


 REGIONE AUTONOMA DE SARDIGNA REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA	
PIANO REGIONALE DELLA RETE DELLA PORTUALITÀ TURISTICA	
	
RELAZIONE GENERALE	
PROGETTAZIONE	COORDINAMENTO SCIENTIFICO
<div style="text-align: center;">  REGIONE AUTONOMA DE SARDIGNA REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA Assessorato dei Lavori Pubblici Assessoradu de sos traballos públicos </div> <p>Direttore generale: Ing. Piero Dau Servizio Infrastrutture di Trasporto e Sicurezza Stradale Direttore del servizio: Ing. Massimiliano Ponti</p> <p>Gruppo di progettazione:</p> <p>Ing. Massimiliano Ponti (Coordinatore del Gruppo di Lavoro) Ing. Massimiliano Mongelli (Responsabile di Progetto) Ing. Stefano Porcu (Responsabile del settore Infrastrutture portuali) Geol. Claudia Dessy Ing. Andrea Nivola</p> <p>Gruppo di lavoro interassessoriale:</p> <p>Ing. Massimiliano Ponti (Coordinatore del Gruppo di Lavoro) - Assessorato dei Lavori Pubblici Ing. Filippo Arras - Assessorato della Difesa dell'Ambiente Dott. Paolo Bertoleoni - Assessorato del Turismo, Artigianato e Commercio Ing. Maria Laura Locci - Assessorato dei Trasporti Ing. Alessandro Manca - Assessorato degli Enti Locali, Finanze e Urbanistica; Direzione generale della pianificazione urbanistica territoriale e della vigilanza edilizia Ing. Massimiliano Mongelli - Assessorato dei Lavori Pubblici Ing. Marco Naseddu - Assessorato della Programmazione, Bilancio, Credito e Assetto del territorio - Centro regionale di Programmazione Ing. Cristina Strinna - Assessorato degli Enti Locali, Finanze e Urbanistica; Direzione generale Enti Locali e Finanze</p>	<div style="text-align: center;">  DICAAR Università degli Studi di Cagliari DICAAR - Dipartimento di Ingegneria civile, Ambientale e Architettura </div> <p>Gruppo di lavoro:</p> <p>Prof. Ing. Italo Meloni Prof. Ing. Nicola Montaldo Prof. Ing. Michele Campagna Dott. Giuliana Caruso Ing. Elisabetta Marta di Cesare Ing. Federica Isola Ing. Federica Leone Dott. Francesco Onorato Perseu Arch. Benedetta Stefania Rubattu Ing. Giovanni Tuveri Ing. Roberto Corona Ing. Serena Sirigu</p>
Allegato 4: Analisi del sistema meteomarinò	Data: Novembre 2023

1 Introduzione

In questo documento è riportato lo studio meteomarinario preliminare, su scala regionale, dei dati climatici a cui le coste della Sardegna sono esposte per determinare le principali macro condizioni, in termini di altezza d'onda e direzione di provenienza del vento. I risultati di questo studio mettono in luce le condizioni meteomarine predominanti sull'Isola e sono risultate utili per evidenziare, con dati ed analisi quantitative, le principali criticità, sottolineando l'urgente necessità di potenziare l'attuale infrastruttura portuale alla luce dello stato attuale del clima meteomarinario ma anche degli effetti del cambiamento climatico in atto.

In tale senso la presente relazione si articola analizzando 1) inizialmente il clima meteomarinario attuale nelle coste della Sardegna, 2) poi i dati storici delle altezze d'onda e della velocità di vento sui quattro quadranti principali per individuazione di eventuali trend climatici, e 3) si forniscono le prime indicazioni e linee guida sulle modalità progettuali da adottarsi per tenere conto del cambiamento climatico futuro. Questo aspetto riveste particolare importanza nell'ottica di adattare le infrastrutture alle condizioni ambientali in evoluzione. Infine, l'elaborato si conclude con le indicazioni per la realizzazione di un efficiente sistema di monitoraggio del moto ondoso lungo le coste della Sardegna, aspetto fondamentale ed ormai non più procrastinabile.

2 Clima meteomarinò nelle coste della Sardegna

In tutte le applicazioni di ingegneria marittima e costiera è necessario definire preliminarmente le condizioni di “esposizione” del sito di interesse rispetto a vento, moto ondoso e ad altre componenti meteomarine. Per analizzare al meglio le differenze che si riscontrano nelle coste dell’Isola, si è suddivisa la Sardegna in 4 quadranti: il Quadrante Nord Est (NE)- Olbia Tempio e Nuoro; il Quadrante Nord Ovest NO- Sassari; il Quadrante SUD Est (SE)- Cagliari e Ogliastra; il Quadrante SUD Ovest (SO)- Oristano, Carbonia Iglesias e Medio Campidano (Figura 1).

In tale prima analisi, si sono acquisite le informazioni meteomarine della banca dati messa a disposizione dal programma di osservazione della Terra dell’Unione europea Copernicus, dedicato a monitorare il nostro pianeta e il suo ambiente. Il programma è coordinato e gestito dalla Commissione europea ed è attuato in collaborazione con gli Stati membri, l’Agenzia spaziale europea (ESA), l’Organizzazione europea per l’esercizio dei satelliti meteorologici (EUMETSAT), il Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (CEPMMT), le agenzie dell’UE e Mercator Océan.

Sono stati utilizzati in particolare i dati di ERA5, che fa parte del programma di monitoraggio della terra dell’Unione europea e implementato da ECMWF. Il set di dati ERA5 è una rianalisi di condizioni meteorologiche orarie che risalgono al 1950. ERA5 viene aggiornato quotidianamente con una latenza di circa 5 giorni. I dati sono stati registrati in una griglia latitudine -longitudine regolare ogni 0.5°. Per quanto concerne lo studio, sono stati utilizzati i dati con latitudine compresa tra 7° e 10° e longitudine compresa tra 38° e 42°.

Sono stati in particolare utilizzati i seguenti dati:

- **Direzione media dell'onda**, questo parametro è la direzione media delle onde superficiale dell'oceano/mare. Il campo d'onda della superficie oceanica/marina è costituito da una combinazione di onde con diverse altezze, lunghezze e direzioni (noto come spettro d'onda bidimensionale). Questo parametro è una media su tutte le frequenze e direzioni dello spettro d'onda bidimensionale.
- **Altezza significativa delle onde del vento combinate e del moto ondoso**, questo parametro rappresenta l'altezza media della terza parte più alta delle onde oceaniche/marine di superficie generate dal vento e dal moto ondoso. Rappresenta la distanza verticale tra la cresta dell'onda e l'avvallamento dell'onda. Attraverso l'utilizzo dei dati di ERA5, per ogni quadrante della Sardegna sono state individuate diverse celle, in cui in ognuna di esse è stata calcolata l'altezza d'onda e la relativa provenienza e la relativa rosa dei venti (Figura 1). Di seguito, si riportano i risultati delle analisi per ciascuno dei quattro settori individuati.

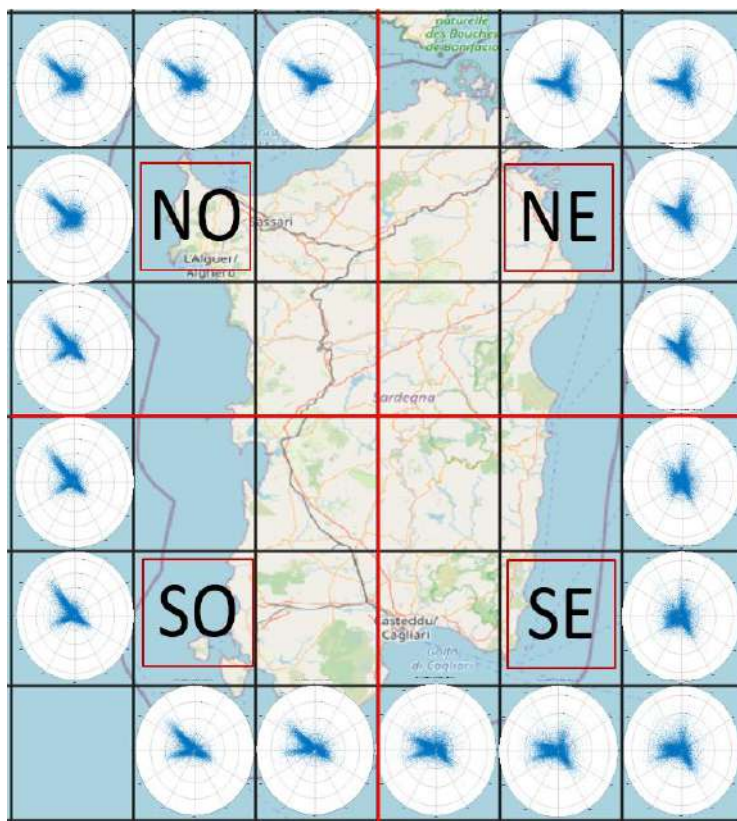


Figura 1: Quadranti interessati dalle analisi dell'altezza d'onda per la Regione Sardegna.

QUADRANTE Nord-Est

Il quadrante NE, interessa l'area compresa dalle province di Olbia Tempio e Nuoro. Per tale settore, sono disponibili i dati di quattro celle del database ERA5. Su ciascuna delle celle analizzate la direzione d'onda prevalente è quella proveniente da Nord, cioè dalla direzione di Tramontana. Inoltre, è emersa anche una componente d'onde con direzione di provenienza ovest, che arriva quindi dalle Bocche di Bonifacio (Figura 2).

QUADRANTE Sud-Est

Il quadrante SE, comprende le province di Cagliari e l'Ogliastra. La direzione d'onda prevalente sulle 5 celle per le quali sono stati analizzati i dati, è quella proveniente da sud-est, quindi la direzione del vento di Scirocco. Emerge nota anche che una quota parte delle onde provenienti da sud-ovest, direzione del vento di libeccio (Figura 2).

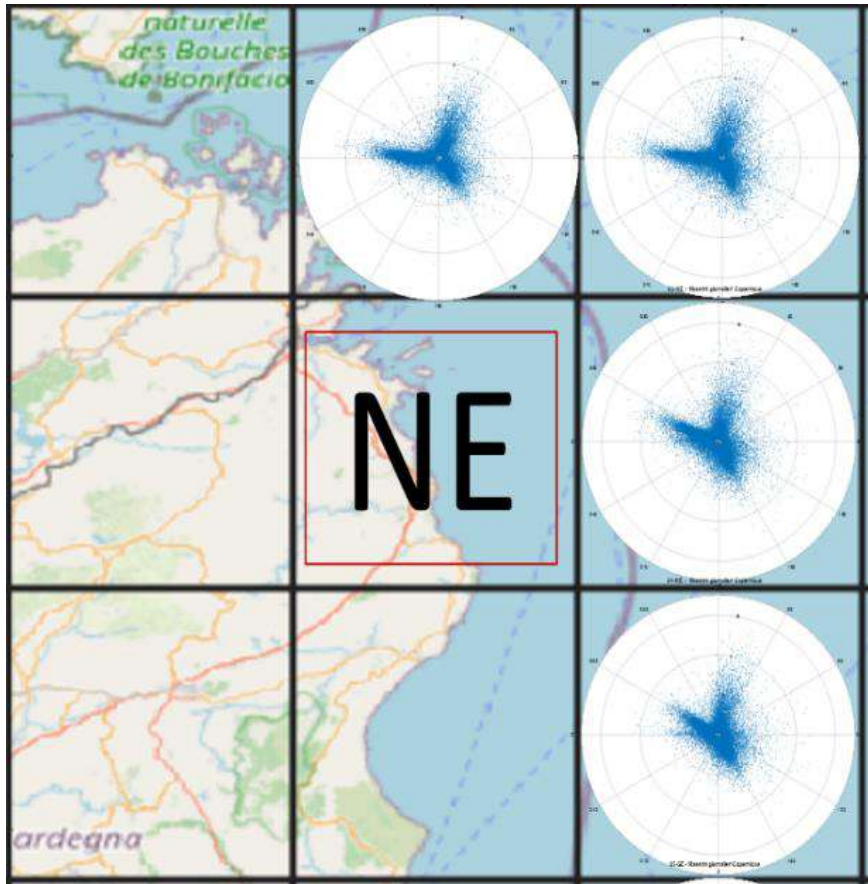


Figura 2: Quadranti Nord Est.

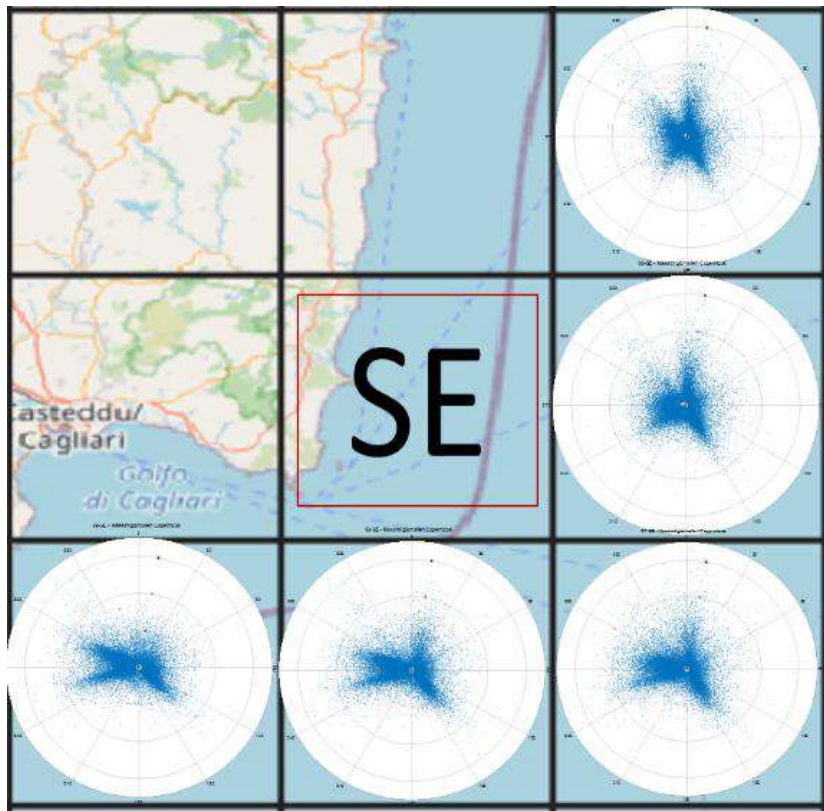


Figura 3: Quadranti Sud Est.

QUADRANTE Sud-Ovest

Nel quadrante SO, ricadono le province di Oristano, e quella di Carbonia-Iglesias. La direzione d'onda prevalente coincide con quella del vento di Maestrale per la provincia di Oristano, mentre per quella di Carbonia, oltre ad una buona componente del moto ondoso generata dal vento di maestrale, assumono notevole importanza anche le onde provenienti da Sud-Ovest, cioè quelle generate dai venti di libeccio (Figura 2).

QUADRANTE Nord-Ovest

Nel quadrante NO, che comprende la provincia di Sassari, la direzione d'onda prevalente è quella proveniente da Nord-ovest, cioè dalla direzione del vento di maestrale. Possiamo notare che la direzione di provenienza delle onde è ben definita, soprattutto nella parte più a nord dell'Isola (Figura 2).

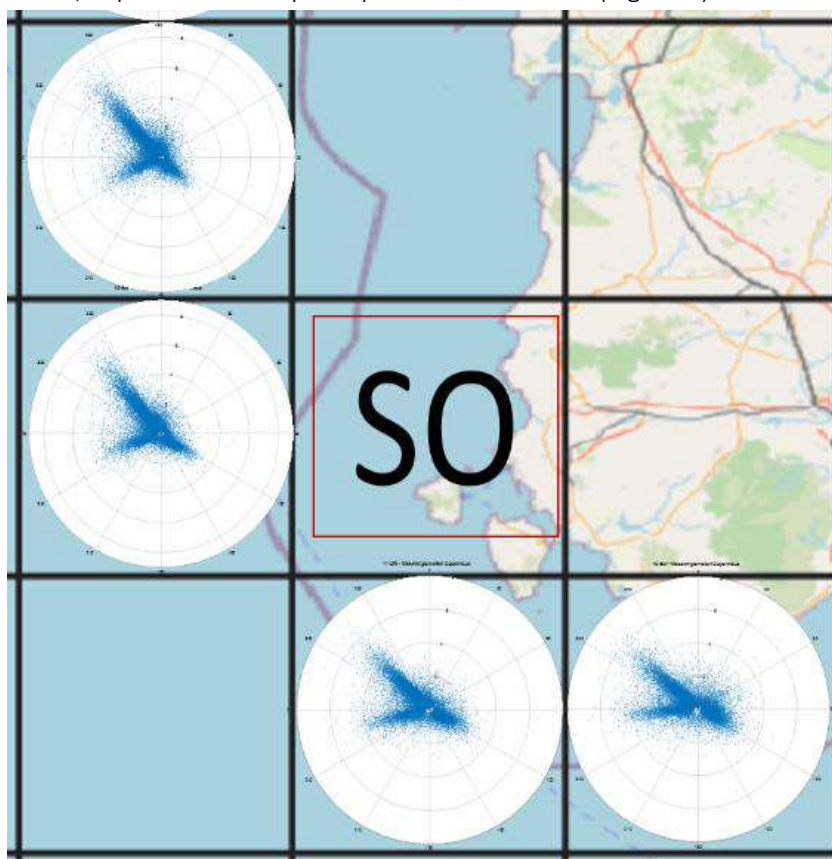


Figura 4: Quadranti Sud Ovest.

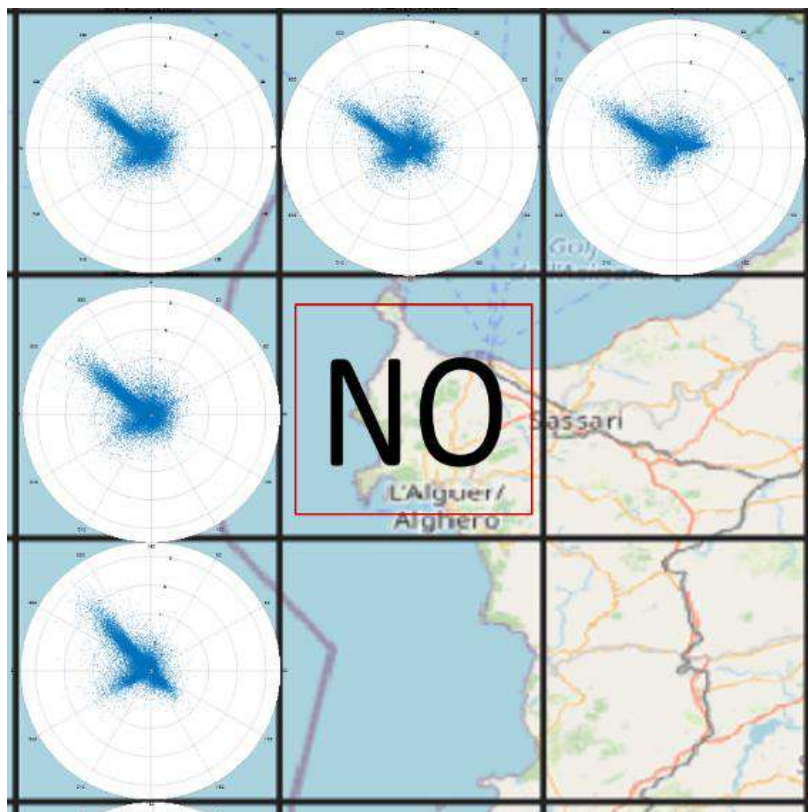


Figura 5: Quadranti Nord Ovest

2.1 Considerazioni riassuntive

L'analisi direzionale dell'onda prevalente ha evidenziato che tutti i quadranti dell'Isola sono soggetti a direzioni d'onda ben definite, principalmente influenzate dall'esposizione specifica del quadrante al vento dominante. Questo sottolinea l'importanza di strutture portuali adeguate per garantire la sicurezza della navigazione in diverse condizioni climatiche.

Attualmente, le strutture portuali in Sardegna sono concentrate principalmente nel quadrante NORD-EST, mentre negli altri quadranti sono assenti o insufficienti. La costa occidentale è soggetta sia a forti venti di maestrale che a quelli di libeccio, con valori di altezze d'onda sicuramente superiori rispetto a quelli nelle altre coste dell'isola. Si evidenzia, per esempio, la mancanza di approdi o porti rifugio lungo la costa Nord-Ovest, esposta ai forti venti di maestrale. Analoghe considerazioni per la costa occidentale, soggetta ai forti venti di scirocco e grecale, che grazie al significativo fetch marittimo, determinano su tali coste rilevanti mareggiate. In questa situazione, la navigazione diventa potenzialmente pericolosa, poiché un'imbarcazione che si trovasse in mezzo a una tempesta non avrebbe possibilità di ripararsi in zone prive di strutture portuali adeguate.

In considerazione di ciò, risulta essenziale implementare infrastrutture portuali lungo tutte le coste dell'Isola che ne sono sprovviste, al fine di garantire un ambiente sicuro e protetto per la navigazione in tutte le condizioni climatiche.

3 Analisi dati storici altezze d'onda e velocità di vento sui quattro quadranti principali per individuazione trend climatici

In questo capitolo sono esposti i risultati delle analisi temporali svolte sulle altezze d'onda e le velocità del vento ottenute sui quattro principali settori con cui è stata suddivisa la Sardegna. L'obiettivo è quello di verificare l'esistenza di eventuali trend climatici che possano evidenziare un fenomeno di aumento del rischio in atto, così come preannunciato dal cambiamento climatico.

Vista la delicatezza di tale analisi e la necessità di utilizzare dati di dettaglio e da diverse fonti, si sono utilizzati sia dati ondametrici che di vento. In particolare, per i dati ondametrici si sono utilizzati due database principali:

- Serie di dati storici registrati nelle boe ondametriche poste al largo del territorio Nazionale;
- Serie di dati ricostruiti attraverso dati di vento, dalle carte bariche, dai rilevamenti da satellite, o da modelli di rianalisi delle serie a grande scala.

Per quanto riguarda la prima categoria di dati, ovvero le serie storiche registrate delle boe ondametriche, le registrazioni dei dati in Italia è ricavata e realizzata dal sistema di rilevamento della Rete Ondametrica Nazionale, abbreviato come RON. La RON è operativa dal 1989, dapprima gestita dal vecchio Servizio idrografico e mareografico italiano del Ministero dei Lavori Pubblici e attualmente dall' ISPRA, Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale. Nel 2000 la rete era costituita addirittura da 15 boe (Alghero, Siniscola e Cagliari per la Sardegna), mentre oggi restano soltanto sette boe distribuite in aree di intensa attività ondosa dei mari italiani (solo Alghero per la Sardegna).

I dati relativi al vento utilizzati nelle analisi sono di due tipi:

- Serie di dati storici registrati nelle diverse tipologie di stazioni sul territorio Nazionale;
- Serie di dati ricostruiti attraverso modelli di analisi di dati.

Sono risultate relativamente estese e valide le serie storiche dei dati di vento registrati negli aeroporti di Elmas, utilizzati quindi per la zona Sud-Est, e i dati delle serie storiche dell'aeroporto di Fertilia, utilizzabili per la Zona Nord-Ovest.

Per le altre due zone non sono state ricavate serie storiche abbastanza estese da poter essere utilizzare.

Di seguito si riportano i risultati per ciascuna delle zone principali esaminate.

3.1 Zona Nord – Ovest

Nella zona Nord – Ovest, sono stati utilizzati 3 dataset di onde, e un dataset di dati anemometrici. I punti di stazione sono georeferenziati e associati ad una specifica latitudine e longitudine, le informazioni geografiche dei punti di dati vengono inserite in Tabella 1, dove sono anche indicati i nomi e le sigle con cui sono stati rinominati i punti dei dataset.

<i>Nome</i>	<i>Longitudine</i>	<i>Latitudine</i>
<i>OCC3</i>	<i>7.5</i>	<i>41.0</i>
<i>OCC4</i>	<i>7.5</i>	<i>40.5</i>
<i>Boa AHO Copernicus</i>	<i>8.0</i>	<i>40.5</i>
<i>Aeroporto AHO</i>	<i>8.29</i>	<i>40.63</i>

Tabella 1, coordinate punti zona Nord-Ovest.

In Figura 6 viene inserita la mappa di inquadramento della Zona Nord – Ovest, dove è possibile individuare le stazioni dei dati.

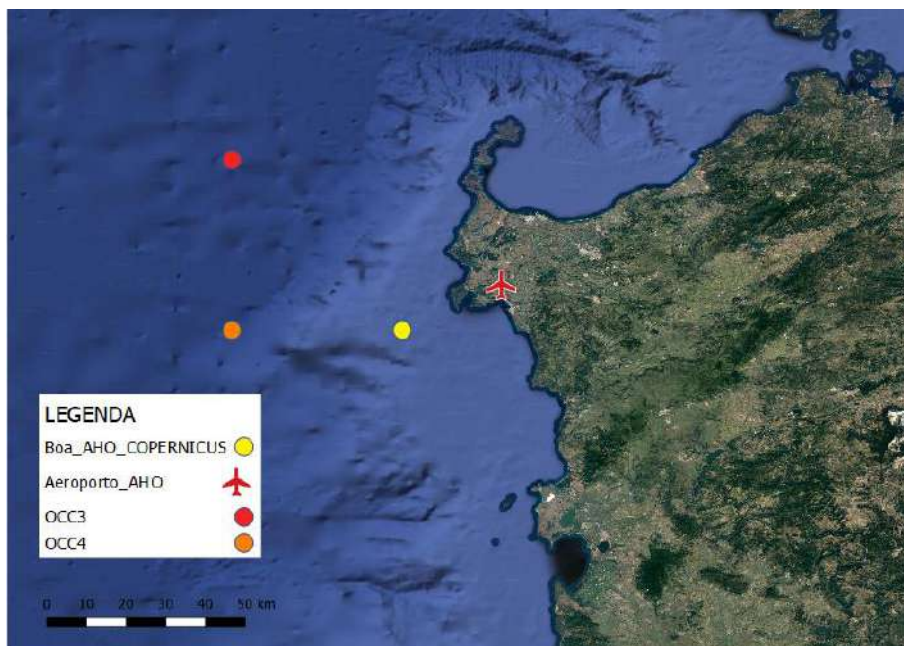


Figura 6, mappa inquadramento Zona Nord - Ovest.

Vengono nel seguito inseriti i diversi grafici elaborati ed analizzati, indicando quali siano le osservazioni da evidenziare.

In Figura 7 viene inserito il grafico delle altezze d'onda massime annuali provenienti da direzione maestrale relativo alla cella rinominata Boa_AHO_COPERNICUS, le cui coordinate sono note nella tabella precedentemente indicata, ed i cui dati sono stati opportunamente verificati e calibrati con i dati osservati nella boa ondometrica di Alghero, la cui estensione è però limitata.

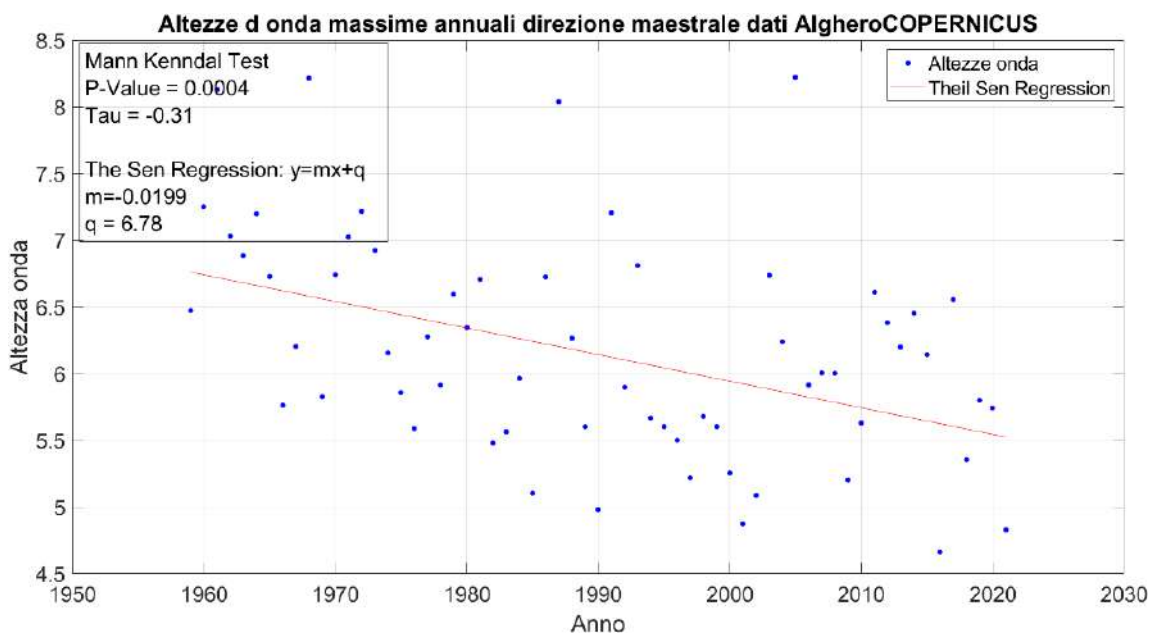


Figura 7, grafico delle altezze d'onda massime annuali in direzione maestrale Cella AHO_COPERNICUS.

Il grafico delle altezze d'onda mostra un trend negativo significativo, come confermato dal valore di τ di Mann Kendall pari a -0.31, e da un coefficiente angolare della retta di regressione negativo. Le altezze d'onda difatti partono da valori attorno ai 7.00 metri nel 1959 arrivando a valori attorno ai 5.00 metri negli ultimi anni del 2020.

In Figura 8 è riportato il grafico della percentuale di giorni di maestrale in un anno, relativo alla cella rinominata AHO Alghero le cui coordinate sono note nella Tabella 1.

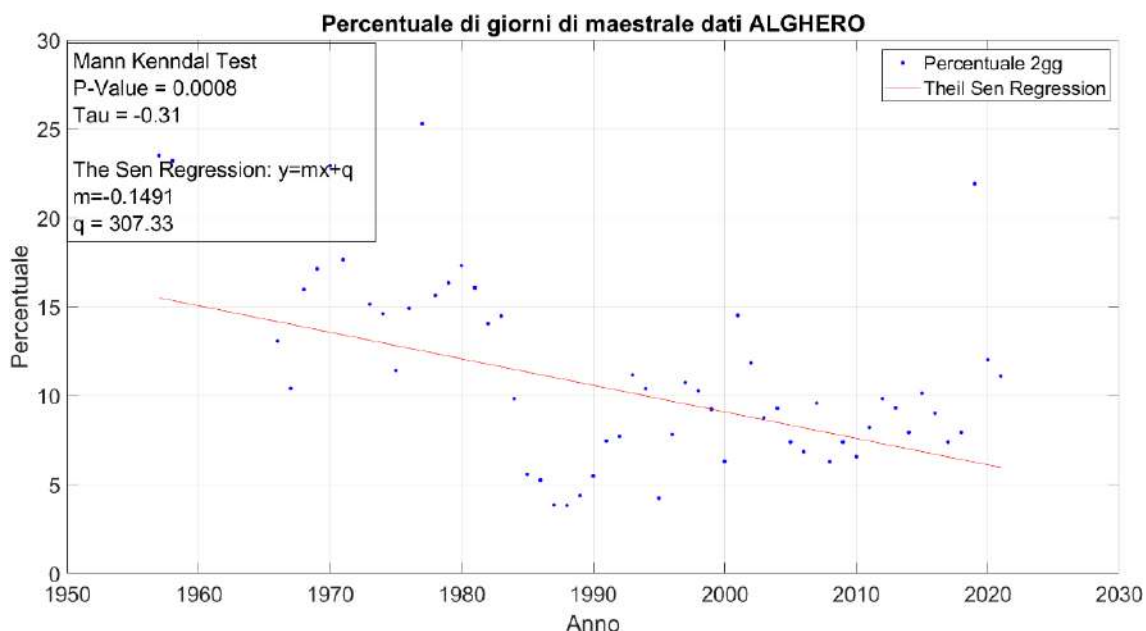


Figura 8, grafico percentuale di giorni di maestrale Stazione Alghero.

Il grafico della percentuale di giorni di maestrale in un anno mostra un trend ancora negativo, come confermato dal valore di τ di Mann Kendall pari a -0.31, e da un coefficiente angolare della retta di

regressione negativo. La percentuale difatti parte da valori attorno ai 15% nel 1958 arrivando a valori attorno al 5% negli ultimi anni del 2020.

In Figura 9 viene inserito il grafico della percentuale di eventi con almeno 2 giorni consecutivi di maestrale, relativo alla cella rinominata AHO Alghero le cui coordinate sono note nella tabella precedentemente indicata.

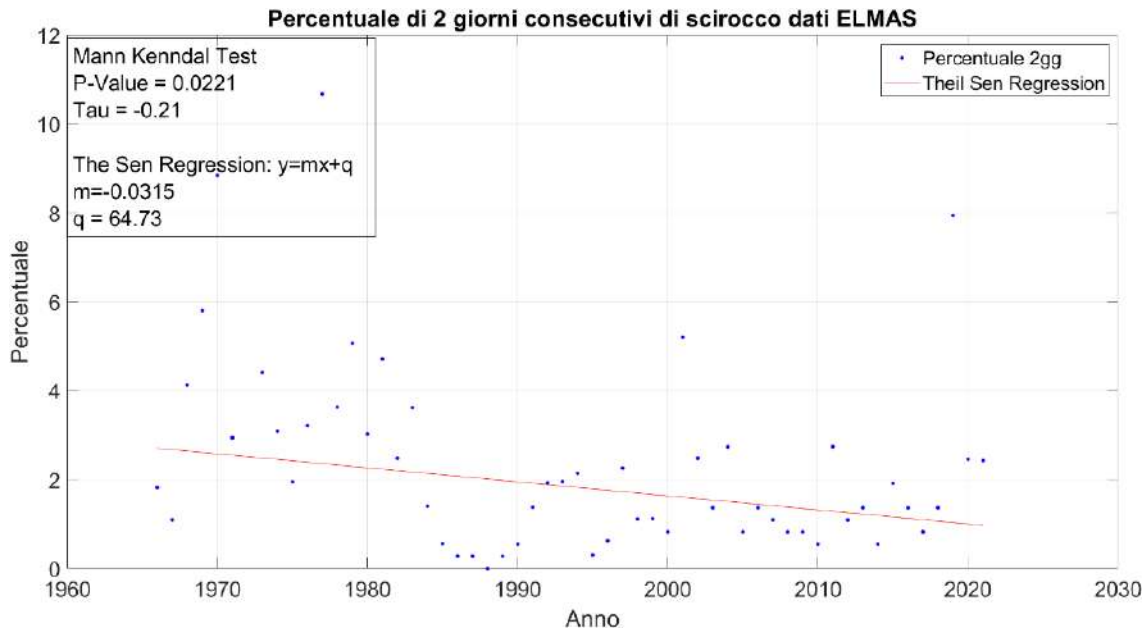


Figura 9, il grafico della percentuale di eventi con almeno 2 giorni consecutivi di maestrale Stazione Alghero.

Il grafico che rappresenta la percentuale di eventi con almeno 2 giorni consecutivi di maestrale evidenzia un trend negativo, confermato da un valore di τ di Mann Kendall pari a -0.21 e da un coefficiente angolare della retta di regressione negativo

3.2 Zona Nord – Est

Nella zona Nord – Est, è stato utilizzato un solo dataset di onde. In Figura 10 viene inserita la mappa di inquadramento della Zona Nord – Est, dove è possibile individuare le stazioni dei dati.

Nome	Longitudine	Latitudine
Boa_OLB_COPERNICUS	10	41

Tabella 2, coordinate punti zona Nord-Est.

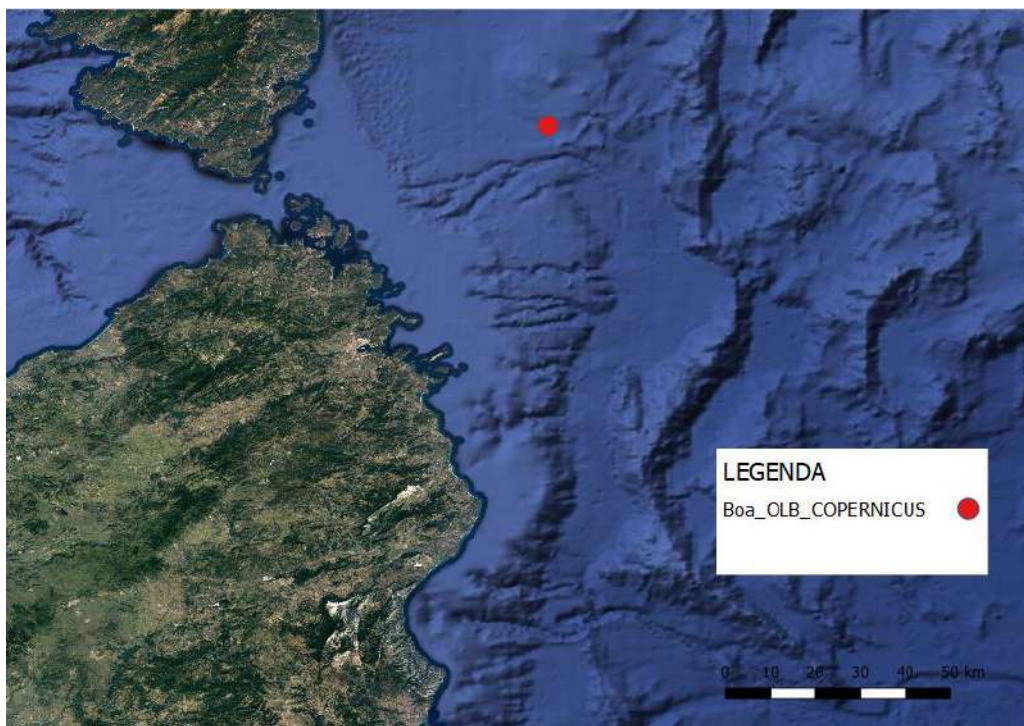


Figura 10, mappa inquadramento Zona Nord - Est.

In Figura 11 viene inserito il grafico delle altezze d'onda massime annuali provenienti da direzione grecale relativo alla cella rinominata Boa_OLB_COPERNICUS.

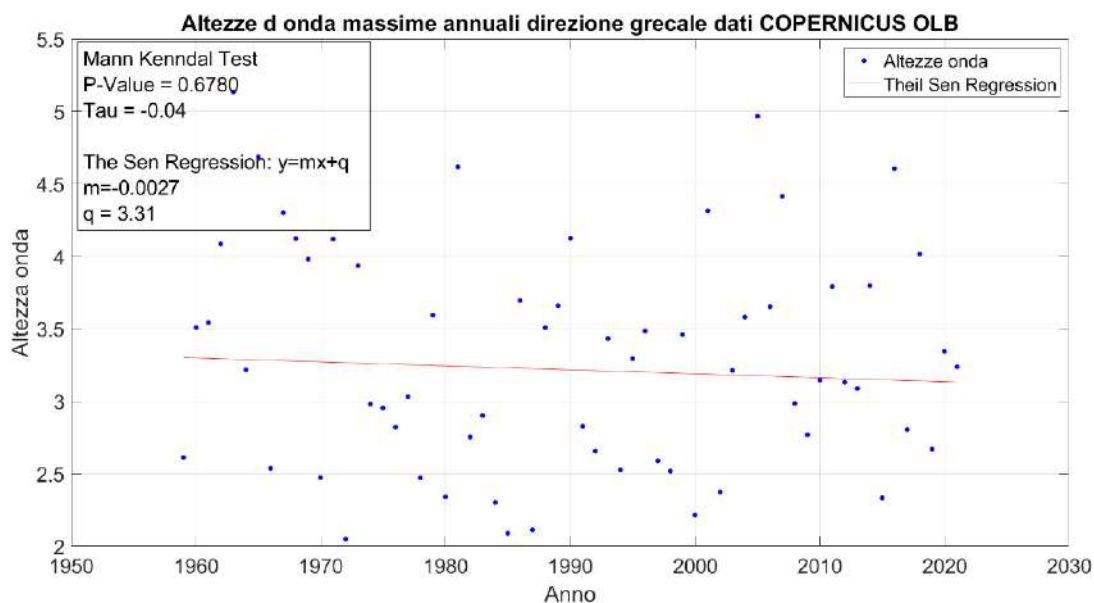


Figura 11, grafico delle altezze d'onda massime annuali in direzione grecale Cella OLB_COPERNICUS.

Il grafico delle altezze d'onda mostra un trend, negativo ma non significativo, come confermato dal valore di τ di Mann Kendall pari a -0.04.

Nelle Figura 12, Figura 13 e Figura 14 sono illustrate le percentuali di onde in un anno provenienti da direzione grecale che superano, rispettivamente, la soglia di 1 metro, 2 metri e 3 metri, relativi alla cella rinominata Boa_OLB_COPERNICUS le cui coordinate sono note nella tabella precedentemente indicata.

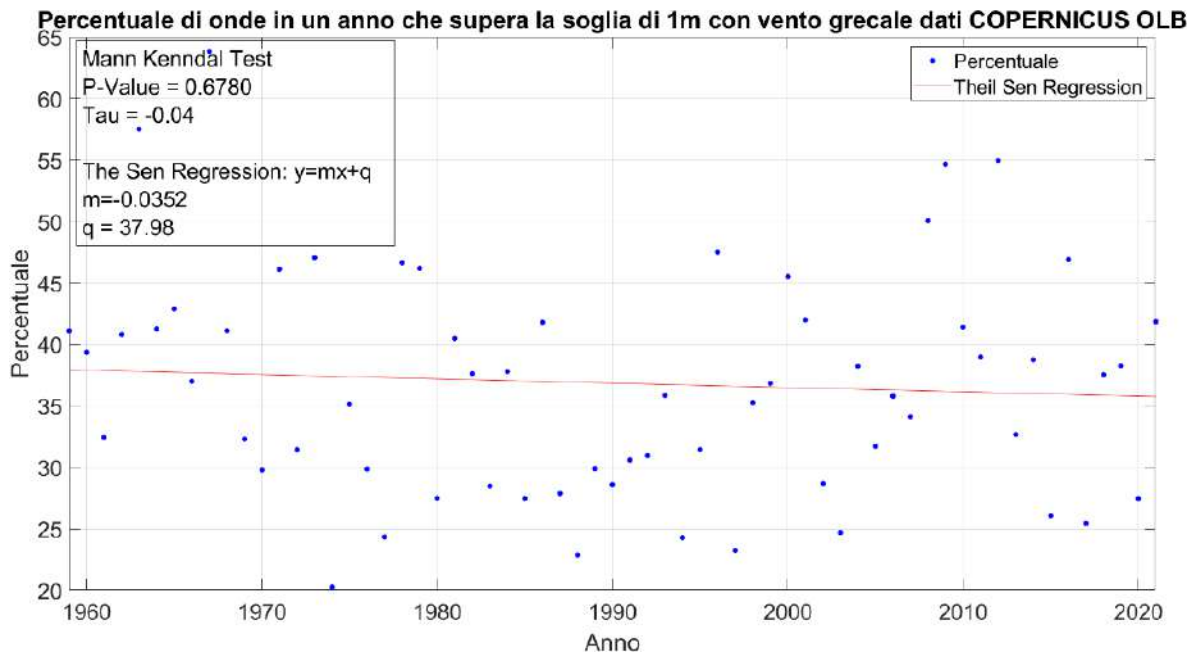


Figura 12, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione grecale che supera la soglia di 1 metro Cella OLB_COPERNICUS.

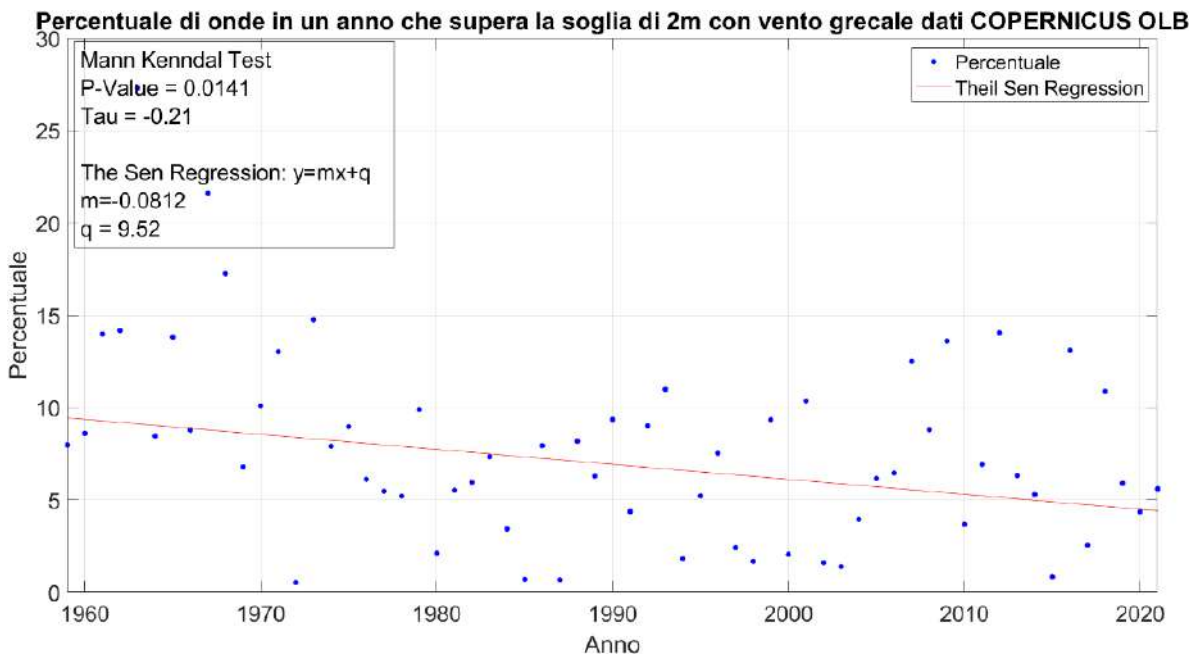


Figura 13, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione grecale che supera la soglia di 2 metri Cella OLB_COPERNICUS.



Figura 14, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione grecale che supera la soglia di 3 metri Cella OLB_COPERNICUS.

Anche in questo caso non si rileva alcun trend significativo.

3.3 Zona Sud – Ovest

La Zona Sud - Ovest è la terza zona in cui viene diviso il territorio regionale. Il settore di traversia esposto a questa zona è quello compreso tra 202.5° e 247.5°, ovvero il vento Libeccio.

Nella zona Sud – Ovest, sono stati utilizzati 3 dataset di onde. I punti di stazione sono georeferenziati e associati ad una specifica latitudine e longitudine, le informazioni geografiche dei punti di dati vengono inserite in Tabella 3, dove sono anche indicati i nomi e le sigle con cui sono stati rinominati i punti dei dataset.

Nome	Longitudine	Latitudine
OCC7	7.5	39.0
OCC8	7.5	38.5
Boa_S-O	8	38.5

Tabella 3, coordinate punti zona Sud-Ovest.

In Figura 15 viene inserita la mappa di inquadramento della Zona Sud – Ovest, dove è possibile individuare le stazioni dei dati.

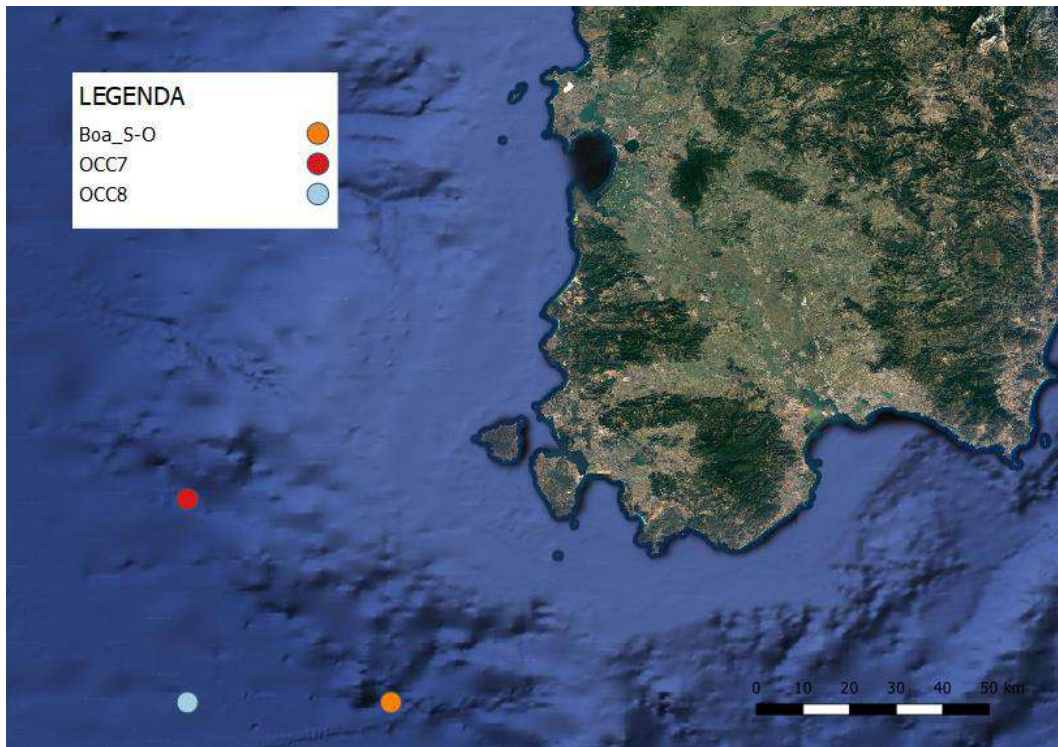


Figura 15, mappa inquadramento Zona Sud - Ovest.

La Figura 16 si riporta il grafico delle altezze d'onda massime annuali provenienti da direzione libeccio relativo alla cella OCC7, rappresentativa del settore Sud-Ovest.

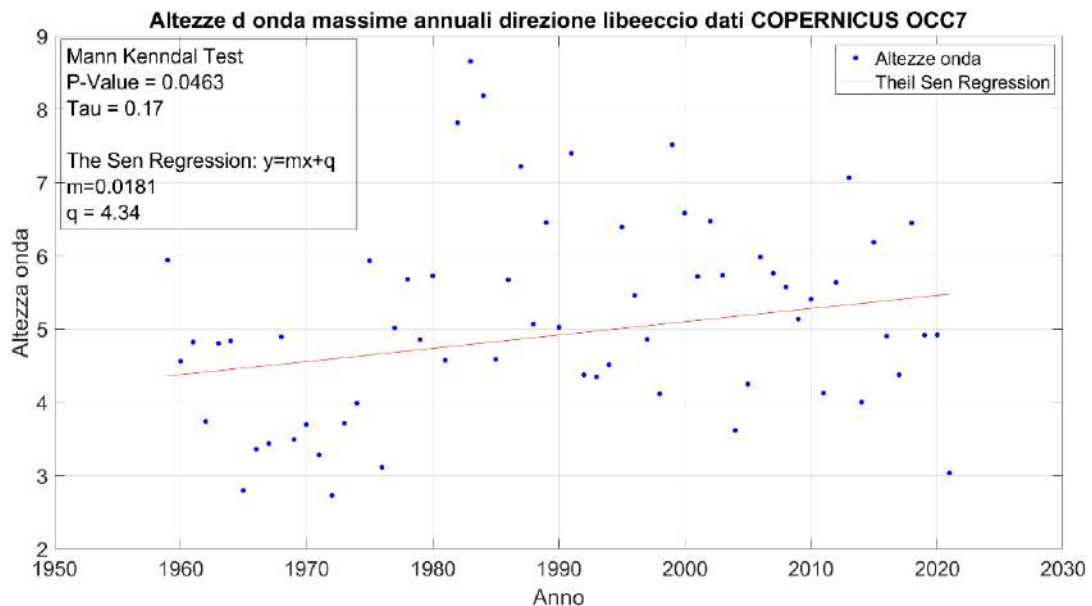


Figura 16, grafico delle altezze d'onda massime annuali in direzione libeccio Cella OCC7.

Il grafico delle altezze d'onda mostra un trend positivo e significativo, confermato dal valore di τ di Mann Kendall pari a +0.17, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo. Si registrano minimi valori delle altezze d'onda nel 1959 (4 m circa) e massimi, che arrivano a valori di circa 6.00 metri negli ultimi anni del 2020.

In Figura 17, Figura 18 e Figura 19 sono riportati i grafici della percentuale di onde in un anno provenienti da direzione libeccio che superano, rispettivamente, la soglia di 1 metro, 2 metri e 3 metri, relativi alla cella OCC7.

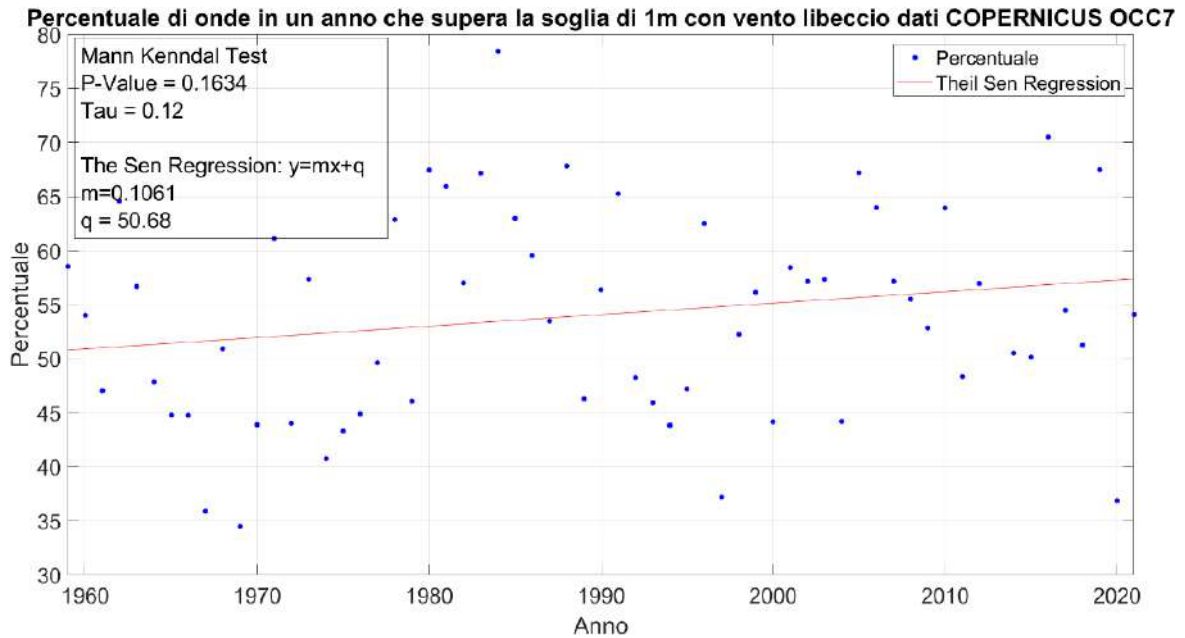


Figura 17, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione libeccio che supera la soglia di 1 metro Cella OCC7.

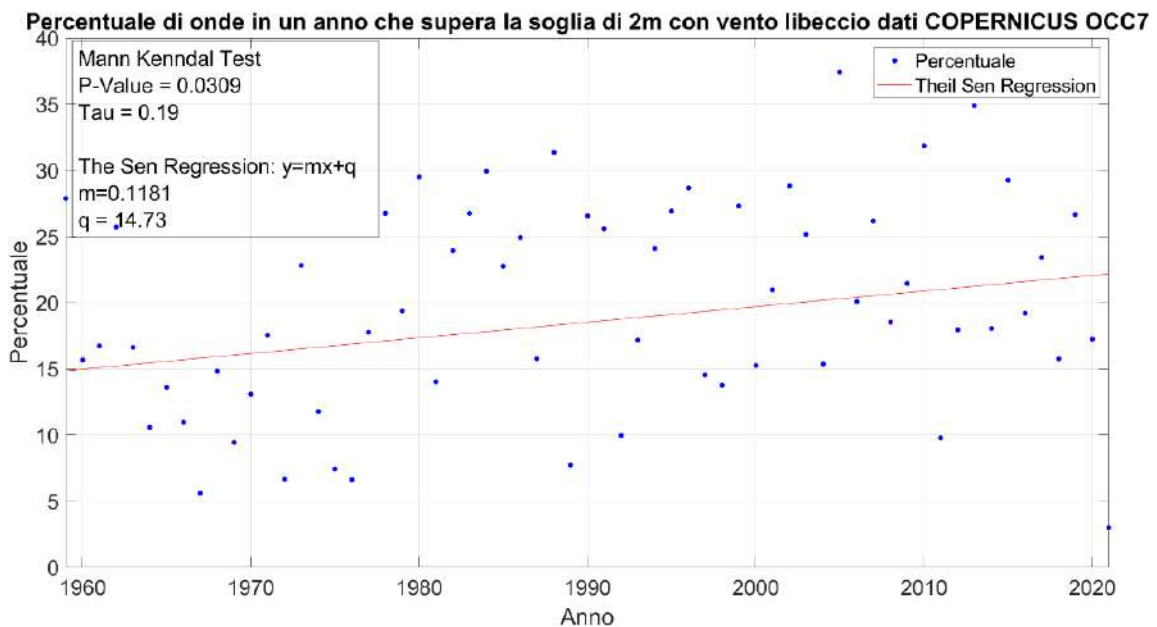


Figura 18, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione libeccio che supera la soglia di 2 metri Cella OCC7.

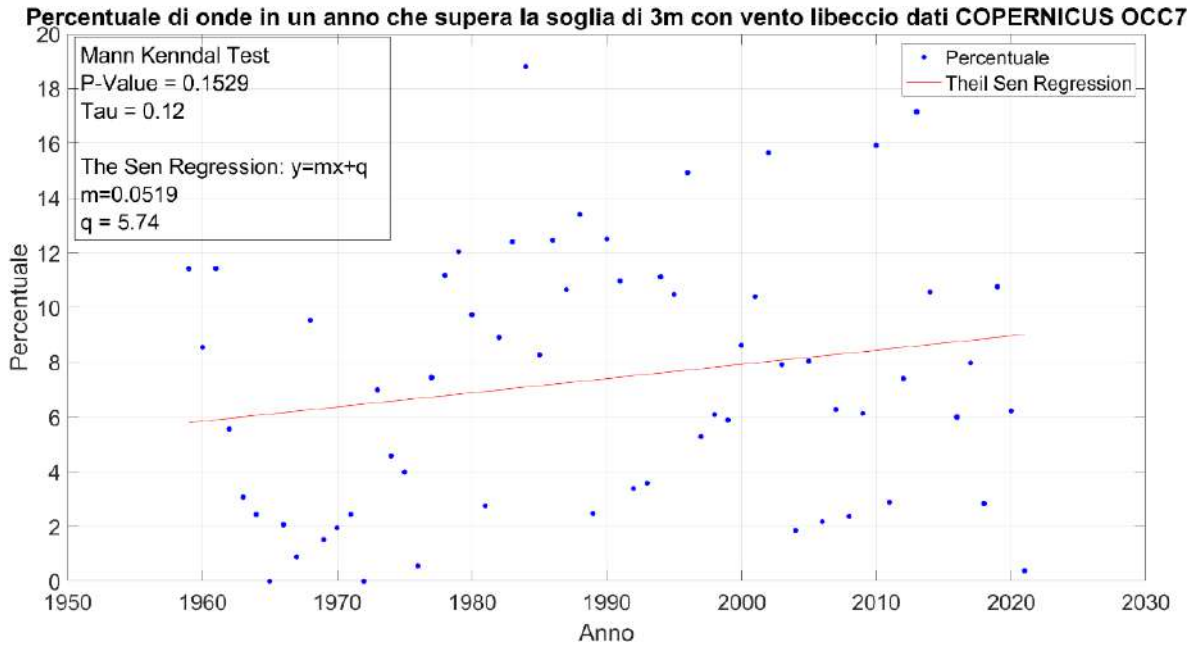


Figura 19, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione libeccio che supera la soglia di 3 metri Cella OCC7.

Emerge ancora un trend positivo, confermato dai valori di τ di Mann Kendall pari rispettivamente a +0.12 per soglia di 1 metro, +0.19 per soglia di 2 metri e +0.12 per soglia di 3 metri, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo per tutti e tre i casi.

In Figura 20 viene inserito il grafico delle altezze d’onda massime annuali provenienti da direzione libeccio relativo alla cella rinominata Boa_Sud-Ovest. Anche in questo caso il trend è positivo, con un notevole incremento dei valori di altezza d’onda

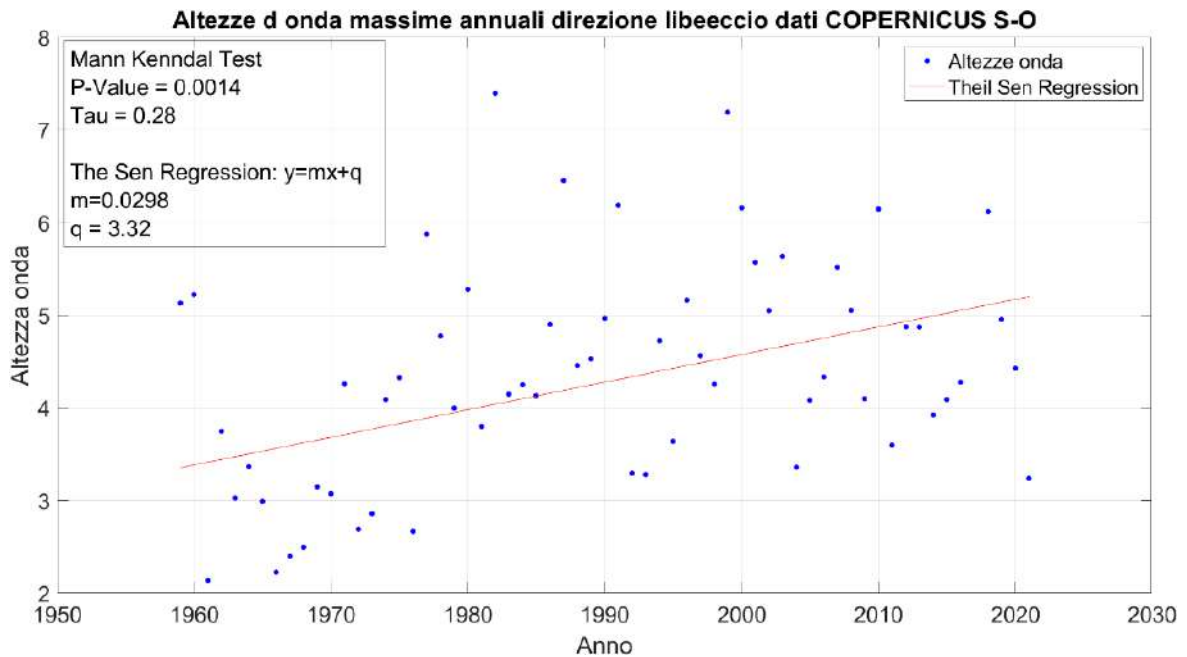


Figura 20, grafico delle altezze d’onda massime annuali in direzione libeccio Cella Sud - Ovest.

In Figura 21, Figura 22 e Figura 23 vengono inseriti i grafici della percentuale di onde in un anno proveniente da direzione libeccio che superano, rispettivamente, la soglia di 1 metro, 2 metri e 3 metri, relativi alla cella rinominata Boa_Sud-Ovest le cui coordinate sono note nella tabella precedentemente indicata.

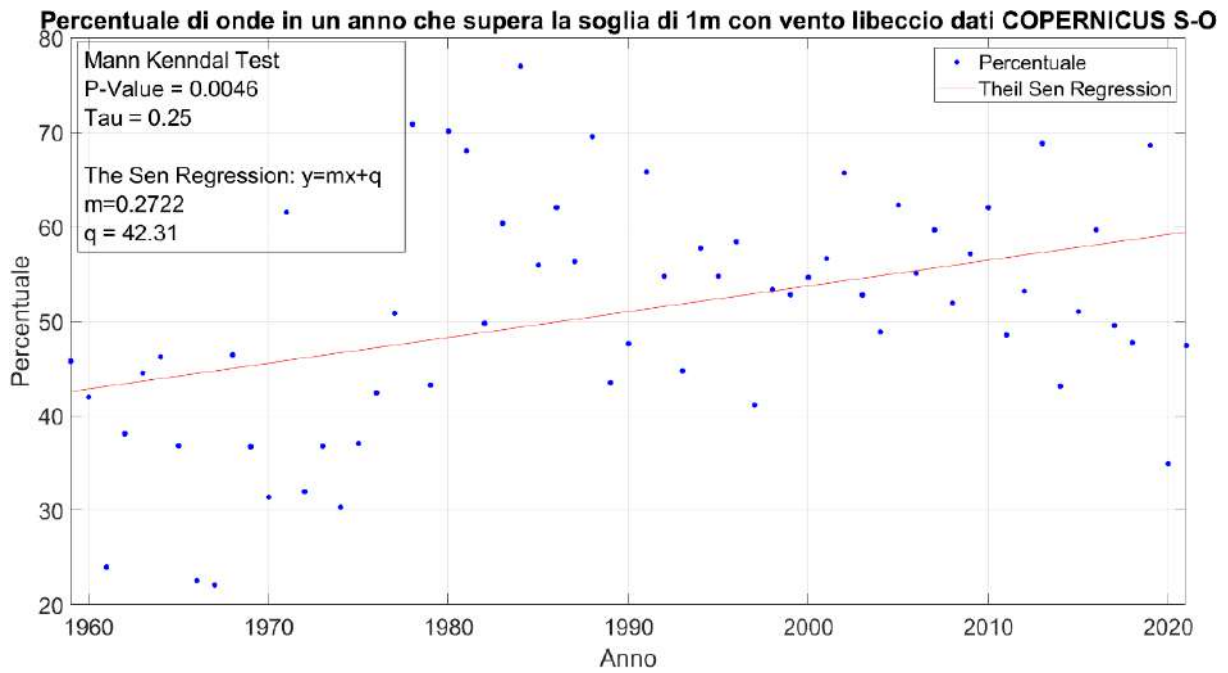


Figura 21, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione libeccio che supera la soglia di 1 metro Cella Sud - Ovest.

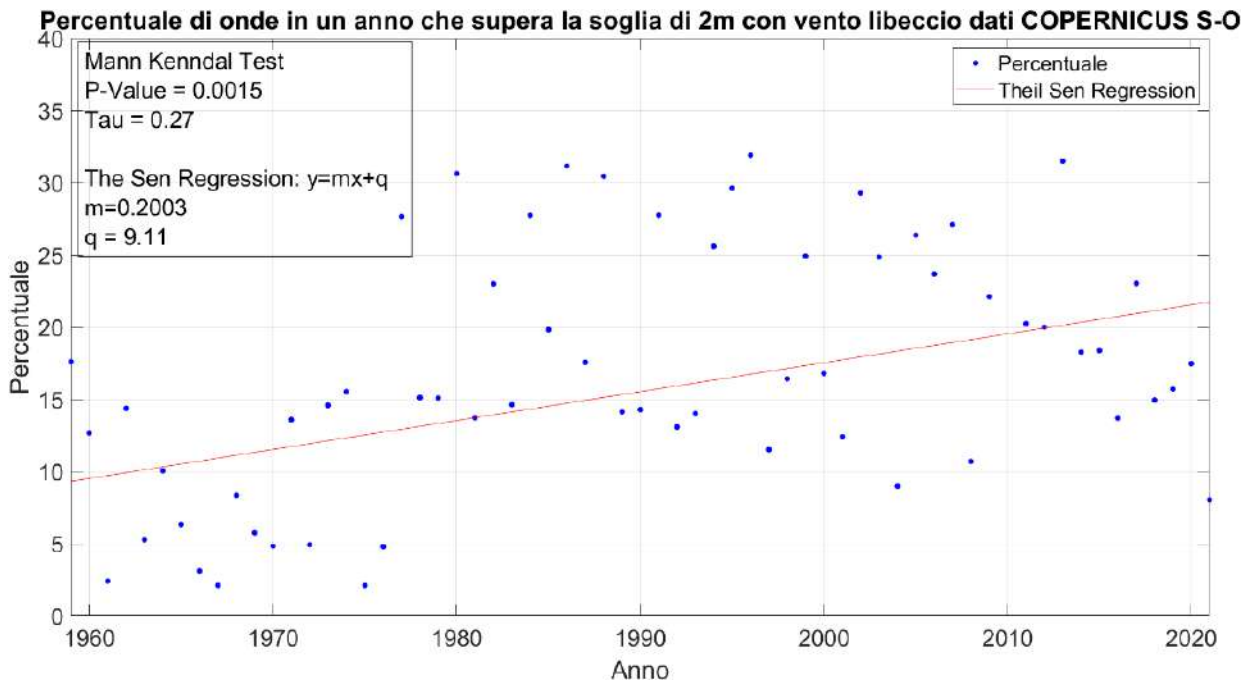


Figura 22, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione libeccio che supera la soglia di 2 metri Cella Boa Sud - Ovest.

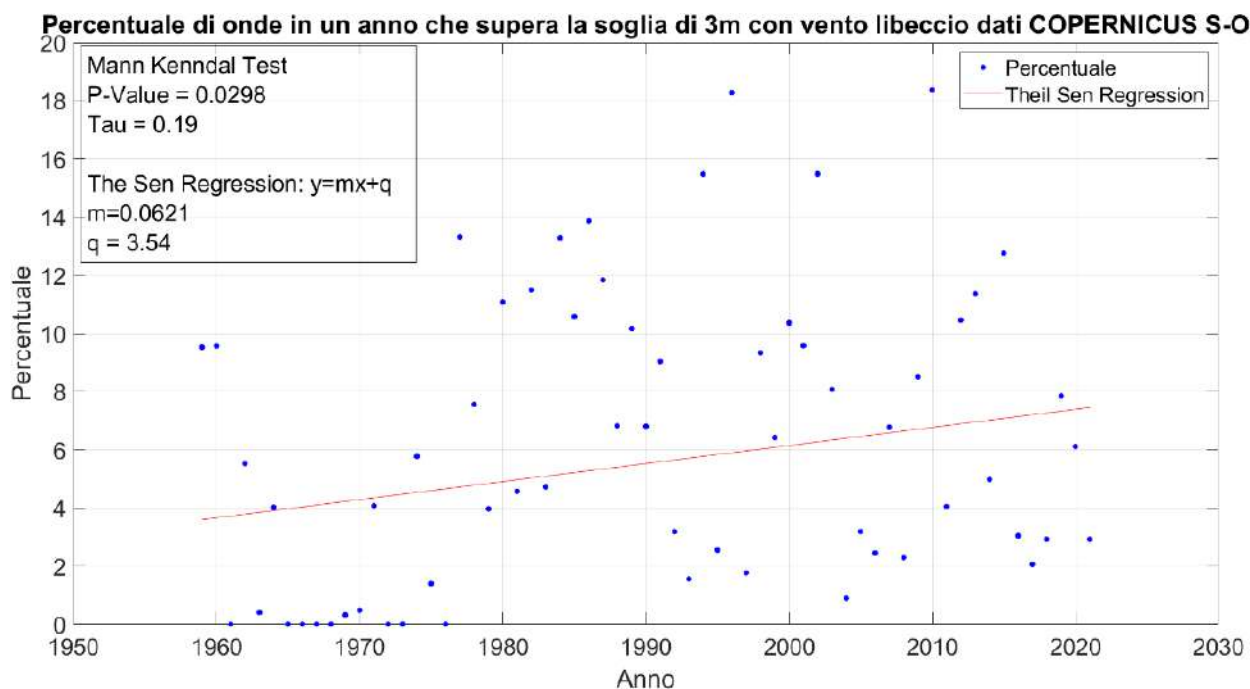


Figura 23, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione libeccio che supera la soglia di 3 metri Cella Boa Sud - Ovest.

È evidente un trend positivo anche nei dati di vento, confermato dai valori di τ di Mann Kendall pari rispettivamente a +0.25 per soglia di 1 metro, +0.27 per soglia di 2 metri e +0.19 per soglia di 3 metri, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo per tutti e tre i casi.

Nella Zona Sud – Ovest è osservabile un aumento delle variabili analizzate che sarà sicuramente determinante per la progettazione di nuove opere marittime, in quanto, l’intensità e la frequenza delle onde estreme provenienti da libeccio sono in aumento.

3.4 Zona Sud – Est.

Il settore di traversia è quello compreso tra 112.5° e 157.5°, ovvero quello predominante per il vento di Scirocco.

Nella zona Sud – Ovest, sono stati utilizzati 2 dataset di onde, e un dataset di dati anemometrici. I punti di stazione sono georeferenziati e associati ad una specifica latitudine e longitudine, le informazioni geografiche dei punti di dati vengono inserite in Tabella 4, dove sono anche indicati i nomi e le sigle con cui sono stati rinominati i punti dei dataset. In Figura 24 viene inserita la mappa di inquadramento della Zona Sud - Est, dove è possibile individuare le stazioni dei dati.

Nome	Longitudine	Latitudine
Boa CAG Copernicus 3	9.5	38.5
Boa CAG Copernicus 5	10.0	38.5
Aeroporto CAG	8.17	40.37

Tabella 4, coordinate punti zona Sud - Est.

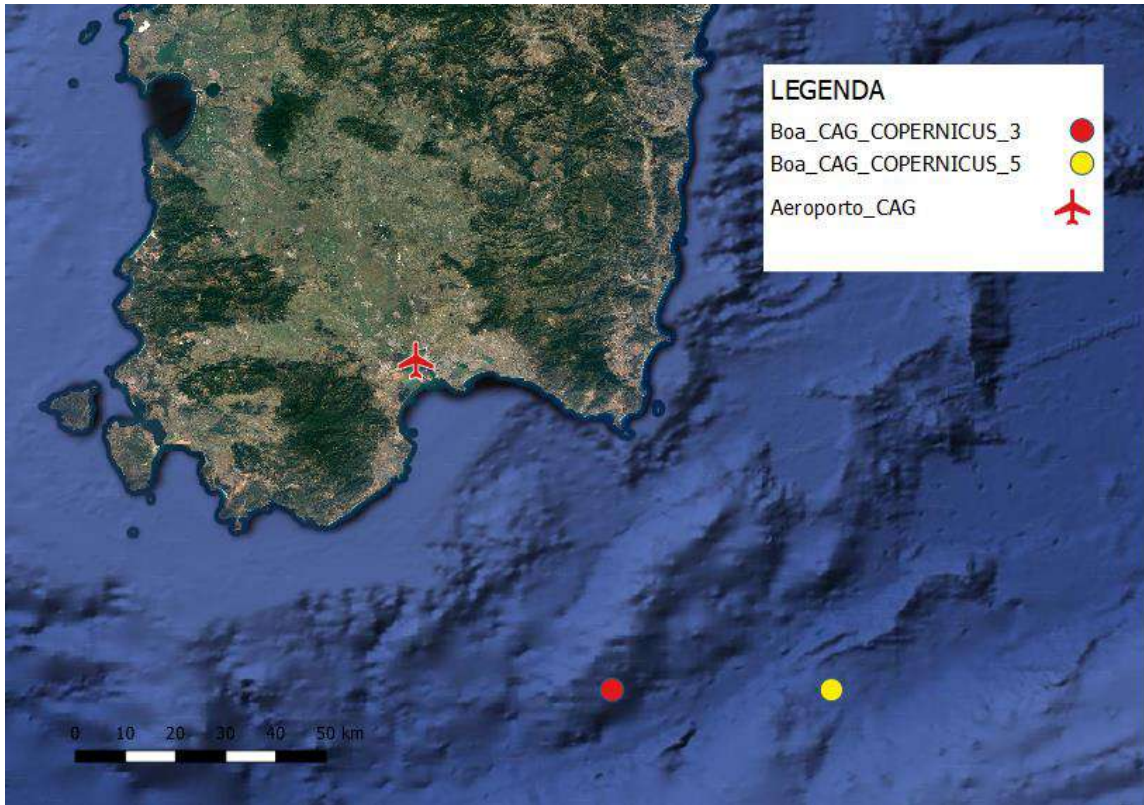


Figura 24, mappa inquadramento Zona Sud - Ovest.

Il grafico delle altezze d’onda relativo alla cella rinominata Boa_CAG_COPERNICUS_3 (Figura 25) mostra un trend positivo, confermato dal valore di τ di Mann Kendall pari a +0.25, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo.

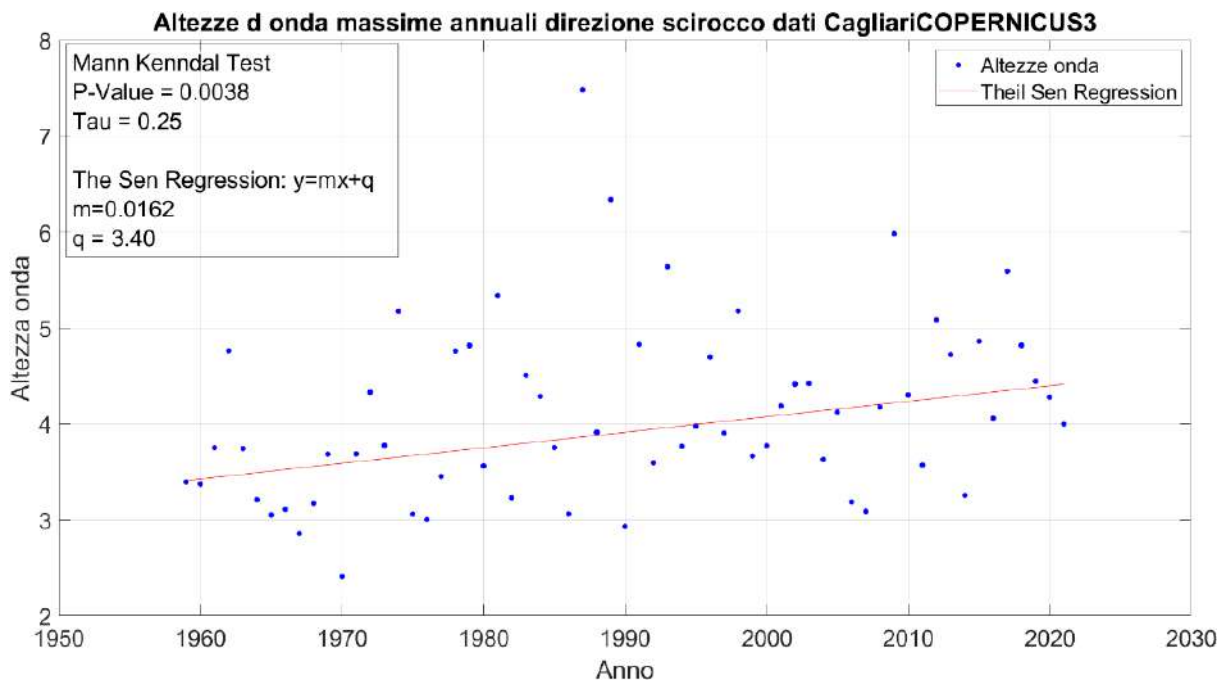


Figura 25, grafico delle altezze d’onda massime annuali in direzione scirocco Cella CAG_COPERNICUS_3.

In Figura 26, Figura 27 e Figura 28 vengono inseriti i grafici della percentuale di onde in un anno proveniente da direzione maestrale che superano, rispettivamente, la soglia di 1 metro, 2 metri e 3 metri, relativi alla cella rinominata Boa_CAG_COPERNICUS_3.

Percentuale di onde in un anno che supera la soglia di 1m con vento scirocco dati CagliariCOPERNICUS3

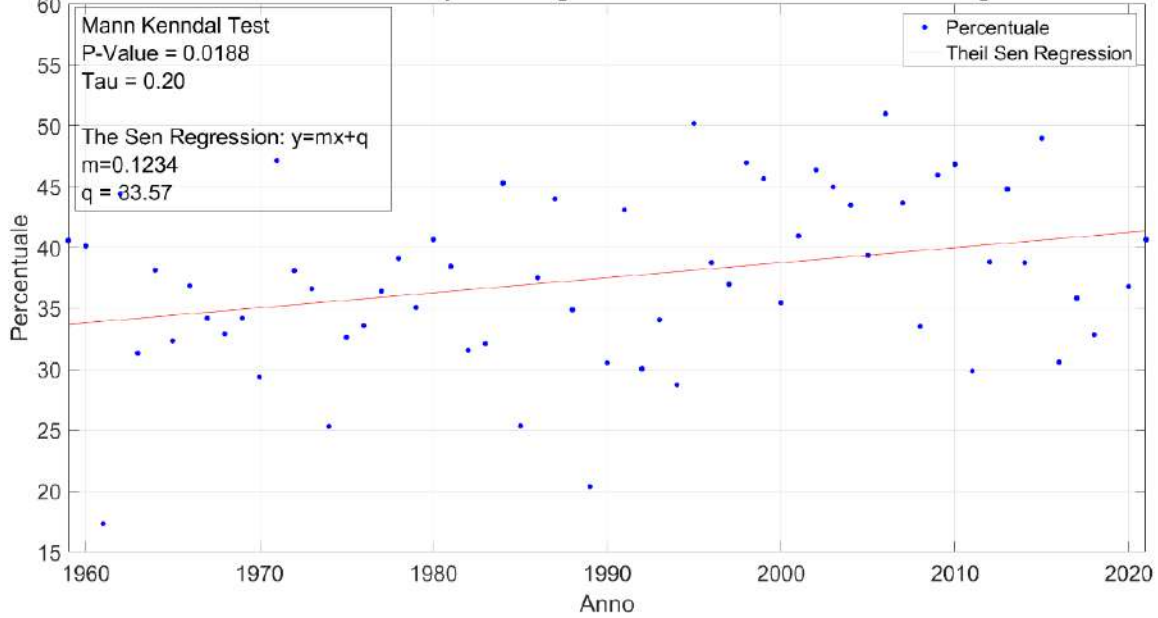


Figura 26, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione scirocco che supera la soglia di 1 metro Cella CAG_COPERNICUS_3.

Percentuale di onde in un anno che supera la soglia di 2m con vento scirocco dati CagliariCOPERNICUS3

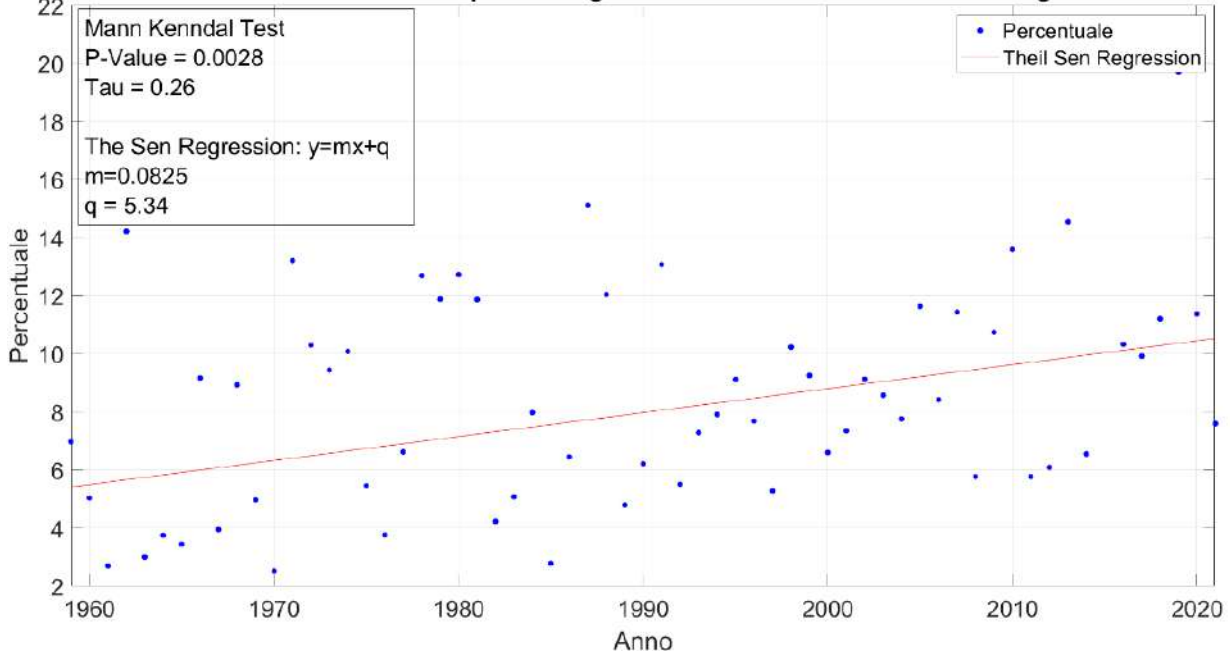


Figura 27, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione scirocco che supera la soglia di 2 metri Cella CAG_COPERNICUS_3.

Percentuale di onde in un anno che supera la soglia di 3m con vento scirocco dati CagliariCOPERNICUS3

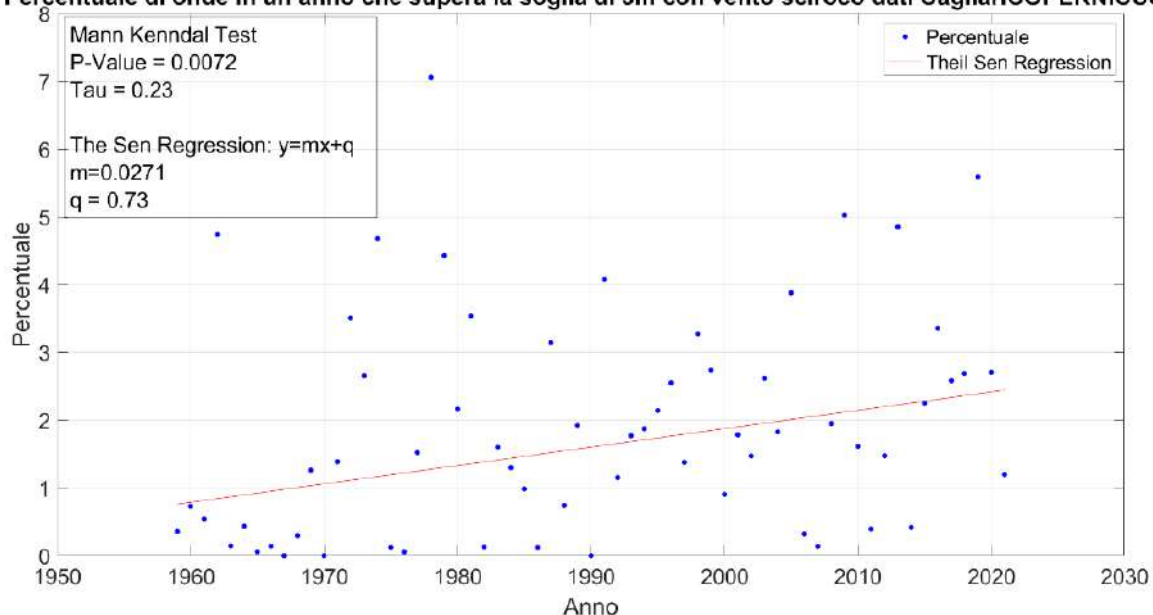


Figura 28, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione scirocco che supera la soglia di 3 metri Cella CAG_COPERNICUS_3.

I grafici delle percentuali di superamento mostrano un trend positivo, questo è confermato dai valori di τ di Mann Kendall pari rispettivamente a -0.20 per soglia di 1 metro, -0.26 per soglia di 2 metri e -0.23 per soglia di 3 metri, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo per tutti e tre i casi.

Anche utilizzando i dati rilevati nella cella rinominata CAG_COPERNICUS_5 si riscontra un trend positivo, questo è confermato dal valore di τ di Mann Kendall pari a +0.26, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo (Figura 29).

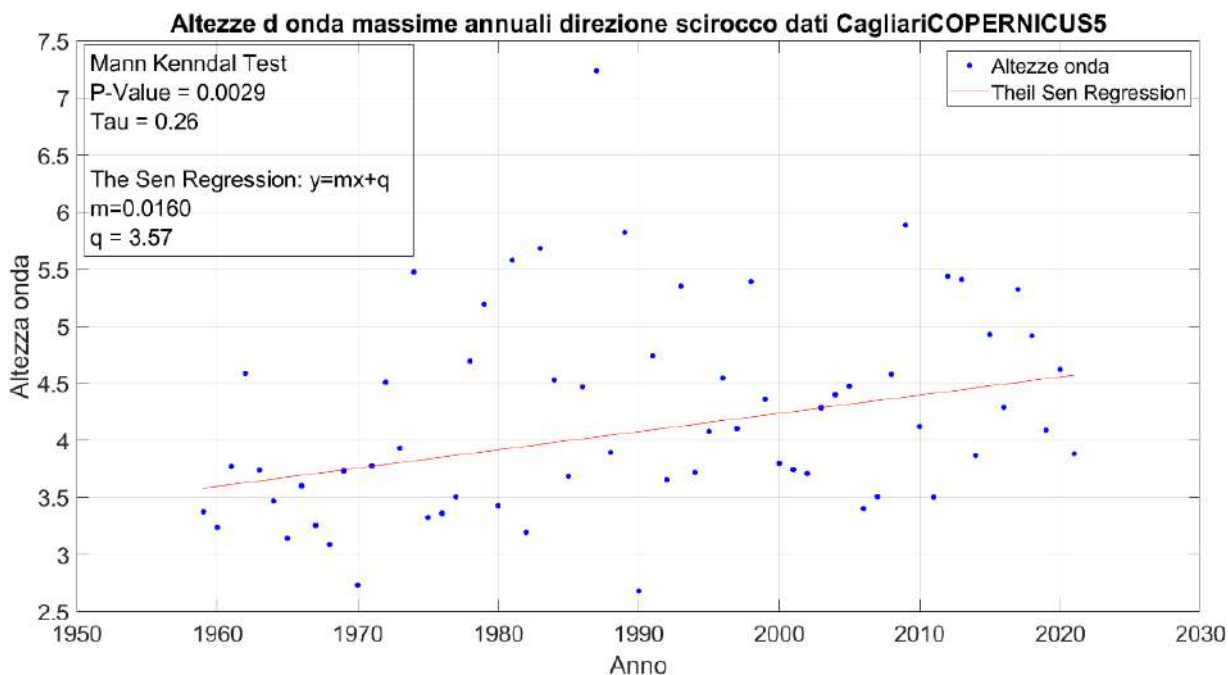


Figura 29, grafico delle altezze d'onda massime annuali in direzione scirocco Cella CAG_COPERNICUS_5.

In Figura 30, Figura 31 e Figura 32 vengono inseriti i grafici della percentuale di onde in un anno proveniente da direzione scirocco che superano, rispettivamente, la soglia di 1 metro, 2 metri e 3 metri, relativi alla cella rinominata CAG_COPERNICUS_5. Per tutti i casi si evince ancora un trend positivo, confermato dai valori di τ di Mann Kendall pari rispettivamente a +0.18 per soglia di 1 metro, +0.21 per soglia di 2 metri e +0.24 per soglia di 3 metri, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo per tutti e tre i casi.

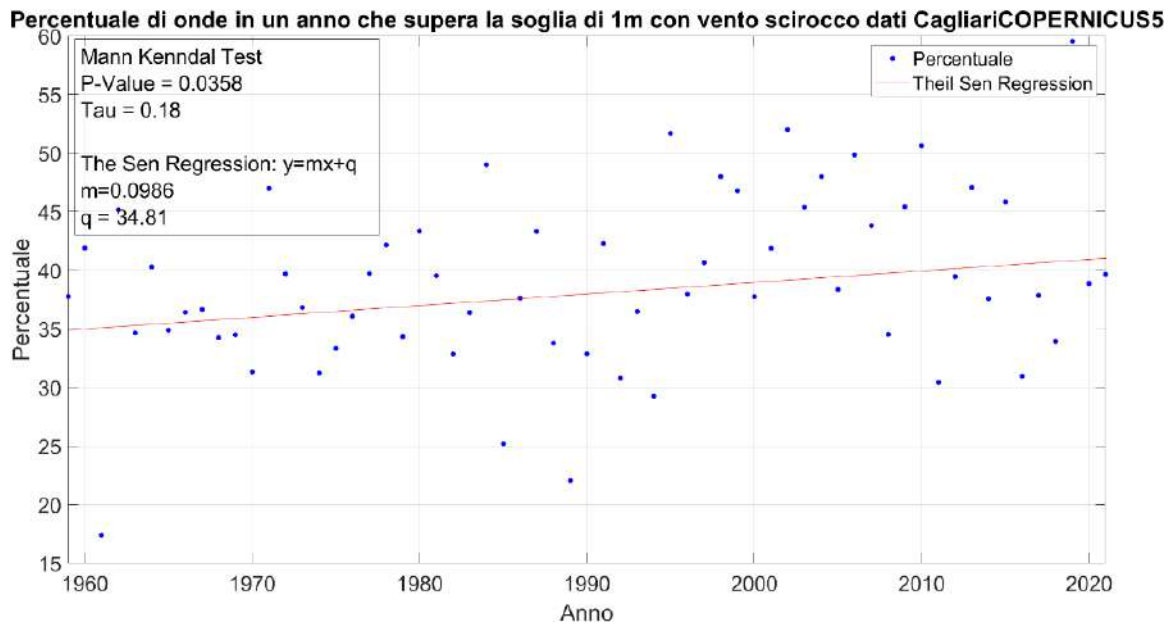


Figura 30, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione scirocco che supera la soglia di 1 metro Cella CAG_COPERNICUS_5.

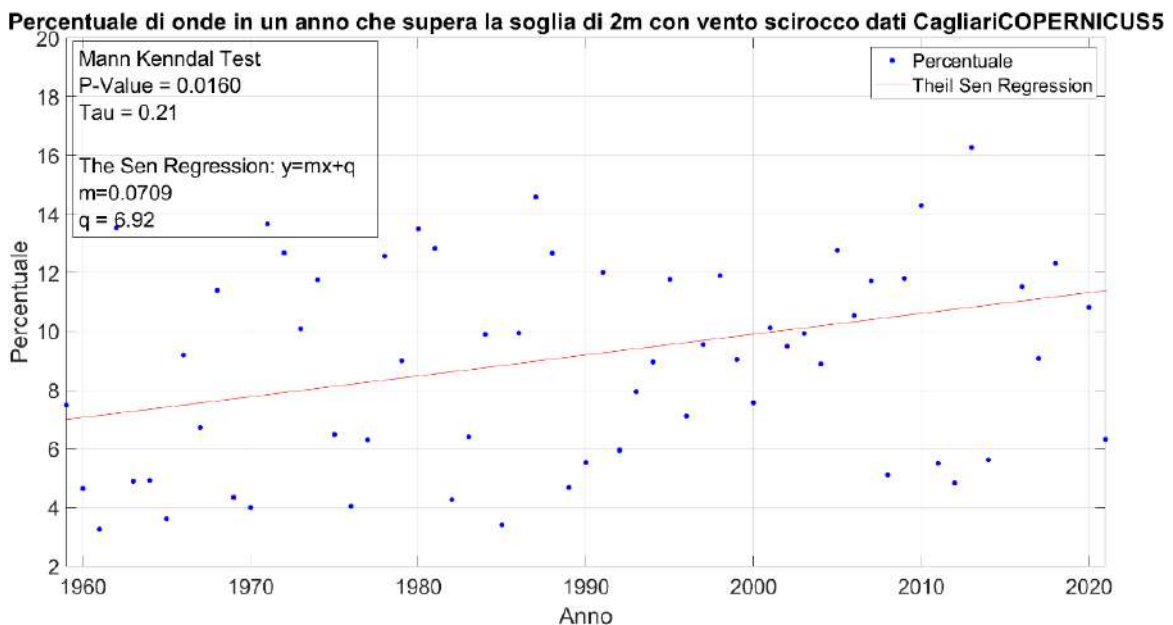


Figura 31, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione scirocco che supera la soglia di 2 metri Cella CAG_COPERNICUS_5.

Percentuale di onde in un anno che supera la soglia di 3m con vento scirocco dati CagliariCOPERNICUS5

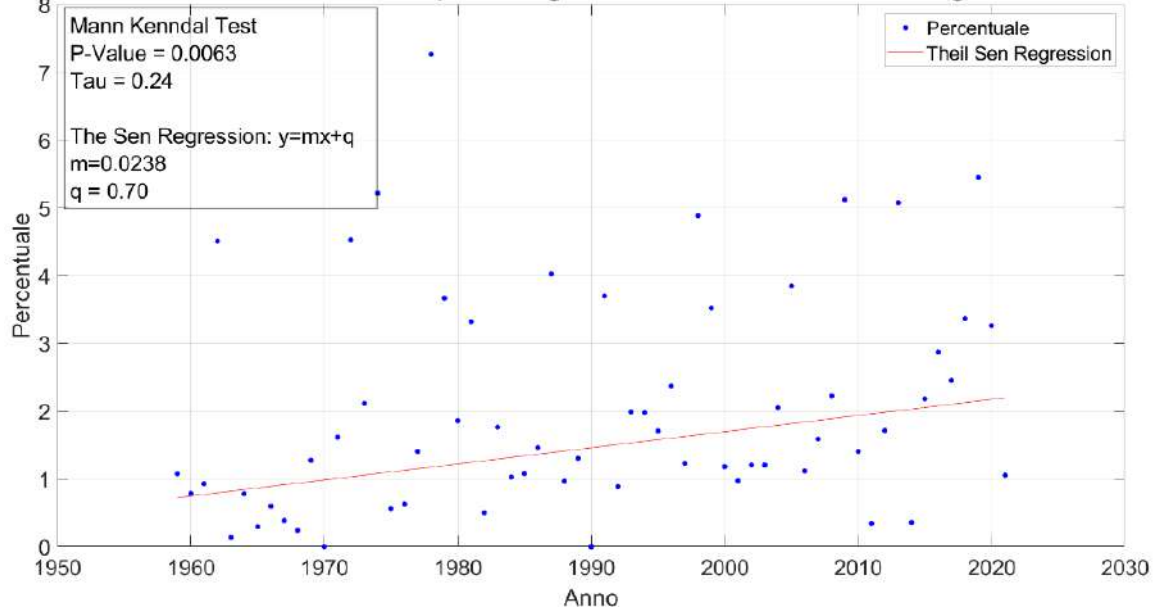


Figura 32, grafico percentuale di onde in un anno proveniente da direzione scirocco che supera la soglia di 3 metri Cella CAG_COPERNICUS_5.

I grafici delle percentuali di superamento mostrano un trend positivo, questo è confermato dai valori di τ di Mann Kendall pari rispettivamente a +0.18 per soglia di 1 metro, +0.21 per soglia di 2 metri e +0.24 per soglia di 3 metri, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo per tutti e tre i casi.

In Figura 33 viene inserito il grafico della percentuale di giorni di scirocco in un anno, relativo alla cella rinominata Stazione Elmas.

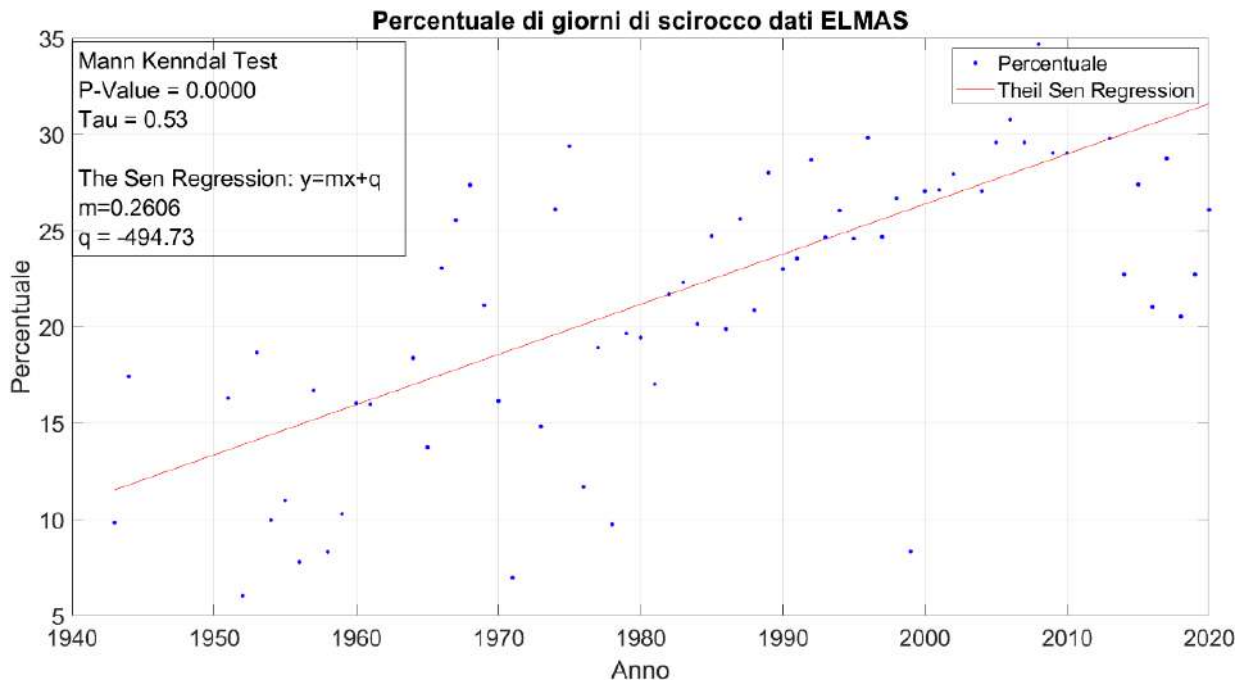


Figura 33, grafico percentuale di giorni di maestrale Stazione Elmas.

E' evidente un trend positivo sui giorni di scirocco, questo è confermato dal valore di τ di Mann Kendall molto elevato e pari a +0.53, e da un coefficiente angolare della retta di regressione positivo. Il trend di crescita è confermato anche quando consideriamo 2 giorni consecutivi di scirocco (Figura 34).

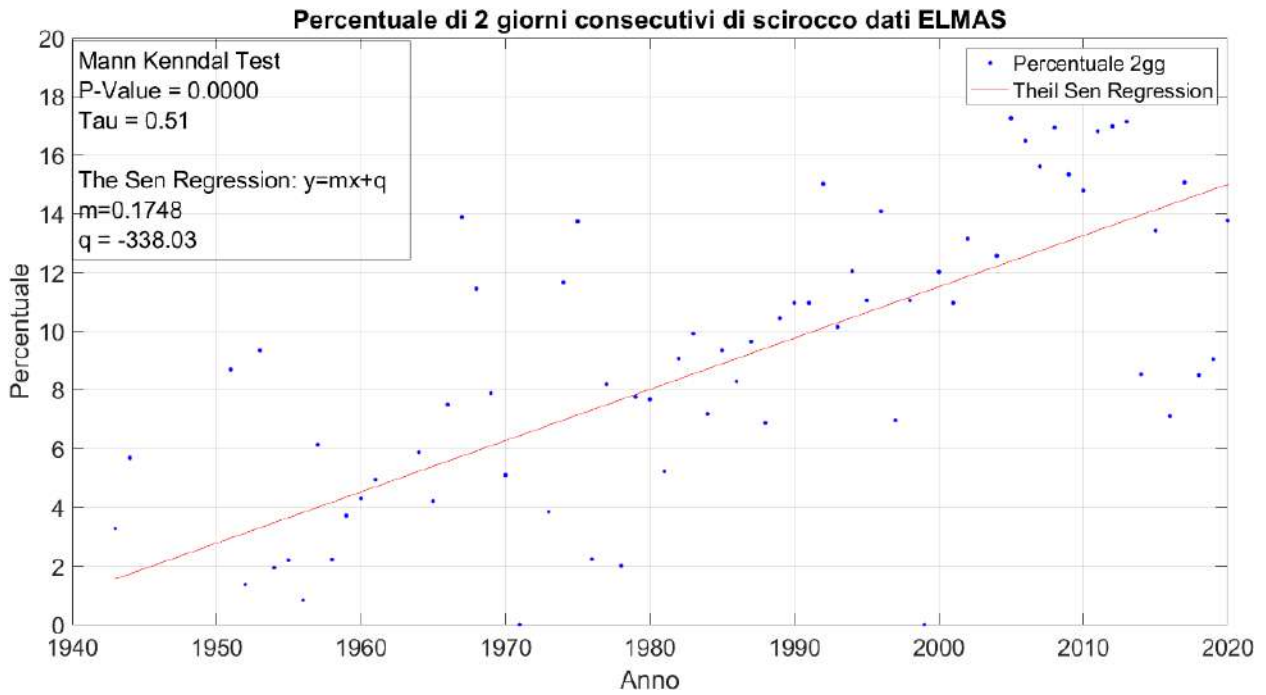


Figura 34, il grafico della percentuale di eventi con almeno 2 giorni consecutivi di scirocco Stazione Elmas.

Infine, la Figura 35 mostra la percentuale di giorni di vento consecutivi con diverse soglie di velocità, relativo alla cella rinominata Stazione Elmas.

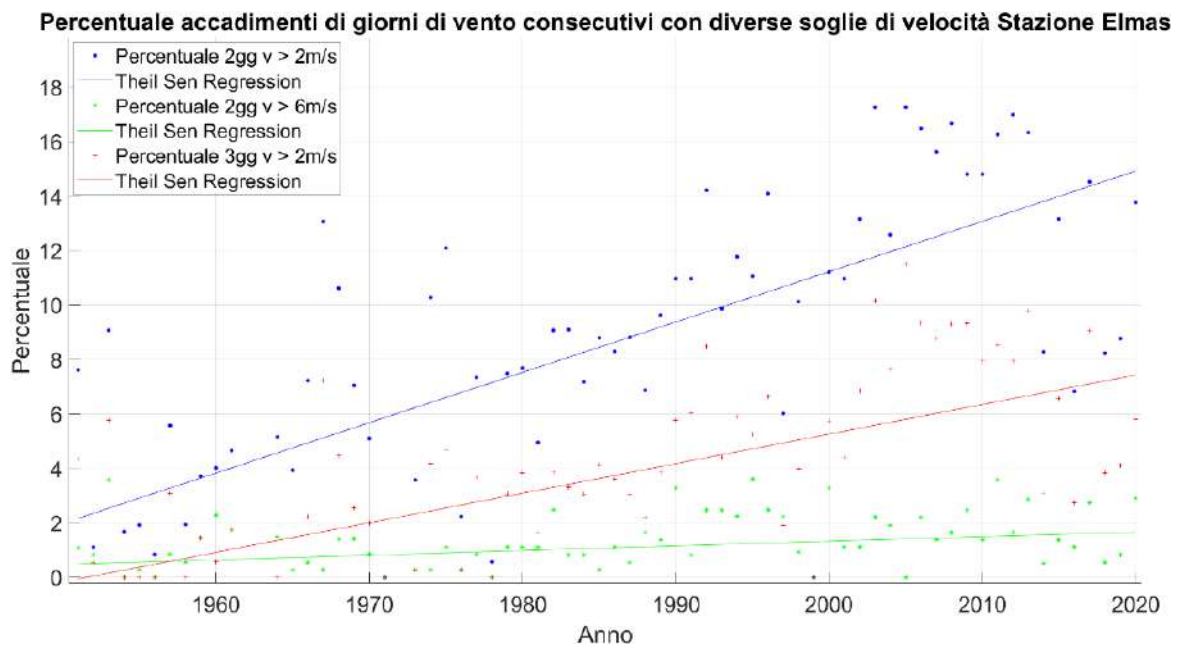


Figura 35, grafico percentuale accadimenti di giorni di vento consecutivi con diverse soglie di velocità Stazione Elmas.

Si evince un trend positivo sui dati di vento e sulle altezze d'onda rilevate per il settore Sud – Est e vento Scirocco. Infatti, nel periodo storico esaminato c'è stato un aumento delle grandezze d'interesse indagate, che deve essere considerato nelle fasi realizzative delle nuove opere marittime.

Relativamente alle zone Zona Sud – Ovest e in quella Sud -Est, per le quali sono stati riscontrati notevoli incrementi delle altezze d'onda e del numero di giornate ventose, è stata valutata la variazione dell'onda di progetto tra quella stimata utilizzando i dati storici del periodo 1959-1985 e la stima utilizzando la base dati più recente, dal 1966-2021.

In Figura 36 viene inserita la variazione delle altezze per la zona sud-Ovest, calcolata per i tempi di ritorno di 50, 100, 200 e 500 anni, con la distribuzione di probabilità Weibull per la cella Sud – Ovest, mentre in Figura 37 si riporta la stessa stima effettuata utilizzando la distribuzione di probabilità di Gumbel.

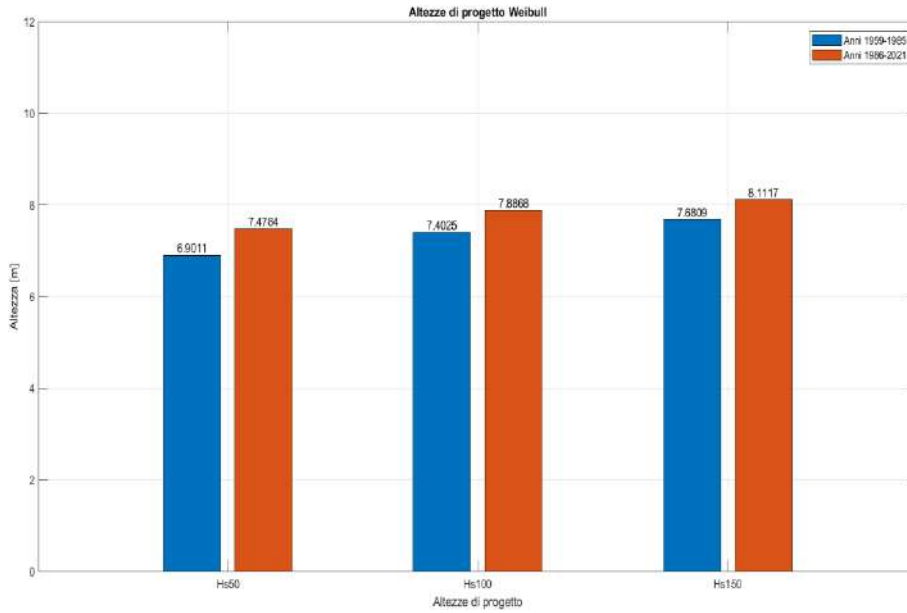


Figura 36, variazione delle altezze, calcolata per più tempi di ritorno, con la distribuzione di probabilità Weibull cella Sud - Ovest.

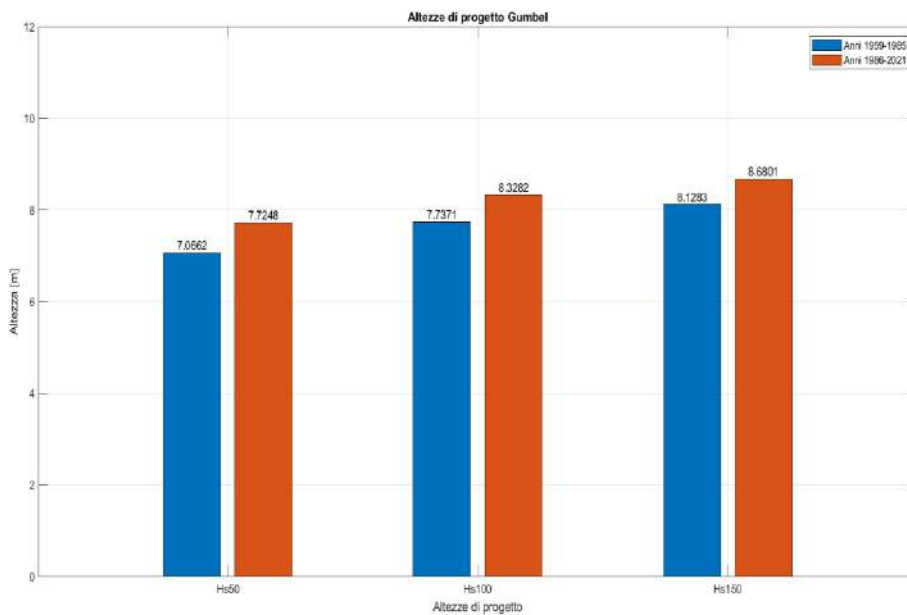


Figura 37, variazione delle altezze, calcolata per più tempi di ritorno, con la distribuzione di probabilità Gumbel cella Sud - Ovest.

Dall’analisi sulla variazione delle altezze d’onda è evidente un aumento tra la prima e la seconda metà della serie di dati, il che conferma un incremento delle altezze d’onda che dovrebbero essere utilizzate in sede di progetto. Tale aumento potrebbe risultare poi un fattore condizionante nella progettazione delle nuove opere.

Anche per la zona Zona Sud – Est, sono state determinate le altezze di progetto utilizzando le funzioni di distribuzione Weibull e Gumbell per ciascuna delle celle esaminate. A titolo di esempio, in Figura 38 viene inserita la variazione delle altezze di progetto, calcolata per più tempi di ritorno, con la distribuzione di probabilità Weibull per la Cella3, mentre in Figura 39 con la distribuzione di probabilità di Gumbel.

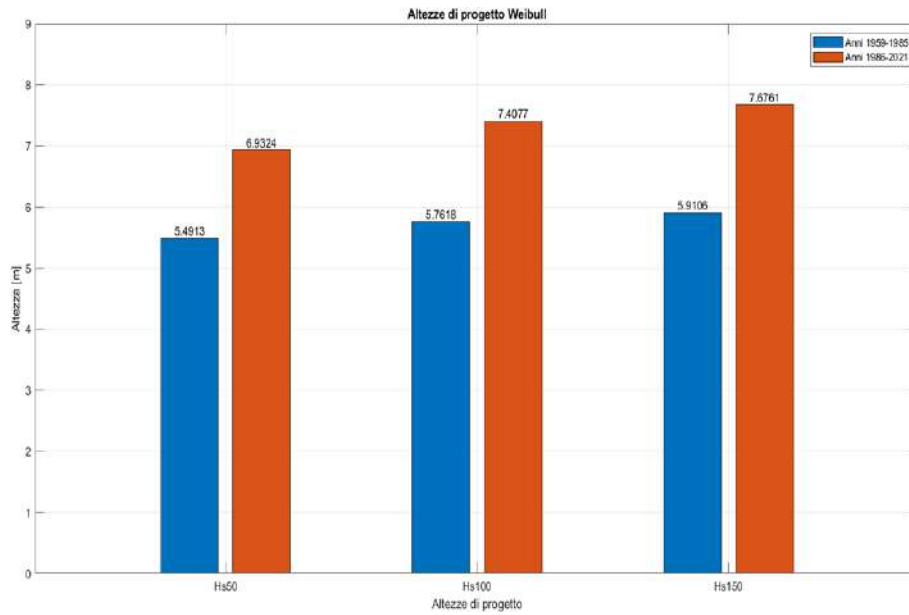


Figura 38, variazione delle altezze di progetto, calcolata per più tempi di ritorno, con la distribuzione di probabilità Weibull Cella3.

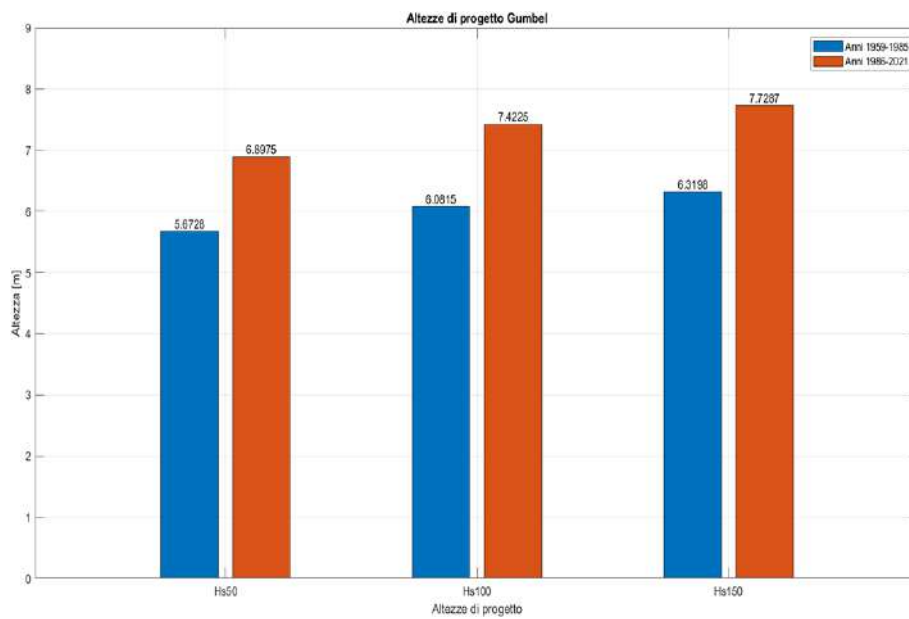


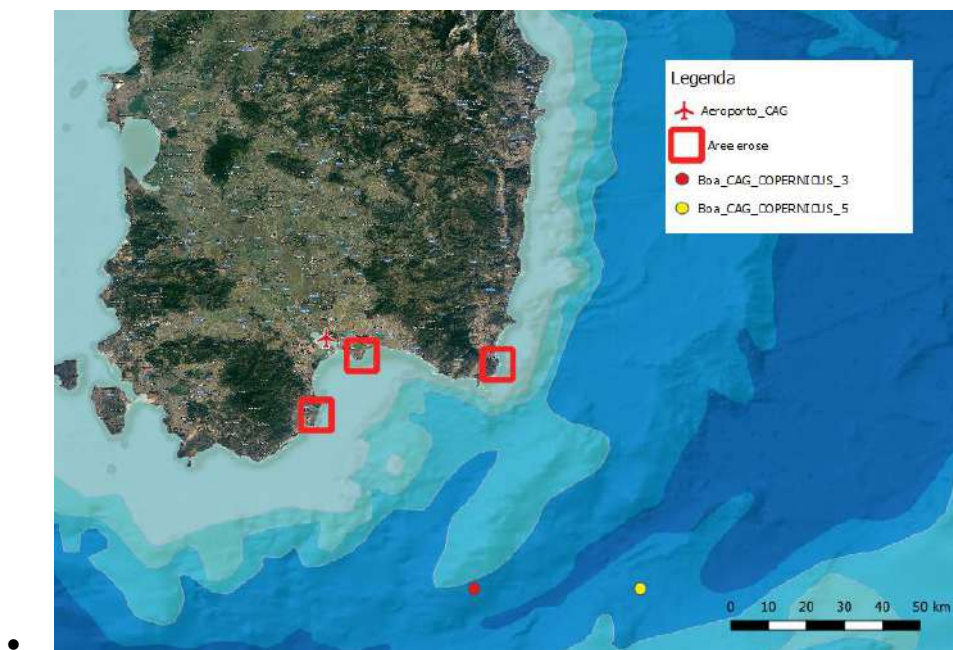
Figura 39, variazione delle altezze di progetto, calcolata per più tempi di ritorno, con la distribuzione di probabilità Gumbel Cella3.

Anche su tale settore è evidente come l'incremento delle altezze d'onda rilevate negli ultimi decenni sia determinante per la stima delle onde di progetto da impiegarsi nella progettazione delle opere marittime

3.5 Analisi sugli effetti indotti dalle modifiche del clima ondoso

Dall'analisi condotta sui quattro principali settori della Sardegna, emerge una condizione particolarmente allarmante nelle regioni Sud-Ovest e Sud-Est. In queste aree, si è registrato un aumento dell'altezza delle onde e della percentuale di giornate caratterizzate da venti tempestosi nei recenti decenni. L'incremento della frequenza di giorni con condizioni di tempesta e l'aumento dell'altezza significativa delle onde hanno contribuito a intensificare l'azione erosiva del moto ondoso nelle zone costiere già soggette a rischio di erosione. Un'analisi delle ortofoto storiche su tre casi studio esemplificativi ha permesso di definire le linee di riva e valutare sommariamente l'entità del fenomeno erosivo. I casi studio considerati sono i seguenti (Figura 40,41,42,43):

- Spiaggia di Perd'e Sali;
- Spiaggia del Poetto;
- Spiaggia di Cala Pira.



• *Figura 40, individuazione delle aree soggette a arretramento della linea di riva nella Zona Sud – Est.*

In figura 41 si riporta l'andamento linea di riva spiaggia di Perd'e Sali nel 1998, nella Figura 42 viene inserito l'andamento linea di riva spiaggia di Perd'e Sali nel 2019 e nella Figura 43 viene riportata la stima della fascia costiera erosa che rappresenta l'effetto erosivo della spiaggia di Perd'e Sali dal 1998 al 2019. Nella Tabella 5 si riportano i risultati in forma tabellare.



Figura 41, andamento linea di riva spiaggia Perd'e Sali 1998.



Figura 42, andamento linea di riva spiaggia Perd'e Sali 2019.



Figura 43, risultato erosione spiaggia Perd'e Sali dal 1998 al 2019.

Pond'e Sali (Sarroch)		
Arretramento	16	m
Anni	22	anni
Tasso di erosione annuo	0.73	m/anno

Tabella 5, resoconto dati delle linee di costa e il tasso di erosione.

La stessa analisi è stata condotta per la spiaggia del Poetto. In Figura 44 viene inserito l'andamento linea di riva spiaggia Poetto nel 2003, nella Figura 45 viene inserito l'andamento linea di riva spiaggia del Poetto nel 2019 e nella Figura 46 si riporta la porzione di spiaggia erosa nell'intervallo temporale dal 2003 al 2019. Viene inoltre inserito in Tabella 6 un resoconto sui dati delle linee di costa e il tasso di erosione annuo.

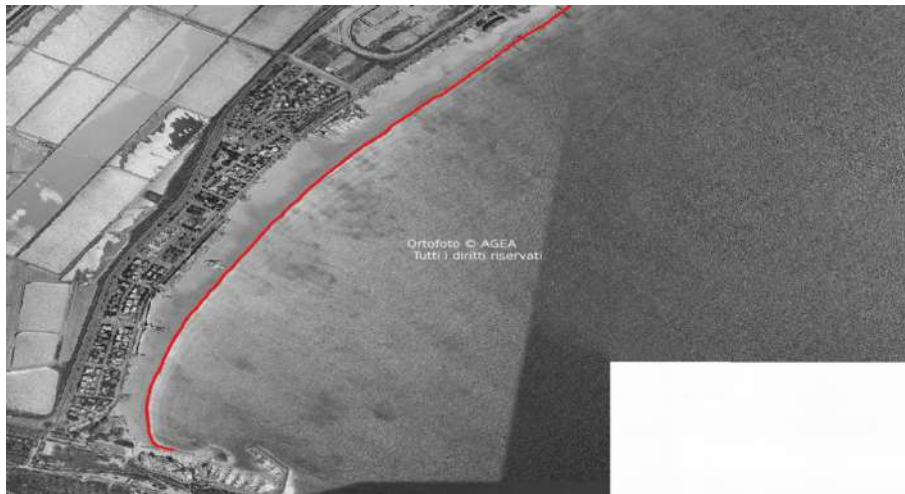


Figura 44, andamento linea di riva spiaggia Poetto 2003.

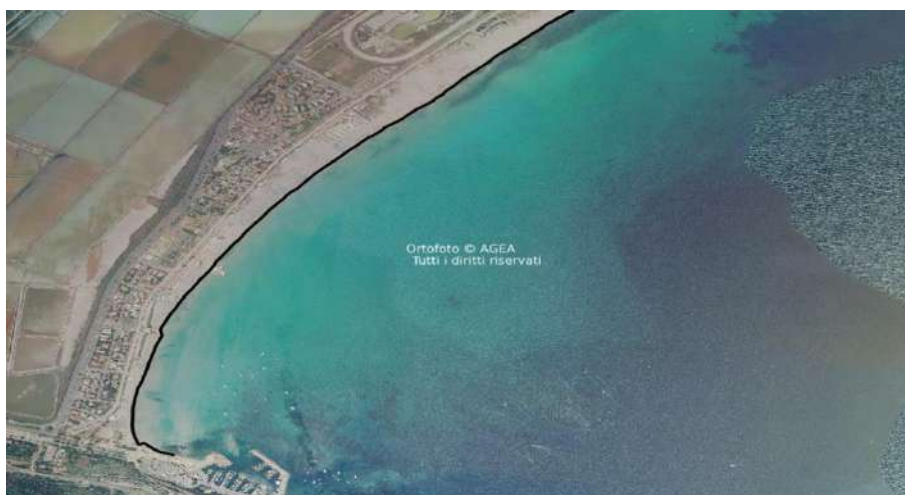


Figura 45, andamento linea di riva spiaggia Poetto 2019.



Figura 46, risultato erosione spiaggia Poetto dal 2003 al 2019.

Poetto (Cagliari)		
Arretramento	70	m
Anni	17	anni
Tasso di erosione annuo	4.12	m/anno

Tabella 6, resoconto dati delle linee di costa e il tasso di erosione.

La stessa situazione è stata riscontrata nella spiaggia di Cala Pira. In Figura 47 si riporta l'andamento linea di riva spiaggia di Cala Pira nel 1968, nella Figura 48 viene inserito l'andamento linea di riva spiaggia di Cala Pira nel 2019 e nella Figura 49 viene riportata la porzione di spiaggia erosa dal 1968 al 2019. I risultati numerici di tale analisi sono riportati in Tabella 7 un resoconto sui dati delle linee di costa e il tasso erosione.



Figura 47, andamento linea di riva spiaggia Cala Pira 1968.



Figura 48, andamento linea di riva spiaggia Cala Pira 2019.



Figura 49, risultato erosione spiaggia Cala Pira dal 1968 al 2019.

Cala Pira (Castiolas)		
Arretramento	20	m
Anni	52	anni
Tasso di erosione annuo	0.38	m/anno

Tabella 7, resoconto dati delle linee di costa.

3.6 Considerazioni riassuntive

L'analisi dei dati storici di moto ondoso e di vento si è rivelata fondamentale per la comprensione delle condizioni meteomarine che hanno caratterizzato il periodo storico che va dal 1959 al 2021. Sono state utilizzate molteplici dati ed informazioni ad oggi disponibili, incluse le analisi sui dati di moto ondoso effettuate dai centri Europei dedicati allo studio e alla rianalisi dei variabili meteo climatiche (ECMWF).

Mentre le condizioni meteomarine sembrano rimaste più stabili nei settori Nord-Ovest e Nord-Est, sono evidenti le modifiche delle condizioni di clima ondoso e di vento nei settori Sud-Ovest e Sud-Est, per i quali sono state riscontrati degli incrementi sulle altezze d'onda significative da punto di vista statistico. Tali incrementi sono stati riscontrati anche sui dati storici di vento per entrambi i settori.

Le conseguenze di tali variazioni hanno portato, nel corso degli anni, a una modificazione della fascia costiera, testimoniata dall'intensificarsi dei processi erosivi. Gli esempi dell'analisi dell'evoluzione storica della linea di riva nelle spiagge di Perd'e Sali, del Poetto e di Cala Pira ha evidenziato un fenomeno erosivo particolarmente intenso nel periodo 1968-2019. In particolare, si è registrato un arretramento della linea di riva di circa 70 metri nella spiaggia del Poetto, mentre negli altri due casi studio questo è stato di circa 20 metri. Nel corso degli anni, sui settori in esame sono aumentate le condizioni meteo climatiche sfavorevoli che hanno determinato l'incremento dei fenomeni erosi, maggiormente accentuati nei tratti di costa già sottoposti a fenomeni erosivi.

In aggiunta, l'aumento della percentuale dei giorni consecutivi di tempesta comporta un incremento delle possibili situazioni avverse alla navigazione, poiché i naviganti potrebbero trovarsi più frequentemente in condizioni di mare agitato. In queste circostanze, diventa essenziale mettere a disposizione dei naviganti la possibilità di trovare rifugio in adeguate strutture portuali, il cui numero è attualmente al di sotto delle esigenze.

Infatti, buona parte della costa est, e su tutta la costa ovest dell'isola, si registra un numero ridotto di opere portuali/rifugi per Km di costa. Questi, sarebbero invece fondamentali per una navigazione sicura, soprattutto in un contesto nel quale le condizioni meteomarine stanno diventando sempre più severe.

4 Indicazioni e linee guida sulle modalità progettuali da adottarsi per tenere conto del cambiamento climatico futuro

Nell'ottica di una progettazione futura delle opere marittime è fondamentale tenere conto degli effetti dei cambiamenti climatici. Di seguito vengono fornite delle possibili indicazioni sulle modalità progettuali da adottarsi per tenere conto dei possibili effetti del cambiamento climatico sulla progettazione delle opere marittime. Sono state adottate le metodologie di una progettazione classica e di una futura che aggiorna le stime dei parametri di progetto sulla base degli scenari climatici futuri, con lo scopo di confrontare le possibili variazioni dei parametri di riferimento progettuali nel rispetto dei vincoli progettuali. I dati meteoroclimatici impiegati per la progettazione futura sono quelli pubblicati nei report dell'IPCC, che prevedono un incremento del livello medio del mare per entrambi i due scenari Representative Concentration Pathway (RCP) che corrispondono a un ottimistico scenario di emissione in cui le emissioni iniziano a diminuire oltre il 2040 (RCP4.5) e uno scenario pessimistico in cui le emissioni continuano ad aumentare per tutto il secolo, spesso chiamato scenario normale (RCP8.5). Il clima delle onde in questi scenari è simulato usando la forza del vento da un membro dell'insieme di modelli climatici EURO-CORDEX - il modello climatico regionale HIRHAM5 ridimensionato dal modello climatico globale EC-EARTH. Oltre ai tre scenari climatici, anche le serie temporali vengono calcolate utilizzando la forzatura del vento di rianalisi ERA5. Ciò fornisce il clima delle onde storiche recenti che può essere utilizzato, ad esempio, per osservare eventi specifici nel passato. Oltre al dato futuro di moto ondoso, è stata presa in considerazione la modifica del livello medio del mare che si prevede possa incrementare notevolmente. Nel golfo di Cagliari si prevede una variazione del livello medio del mare che può essere di 0.78 m nel 2100 (Figura 50).

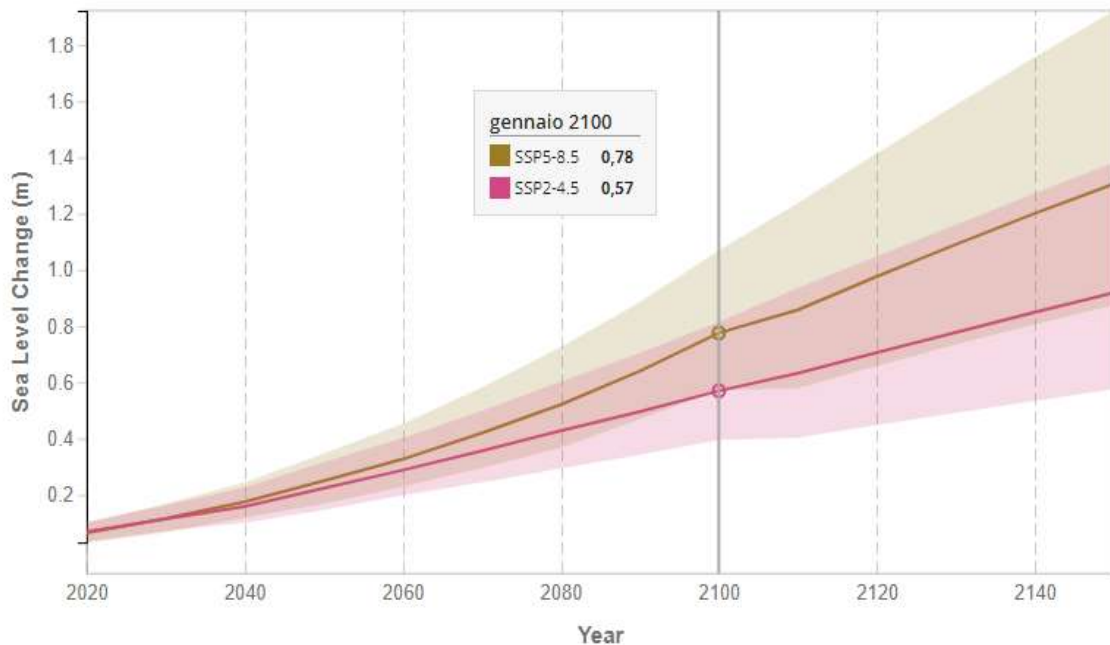


Figura 50 Modifica del livello medio del mare, fonte IPCC

Esemplificativamente, si sono considerati due dei casi di studio già oggetto di analisi degli effetti erosivi indotti dalle modifiche del clima meteomarinò descritte nel capitolo precedente.

Il caso di studio della spiaggia e del porto di Perd'e Sali

La spiaggia di Perd'e Sali si trova sulla costa Sud-Est dell'isola, ed è limitata dal porto di Marina di Perd'e Sali e dalla spiaggia di Porto Columbu (Figura 51)



Figura 51 ortofoto spiaggia dei Perd'e Sali

La distribuzione delle direzioni in funzione delle altezze di moto ondoso demarca una chiara tendenza del moto ondoso prevalente in direzione dello scirocco, sia nella serie storica dei dati raccolti dal 2015 al 2023 (Figura 52) sia in quella dei dati futuri IPCC dal 2040 al 2100 con scenario pessimistico RCP 8.5 (Figura 53). L'altezza d'onda di progetto stimata attraverso la distribuzione di Weibull fissata per un tempo di ritorno di 100 anni è di 6.46 m in riferimento ad uno scenario pessimistico RCP 8.5 (Figura 54).

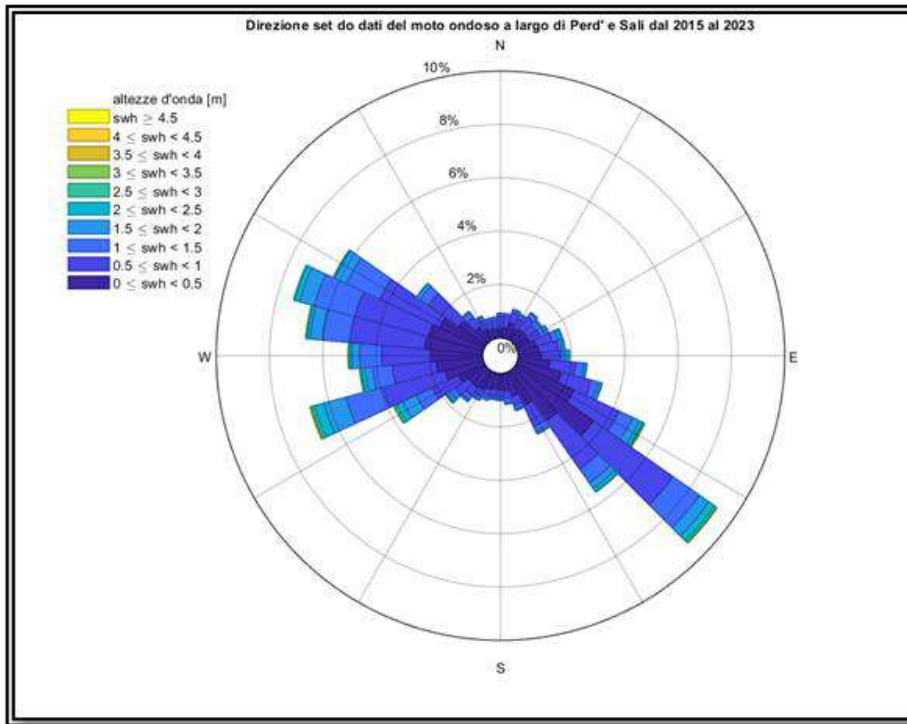


Figura 52 direzione dei dati di moto ondoso al largo del golfo di Perd'e Sali dei dati raccolti dal 2015 fino al 2023

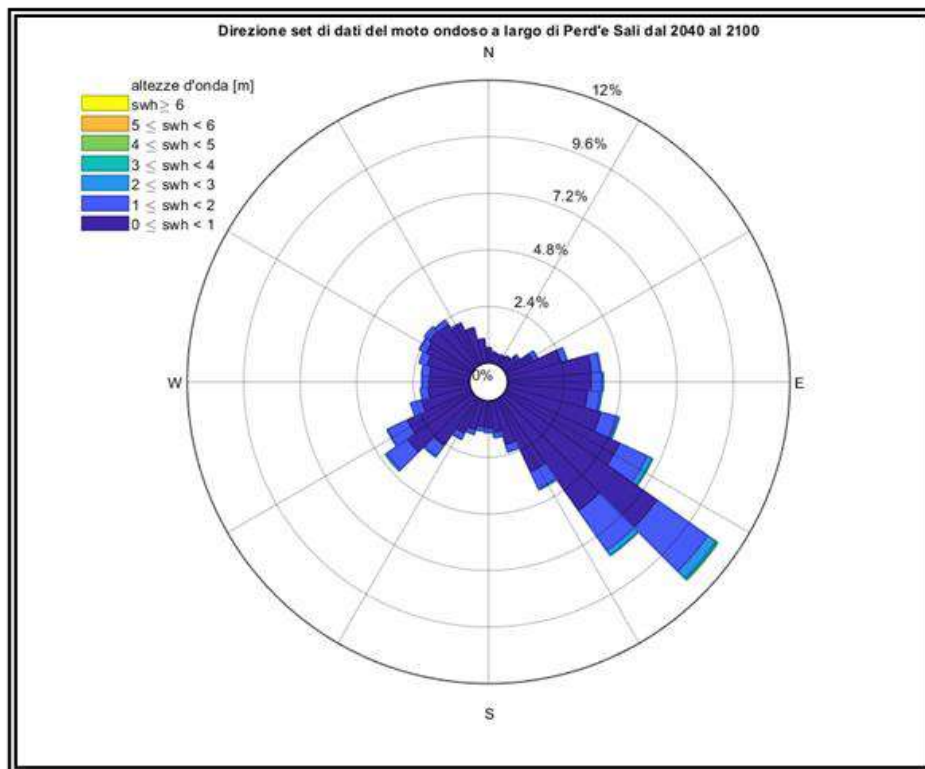


Figura 53 direzione dei dati di moto ondoso al largo del golfo di Perd'e Sali dei dati stimati dal 2040 fino al 2100

Lo studio degli effetti del cambiamento climatico sul litorale è stato condotto utilizzando due diversi modelli numerici: il primo di tipo idrodinamico ed il secondo dedicato alla simulazione del trasporto di sedimenti non

coesivi, interfacciandoli in modo da poter modellare la trasformazione del moto ondoso e la generazione di correnti longshore e cross-shore, che nella realtà risultano le principali forzanti per la movimentazione di sedimenti non coesivi e per i conseguenti fenomeni di trasporto.

In questo modo è stato possibile evidenziare come le modifiche previste del clima meteo marino possono influenzare le condizioni idrodinamiche locali. Per il raggiungimento degli obiettivi è stato utilizzato il software S.M.S. (Surface-water modeling system) il quale dispone di un modulo contenente un modello di tipo spettrale per la propagazione delle onde a riva (Stwave) e un modello ad una linea per la rappresentazione dell'evoluzione della linea di riva (Gencade). La figura 54 mostra la propagazione a terra di un'onda, la più alta della serie storica.

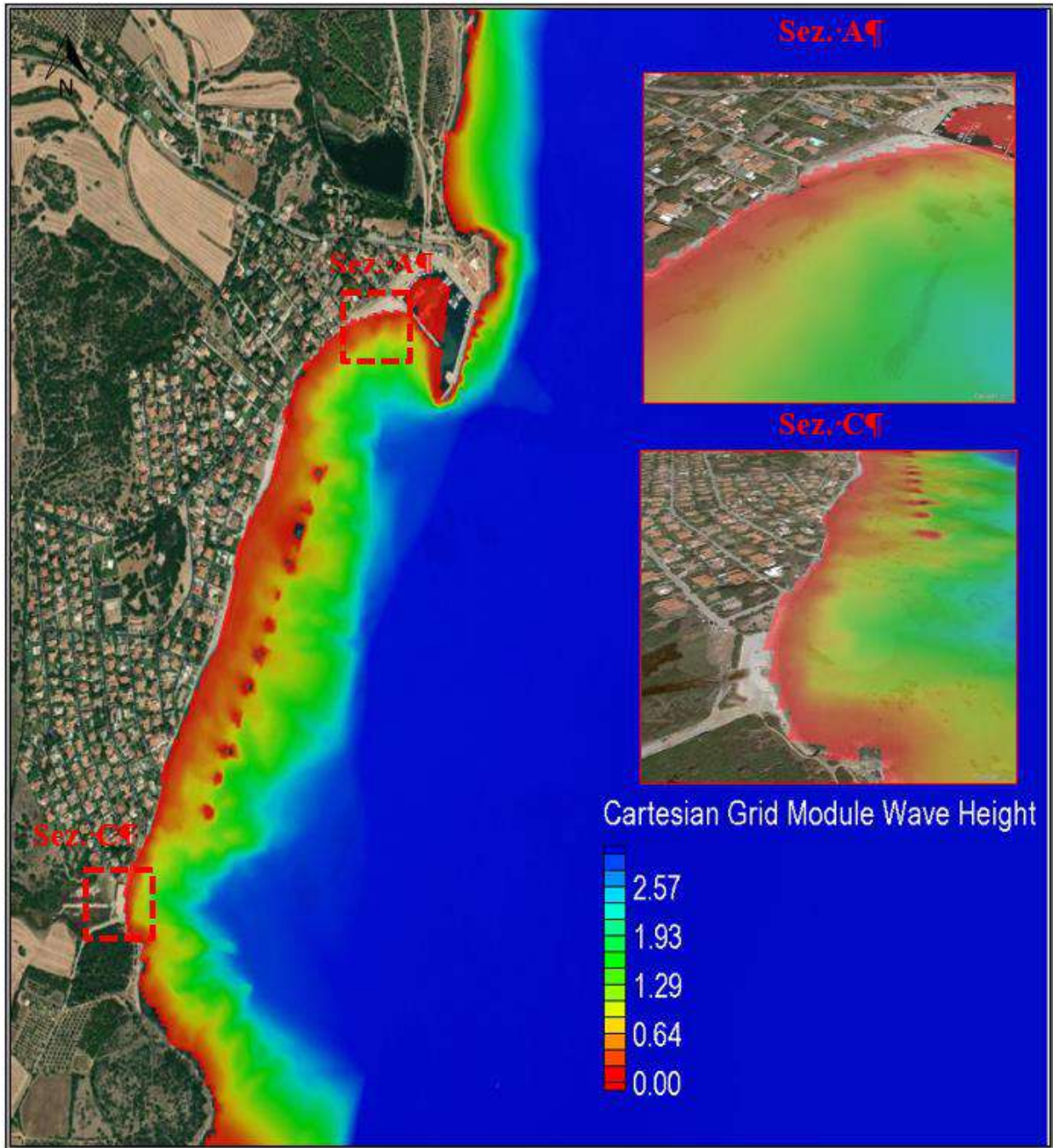


Figura 54 propagazione dell'onda più alta della serie storica del modello

Il modello SMS è stato calibrato utilizzando dati storici e poi utilizzato per simulare il moto ondoso futuro per il periodo 2060-2070. I dati di input al modello sono quelli di moto ondoso previsti dall'IPCC unitamente alla variazione del livello medio del mare.

Sulla base degli output del modello di propagazione, è stata definita la direzione del moto ondoso risultante, ossia la direzione di provenienza delle onde con altezza più significativa. L'analisi è stata svolta considerando sia le condizioni di moto ondoso future che il previsto innalzamento del livello medio del mare.

L'analisi delle frequenze, è stata condotta considerando i settori di spiaggia con direzione ad essa normale pari a 173°N, 95°N, 121°N, 93°N e per ciascuna di esse si riportano le direzioni del moto ondoso risultante determinate sia utilizzando i dati di moto ondoso propagati che quelli non propagati, insieme ad altri parametri energetici e la portata globale di sedimento (Tabella 8).

condizioni future scenario pessimistico 8.5 2060-2070							
	dati propagati	direzione normale alla riva (N°)	direzione moto ondoso risultante (N°)	direzione	settore	Plbs e energia watt/m	Portata globale Qg [m3/anno]
Scenario 4	Direzione 1	173	236.1	libeccio	E	35.5	45749.9
	Direzione 2	95	111.1	levante	SW	33.7	43459.0
	Direzione 3	121	143.9	scirocco	S	31.9	41139.4
	Direzione 4	93	110.4	levante	SW	35.4	45707.7
	dati non propagati						
	Direzione 1	173	218.20	libeccio	E	51.25	66112.8
	Direzione 2	95	128.00	scirocco	S	50.31	64893.6
	Direzione 3	121	144.33	scirocco	S	37.24	48038.2
	Direzione 4	93	127.36	scirocco	S	50.41	65034.5

Tabella 8 dati riassuntivi

Nella Tabella 9 si riporta il confronto fra le direzioni del moto ondoso, determinate per i settori di spiaggia aventi direzione normale di 173°N e 93°N, stimate per le condizioni attuali e quelle future. Emerge una modifica delle direzioni del moto ondoso rispetto alle condizioni attuale unitamente alla modifica del contenuto energetico per entrambi i settori considerati. Inoltre, anche per lo scenario futuro si prospetta una ulteriore riduzione della spiaggia a causa dei fenomeni erosivi così come mostrato dalla Figura 55.

Direzione di 173°N Sezione A				Direzione di 93°N Sezione b		
	Direzione moto ondoso	DIREZIONE	Energia Watt/m	Direzione moto ondoso	DIREZIONE	Energia watt/m
Stato attuale	237.3°N	Libeccio	32.8	111.1°N	levante	<u>33.3</u>
Scenario futuro	236.1°N	Libeccio	35.5	110°N	levante	<u>35.5</u>

Tabella 9 Analisi delle direzioni del moto ondoso

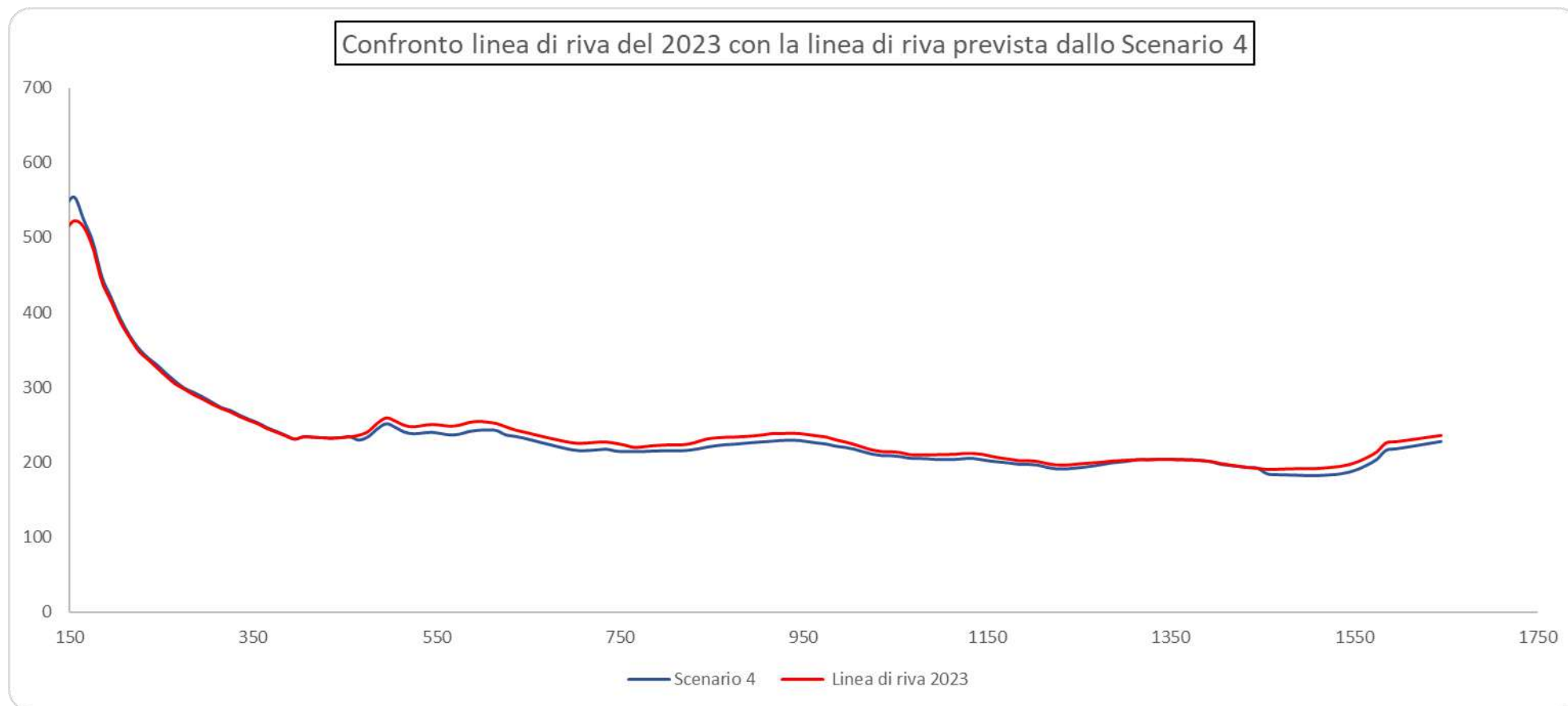


Figura 55 confronto linee di riva 2023 con lo scenario

Il caso di studio della spiaggia del Poetto

Il tratto di costa oggetto di studio è riferito alla spiaggia del Poetto (Figura 56) che si inquadra nel contesto di studio evolutivo delle spiagge del sud Sardegna come una spiaggia bassa e sabbiosa; si estende sul versante orientale del Golfo di Cagliari, nel settore sud est dell'isola, dal promontorio della Sella del Diavolo all'Ospedale Marino in territorio di Cagliari e da questo punto sino al Margine Rosso in territorio di Quartu Sant'Elena per una lunghezza complessiva di circa 7700 m.

La spiaggia del Poetto, oltre ad essere interessata da fenomeni erosivi a lungo termine è stata oggetto nell'anno 2002 di un intervento di ripascimento. Per tale motivo si è pensato di applicare i modelli numerici sviluppati alla riproduzione di uno scenario critico dal punto di vista erosivo in cui la movimentazione del sedimento rappresenta un fattore decisivo per la stabilità e l'equilibrio della costa.



Figura 56 ortofoto spiaggia del Poetto

La serie dei dati ottenuta dalle previsioni IPCC è stata utilizzata per caratterizzare gli eventi estremi prevedibili al largo della costa del Golfo di Cagliari nel periodo che va dal 1/01/2040 al 31/12/2100 con uno scenario pessimistico, e confrontata con quelli storici dal 1/01/2001 al 31/12/2022. I risultati forniti dal modello evidenziano gli eventi ondosi che possono interessare l'area in esame, i quali provengono prevalentemente da un settore compreso tra 90°N e 180°N (Figura 57 e Figura 58)

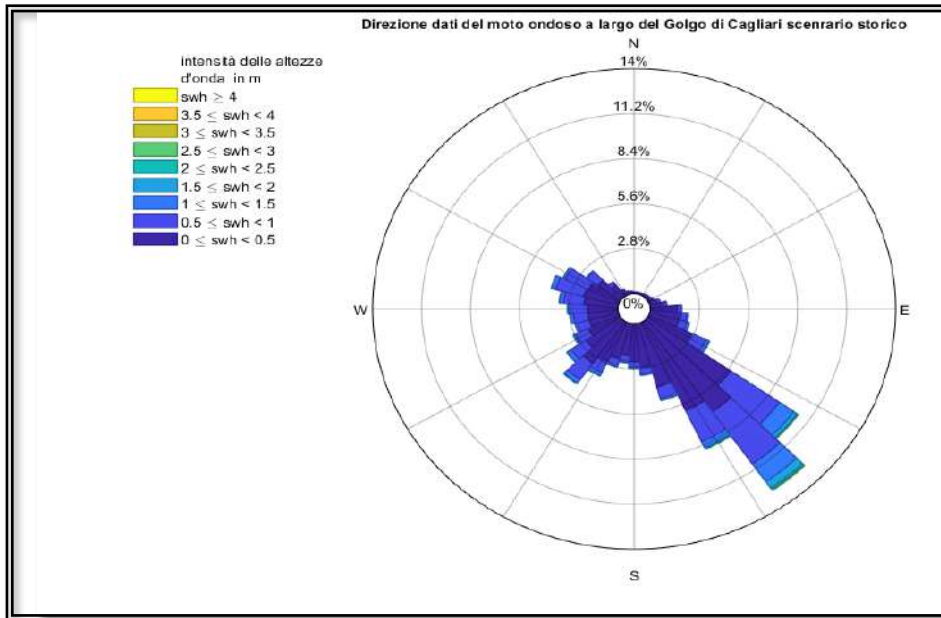


Figura 57 direzione dei dati di moto ondoso al largo del golfo Cagliari dei dati raccolti dal 2002

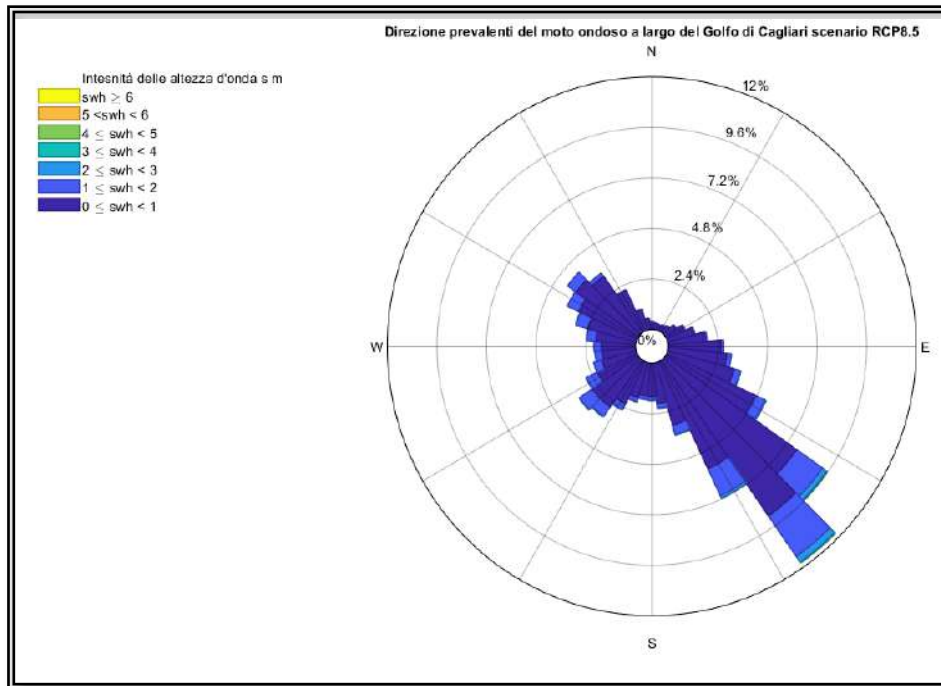


Figura 58 direzione dei dati di moto ondoso a largo del golfo Cagliari in riferimento ai dati simulati dal modello dal 2040 al 2100

Per la determinazione dell'onda di progetto sono state elaborate statisticamente le altezze d'onda maggiori, facendo riferimento alla serie di dati storica e a quella dei dati relativi allo scenario futuro.

Mediante la regolarizzazione della serie degli eventi estremi, secondo note funzioni probabilistiche, è stato possibile ricavare le caratteristiche del moto ondoso (definite in termini di altezza significativa e periodo) da associare ad assegnati tempi di ritorno (o probabilità di occorrenza).

L'individuazione di ciascuna mareggiata nell'ambito della serie storica viene effettuata con un numero limitato di valori corrispondenti agli eventi di picco annuali, esse sono state elaborate facendo prima una regolarizzazione statistica, riorganizzando i dati dal più piccolo al più grande e successivamente tramite le usuali leggi di distribuzioni statistiche ove sono stati determinati i valori prefissati del tempo di ritorno o probabilità di non superamento durante la vita utile dell'opera.

Per la serie di altezze massime annuali si è verificato l'adattamento di diverse distribuzioni probabilistiche usualmente impiegate per l'analisi di eventi estremi, in particolare si sono usate la distribuzione di Gumbel, la distribuzione LogNormale e la distribuzione di Weibull.

Come previsto, le altezze d'onda di progetto stimate utilizzando i dati climatici futuri e considerando l'incremento del livello medio del mare sono risultate inferiori a quelle stimate utilizzando la serie storica dei dati.

L'altezza d'onda di progetto fissata per un tempo di ritorno di 100 anni avrà un'altezza massima di 6.26 m utilizzando le previsioni future del IPCC, l'altezza d'onda di progetto, fissata per un tempo di ritorno di 100 anni, sulla base dei dati storici è di 5.47 m (Tabella 10)

Tabella riassuntiva			
Tr	Hsr weibull	Hsr Gambell	Hsr LogNormale
100	6.26	6.39	5.99
200	6.62	6.86	6.33
500	7.07	7.48	6.76

Tabella 10 tabella riassuntiva delle altezze d'onda relative al tempo di ritorno

Il modello SMS dopo essere stato opportunamente calibrato e validato per il caso in esame è stato utilizzato per la simulazione degli effetti indotto dalla variazione del livello medio del mare prevista dal 2023 al 2070 e utilizzando i dati climatici futuri relativi allo scenario pessimistico fra quelli disponibili.

Nella Figura 59 è rappresentato un grafico di confronto tra la linea di riva del 2023, punto di partenza del modello e quella finale elaborata dal modello SMS per l'anno 2070, che mostrano una riduzione della linea di riva a causa degli effetti indotti dai cambiamenti climatici.

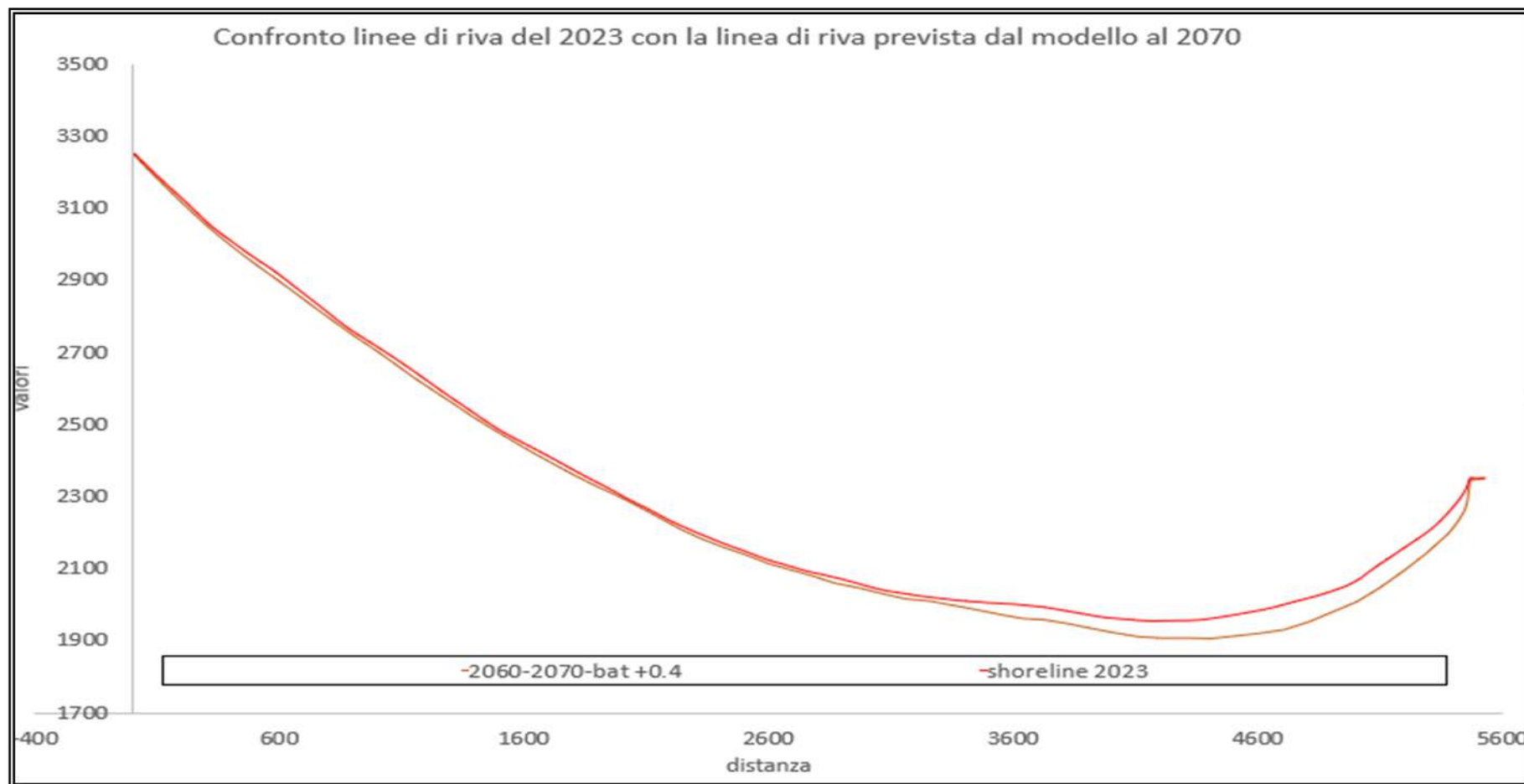


Figura 59 confronto delle linee di riva dello scenario 4 con la linea di riva del 2023

Successive analisi sulla serie di dati del moto ondoso hanno permesso di definire la direzione del moto ondoso risultante definite per settori di spiaggia caratterizzati da direzione normale pari a 148°N, 134°N, 119°N, 102°N e valutate sia sottocosta che al largo.

Lo studio dei dati riassunti in Tabella 7 mostra come la zona più critica caratterizzata da una normale di 102°N e 119°N sia influenzata da un flusso Plbs di energia pari a circa 68Watt/m, per la serie d’onda propagata.

Nella Tabella 11 viene presentata una comparazione tra i risultati della stima del moto ondoso nell'attuale stato e quelli ottenuti per lo scenario futuro, specificamente nel settore con normale alla spiaggia di 134°N. Emergono chiaramente una significativa variazione della direzione del moto ondoso, pari a circa 7°N, e un notevole incremento dell'energia del moto ondoso di circa 40 W/m. Questo aumento di energia, insieme alla modifica della direzione del moto ondoso, rappresenta un importante insieme di fattori che contribuiranno alla modifica prevista della linea di riva nel 2070 a causa della variazione del livello e del moto ondoso.

condizioni future scenario pessimistico 8.5 2060-2070							
	dati propagati	direzione normale alla riva (N°)	direzione moto ondoso risultante (N°)	direzione	settore	Plbs energia watt/m	Portata globale Qg [m3/anno]
Scenario 4	Direzione 1	148	167.7	ostro	SE	23.8	30692.1
	Direzione 2	134	156.1	scirocco	S	54.1	69798.1
	Direzione 3	119	152.2	scirocco	S	68.0	87688.7
	Direzione 4	102	149.0	scirocco	S	68.0	87685.5
	dati non propagati						
	Direzione 1	148	170.48	ostro	SE	33.53	43255.0
	Direzione 2	134	156.00	scirocco	S	24.20	31215.1
	Direzione 3	119	144.21	scirocco	S	35.84	46229.2
	Direzione 4	102	137.69	scirocco	S	44.25	57084.1

Tabella 11 dati riassuntivi

Direzione di 134°N Sezione A	Direzione moto ondoso risultante	DIREZIONE	Energia Watt/m
Scenario attuale	158.7°N	OSTRO	<u>30.5</u>
Scenario futuro	152.2°N	SCIROCCO	<u>68.1</u>

Tabella 12 dati riassuntivi

4.1 Considerazioni riassuntive

Sono state effettuate una serie di analisi che risultano propedeutiche alla definizione dei parametri progettuali necessari alla realizzazione delle opere marittime. Utilizzando le previsioni meteomarine degli scenari futuri del IPCC, ed un software per la modellazione delle acque superficiali (SMS), sono state determinate le caratteristiche del moto ondoso risultante per le condizioni future e comparate con quelle attuali.

Si è mostrato come gli effetti del cambiamento climatico potrebbero determinare non solo l’incremento dell’altezza d’onda di progetto, ma una modifica della direzione del moto risultante ed una considerevole variazione dell’energia del moto ondoso.

L'altezza e la direzione del moto ondoso risultante sono determinanti per la progettazione delle opere portuali. Pertanto, si ritiene indispensabile, in sede di progettazione di nuove opere marittime, effettuare la verifica delle condizioni di moto ondoso anche in un'ottica di cambiamento climatico.

5 Sistema di monitoraggio del moto ondoso lungo le coste della Sardegna.

La progettazione di nuove opere marittime richiede la disponibilità di dati ondametrici attendibili. Attualmente lo studio meteomarinario delle coste della Sardegna deve essere purtroppo eseguito utilizzando informazioni, quali quelle di ERA5, che non sono comunque su dati osservati nelle coste sarde, determinando quindi delle inevitabili approssimazioni ed incertezze. Ecco quindi che risulta indispensabile l'utilizzo viceversa anche di dati ondametrici osservati lungo le coste sarde. Il monitoraggio dello stato fisico del mare e il rilievo delle grandezze relative al clima marino e marittimo, inclusa l'analisi ed il reporting era dapprima gestita dal vecchio Servizio idrografico e mareografico italiano del Ministero dei Lavori Pubblici e attualmente dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), ente pubblico di ricerca nato nel 2008.

Le boe ondametriche consentono la rilevazione dei parametri che seguono:

- TP: Periodo di picco (misurata in sec);
- TM: Periodo medio (misurata in sec);
- DIR: Direzione media di provenienza del moto ondoso (misurata in °N);
- HS-TP: altezza del moto ondoso-periodo di picco;
- HS-TM: altezza del moto ondoso-periodo medio;
- HS-DIR: altezza del moto ondoso-direzione di provenienza del moto ondoso;
- dati meteorologici (temperatura di acqua/aria, umidità, pressione, velocità e direzione del vento)



Boa ondametria.

La rete ondametrica prevedeva 3 boe ondametriche, una ad Alghero, una a Siniscola e ultima a Cagliari (Figura 60). Purtroppo, oggi in Sardegna è operativa la sola boa di Alghero, mentre le stazioni di Siniscola e Alghero sono state dismesse (Figura 61).



Figura 60 Boe di misura fino agli anni 2000

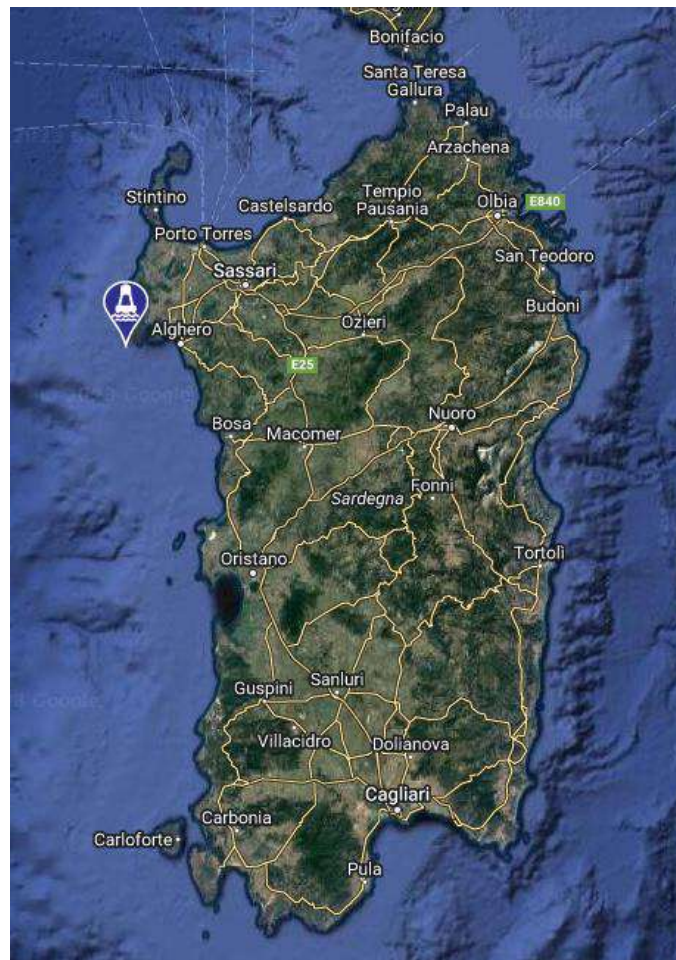


Figura 61 Boe di misura oggi

Le coste della Sardegna sono esposte a condizioni meteomarine assai differenti, a seconda della loro esposizione. Le coste occidentali e orientali, quelle a nord e quelle a sud, sono tutte esposte ad onde estreme ma di differente direzione vista la differente esposizione. Quindi, non è pensabile effettuare il monitoraggio ondametrico solo in una stazione.

Pertanto, è fondamentale incrementare il numero di stazioni di monitoraggio istituendo una rete di misura che preveda l'istallazione di almeno ulteriori 5 stazioni di misura (Figura 62).

La disposizione delle nuove stazioni (Figura 62) consentirebbe il monitoraggio delle differenti condizioni meteomarine che caratterizzano l'isola. Le informazioni sarebbero fondamentale per l'individuazione di eventuali modifiche sui regimi di moto ondoso e sarebbero lo strumento fondamentale per la progettazione delle opere marittime. Inoltre, sarebbe auspicabile la gestione in tempo reale delle stazioni di misura in modo da poter finire informazioni utili ai naviganti, con risvolti positivi sulla sicurezza della navigazione.



Figura 62 Predisposizione del nuovo sistema di monitoraggio