



Ricerca di Sistema elettrico

## **Produzione di climatologie presenti e future dello stato del mar Mediterraneo**

A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, M.V. Struglia, E. Napolitano, R. Iacono

## PRODUZIONE DI CLIMATOLOGIE PRESENTI E FUTURE DELLO STATO DEL MAR MEDITERRANEO

A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, M.V. Struglia, E. Napolitano, R. Iacono

Aprile 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: *(Energia elettrica dal mare)*

Linea di attività: Produzione di climatologie presenti e future della circolazione (comprese le maree) e dello stato del mare nel Mediterraneo (LA1.8)

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino ENEA

Responsabile del Work package: Gianmaria Sannino ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Piano triennale di realizzazione 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale*"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Giuliana Mattiazzo

## Indice

SOMMARIO .....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI.....	5
2.2 VALIDAZIONE DEI RISULTATI .....	7
2.2.1 <i>Validazione rispetto ai dati da satellite</i> .....	7
2.2.2 <i>Validazione rispetto ai dati delle boe</i> .....	8
2.3 ANALISI DEL CLIMA PRESENTE .....	16
2.4 RISORSA ENERGETICA FUTURA .....	27
3 CONCLUSIONI .....	36
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	37

## Sommario

Il presente rapporto descrive le attività relative alla produzione di climatologie delle onde nel bacino mediterraneo. L'attività è stata svolta con due obiettivi distinti: da una parte la descrizione ad alta risoluzione spaziale del clima attuale, e dall'altra una analisi del possibile cambiamento della risorsa ondosa al variare delle condizioni climatiche future. La climatologia relativa al clima presente è stata realizzata alla risoluzione di  $1/32^\circ$  utilizzando come forzanti atmosferici i campi di vento generati da un modello regionale accoppiato oceano-atmosfera, per un periodo di 36 anni.

Per la valutazione dell'effetto dei cambiamenti climatici, sono state realizzate simulazioni alla risoluzione di  $1/16^\circ$ , relative a dieci anni del periodo storico e ad intervalli della stessa lunghezza a due diversi orizzonti temporali.

Nel presente rapporto vengono descritte le simulazioni effettuate e presentate le climatologie relative. Vasto spazio è dedicato alla validazione della climatologia del clima attuale, realizzata tramite il confronto delle altezze significative delle onde con i valori registrati dalle boe della rete ondometrica nazionale (RON) e con i dati satellitari.

Confronti tra le medie mensili ottenute dalla simulazione di scenario e quella del periodo storico saranno inoltre presentati.

## 1 Introduzione

La caratterizzazione del clima ondoso costituisce un importante punto di riferimento per lo sviluppo dello sfruttamento energetico della risorsa ondosa.

All'interno delle attività sviluppate dall'ENEA nell'ambito del PAR è stata realizzata, negli anni passati, una climatologia relativa all'intero bacino mediterraneo per gli anni 2001-2010, alla risoluzione spaziale di  $1/16^\circ$ . La disponibilità di nuovi *downscaling* della forzante atmosferica, elaborati a partire dalle rianalisi ERA-interim di ECMWF, ha permesso di migliorare questa climatologia sia usando un intervallo temporale più ampio, che aumentando la risoluzione spaziale che in questo caso è stata portata a  $1/32^\circ$ . Il forzante atmosferico attualmente in uso, è stato ricavato da una simulazione effettuata con un modello regionale alla risoluzione di 15 km ed è stata estesa su 35 anni.

Una valutazione del possibile cambiamento della risorsa negli anni futuri è inoltre importante per una programmazione degli investimenti. Sono state quindi realizzate climatologie decennali a partire da simulazioni atmosferiche di clima futuro utilizzando lo scenario RCP8.5 (Representative Concentration Pathways), che, tra gli scenari prodotti, rappresenta la situazione più pessimistica dal punto di vista delle emissioni. In questo caso è stata utilizzata una versione del modello di onde alla risoluzione di  $1/16^\circ$ .

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Descrizione delle simulazioni

La simulazione del clima ondoso per il bacino Mediterraneo, per il periodo presente, è stata effettuata utilizzando come forzante superficiale i campi di vento a 10 m prodotti da una simulazione di *hindcast* eseguita con un modello regionale accoppiato oceano-atmosfera. La simulazione è stata effettuata sul periodo 1980-2015.

Il modello regionale accoppiato è formato da un modello atmosferico ed uno oceanico che scambiano regolarmente informazioni sulle variabili fisiche all'interfaccia aria-mare tramite un driver, l'*Earth System Modeling Framework* (ESMF) (Hill et al. 2004, Collins et al 2005). La componente atmosferica riceve i valori di temperatura superficiale del mare dal modello oceanico che a sua volta riceve i valori di pressione superficiale, le componenti del vento e i flussi di acqua (evaporazione e precipitazione) e di calore dal modulo atmosferico. Lo scambio tra le due componenti avviene ogni 3 ore. I risultati della simulazione accoppiata sono stati validati rispetto alle stesse rianalisi e a dataset osservativi; un'accurata descrizione della validazione è contenuta in un articolo attualmente in via di revisione (GMD 2020).

#### **La componente atmosferica WRF**

La componente atmosferica è costituita dal modello regionale WRF (*Weather Research Forecast*), la cui discretizzazione spaziale è fatta su una griglia di tipo Arakawa-C. WRF inoltre può essere utilizzato sia in modalità idrostatica che non idrostatica. Il modello è stato originariamente sviluppato dal *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) con la doppia finalità, sia di ricerca che di previsione meteorologica. Successivamente, WRF è stato ulteriormente sviluppato da diverse università e centri di ricerca di tutto il mondo e attualmente offre una vasta gamma di schemi numerici e parametrizzazioni.

Le simulazioni utilizzate in questo studio sono basate sul nucleo dinamico ARW (Advanced Research WRF, versione 3.8.1) (Skamarock et al., 2008). Il dominio di calcolo copre l'intera Europa continentale e l'intero bacino Mediterraneo con una risoluzione spaziale orizzontale di 15 km e con 35 livelli verticali che si estendono dalla superficie fino al livello di 50 hPa. Le condizioni iniziali e laterali sono prescritte in base alla rianalisi globale ERA-Interim del Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF) (Dee et al, 2011) che ha una risoluzione orizzontale di circa 75 km e temporale di 6 ore.

Nelle simulazioni di WRF è stato applicato il *nudging* spettrale ai campi di temperatura, alle componenti del vento e al contenuto di umidità al di sopra dello strato limite planetario. Questa tecnica consente di mantenere il modello regionale maggiormente vicino al forzante globale, accorgimento che si rivela particolarmente utile nel caso di una simulazione di *hindcast*, il cui scopo è riprodurre quanto più fedelmente il clima osservato.

### **La componente oceanica MITgcm**

Il modello di circolazione oceanica è basato sul Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model (MITgcm version c65; Marshall et al., 1997). Il MITgcm nella configurazione attuale è utilizzato nella versione idrostatica già messa a punto per il mar Mediterraneo (Reale et al 2019). Il dominio copre tutto il bacino mediterraneo alla risoluzione orizzontale di  $1/12^\circ$  con condizioni laterali nella zona atlantica. Nella verticale il modello è discretizzato usando 75 livelli distribuiti in modo non uniforme a partire da 1 m alla superficie fino a circa 300 m nei livelli inferiori.

### **Il modello di onde WAVEWATCHIII**

Il modello di onde utilizzato è il modello WAVEWATCHIII (WW3), versione v6.07 (The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG), 2019). WW3 è un modello spettrale di terza generazione sviluppato inizialmente presso la Delft University of Technology (Tolman 1989, 1990, 1991), e successivamente presso lo US National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP) (Tolman, 2014; WW3DG, 2016). WW3 risolve l'equazione di bilancio della densità spettrale per spettri funzione di numero d'onda e direzione.

Il modello è stato inizialmente sviluppato per la simulazione in acque profonde ma nelle successive versioni sono stati introdotte opzioni che permettono di considerare termini caratteristici delle acque molto basse.

Per questo studio, è stata realizzata una climatologia dello stato del mare alla risoluzione spaziale di  $1/32^\circ$ , che corrisponde a circa 3 km alla latitudine di  $45^\circ\text{N}$ , basata su 36 anni di clima recente, dal 1980 al 2015. I risultati del modello sono stati memorizzati alla risoluzione temporale di 3 ore.

In figura 1 è riportata la batimetria del Mediterraneo usata nella simulazione, ricavata dalla Carta Batimetrica Generale degli Oceani (GEBCO) disponibile alla risoluzione di 30 secondi di arco. Il dominio di calcolo è esteso all'intero bacino Mediterraneo e copre l'area da  $5.50^\circ\text{W}$  a  $36.125^\circ\text{E}$  e da  $30.2^\circ\text{N}$  a  $45.825^\circ\text{N}$ .

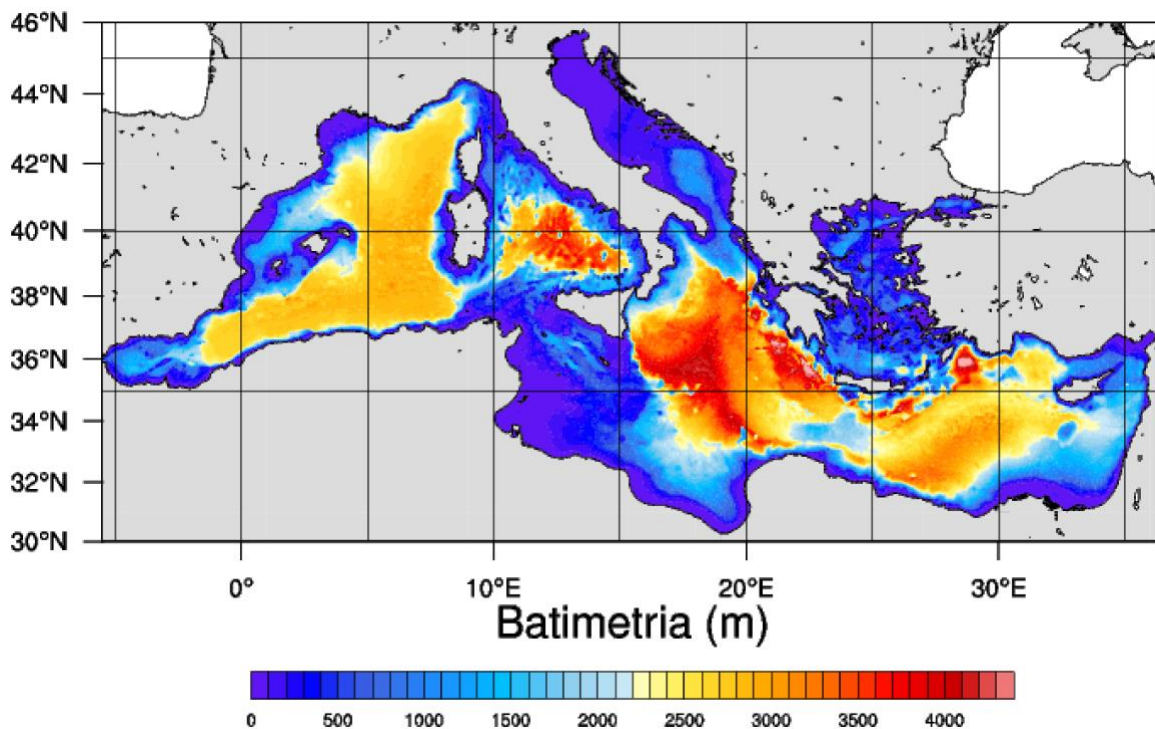


Figura 1 – Batimetria del modello di onde

## 2.2 Validazione dei risultati

Un'accurata validazione dei risultati del modello è stata eseguita utilizzando i dati osservativi disponibili: sia le boe della rete ondometrica nazionale (RON) che i dati satellitari.

### 2.2.1 Validazione rispetto ai dati da satellite

Le osservazioni da satellite utilizzate per la validazione sono state scaricate dal portale IMOS (Integrated Marine Observing System (<https://portal.aodn.org.au/>)) (Ribal, 2019) gestito dal National Collaborative Research Infrastructure strategy (NCRIS).

IMOS ha un'interfaccia che consente di selezionare facilmente sia l'intervallo temporale che l'area di interesse nonché le diverse missioni satellitari disponibili sul periodo di interesse, ad una risoluzione spaziale di circa 1° per 1°.

Sono stati utilizzati i dati relativi a tutti i satelliti disponibili: Topex, ERS-2, GFO, Jason-1, ENVISAT, Jason-2, Cryosat-2, e HY-2, utilizzando le altezze significative ricavate dalla banda Ku e calibrate attraverso il confronto con le misure alle boe.

I confronti sono stati effettuati sul punto più vicino sia nel tempo che nello spazio, senza effettuare interpolazioni, utilizzando solo i valori per i quali il codice di qualità risultasse uguale a 1 o a 2, che corrispondono a una buona qualità del dato.

In Tabella 1 sono riportate le statistiche relative all'altezza significativa, calcolate per ogni satellite su tutto l'intervallo di anni disponibile. In particolare viene riportato il numero di dati utilizzati per il calcolo dei parametri statistici, la media calcolata sui dati del satellite e sui dati del modello, il *bias* tra il modello e il satellite, la pendenza della retta di *best fit* passante per l'origine, lo *scatter index* e l'indice di Willmott (Willmott, 1982). Quest'ultimo indice è definito come:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i'| + |x_i'|)^2} \right]$$

dove n è il numero di valori usati per il confronto,  $x_i$  la serie dei valori del satellite,  $y_i$  la serie corrispondente di valori del modello,  $x_i' = x_i - \bar{x}$  e  $y_i' = y_i - \bar{y}$ ,  $\bar{x}$  è la media calcolata sui dati del satellite. Il valore 1 dell'indice di Willmott indica un perfetto accordo tra le due serie di dati.

Utilizzando i dati provenienti dalle diverse missioni è stato possibile validare il modello su un elevato numero di anni. Dalla tabella risulta un valore del *bias* sempre molto basso, che raggiunge i 10 cm solo nel caso del satellite CRYOSAT. Il valore della *slope* risulta sempre molto vicino a 1, la sola eccezione è costituita anche in questo caso dal satellite CRYOSAT per il quale si ottiene il valore minimo di 0.925. Nonostante il valore della *slope* sia sempre inferiore all'unità, il *bias* assume sia valori positivi che negativi, non mostrando una sistematica sottostima o sovrastima da parte del modello. Il valore dell'indice di Willmott è generalmente prossimo a 0.95, in questo caso il risultato peggiore risulta quello del satellite HY-2 a cui corrisponde anche il peggior risultato in termini di *rmse* (0.511).

Complessivamente i risultati mostrano un accordo molto buono rispetto ai dati satellitari.

SATELLITE	intervallo anni	n. punti	media (satellite)	media (modello)	bias	rmse	slope	si	d
Topex	1992-2005	1131868	1,159	1,223	0,064	0,358	1,000	0,293	0,953
ERS-2	1995-2009	942989	1,149	1,189	0,040	0,423	0,982	0,355	0,934
GFO	2000-2008	208219	1,375	1,400	0,025	0,361	0,996	0,258	0,954
Jason-1	2002-2013	1058379	1,190	1,230	0,041	0,396	0,985	0,322	0,944
ENVISAT	2003-2012	600777	1,354	1,334	-0,020	0,392	0,966	0,294	0,949
Jason-2	2008-2015	674738	1,214	1,200	-0,014	0,379	0,950	0,316	0,949
CRYOSAT	2010-2015	221248	1,151	1,046	-0,105	0,378	0,925	0,362	0,944
Hy-2	2011-2015	223232	1,528	1,563	0,035	0,511	0,962	0,327	0,904

**Tabella 1 – Statistiche relative al confronto tra i dati di altezza significativa calcolati dal modello WW3 e dati da satellite.**

### 2.2.2 Validazione rispetto ai dati delle boe

Una ulteriore validazione dei risultati del modello è stata effettuata utilizzando le boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita da ISPRA, confrontando i dati di altezza significativa prodotti dalla simulazione di hindcast con le osservazioni. I dati disponibili per le diverse boe sono relativi ad anni diversi, quindi i confronti sono stati effettuati separatamente per ogni boa e per ciascun anno. In tabella 2 sono riportate le posizioni geografiche delle boe e l'intervallo temporale su cui è stato effettuato il confronto. Le posizioni delle boe sono mostrate nella figura 2.

<b>boa</b>	<b>longitudine</b>	<b>latitudine</b>	<b>intervallo anni</b>
<b>Alghero</b>	8.107	40.549	1989-2008
<b>Ponza</b>	12.950	40.867	1989-2008
<b>Monopoli</b>	17.378	40.975	1989-2008
<b>Mazara del Vallo</b>	12.533	37.518	1989-2008
<b>Crotone</b>	17.220	39.024	1989-2008
<b>La Spezia</b>	9.828	43.929	1989-2007
<b>Palermo</b>	13.333	38.258	2002-2003
<b>Ancona</b>	13.710	43.832	1999-2006
<b>Catania</b>	15.147	37.440	1989-2006
<b>Cetraro</b>	15.918	39.453	1999-2008
<b>Civitavecchia</b>	11.554	42.245	2002-2003
<b>Ortona</b>	14.537	42.407	1989-2008
<b>Siniscola</b>	9.892	40.617	2002-2003

**Tabella 2 – Elenco delle boe utilizzate per la validazione, coordinate e anni utilizzati.**

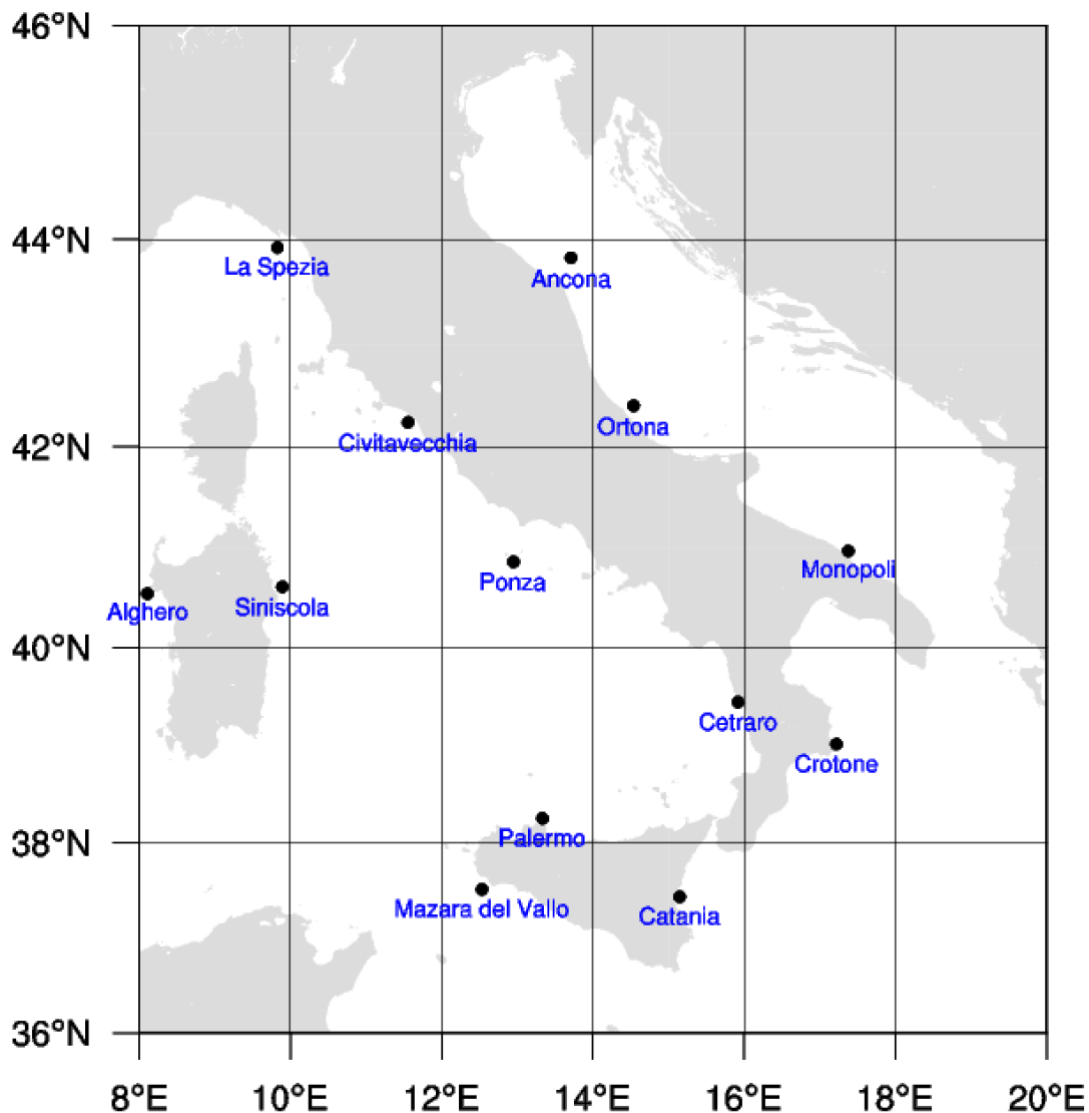


Figura 2 – Posizione delle boe utilizzate per la validazione

In Tabella 3 sono mostrati per ciascuna boa e per ciascun anno, gli stessi parametri statistici già introdotti per il confronto con i dati satellitari. I valori medi di altezza significativa dell'onda sono espressi in metri. Anche in questo caso è stato considerato per il confronto con le osservazioni il dato del modello estratto in un punto prossimo alla boa. I valori delle statistiche risultano fondamentalmente costanti nel tempo ma dipendenti dal sito. Si può innanzitutto osservare che la media dell'altezza significativa calcolata sui dati del modello è inferiore al dato delle boe per la maggior parte dei siti, ad eccezione di Mazara del Vallo, Crotona, Cetraro, Palermo e Siniscola. Questi valori sono confermati dalla pendenza della retta di regressione, che è generalmente inferiore a 1. Nel caso di Mazara e di Crotona invece la pendenza della retta è prossima all'unità ed è accompagnata da un valore di *bias* particolarmente basso, dell'ordine di pochi centimetri. In generale, i parametri statistici calcolati in corrispondenza delle boe di La Spezia, Civitavecchia ed Alghero presentano un minore accordo col dato osservato. Nel caso di Alghero lo scostamento tra il modello e l'osservazione è contenuto intorno alla decina di centimetri e pari al 10% del valor medio di  $H_s$  con una sottostima sistematica del modello rispetto alle osservazioni, il valore della pendenza del best fit risente quindi di questa sottostima sistematica. Anche nel caso di La Spezia c'è una sottostima sistematica del modello che comporta dei valori della *slope* di circa 0.8 ed i dati sembrano avere una maggiore dispersione che nelle altre località prese a confronto.

L'indice di Willmott è comunque elevato per la maggior parte degli anni e delle stazioni ed in media pari a 0.94, indicativo di un buon accordo tra le serie temporali.

anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
<b>Alghero</b>								
1989	1384	1,035	0,938	-0,098	0,396	0,852	0,422	0,948
1990	2774	1,136	1,021	-0,114	0,396	0,869	0,388	0,962
1991	2711	1,237	1,136	-0,101	0,426	0,871	0,375	0,960
1992	2743	1,194	1,076	-0,117	0,354	0,882	0,329	0,969
1993	2711	1,181	1,078	-0,103	0,415	0,859	0,385	0,955
1994	2648	1,205	1,102	-0,103	0,357	0,881	0,324	0,968
1995	2856	1,259	1,133	-0,126	0,399	0,862	0,352	0,966
1996	2771	1,352	1,270	-0,081	0,431	0,889	0,340	0,963
1997	2840	1,133	1,035	-0,097	0,374	0,875	0,361	0,964
1998	2763	1,289	1,148	-0,141	0,376	0,857	0,328	0,968
1999	2856	1,350	1,233	-0,116	0,395	0,879	0,320	0,972
2000	2796	1,209	1,109	-0,100	0,347	0,880	0,313	0,968
2001	2274	1,442	1,273	-0,169	0,988	0,708	0,776	0,795
2002	2325	1,205	1,090	-0,114	0,374	0,867	0,343	0,959
2003	2432	1,069	0,974	-0,095	0,389	0,876	0,400	0,957
2004	2434	1,066	0,964	-0,103	0,376	0,858	0,390	0,944
2005	1537	0,921	0,839	-0,081	0,308	0,879	0,367	0,963
2006	1837	1,101	0,999	-0,102	0,334	0,874	0,334	0,962
2007	2850	1,312	1,167	-0,145	0,391	0,867	0,335	0,968
2008	610	1,426	1,322	-0,104	0,381	0,905	0,288	0,963
anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
<b>Ponza</b>								
1989	1356	0,741	0,645	-0,096	0,264	0,890	0,410	0,950
1990	2691	0,819	0,763	-0,056	0,291	0,935	0,382	0,953
1991	2749	0,848	0,789	-0,059	0,299	0,936	0,379	0,949
1992	2598	0,787	0,733	-0,054	0,265	0,934	0,362	0,960
1993	2666	0,871	0,815	-0,056	0,290	0,930	0,356	0,957
1994	2362	0,747	0,703	-0,044	0,335	0,938	0,477	0,922
1995	2756	0,913	0,816	-0,097	0,381	0,883	0,467	0,929
1996	2691	0,977	0,925	-0,052	0,332	0,945	0,359	0,953
1997	2299	0,788	0,728	-0,060	0,272	0,920	0,374	0,956
1998	2467	0,899	0,817	-0,082	0,292	0,908	0,358	0,957
1999	2761	0,878	0,822	-0,057	0,275	0,936	0,335	0,963
2000	2635	0,869	0,801	-0,068	0,318	0,916	0,397	0,943
2001	2688	0,890	0,813	-0,078	0,286	0,906	0,352	0,952
2002	1938	0,901	0,807	-0,094	0,314	0,910	0,389	0,934

2003	2790	0,870	0,781	-0,088	0,293	0,911	0,375	0,956
2004	2482	0,858	0,795	-0,063	0,293	0,938	0,369	0,950
2005	1877	0,692	0,638	-0,055	0,247	0,911	0,388	0,933
2006	1426	0,663	0,538	-0,125	0,251	0,817	0,467	0,934
2007	1649	0,845	0,742	-0,103	0,287	0,904	0,386	0,961
2008	353	1,047	0,895	-0,152	0,293	0,888	0,327	0,959
<b>anno</b>	<b>n. punti</b>	<b>Media boa (m)</b>	<b>Media modello (m)</b>	<b>Bias(m)</b>	<b>Rmse (m)</b>	<b>slope</b>	<b>si</b>	<b>d</b>
<b>Monopoli</b>								
1989	1394	0,614	0,516	-0,098	0,288	0,892	0,559	0,900
1990	2768	0,649	0,550	-0,099	0,291	0,885	0,529	0,913
1991	2719	0,693	0,638	-0,055	0,289	0,942	0,454	0,929
1992	2761	0,654	0,586	-0,069	0,290	0,905	0,496	0,915
1993	2606	0,670	0,612	-0,058	0,321	0,955	0,525	0,918
1994	2638	0,626	0,565	-0,061	0,291	0,942	0,515	0,920
1995	2445	0,706	0,627	-0,079	0,331	0,964	0,528	0,929
1996	2733	0,690	0,615	-0,075	0,284	0,925	0,462	0,926
1997	2708	0,740	0,679	-0,060	0,281	0,948	0,413	0,949
1998	2778	0,701	0,623	-0,079	0,292	0,914	0,469	0,937
1999	2819	0,650	0,571	-0,079	0,305	0,948	0,534	0,924
2000	2818	0,670	0,557	-0,113	0,338	0,846	0,607	0,896
2001	2504	0,757	0,675	-0,082	0,452	0,903	0,670	0,864
2002	2117	0,728	0,620	-0,108	0,327	0,885	0,528	0,915
2003	2430	0,781	0,660	-0,120	0,354	0,919	0,536	0,924
2004	2718	0,679	0,556	-0,123	0,294	0,853	0,528	0,915
2005	2113	0,694	0,570	-0,124	0,310	0,845	0,545	0,906
2006	2192	0,659	0,559	-0,100	0,286	0,927	0,512	0,933
2007	695	0,516	0,437	-0,079	0,273	0,947	0,625	0,937
2008	652	0,894	0,787	-0,107	0,363	0,913	0,461	0,924
<b>anno</b>	<b>n. punti</b>	<b>Media boa (m)</b>	<b>Media modello (m)</b>	<b>Bias(m)</b>	<b>Rmse (m)</b>	<b>slope</b>	<b>si</b>	<b>d</b>
<b>Mazara</b>								
1989	1377	0,860	0,830	-0,031	0,285	0,988	0,344	0,955
1990	2599	0,949	0,927	-0,022	0,287	0,984	0,310	0,964
1991	2662	1,004	1,019	0,015	0,274	1,025	0,269	0,969
1992	2776	0,955	0,982	0,027	0,282	1,035	0,288	0,962
1993	2443	1,007	1,025	0,018	0,293	1,021	0,286	0,959
1994	2488	0,912	0,930	0,018	0,350	1,024	0,376	0,944
1995	2499	1,000	1,047	0,047	0,283	1,040	0,271	0,965
1996	2267	1,035	1,085	0,050	0,323	1,053	0,298	0,963
1997	2517	0,959	0,966	0,007	0,291	1,012	0,301	0,957
1998	1900	1,043	1,027	-0,016	0,312	0,975	0,303	0,953
1999	1599	1,071	1,125	0,054	0,316	1,044	0,281	0,957

2000	2575	0,921	0,952	0,031	0,277	1,029	0,291	0,958
2001	2146	0,969	1,032	0,063	0,307	1,039	0,297	0,945
2002	2572	1,011	1,018	0,007	0,279	1,020	0,274	0,959
2003	2239	1,075	1,064	-0,012	0,314	0,995	0,295	0,961
2004	2531	0,975	0,966	-0,009	0,268	0,996	0,277	0,969
2005	2431	1,031	0,986	-0,045	0,295	0,980	0,299	0,969
2006	1948	0,959	0,911	-0,048	0,258	0,977	0,283	0,968
2007	1258	0,863	0,831	-0,032	0,262	0,966	0,315	0,960
2008	706	1,060	1,025	-0,035	0,282	0,988	0,275	0,947
anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
<b>Crotone</b>								
1989	1400	0,677	0,600	-0,077	0,247	0,899	0,411	0,936
1990	2685	0,740	0,716	-0,024	0,311	0,990	0,435	0,945
1991	2741	0,759	0,774	0,015	0,271	1,018	0,350	0,958
1992	2731	0,720	0,718	-0,002	0,298	1,001	0,415	0,943
1993	2742	0,705	0,712	0,007	0,299	1,015	0,421	0,950
1994	2359	0,701	0,706	0,005	0,266	1,009	0,377	0,967
1995	2706	0,733	0,735	0,002	0,253	1,004	0,345	0,958
1996	2635	0,782	0,815	0,033	0,311	1,035	0,382	0,951
1997	2697	0,745	0,768	0,023	0,316	1,031	0,412	0,946
1998	2865	0,719	0,716	-0,003	0,244	0,997	0,341	0,965
1999	2648	0,663	0,667	0,005	0,242	0,994	0,363	0,949
2000	2836	0,684	0,692	0,008	0,274	0,998	0,395	0,943
2001	2044	0,810	0,824	0,013	0,305	1,003	0,370	0,947
2002	2451	0,658	0,680	0,023	0,274	1,050	0,403	0,945
2003	2632	0,764	0,735	-0,029	0,309	1,003	0,420	0,943
2004	2619	0,820	0,805	-0,015	0,304	0,984	0,377	0,953
2005	1875	0,584	0,626	0,041	0,329	1,045	0,527	0,913
2006	1744	0,605	0,583	-0,022	0,258	0,986	0,442	0,936
2007	1552	0,699	0,709	0,010	0,246	1,025	0,346	0,955
anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
<b>La Spezia</b>								
1989	1364	0,635	0,525	-0,110	0,273	0,857	0,520	0,943
1990	2679	0,763	0,643	-0,121	0,311	0,865	0,484	0,956
1991	2748	0,715	0,626	-0,090	0,314	0,857	0,502	0,935
1992	2602	0,784	0,667	-0,117	0,308	0,855	0,462	0,947
1993	2635	0,757	0,698	-0,059	0,280	0,915	0,401	0,946
1994	2523	0,727	0,625	-0,102	0,310	0,867	0,496	0,924
1995	2808	0,802	0,692	-0,110	0,321	0,867	0,464	0,944
1996	2674	0,789	0,695	-0,094	0,307	0,885	0,441	0,938
1997	2815	0,708	0,616	-0,092	0,315	0,863	0,511	0,933

1998	2817	0,824	0,704	-0,119	0,308	0,863	0,438	0,945
1999	2571	0,847	0,742	-0,105	0,317	0,889	0,428	0,950
2000	2517	0,886	0,783	-0,103	0,335	0,883	0,427	0,946
2001	2449	0,871	0,774	-0,097	0,322	0,889	0,416	0,930
2002	1646	0,733	0,598	-0,135	0,286	0,837	0,479	0,929
2003	2705	0,804	0,638	-0,166	0,371	0,804	0,581	0,931
2004	1643	0,792	0,621	-0,171	0,364	0,766	0,585	0,914
2005	1541	0,752	0,614	-0,138	0,313	0,846	0,509	0,922
2006	1145	0,622	0,447	-0,175	0,279	0,737	0,625	0,910
2007	65	0,551	0,484	-0,067	0,275	0,917	0,569	0,956
<b>anno</b>	<b>n. punti</b>	<b>Media boa (m)</b>	<b>Media modello (m)</b>	<b>Bias(m)</b>	<b>Rmse (m)</b>	<b>slope</b>	<b>si</b>	<b>d</b>
<b>Palermo</b>								
2002	1012	0,851	0,839	-0,013	0,289	0,956	0,345	0,930
2003	2332	0,760	0,778	0,017	0,309	1,030	0,397	0,950
<b>anno</b>	<b>n. punti</b>	<b>Media boa (m)</b>	<b>Media modello (m)</b>	<b>Bias(m)</b>	<b>Rmse (m)</b>	<b>slope</b>	<b>si</b>	<b>d</b>
<b>Ancona</b>								
1999	2249	0,658	0,615	-0,043	0,315	0,973	0,512	0,925
2000	2276	0,652	0,593	-0,059	0,297	0,928	0,500	0,915
2001	2122	0,750	0,700	-0,050	0,373	0,973	0,533	0,916
2002	2446	0,719	0,679	-0,039	0,309	0,966	0,455	0,933
2003	2294	0,668	0,604	-0,063	0,310	0,936	0,513	0,913
2004	2195	0,672	0,632	-0,040	0,364	0,936	0,575	0,883
2005	824	0,908	0,897	-0,011	0,418	1,028	0,466	0,929
2006	290	1,264	1,156	-0,108	0,416	0,914	0,360	0,918
<b>anno</b>	<b>n. punti</b>	<b>Media boa (m)</b>	<b>Media modello (m)</b>	<b>Bias(m)</b>	<b>Rmse (m)</b>	<b>slope</b>	<b>si</b>	<b>d</b>
<b>Catania</b>								
1989	1260	0,552	0,470	-0,082	0,245	0,925	0,523	0,954
1990	2635	0,600	0,547	-0,053	0,259	0,940	0,472	0,939
1991	2732	0,681	0,632	-0,049	0,253	0,954	0,401	0,955
1992	2718	0,614	0,579	-0,035	0,235	0,981	0,405	0,958
1993	2520	0,552	0,530	-0,022	0,257	0,981	0,486	0,941
1994	2330	0,543	0,474	-0,070	0,238	0,888	0,503	0,942
1995	2614	0,559	0,495	-0,064	0,224	0,917	0,452	0,941
1996	2526	0,674	0,634	-0,040	0,269	0,955	0,424	0,956
1997	2862	0,661	0,620	-0,041	0,296	0,971	0,477	0,934
1998	2567	0,554	0,505	-0,049	0,244	0,939	0,484	0,936
1999	2233	0,518	0,473	-0,045	0,237	0,926	0,502	0,916
2000	2742	0,558	0,496	-0,062	0,242	0,890	0,489	0,909
2001	2652	0,540	0,471	-0,069	0,241	0,891	0,512	0,908

2002	2218	0,632	0,579	-0,053	0,267	0,965	0,461	0,921
2003	2523	0,623	0,563	-0,059	0,264	0,961	0,468	0,932
2004	2415	0,609	0,557	-0,052	0,249	0,962	0,447	0,935
2005	2023	0,540	0,453	-0,087	0,247	0,889	0,546	0,918
2006	224	0,491	0,429	-0,062	0,177	0,844	0,413	0,918
anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
<b>Cetraro</b>								
1999	2369	0,628	0,648	0,020	0,219	0,983	0,338	0,965
2000	2613	0,591	0,631	0,041	0,199	1,009	0,315	0,973
2001	2729	0,664	0,694	0,030	0,245	0,979	0,353	0,955
2002	2573	0,676	0,663	-0,013	0,232	0,937	0,351	0,941
2003	2401	0,631	0,603	-0,028	0,251	0,910	0,417	0,956
2004	2423	0,703	0,691	-0,012	0,249	0,959	0,361	0,958
2005	2335	0,652	0,630	-0,022	0,224	0,985	0,356	0,967
2006	2465	0,634	0,616	-0,019	0,224	0,964	0,363	0,958
2007	1256	0,737	0,750	0,013	0,228	0,995	0,304	0,977
2008	619	0,827	0,817	-0,010	0,256	0,961	0,313	0,970
anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
<b>Civitavecchia</b>								
2002	947	0,762	0,583	-0,179	0,356	0,744	0,610	0,854
2003	2132	0,754	0,654	-0,100	0,355	0,851	0,542	0,908
anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
<b>Ortona</b>								
1989	1398	0,592	0,492	-0,099	0,285	0,849	0,579	0,918
1990	2641	0,631	0,553	-0,078	0,270	0,908	0,488	0,942
1991	2730	0,666	0,612	-0,054	0,297	0,929	0,486	0,935
1992	2636	0,598	0,518	-0,081	0,255	0,903	0,493	0,937
1993	2703	0,668	0,596	-0,072	0,298	0,932	0,500	0,948
1994	2551	0,613	0,548	-0,065	0,315	0,933	0,574	0,919
1995	2724	0,659	0,596	-0,062	0,299	0,954	0,501	0,951
1996	2852	0,640	0,610	-0,030	0,291	0,974	0,478	0,926
1997	2838	0,633	0,598	-0,035	0,361	0,920	0,603	0,899
1998	2716	0,650	0,559	-0,092	0,270	0,888	0,484	0,948
1999	2677	0,631	0,570	-0,062	0,267	0,929	0,469	0,954
2000	2193	0,598	0,530	-0,068	0,243	0,887	0,458	0,928
2001	2205	0,728	0,646	-0,082	0,327	0,908	0,505	0,930
2002	2115	0,687	0,597	-0,090	0,290	0,898	0,485	0,931
2003	2406	0,631	0,537	-0,094	0,276	0,899	0,514	0,936
2004	1664	0,635	0,559	-0,076	0,267	0,895	0,477	0,921

2005	1300	0,596	0,529	-0,067	0,312	0,949	0,589	0,919
2006	2104	0,582	0,494	-0,089	0,243	0,898	0,493	0,941
2007	1871	0,540	0,504	-0,036	0,292	0,966	0,580	0,926
2008	486	0,548	0,484	-0,064	0,316	0,970	0,654	0,892
anno	n. punti	Media boa (m)	Media modello (m)	Bias(m)	Rmse (m)	slope	si	d
Siniscola								
2002	301	0,863	0,934	0,071	0,304	1,024	0,326	0,951
2003	2373	0,764	0,801	0,037	0,297	1,053	0,371	0,944

**Tabella 3 – Statistiche relative al confronto tra i dati di altezza significativa calcolati dal modello WW3 e i dati registrati dalle boe.**

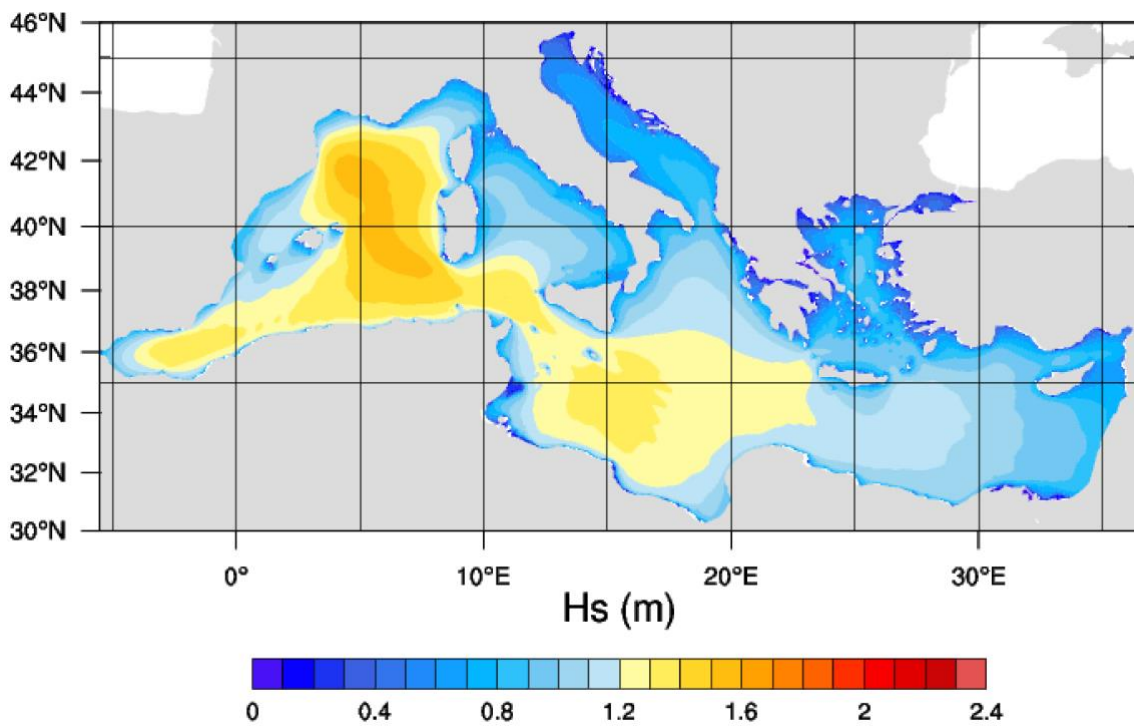
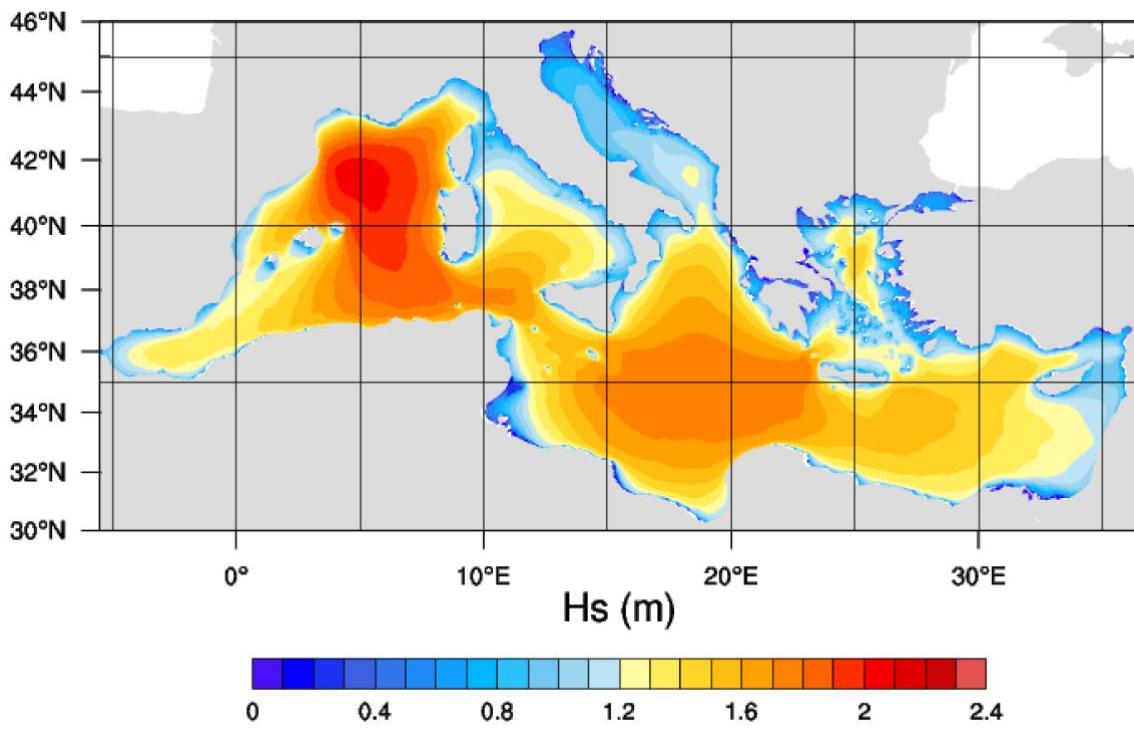
Dalla validazione delle altezze significative prodotte con il modello WW3 rispetto ai dati dei satelliti ed alle misure alle boe risulta in generale un ottimo accordo. È necessario comunque osservare il miglior accordo rispetto ai dati satellitari, rappresentativi della situazione in alto mare rispetto a quelli delle boe che, nonostante siano collocate in condizioni che si possono considerare di mare profondo, dell'ordine dei 100 m, risentono in misura maggiore delle condizioni locali. In questo caso probabilmente la risoluzione spaziale della simulazione non è ancora sufficiente a rappresentare al meglio la propagazione delle onde sotto costa.

### 2.3 Analisi del clima presente

In questo paragrafo viene presentata la climatologia ottenuta sulla base della simulazione di hindcast precedentemente descritta, e mostrate alcune valutazioni dettagliate della risorsa energetica disponibile in località selezionate all'interno delle zone più produttive.

In Figura 2 sono mostrate le mappe delle climatologie stagionali dell'altezza significativa dell'onda, stimate sul periodo 1980-2015. La maggior parte del bacino mediterraneo presenta valori superiori a 1.2 m di altezza significativa media nel periodo invernale. I valori maggiori si riscontrano nel bacino occidentale e in particolare nel tratto di mare compreso tra le isole Baleari a ovest e la Corsica e la Sardegna ad est, questa zona è caratterizzata dai valori massimi di ampiezza, superiori a 1.5 m, anche nei periodi primaverile ed autunnale. Valori meno intensi di ampiezza delle onde si riscontrano nel corso dell'estate, in questo caso vengono raggiunti valori medi superiori ad un metro solo nella zona orientale, circoscritti all'area a sud dell'isola di Creta, interessata dalla presenza dei venti etesiani.

In Figura 3 sono riportati gli andamenti temporali dei valori medi e dei valori massimi mensili per tre località collocate in regioni con valori elevati di moto ondoso: Alghero, Capo Passero (estrema punta meridionale della Sicilia) e Pantelleria. In tutti i siti scelti si nota l'evidente stagionalità dei valori medi dell'altezza significativa delle onde, con l'ampiezza del ciclo stagionale compresa tipicamente tra 0.5 m e 2 m. Alghero presenta la massima variabilità, con valori medi che possono passare da un minimo di 0.2 m fino a superare i 2.5 m; anche il massimo assoluto, di circa 9 m, si riscontra in questo sito.



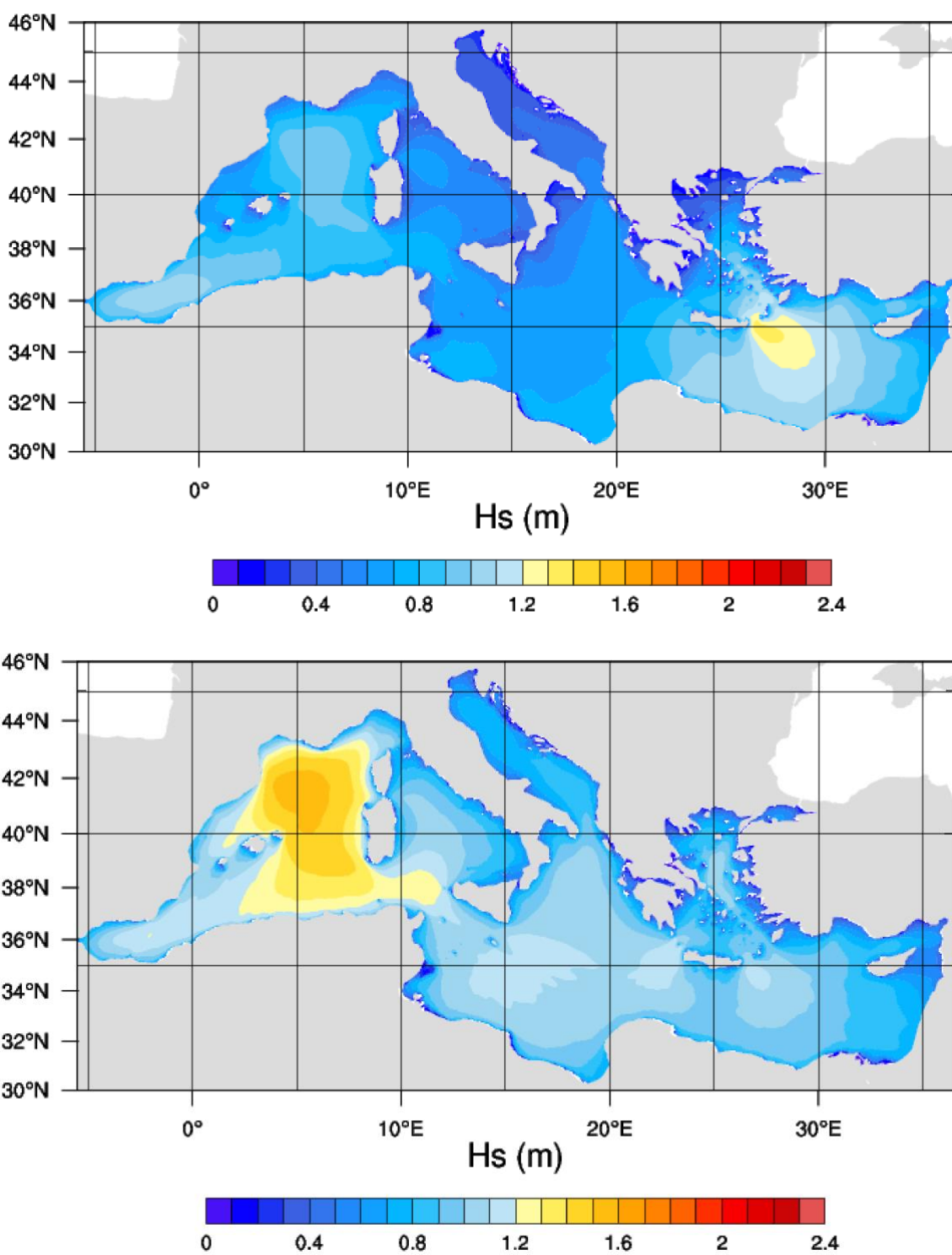


Figura 3 – Climatologie stagionali di altezza significativa calcolate sulla simulazione con il modello WW3 per il periodo 1980-2015. Dall'alto inverno, primavera, estate e autunno.

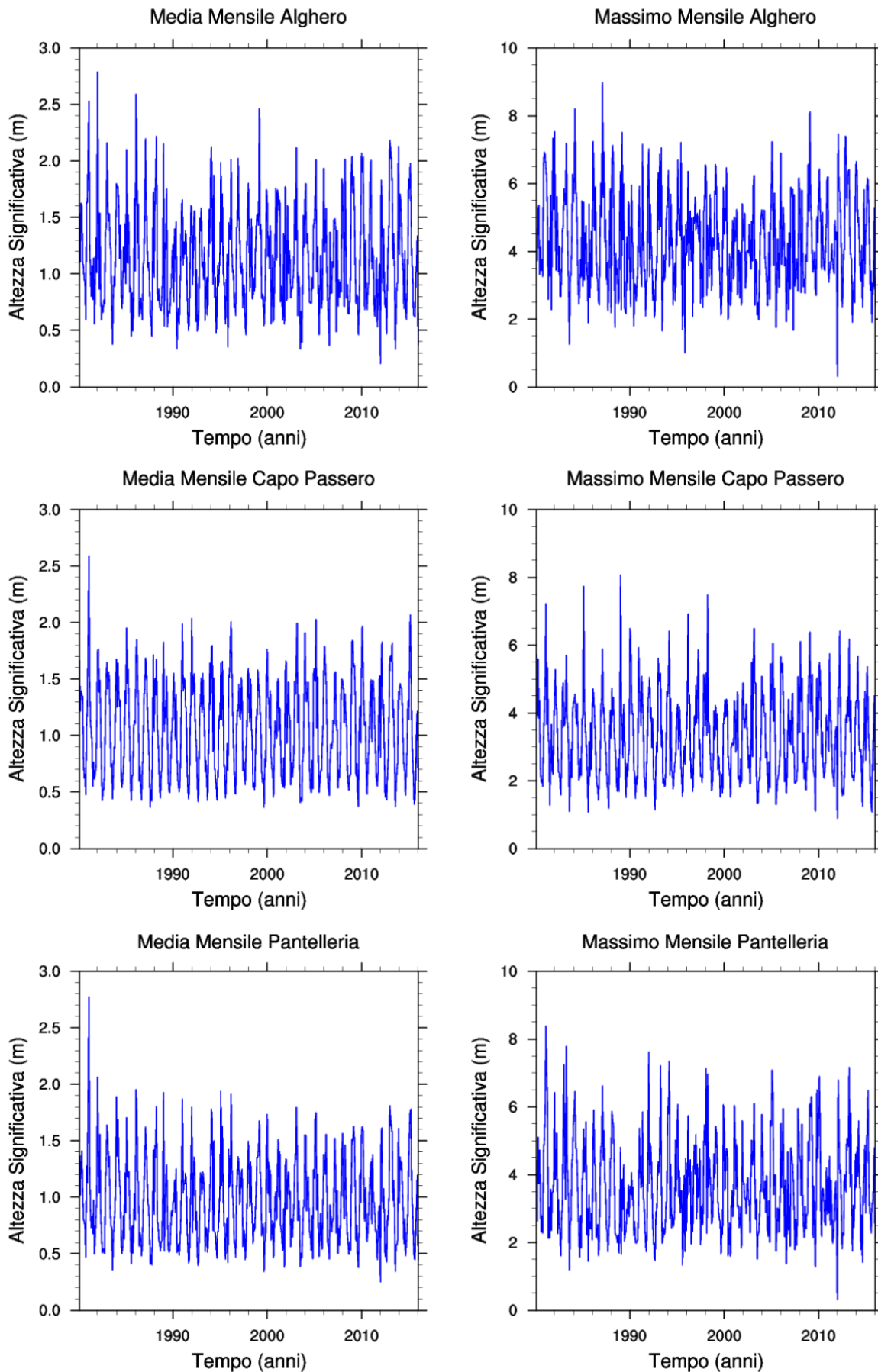


Figura 4 Esempi di andamenti dei valori medi e massimi mensili in tre siti.

Sugli stessi siti di Pantelleria, Capo Passero e Alghero sono state effettuate analisi più dettagliate dell'intera serie temporale di 36 anni. In particolare nelle figure 5-10 sono mostrate le distribuzioni dell'altezza significativa, del periodo medio e del periodo di picco, è inoltre mostrata la distribuzione delle direzioni di provenienza delle onde e la distribuzione dell'energia media annuale, in funzione del periodo  $T_e$  e dell'ampiezza dell'onda  $H_s$ . Il contributo all'energia totale dato dai differenti stati di mare è raggruppato in intervalli di 0.25 s per il periodo e di 0.25 m per l'altezza. I valori di energia sono stati calcolati a partire dall'equazione per il flusso di potenza per unità di lunghezza della cresta d'onda:

$$J = \rho g^2 / (64\pi) T_e H_s^2$$

dove  $J$  è il flusso di potenza in W/m,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $\rho$  la densità dell'acqua di mare assunta pari a  $1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $H_s$  indica l'altezza significativa e  $T_e$  il periodo medio dell'onda.

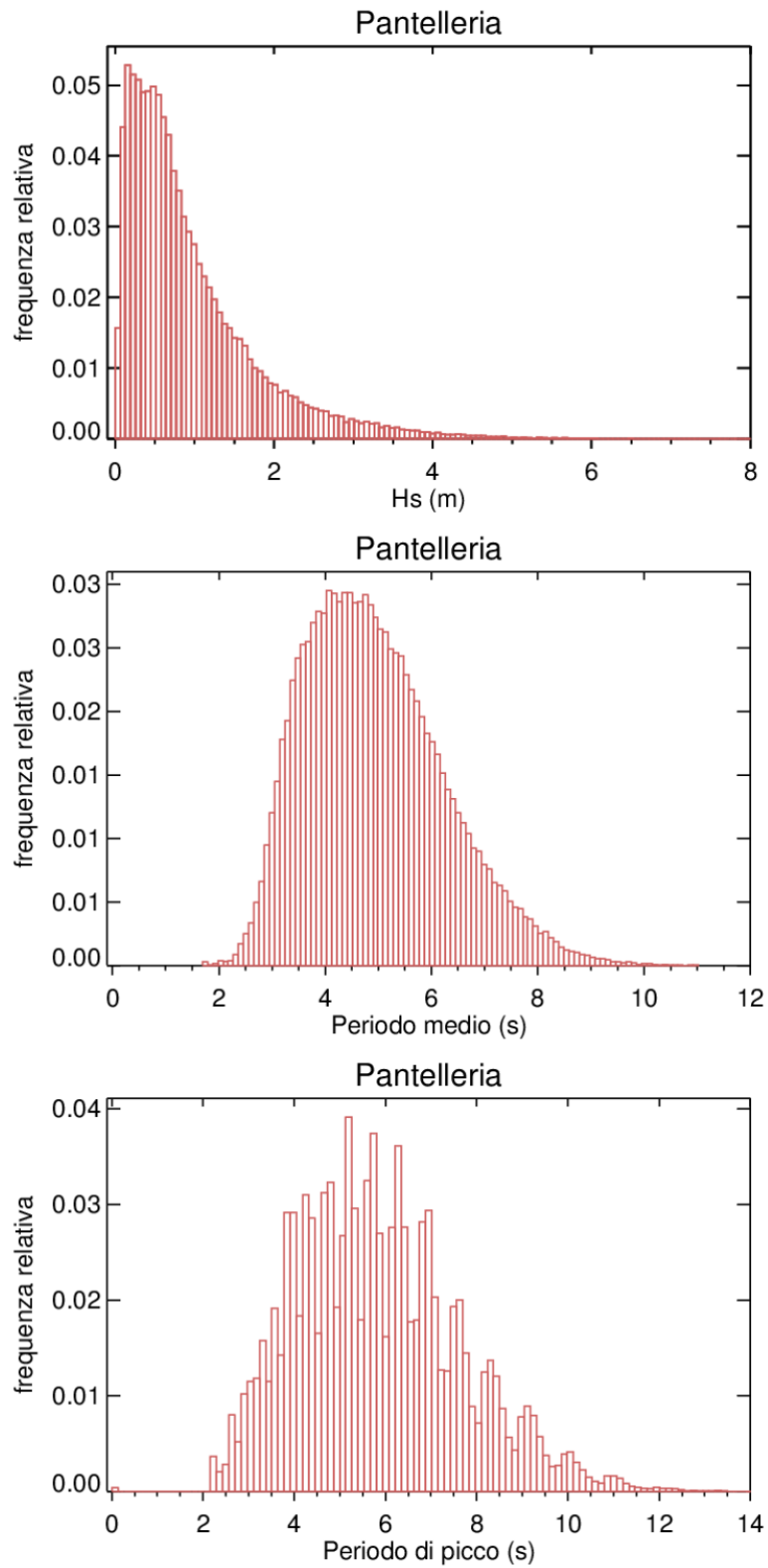
In tabella 4 sono mostrati i valori medi di flusso di potenza e di flusso di energia annua, calcolati sull'intero periodo della simulazione facendo uso della formula precedente. I valori per Pantelleria e Capo Passero sono molto simili, mentre la potenza media è quasi doppia nel punto in prossimità di Alghero.

Nelle figure si può notare una forte direzionalità delle onde, con prevalenza della provenienza da Nord-Ovest, nei siti di Alghero e Pantelleria, mentre a Capo Passero la principale direzione di provenienza è occidentale con un massimo secondario da Nord-Est.

Si può osservare che ad Alghero si ottiene un contributo significativo dell'energia per un intervallo di valori di ampiezza (tra 2 e 6 m) e di periodi (tra 6.5 e 9 s) più ampio rispetto a quello degli altri siti. La distribuzione dell'energia a Pantelleria si concentra su una limitata serie di coppie di valori, con massimi di ampiezza pari a 4 m e di periodo a 8 s. Nonostante il valore medio annuo sia molto simile a quello di Capo Passero, in questo ultimo sito i massimi di energia risultano inferiori con una distribuzione più allargata in funzione dei valori di ampiezza e di periodo.

Sito	Longitudine	Latitudine	Potenza media (kW/m)	Energia annua (MWh/m)
Pantelleria	11.9375	36.8438	5.368	47.027
Capo Passero	15.1875	36.5312	5.703	49.963
Alghero	8.12500	40.7500	8.586	75.213

**Tabella 4 – Potenza media e energia media annua per i tre siti selezionati.**



**Figura 5 -Distribuzione di altezza significativa, periodo medio e periodo di picco a Pantelleria.**

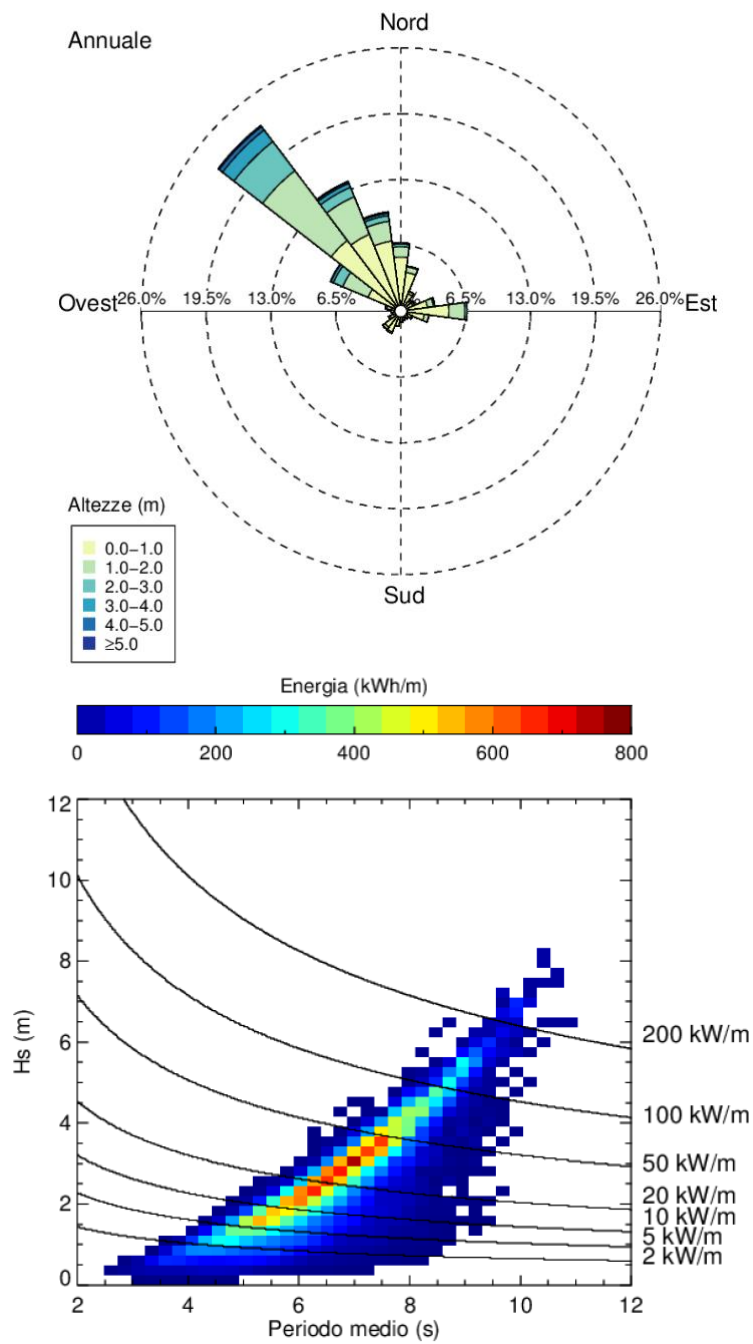
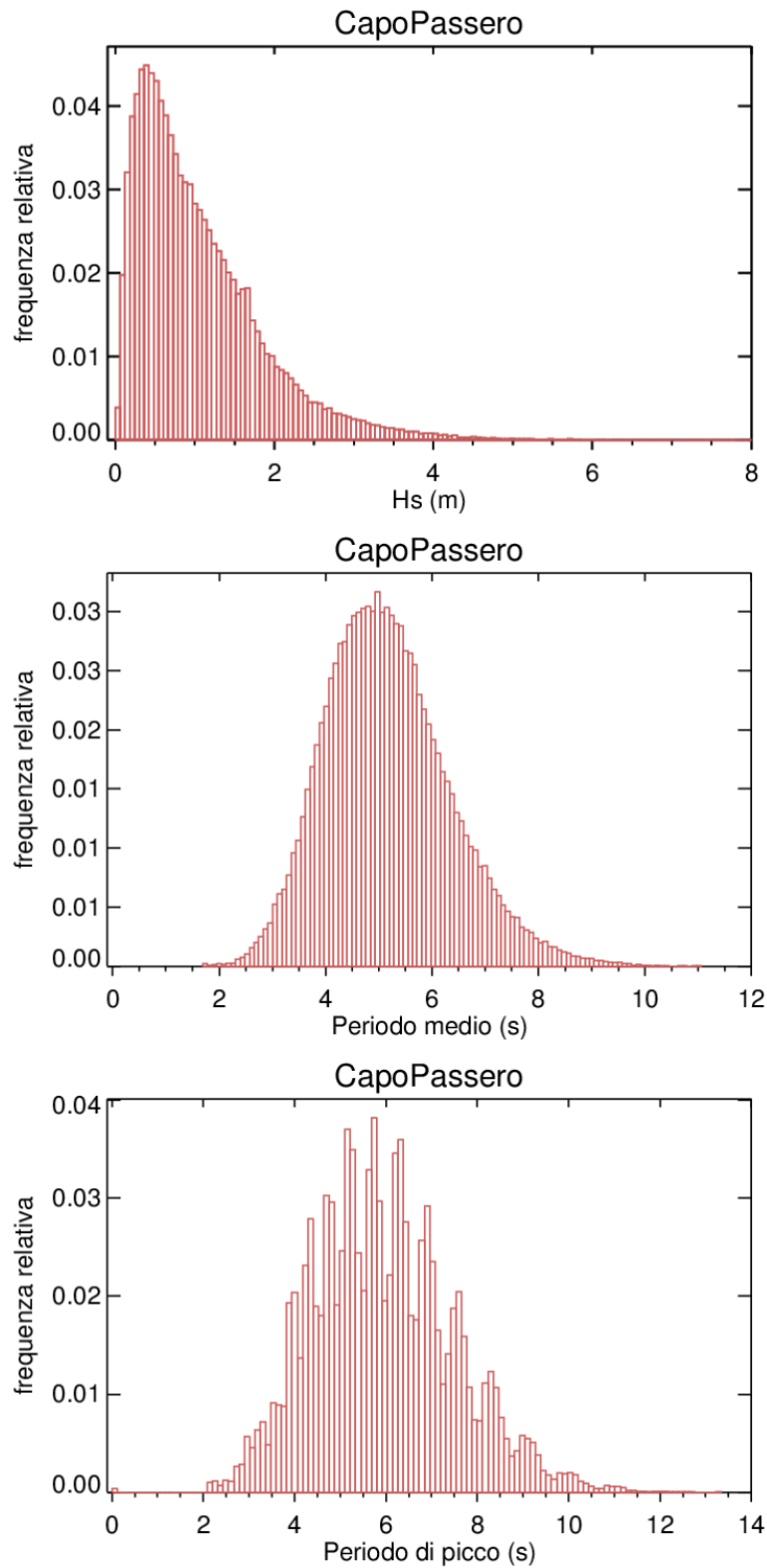
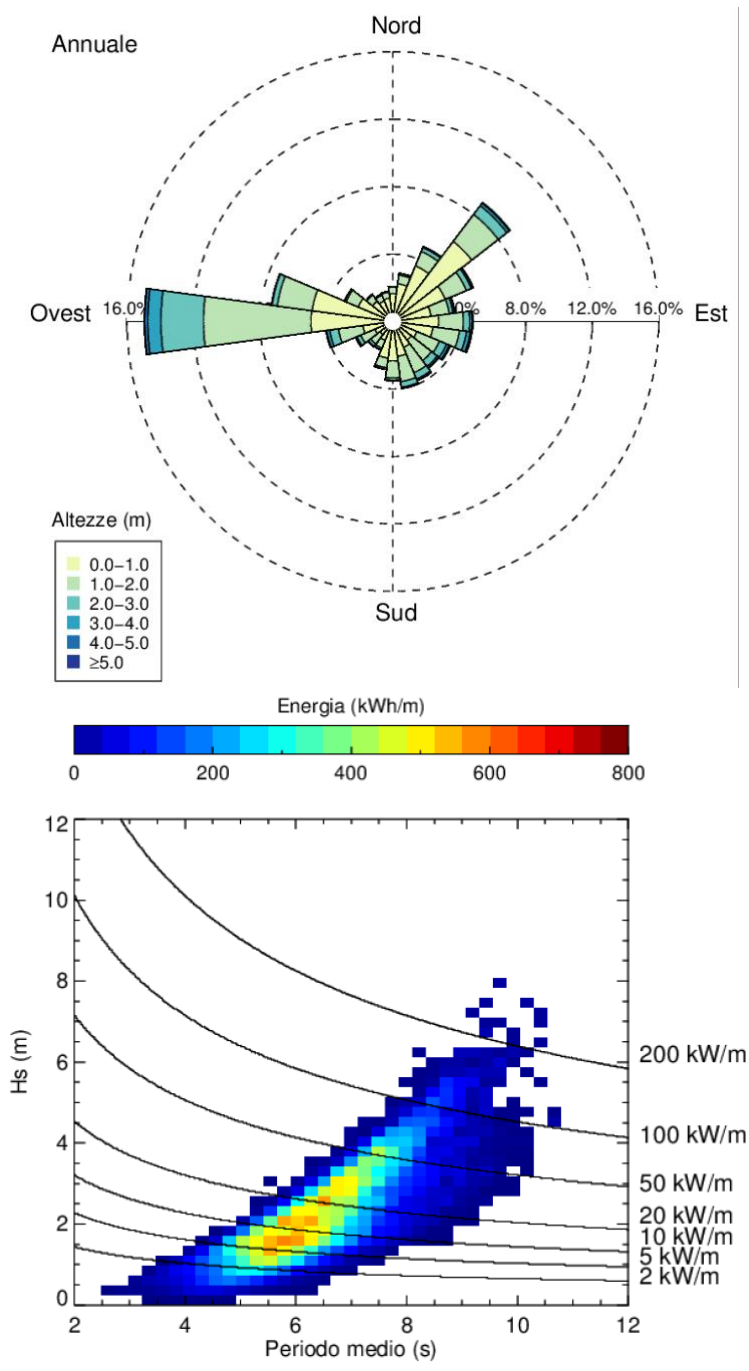


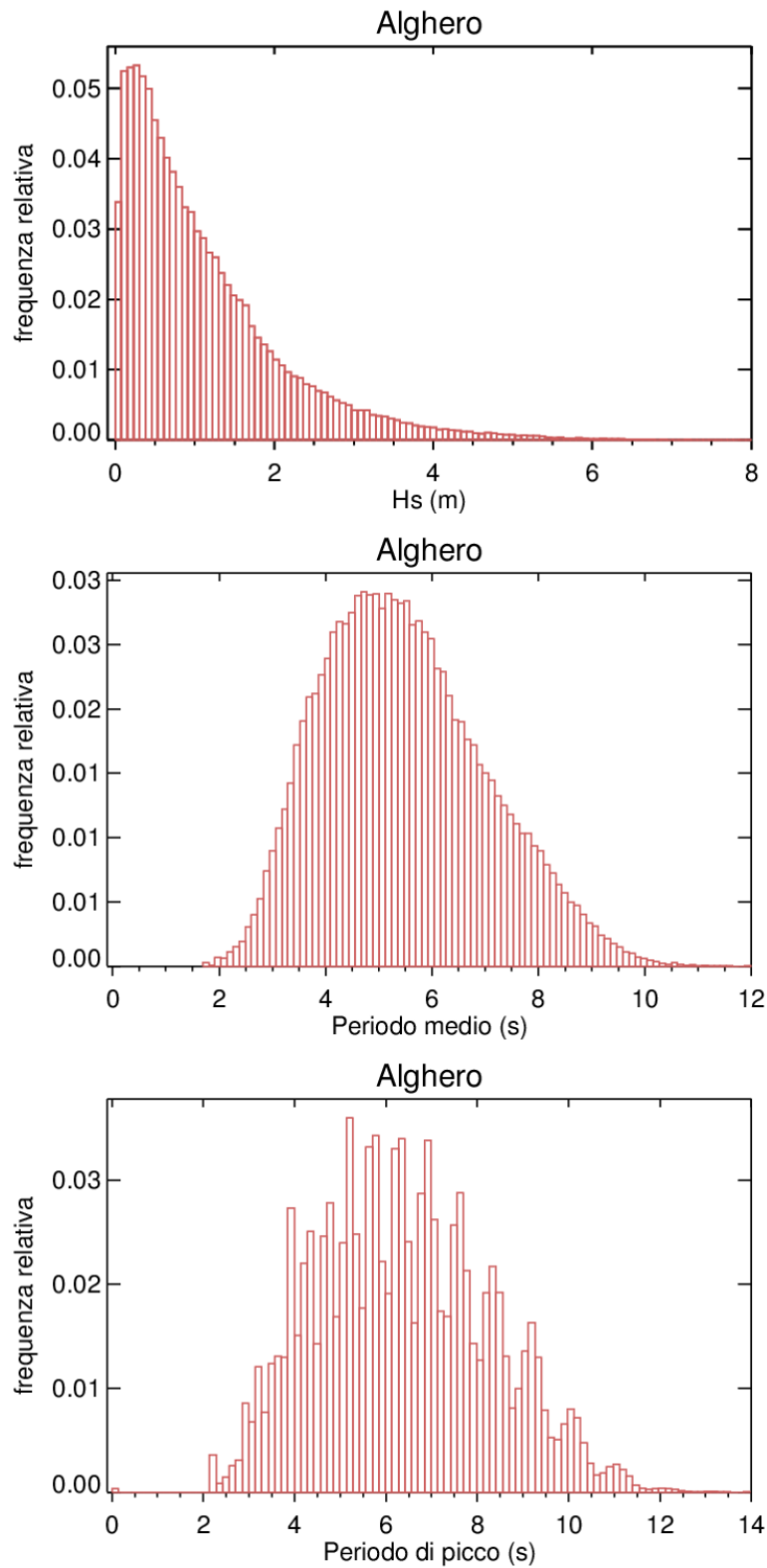
Figura 6 - Direzioni di provenienza delle onde (pannello superiore). Distribuzione dell'energia media annua in funzione del periodo medio e dell'altezza significativa (pannello inferiore). Il valore è calcolato utilizzando classi di 0.25 s per il periodo e di 0.25 m per l'altezza. Sono riportate come riferimento le isolinee dei livelli di potenza. Pantelleria.



**Figure 7 -Distribuzione di altezza significativa, periodo medio e periodo di picco a Capo Passero.**



**Figura 8 - Direzioni di provenienza delle onde (pannello superiore). Distribuzione dell'energia media annua in funzione del periodo medio e dell'altezza significativa (pannello inferiore). Il valore è calcolato utilizzando classi di 0.25 s per il periodo e di 0.25 m per l'altezza. Sono riportate come riferimento le isolinee dei livelli di potenza. Capo Passero.**



**Figure 9 -Distribuzione di altezza significativa, periodo medio e periodo di picco a Alghero.**

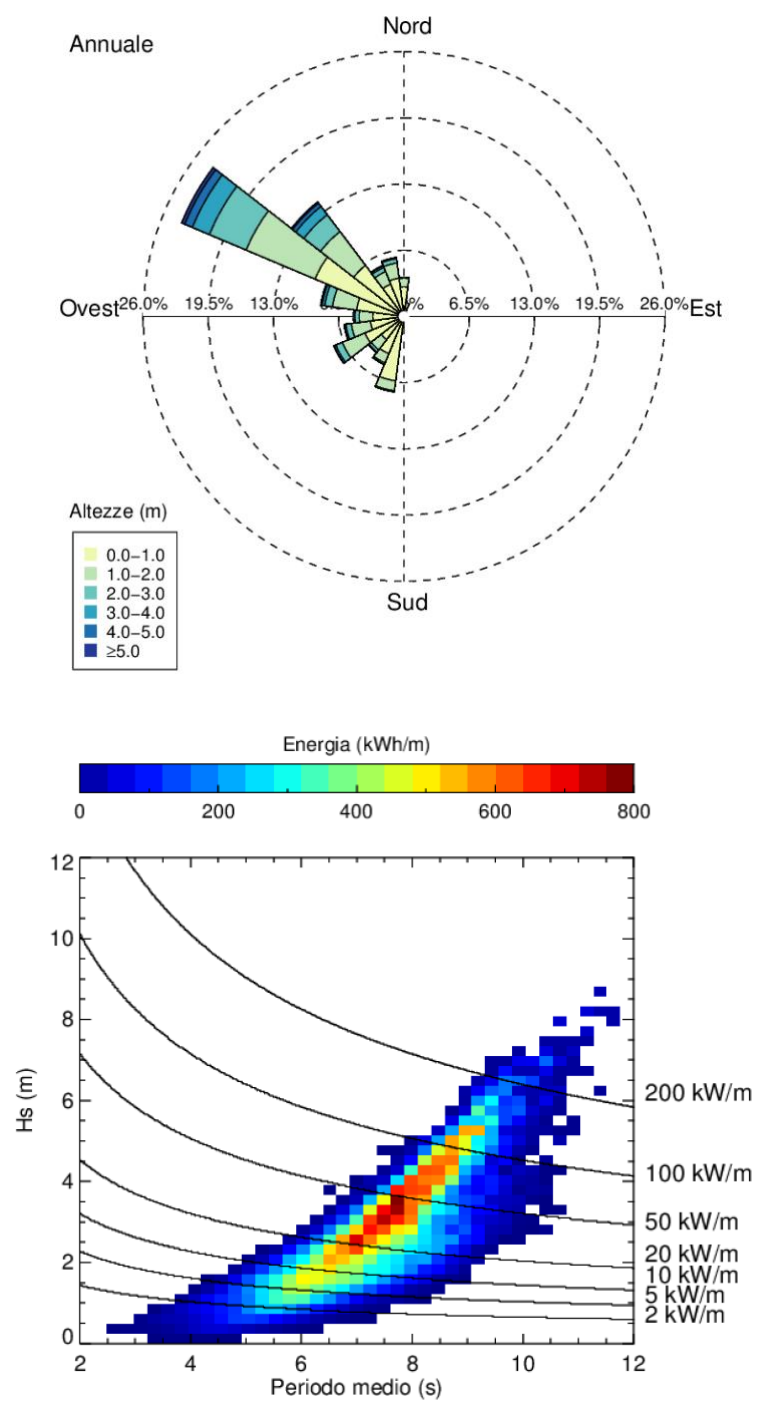


Figura 10 - Direzioni di provenienza delle onde (pannello superiore). Distribuzione dell'energia media annua in funzione del periodo medio e dell'altezza significativa (pannello inferiore). Il valore è calcolato utilizzando classi di 0.25 s per il periodo e di 0.25 m per l'altezza. Sono riportate come riferimento le isolinee dei livelli di potenza. Alghero

## 2.4 Risorsa energetica futura

Parallelamente alla creazione di una climatologia ad alta risoluzione spaziale relativa alle condizioni attuali, sono state realizzate delle simulazioni alla risoluzione di  $1/16^\circ$  per stimare l'eventuale variazione della risorsa marina imputabile ai cambiamenti climatici per due diversi orizzonti temporali futuri (prossimo e lontano futuro). Questa informazione può infatti essere utile in fase di programmazione, considerando che la durata di esercizio degli impianti di conversione del moto ondoso in energia è dell'ordine delle decine di anni.

Attualmente sono disponibili i risultati di numerose simulazioni di scenario futuro, realizzate nell'ambito del Coupled Model Intercomparison Project (CMiP). In particolare, tra le simulazioni globali accoppiate oceano-atmosfera disponibili è stata selezionata la simulazione realizzata dall'Hadley Center for Climate Prediction and Research denominata HadGEM2-ES. Questa simulazione è stata a sua volta utilizzata dal Rossby Center dell'SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) come forzante per il modello atmosferico regionale RCA4 (Strandberg et al., 2014) sul dominio EURO-CORDEX che copre l'area euro-mediterranea. La simulazione regionale è effettuata alla risoluzione orizzontale di  $0.11^\circ$ , corrispondenti a una griglia orizzontale di circa 12.5 km.

Tra gli scenari di cambiamento climatico è stato utilizzato lo scenario RCP-8.5, che rappresenta una condizione estrema corrispondente a una situazione in cui non vengano attuati provvedimenti per limitare le emissioni di gas a effetto serra.

Preliminarmente alle simulazioni di scenario è stata effettuata una simulazione di riferimento, utilizzando il forzante ricavato da una simulazione cosiddetta 'storica' relativa al periodo 1996-2005. Nella simulazione di riferimento il forcing radiativo del modello globale è prescritto in base alle concentrazioni di CO<sub>2</sub> e degli altri gas a effetto serra e degli aerosols, tipiche del periodo industriale. Nella simulazione di scenario prescelta, si assume invece che il forcing radiativo sia legato a concentrazioni crescenti nel tempo dei gas serra, quali si avrebbero in assenza di strategie di mitigazione.

I downscaling regionali della simulazione globale di scenario prodotti dall'Istituto SMHI con il modello RCA4 sono stati utilizzati per forzare il modello di onde e produrre delle proiezioni RCP8.5 dello stato del mare su due diversi intervalli di dieci anni: 2041-2050 e 2090-2099, corrispondenti ai due orizzonti temporali di prossimo e lontano futuro.

Nella figura 11 sono riportate le climatologie stagionali per la simulazione sul periodo storico 1996-2005. Queste costituiscono la climatologia di riferimento del clima presente rispetto a cui si valutano le variazioni dello scenario futuro. Queste mappe mostrano una distribuzione dei valori molto simile a quella ricavata dalla simulazione di *hindcast* presentata nel capitolo precedente (si veda la Fig.3). La variabilità tra le stagioni è ben rappresentata e anche le distribuzioni spaziali nei vari periodi dell'anno. La simulazione relativa al periodo storico presenta però in generale una lieve sottostima dell'intensità del moto ondoso rispetto al clima attuale, in tutte le stagioni. La differenza più significativa è sicuramente costituita dalla riduzione dall'intensità del moto ondoso nel periodo invernale, che raggiunge solo 1.7 m nella zona del Golfo del Leone con una sottostima di circa 30 cm rispetto alla climatologia di *hindcast*.

Nelle figure 12 e 13 sono riportate le differenze delle climatologie calcolate sullo scenario per il periodo 2041-2050 e per il periodo 2090-2099 rispetto alla climatologia calcolata sul periodo storico.

Consideriamo prima di tutto le variazioni attese nel prossimo futuro. Si può innanzitutto osservare che il segno della differenza dipende dalla stagione e dalla parte di bacino considerata, con un aumento di intensità su tutto il bacino occidentale e, più moderatamente, su gran parte di quello orientale nel trimestre invernale. La situazione si inverte nel trimestre primaverile con un aumento

di intensità nella zona orientale, soprattutto nel mare Egeo e a Sud-Est di Creta e una diminuzione nel resto del bacino, con l'eccezione di una piccola zona dell'Alboran.

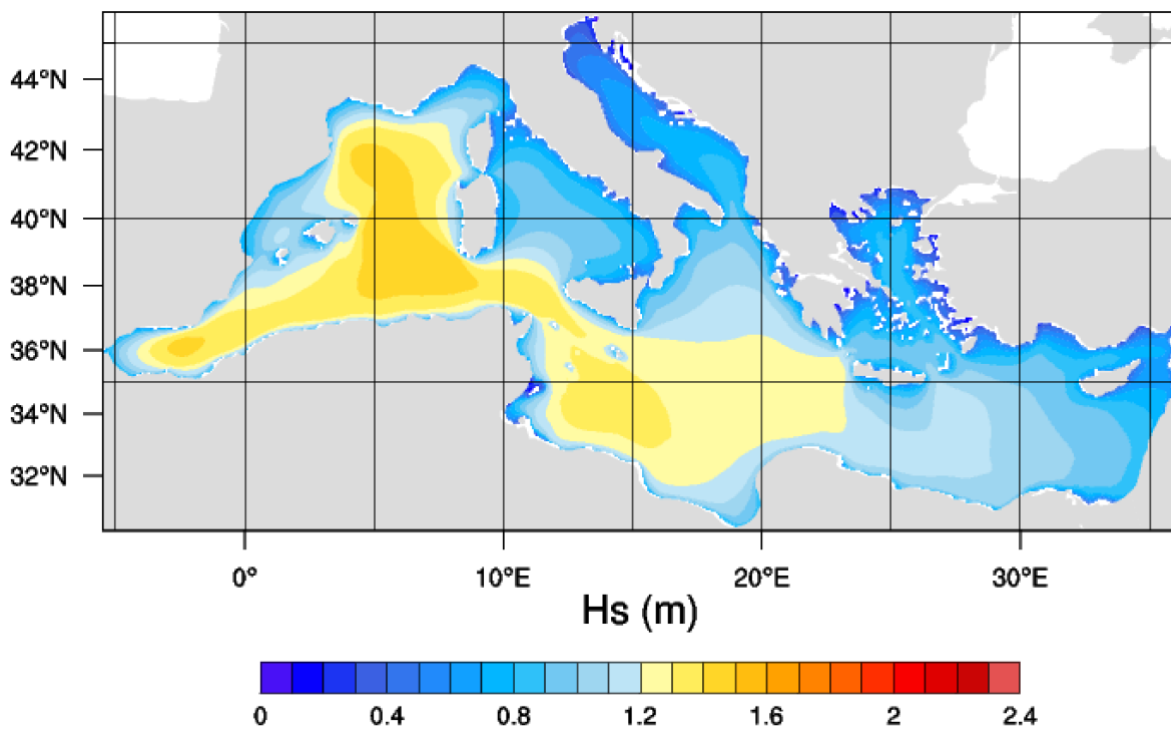
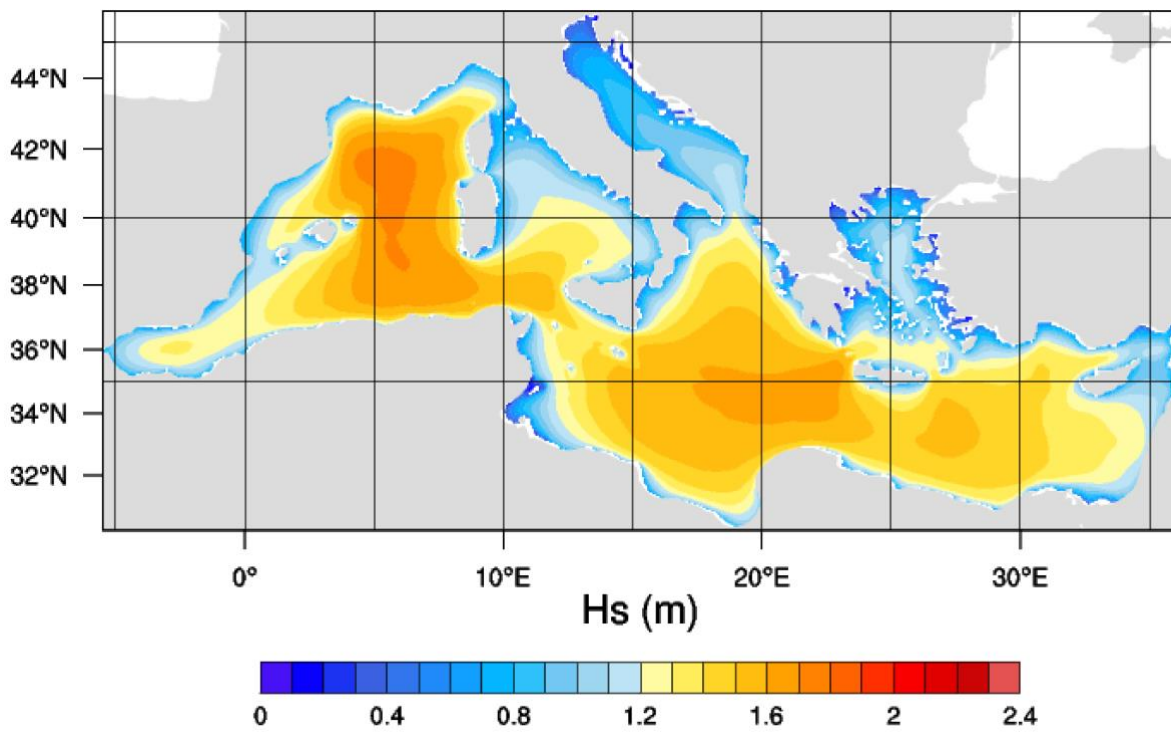
In estate le differenze tra la simulazione di scenario e quella di riferimento indicano una lieve tendenza all'aumento del moto ondoso in quasi tutto il bacino, più marcata nell'Egeo, mentre in autunno la differenza più marcata è nel Mediterraneo Occidentale.

La proiezione a fine secolo mostra la tendenza ad una generalizzata diminuzione dell'intensità in inverno ed autunno ed una situazione meno definita in primavera ed estate; in quest'ultimo periodo in particolare risulta un leggero aumento dei valori medi in una vasta area del Mediterraneo orientale e sul Mar Adriatico.

Oltre alle medie è anche interessante capire se, in ipotesi di cambiamento climatico, si possano avere delle variazioni nella frequenza o nell'intensità degli eventi più energetici.

La figura 14 mostra la differenza del valore massimo annuale mediato sugli anni della simulazione rispetto alla stessa grandezza calcolata sul periodo storico, per entrambi i periodi di scenario futuro.

Si può notare che nell'orizzonte temporale prossimo, durante la stagione invernale, la zona del Mediterraneo Occidentale ad Ovest della Sardegna, caratterizzata da un aumento della media dell'energia ondosa, non sembra risentire di un aumento dei valori massimi di altezza dell'onda. D'altra parte la zona ad Est della Sardegna, il Mare Adriatico e il Mar Egeo, che in media mostrano aumenti molto contenuti dell'altezza significativa dell'onda, presentano aumenti considerevoli nei valori massimi. Questa tendenza è confermata anche nel lontano futuro per l'Adriatico e l'Egeo, lasciando supporre che in queste zone l'aumento di energia sia concentrato in eventi estremi più intensi.



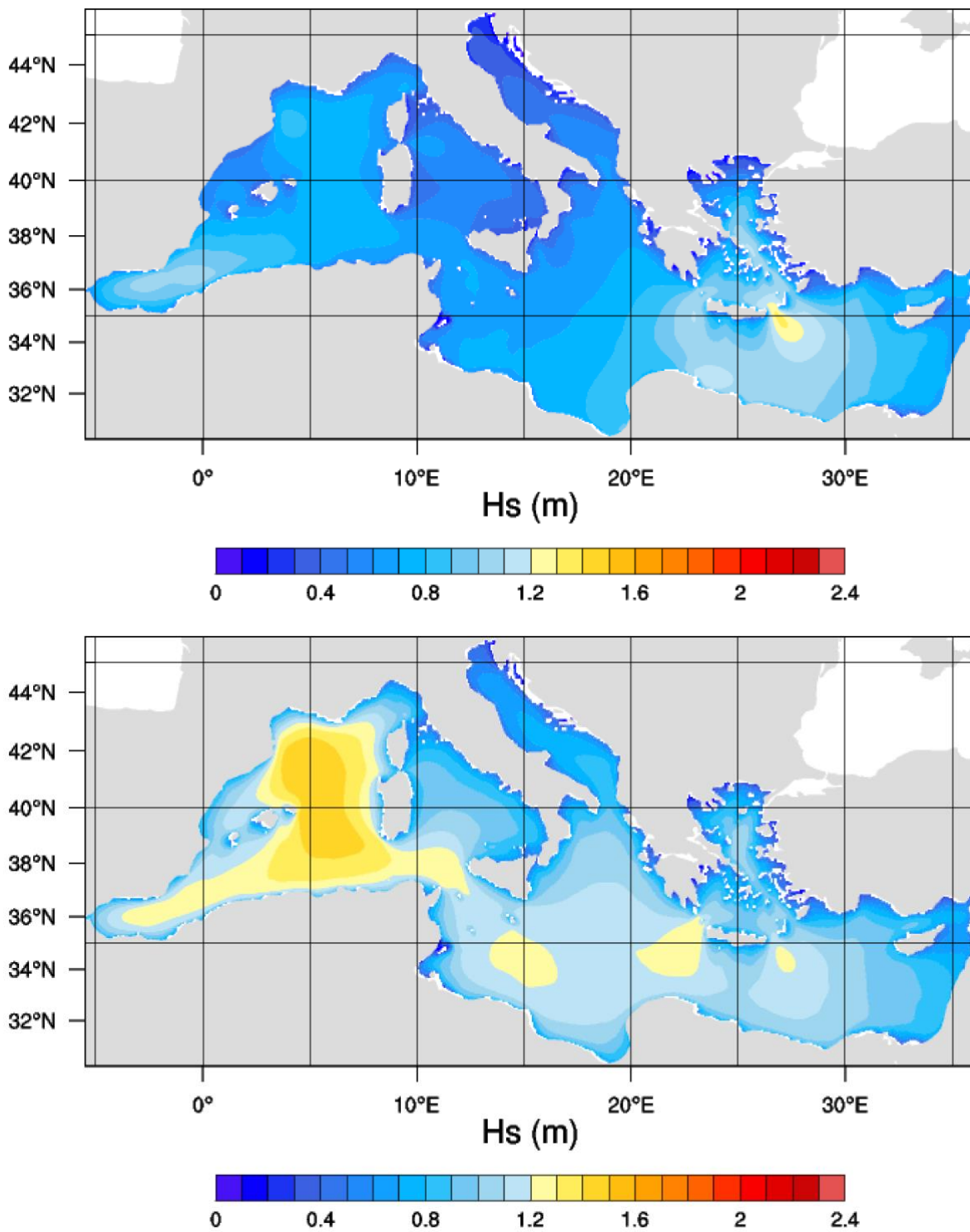
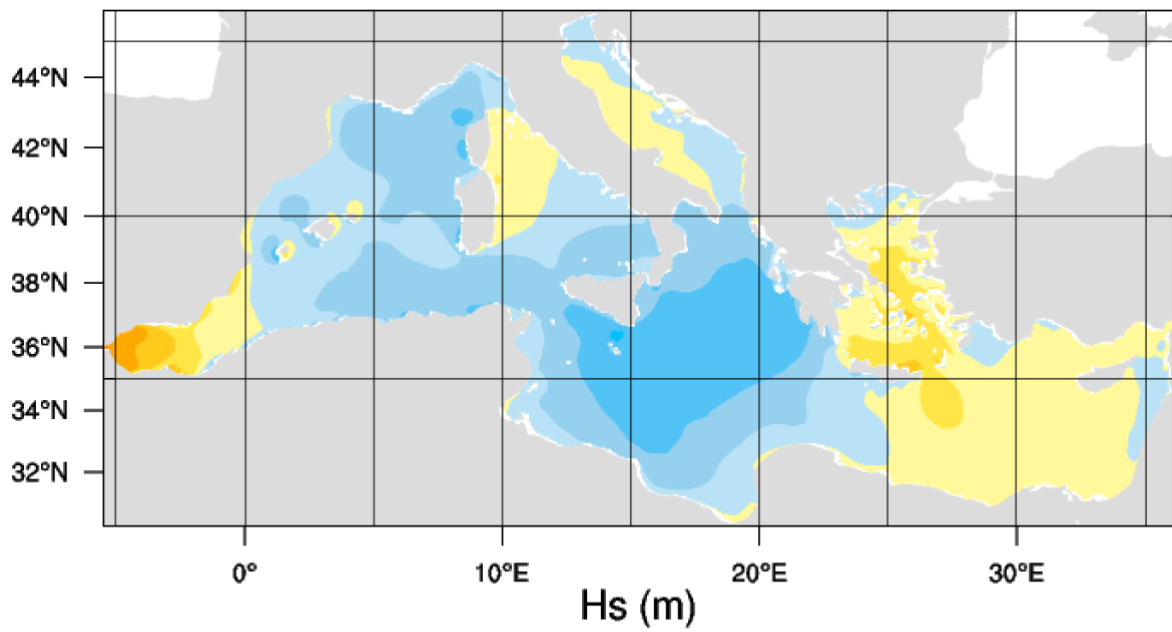
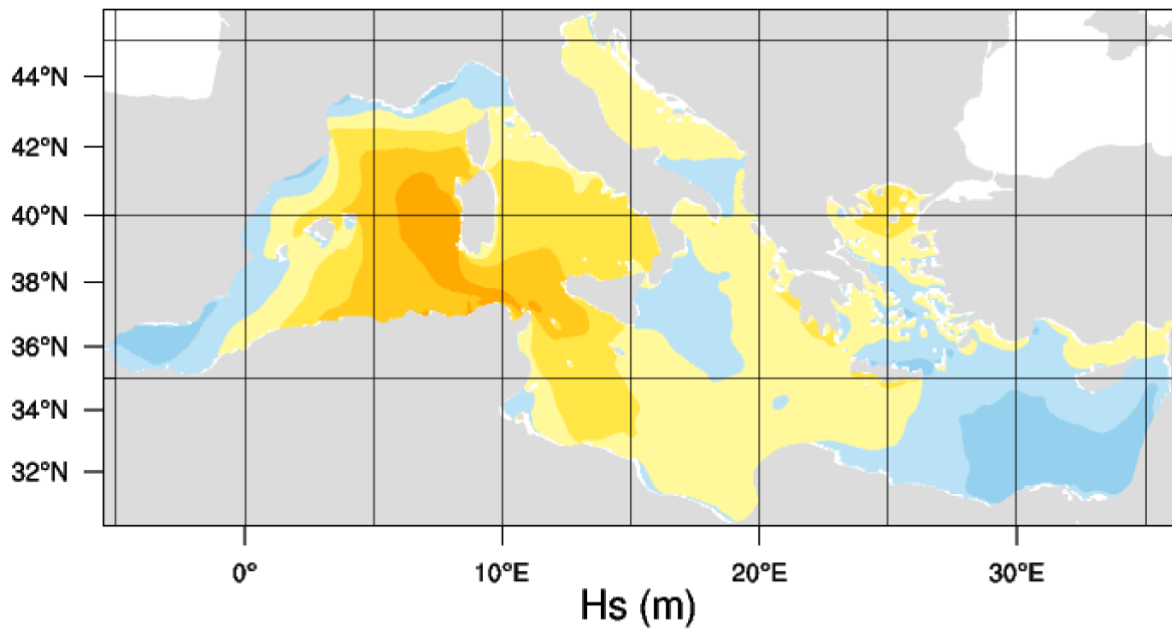


Figura 11 – Climatologie stagionali di altezza significativa calcolate sulla simulazione con il modello WW3 per il periodo 1996-2005. Dall'alto inverno, primavera, estate e autunno.



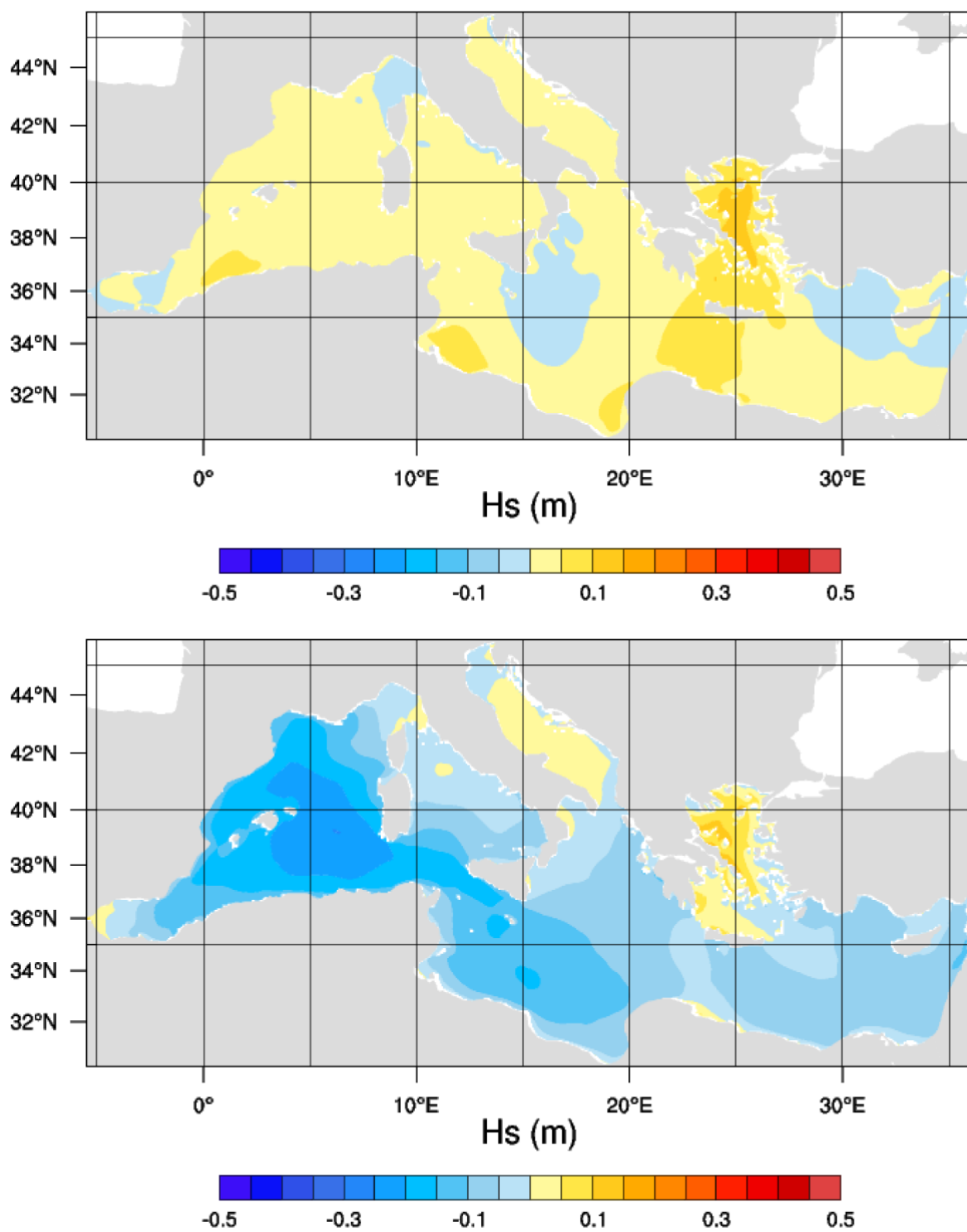
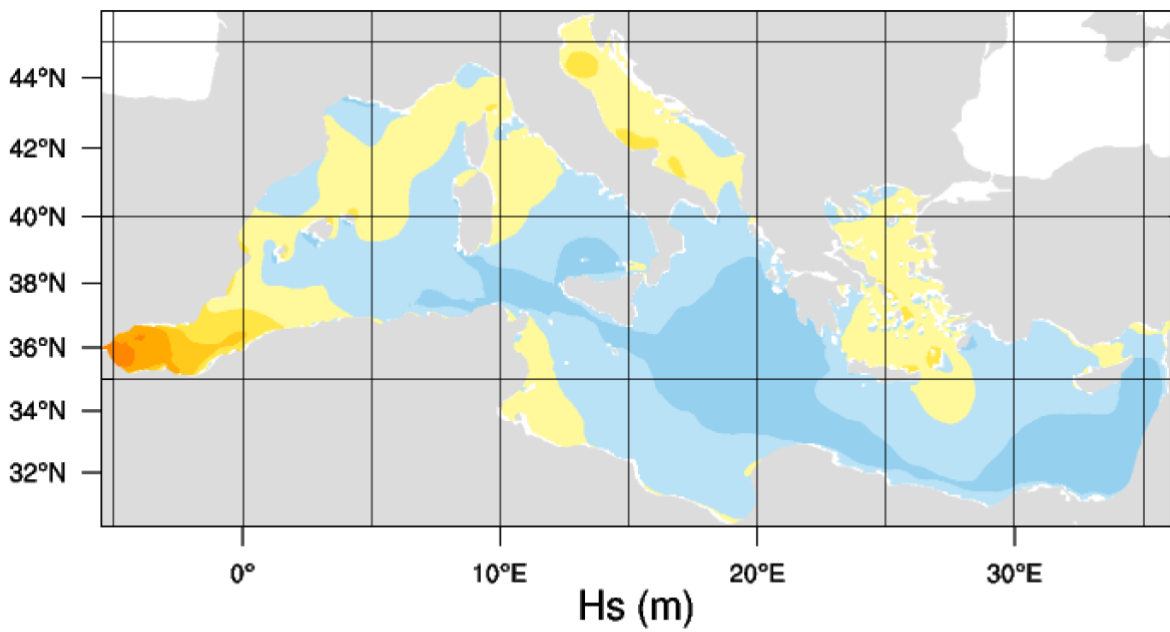
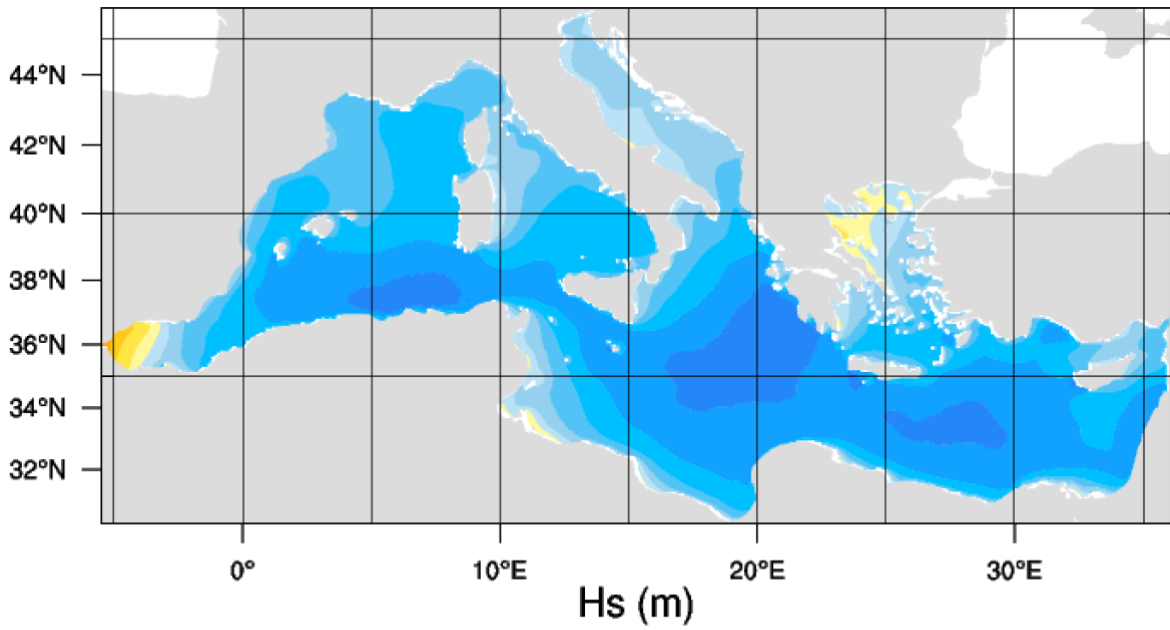


Figura 12 – Differenza tra le climatologie stagionali di altezza significativa calcolate sulla simulazione di scenario RCP-8.5 per il periodo 2041-2050 e sul periodo storico. Dall'alto inverno, primavera, estate e autunno.



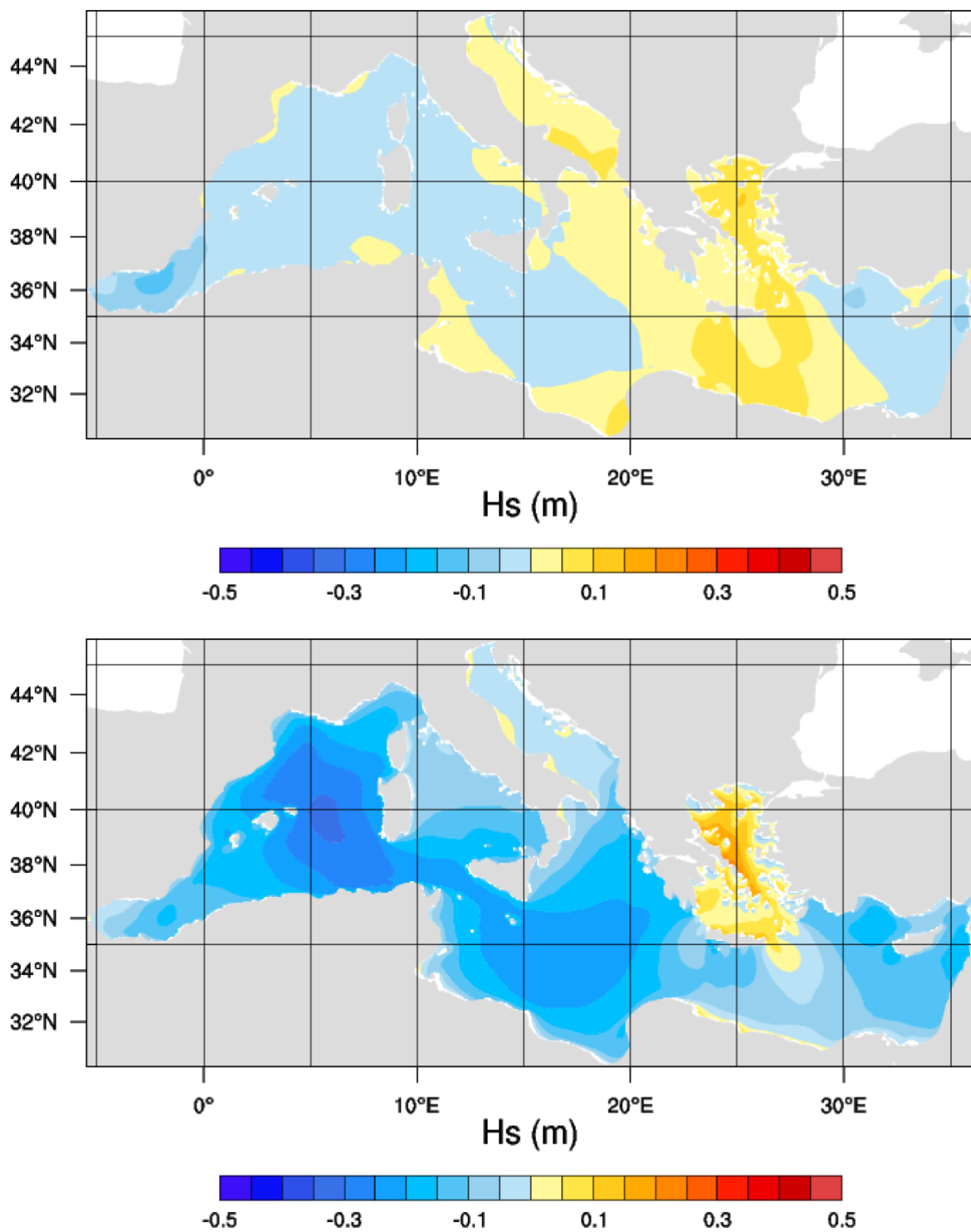


Figura 13 – Differenza tra le climatologie stagionali di altezza significativa calcolate sulla simulazione di scenario RCP-8.5 per il periodo 2090-2099 e sul periodo storico. Dall'alto inverno, primavera, estate e autunno.

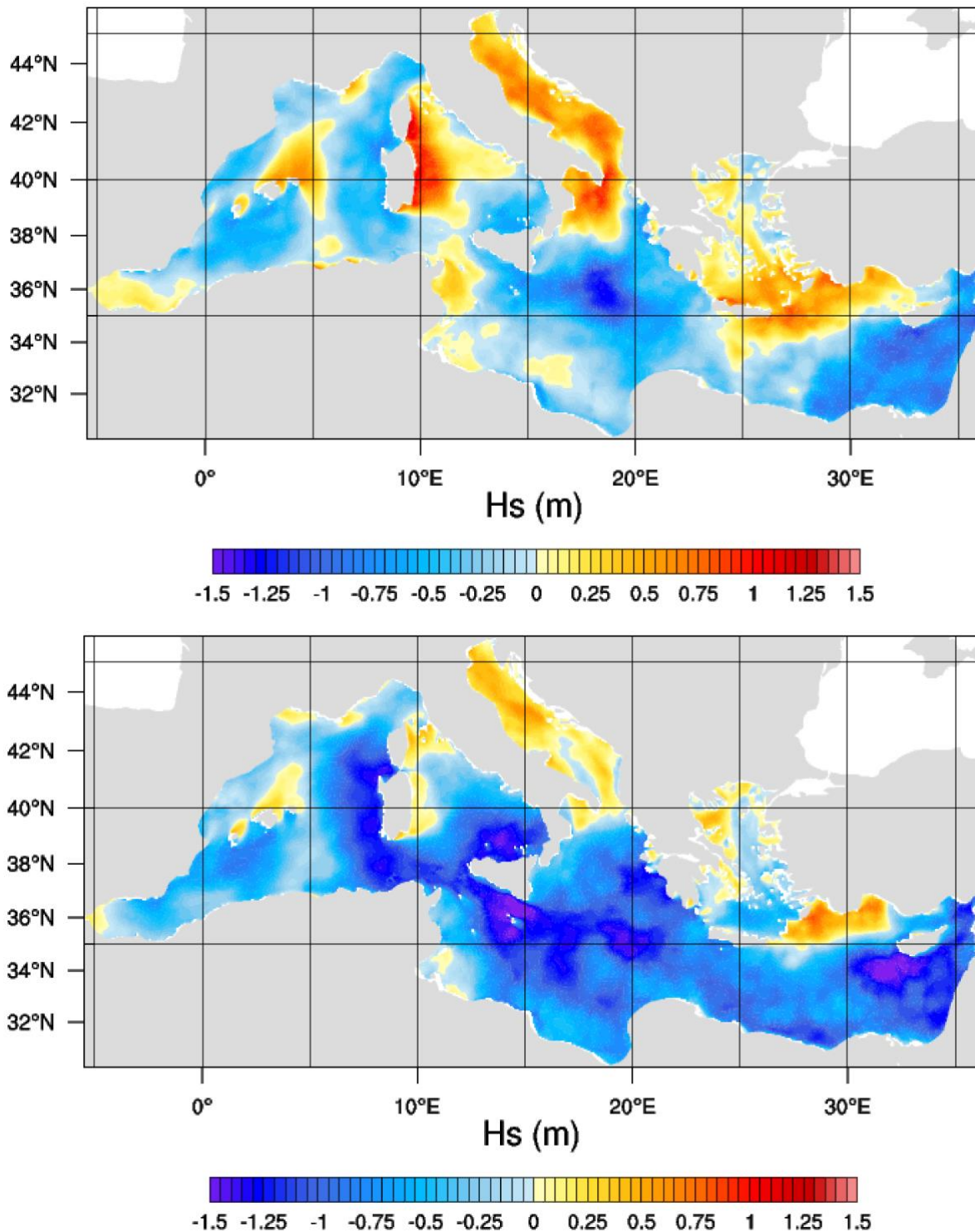


Figura 14 – Differenza tra le medie dei massimi annuali di altezza significativa calcolate sulla simulazione di scenario RCP8.5 per il periodo 2041-2050 (pannello superiore) e 2090-2099 (pannello inferiore) rispetto alle stesse medie calcolate sul periodo storico.

### 3 Conclusioni

Nel presente rapporto è stata descritta la nuova climatologia delle onde, realizzata utilizzando come forzante superficiale una simulazione effettuata con il modello atmosferico WRF, accoppiato con il modello di circolazione del mare MITgcm. La simulazione, della durata di 36 anni, dal 1980 al 2015, è stata effettuata con il modello WW3 alla risoluzione orizzontale di  $1/32^\circ$ . È stato illustrato il confronto delle altezze significative prodotte dal modello con le misure da satellite e con le misure della rete ondometrica nazionale RON. La validazione ha mostrato un ottimo accordo in particolare con i dati da satellite. Per quanto riguarda il confronto con le boe, tutti i parametri statistici considerati mostrano in generale un buon accordo tranne in alcuni siti per i quali si è osservata una leggera sottostima dei risultati rispetto ai valori misurati, probabilmente legata a specifiche condizioni locali. I dati triorari relativi a tre siti, scelti nelle zone che presentano una maggiore intensità del moto ondoso, sono stati utilizzati per una analisi più dettagliata della risorsa, che comprende la valutazione dell'energia annua disponibile per unità di lunghezza.

Tre simulazioni, della lunghezza di 10 anni ciascuna, sono poi state utilizzate per valutare il possibile effetto dei cambiamenti climatici sul clima ondoso nell'area mediterranea. Le simulazioni sono state forzate utilizzando lo stesso modello atmosferico regionale in condizioni di clima presente, e per due periodi di clima futuro rispettivamente 2041-2050 e 2090-2099. Il confronto delle climatologie stagionali dell'altezza delle onde per il futuro prossimo mostra un aumento dell'intensità, principalmente in inverno ed estate, ed una diminuzione in autunno. La differenza nelle medie dei massimi annuali mostra aumenti anche superiori al metro nel Tirreno occidentale, nell'Adriatico e nell'Egeo e diminuzioni nel resto del bacino.

Per quanto riguarda la proiezione per la fine del secolo, prevale una diminuzione dell'intensità, ma si nota ancora un leggero aumento nella regione orientale in particolare in estate. I valori massimi su questo orizzonte temporale subiscono, per la maggior parte del bacino, riduzioni superiori al metro di altezza significativa ad esclusione di aree limitate nell'Adriatico e vicino all'isola di Creta.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Hill C, DeLuca C, Balaji V, Suarez M, Da Silva A (2004) The architecture of the Earth System Modeling Framework. *Comput Sci Eng* 6(1):18–28
2. Collins N, Theurich G, Deluca C, Suarez M, Trayanov A, Balaji V, Li P, Yang W, Hill C, Da Silva A (2005) Design and implementation of components in the Earth System Modeling Framework. *Int J High Perform Comput Appl* 19(3):341–350
3. Anav, A. Carillo, M. Palma, M. V. Struglia, U. U. Turuncoglu, G. Sannino - "The Enea-Reg System (V1.0), A Multi-Component Regional Earth System Model. Sensitivity To Different Atmospheric Components Over Med-Cordex Region – under revision GMD 2021
4. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D68S4MVH
5. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., and Bauer, d. P.: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137, 553-597, 2011.
6. J. Marshall, A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey: A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers, *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 102, No. C3, Pages 5753-5766, March 15, 1997
7. Reale, M., Giorgi, F., Solidoro, C., Di Biagio, V., Di Sante, F., Mariotti, L., Farneti, R., and Sannino, G.: The Regional Earth System Model RegCM - ES: Evaluation of the Mediterranean climate and marine biogeochemistry, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, e2019MS001812,
8. The WAVEWATCH III R Development Group (WW3DG) (2019). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 pp. + Appendices
9. Tolman, H. L., 1989: The numerical model WAVEWATCH: a third-generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering* 89-2, Delft University of Technology, ISSN 0169–6548, 72 pp.
10. Tolman, H. L., 1990: Wind wave propagation in tidal seas. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering* 90-1, Delft University of Technology, ISSN 0169–6548, 135 pp. (Doctoral Thesis).
11. Tolman, H. L., 1991: A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 782–797.
12. H. L. Tolman and the WAVEWATCH III Development Group, User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18 - Technical Note - March 2014
13. The WAVEWATCH III R Development Group (WW3DG), 2016: User manual and system documentation of WAVEWATCH IIIR version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp.+ Appendices.
14. GEBCO. <http://www.gebco.net/data and products/gridded bathymetry data/>
15. Ribal, A., Young, I.R. 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations. *Sci Data* 6, 77 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0083-9>
16. Willmott, C. J., 1982: Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 1309–1313, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982))
17. Strandberg G, Barring L, Hansson U, Jansson C, Jones C (2014) CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4