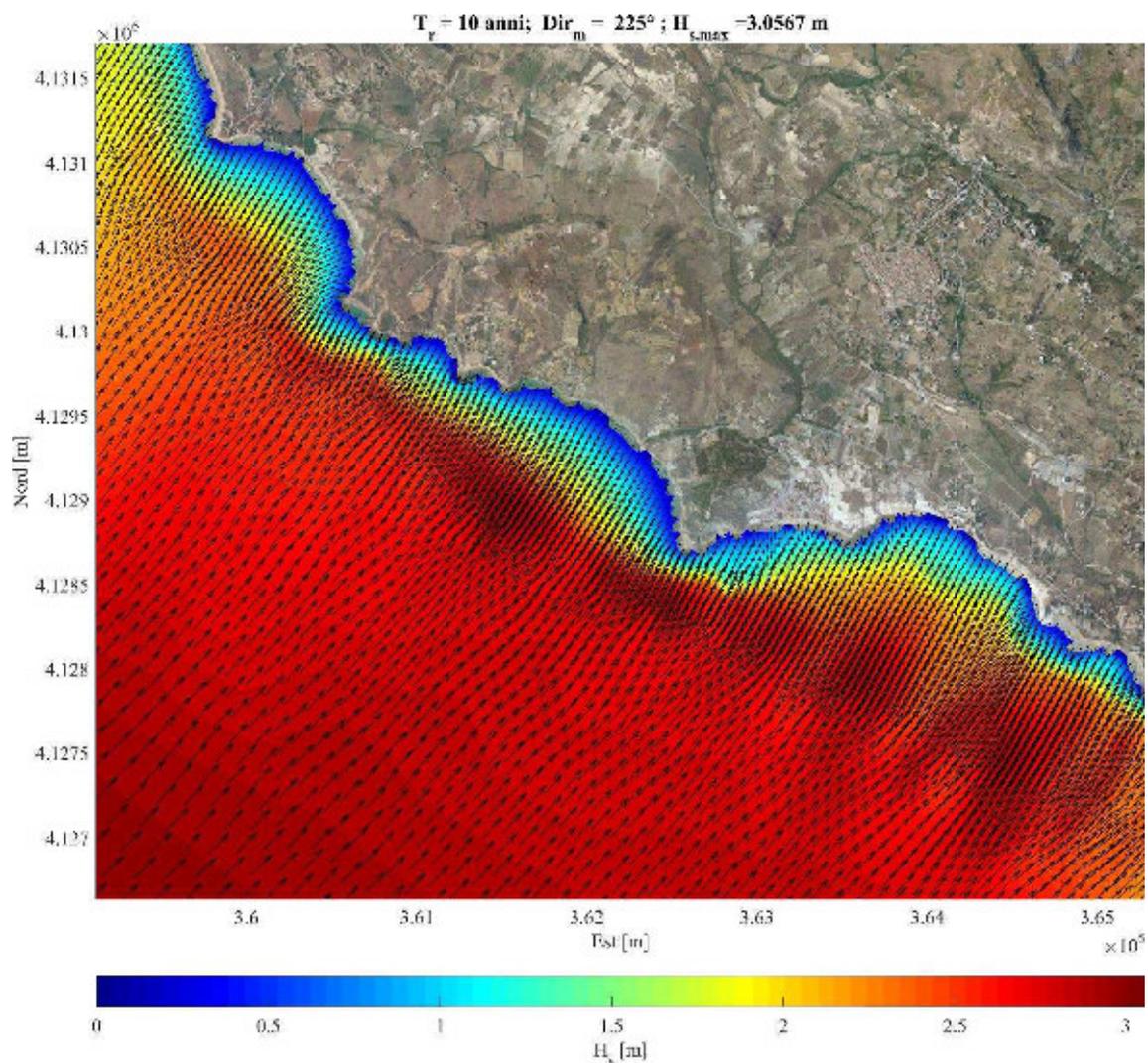


Figura A.37: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $225^\circ N$ – $T_r = 10$ anni.

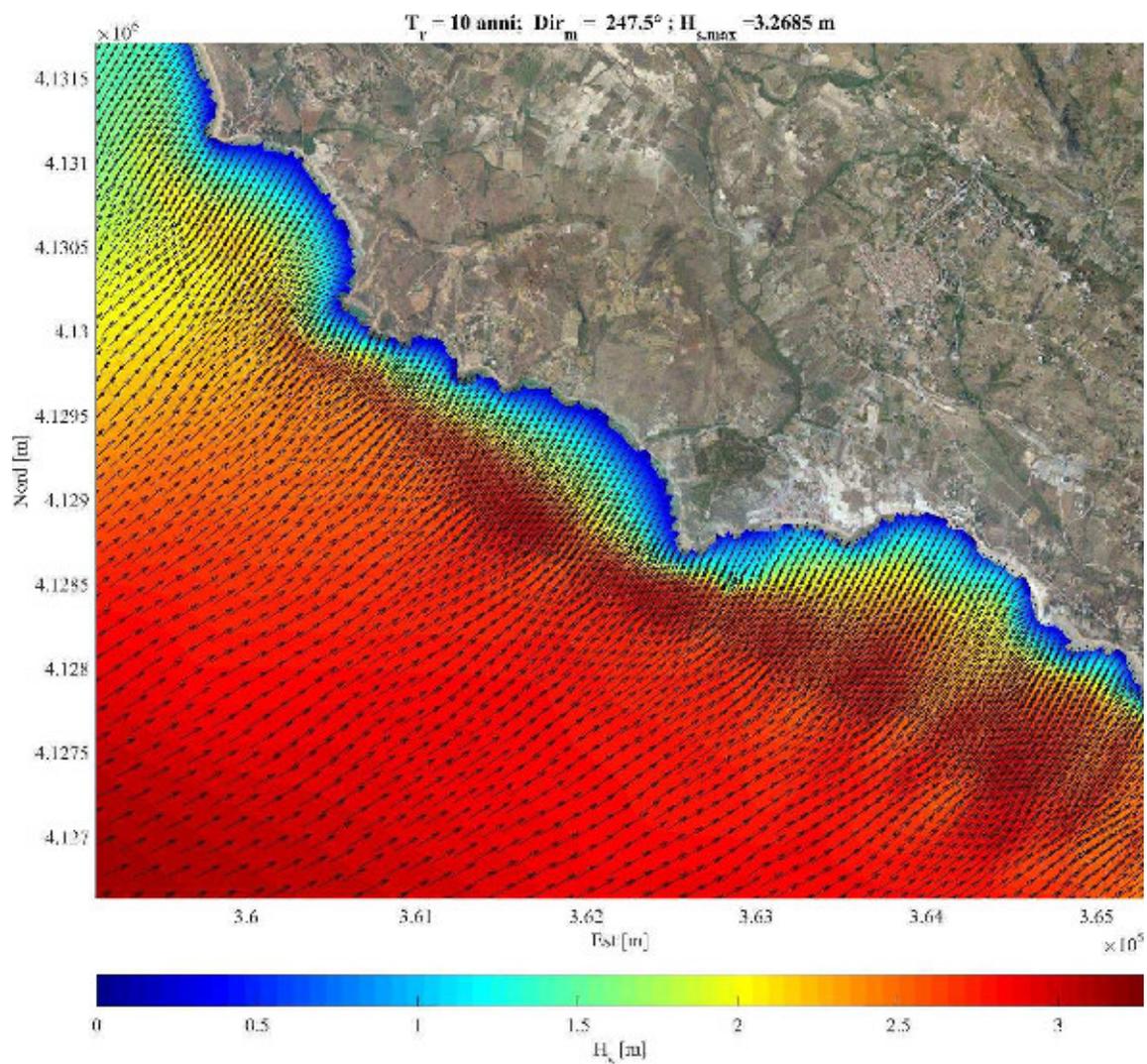


Figura A.38: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $247.5^\circ N$ – $Tr = 10$ anni.

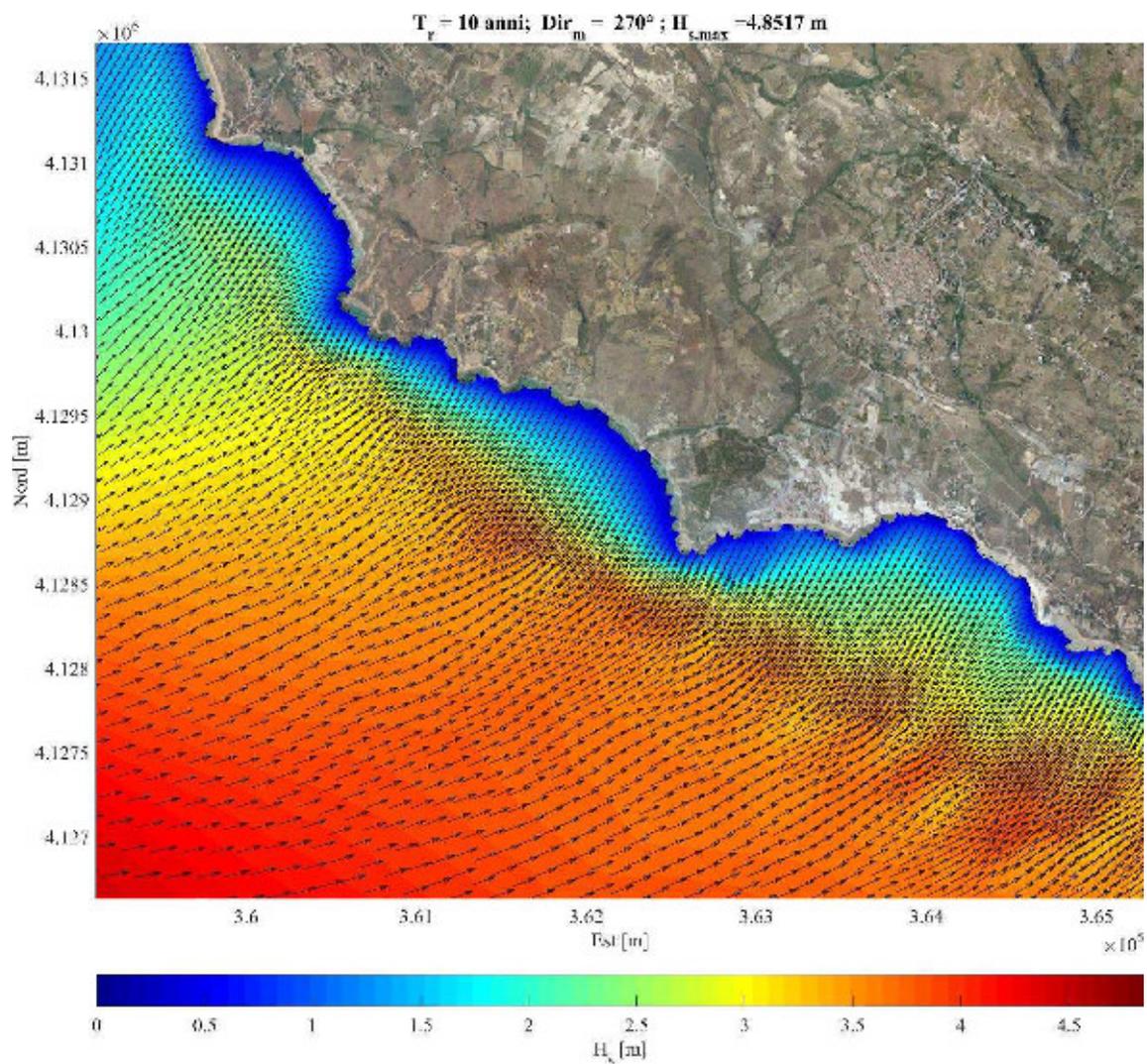


Figura A.39: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $270^\circ N$ – $T_r = 10$ anni.

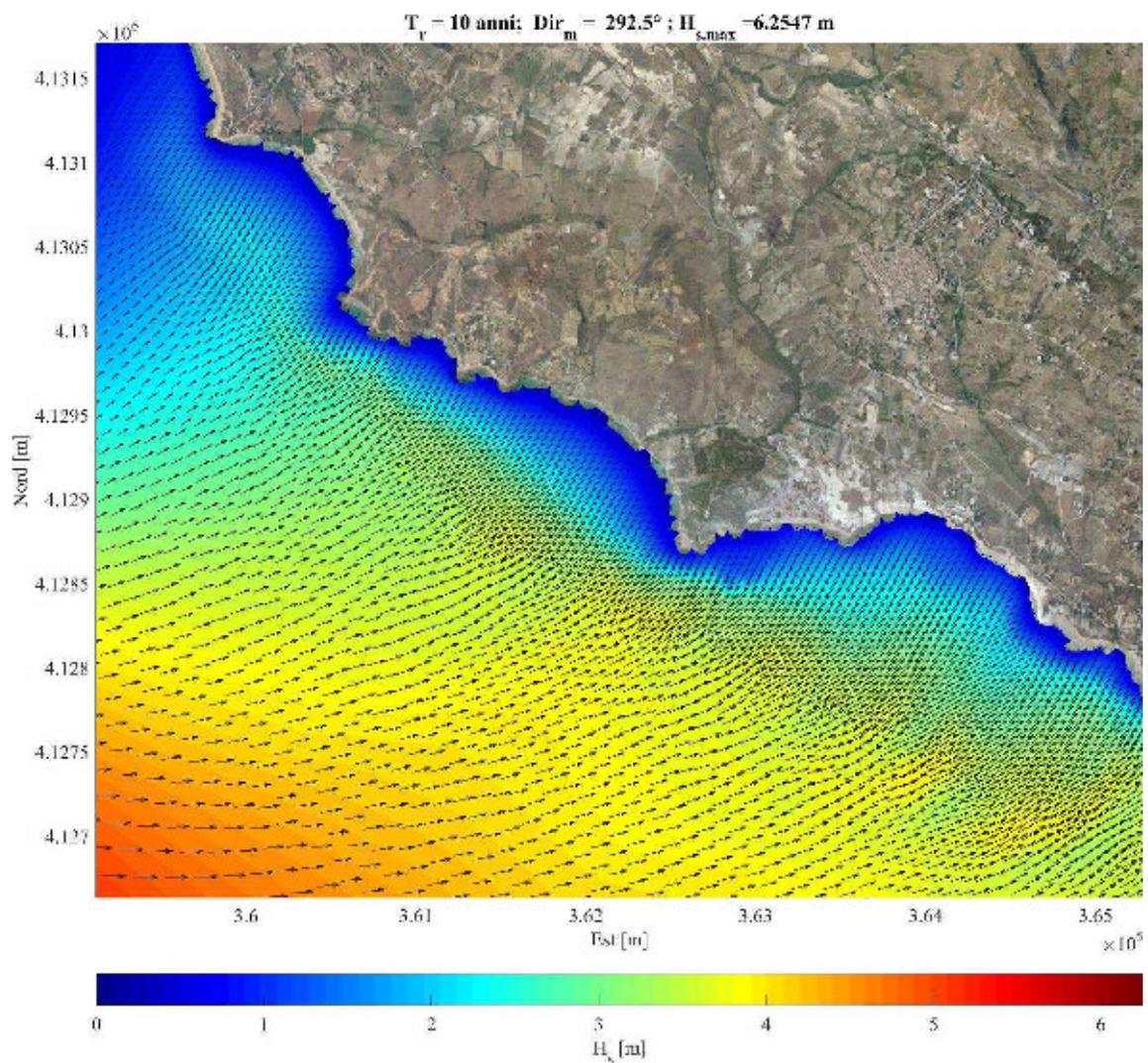


Figura A.40: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $292.5^\circ N$ – $Tr = 10$ anni.

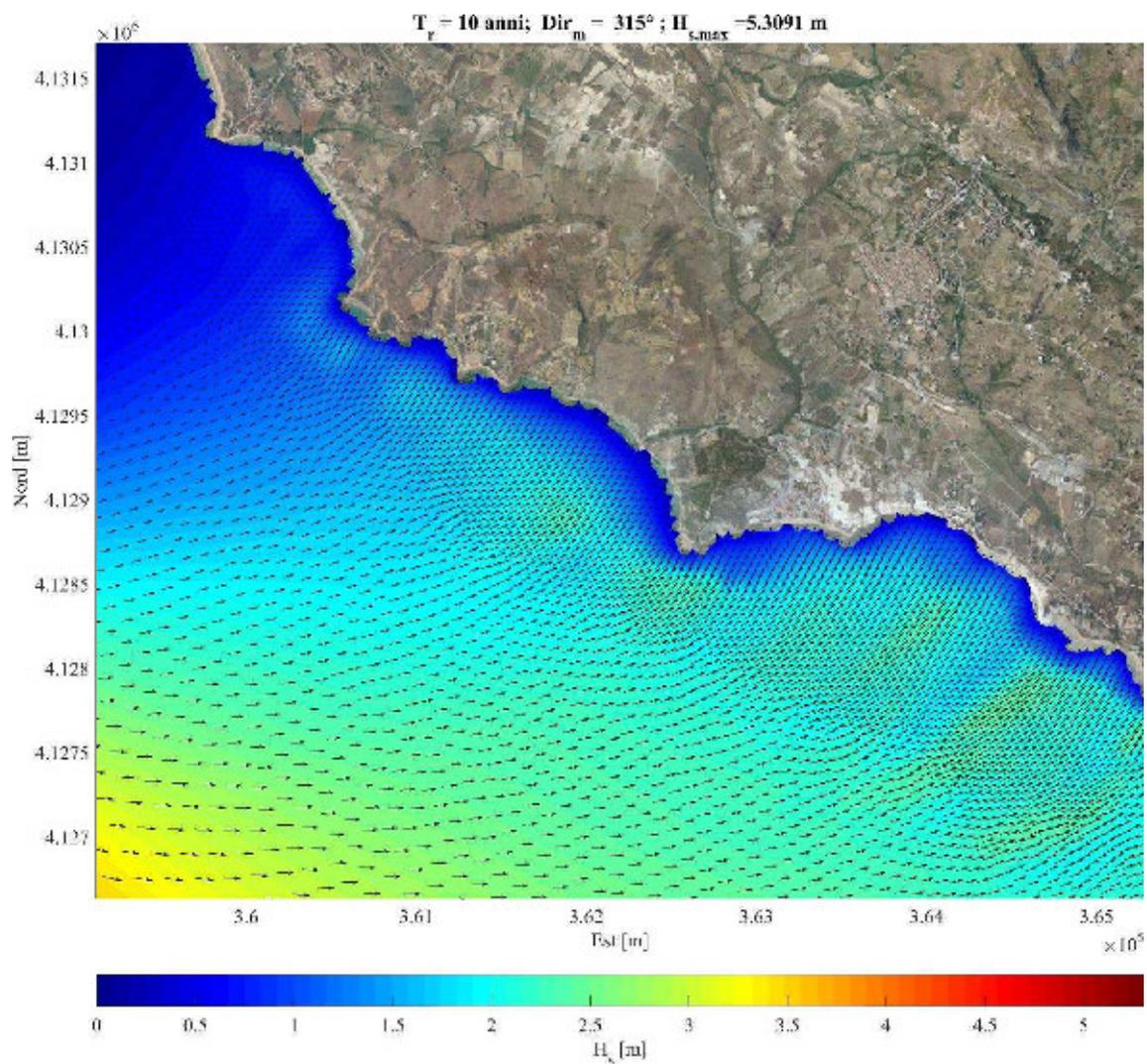


Figura A.41: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $315^\circ N$ – $T_r = 10$ anni.

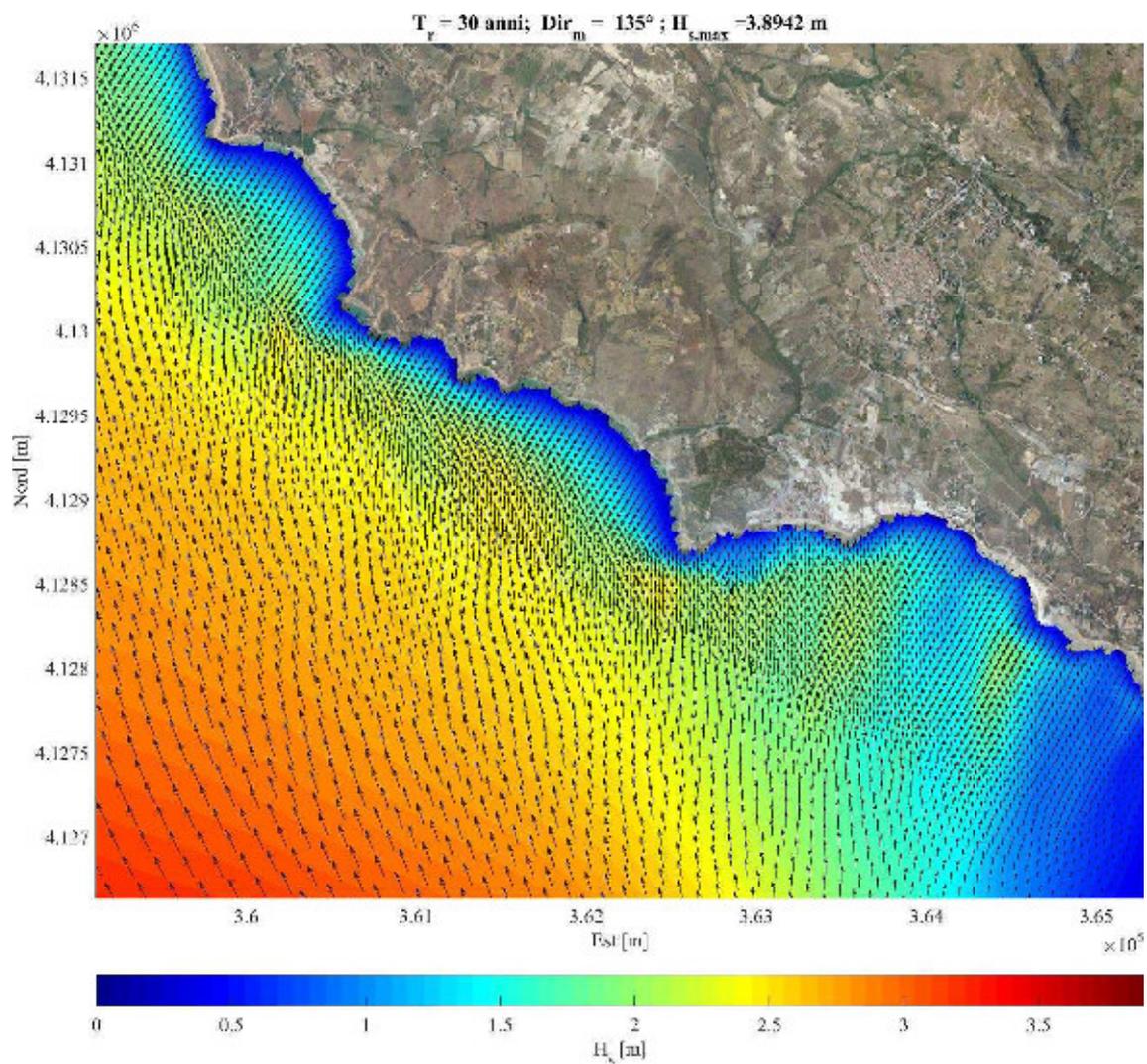


Figura A.42: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $135^\circ N$ – $T_r = 30$ anni.

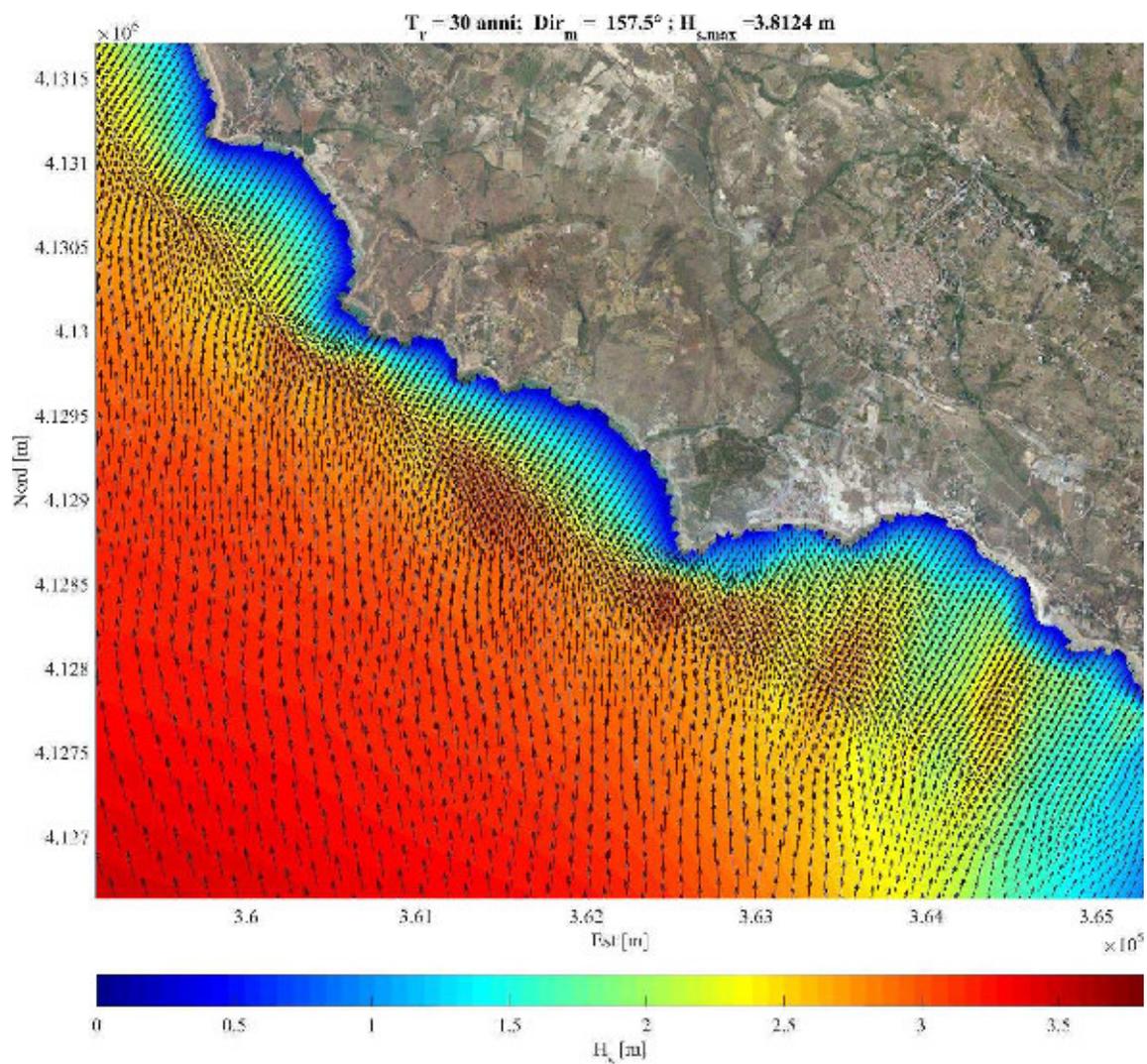


Figura A.43: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $157.5^\circ N$ – $Tr = 30$ anni.

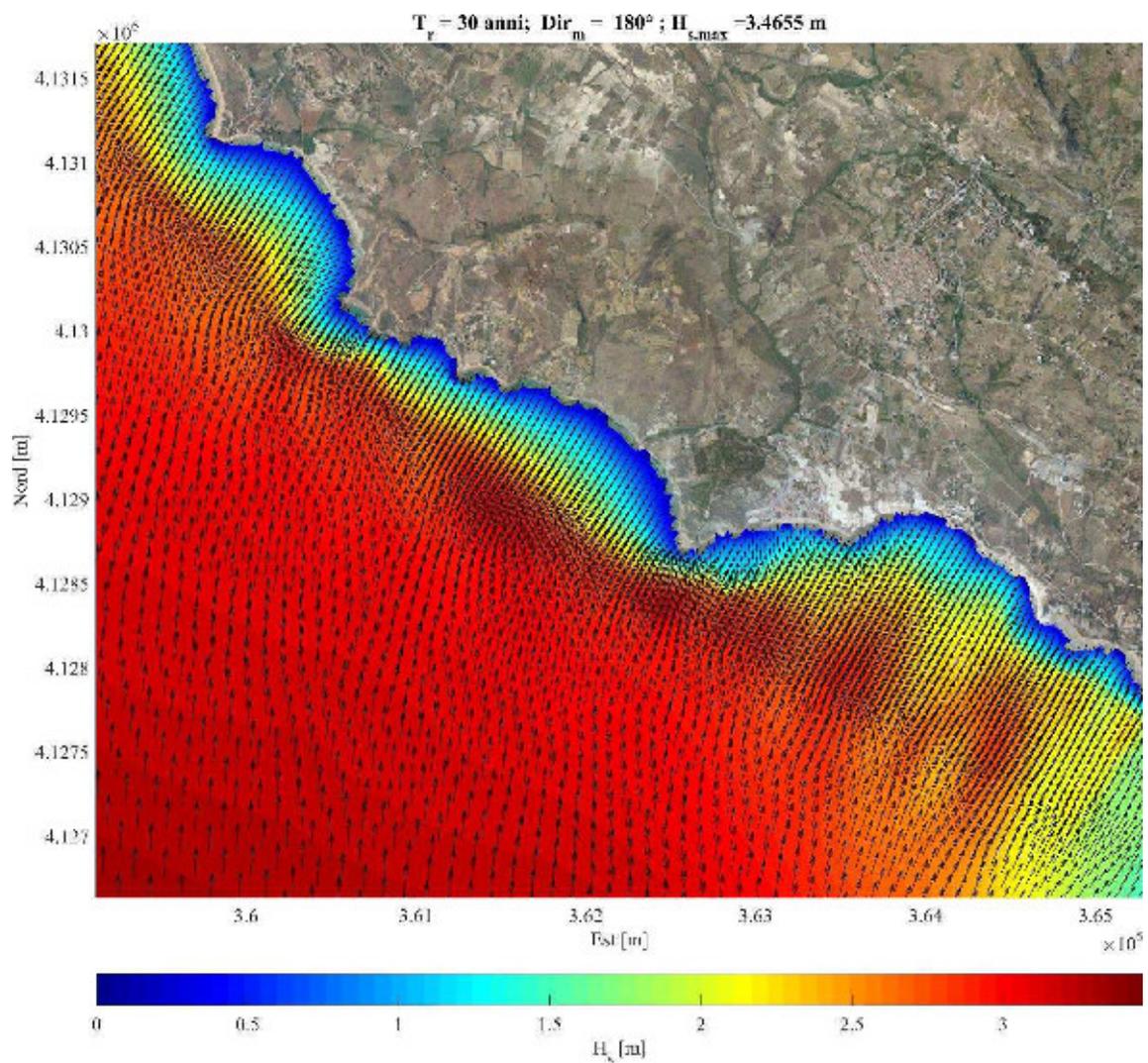


Figura A.44: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $180^\circ N$ – $Tr = 30$ anni.

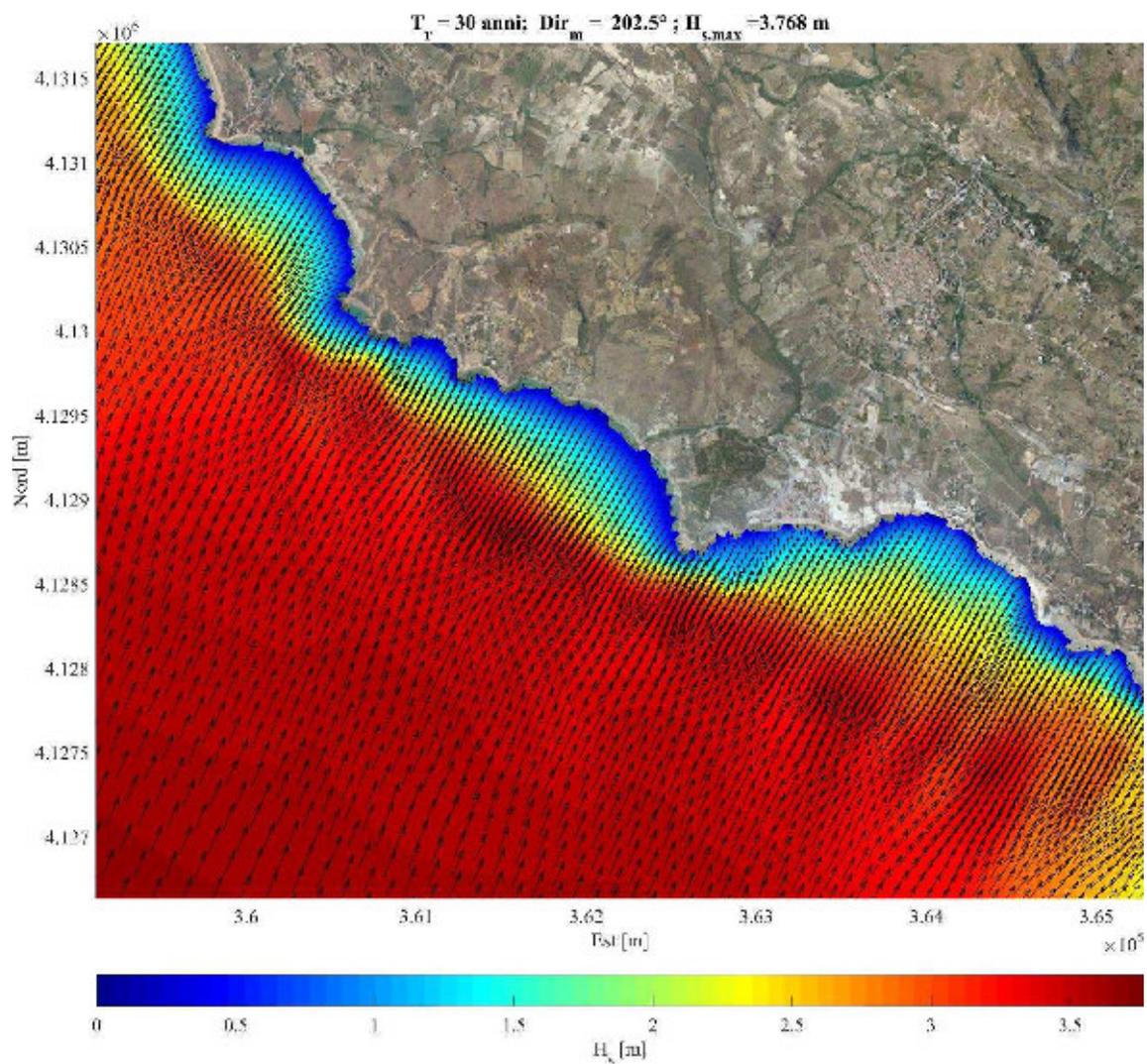


Figura A.45: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $202.5^\circ N$ – $Tr = 30$ anni.

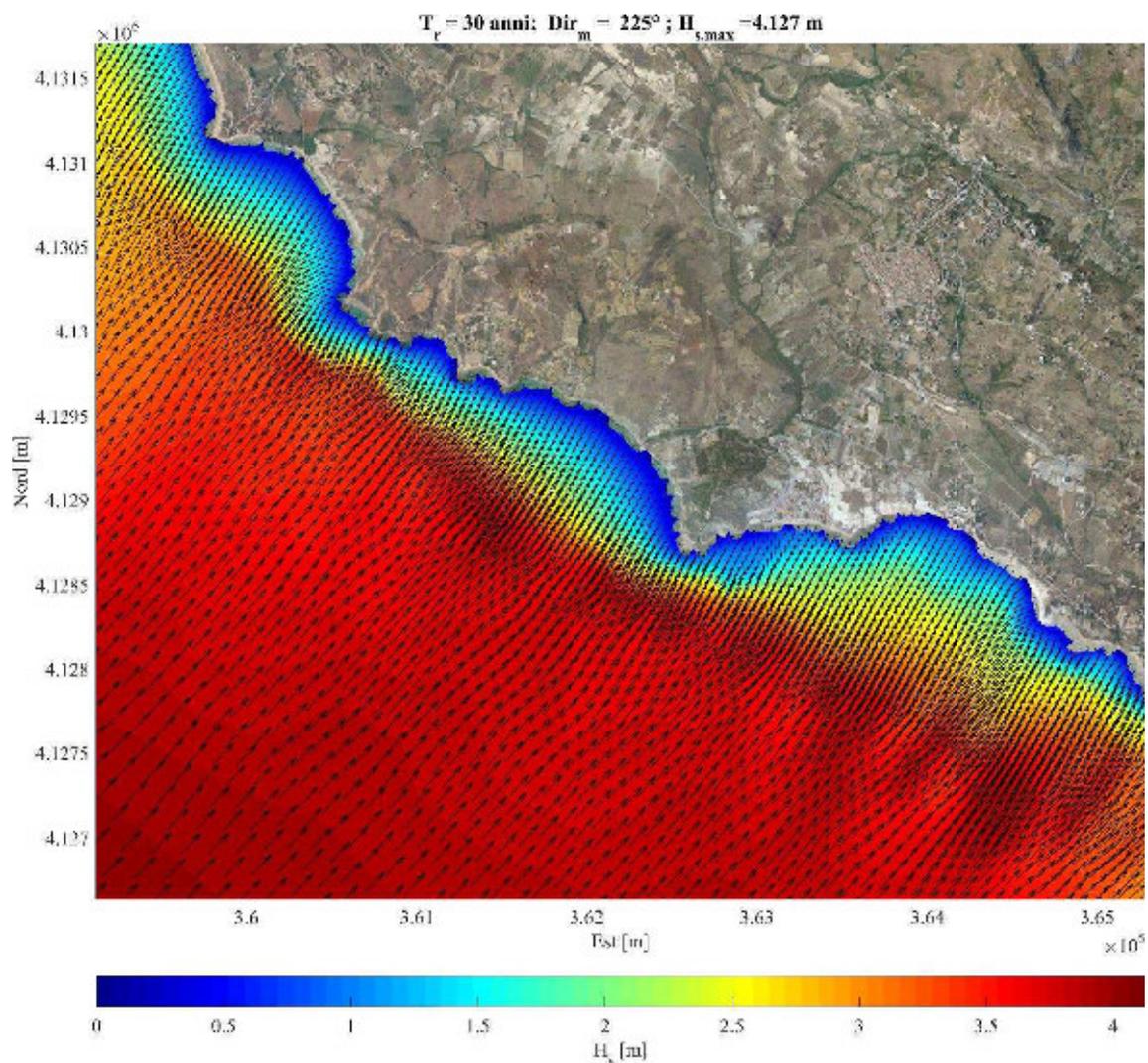


Figura A.46: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 225°N – $T_r = 30$ anni.

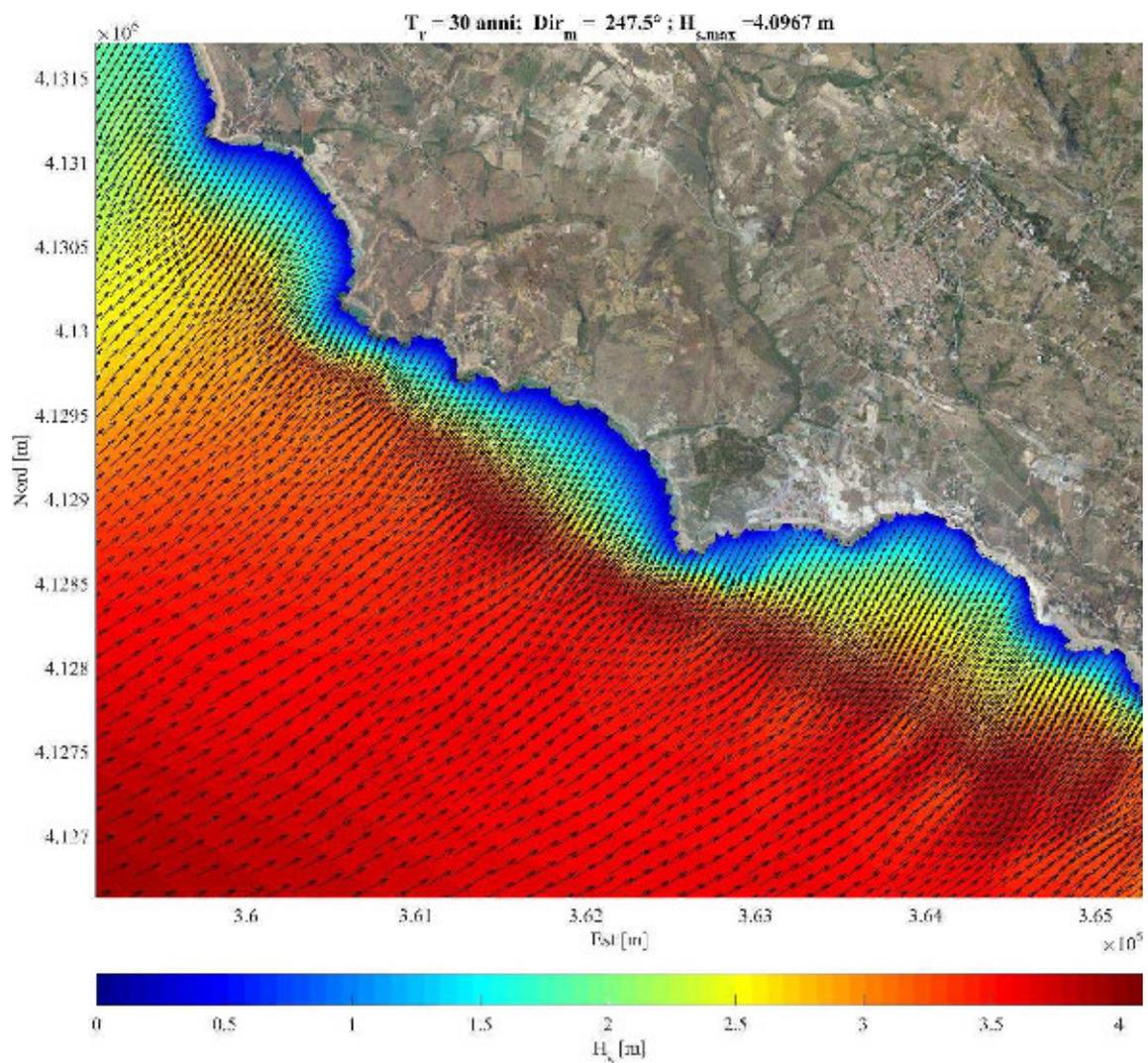


Figura A.47: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $247.5^\circ N$ – $Tr = 30$ anni.

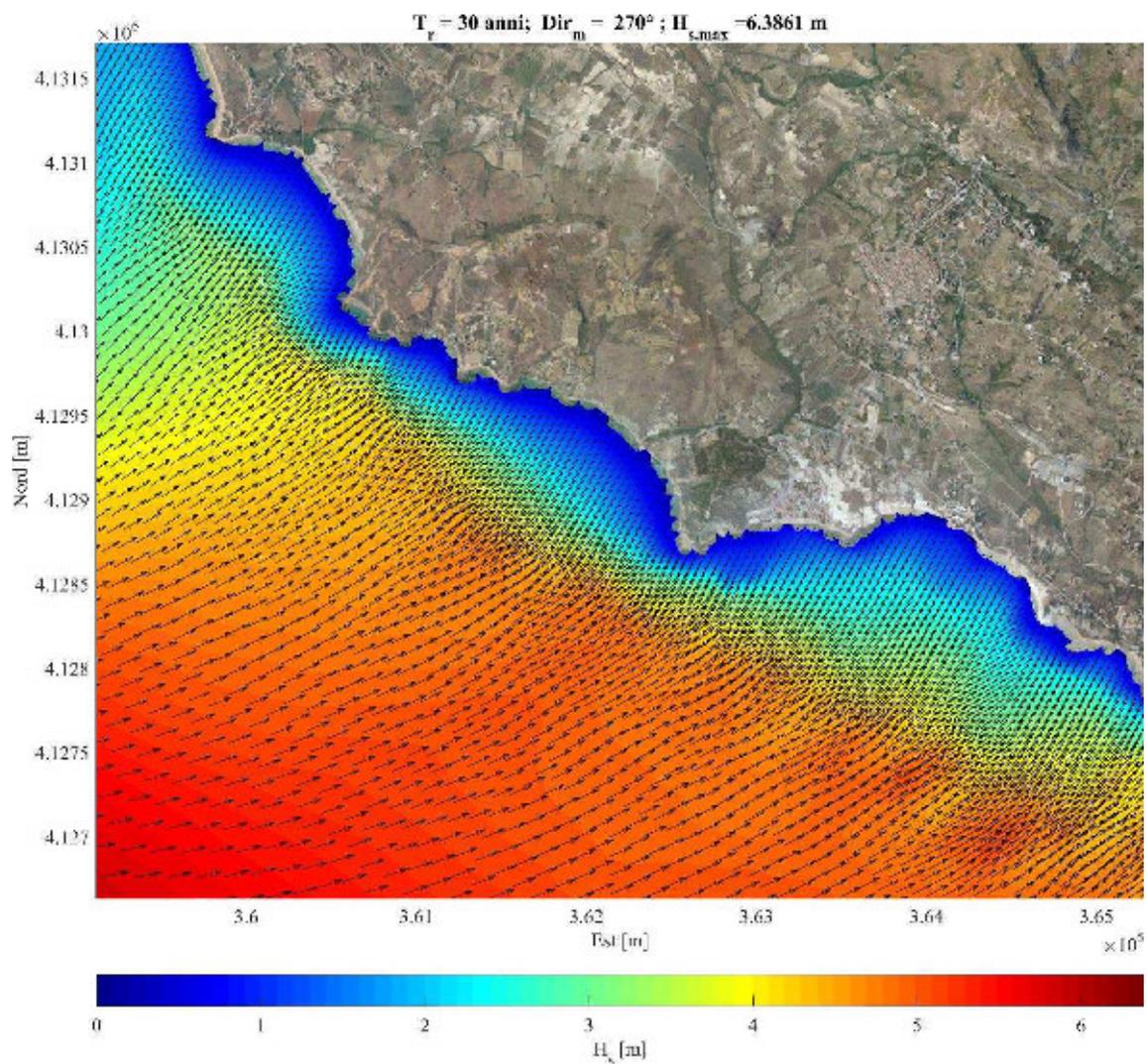


Figura A.48: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $270^\circ N$ – $T_r = 30$ anni.

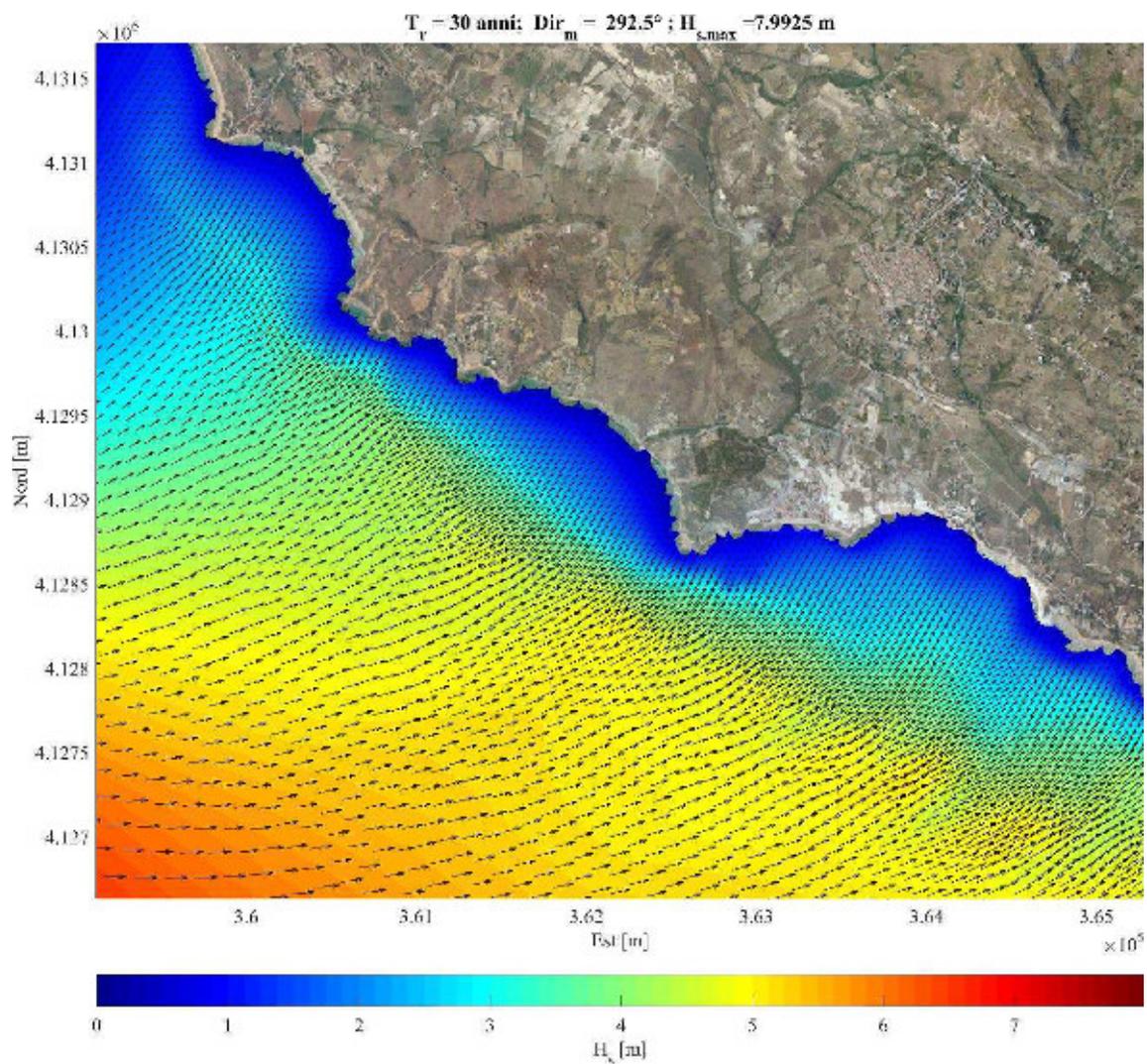


Figura A.49: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $292.5^\circ N$ – $Tr = 30$ anni.

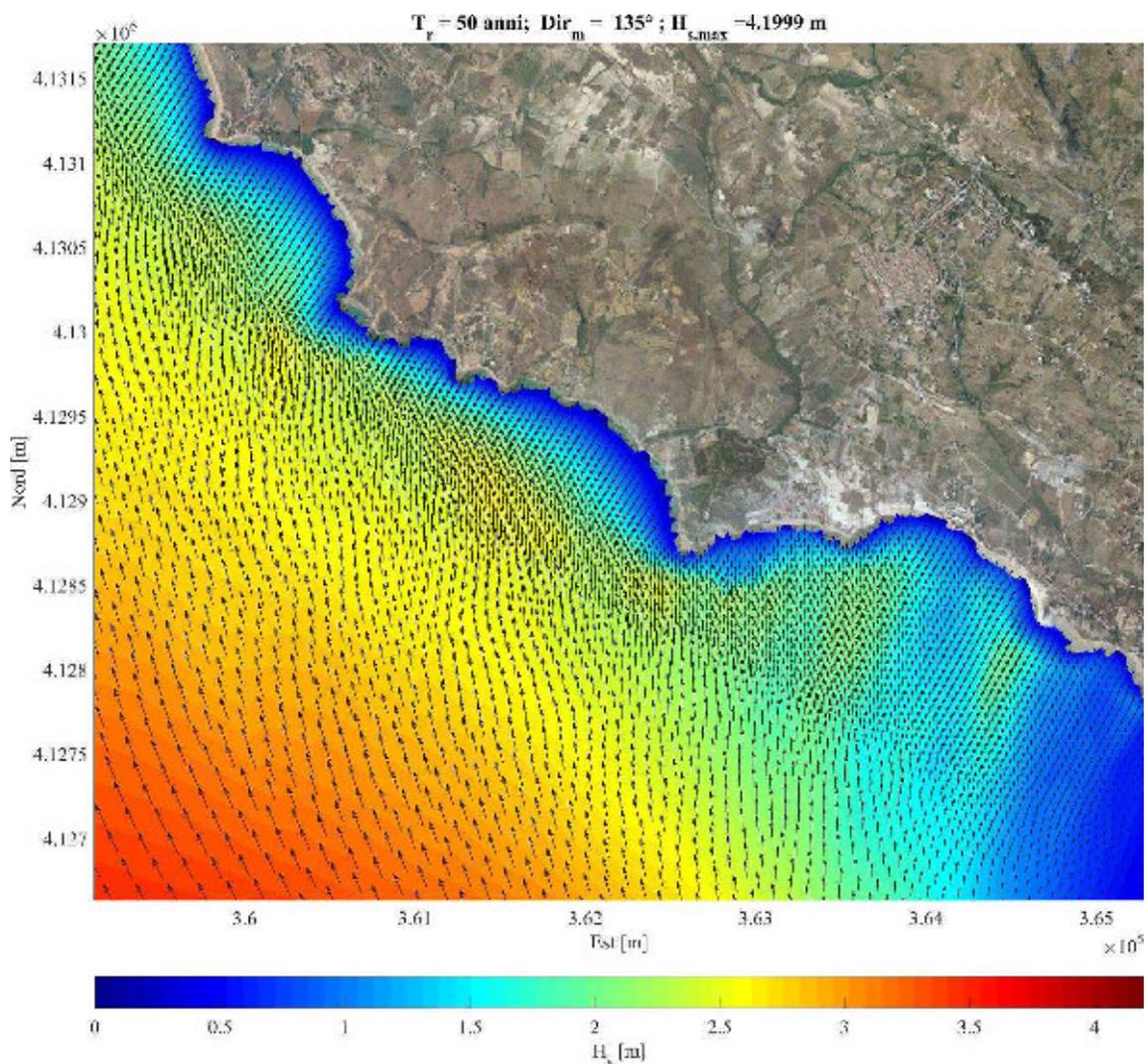


Figura A.50: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $135^\circ N$ – $T_r = 50$ anni.

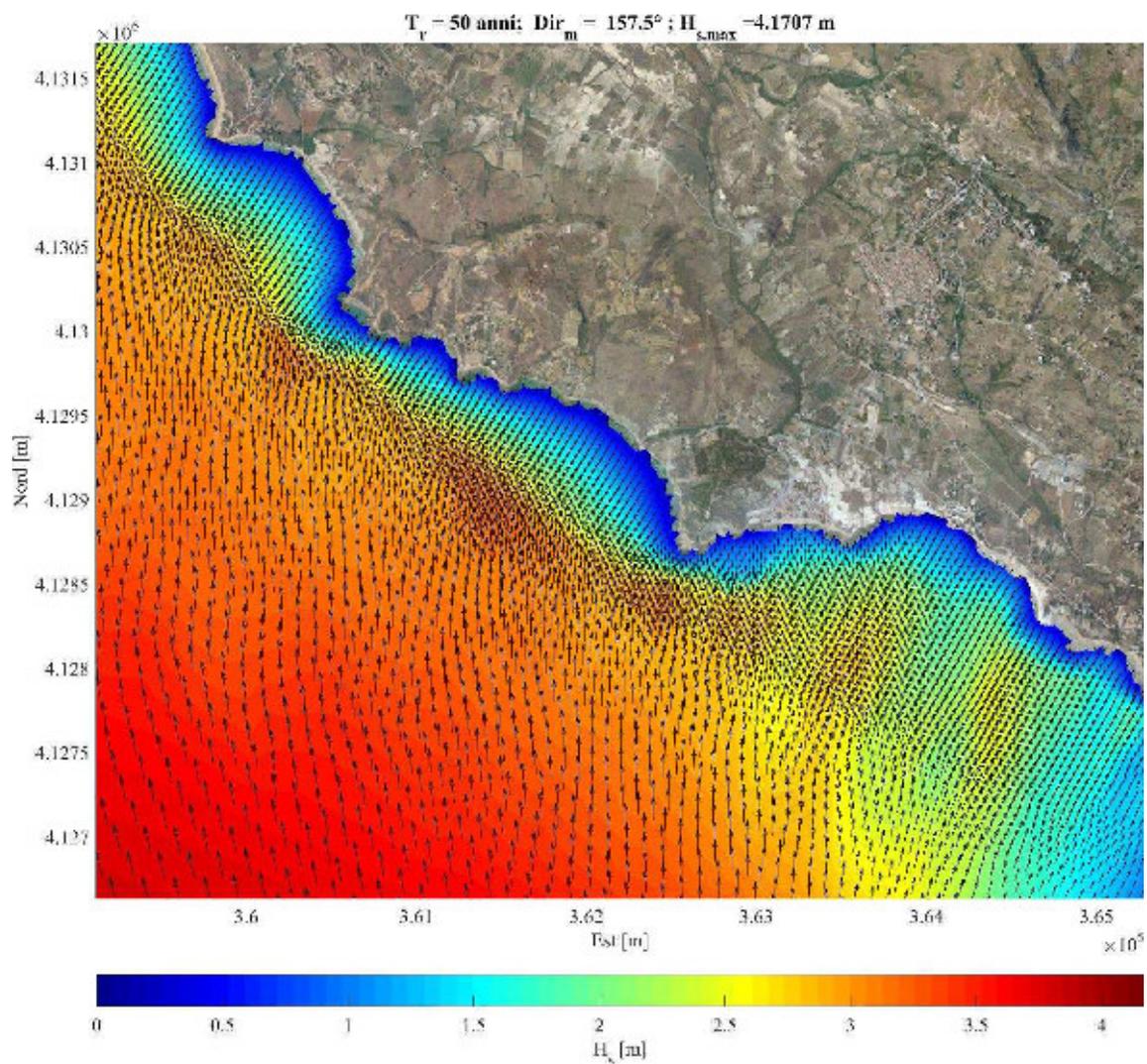


Figura A.51: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $157.5^\circ N$ – $Tr = 50$ anni.

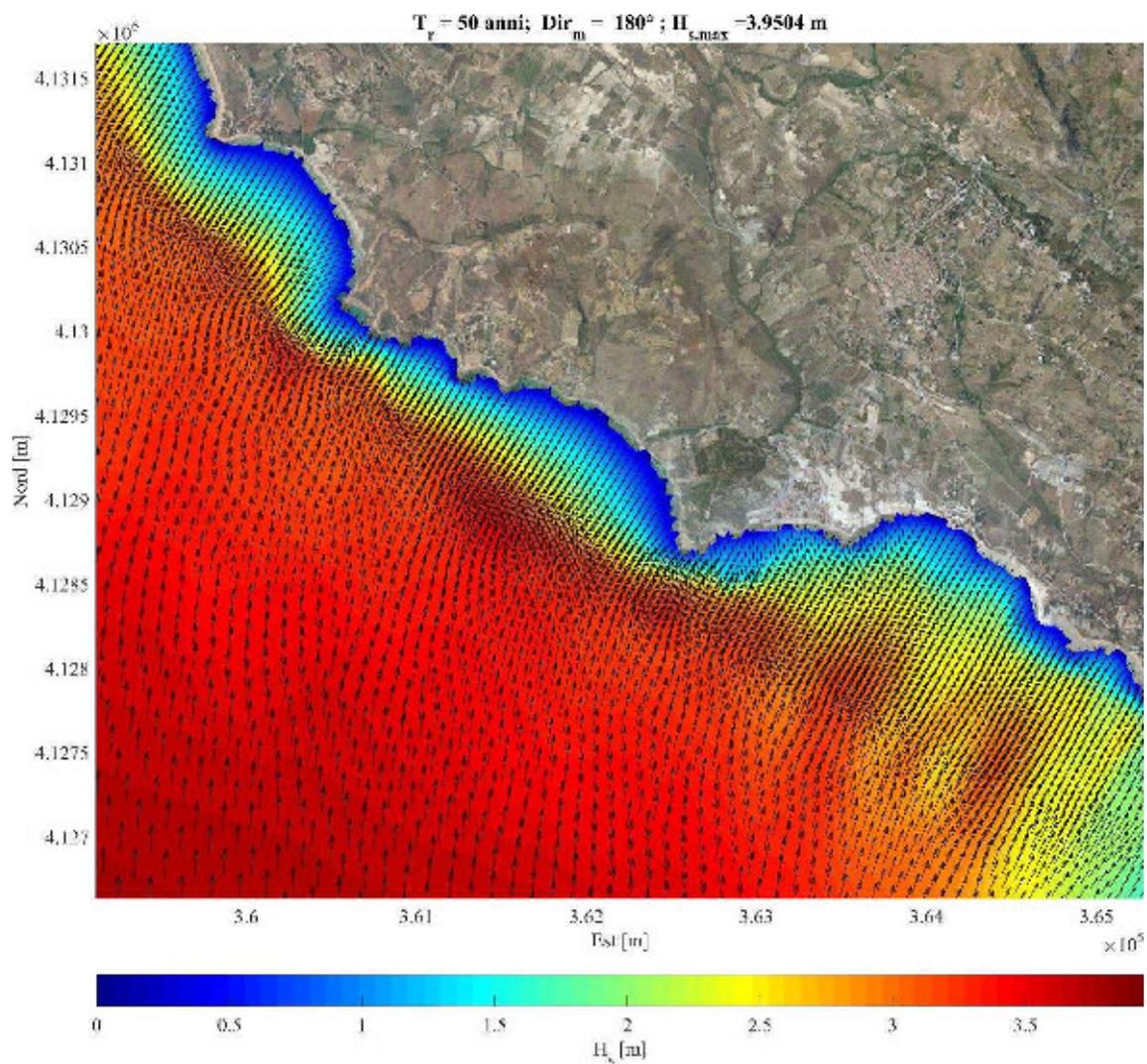


Figura A.52: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $180^\circ N$ – $T_r = 50$ anni.

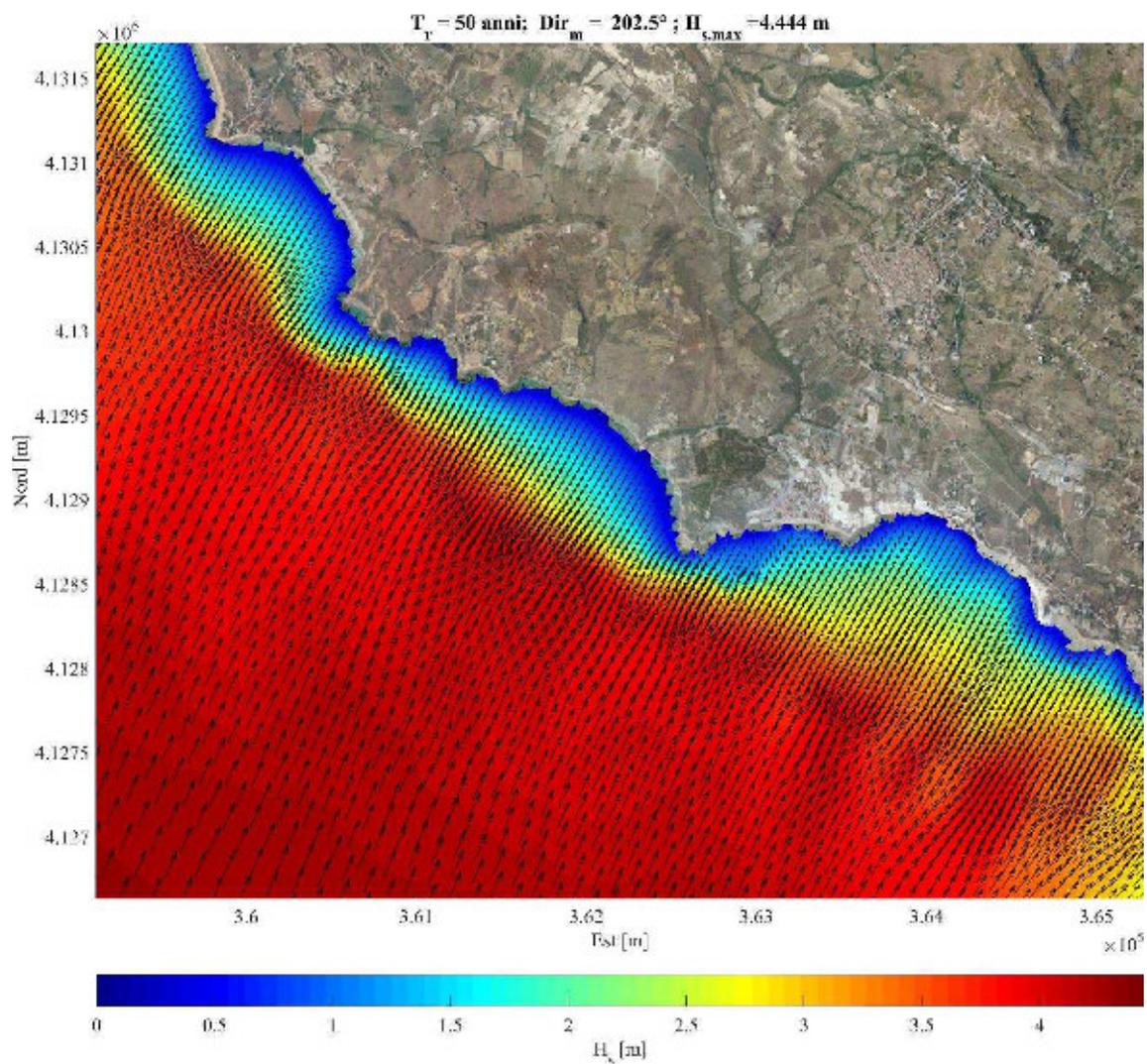


Figura A.53: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $202.5^\circ N$ – $Tr = 50$ anni.

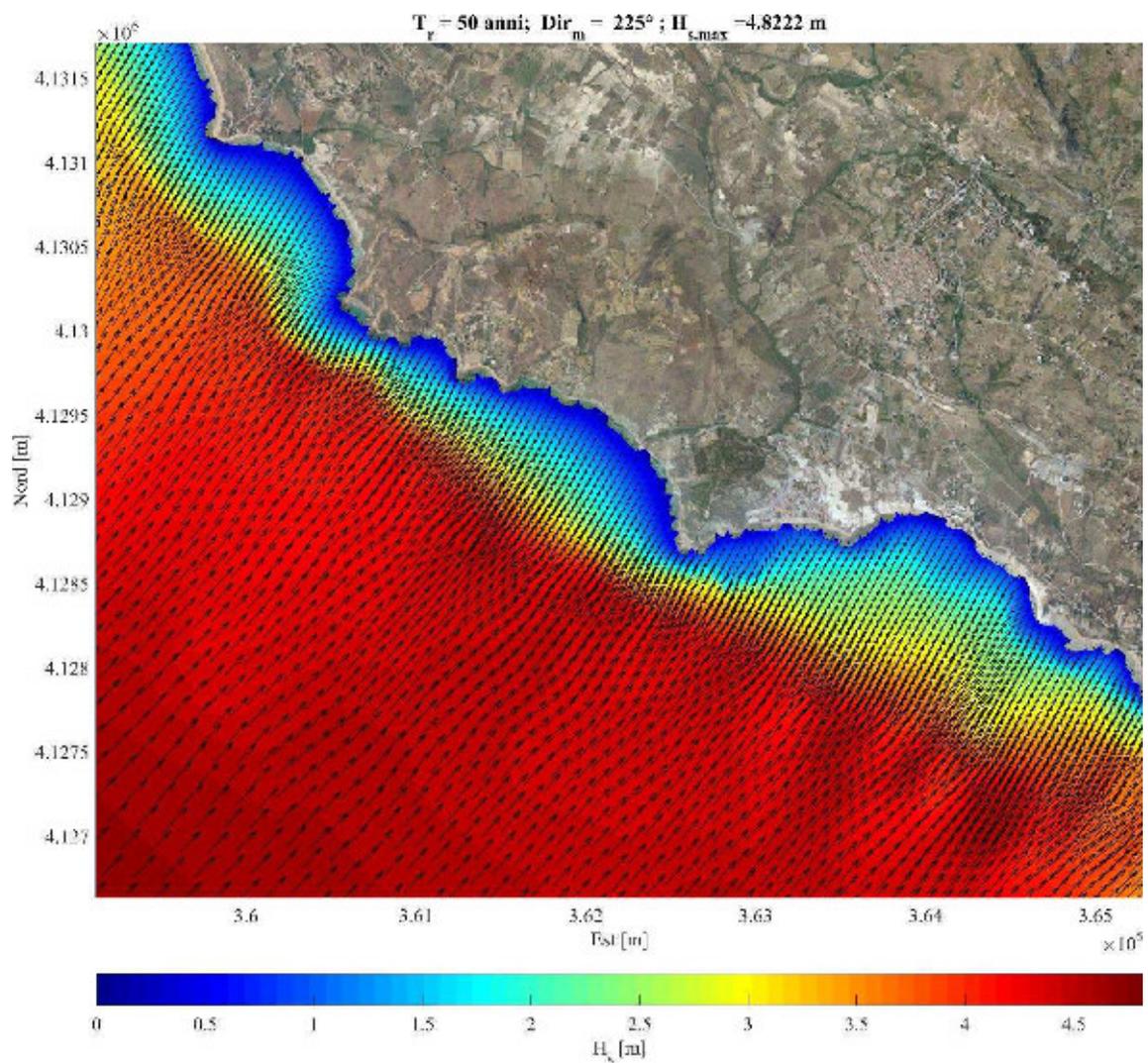


Figura A.54: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 225°N – $T_r = 50$ anni.

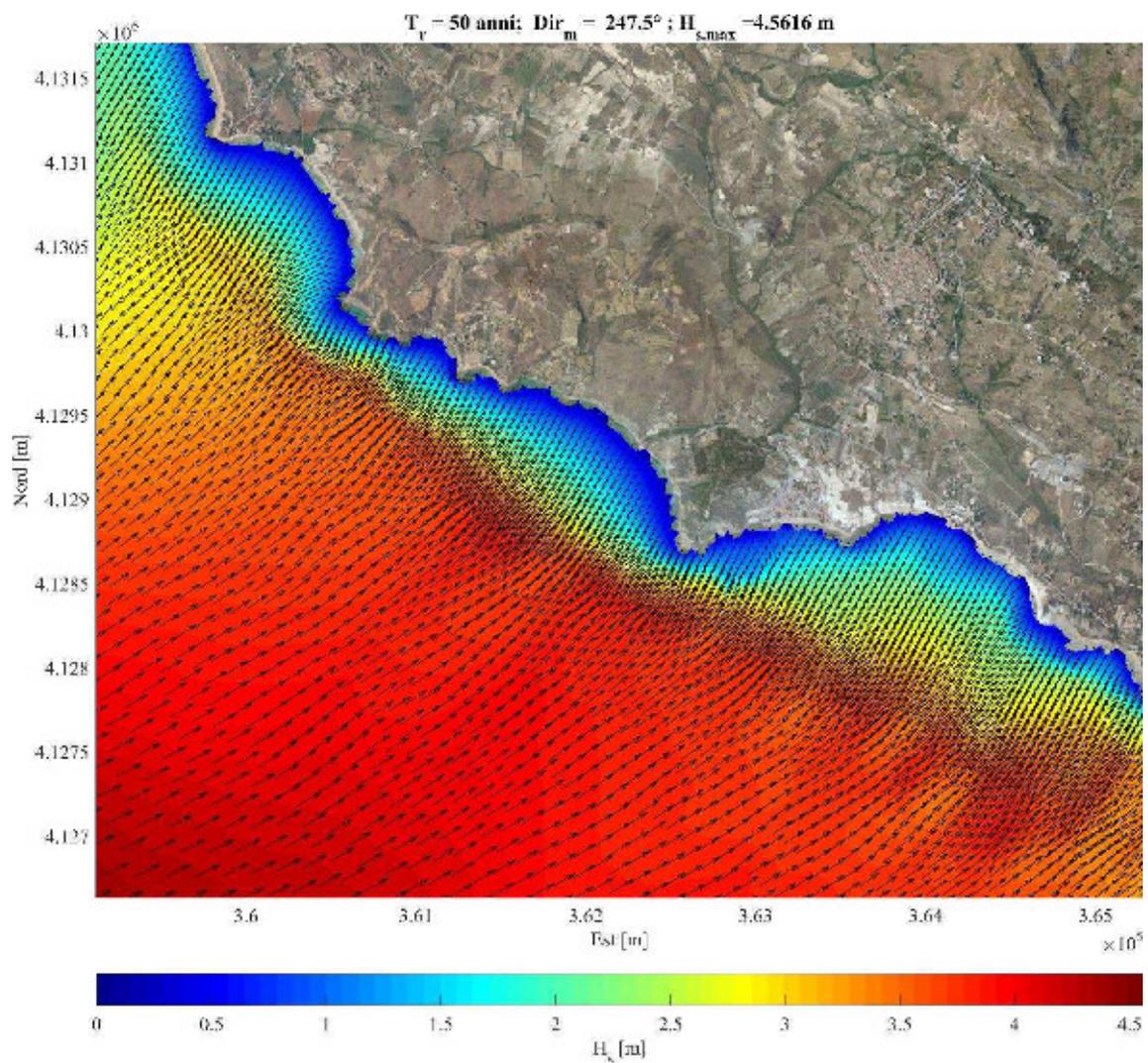


Figura A.55: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 247.5°N – $T_r = 50$ anni.

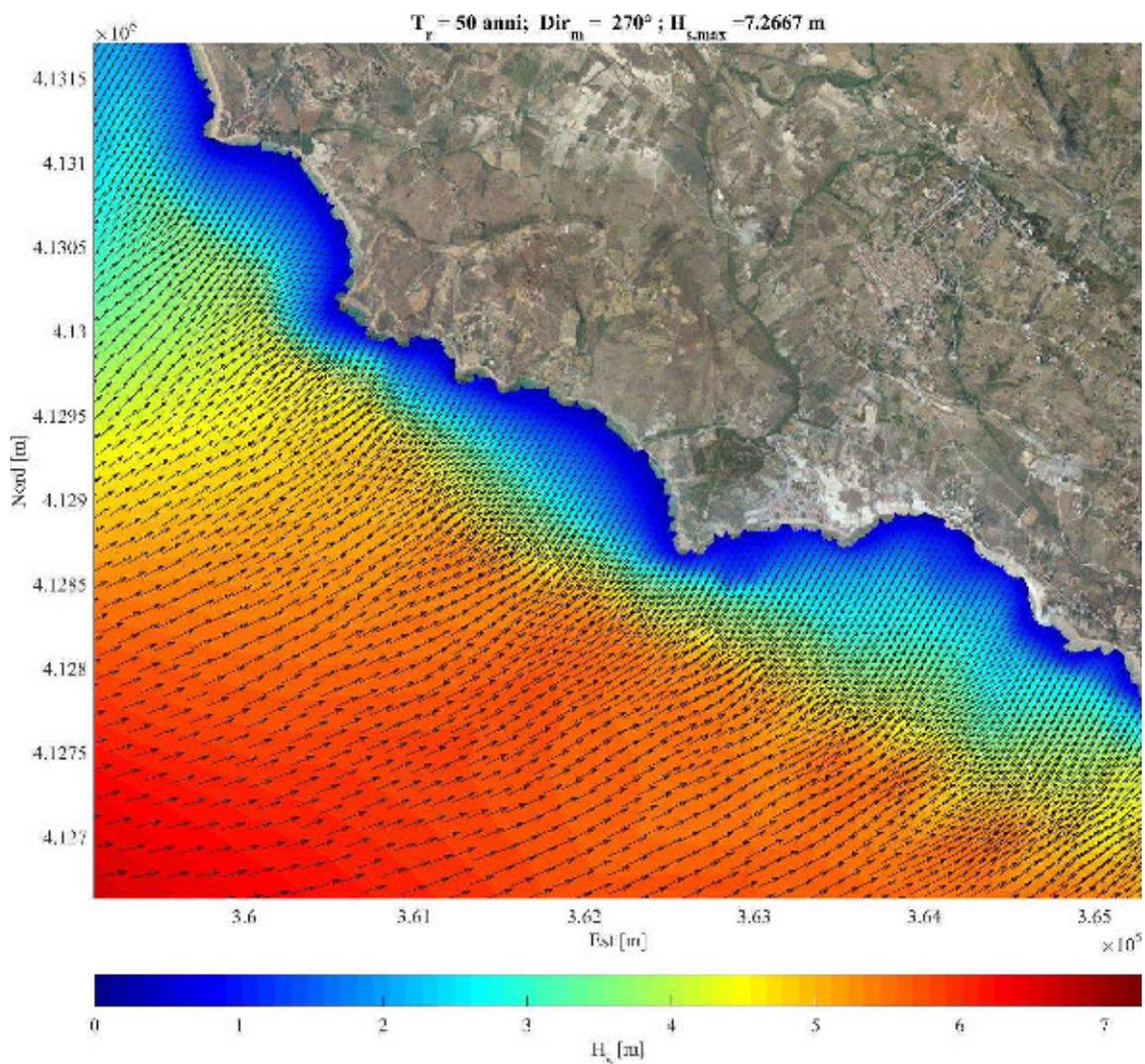


Figura A.56: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $270^\circ N$ – $T_r = 50$ anni.

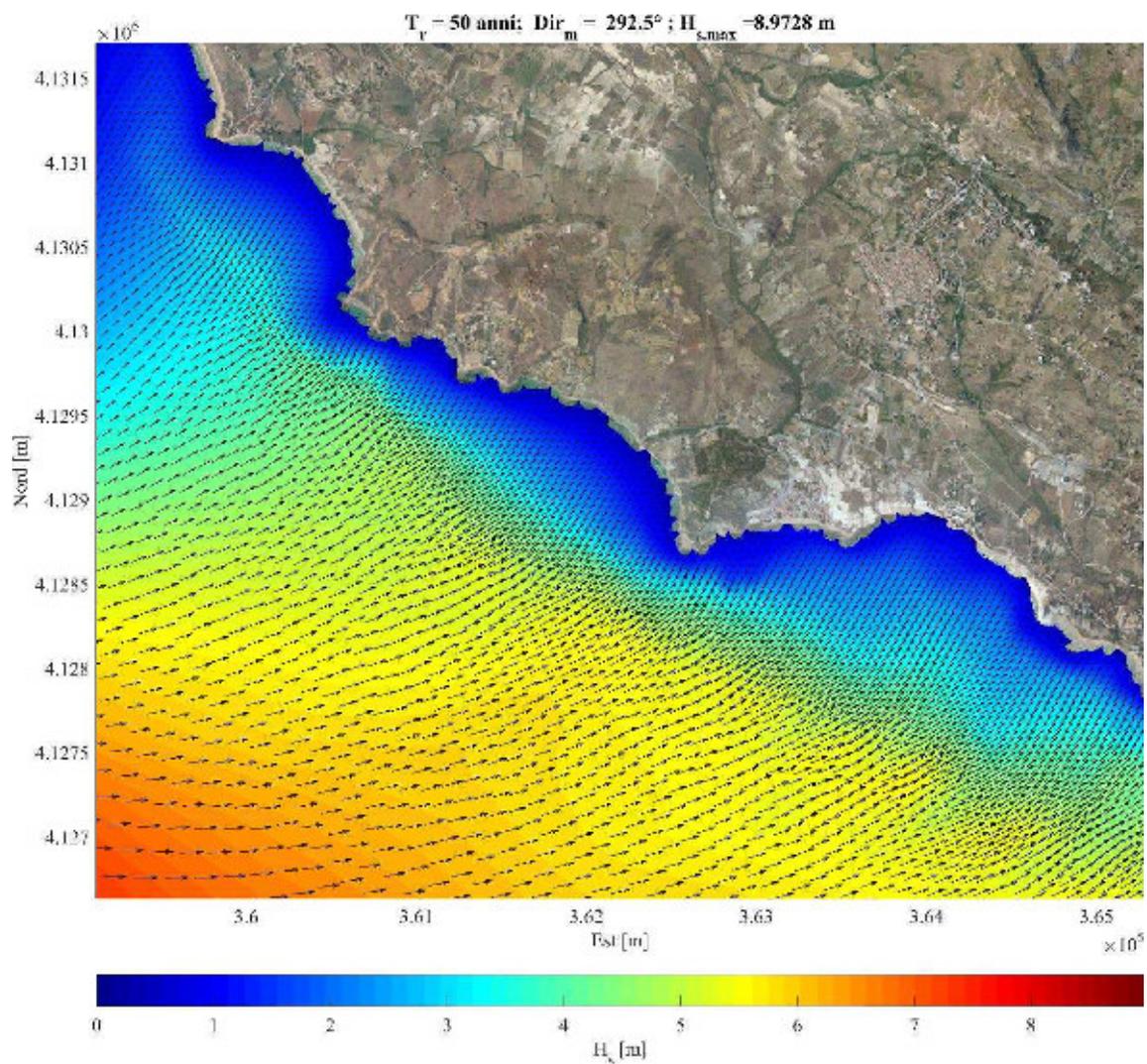


Figura A.57: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $292.5^\circ N$ – $Tr = 50$ anni.

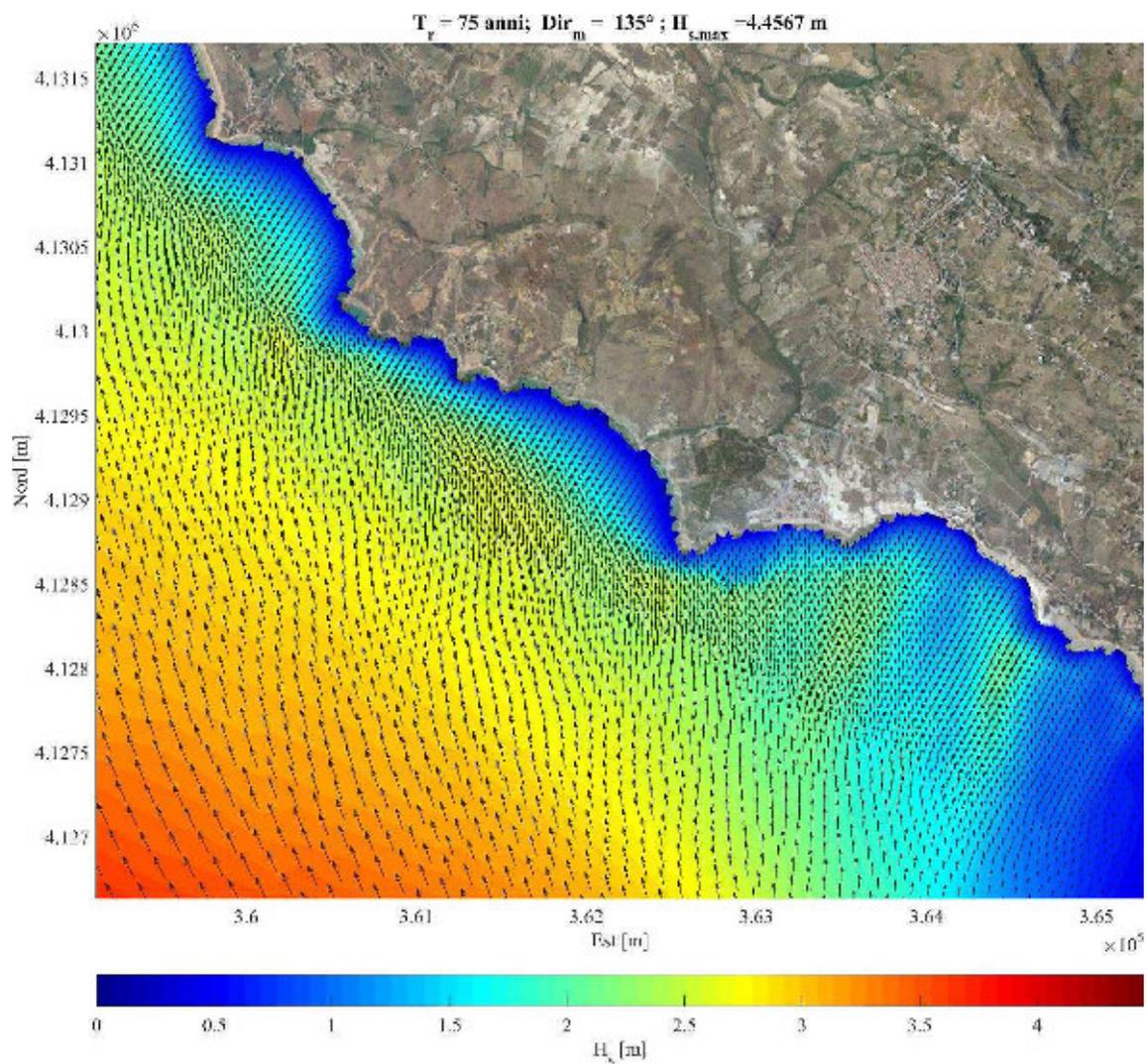


Figura A.58: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $135^\circ N$ – $T_r = 75$ anni.

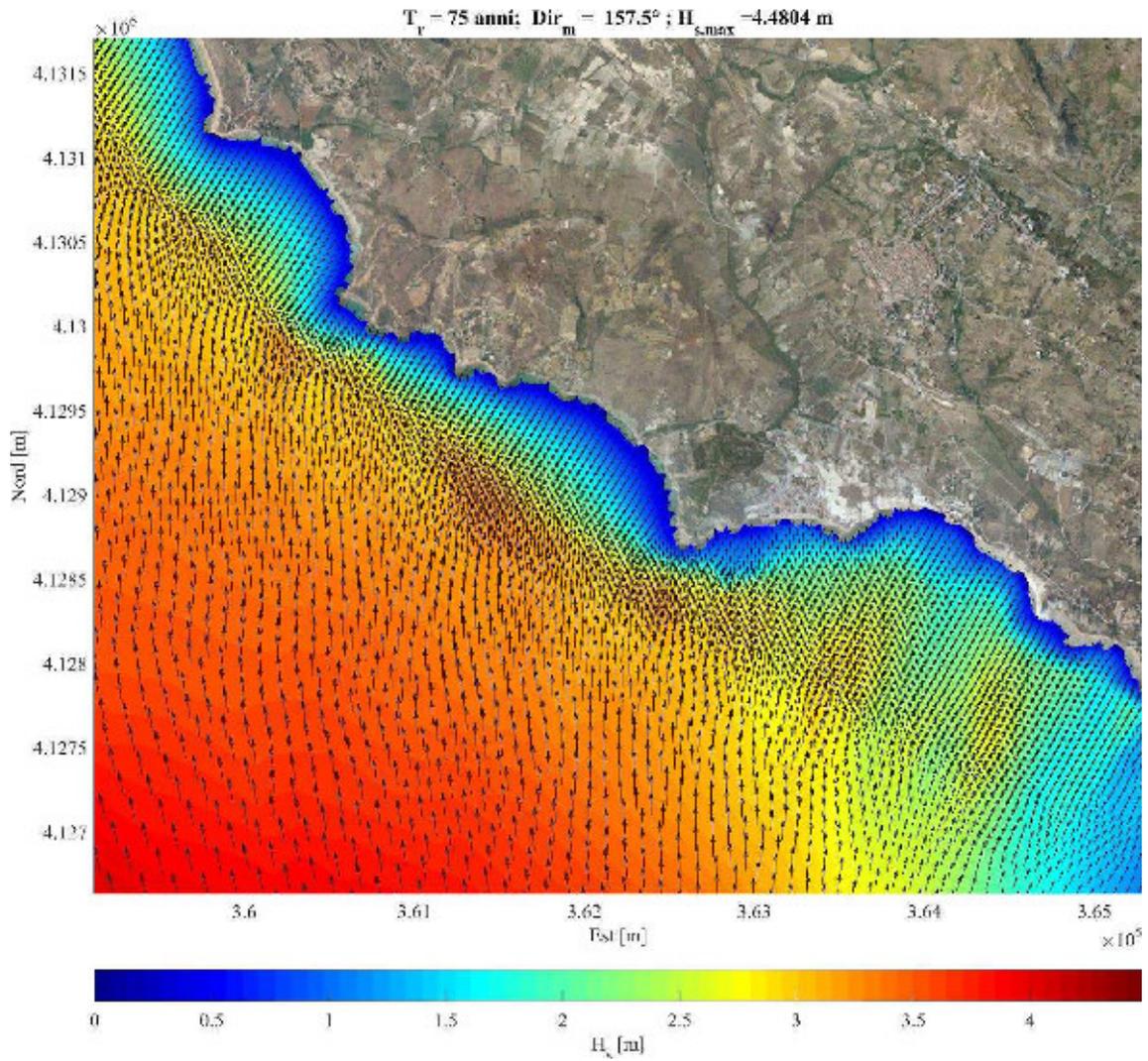


Figura A.59: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $157.5^\circ N$ – $T_r = 75$ anni.

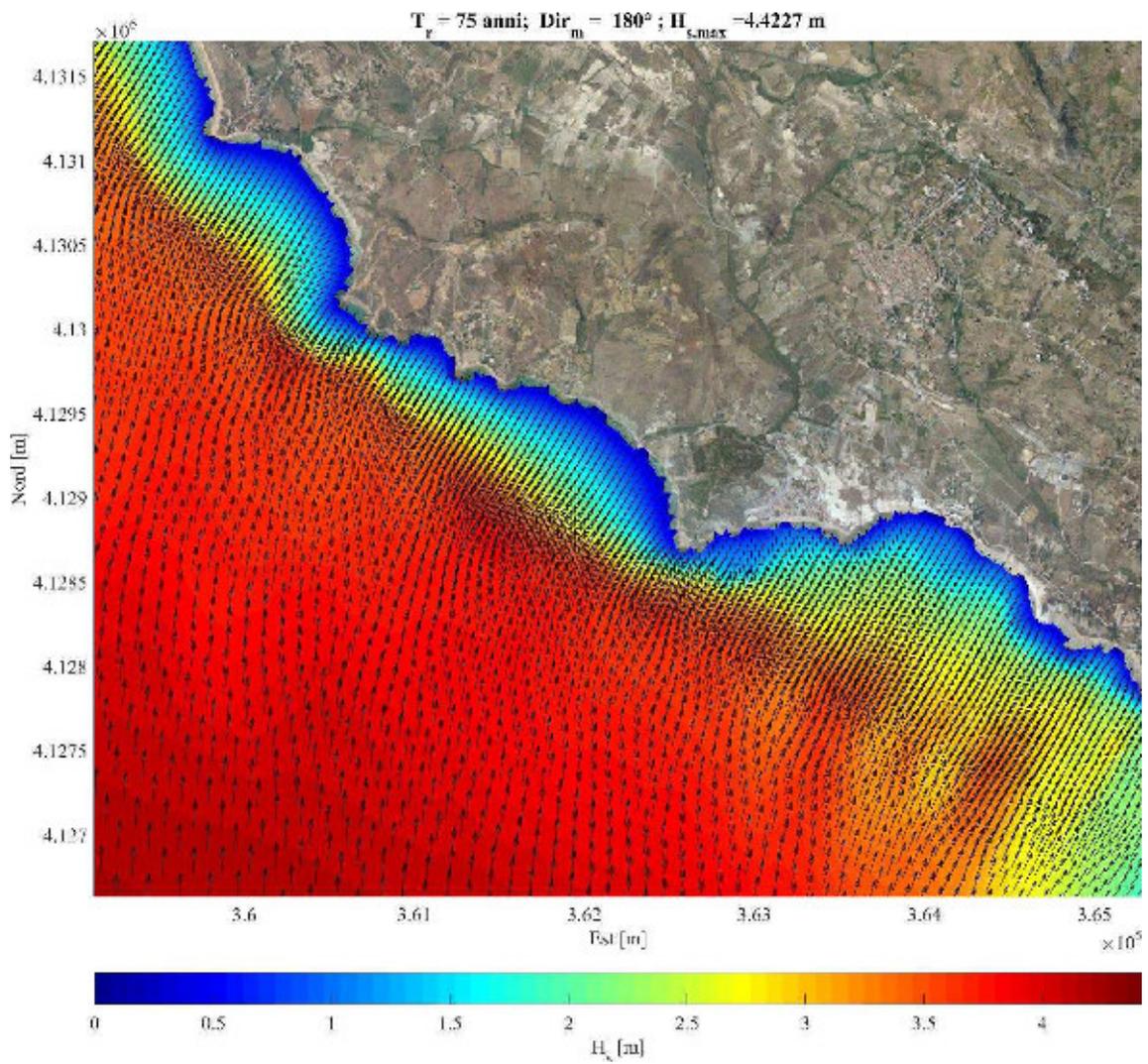


Figura A.60: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 180°N – $T_r = 75$ anni.

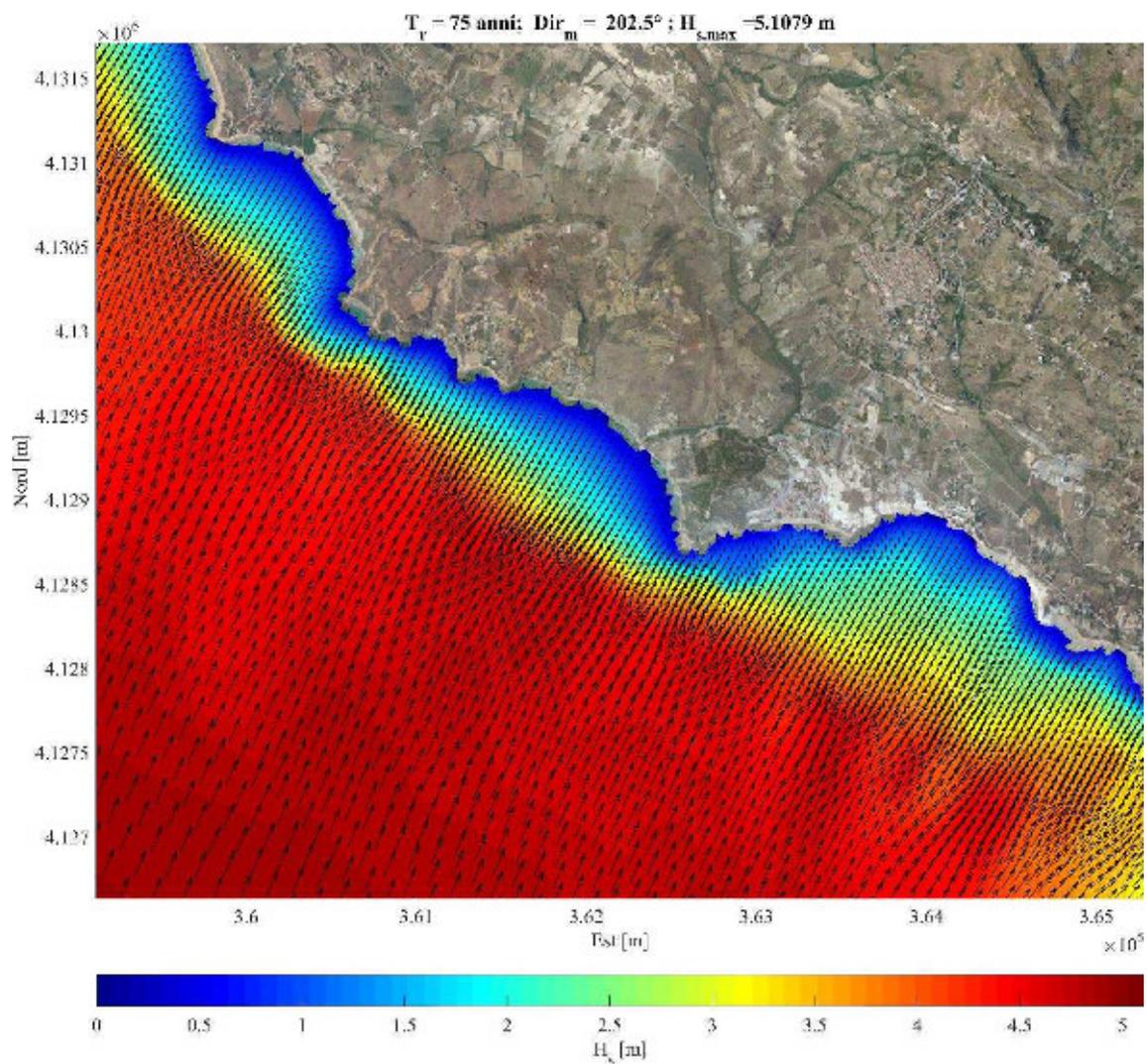


Figura A.61: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 202.5°N – $T_r = 75$ anni.

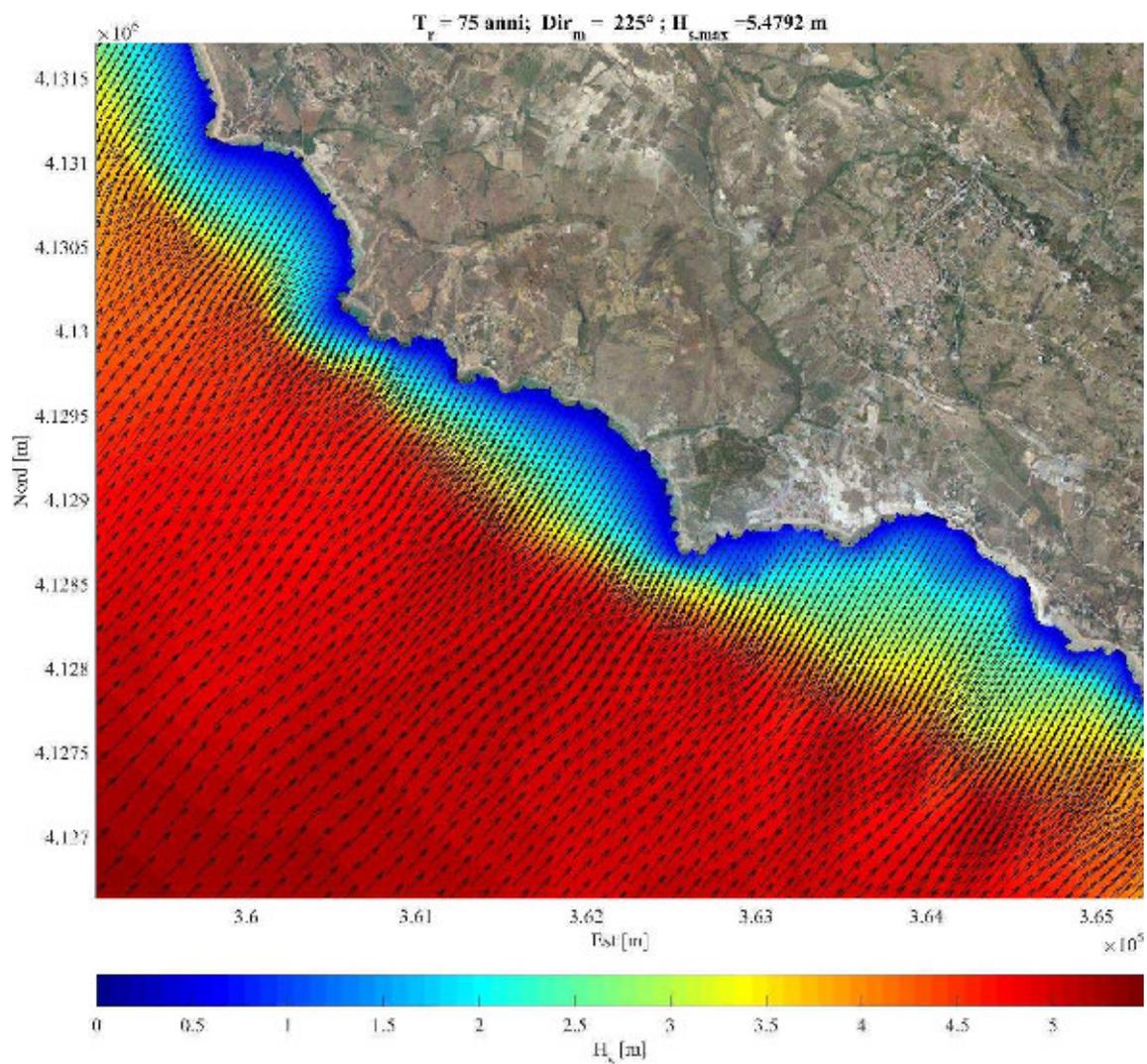


Figura A.62: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 225°N – $T_r = 75$ anni.

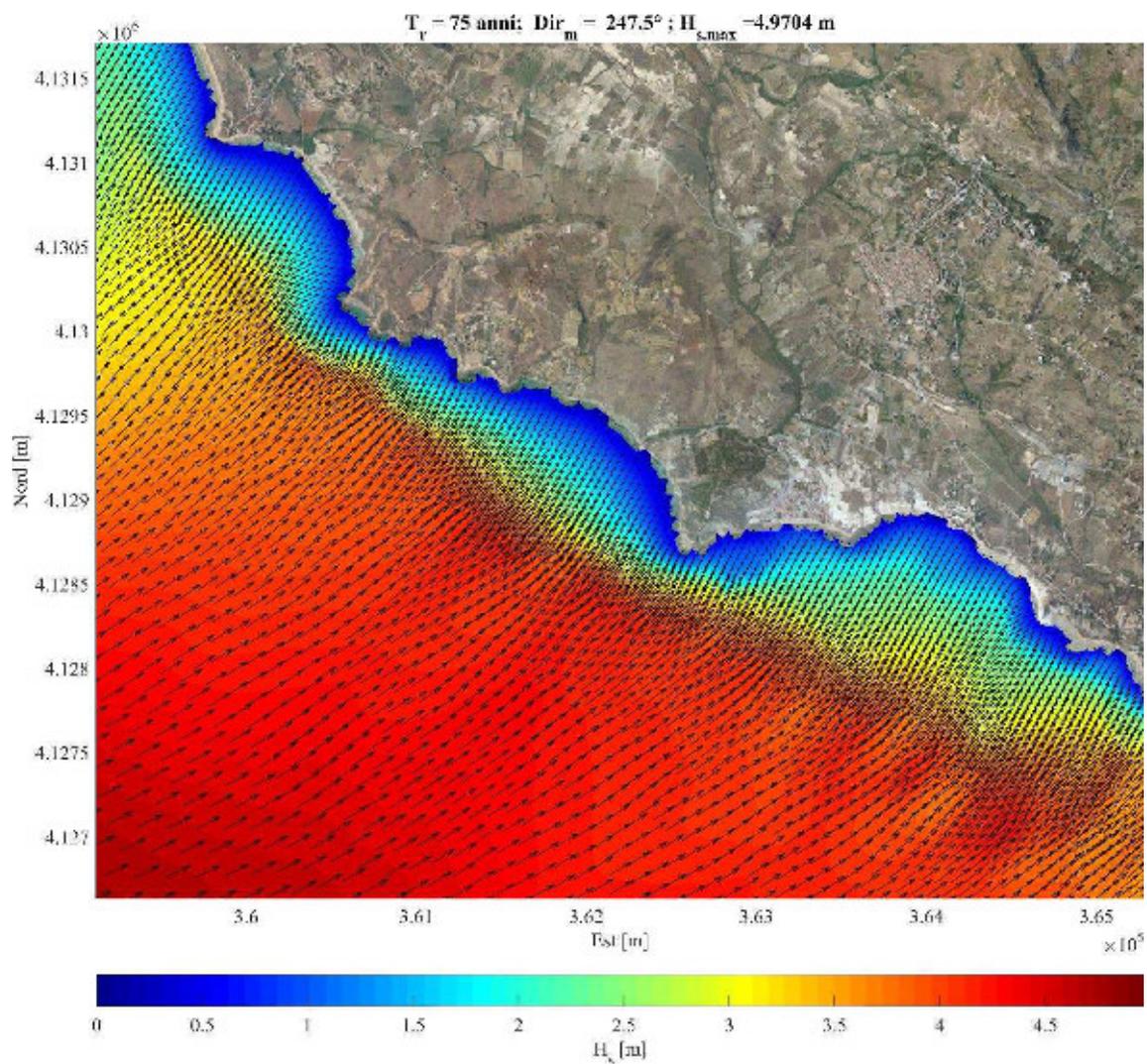


Figura A.63: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 247.5°N – $T_r = 75$ anni.

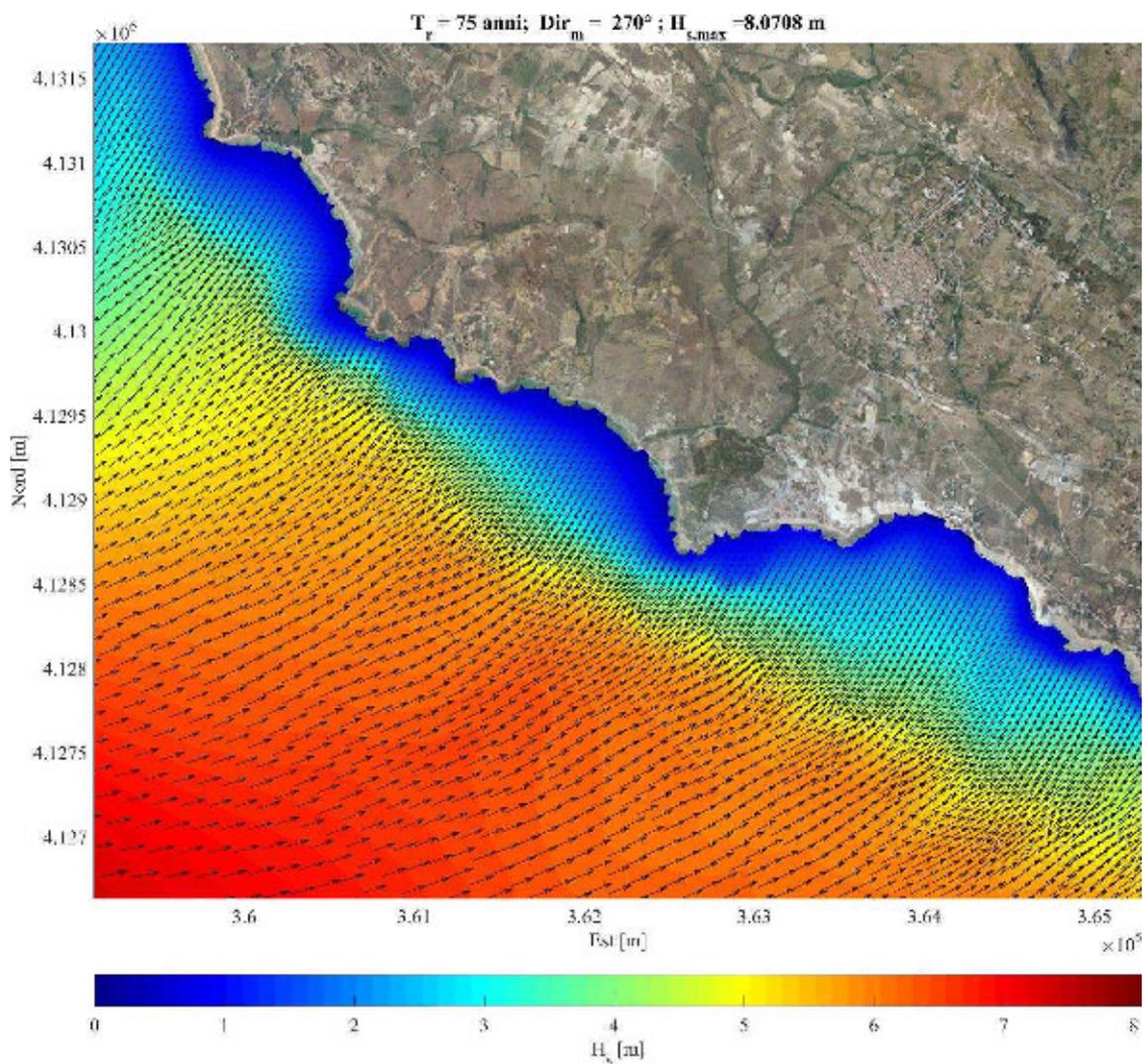


Figura A.64: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $270^\circ N$ – $T_r = 75$ anni.

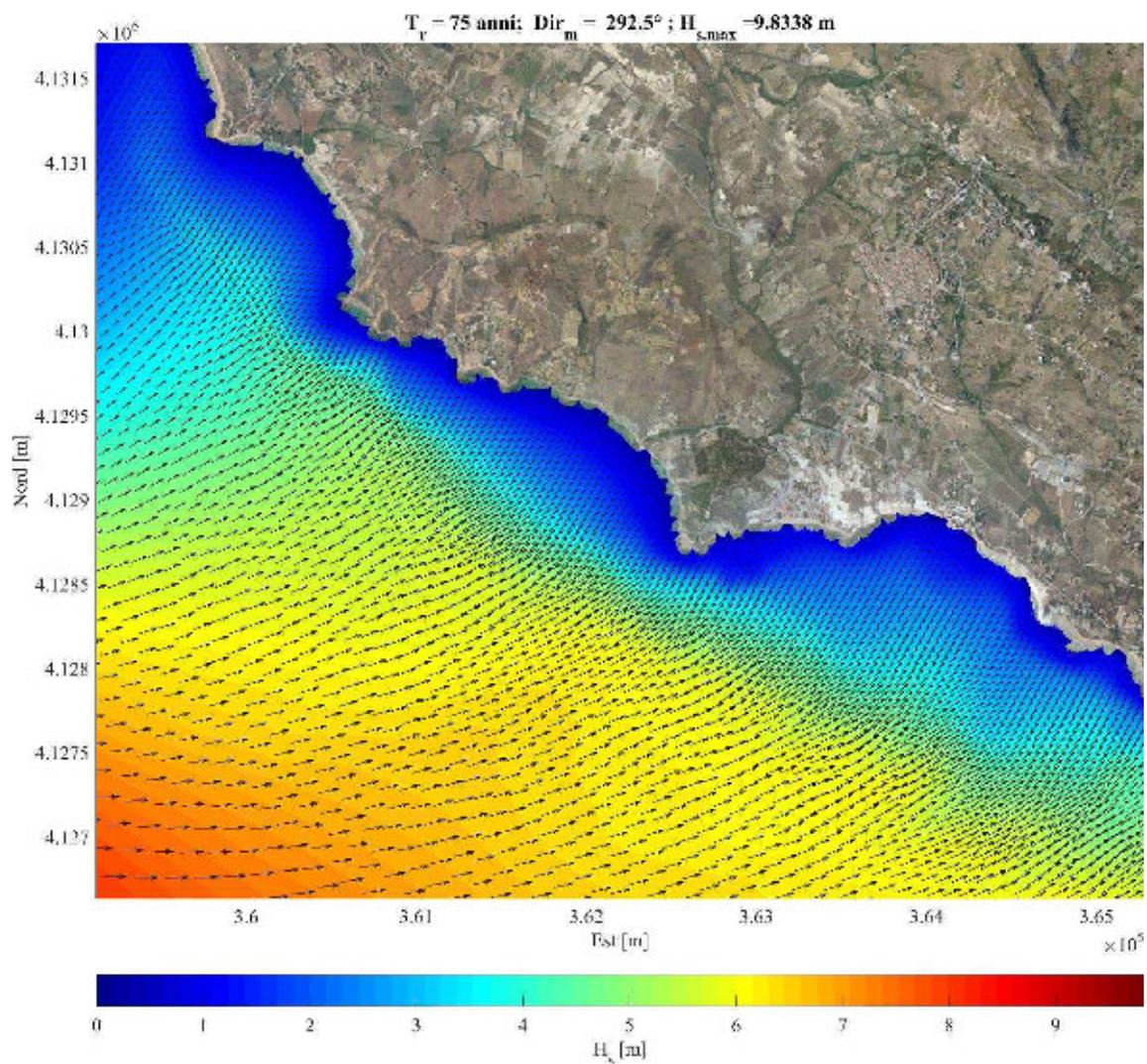


Figura A.65: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $292.5^\circ N$ – $Tr = 75$ anni.

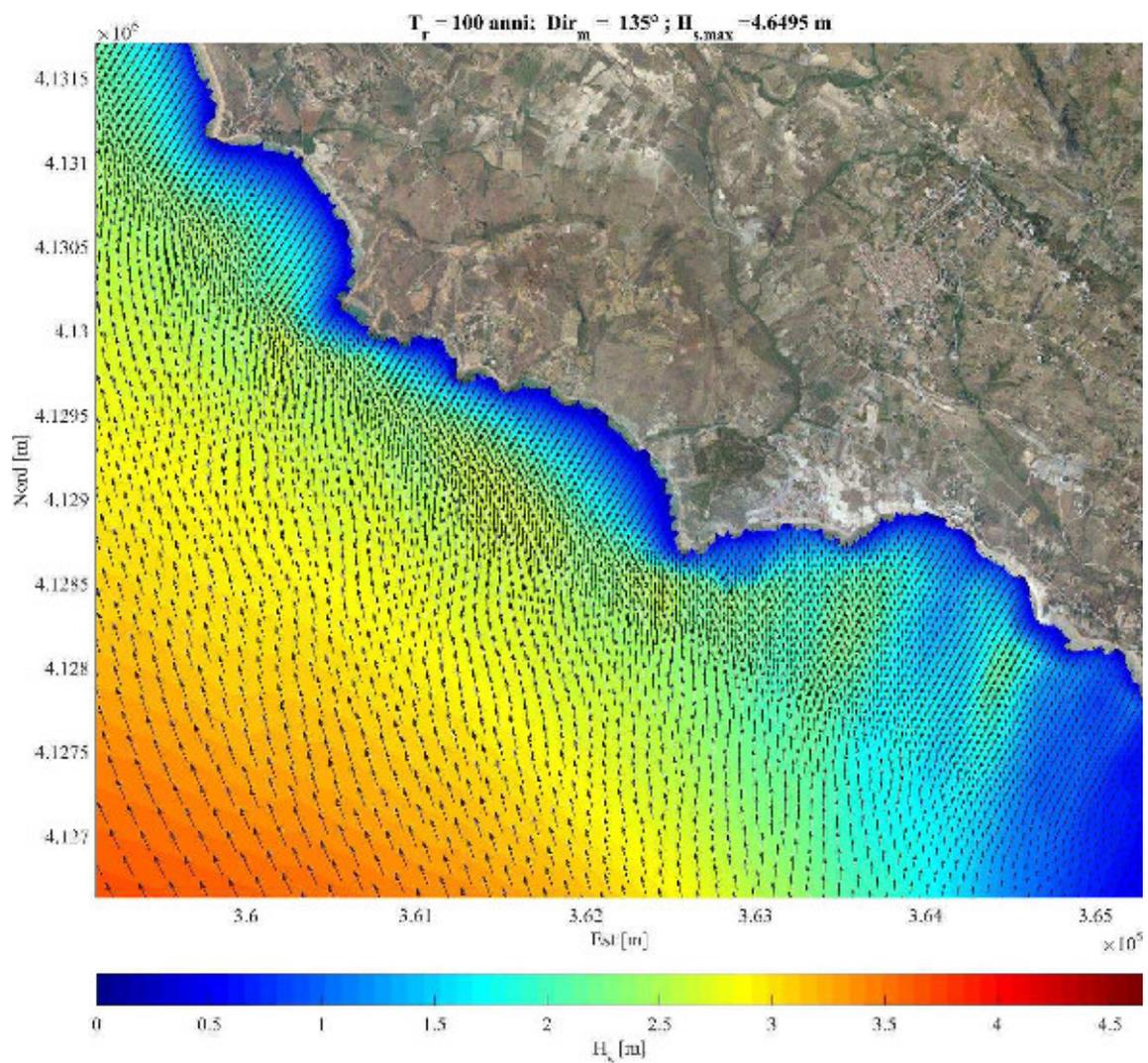


Figura A.66: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $135^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

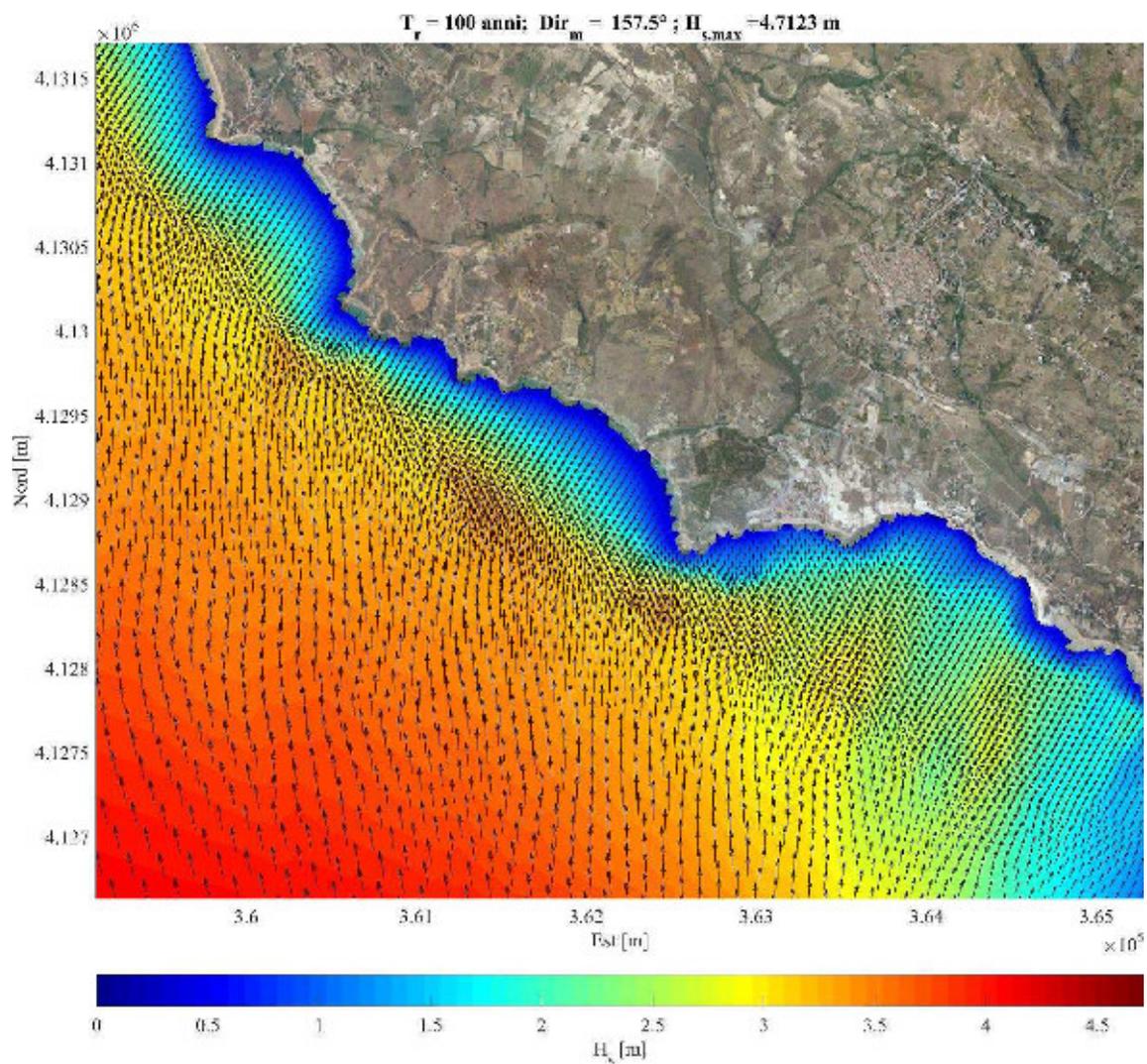


Figura A.67: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $157.5^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

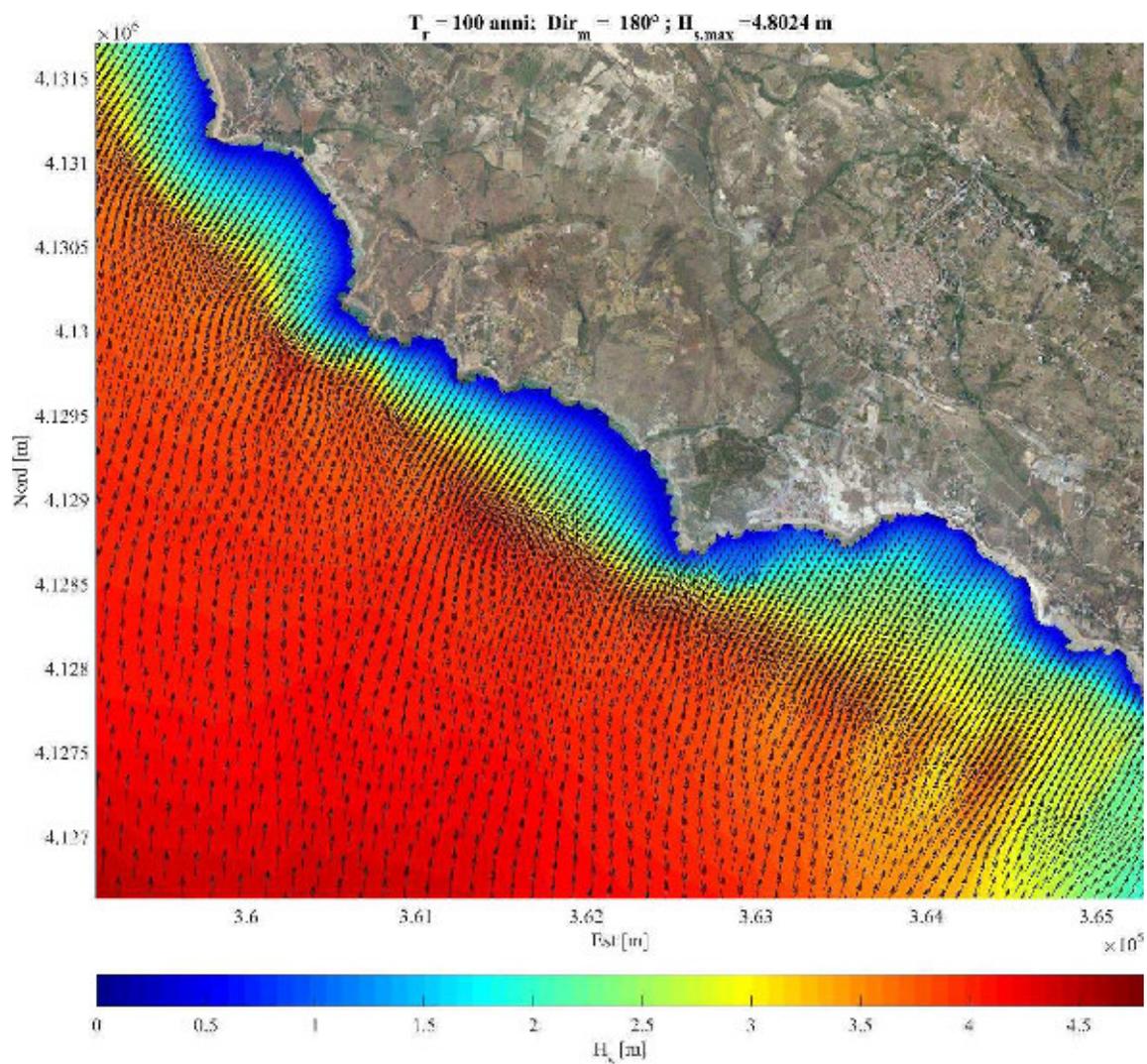


Figura A.68: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 180°N – $T_r = 100$ anni.

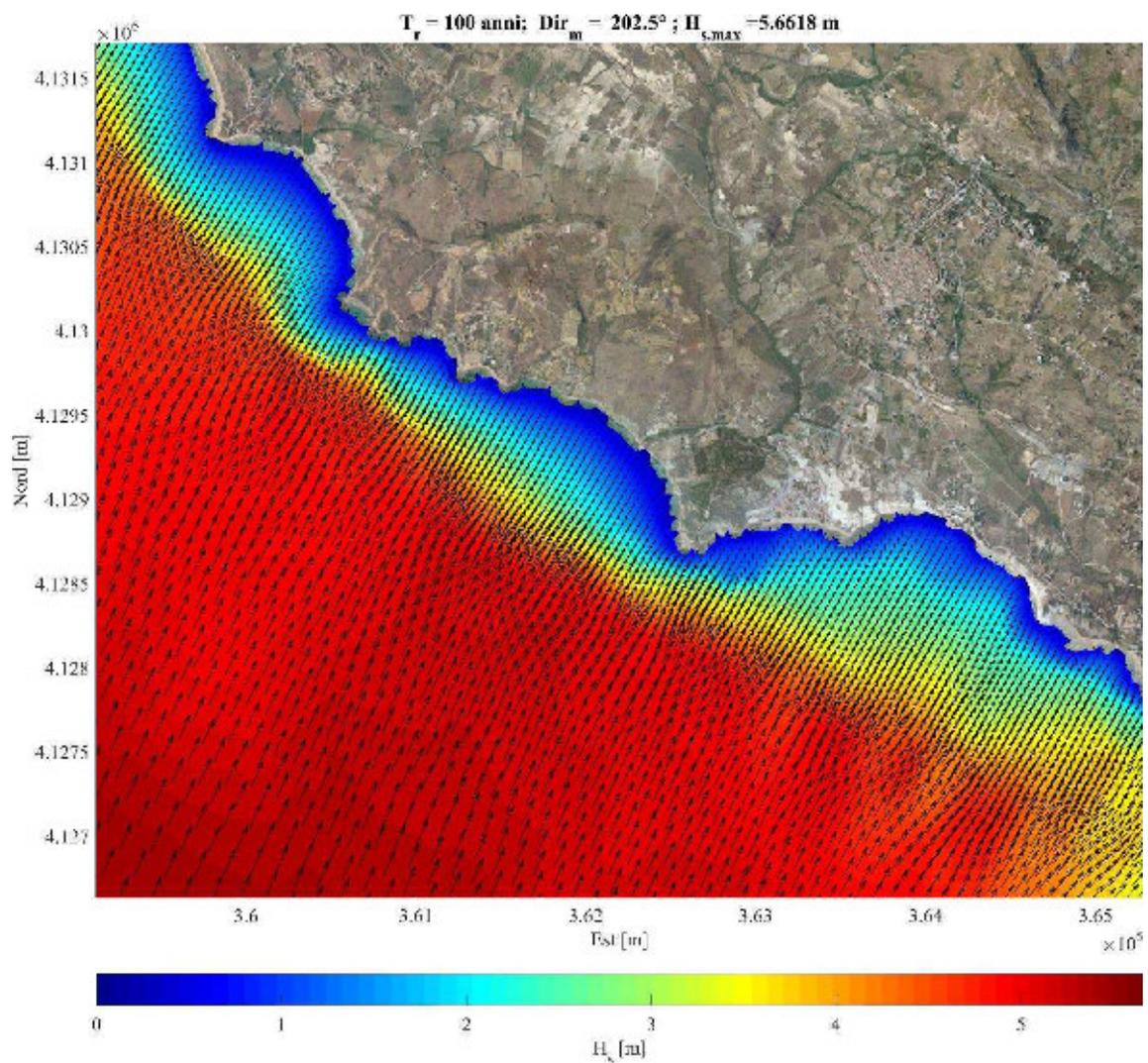


Figura A.69: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $202.5^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

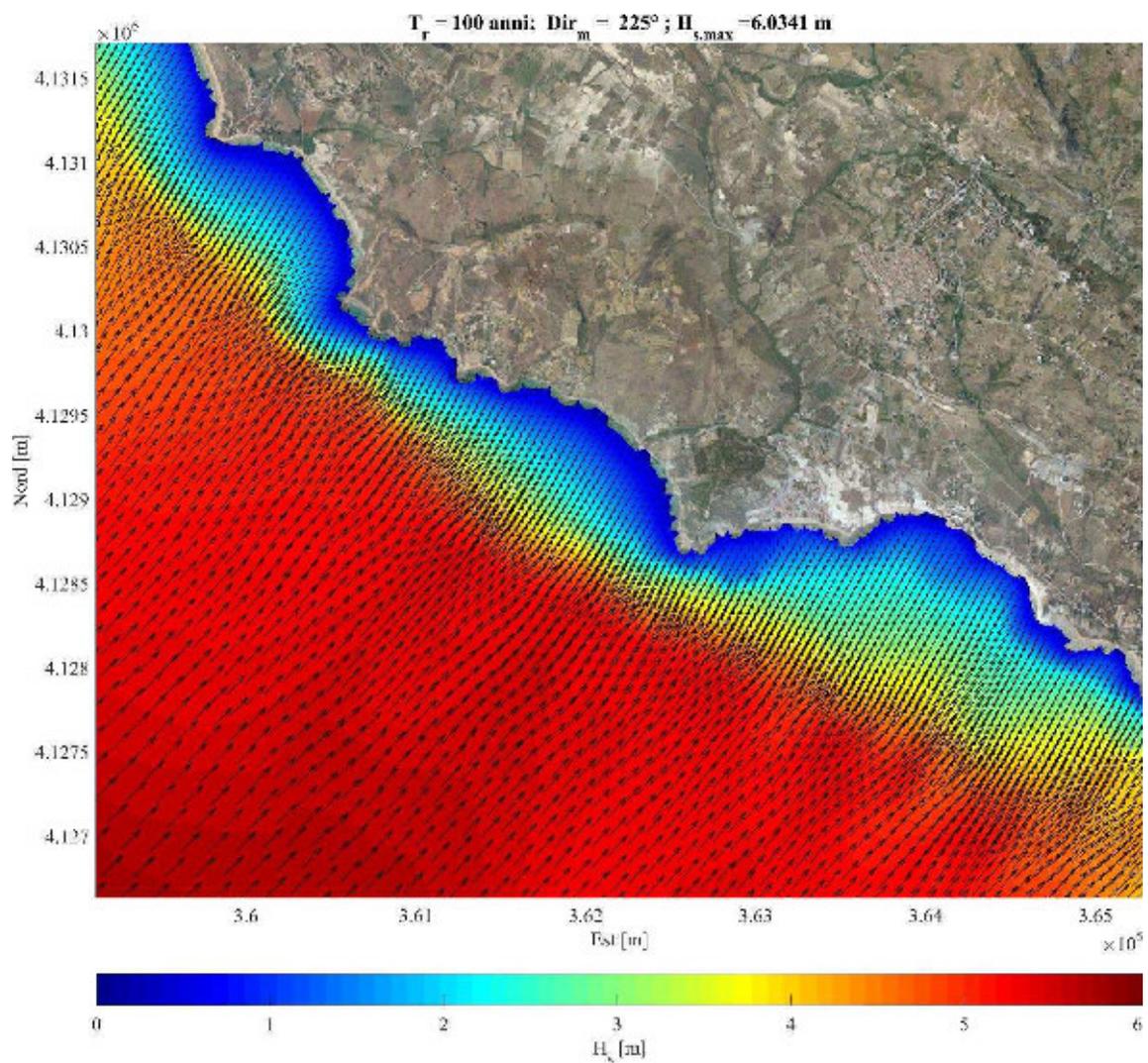


Figura A.70: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo 225°N – $T_r = 100$ anni.

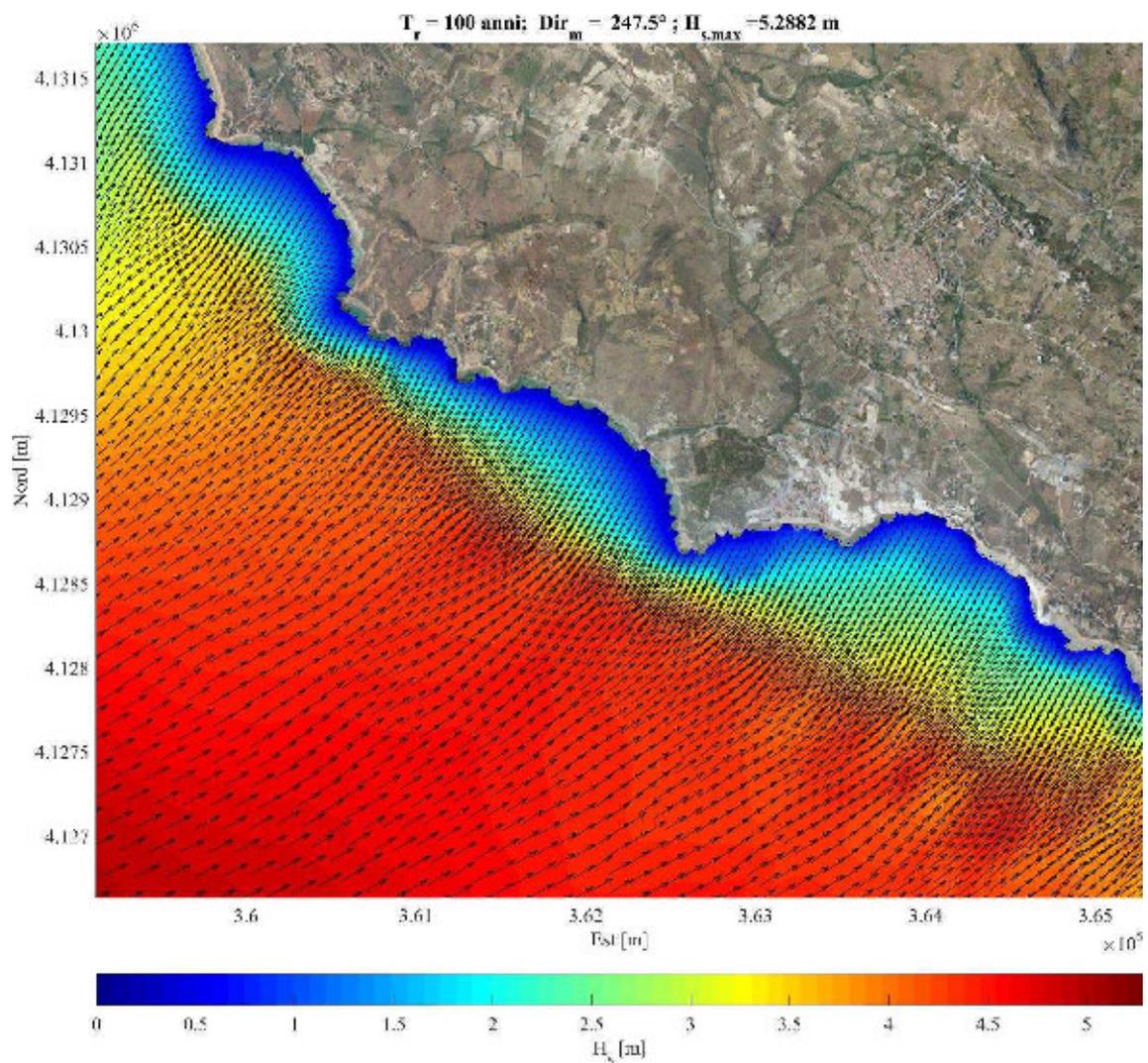


Figura A.71: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $247.5^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

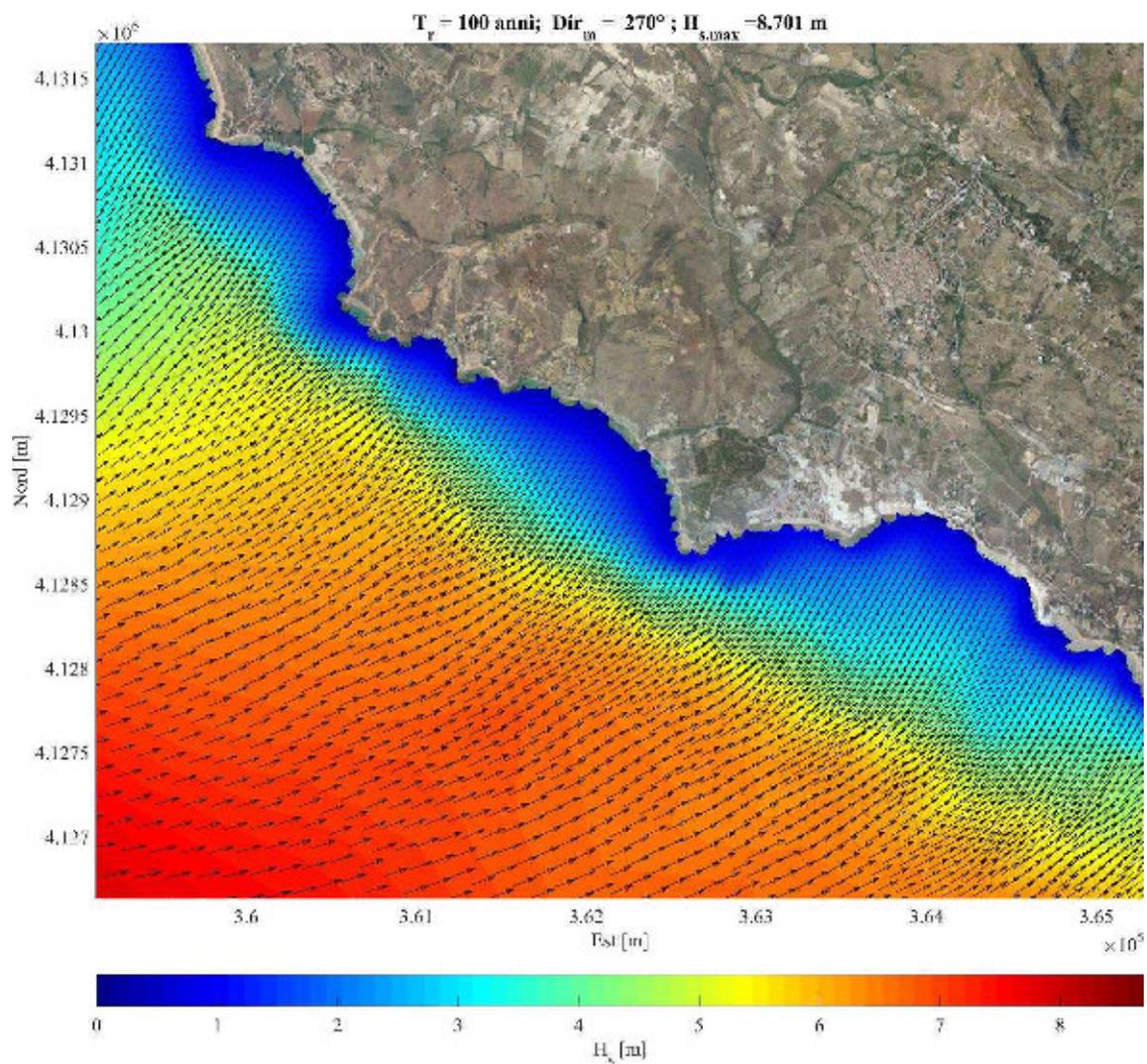


Figura A.72: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $270^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

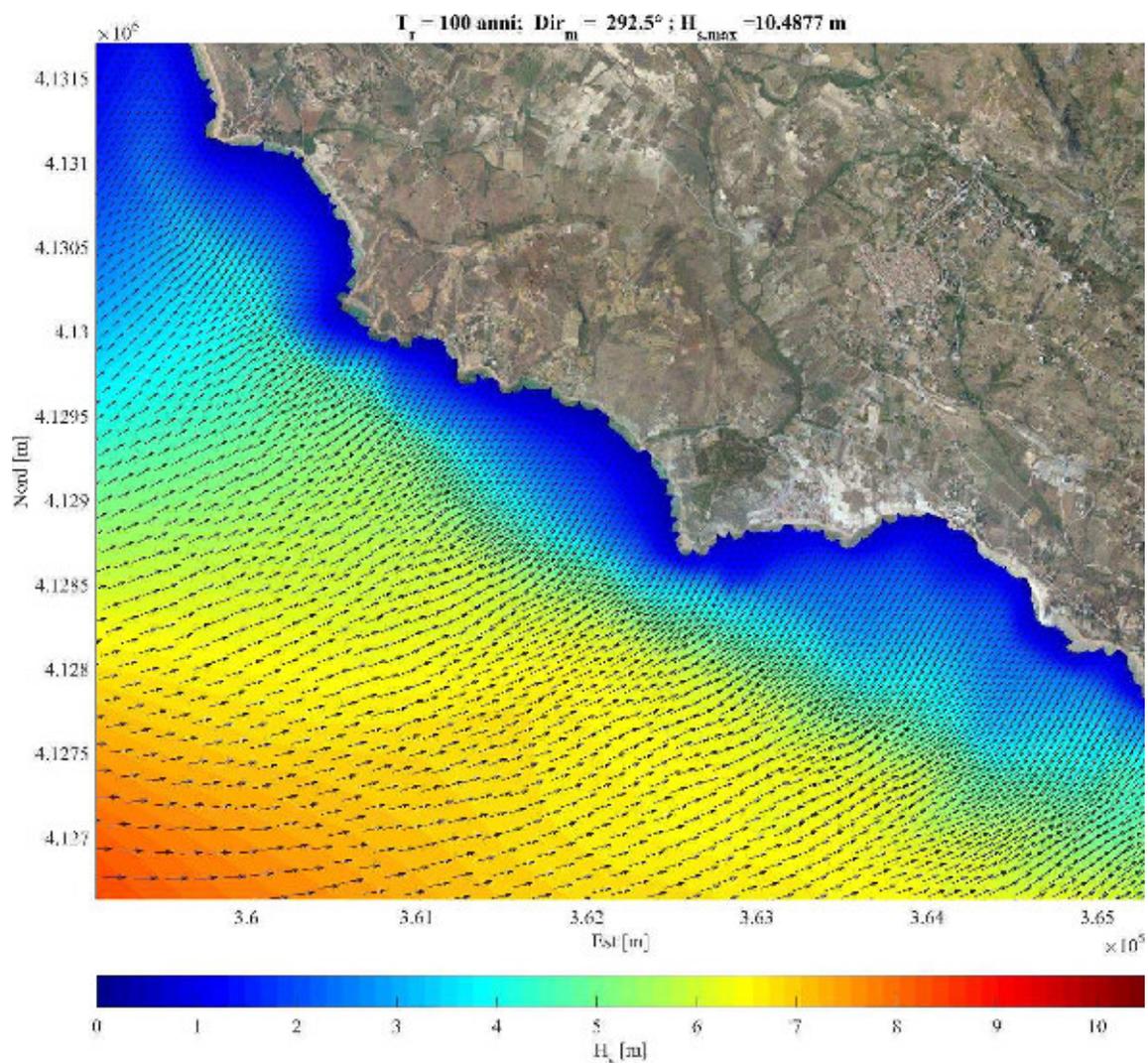


Figura A.73: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $292.5^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

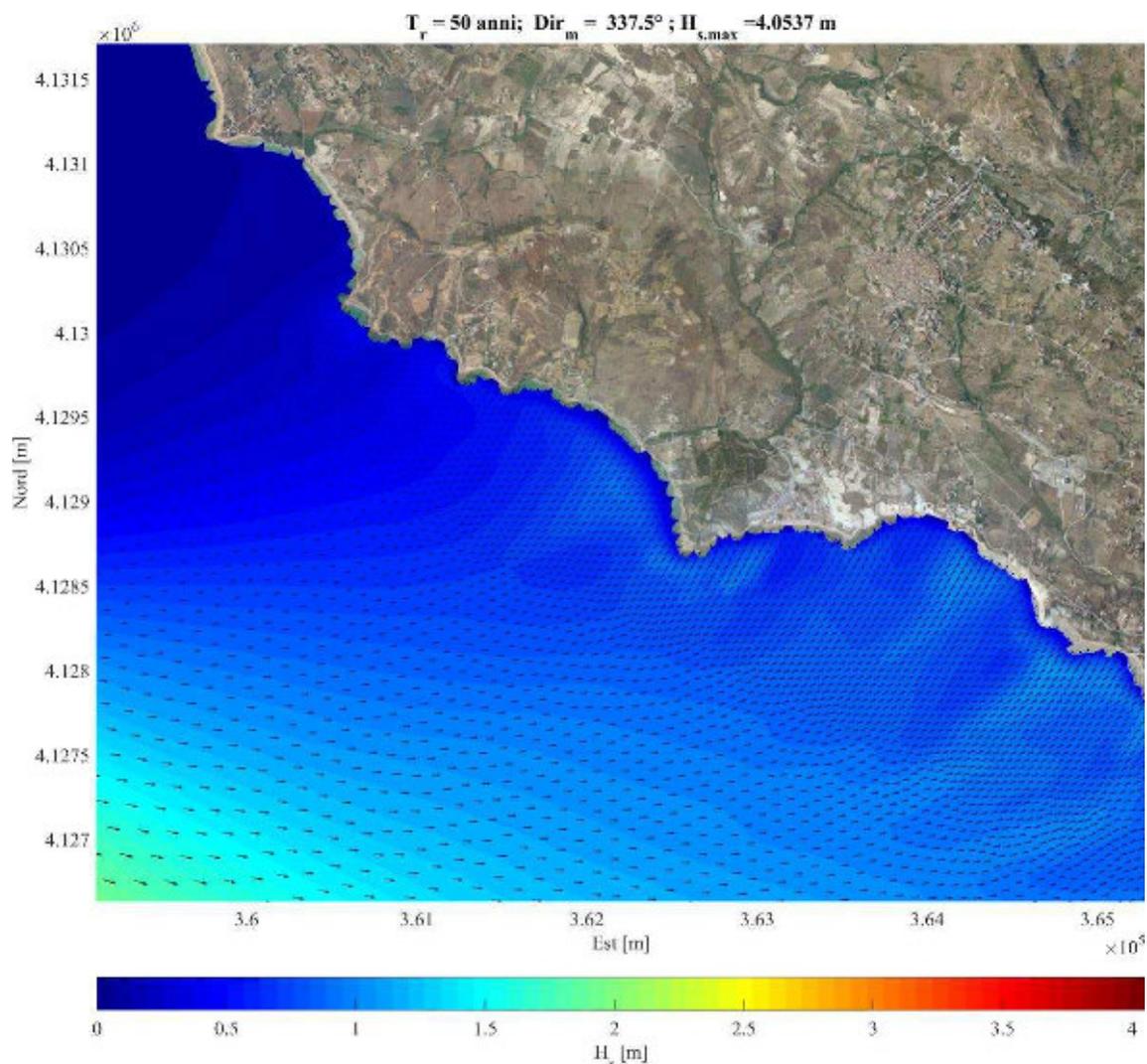


Figura A.74: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $337.5^\circ N$ – $T_r = 50$ anni.

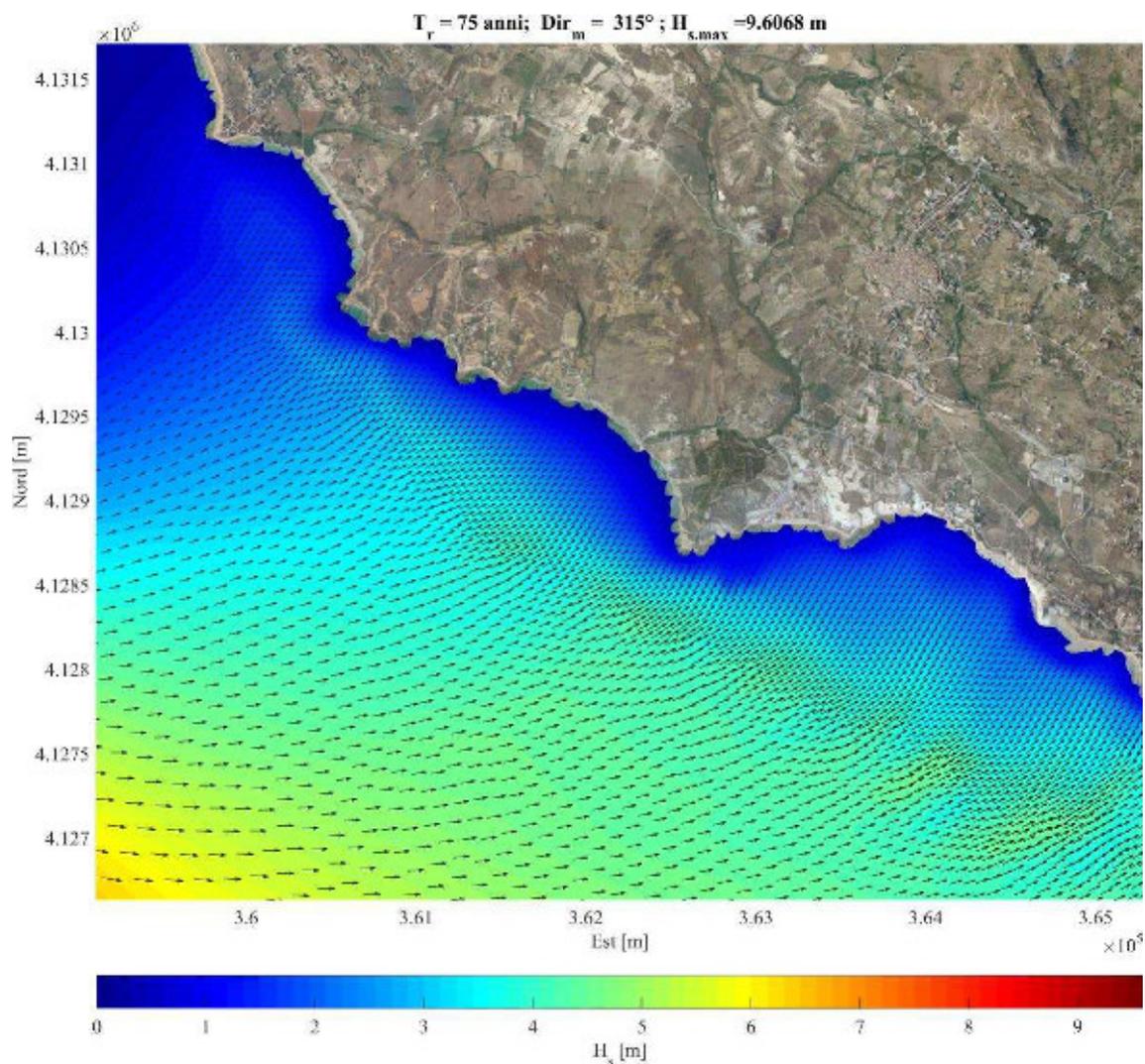


Figura A.75: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $315^\circ N$ – $T_r = 75$ anni.

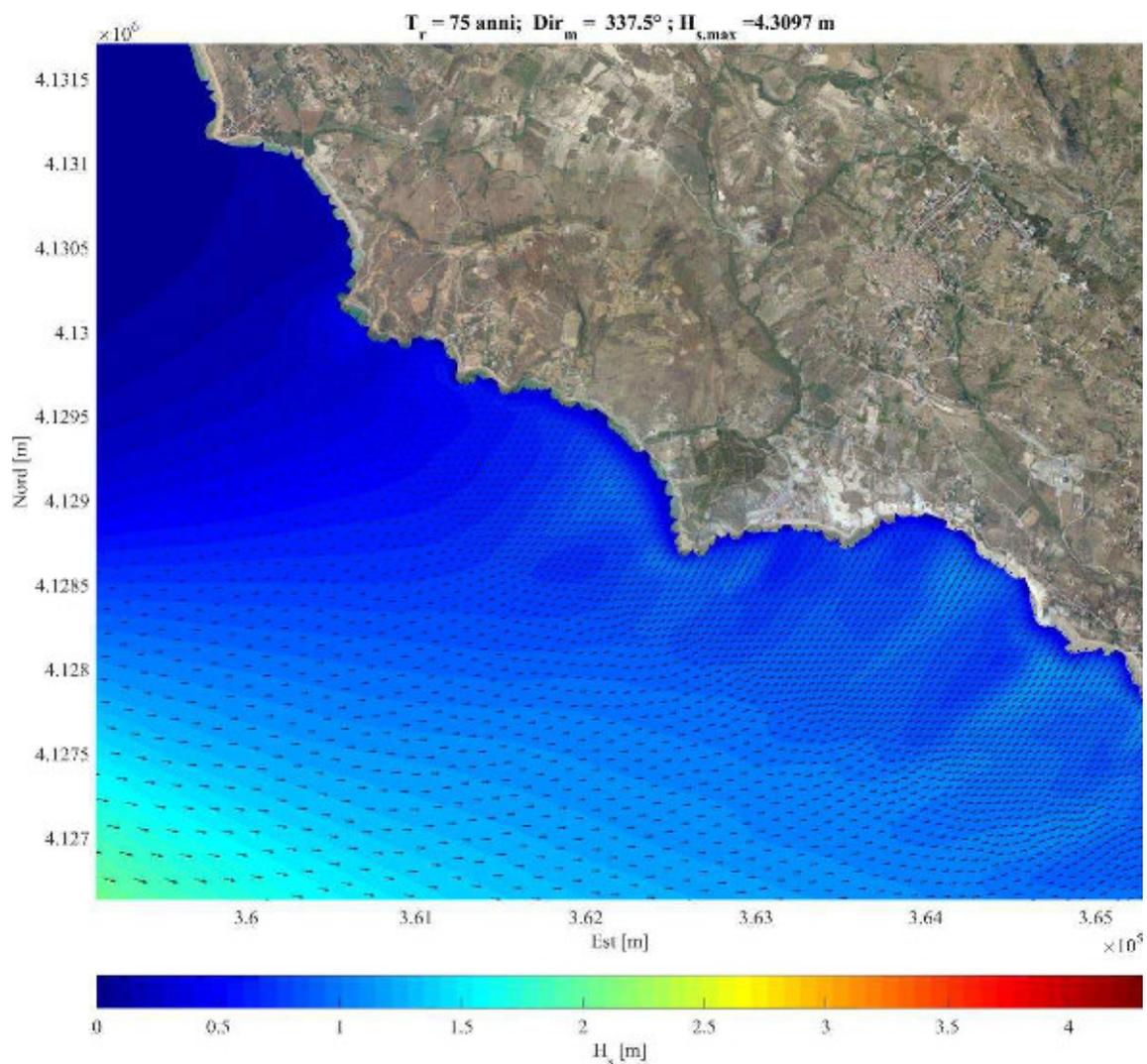


Figura A.76: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $337.5^\circ N$ – $T_r = 75$ anni.

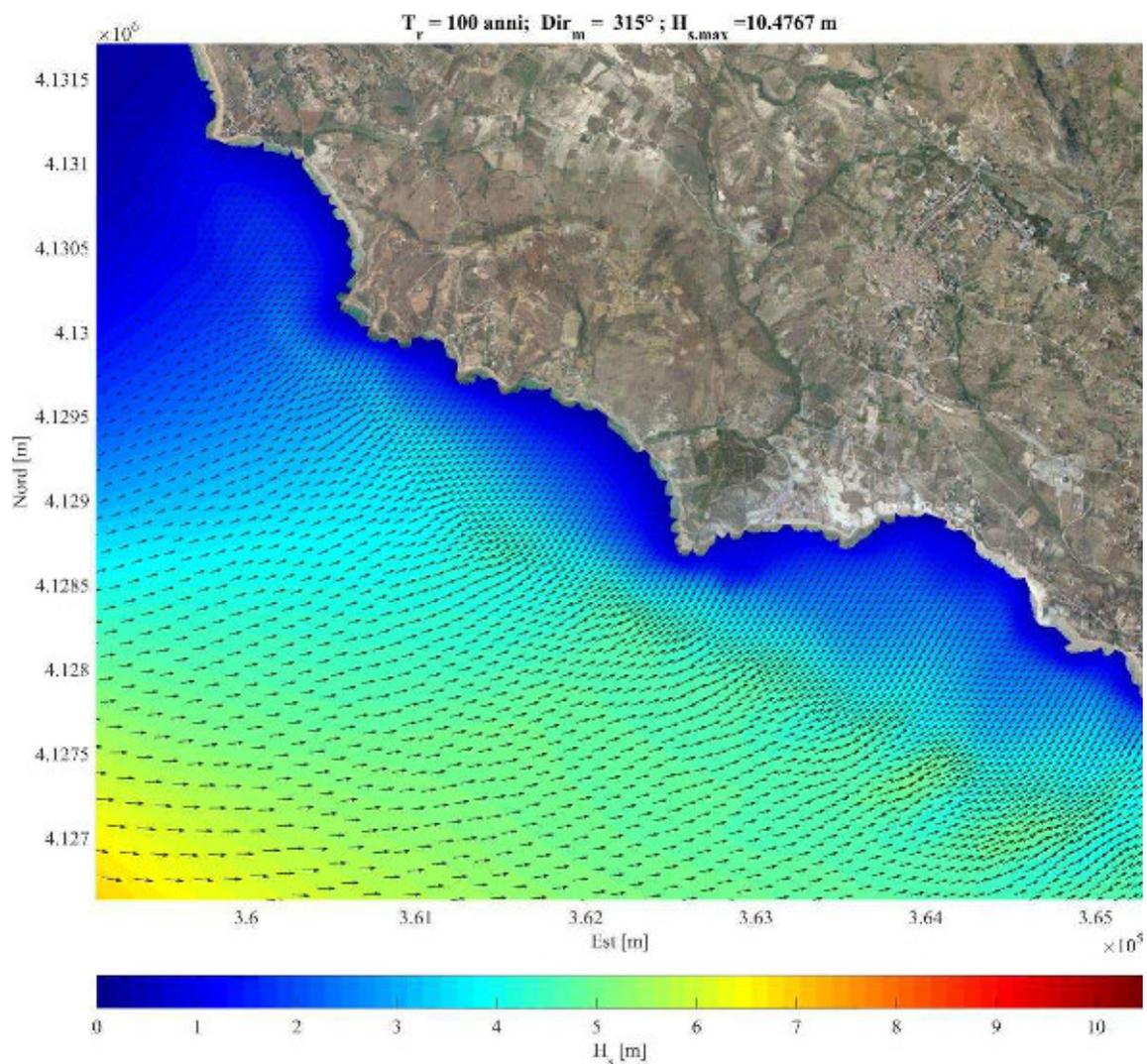


Figura A.77: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $315^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

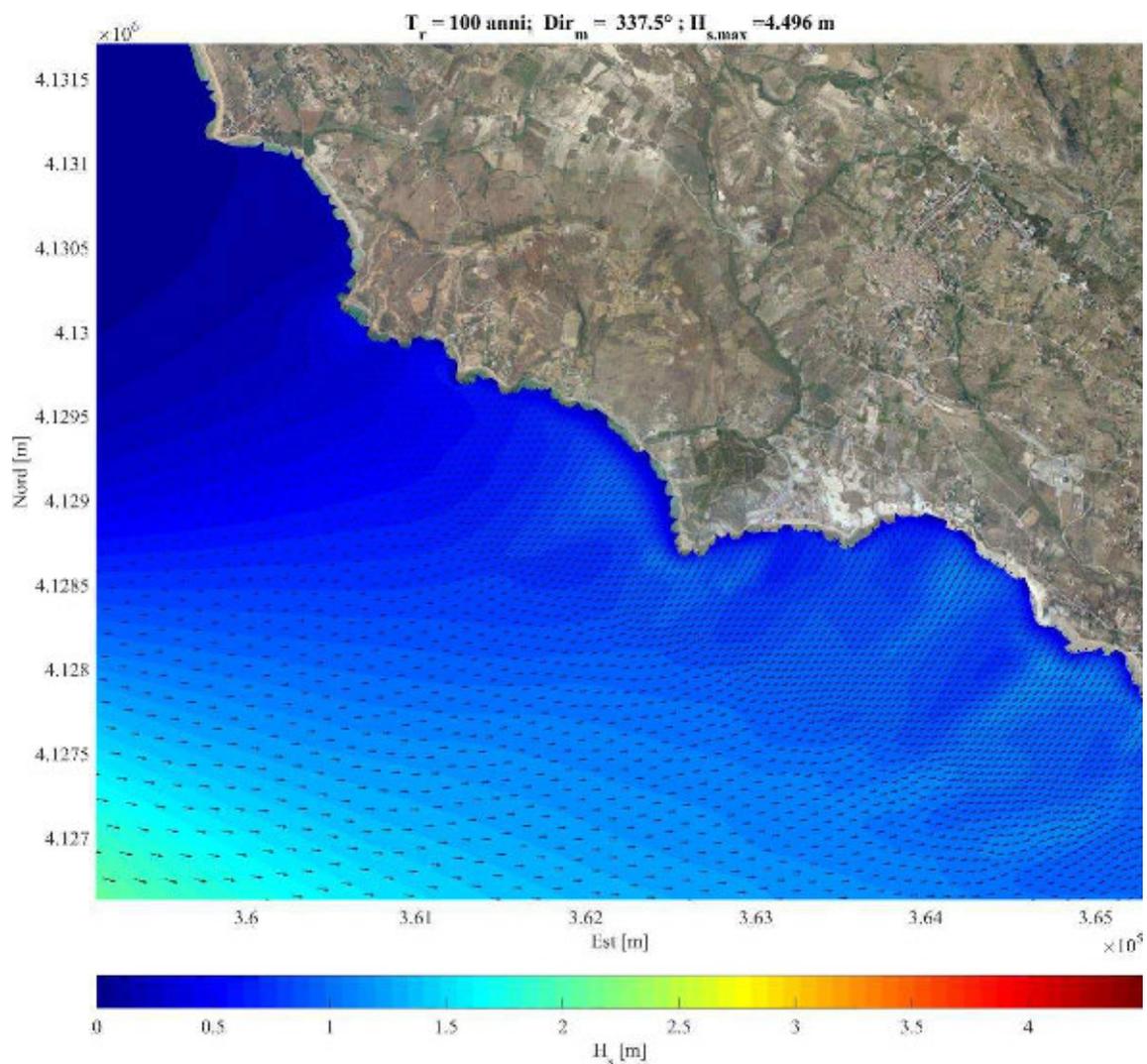


Figura A.78: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $337.5^\circ N$ – $T_r = 100$ anni.

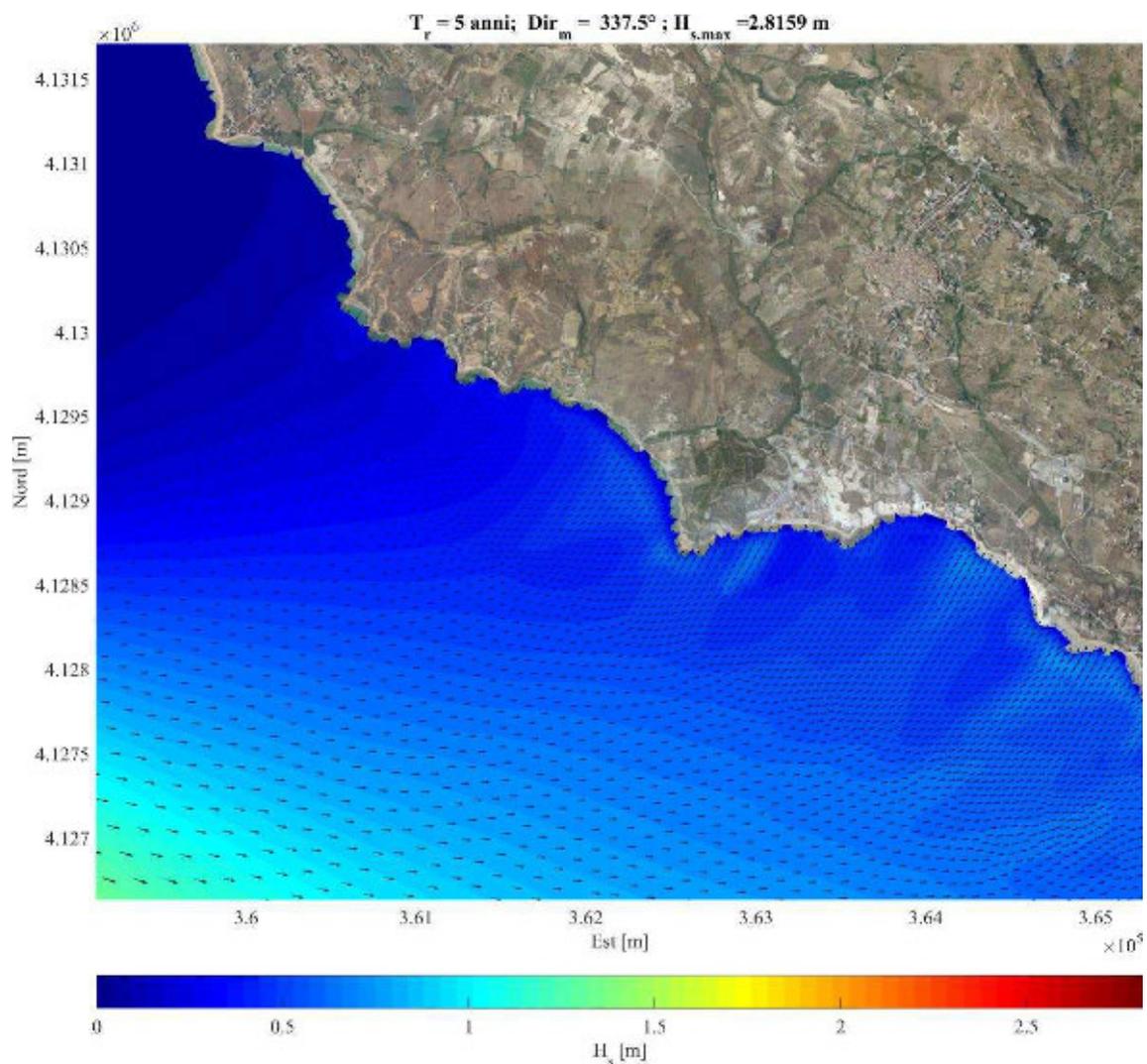


Figura A.79: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $337.5^\circ N$ – $Tr = 5$ anni.

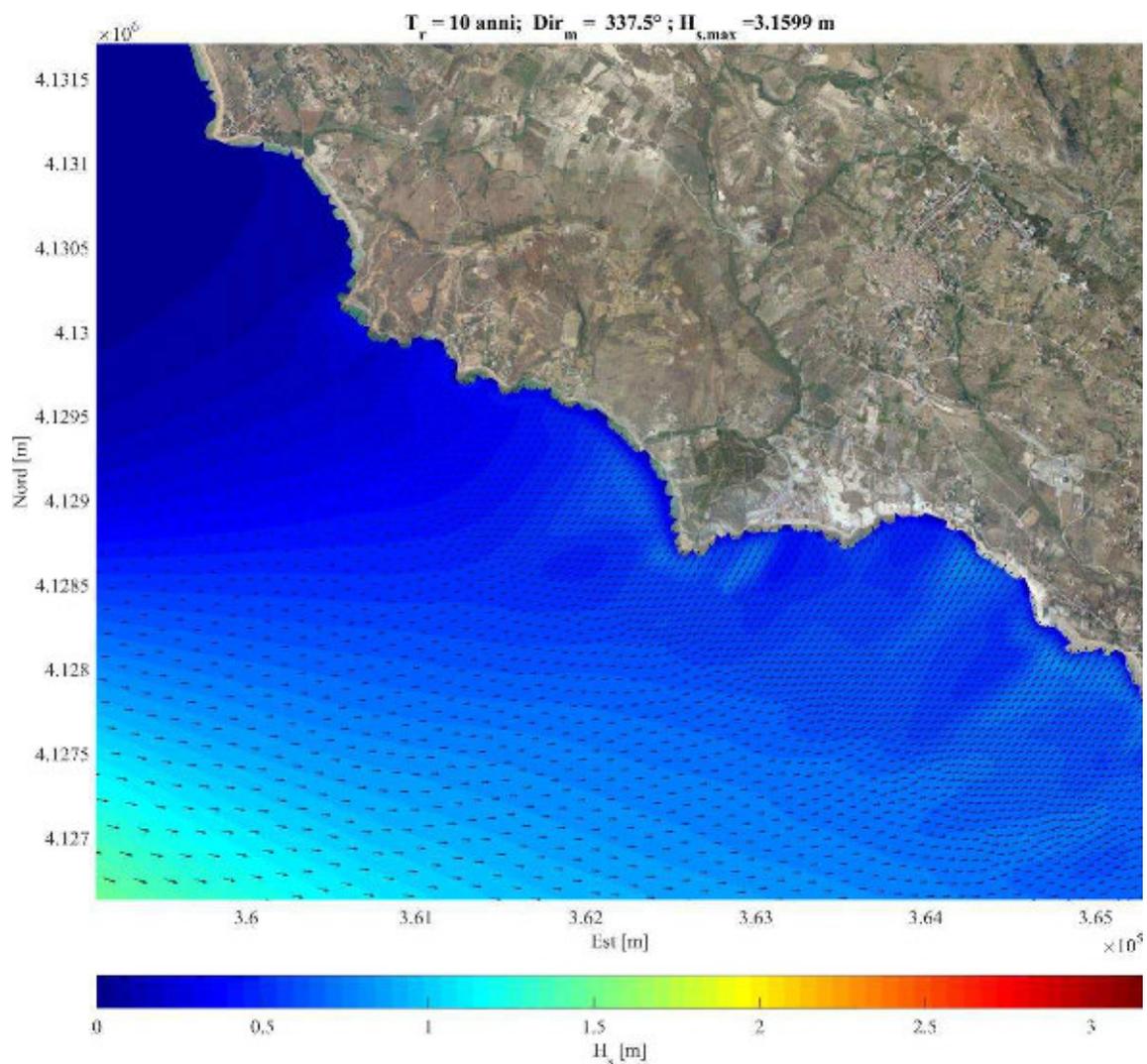


Figura A.80: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $337.5^\circ N$ – $T_r = 10$ anni.

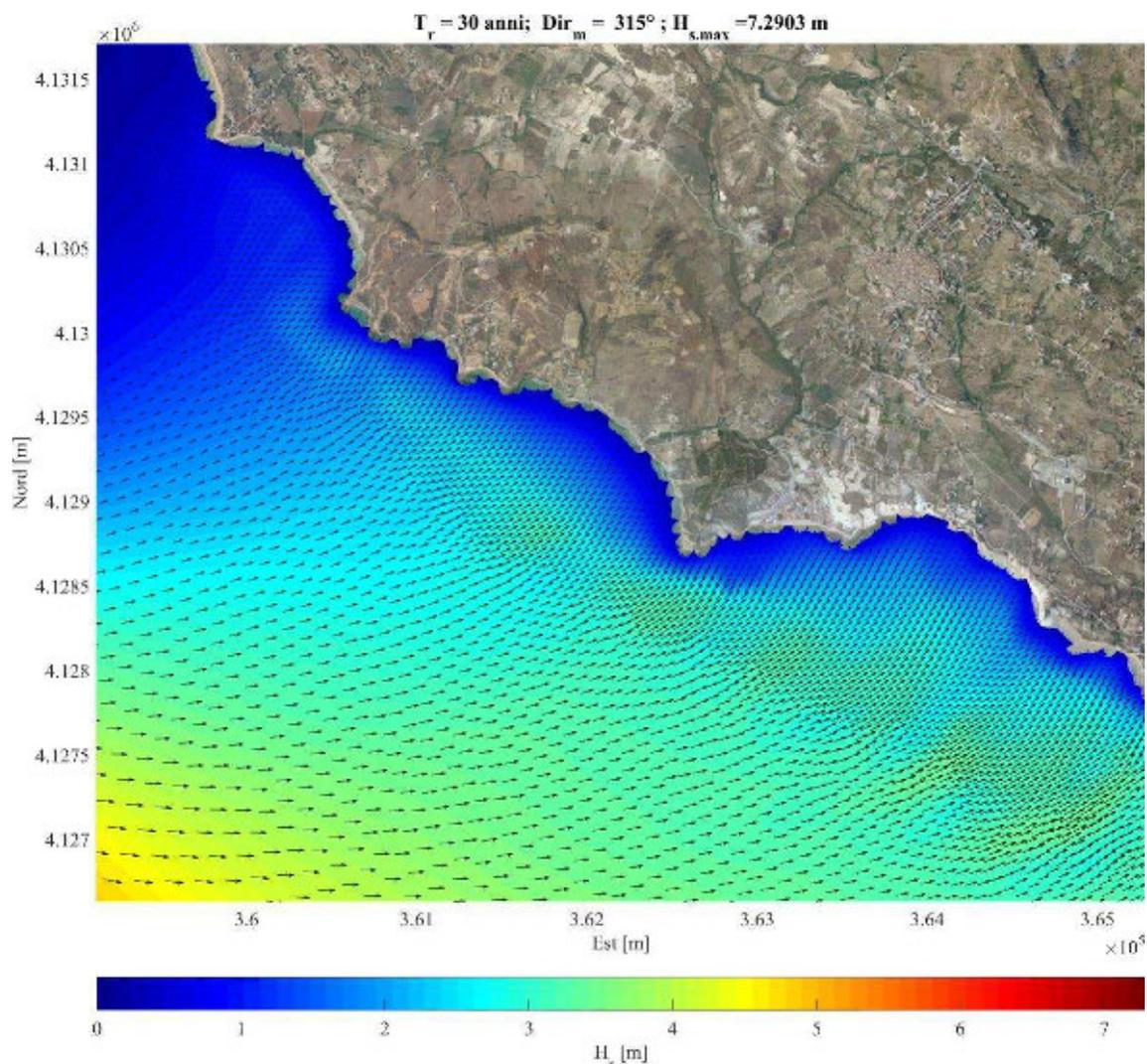


Figura A.81: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $315^\circ N$ – $T_r = 30$ anni.

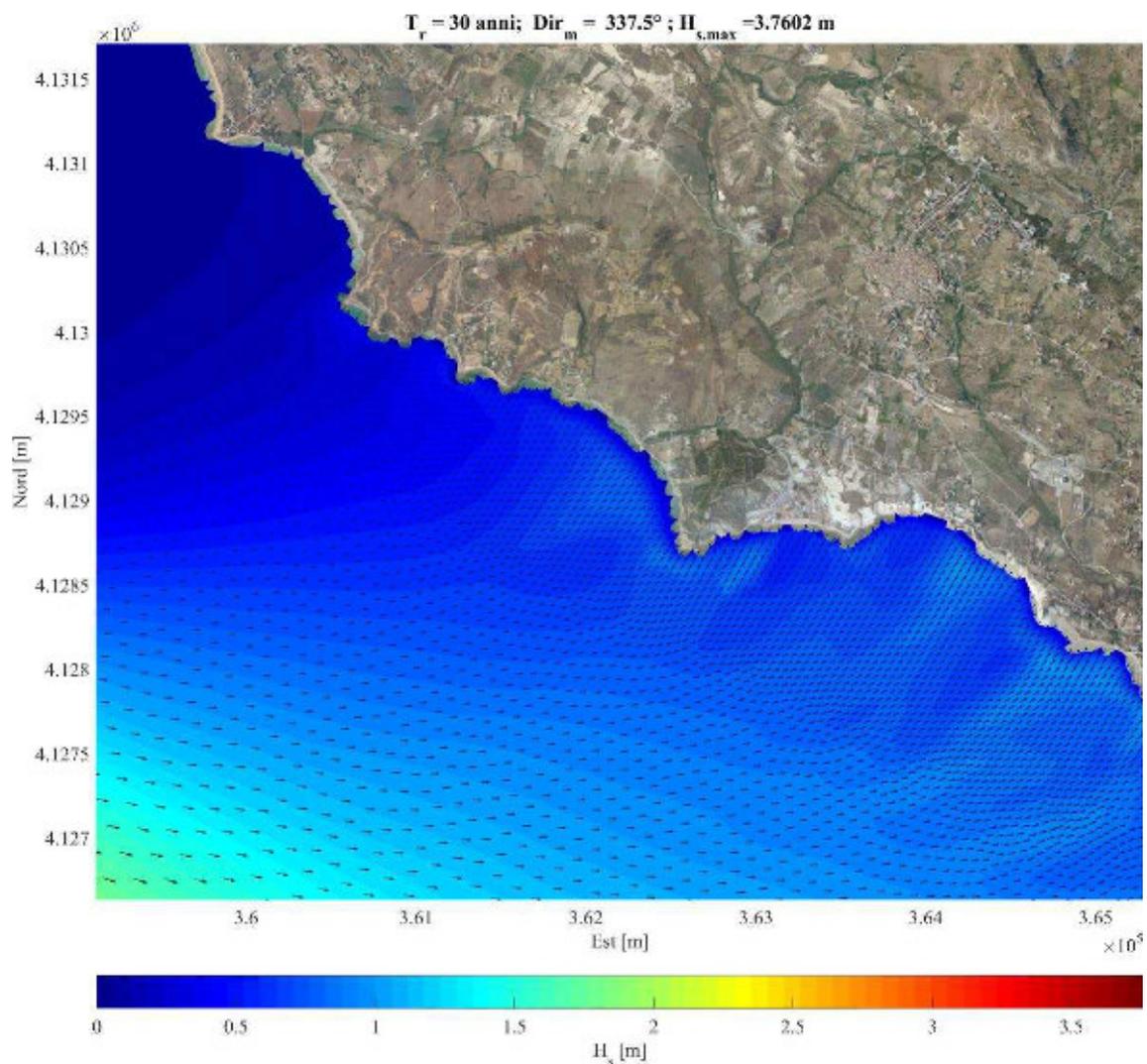


Figura A.82: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $337.5^\circ N$ – $T_r = 30$ anni.

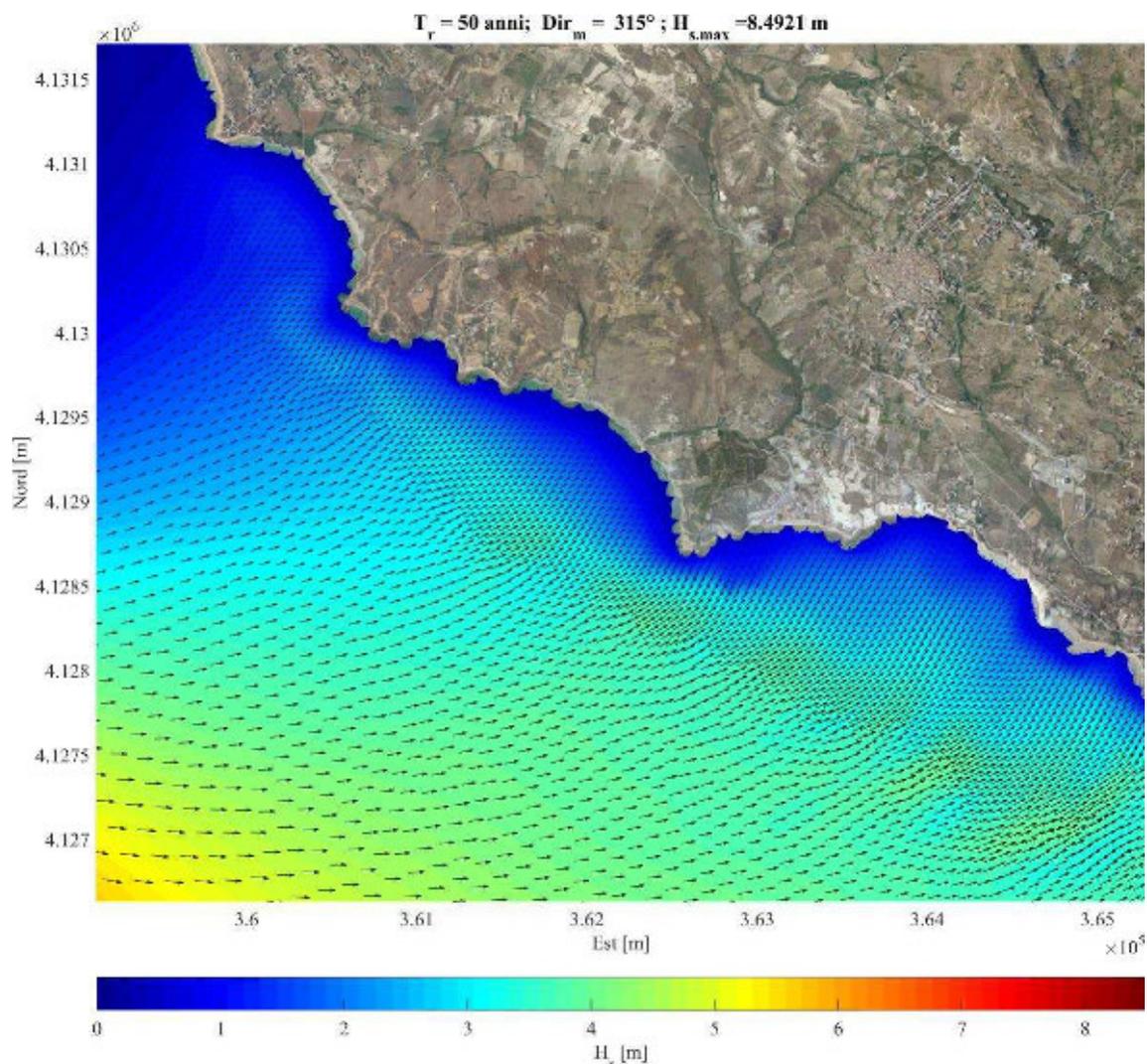


Figura A.83: Propagazione del moto ondoso con modello SWAN: direzione di provenienza al largo $315^\circ N$ – $T_r = 50$ anni.

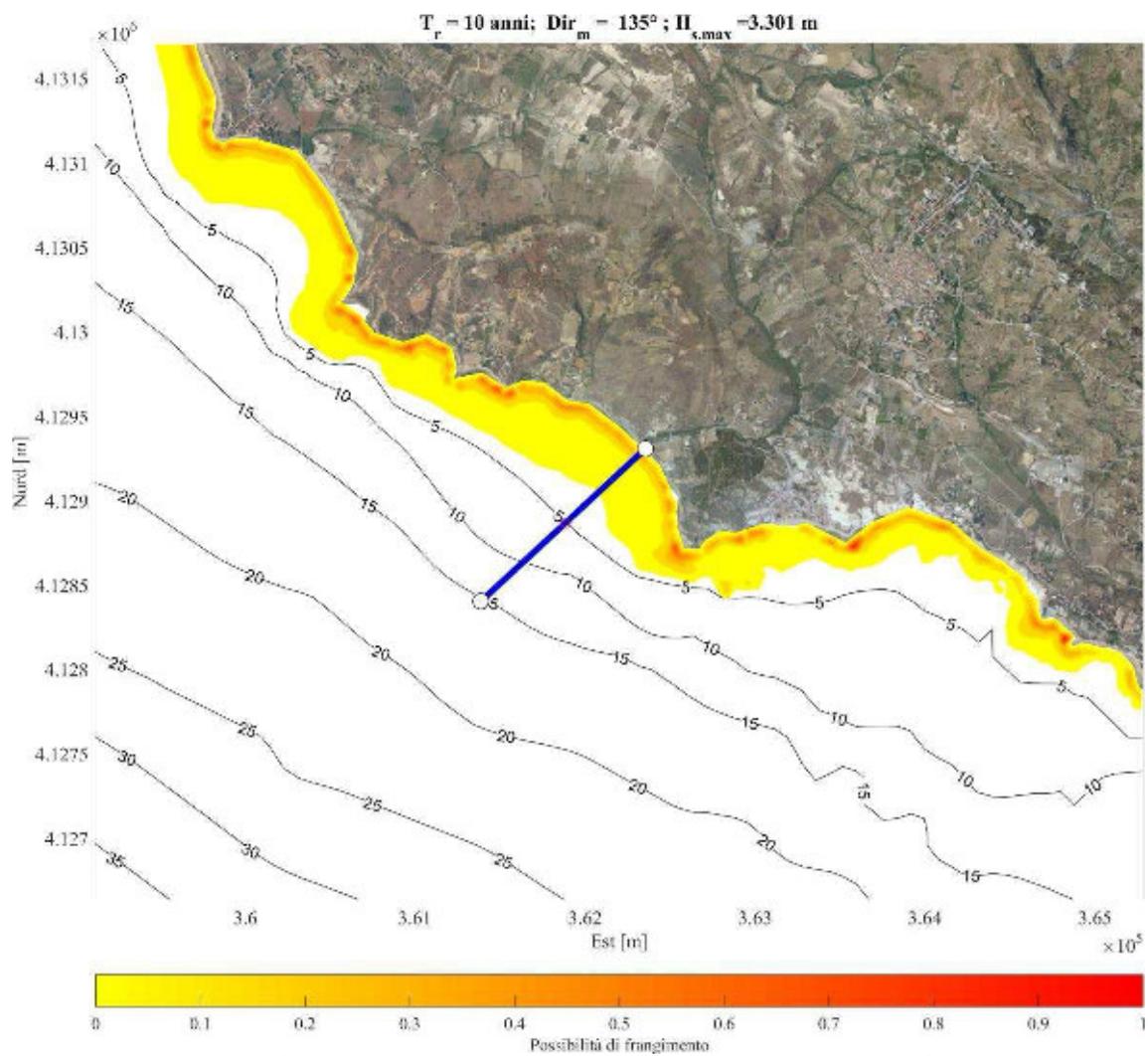


Figura A.84: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

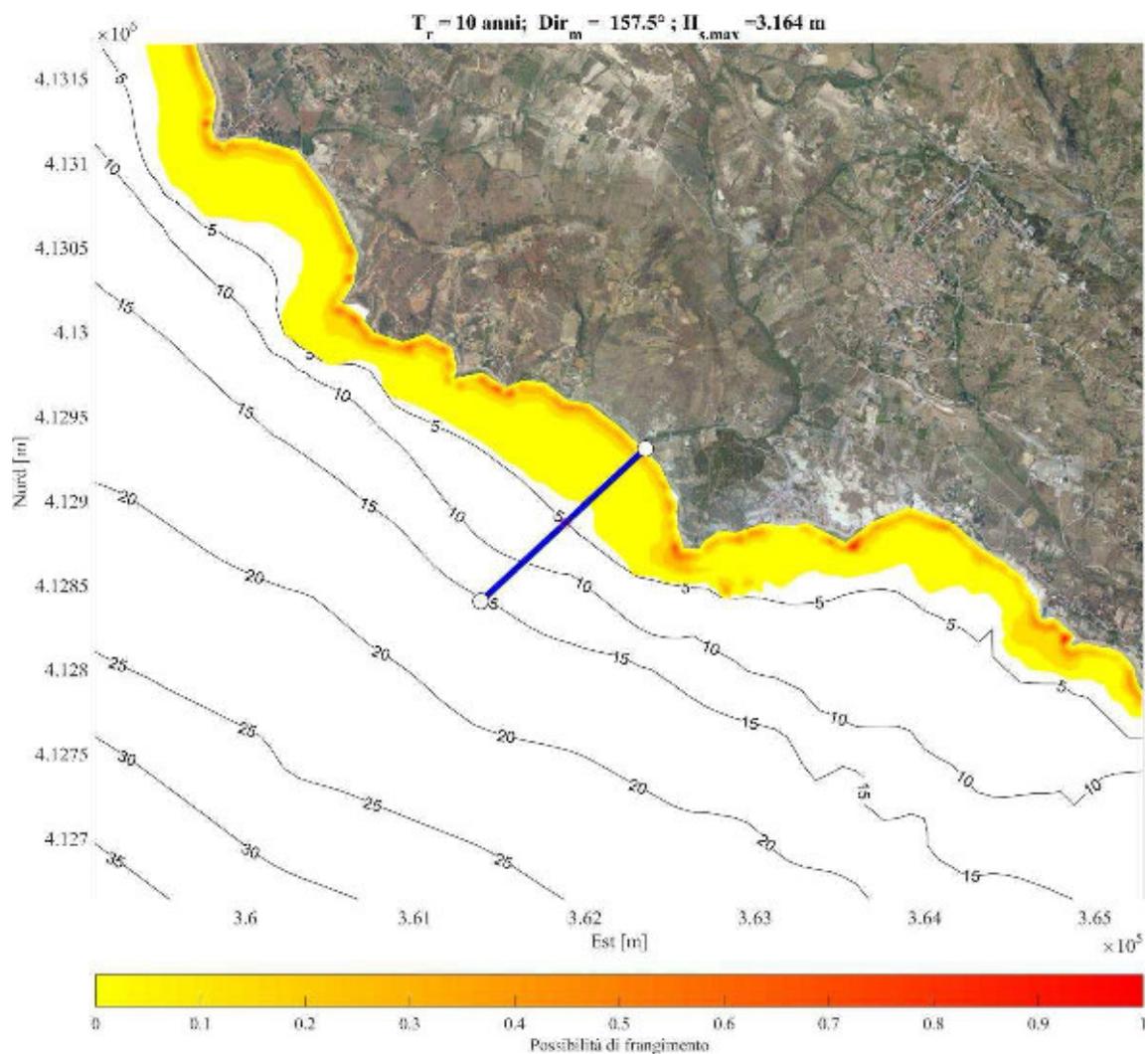


Figura A.85: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

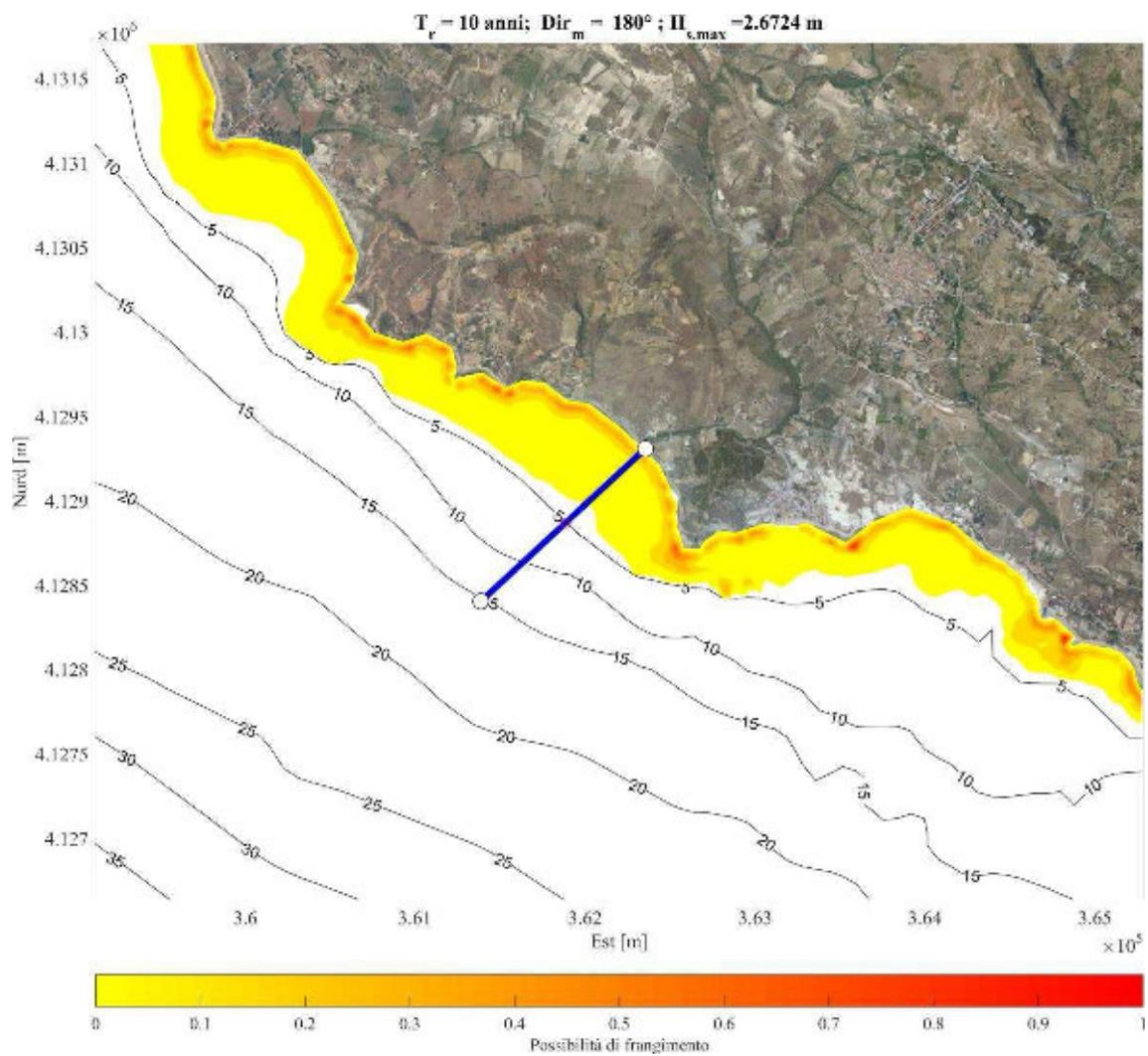


Figura A.86: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

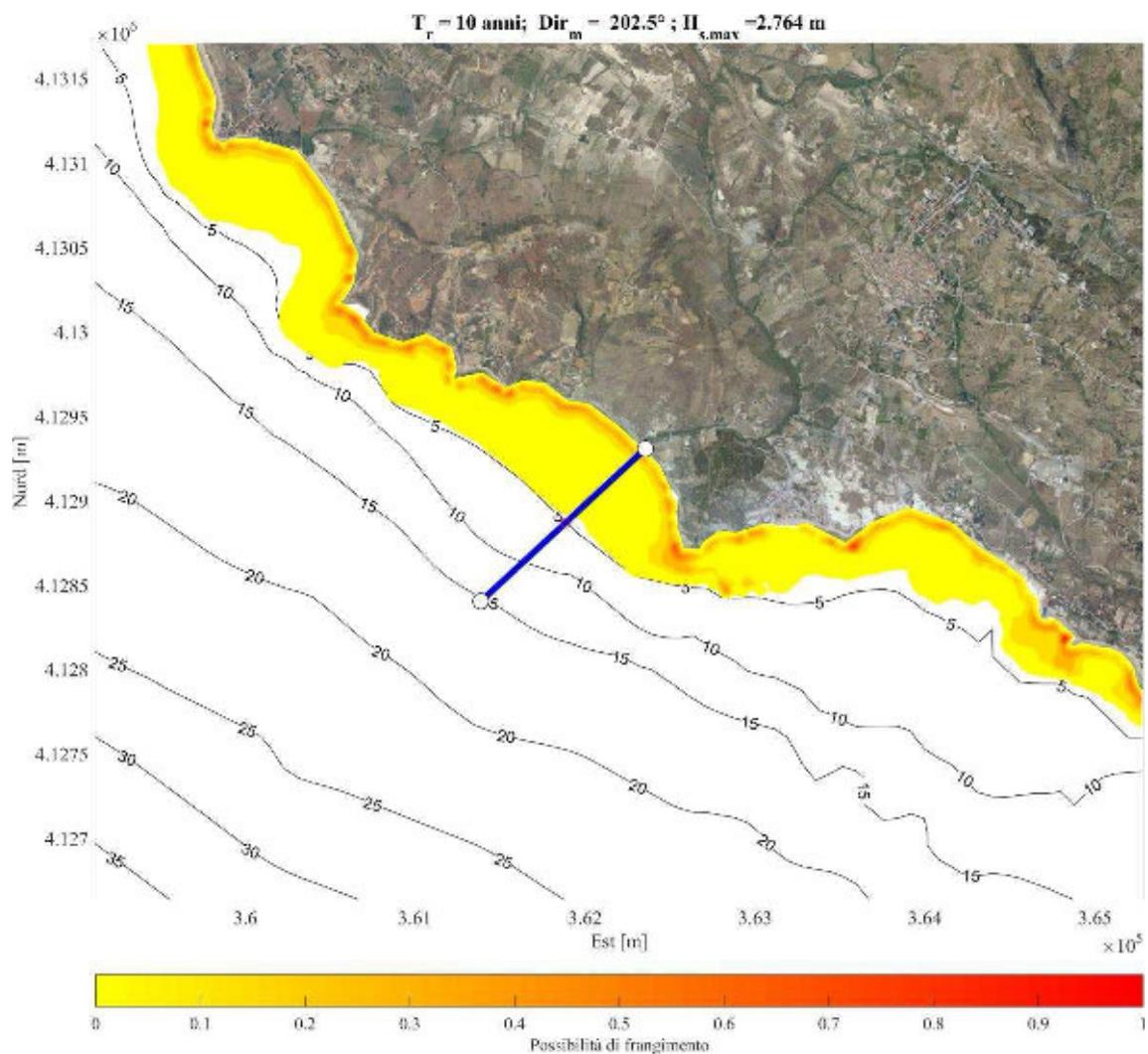


Figura A.87: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

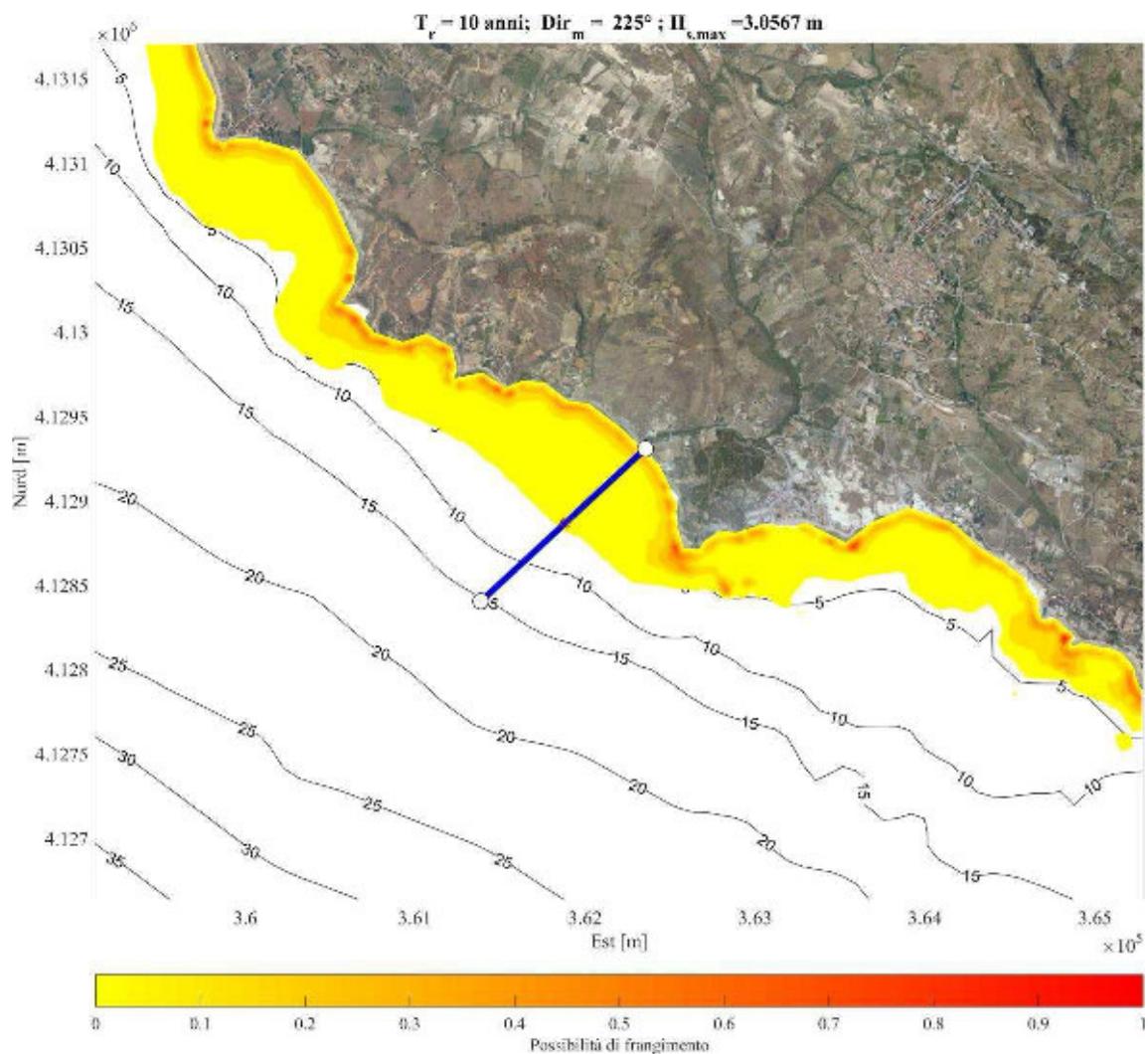


Figura A.88: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

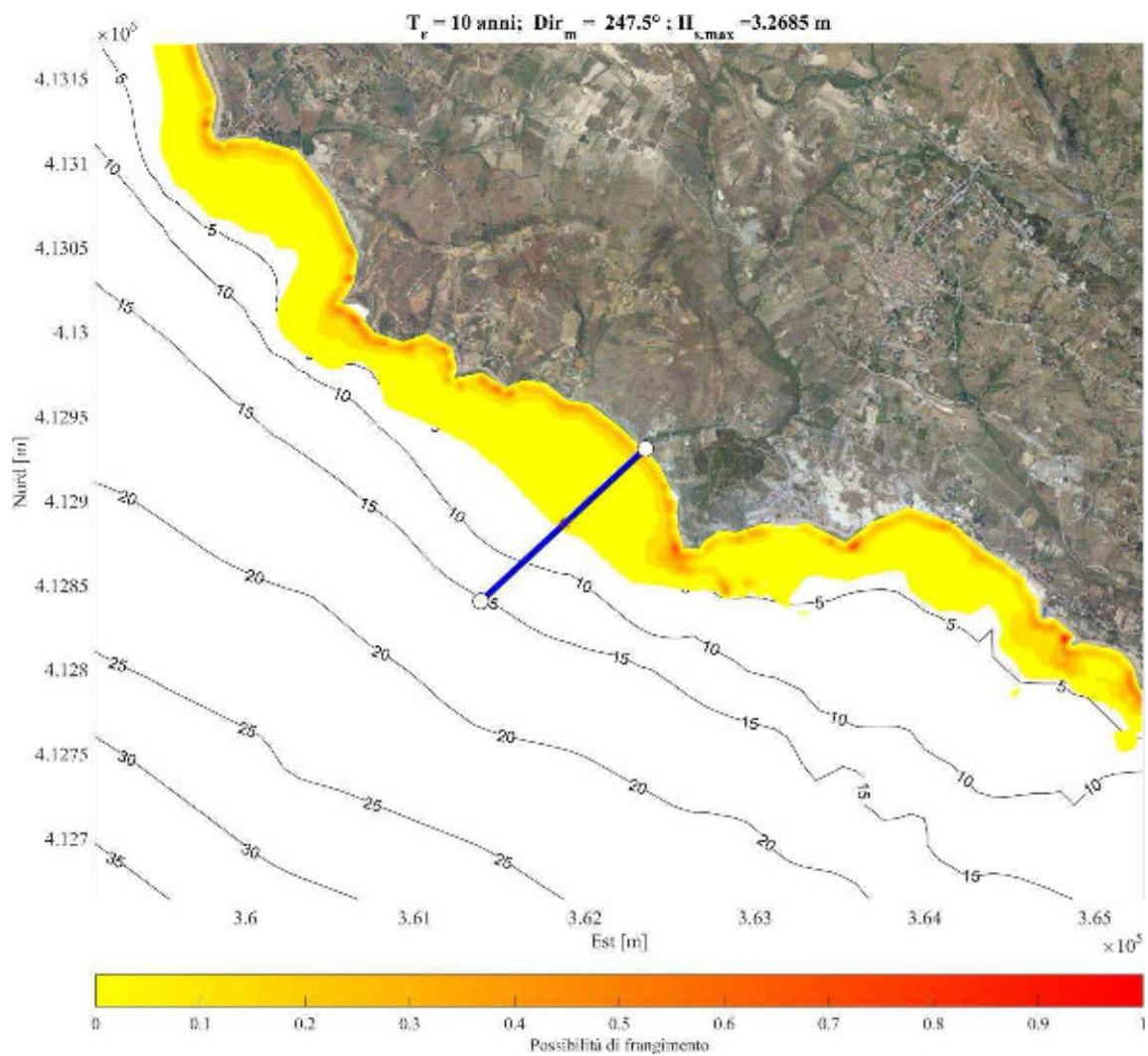


Figura A.89: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

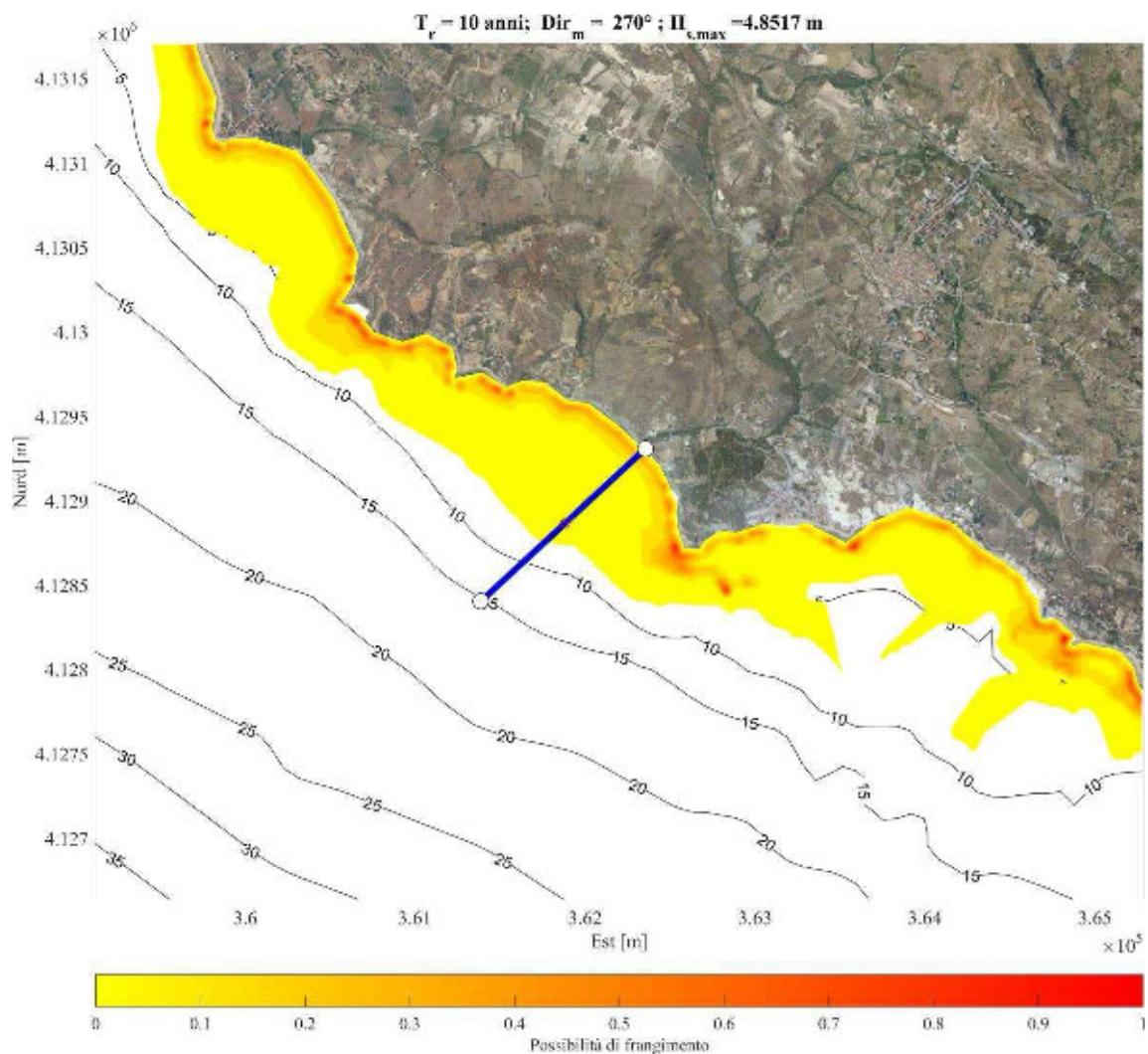


Figura A.90: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

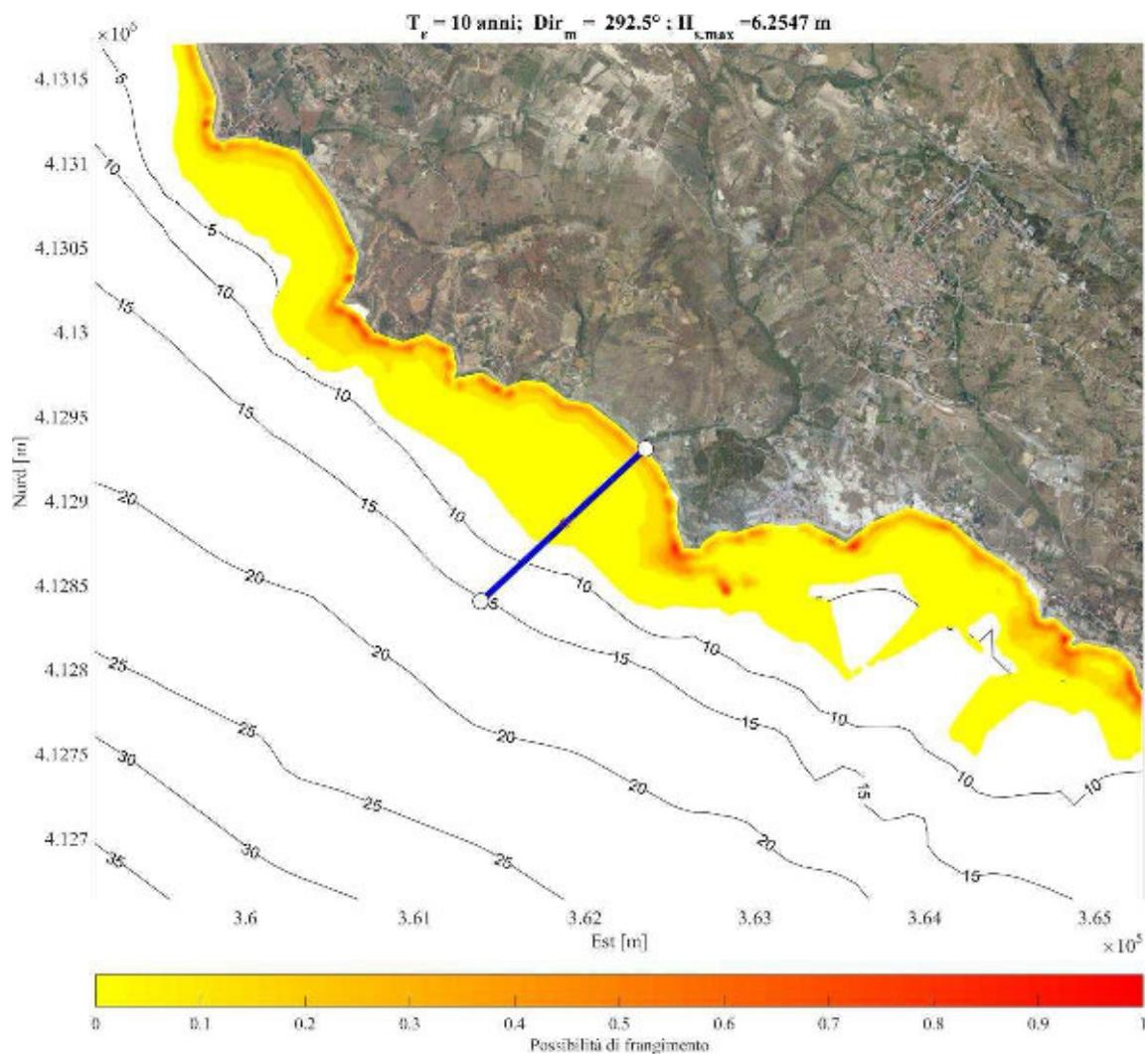


Figura A.91: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.

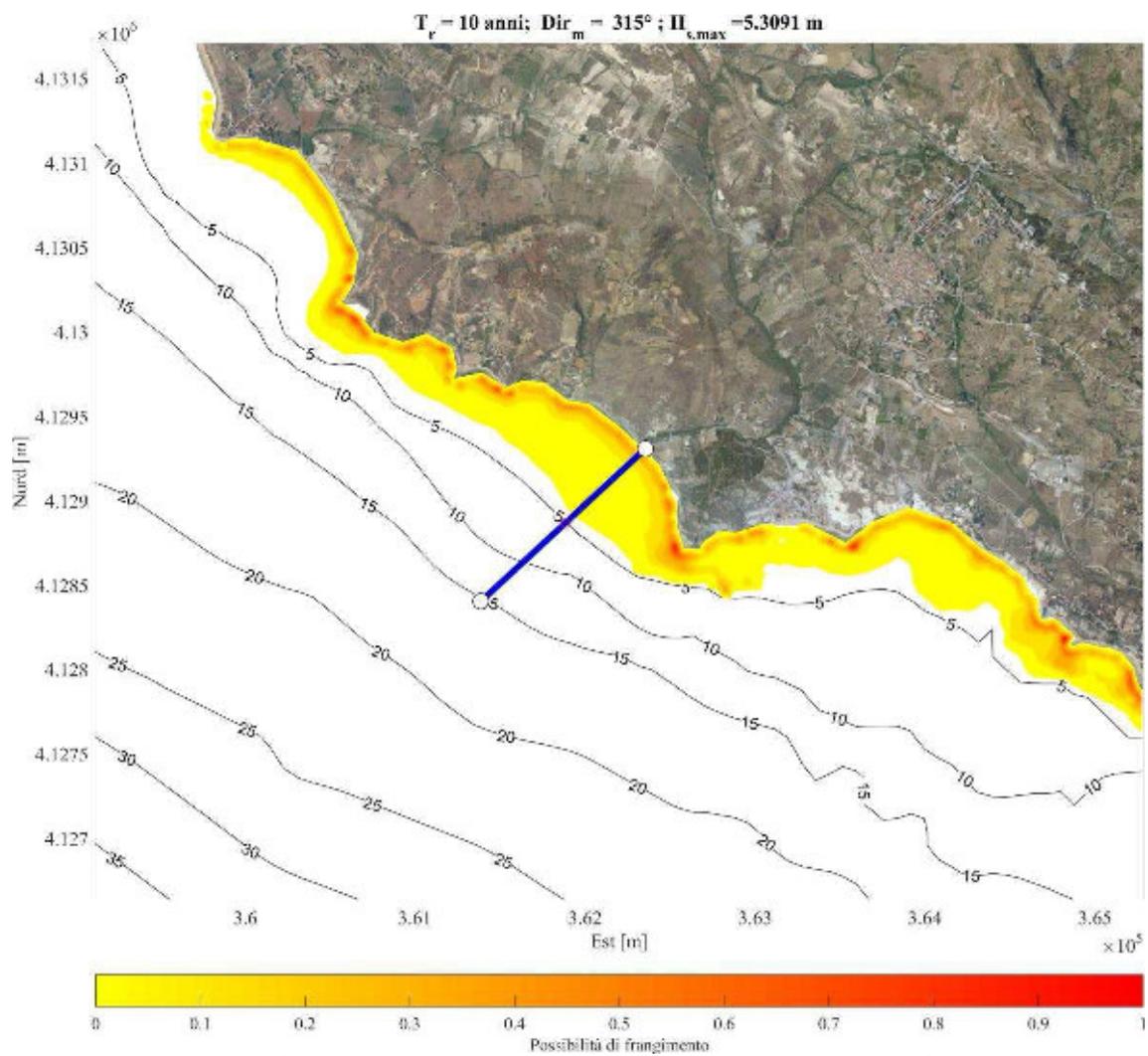


Figura A.92: Zona dei frangenti rappresentata tramite l'indice di possibilità di frangimento, per lo stato di mare con $T_R = 10$ anni e direzione riportata in figura.