



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Valutazione del potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste italiane

*G. Sannino, A. Bargagli, A. Carillo,
E. Caiaffa, E. Lombardi, P. Monti, G. Leuzzi.*



VALUTAZIONE DEL POTENZIALE ENERGETICO DEL MOTO ONDOSI LUNGO LE COSTE ITALIANE

G. Sannino, A. Carillo, A. Bargagli, E. Caiaffa, E. Lombardi (ENEA)

P. Monti, G. Leuzzi (Università di Roma La Sapienza, DICEA)

Settembre 2011

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine

Responsabile Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Si ringrazia il Servizio Mareografico dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) per aver reso disponibile attraverso il sito <http://www.idromare.it/> i dati registrati dalle boe della rete ondometrica nazionale (RON).

VALUTAZIONE DEL POTENZIALE ENERGETICO DEL MOTO ONDOSO LUNGO LE COSTE ITALIANE

1. Introduzione.....	2
2. Simulazione clima presente 2001-2010 SIM_ECMWF.....	2
2.1. Validazione	2
2.2. Moto ondoso	24
2.3. Potenziale energetico	26
3. Uso dello strumento GIS per la caratterizzazione del potenziale energetico associato al moto ondoso.....	37
3.1. WEB GIS	43
4. Confronto statistico tra il decennio 2001-2010 e il decennio 2041-2050.....	45
4.1. EOF.....	46
4.2. Risultati.....	46
5. Bibliografia.....	51

1. INTRODUZIONE

Una stima dettagliata e completa dell'energia delle onde per i mari italiani non è fino ad oggi disponibile. Allo stato attuale, la quasi totalità delle informazioni relative al potenziale energetico del moto ondoso è valutata sulla base dei dati registrati dalle 15 boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON), attiva dal 1989 e gestita dal Servizio Mareografico dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Le boe RON sono distribuite lungo tutta la fascia costiera italiana secondo lo schema riportato in Figura 1.

Tutte le boe RON sono situate in acque profonde, ossia la profondità in corrispondenza della boa è maggiore della metà del massimo della lunghezza d'onda, quindi è possibile calcolare il flusso di energia del moto ondoso utilizzando l'equazione:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_{m0,-1} H_{m0}^2 / 1000 \text{ [kW/m]}$$

dove ρ rappresenta la densità del mare (valore pari circa a 1025 Kg/m^3) e g è la gravità. In questa formula viene utilizzato il momento di ordine zero dell'altezza dell'onda H_{m0} ed il periodo medio dello spettro $T_{m0,-1}$ che possono essere ricavati dai dati registrati dalle boe.

I dati ottenuti dall'analisi delle boe RON, nonostante costituiscano una fonte insostituibile di informazioni, non forniscono una copertura spaziale adeguata per l'individuazione dei siti costieri per l'estrazione dell'energia ondosa. Lo strumento modellistico è quindi necessario per colmare questa limitazione.

Nel corso del lavoro saranno presentati risultati ottenuti utilizzando il WAVE prediction Model (WAM, WAMDI-Group 1988), configurato secondo quanto riportato nel rapporto tecnico dal titolo "Modello di onde per l'area mediterranea" (Bargagli et al.). Il modello è stato forzato con i dati di vento provenienti da tre diversi dataset, due relativi al clima presente (SIM_ECMWF, SIM_CP) e uno al clima futuro (SIM_CF). Le analisi sono state effettuate sui dati di output di queste simulazioni e confrontati con i valori ottenuti dalle misure delle boe.

2. SIMULAZIONE CLIMA PRESENTE 2001-2010 SIM_ECMWF

2.1. Validazione

La qualità delle simulazioni del moto ondoso, a parità di risoluzione orizzontale, dipende in maniera significativa dall'accuratezza dei dati di vento utilizzati come forzante superficiale. Per questo motivo, per determinare il potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste italiane, si è deciso di utilizzare il miglior dataset di vento disponibile a fini scientifici. Per l'area mediterranea il miglior dataset è sicuramente costituito dalle analisi prodotte dal Centro Europeo per le previsioni meteo a medio termine (ECMWF), in questo caso il calcolo dei campi atmosferici viene effettuato utilizzando anche una procedura di assimilazione dei dati meteorologici da stazioni al suolo, di misure da palloni sonda e di misure telerilevate. In particolare, i campi di vento utilizzati provengono dalle analisi meteorologiche prodotte in modalità operativa per il periodo 2001-2010. La risoluzione spaziale del codice operativo del Centro Europeo è andata

aumentando nel tempo fino a raggiungere nel 2010 una risoluzione spettrale T511 corrispondente a una risoluzione orizzontale di circa 40 km. Per ragioni di uniformità, i dati utilizzati per forzare il modello WAM sono stati interpolati per tutto il periodo sulla stessa griglia alla risoluzione di $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

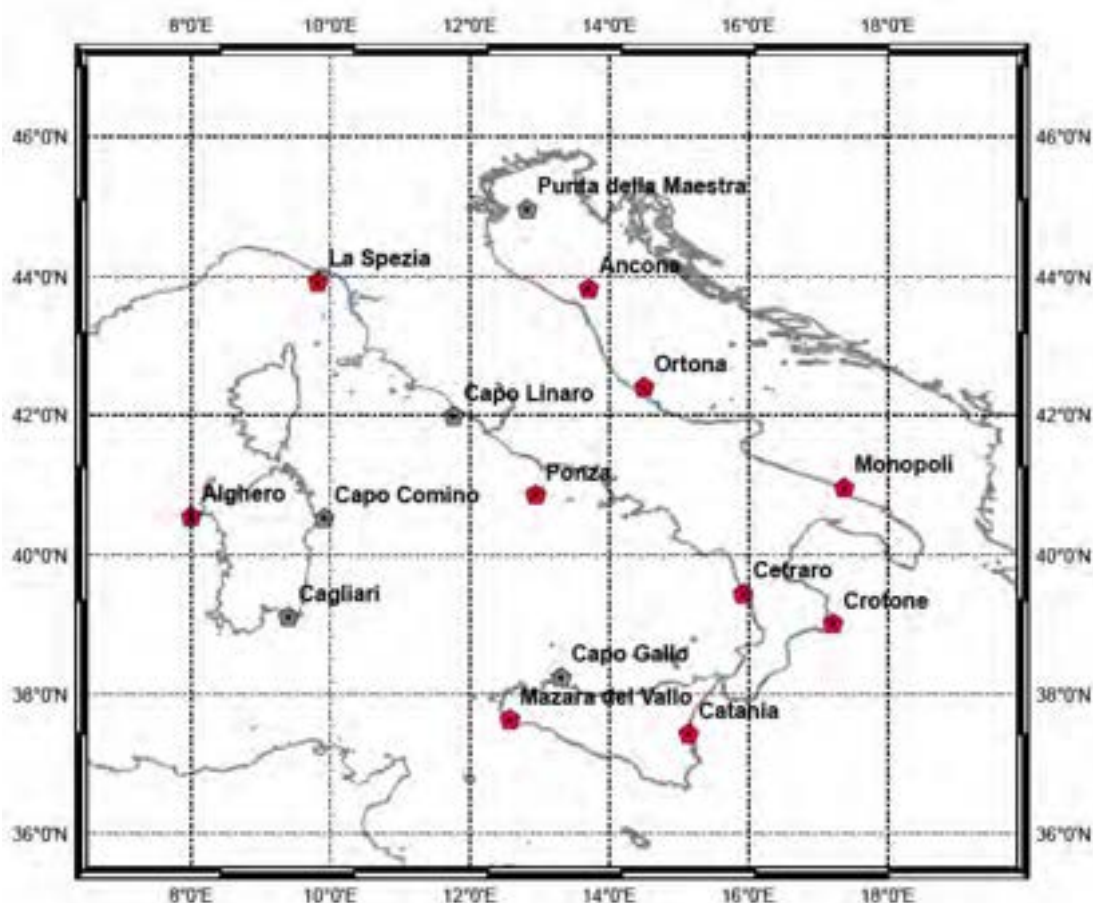


Figura 1: Posizione delle boe della Rete Ondamentrica Nazionale (RON). I dati delle boe evidenziate in rosso sono stati utilizzati nel presente studio. Le boe indicate in grigio non sono state considerate perché l'estensione temporale delle serie non è sufficientemente lunga.

I risultati del modello WAM sono stati validati tramite il confronto con i valori misurati dalle boe RON, i cui dati sono disponibili all'indirizzo URL: <http://www.idromare.it/>. I confronti sono stati effettuati estraendo dall'output del modello i valori relativi ai punti di griglia geometricamente più vicini alle posizioni occupate dalle boe stesse. Le boe sono state installate in periodi diversi, quindi per effettuare le analisi sono state selezionate solo le dieci boe (Figura 1, Tabella 1) operative per un periodo di tempo significativo. Il periodo di osservazione considerato nelle analisi è compreso nell'intervallo tra il 1 Gennaio 2001 (data iniziale della simulazione) e il 31 Dicembre 2007. Sebbene per alcune boe fossero disponibili dati più recenti, si è preferito limitare le analisi fino al 31 Dicembre 2007, a causa della ridotta continuità della copertura temporale delle registrazioni nel periodo successivo (Figura 2).

N	Boa	Periodo di funzionamento		Coordinate	
		Inizio	Fine	Nord	Est
1	Alghero	1 Luglio 1989	5 Aprile 2008	40°33'11.99"	08°07'00.01"
2	Ancona	1 Gennaio 1999	31 Maggio 2006	43°49'47.21"	13°42'52.49"
3	Cagliari	6 Febbraio 2007	2 Marzo 2008	39°06'52.20"	09°24'20.99"
4	Capo Comino	1 Gennaio 2004	12 Settembre 2005	40°31'59.99"	09°55'00.01"
5	Capo Gallo	1 Gennaio 2004	31 Marzo 2008	38°14'60.00"	13°19'00.10"
6	Capo Linaro	2 Gennaio 2004	12 Settembre 2006	42°00'00.00"	11°46'36.10"
7	Catania	1 Luglio 1989	5 Ottobre 2006	37°26'24.00"	15°08'48.01"
8	Cetraro	1 Gennaio 1999	5 Aprile 2008	39°27'08.30"	15°55'43.14"
9	Crotone	1 Luglio 1989	15 Luglio 2007	39°01'23.99"	17°13'12.00"
10	La Spezia	1 Luglio 1989	31 Marzo 2007	43°55'41.99"	09°49'36.01"
11	Mazara del Vallo	1 Luglio 1989	4 Aprile 2008	37°38'43.19"	12°34'57.00"
12	Monopoli	1 Luglio 1989	5 Aprile 2008	40°58'30.00"	17°22'36.10"
13	Ortona	1 Luglio 1989	24 Marzo 2008	42°24'54.00"	14°30'20.99"
14	Ponza	1 Luglio 1989	31 Marzo 2008	40°52'00.10"	12°56'60.00"
15	Punta della Maestra	1 Gennaio 2004	24 Novembre 2004	44°58'18.10"	12°49'59.99"

Tabella 1: Coordinate geografiche delle boe RON e loro periodo di funzionamento. In grassetto sono evidenziate le boe prese in considerazione nel corso delle analisi

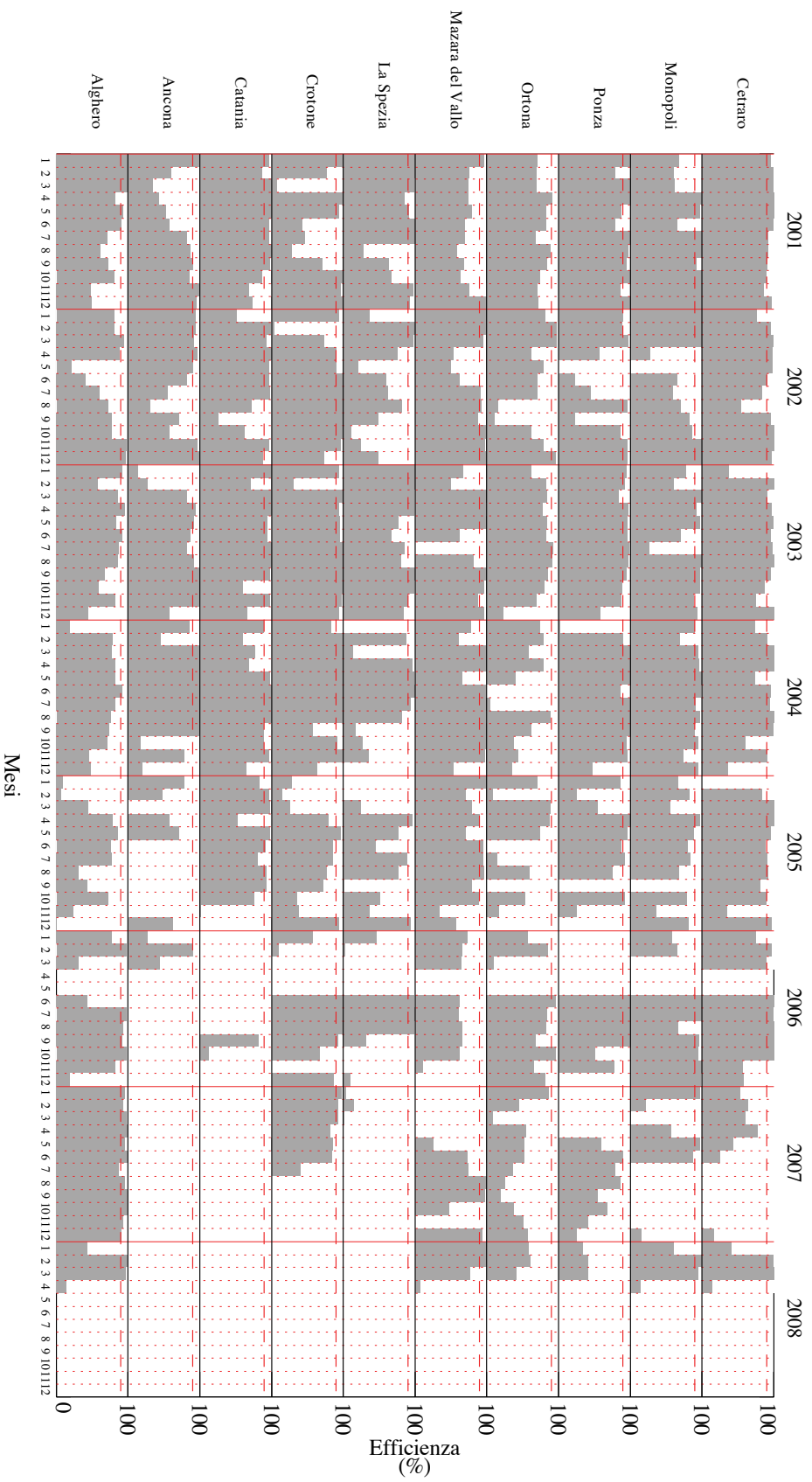


Figura 2: Efficienza di funzionamento delle boe RON. Le barre grigie indicano la percentuale di funzionamento nel mese considerato. Le righe tratteggiate rosse indicano la percentuale del 90%.

Sino al 2002, le boe RON hanno registrato lo stato del mare a una frequenza di tre ore, con incremento della frequenza a trenta minuti solo durante i casi di mareggiata. Dal 2002 i dati vengono registrati alla frequenza costante di trenta minuti. Per ragioni di uniformità statistica, i confronti modello-boa sono stati effettuati sempre sui dati triorari.

Come ulteriore verifica, i dati prodotti dalla simulazione SIM_ECMWF, sono stati confrontati anche con i risultati delle simulazioni effettuate, con una diversa implementazione del codice WAM, presso l'ECMWF. Il modello WAM viene utilizzato in modalità operativa all'ECMWF dal luglio 1992. Inizialmente venivano effettuate simulazioni a livello globale su una griglia alla risoluzione orizzontale di 3° e simulazioni alla risoluzione di 0.5° sull'area Mediterranea. La risoluzione è aumentata nel corso degli anni, sia per quanto riguarda le simulazioni globali che per quelle relative al dominio Mediterraneo, che dal luglio 1995 hanno raggiunto la risoluzione di 0.25°x0.25° (Figura 3).

Dall'agosto 1993 i dati di altezza delle onde registrate dagli altimetri satellitari sono assimilati nel modello WAM. Inizialmente venivano assimilati dati provenienti dal satellite ERS-1, poi sostituito da ERS-2 fino a ottobre 2003 quando iniziarono ad essere utilizzati dati provenienti da ENVISAT e successivamente dai satelliti Jason (1 e 2).

Nel caso della simulazione del Centro Europeo, i dati messi a disposizione della comunità scientifica sono a una frequenza di sei ore. I confronti modello-boa sono stati quindi in questo caso effettuati ogni sei ore.

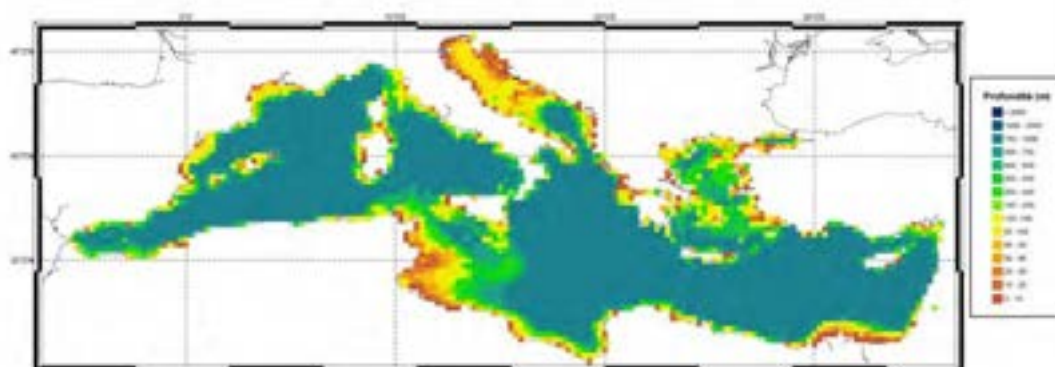


Figura 3: Batimetria utilizzata nel modello di onde operativo sviluppato presso il Centro Europeo ECMWF. Il modello ha una risoluzione orizzontale di 0.25°x0.25°.

Il confronto è stato eseguito sia qualitativamente, analizzando graficamente l'andamento delle serie temporali (Figure 4-7), sia statisticamente, calcolando la correlazione tra i valori di altezza significativa (H_s) misurati e quelli simulati (Figure 8-17, Tabella 2).

Nelle Figure 4-7 sono mostrati alcuni esempi dell'andamento temporale dello stato del mare in termini di altezza significativa, direzione media e periodo medio e di picco. Nelle figure è riportato il confronto dell'andamento dei parametri d'onda simulati dal modello WAM (SIM_ECMWF) con quelli osservati dalle boe RON. Per quanto riguarda l'altezza significativa e il periodo medio, sono anche riportati gli andamenti relativi alle

simulazioni condotte dal Centro Europeo (indicate come ECMWF). In particolare, nelle figure vengono presentati i risultati in corrispondenza delle boe di Alghero, La Spezia e Mazara del Vallo, relativi a periodi della lunghezza di un mese in cui si è verificato almeno un evento di mareggiata. Da un'analisi qualitativa si può facilmente notare il buon accordo esistente sia per i periodi che per le direzioni. L'individuazione dei picchi di ampiezza avviene correttamente in entrambe le simulazioni, ma si osserva un accordo sistematicamente migliore per quanto riguarda i valori massimi raggiunti, per la simulazione SIM_ECMWF rispetto a quella ECMWF, in particolare durante gli eventi intensi. Questo può essere osservato ad esempio nella Figura 5, relativa al mese di Febbraio 2002 e alla boa di La Spezia, in cui il picco di ampiezza superiore a 4m, osservato il giorno 20, viene correttamente simulato in un caso e significativamente sottostimato nell'altro.

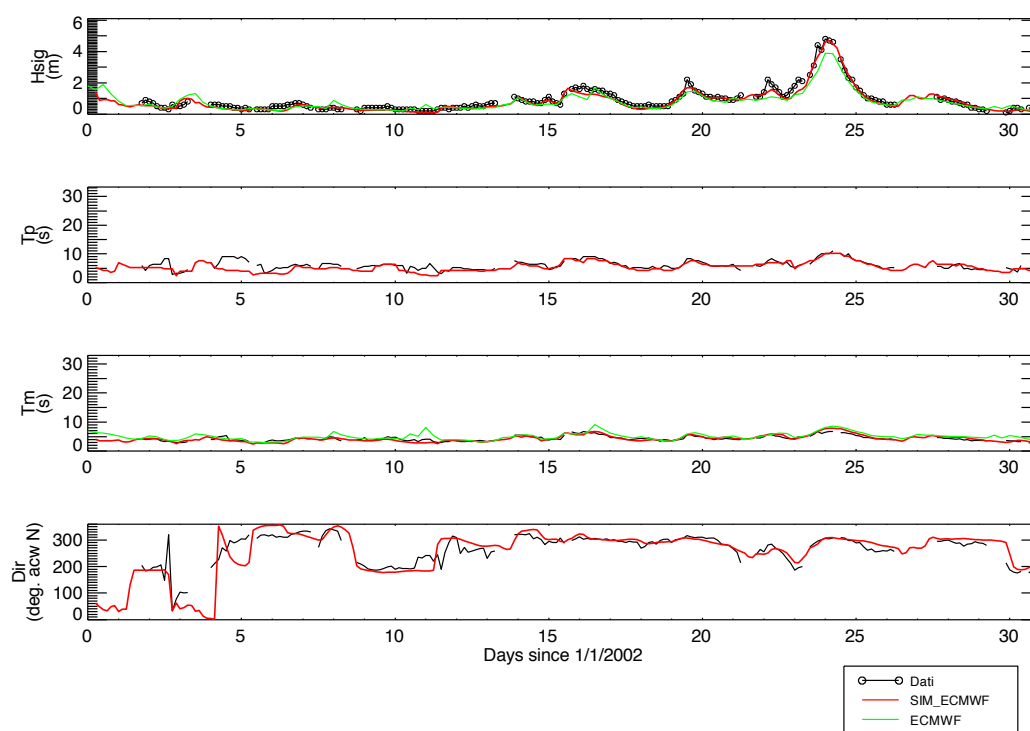


Figura 4: Confronto dell'andamento dei parametri d'onda prodotti dalla simulazione SIM_ECMWF (linee rosse) con quelli osservati dalle boe RON (linee nere) e simulati da ECMWF (linee verdi). I parametri confrontati sono: altezza significativa (Hsig) in metri, periodo di picco (Tp) e periodo medio (Tm) in secondi, direzione di provenienza (Dir) in gradi. I dati del periodo di picco e della direzione sono mostrati solo per i dati RON e la simulazione SIM_ECMWF. I dati si riferiscono alla stazione di Alghero per il mese di Gennaio 2002.

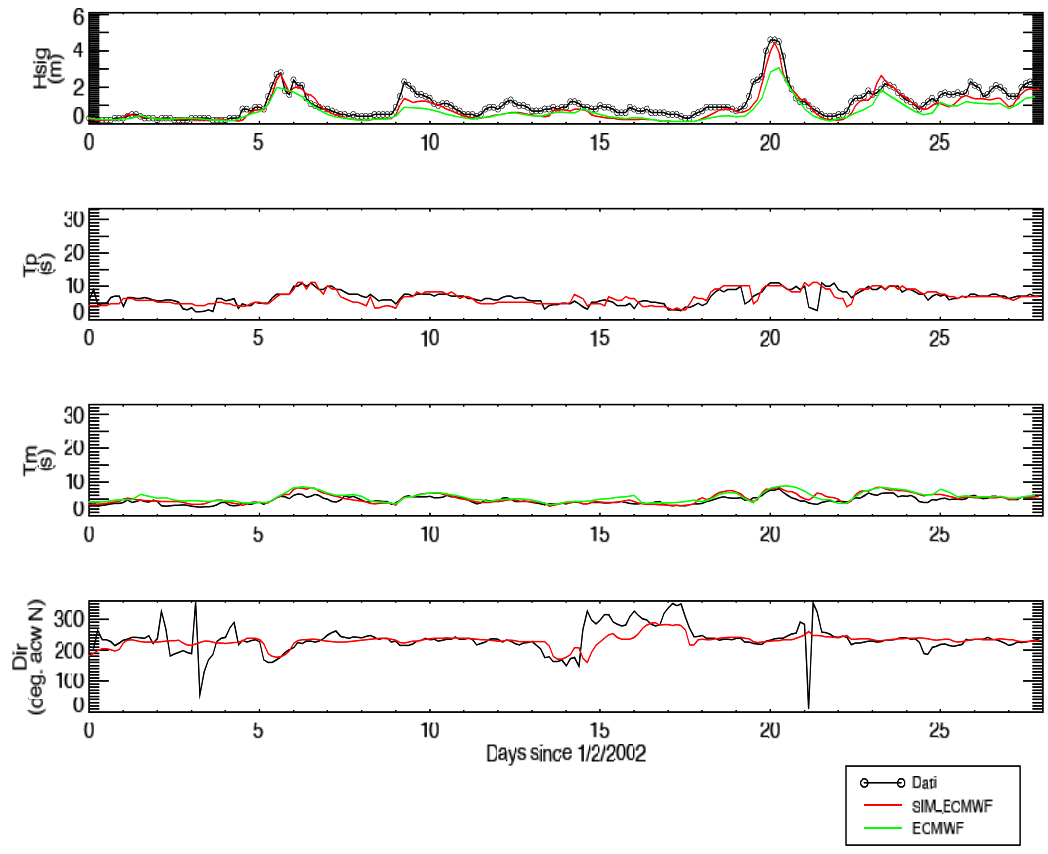


Figura 5: Confronto dell'andamento dei parametri d'onda prodotti dalla simulazione SIM_ECMWF (linee rosse) con quelli osservati dalle boe RON (linee nere) e simulati da ECMWF (linee verdi). I parametri confrontati sono: altezza significativa (Hsig) in metri, periodo di picco (Tp) e periodo medio (Tm) in secondi, direzione di provenienza (Dir) in gradi. I dati del periodo di picco e della direzione sono mostrati solo per i dati RON e la simulazione SIM_ECMWF. I dati si riferiscono alla stazione di La Spezia per il mese di Febbraio 2002.

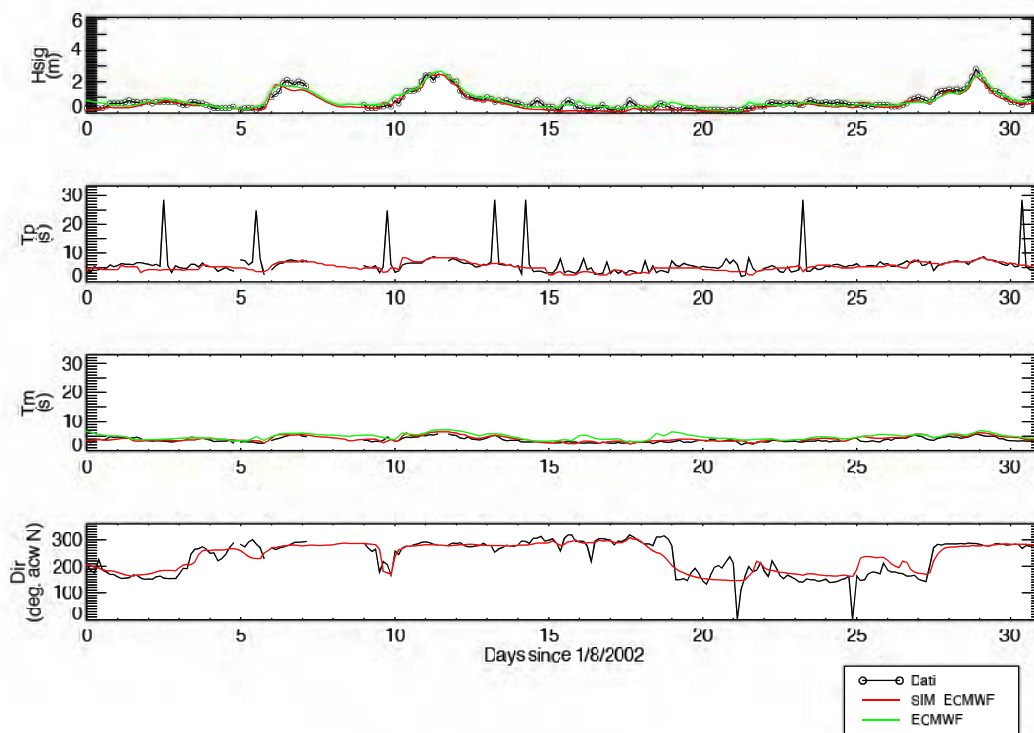


Figura 6: Confronto dell'andamento dei parametri d'onda prodotti dalla simulazione SIM_ECMWF (linee rosse) con quelli osservati dalle boe RON (linee nere) e simulati da ECMWF (linee verdi). I parametri confrontati sono: altezza significativa (Hsig) in metri, periodo di picco (Tp) e periodo medio (Tm) in secondi, direzione di provenienza (Dir) in gradi. I dati del periodo di picco e della direzione sono mostrati solo per i dati RON e la simulazione SIM_ECMWF. I dati si riferiscono alla stazione di Mazara del Vallo per il mese di Agosto 2002.

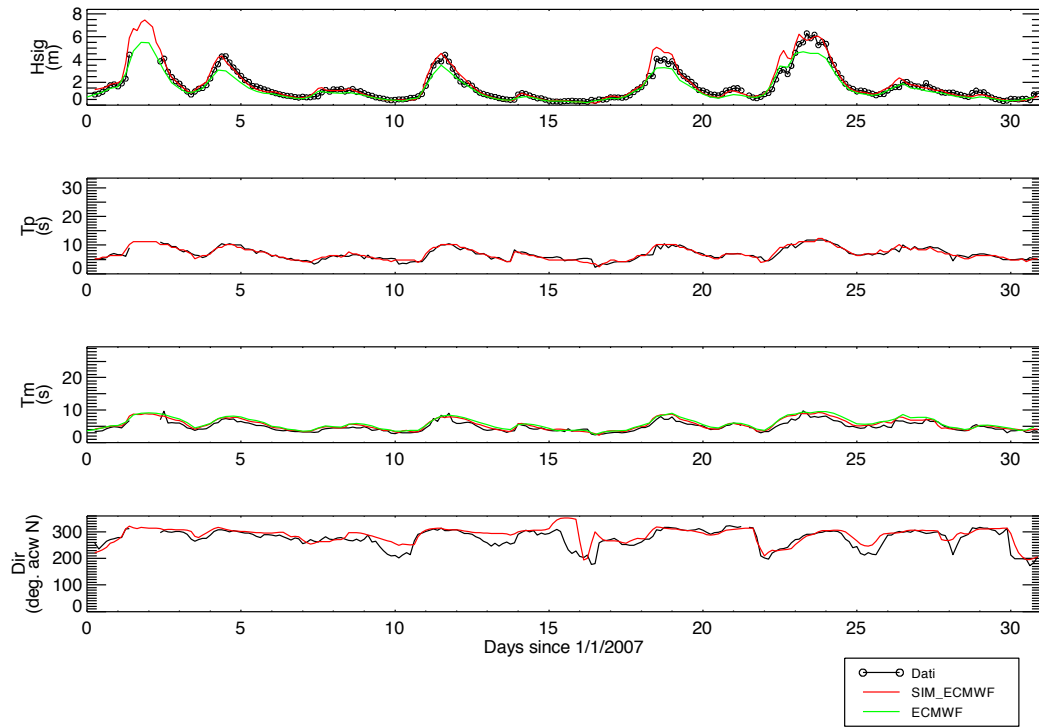


Figura 7: Confronto dell'andamento dei parametri d'onda prodotti dalla simulazione SIM_ECMWF (linee rosse) con quelli osservati dalle boe RON (linee nere) e simulati da ECMWF (linee verdi). I parametri confrontati sono: altezza significativa (Hsig) in metri, periodo di picco (Tp) e periodo medio (Tm) in secondi, direzione di provenienza (Dir) in gradi. I dati del periodo di picco e della direzione sono mostrati solo per i dati RON e la simulazione SIM_ECMWF. I dati si riferiscono alla stazione di Alghero per il mese di Gennaio 2007.

Una dettagliata analisi statistica è stata eseguita separatamente per ciascuna delle boe per confrontare i risultati ottenuti attraverso le simulazioni numeriche con i dati osservati RON per il periodo 2001-2007 (Figure 8-17).

L'analisi statistica è stata condotta sulle coppie di valori corrispondenti di altezza significativa simulata (y) e osservata RON (x). In particolare sono stati calcolati i seguenti parametri statistici:

- Bias (differenza tra i valori medi):

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)$$

- Rmse (radice quadrata dello scarto quadratico medio):

$$Rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}$$

- Scatter Index (SI):

$$SI = \frac{Rmse}{\bar{x}}$$

- Corr. Coeff. (coefficiente di correlazione):

$$corr. Coeff. = \frac{cov(x, y)^2}{var(x)var(y)}$$

$$var(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$cov(x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

- Slope (pendenza della retta di regressione passante per l'origine degli assi):

$$slope(x) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sum_{i=1}^N x_i x_i}$$

I parametri statistici relativi a tutte le boe considerate sono riportati in Tabella 2 insieme al numero di dati utilizzati. Dai grafici e dalla Tabella risulta che entrambi i modelli sottostimano l'altezza significativa, come dimostrato dai valori negativi del bias. Tuttavia, nella quasi totalità delle stazioni considerate, la simulazione SIM_ECMWF presenta un bias inferiore rispetto ai valori ottenuti da ECMWF, con un valore massimo rispettivamente di 0.21m nella simulazione SIM_ECMWF e di 0.28m in quella ECMWF. Anche per quanto riguarda il bias calcolato in termini di percentuale rispetto al valore massimo, la simulazione SIM_ECMWF presenta risultati migliori per quasi tutte le boe, fanno eccezione Ortona e Cetraro per le quali i valori statistici calcolati per le due simulazioni sono praticamente coincidenti. Vale la pena sottolineare che l'errore percentuale in corrispondenza delle due boe caratterizzate da valori più elevati di ampiezza (Alghero e Mazara del Vallo), è comunque inferiore al 3%.

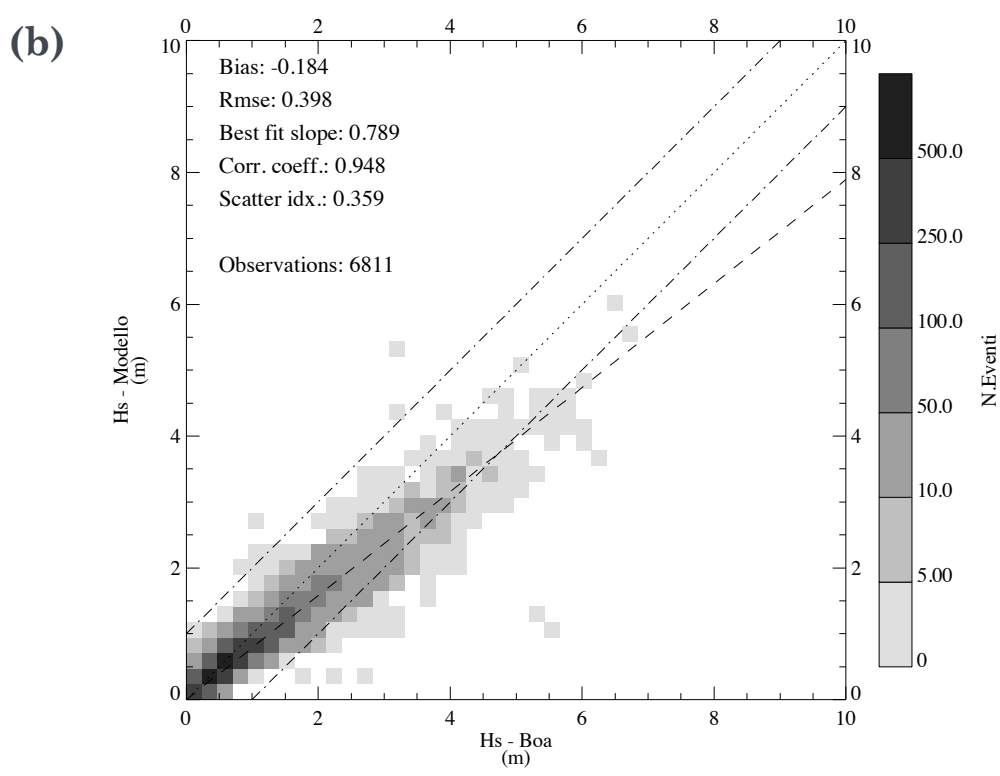
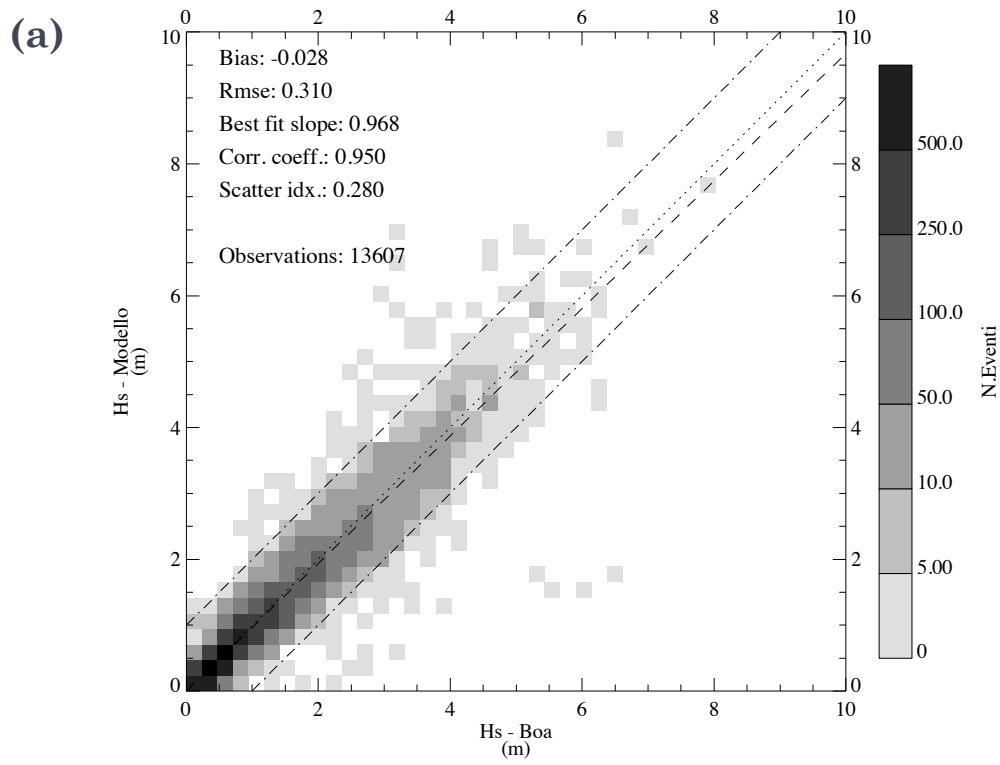


Figura 8: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Alghero per il periodo 2001-2007.

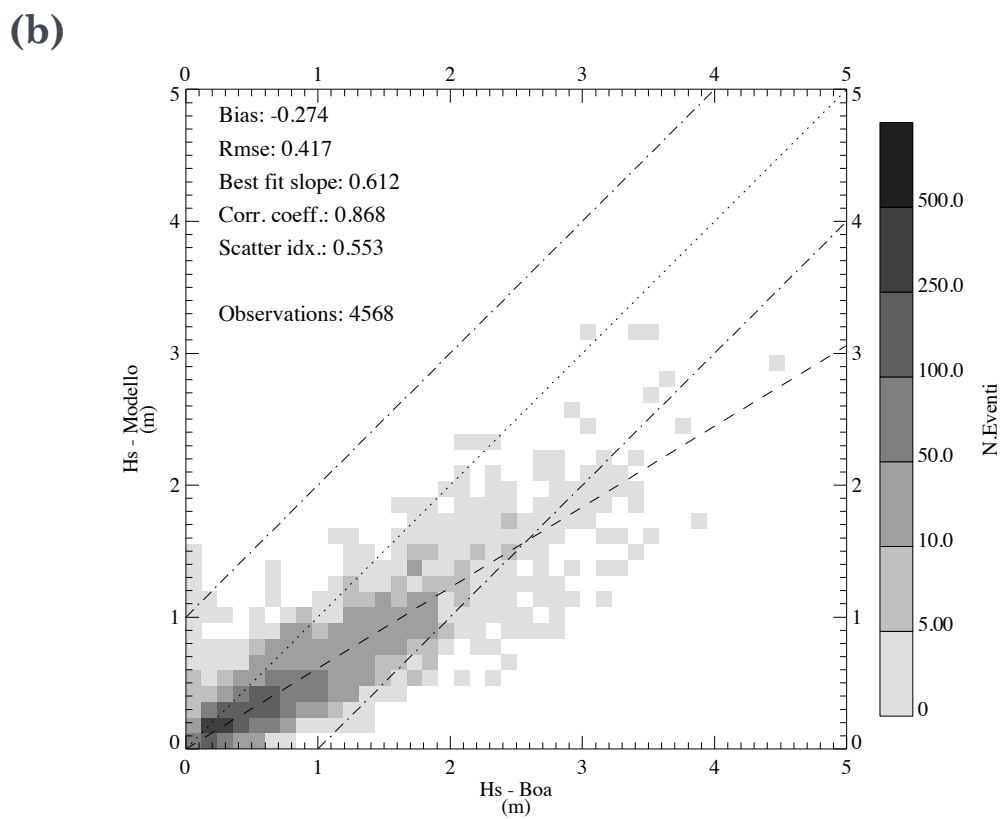
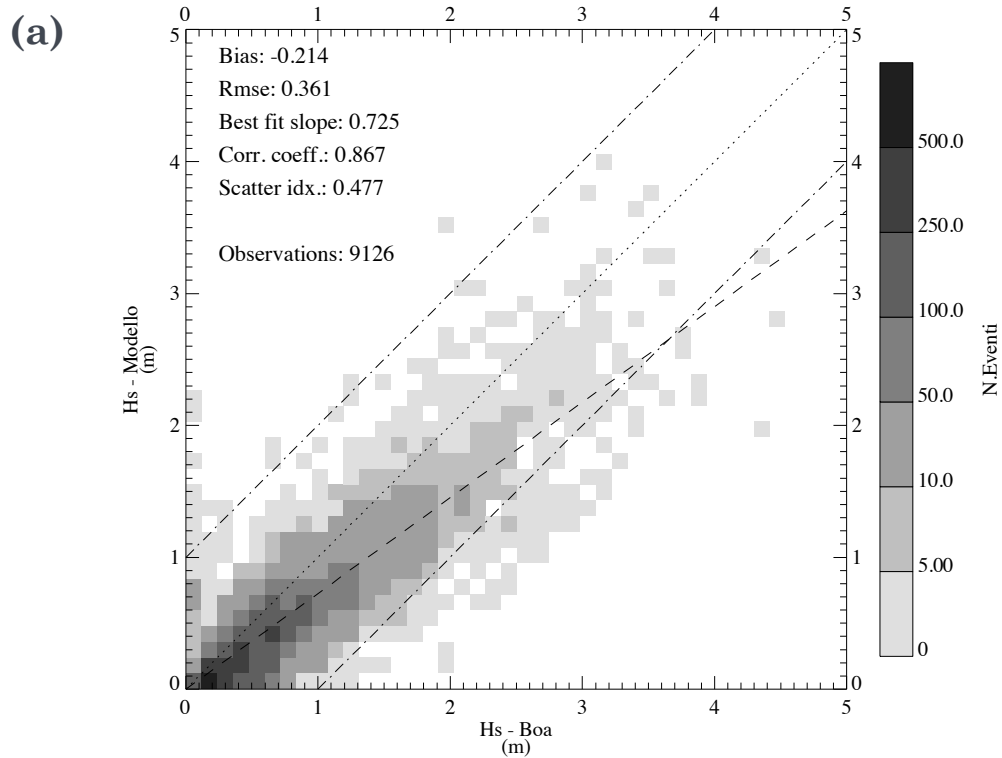
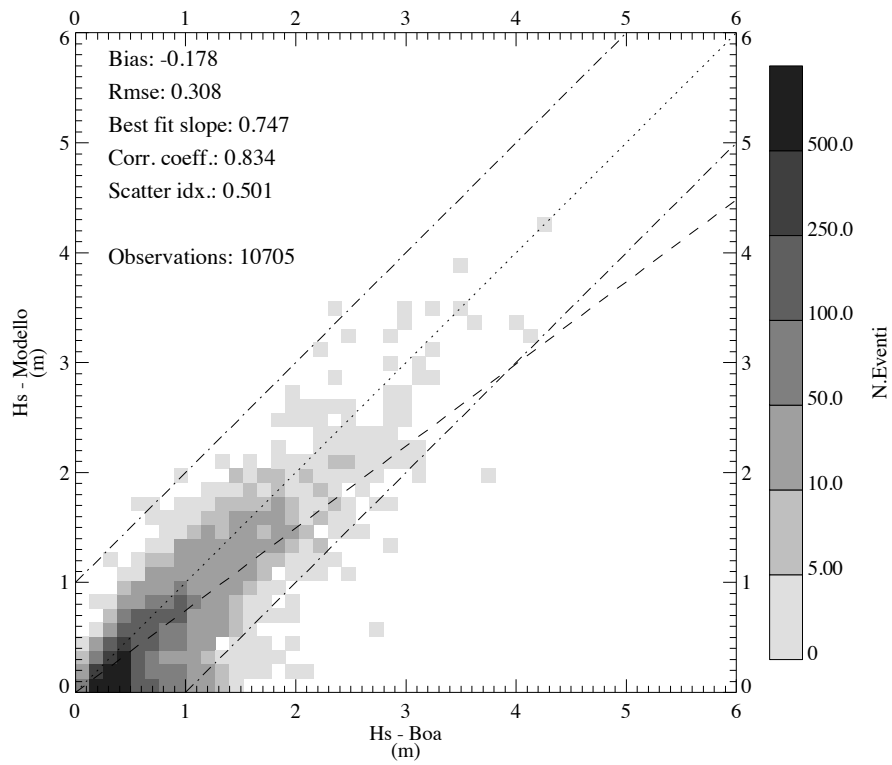


Figura 9: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Ancona per il periodo 2001-2007.

(a)



(b)

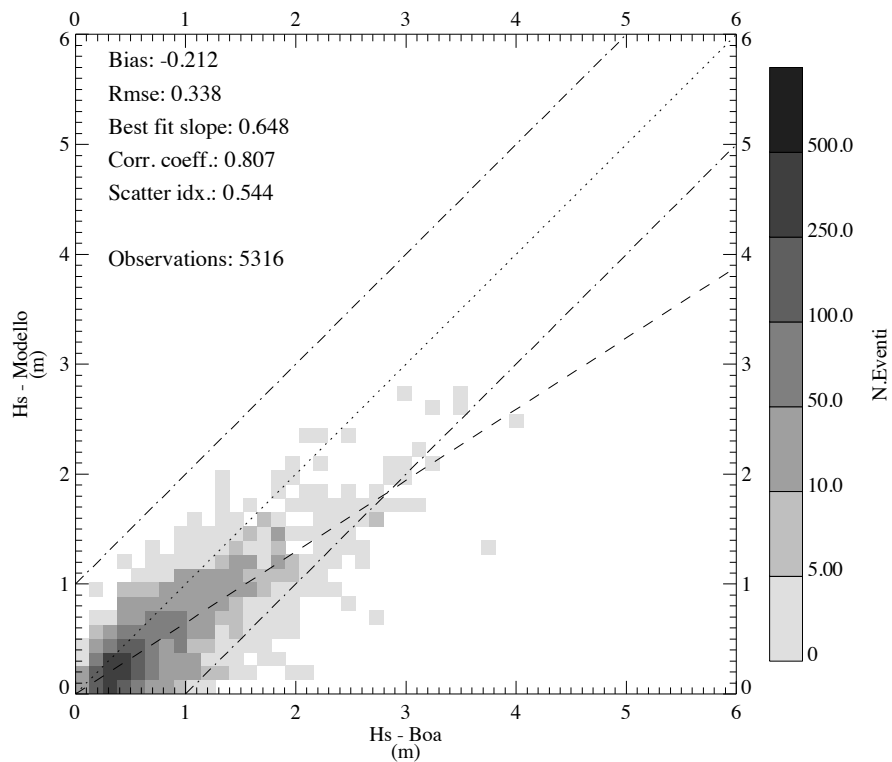
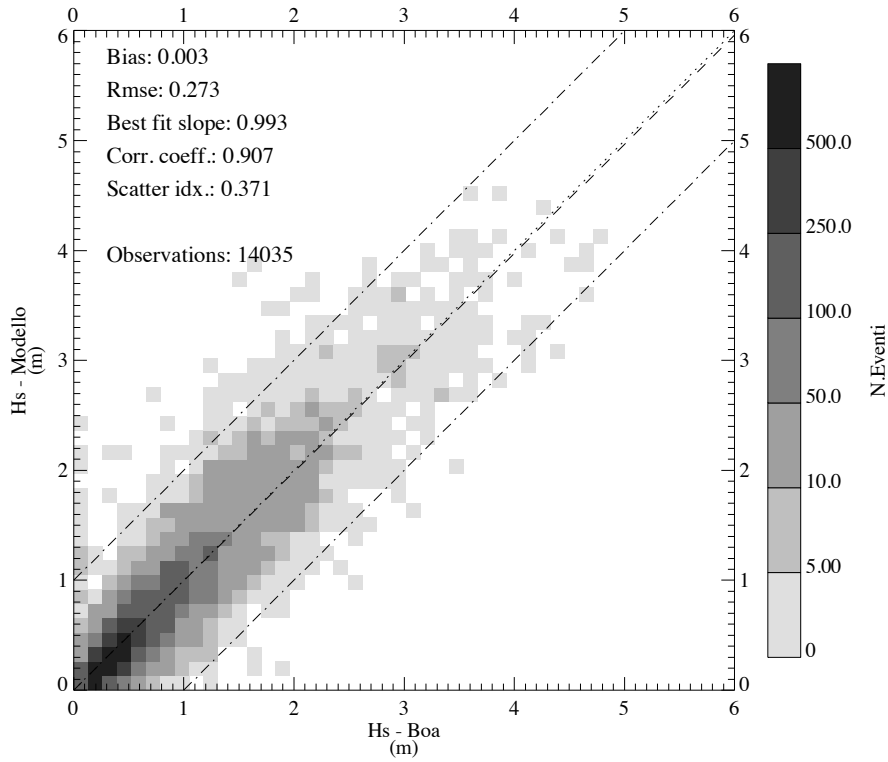


Figura 10: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Catania per il periodo 2001-2007.

(a)



(b)

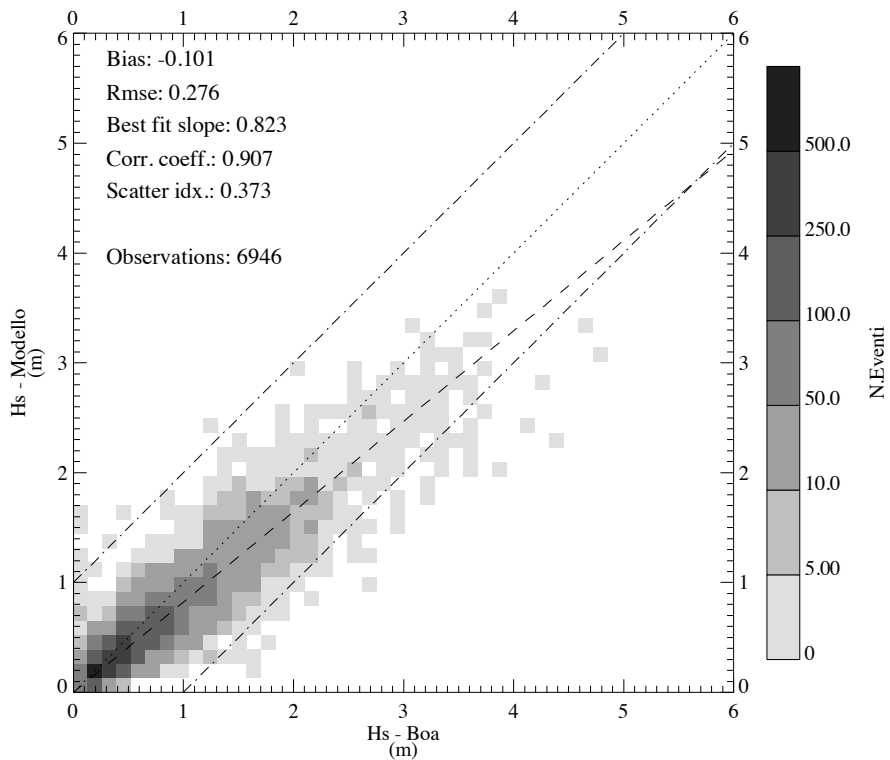


Figura 11: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Crotone per il periodo 2001-2007.

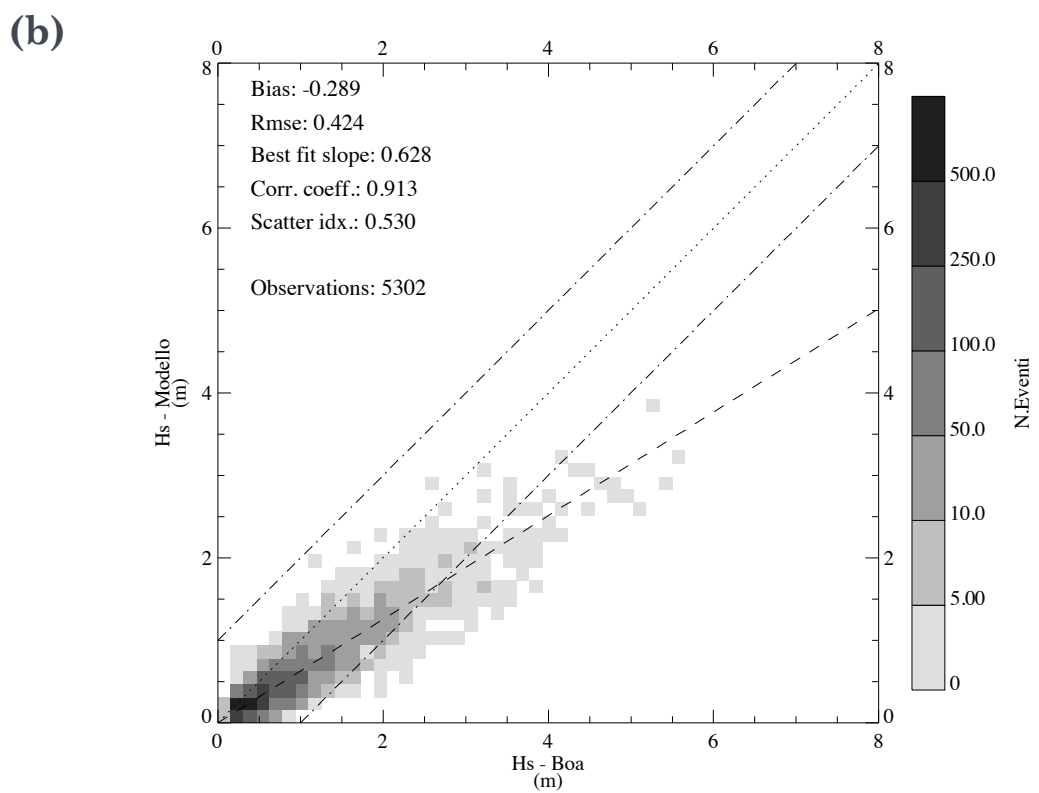
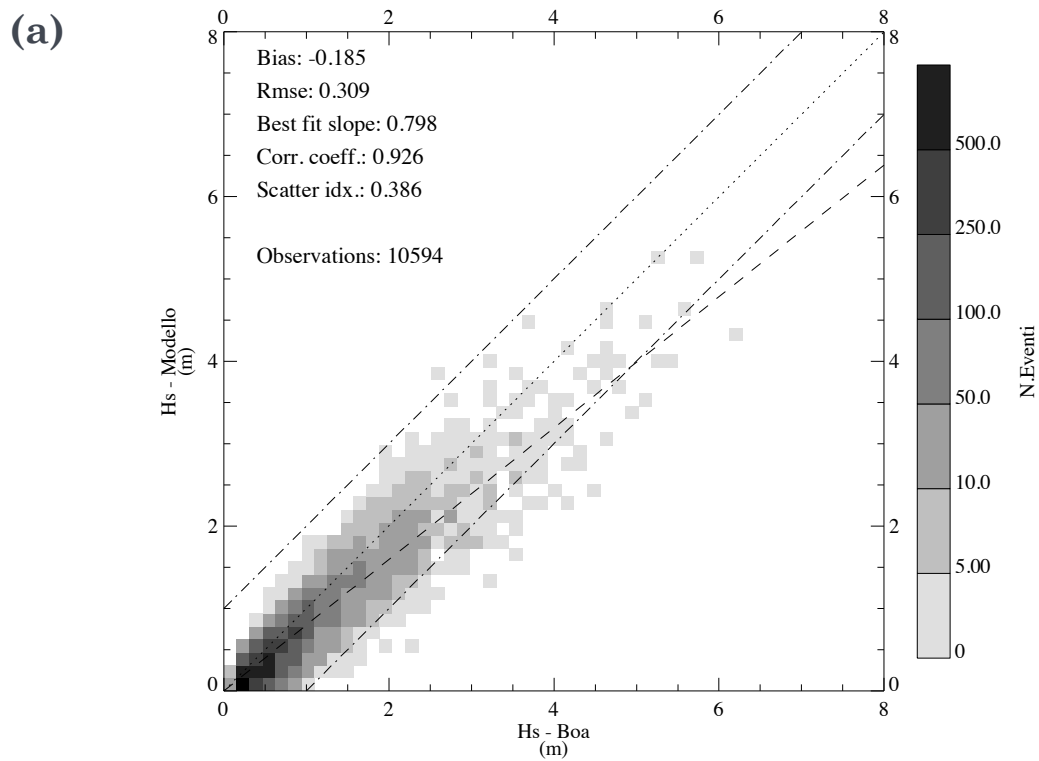
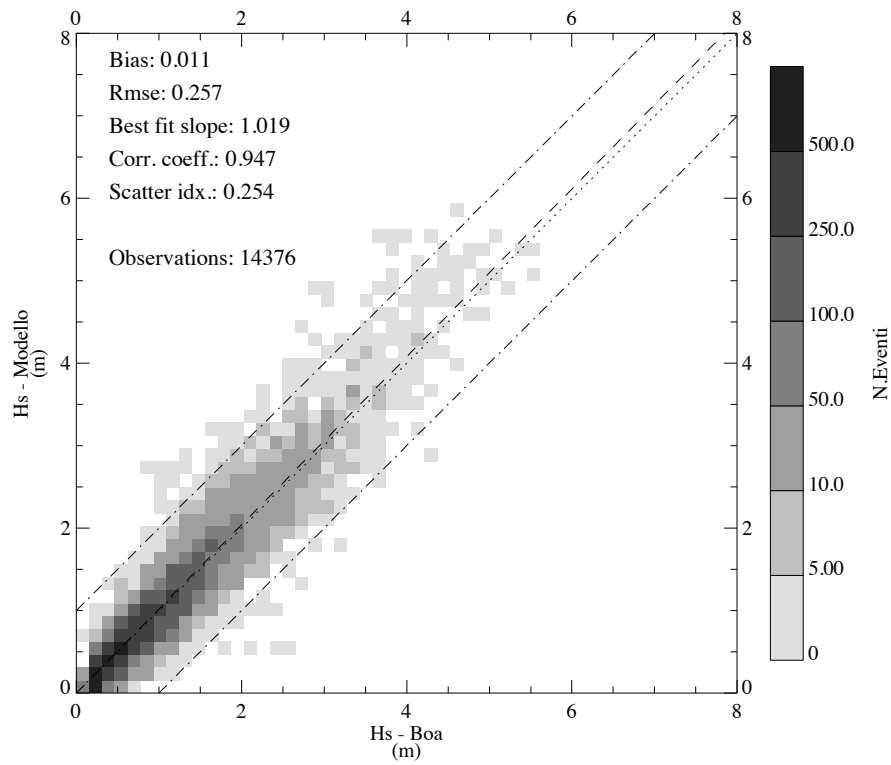


Figura 12: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di La Spezia per il periodo 2001-

2007.

(a)



(b)

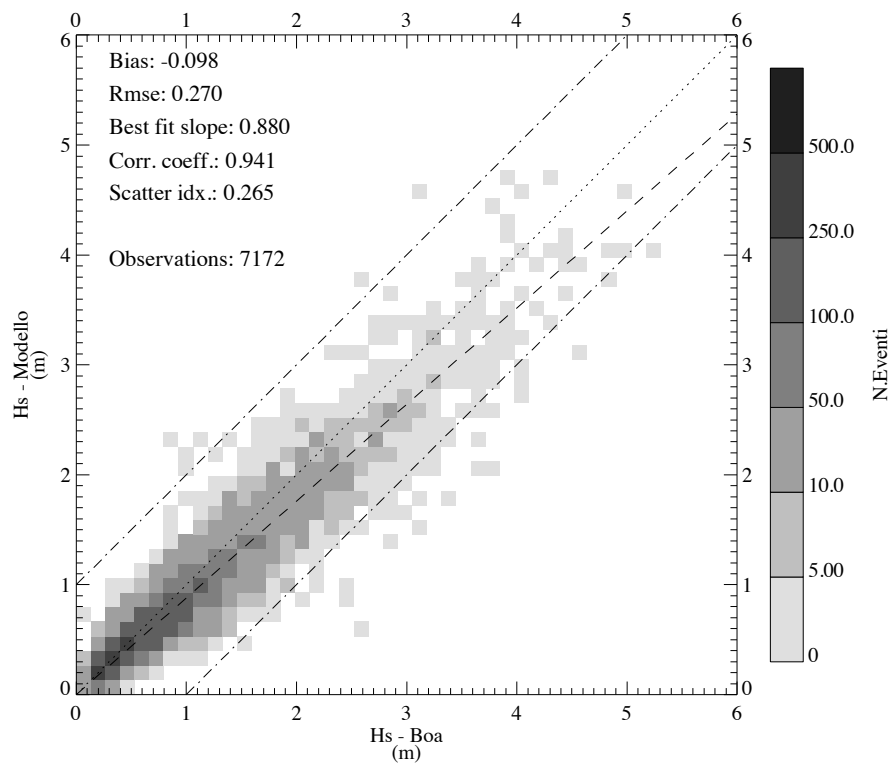


Figura 13: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Mazara del Vallo per il periodo 2001-2007.

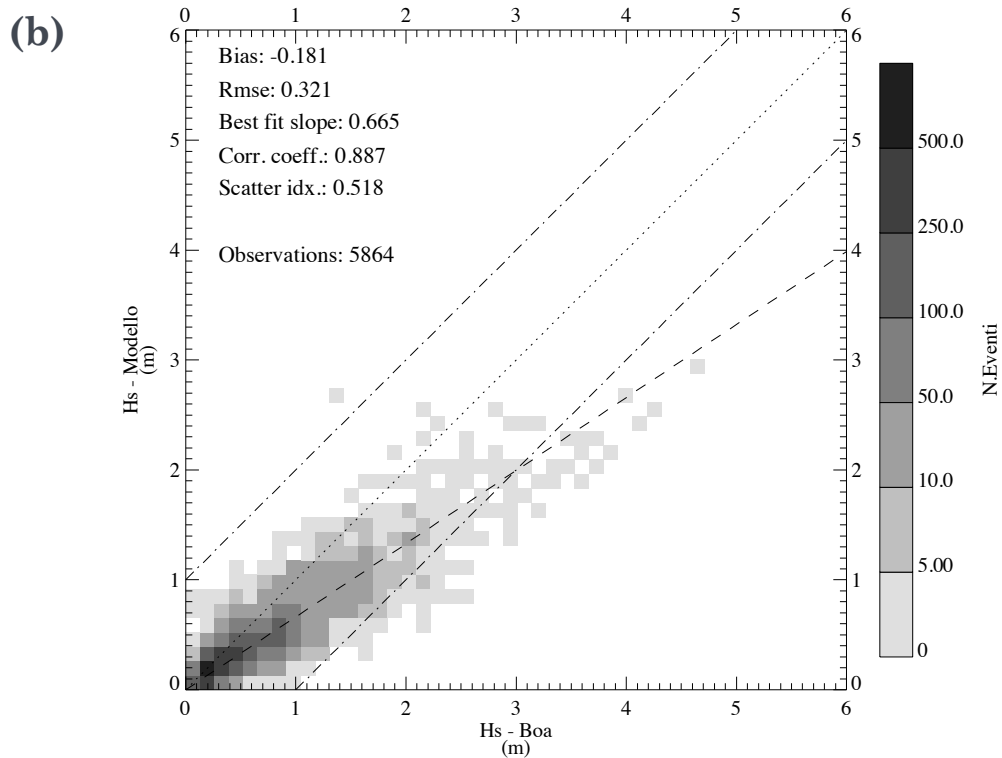
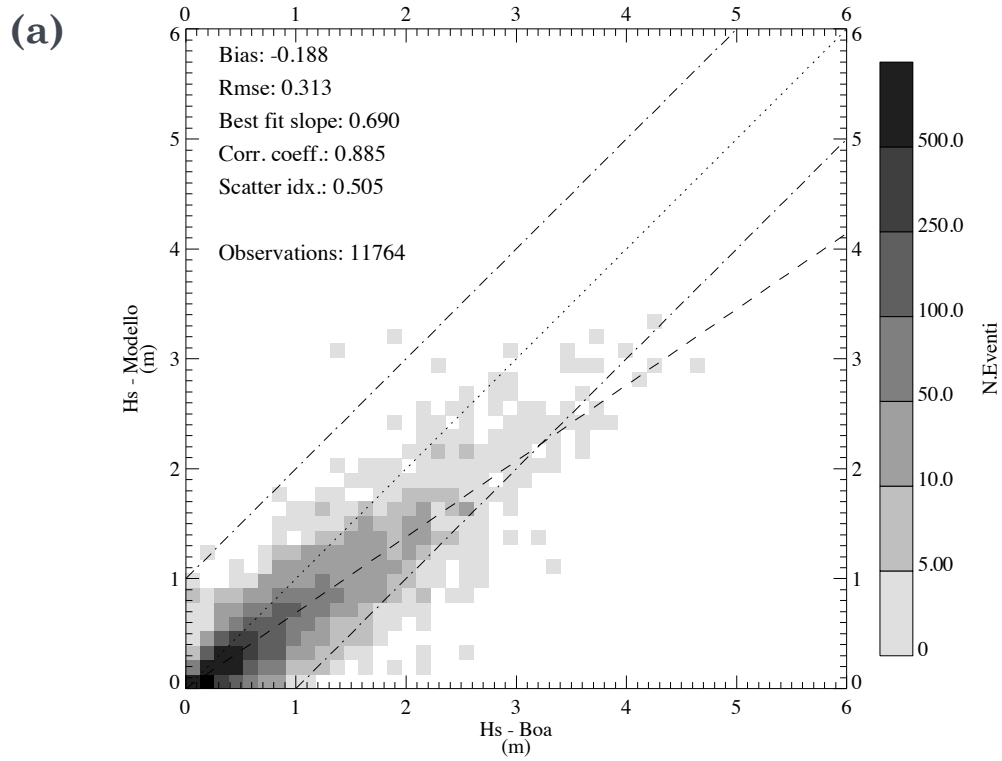


Figura 14: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Ortona per il periodo 2001-2007.

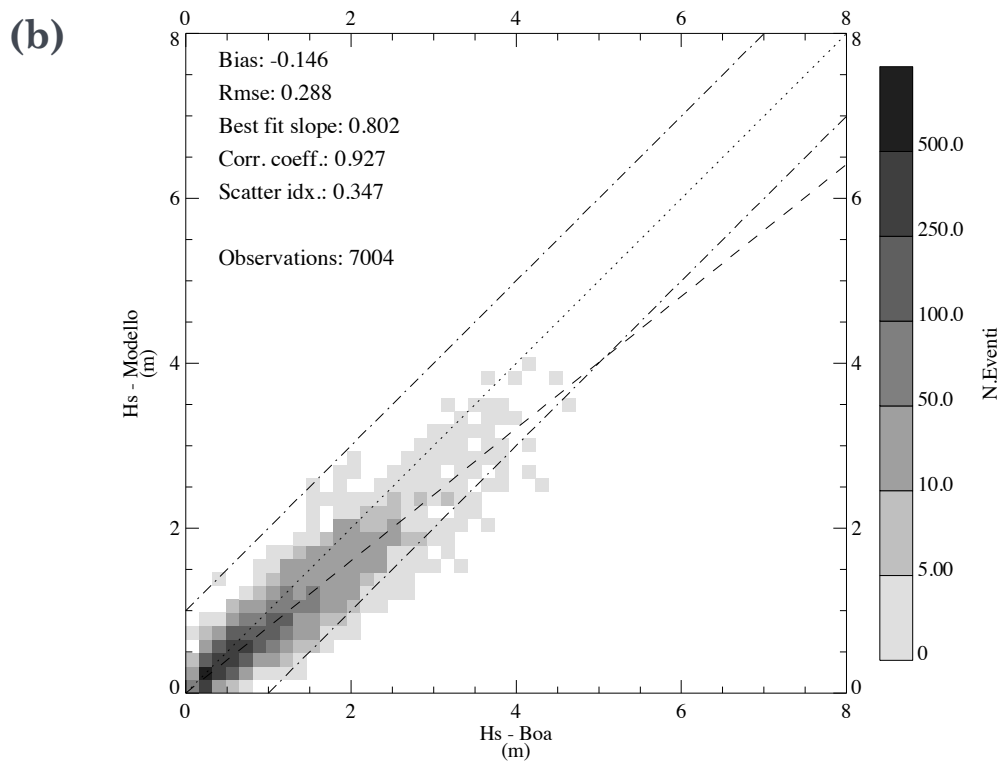
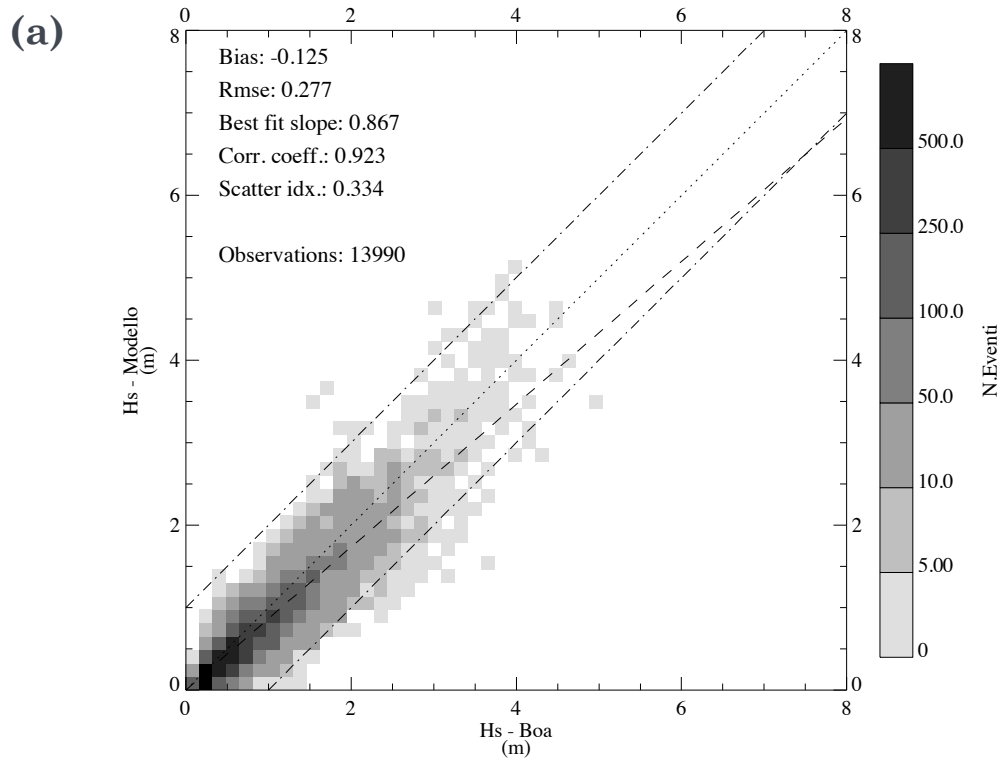


Figura 15: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Ponza per il periodo 2001-2007.

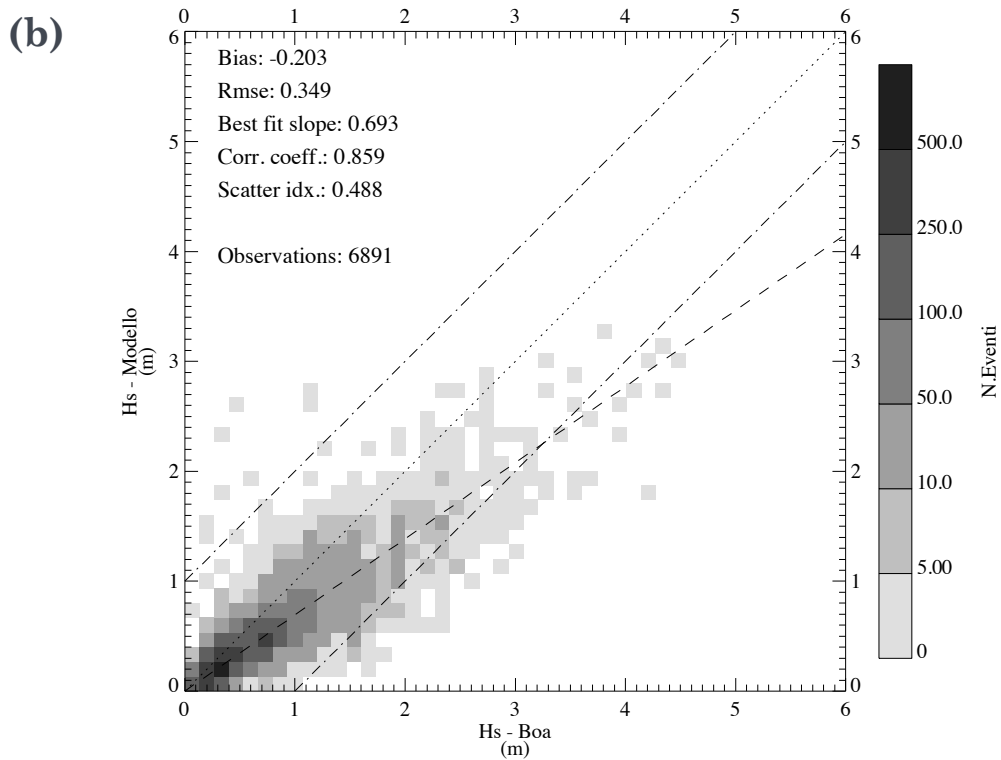
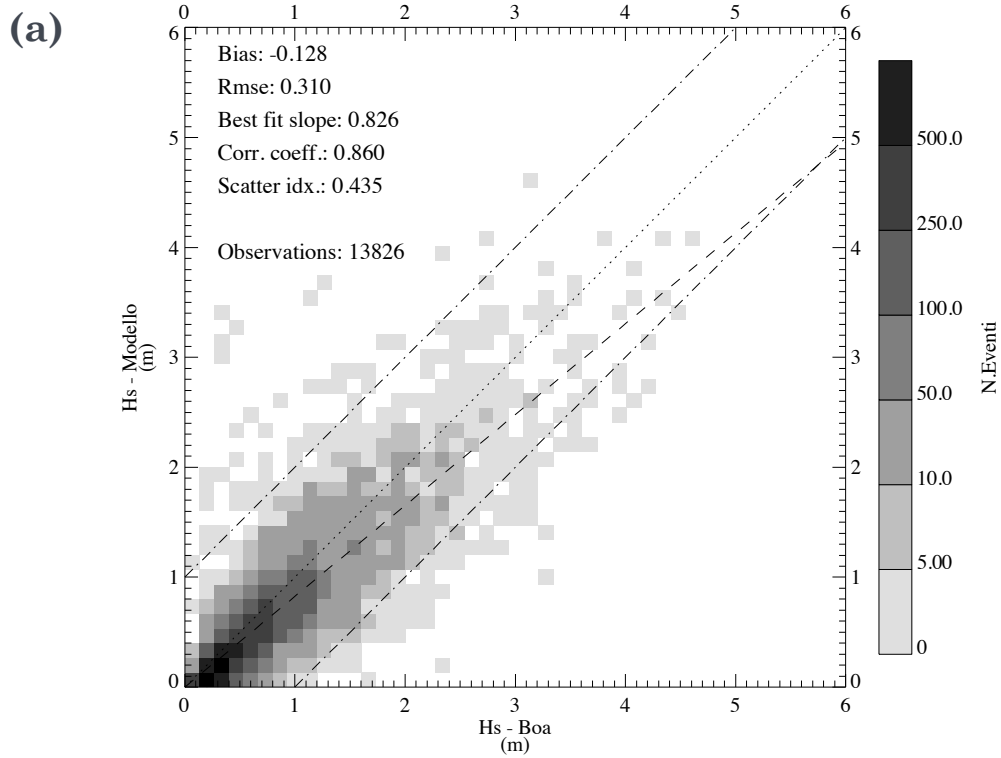


Figura 16: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Monopoli per il periodo 2001-2007.

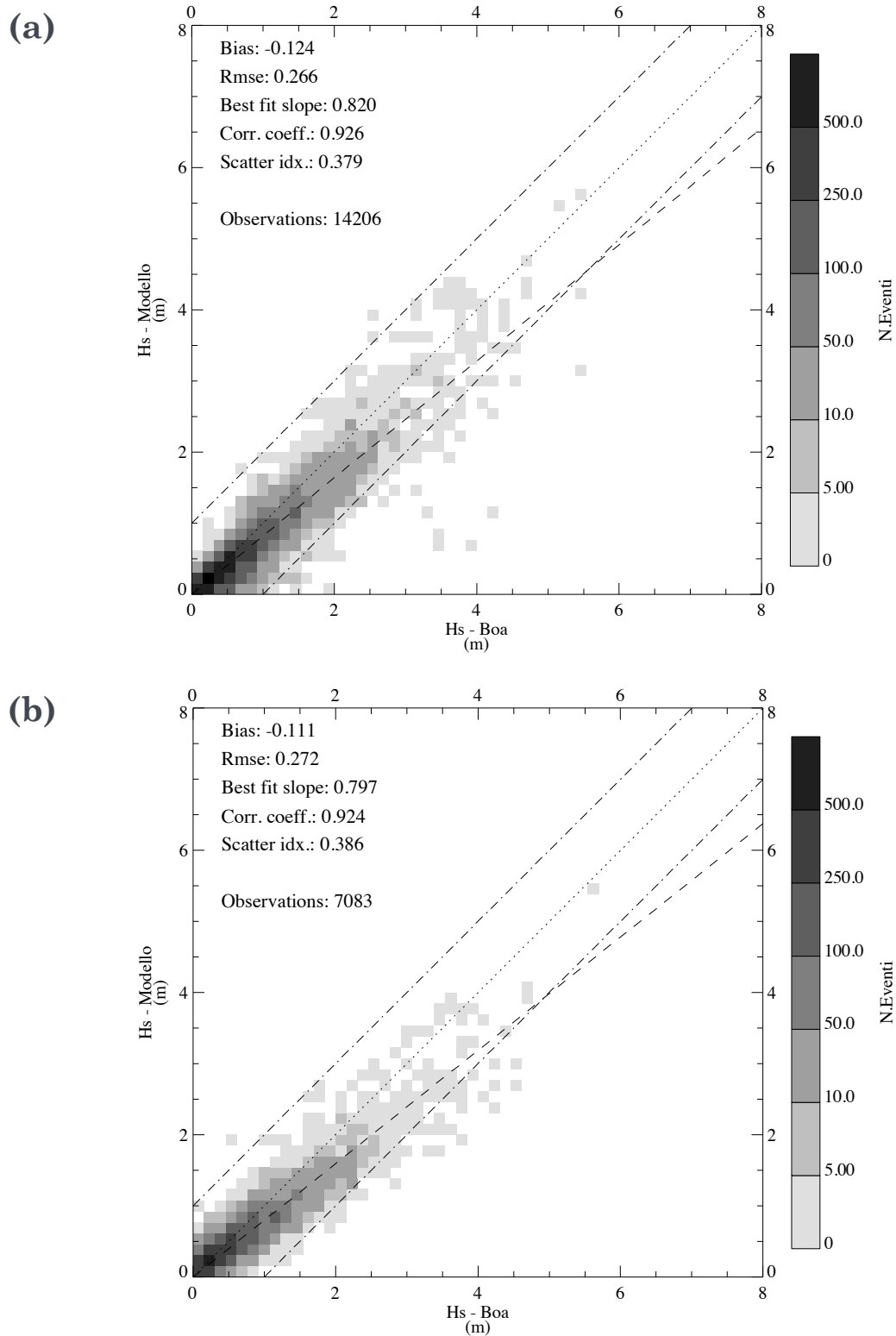


Figura 17: Scatter plot delle altezze significative (Hs) in metri della simulazione SIM_ECMWF (a) e del Centro Europeo ECMWF (b) rispetto ai dati relativi alla boa di Cetraro per il periodo 2001-2007.

Boa	Run	Bias	Bias %	Rmse	Slope	Corr. Coeff	si	N. obs
Alghero	SIM_ECMWF	-0.028	2.529	0.310	0.968	0.950	0.280	13607
	ECMWF	-0.184	14.241	0.398	0.789	0.948	0.359	6811
Ancona	SIM_ECMWF	-0.214	28.997	0.361	0.725	0.867	0.477	9126
	ECMWF	-0.274	36.340	0.417	0.612	0.868	0.553	4568
Catania	SIM_ECMWF	-0.178	28.896	0.308	0.747	0.834	0.501	10705
	ECMWF	-0.212	34.194	0.338	0.648	0.807	0.544	5316
Crotone	SIM_ECMWF	0.003	0.407	0.273	0.993	0.907	0.371	14035
	ECMWF	-0.101	13.649	0.276	0.823	0.907	0.373	6946
La Spezia	SIM_ECMWF	-0.185	23.154	0.309	0.798	0.926	0.386	10594
	ECMWF	-0.289	36.080	0.424	0.628	0.913	0.530	5302
Mazara del Vallo	SIM_ECMWF	0.011	1.000	0.257	1.019	0.947	0.254	14371
	ECMWF	-0.098	9.655	0.270	0.880	0.941	0.265	7172
Ortona	SIM_ECMWF	-0.188	30.274	0.313	0.690	0.885	0.505	11764
	ECMWF	-0.181	29.147	0.321	0.665	0.887	0.518	5864
Ponza	SIM_ECMWF	-0.125	15.097	0.277	0.867	0.923	0.334	13990
	ECMWF	-0.146	17.612	0.288	0.802	0.927	0.347	7004
Monopoli	SIM_ECMWF	-0.128	17.952	0.310	0.826	0.860	0.435	13826
	ECMWF	-0.203	28.352	0.349	0.693	0.859	0.488	6891
Cetraro	SIM_ECMWF	-0.124	17.639	0.266	0.820	0.926	0.379	14206
	ECMWF	-0.111	15.722	0.272	0.797	0.924	0.386	7083

Tabella 2: Confronto statistico relativo alle altezze significative ottenute dalla simulazione SIM_ECMWF e dai dati prodotti da ECMWF. Le statistiche sono state calcolate confrontando i dati dei modelli con i corrispondenti dati RON per il periodo 2001-2007. N. obs indica il numero di coppie di valori analizzati. Bias è la differenza tra i valori medi, Rmse indica la radice quadrata dello scarto quadratico medio, Corr. Coeff. è il coefficiente di correlazione, Slope rappresenta la pendenza della retta di regressione, si è lo *scatter index*.

Per quanto riguarda la pendenza della retta di regressione (Slope), si può notare come la simulazione SIM_ECMWF sia sistematicamente più vicina al valore ideale unitario per tutte le stazioni. In particolare la massima pendenza per entrambe le simulazioni si ha in corrispondenza di Mazara del Vallo, con rispettivamente una pendenza di 0.88 per la simulazione ECMWF e 1.019 per la SIM_ECMWF.

I valori del coefficiente di correlazione (Corr. Coeff.) sono sempre superiori a 0.8 e non mostrano differenze significative tra le due simulazioni. Differenze più marcate sono invece presenti nei valori dello *scatter index* (si) che rappresenta la dispersione dei dati rispetto alla retta ideale, con i valori migliori relativi sempre alla simulazione SIM_ECMWF.

Nelle Figure 18 e 19 vengono infine riportate le rose della direzione di provenienza delle onde per le due boe che presentano i valori più intensi (Alghero e Mazara del Vallo). Le distanze dal centro indicano la percentuale di occorrenza, la scala dei colori si riferisce alle ampiezze significative. Entrambe le boe sono influenzate principalmente dai forti venti provenienti da nord che attraversano il bacino Mediterraneo occidentale. In particolare per la boa di Alghero in quasi il 30% degli eventi osservati le onde provengono dalla direzione tra 300° e 315° con una alta presenza di ampiezze comprese tra 2.5m e 4.5m; questa distribuzione è correttamente riprodotta dal modello. Per la boa di Mazara del Vallo si nota una prevalenza netta di onde dalle direzioni comprese tra 270° e 300° , in questo caso si osservano valori di ampiezza per la maggior parte inferiori a 1.5m. La riproduzione della distribuzione da parte del modello è ottima anche per questa boa.

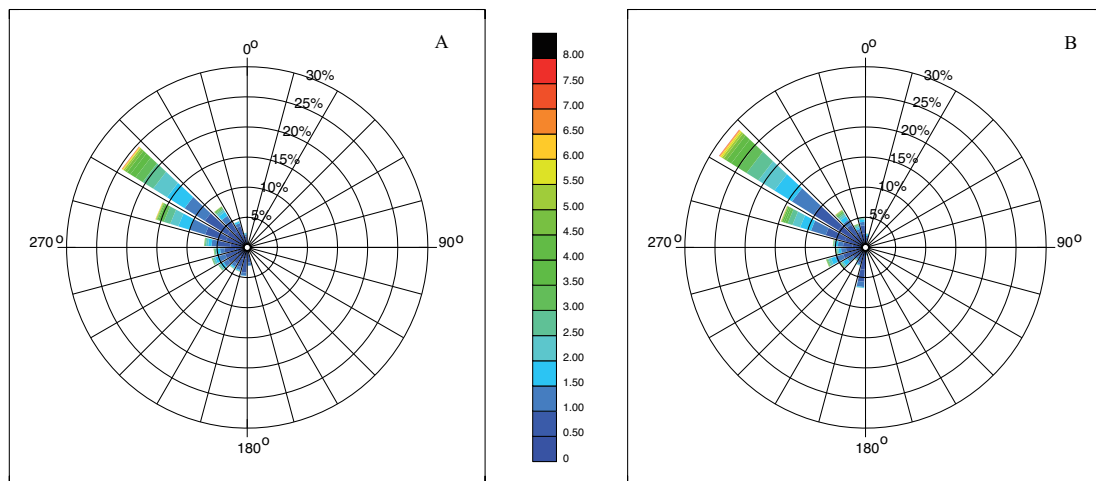


Figura 18: Confronto della distribuzione di provenienza delle onde per la boa di Alghero. A) simulazione SIM_ECMWF, B) dati boa. Le distanze dal centro indicano la percentuale di occorrenza, la scala dei colori è relativa alle ampiezze significative in metri.

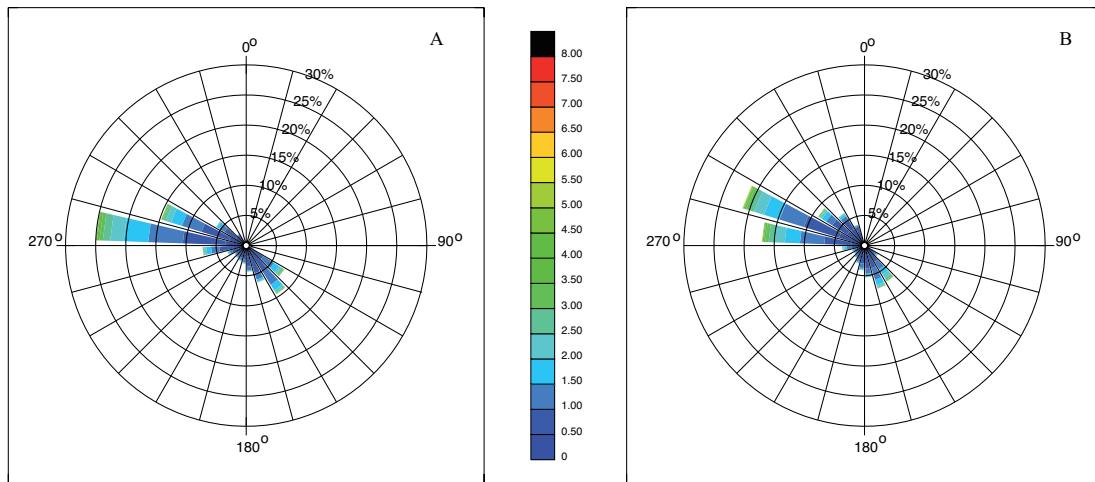


Figura 19: Come Figura 18 per la boa di Mazara del Vallo.

Dall'analisi statistica di tutte le boe considerate risulta quindi che il modello numerico sviluppato per il presente progetto mostra un buon accordo con i dati registrati dalle boe e rappresenta anche un miglioramento rispetto ai dati prodotti dal modello di onde operativo all'ECMWF. Considerato che il modello del Centro Europeo utilizza anche una procedura di assimilazione dei dati satellitari, ne deriva che la maggiore risoluzione spaziale del modello ondometrico sviluppato determina un miglioramento dei risultati. Il contenuto energetico delle onde è funzione del quadrato dell'altezza significativa, quindi il miglioramento introdotto dalla simulazione SIM_ECMWF ha un impatto rilevante sulle stime energetiche.

2.2. Moto ondoso

Avendo verificato il buon accordo dei risultati della simulazione SIM_ECMWF con i valori misurati, questa simulazione è stata utilizzata per analizzare i campi del moto ondoso e del potenziale energetico delle onde. Il valore aggiunto costituito dalle simulazioni numeriche rispetto ai dati registrati dalle boe è infatti rappresentato dalla possibilità di ottenere informazioni sull'intero bacino mediterraneo. In Figura 20 e 21 sono riportate rispettivamente le mappe medie stagionali e la mappa annuale dell'altezza significativa per l'area mediterranea, calcolate sulla base dei dati ricavati dalla simulazione SIM_ECMWF. Le medie si riferiscono al periodo 2001-2010, e per questo possono essere considerate come rappresentative del clima presente del moto ondoso.

Il moto ondoso risulta particolarmente intenso durante la stagione invernale e autunnale, con i valori più elevati presenti nel Mediterraneo occidentale, in particolare nel golfo del Leone e nella zona compresa tra le isole Baleari e la Sardegna, dove viene raggiunto un valore medio di 1.8m. Altra regione interessata da valori elevati di altezza significativa, nelle stesse stagioni dell'anno, è quella del Canale di Sicilia e del Mar Ionio. Strutture analoghe si notano durante la primavera ma con valori ovunque inferiori. Il campo medio delle onde nel periodo estivo è significativamente più basso con

valori medi superiori ad 1.2m solo nella zona orientale, in prossimità dell'isola di Rodi interessata dai venti etesiani.

Alcune regioni della costa italiana possono quindi essere considerate tra le più adatte, tra tutti i paesi mediterranei, allo sfruttamento dell'energia dalle onde.

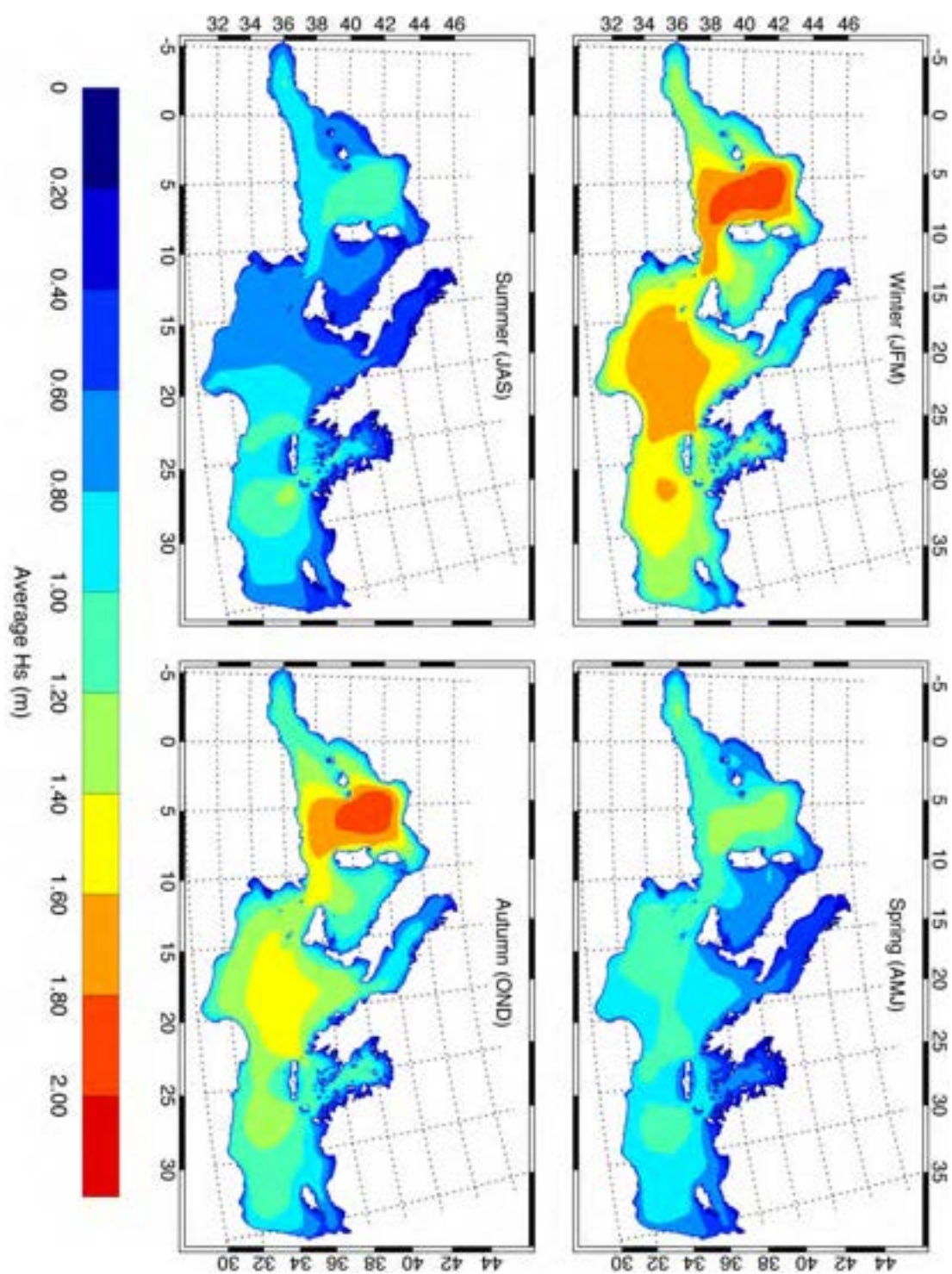


Figura 20: Mappe di altezza significativa (H_s) in metri simulata dal modello WAM (SIM_ECMWF). I valori riportati si riferiscono alla media stagionale calcolata per l'intervallo 2001-2010.

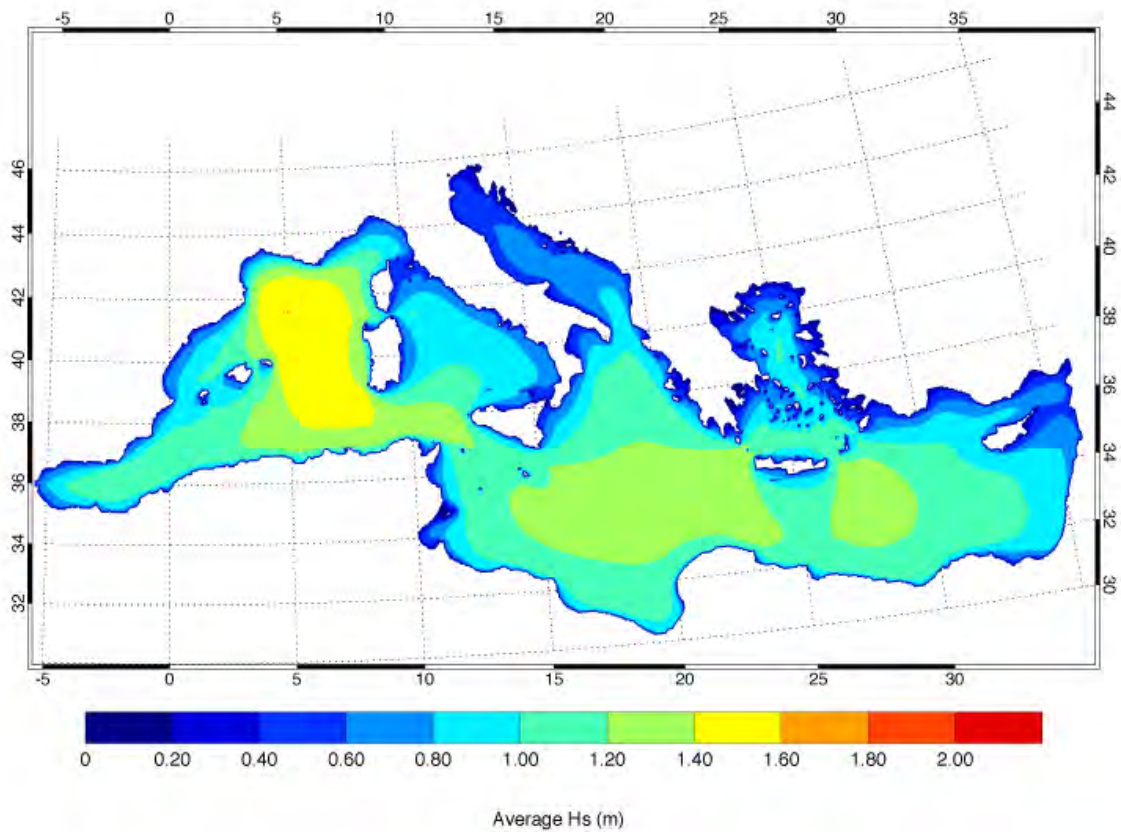


Figura 21: Mappa di altezza significativa (H_s) in metri simulata dal modello WAM (SIM_ECMWF). I valori riportati si riferiscono alla media annuale calcolata per l'intervallo 2001-2010.

2.3. Potenziale energetico

In questo paragrafo viene calcolato il potenziale energetico delle onde nel mar Mediterraneo, basandosi sui dati prodotti dalla simulazione SIM_ECMWF.

Per quanto riguarda il calcolo dell'energia di onde regolari, la somma della densità dell'energia cinetica e potenziale per unità di superficie può essere calcolata in base alla relazione:

$$E_t = \rho g H^2 / 8$$

dove ρ rappresenta la densità del mare (valore costante utilizzato 1025 Kg/m³) e g è la gravità. Il flusso di energia attraverso una sezione verticale, di larghezza unitaria e perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda è pari a:

$$P = E_t \cdot C_g$$

dove C_g rappresenta la velocità di gruppo. Nel caso di acque profonde C_g può essere espressa come:

$$C_g = \frac{g}{2\omega}$$

dove la frequenza dell'onda ω , è $2\pi/T$.

Nel caso di onde reali, cioè onde caratterizzate da altezza, periodo e direzione casuali, si devono usare i parametri spettrali. Il calcolo dell'altezza dell'onda si basa sul momento di ordine zero della funzione spettrale ed è stimato come:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

mentre il periodo dell'onda si può scrivere come:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

dove m_n rappresenta il momento di ordine n dello spettro. Dopo opportune semplificazioni e sostituendo H_{m0} e T_e , in equazioni simili a quelle per le onde regolari si ottiene la formula per il potenziale energetico:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_{m0,-1} H_{m0}^2 / 1000 \text{ [kW/m]}.$$

Nelle figure dalla 22 alla 26 è mostrato il flusso medio di energia in funzione del mese, calcolato come media sul periodo 2001-2010. Nelle figure è riportato sia il valore ricavato dalla simulazione SIM_ECMWF che quello ricavato dalla misura delle boe. Risulta evidente ancora una volta come Alghero rappresenti il sito a più alta energia, con valori particolarmente elevati, attorno a 15 kW/m, nel periodo da novembre a febbraio e valori intorno a 4 kW/m nei mesi estivi. Il valore medio annuale simulato risulta molto prossimo a quello ricavato dalle misure e anche la variazione mensile dei valori è ben riprodotta. Tuttavia si ha una sovrastima particolarmente evidente nel mese di gennaio e una sottostima ad aprile. Per tutti gli altri siti riportati, i valori massimi risultano quasi sempre inferiori a 5 kW/m con una forte variabilità stagionale. Solo in corrispondenza della boa di Mazara del Vallo i valori superano i 5 kW/m per metà dei mesi.

Le mappe stagionali relative a tutto il bacino mediterraneo sono riportate in Figura 27. Data la dipendenza dal quadrato dell'altezza significativa, è ulteriormente accentuata rispetto alle mappe mostrate in figura 20, la differenza tra le diverse zone del bacino. In particolare, per quanto interessa le coste italiane, i valori più elevati sono presenti, nel corso dei mesi autunnali e invernali, lungo tutta la costa ovest della Sardegna. Le mappe mostrano che la zona successiva in ordine di importanza, per quanto riguarda il potenziale energetico delle onde, è rappresentata dalla costa sud-ovest della Sicilia.

Vale la pena sottolineare che la costruzione di mappe permette di stimare i valori del potenziale in tutto il dominio di calcolo; è possibile quindi ottenere valutazioni utili anche in zone isolate quali piccole isole. Ad esempio dall'analisi risulta che l'area caratterizzata dai valori più alti di potenziale energetico si estende all'interno del canale di Sicilia, potrebbe perciò essere interessante una stima più accurata per l'isola di Pantelleria.

Allo scopo di evidenziare meglio i risultati lungo le coste italiane, i valori stagionali del potenziale energetico estratti lungo la fascia costiera (circa 12 Km dalla costa) sono riportati nelle Figure 28 e 29.

Si possono notare differenze significative in aree limitrofe. Tutta la costa ovest della Sardegna è caratterizzata da valori superiori a 12 kW/m sia in inverno che in autunno, dal confronto con le mappe per la primavera e l'estate risulta tuttavia che la zona dove vengono raggiunti i valori più elevati è quella situata a nord di Alghero. Per quanto riguarda la Sicilia le due zone più significative si trovano alle due estremità est e ovest della costa sud. In questo caso la boa di Mazara del Vallo sembra collocata in una delle zone di maggiore intensità.

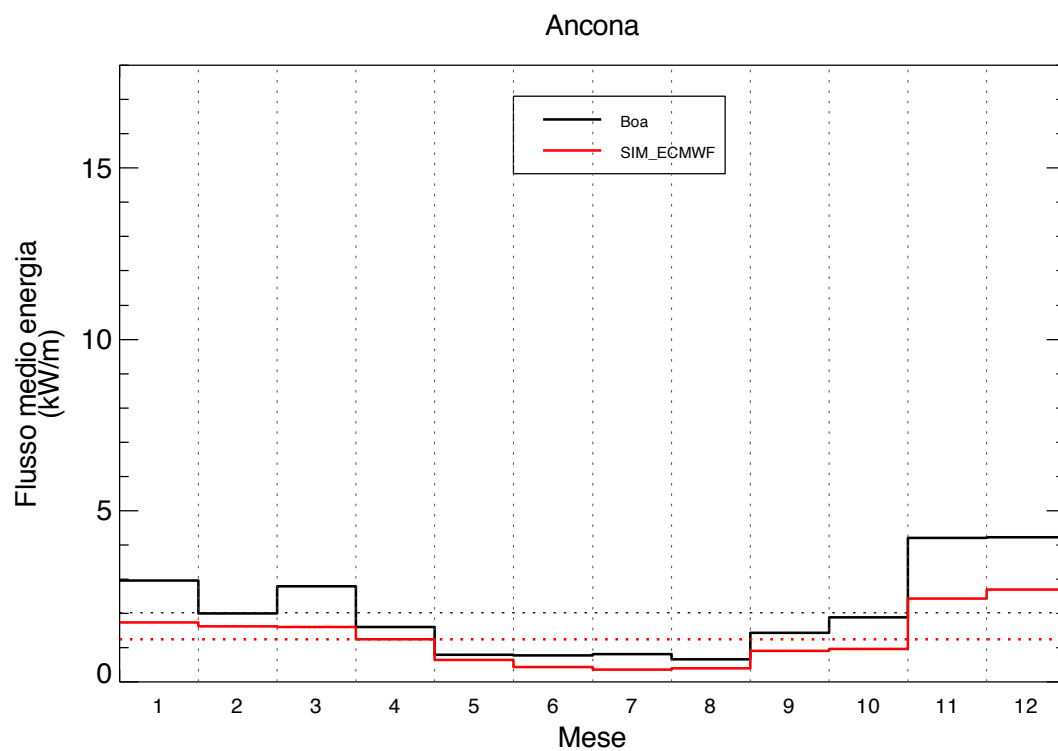
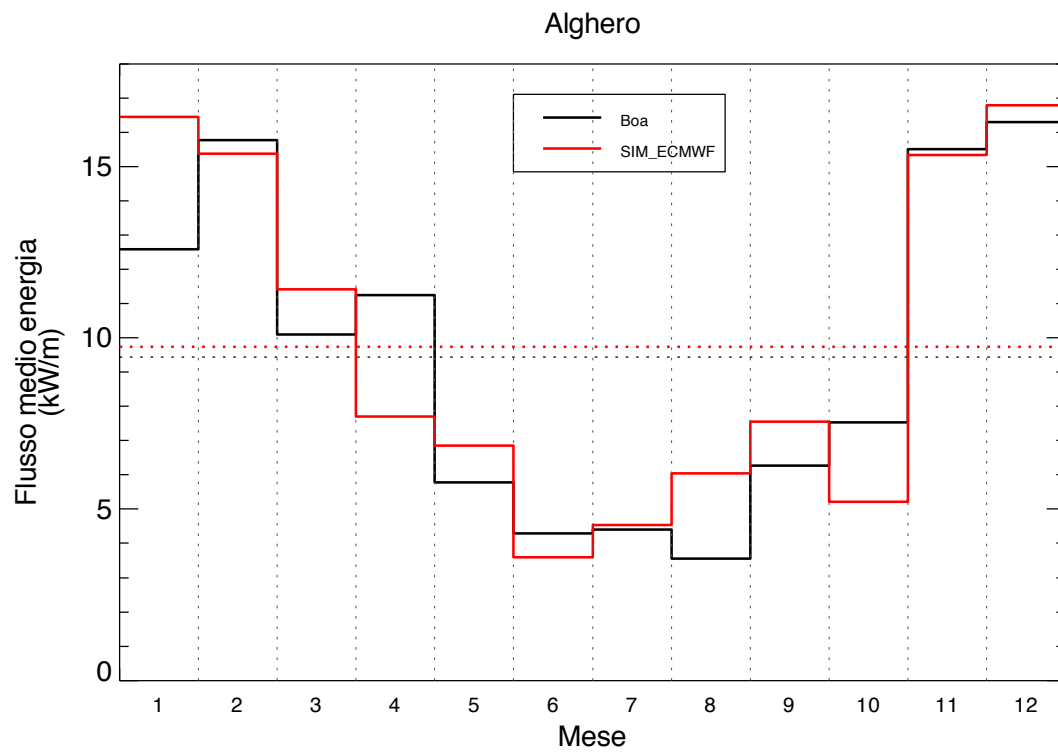


Figura 22: Confronto del flusso medio di energia in funzione del mese tra il valore misurato dalla boa (linea nera) e la simulazione SIM_ECMWF (linea rossa) per la stazione di Alghero e Ancona. Medie effettuate su tutto il periodo 2001-2010. Le linee orizzontali tratteggiate corrispondono al flusso medio annuale.

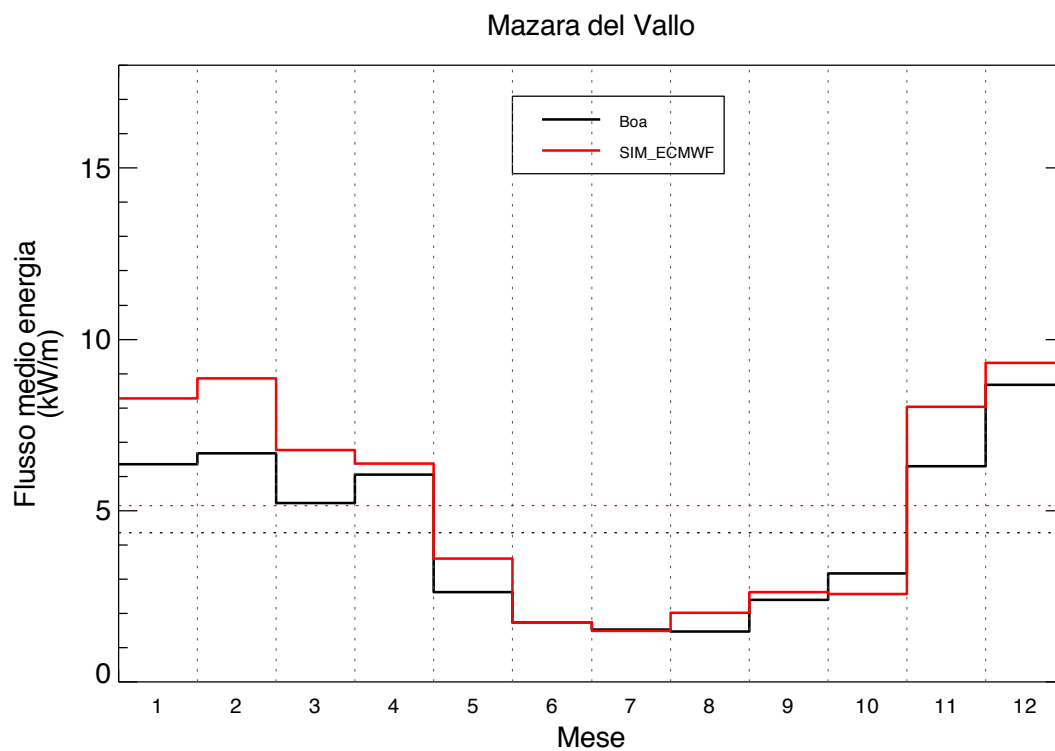
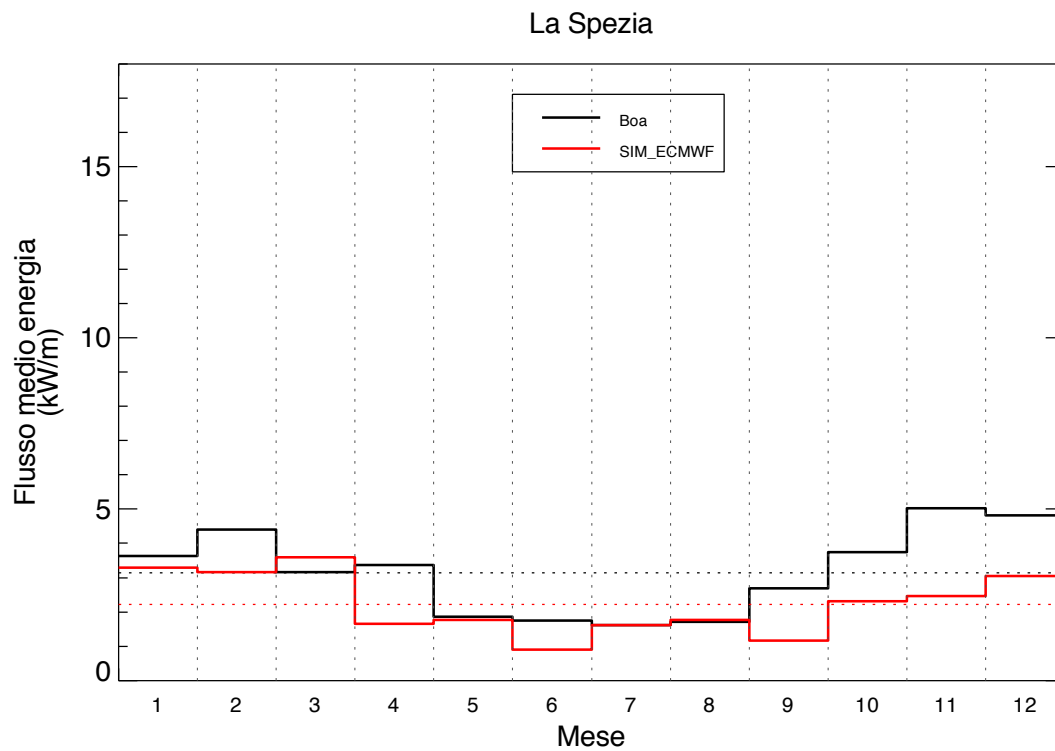


Figura 23: Confronto del flusso medio di energia in funzione del mese tra il valore misurato dalla boa (linea nera) e la simulazione SIM_ECMWF (linea rossa) per la stazione di La Spezia e Mazara del Vallo. Medie effettuate su tutto il periodo 2001-2010. Le linee orizzontali tratteggiate corrispondono al flusso medio annuale.

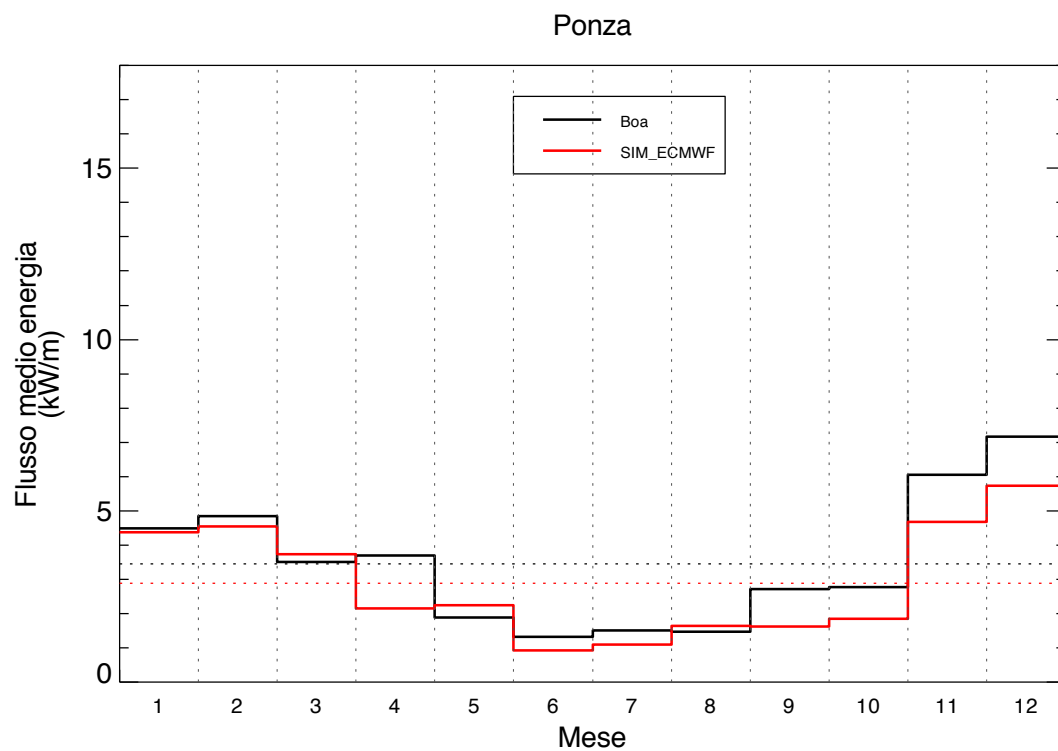
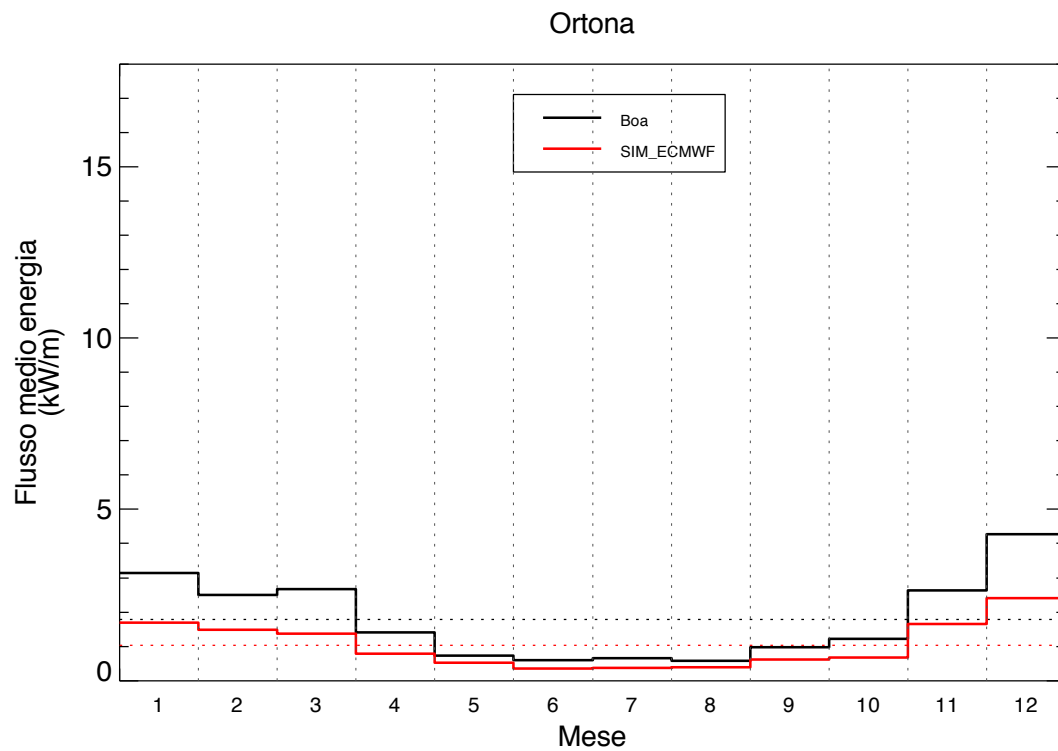


Figura 24: Confronto del flusso medio di energia in funzione del mese tra il valore misurato dalla boa (linea nera) e la simulazione SIM_ECMWF (linea rossa) per la stazione di Ortona e Ponza. Medie effettuate su tutto il periodo 2001-2010. Le linee orizzontali tratteggiate corrispondono al flusso medio annuale.

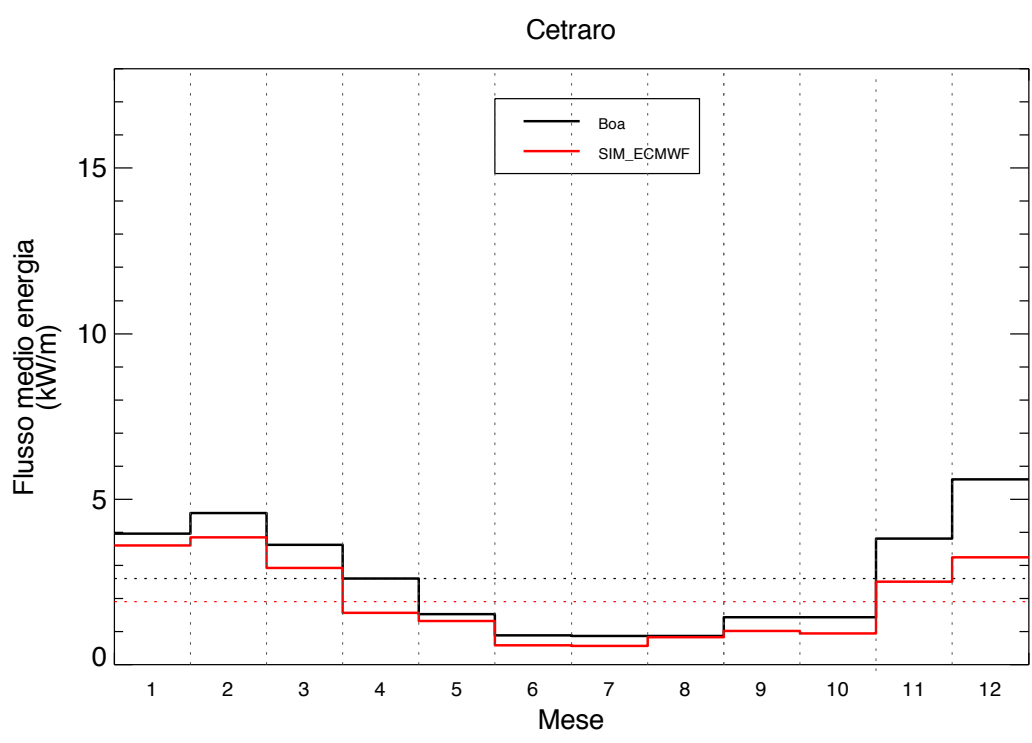
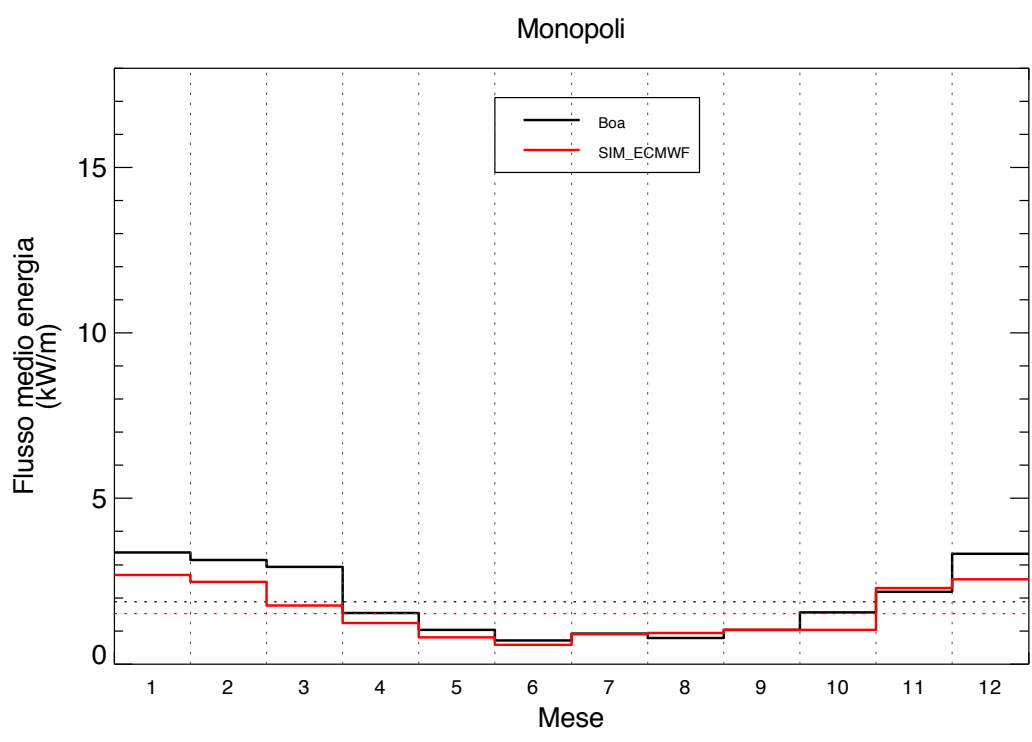


Figura 25: Confronto del flusso medio di energia in funzione del mese tra il valore misurato dalla boa (linea nera) e la simulazione SIM_ECMWF (linea rossa) per la stazione di Monopoli e Cetraro. Medie effettuate su tutto il periodo 2001-2010. Le linee orizzontali tratteggiate corrispondono al flusso medio annuale.

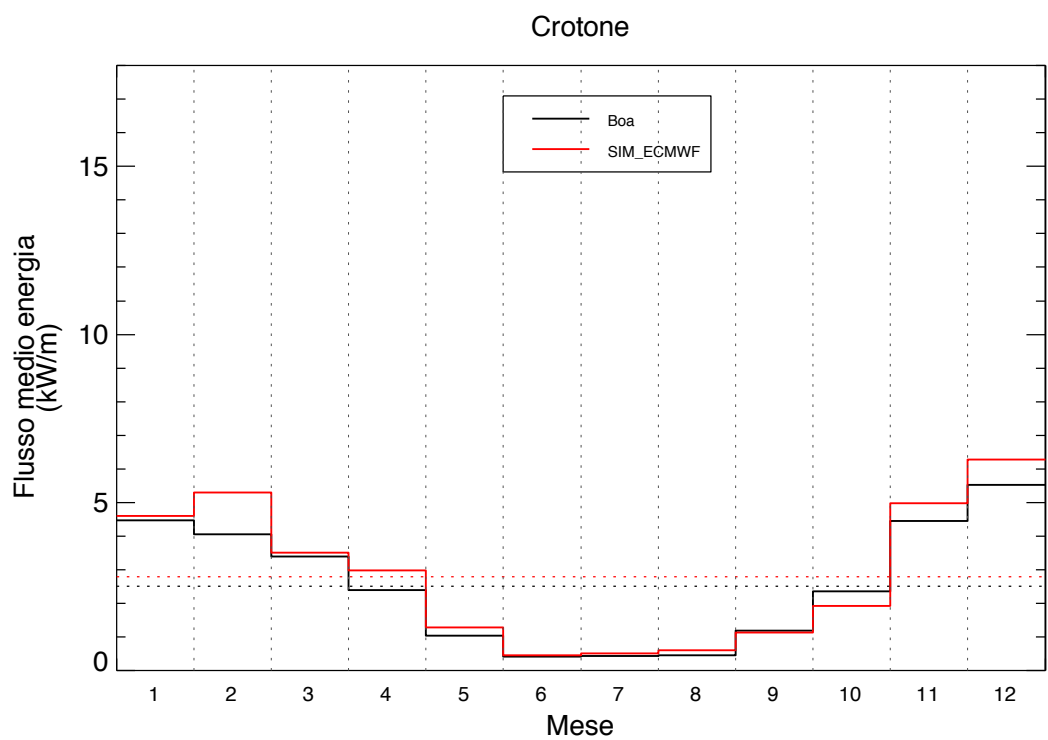
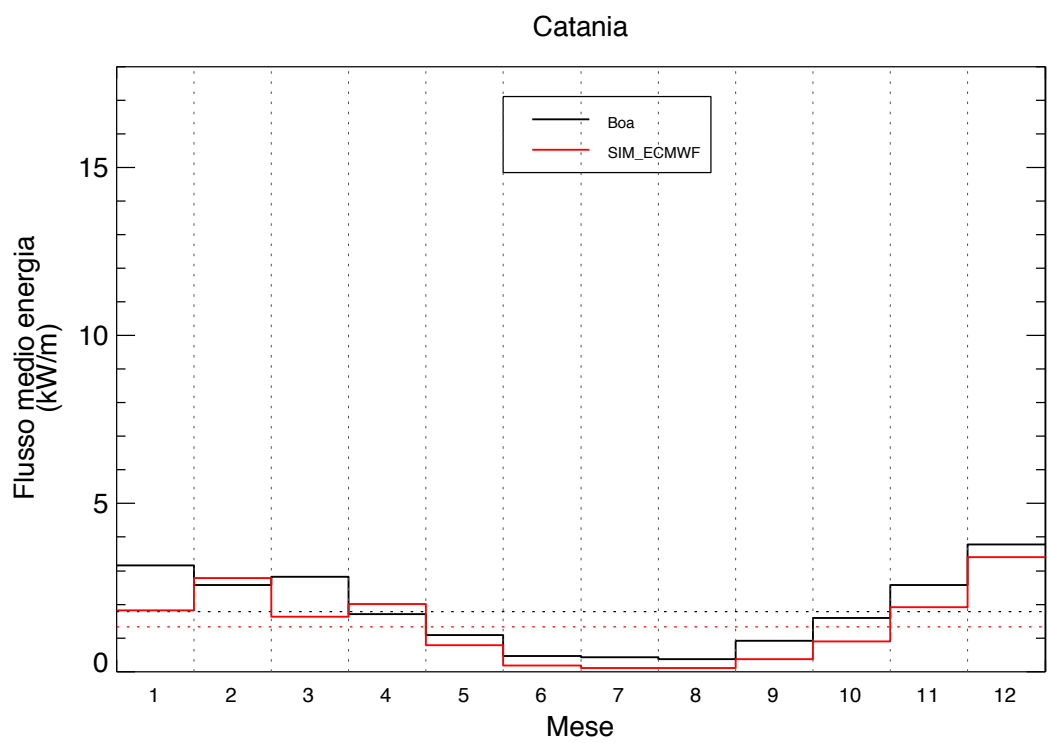


Figura 26: Confronto del flusso medio di energia in funzione del mese tra il valore misurato dalla boa (linea nera) e la simulazione SIM_ECMWF (linea rossa) per la stazione di Catania e Crotone. Medie effettuate su tutto il periodo 2001-2010. Le linee orizzontali tratteggiate corrispondono al flusso medio annuale.

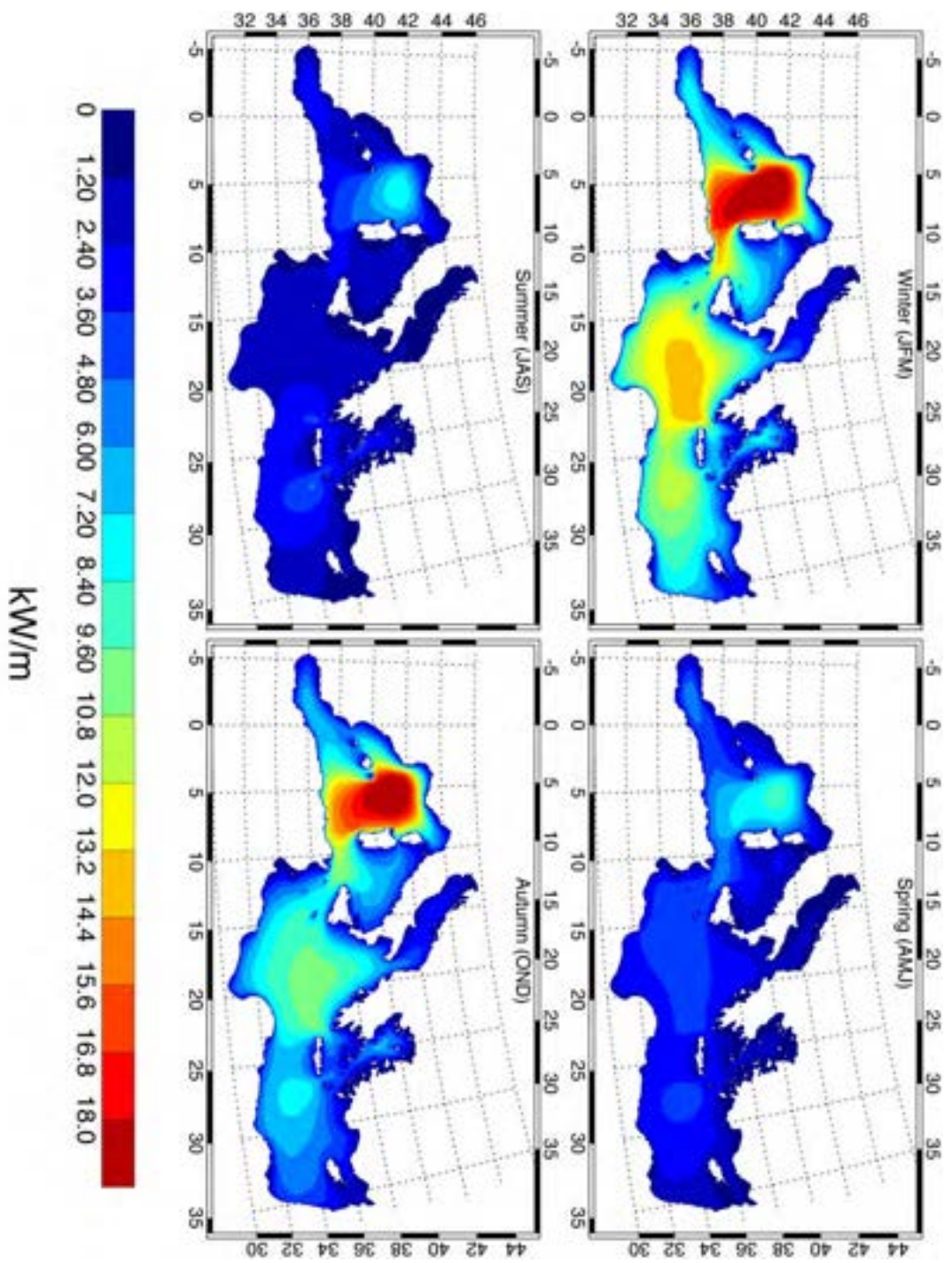


Figura 27: Mappe di potenziale energetico (in kW/m) calcolate dai dati del modello WAM (SIM_ECMWF). I valori riportati si riferiscono alla media stagionale calcolata per l'intervallo 2001-2010.

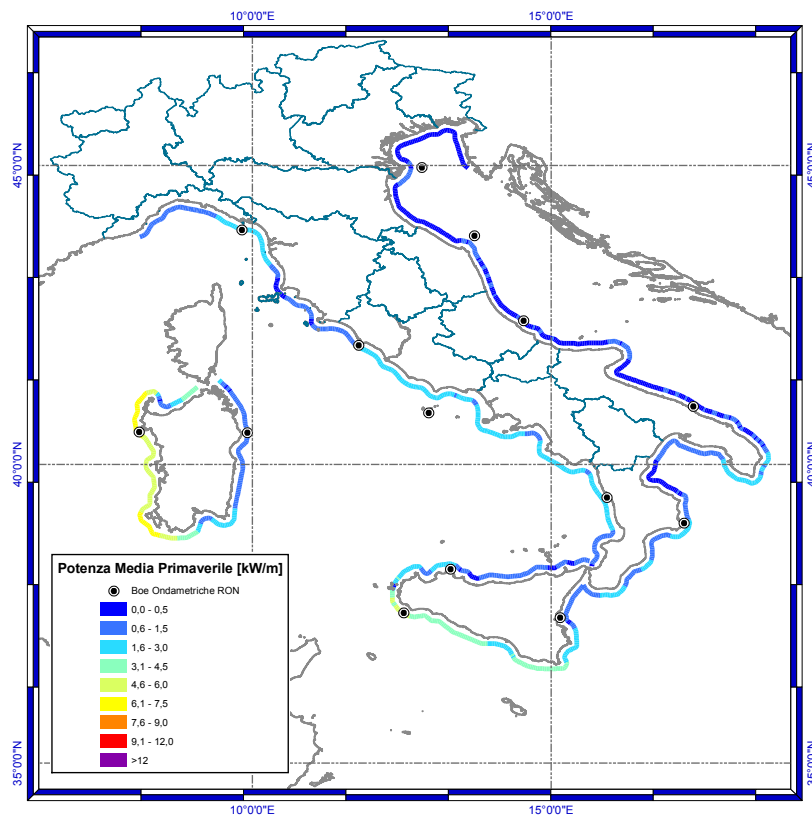
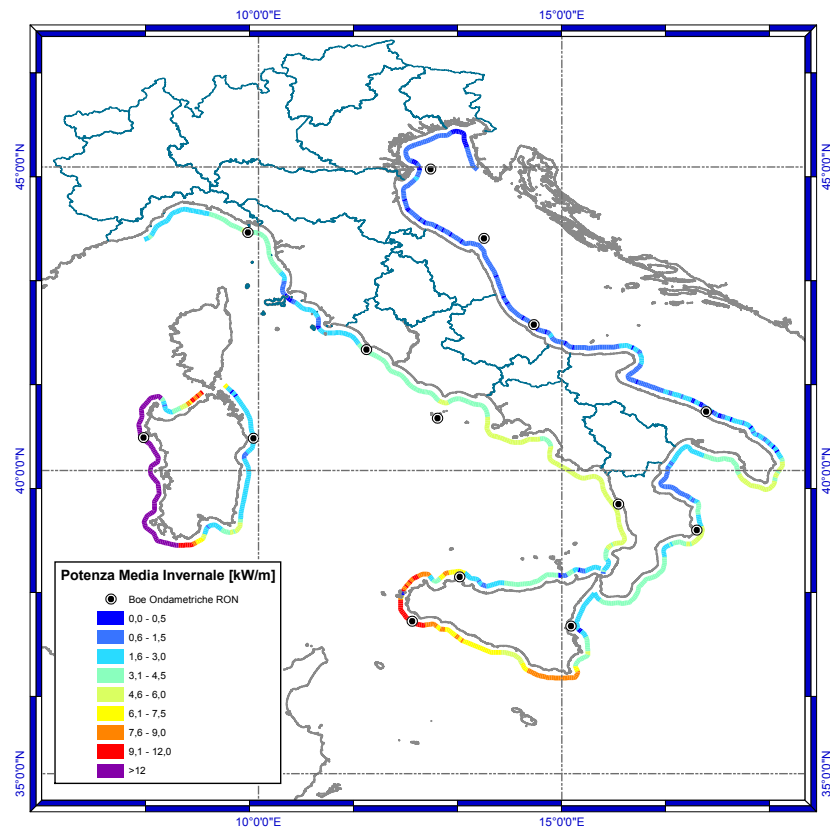


Figura 28: Potenziale energetico medio calcolato per il trimestre invernale e per il trimestre primaverile (in kW/m). Medie effettuate su tutto il periodo 2001-2010 sui dati della simulazione SIM_ECMWF. In figura sono riportate le posizioni delle boe RON.

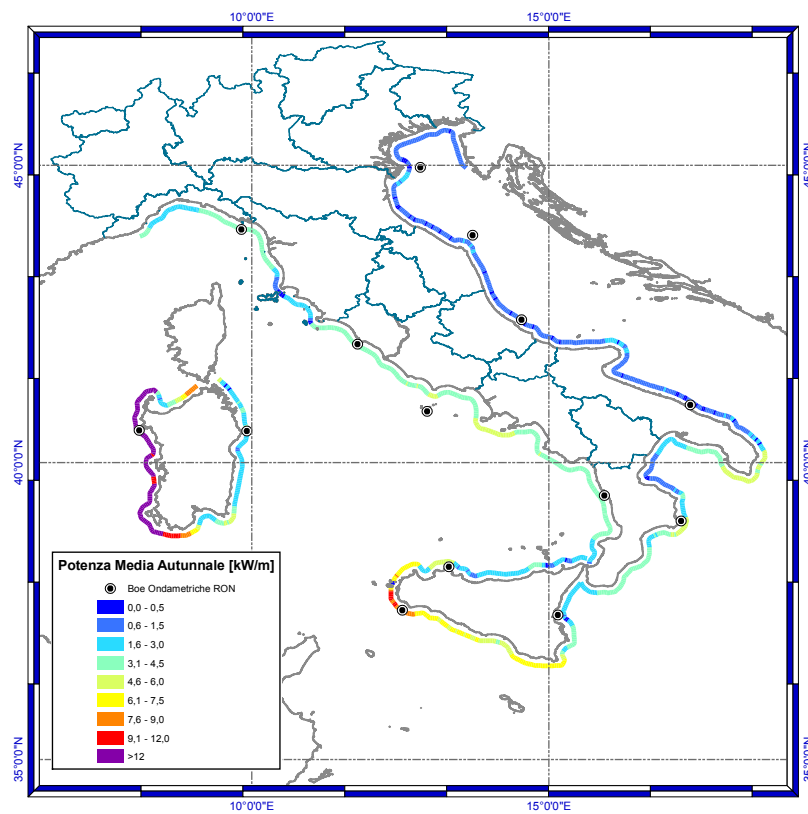
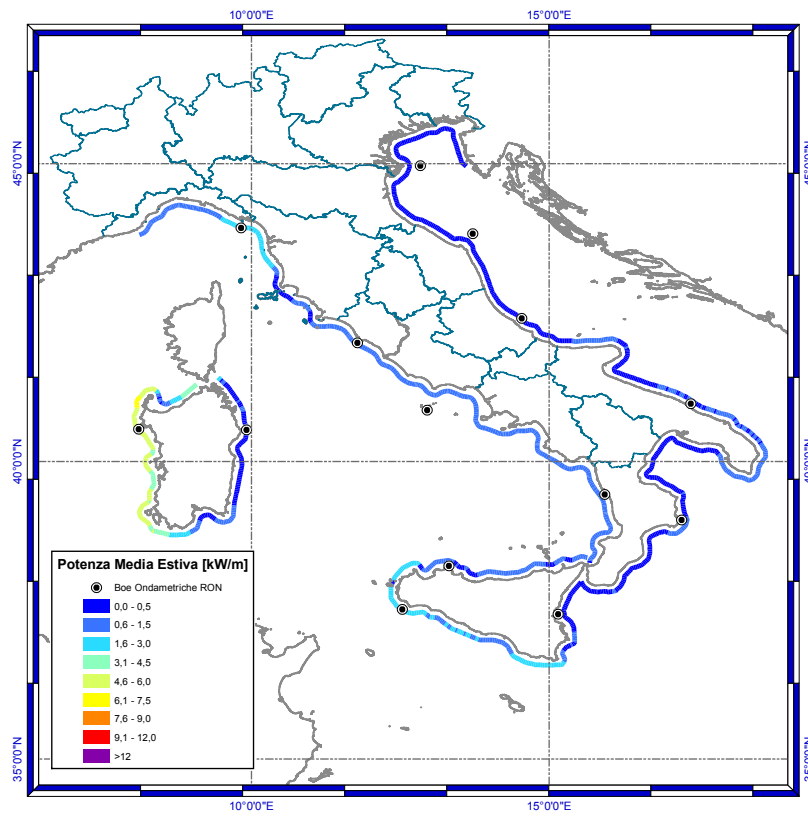


Figura 29: Potenziale energetico medio calcolato per il trimestre estivo e per il trimestre autunnale (in kW/m). Medie effettuate su tutto il periodo 2001-2010 sui dati della simulazione SIM_ECMWF. In figura sono riportate le posizioni delle boe RON.

3. USO DELLO STRUMENTO GIS PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL POTENZIALE ENERGETICO ASSOCIATO AL MOTO ONDO SO

In questo paragrafo si intende illustrare le potenzialità offerte dallo strumento GIS (*Geographic Information System*) per la definizione del potenziale energetico associato al moto ondoso.

Nel caso del Mediterraneo, alla luce di studi già assimilati, si è visto che un buon bilanciamento tra i diversi parametri scientifici e socioeconomici che intervengono nel calcolo del potenziale energetico stesso, portano allo sfruttamento dell'energia da moto ondoso in zone costiere.

Per l'analisi dei numerosi parametri che intervengono nella definizione della presenza e del possibile sfruttamento di energia da moto ondoso, si capisce quanto sia importante la caratterizzazione di tali grandezze a livello territoriale. La visualizzazione, attraverso carte tematiche, dei valori misurati e soprattutto la possibilità di poter combinare vari strati informativi di diversa natura tra loro, permette di verificare gli aspetti socioeconomici dell'impresa.

La figura 30 mostra la media sull'intera simulazione SIM_ECMWF, del potenziale energetico lungo le coste italiane.

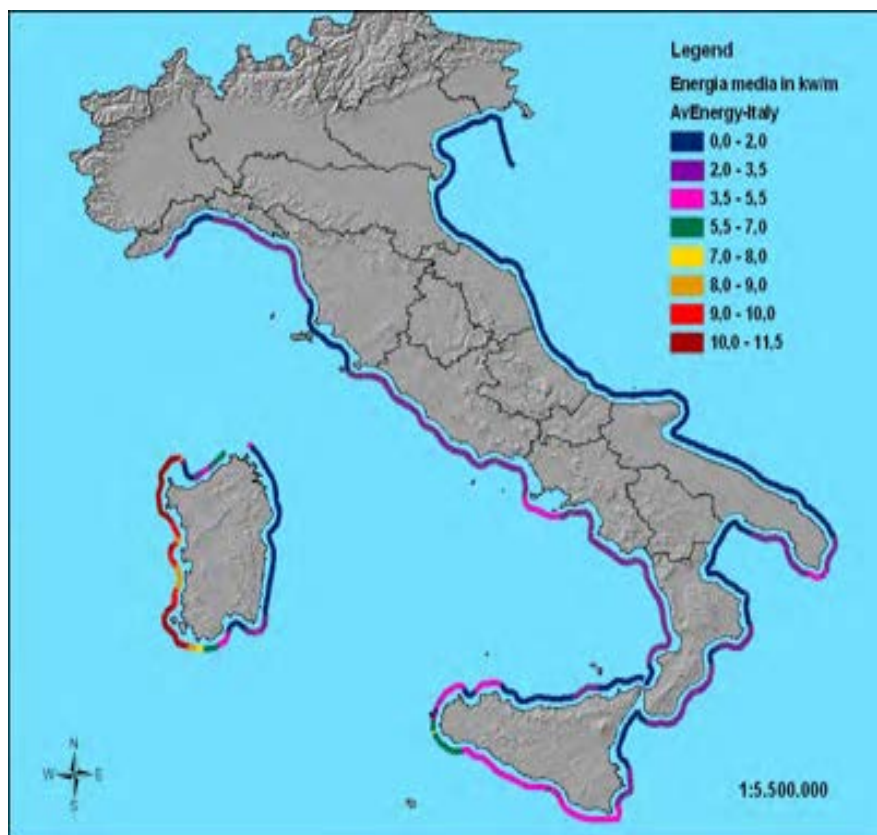


Figura 30: Energia media espressa in kW/m.

Dall'analisi della figura 30 risulta abbastanza immediata la localizzazione di quelle che sono le zone con maggiore potenziale energetico sfruttabile.

E' a questo punto che lo studio deve necessariamente prendere in considerazione altri parametri che devono tenere conto di altri aspetti legati alla reale possibilità di installare dispositivi di conversione di energia.

Uno dei primi aspetti analizzati è stato quello della presenza di parchi marini o di zone comunque dichiarate Aree Naturali Marine Protette e Riserve Naturali Marine. I dati analizzati e caricati nel GIS sono quelli forniti dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio che ha stilato un elenco ufficiale delle suddette aree. Quindi, sovrapponendo allo strato informativo Energia media potenziale lo strato informativo Aree Protette sia marine che terrestri, come mostrato nella figura 31, si evince immediatamente quali sono le zone, che pur presentando un buon potenziale energetico, risultano interdette a qualsiasi tipo di installazione in quanto aree protette.

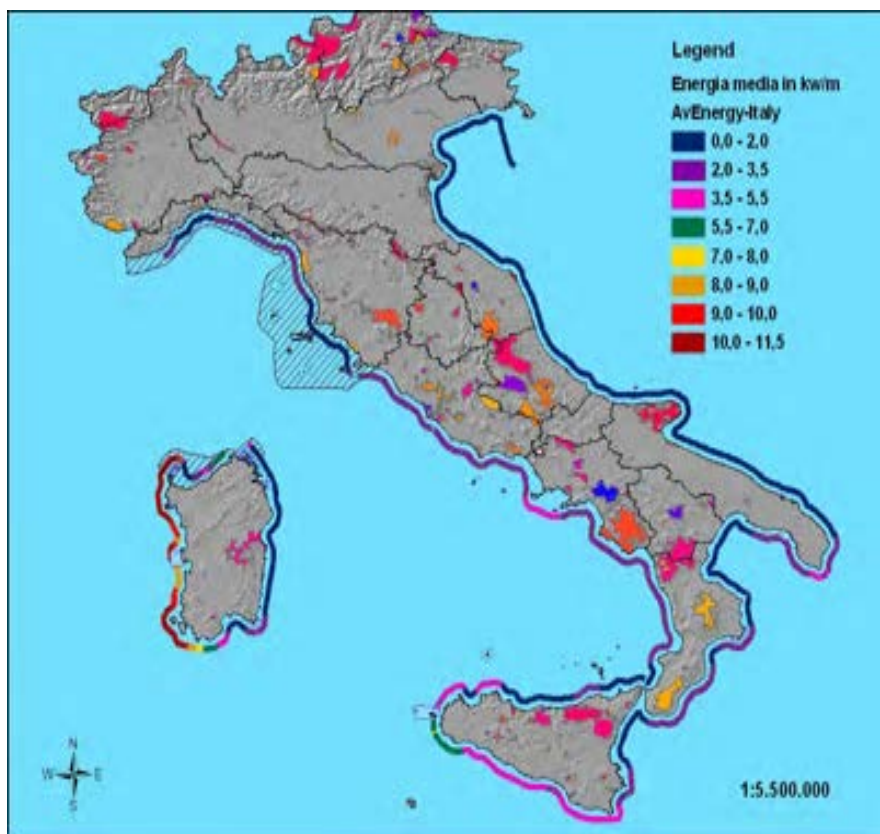


Figura 31: Carta tematica delle Aree Naturali Marine Protette e Riserve Naturali Marine.

Nella figura 31 le aree tematizzate con il grigliato obliquo nero, ricavate dall'Elenco Ufficiale delle Aree Naturali Protette, 5° aggiornamento del 2003, sono denominate Santuario per i mammiferi marini e presentano il codice EUAP1174 e rispondono alla Tipologia di Area Naturale Marina di Interesse Internazionale.

Dalla carta tematica di Figura 31 e, ancora meglio, dalla figura 32 si possono poi individuare delle aree colorate di celeste, la maggior parte delle quali attorno ad isole o penisole. Tali aree rispondono alla Tipologia di Aree Naturali Marine Protette o di Riserva Naturale Marina.

Nelle figure 33 e 34 vengono riportati alcuni particolari della zona relativa alla Sardegna con la visualizzazione dell'interrogazione dei dati con il GIS.

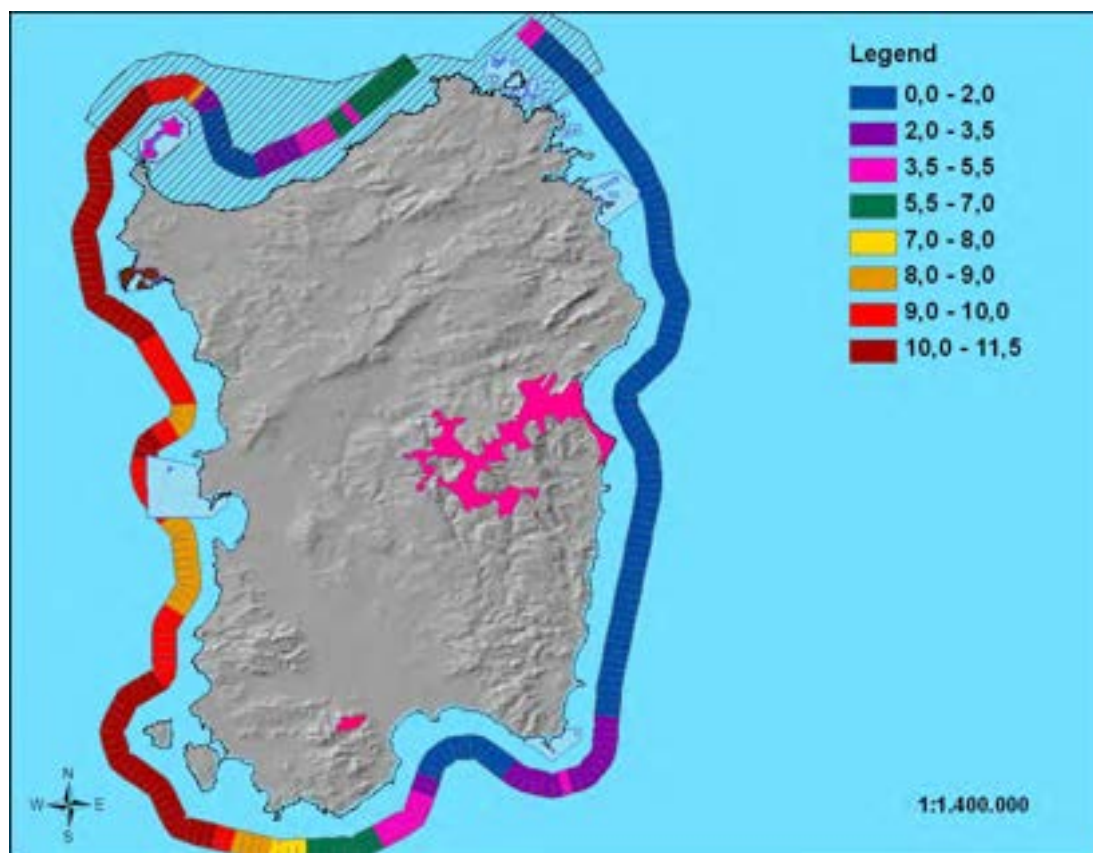


Figura 32: Particolare della Sardegna con le aree protette terrestri e marine.

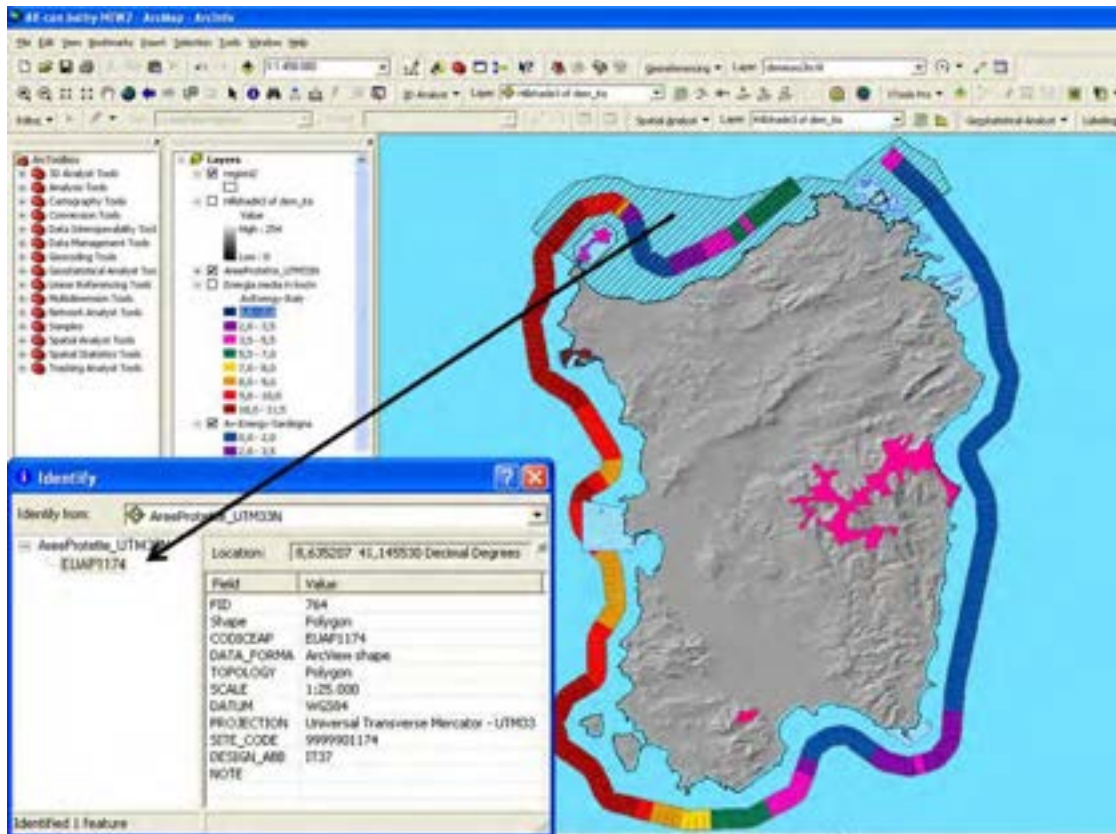


Figura 33: EUAP1174 Santuario per mammiferi marini.

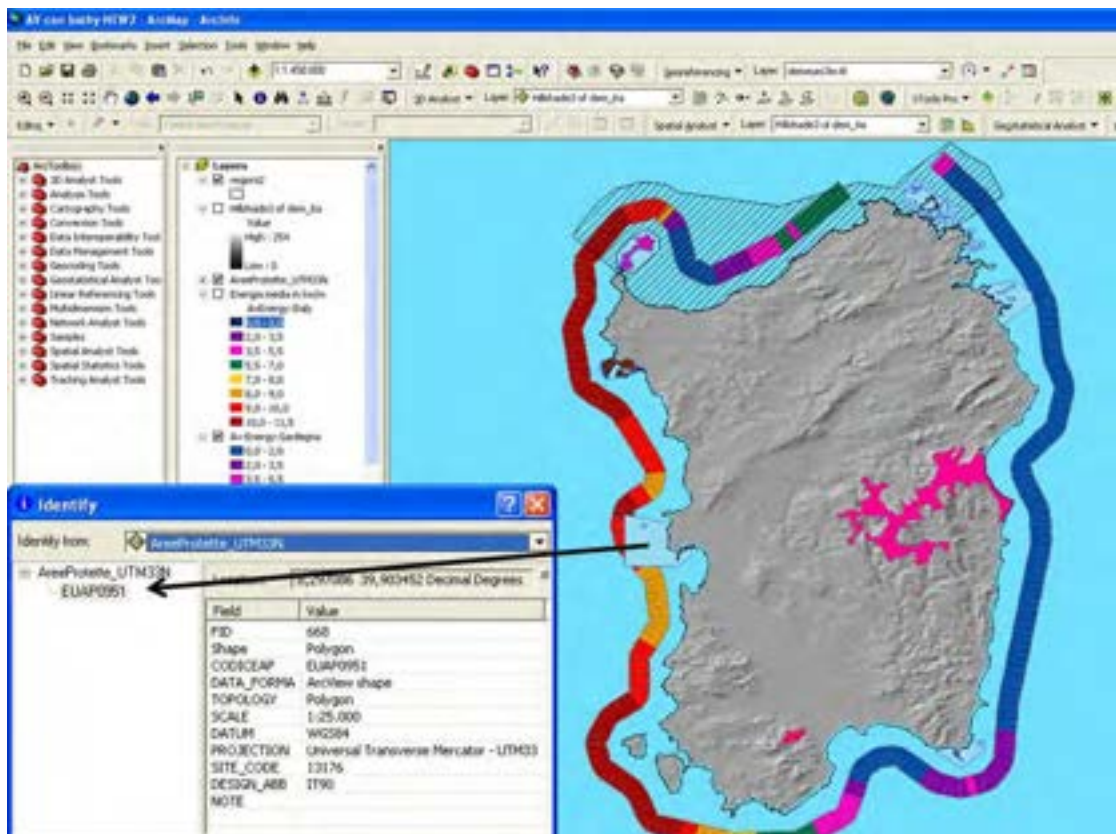


Figura 34: EUAP0951 Area naturale marina protetta Penisola del Sinis – Isola Mal di Ventre.

Nelle considerazioni generali di cui tenere conto un altro aspetto importante è la verifica delle condizioni batimetriche delle aree sotto esame. Quindi risulta importante poter combinare con il GIS anche lo strato relativo alla batimetria del Mediterraneo, come illustrato nella figura 35.

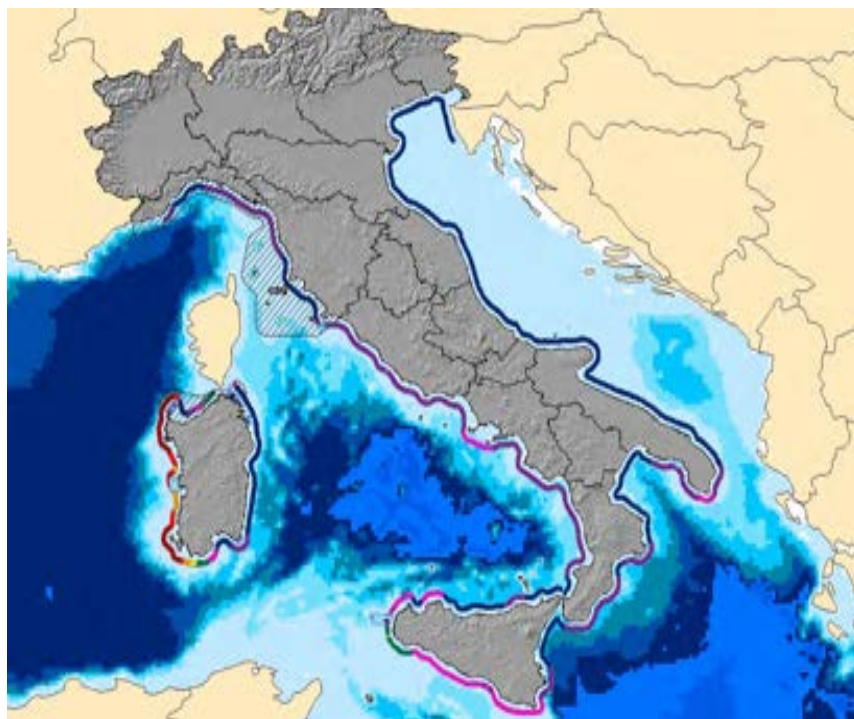


Figura 35: Media dell'energia potenziale e batimetria.

La presente relazione tiene conto solo dei dati che attualmente si hanno a disposizione e che si sono potuti integrare all'interno del GIS. Molteplici analisi si possono condurre avendo a disposizione una più ampia gamma di dati anche di tipo socio-economico.

Le figure 36 e 37 mostrano in dettaglio la situazione energetica potenziale rispettivamente per la Sardegna occidentale e per la Sicilia.

Per analisi con questo tipo di dettaglio sarebbe auspicabile avere a disposizione anche dati batimetrici e geomorfologici del fondale marino e costiero a un appropriato dettaglio.

Le carte tematiche presentate fino ad ora sono state ottenute utilizzando molte delle funzioni offerte dallo strumento GIS.

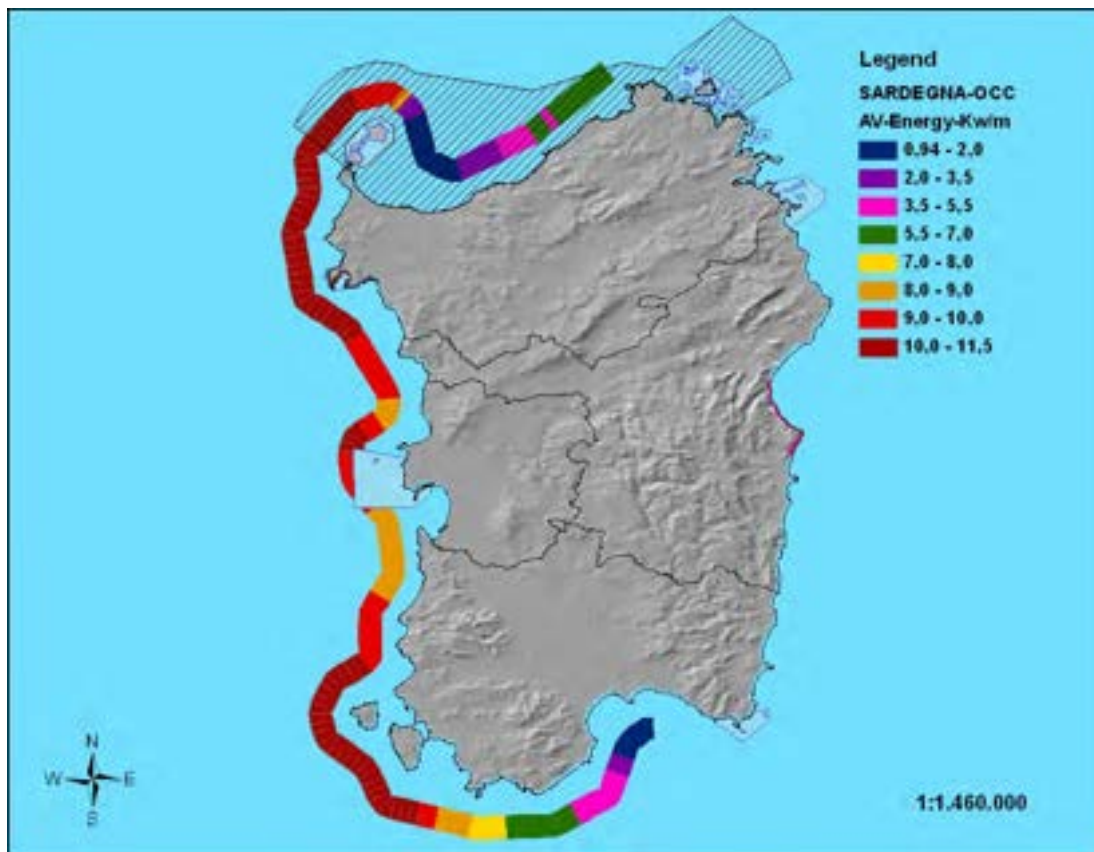


Figura 36: Dettaglio dell'energia potenziale media per la Sardegna occidentale.

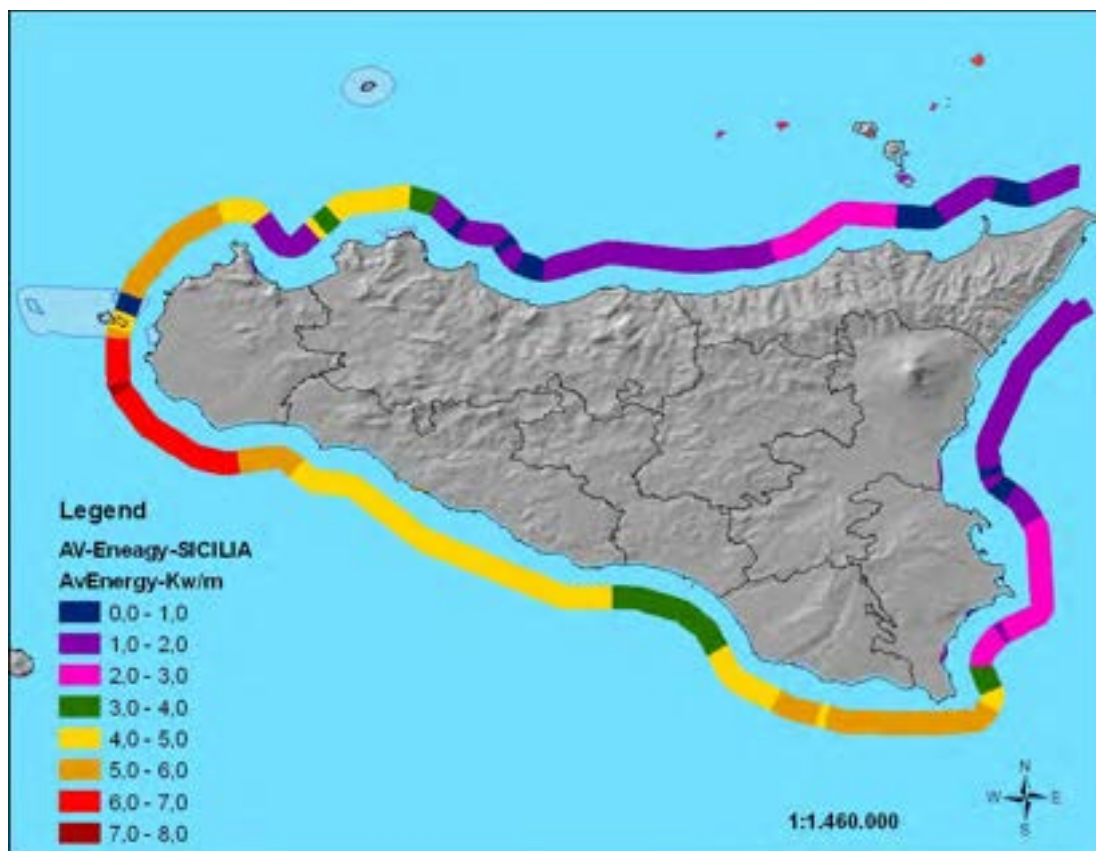


Figura 37: Energia potenziale media per la Sicilia con le zone delle aree marine protette.

In particolare nella pagina dedicata al progetto Energia dal Mare (Figura 40) è possibile consultare interattivamente le mappe tematiche prodotte con il GIS:

URL: <http://utmea.enea.it/projects/energiadalmare/>

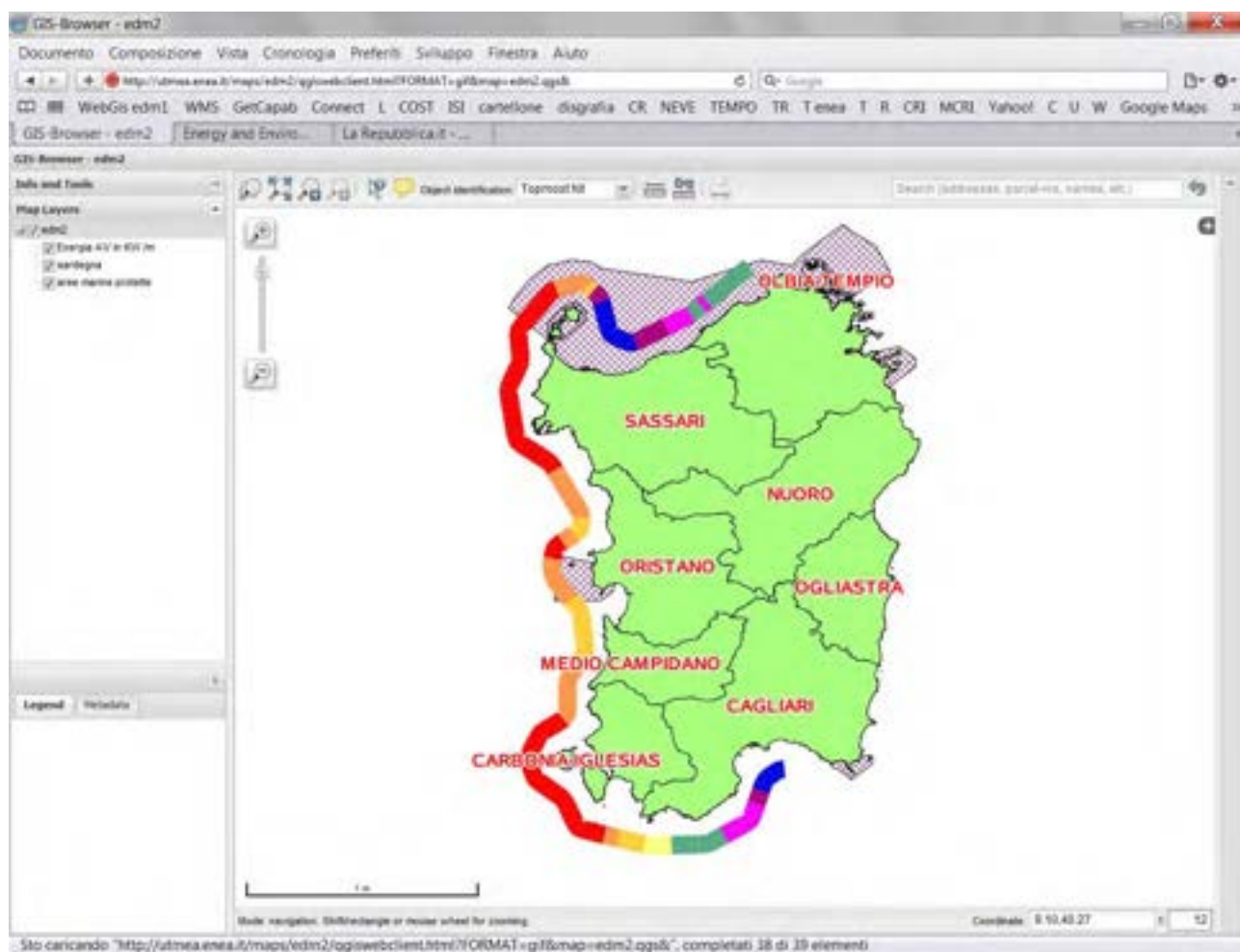


Figura 39: Esempio di pubblicazione su Web della carta tematica Energia potenziale media da moto ondoso misurata lungo la costa occidentale della Sardegna.

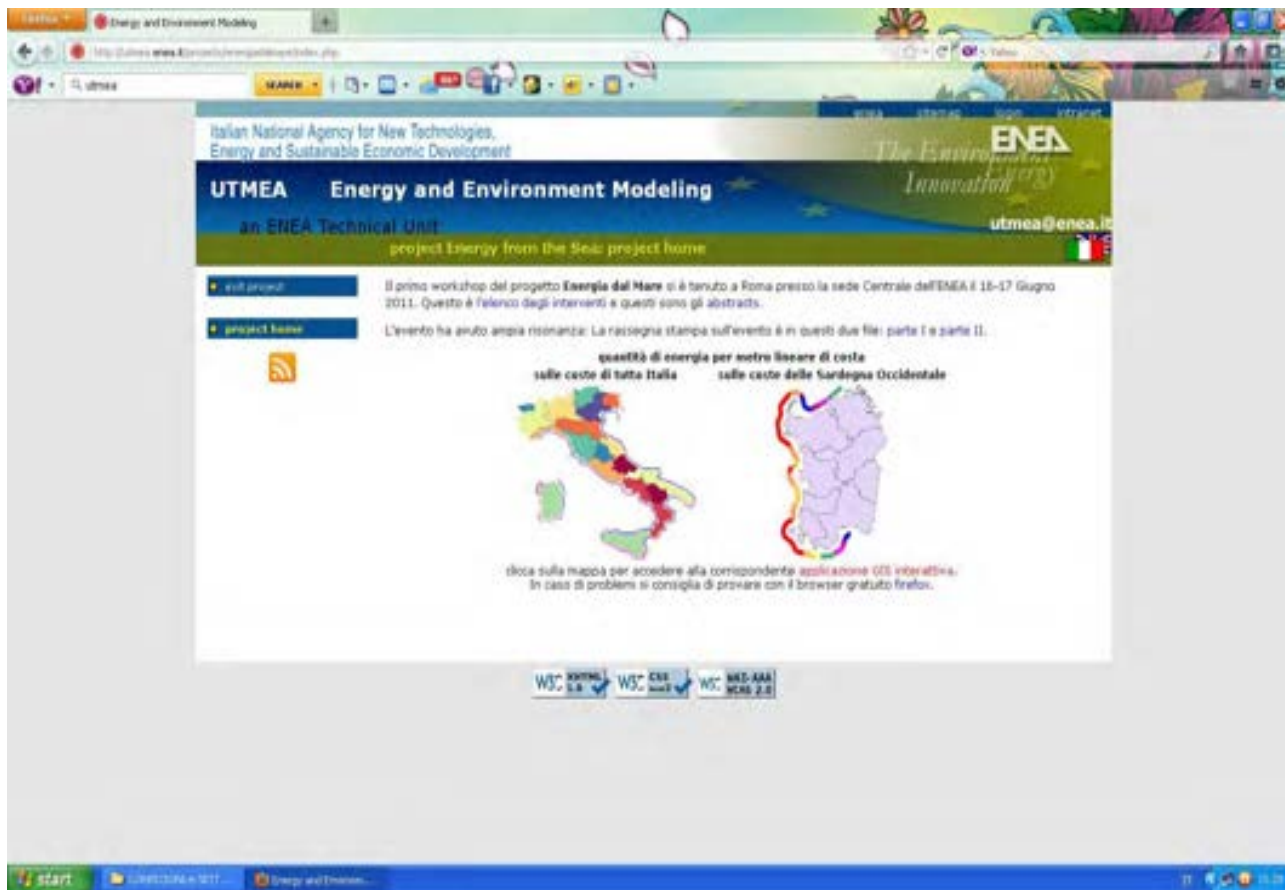


Figura 40: Pagina Web del progetto Energia dal Mare attraverso cui si accede all'applicazione web GIS interattiva.

4. CONFRONTO STATISTICO TRA IL DECENNIO 2001-2010 E IL DECENNIO 2041-2050

Al fine di valutare la differenza tra lo stato del mare nel periodo attuale e quello in un futuro vicino, sono state eseguite simulazioni con il modello WAM per il decennio 2001-2010 e per il decennio 2041-2050.

Il campo di vento nel bacino mediterraneo è il parametro fondamentale che determina le caratteristiche dello stato del mare, quali altezza significativa, periodo medio, periodo di picco, etc. .

Per la simulazione con WAM di entrambi i decenni son stati utilizzati campi di vento per l'area mediterranea ottenuti dal modello accoppiato PROTHEUS (relazione tecnica "Modello accoppiato per l'area Euro-Mediterranea" Calmanti et al.).

Lo scopo di questo studio è valutare le possibili differenze tra le climatologie dei due decenni, quello attuale e quello futuro. La metodologia applicata in questo studio è di tipo statistico e si basa essenzialmente sull'analisi delle EOF (*Empirical Orthogonal Function*).

4.1. EOF

Questo metodo si basa sull'osservazione che la variabilità del dato in esame, specificatamente l'altezza d'onda significativa, per i periodi di tempo considerati, può essere espressa come combinazione di strutture spaziali caratteristiche, dette appunto EOF. Queste strutture caratteristiche sono ricavate dalla matrice di covarianza \mathbf{C} dei valori di H_s (altezza d'onda significativa) per tutte le località e tutti i tempi. I valori di H_s disponibili per ogni simulazione sono pari al numero dei punti di griglia di mare del modello WAM (circa 64.200) per i 14.600 tempi corrispondenti a dieci anni, alla risoluzione temporale di sei ore.

La matrice di covarianza \mathbf{C}^x è calcolata a partire dalla matrice di dati \mathbf{D} costituita da $N_x = 64.200$ colonne e $N_t = 14.600$ righe, dove ogni colonna $\mathbf{D}_{.,j}$ è composta da 14.600 valori di H_s per ogni tempo nella localizzazione di coordinate (x_j, y_j) . Dopo aver sottratto il valor medio ad ogni località, la matrice \mathbf{C}^x è calcolata con il prodotto: $\mathbf{D} \sim \mathbf{D}$, dove $\mathbf{D} \sim$ è la matrice trasposta. Ogni elemento di \mathbf{C}^x : $\mathbf{C}^x_{ij} = \sum_k^{N_t} \mathbf{D}_{ki} \mathbf{D}_{kj}$ rappresenta l'interazione tra la località "i": (x_i, y_i) e quella "j": (x_j, y_j) . Le autofunzioni della matrice \mathbf{C}^x sono quei pattern tipici che vengono chiamati EOF: $\mathbf{C}^x \mathbf{Eof}_k = \lambda_k \mathbf{Eof}_k$ dove \mathbf{Eof}_k è la EOF numero k. Il valore di λ_k rappresenta l'importanza della k° EOF: \mathbf{Eof}_k al fine di rappresentare la variabilità complessiva.

Poiché il numero di punti spaziali o località N_x è considerevolmente maggiore del numero di tempi N_t , ai fini del calcolo delle EOF, è preferibile utilizzare la matrice $\mathbf{C}^t = \mathbf{D} \mathbf{D} \sim$ di dimensione $(N_t)^2$. È facile dimostrare che gli autovalori delle matrici \mathbf{C}^t e \mathbf{C}^x coincidono e che definendo *Principal Component* la autofunzione \mathbf{Pc} tale che: $\mathbf{C}^t \mathbf{Pc}_k = \lambda_k \mathbf{Pc}_k$ e definendo la matrice diagonale \mathbf{W} i cui elementi sono la radice degli autovalori λ_k , vale la relazione $\mathbf{D} \sim \mathbf{Pc} = \mathbf{Eof} \mathbf{W}$, dove \mathbf{Pc} è la matrice le cui colonne sono le "Principal Component" e \mathbf{Eof} è la matrice le cui colonne sono le EOF ordinate secondo l'ampiezza dei vari λ_k .

4.2. Risultati

Sono state calcolate le prime EOF, cioè quelle con gli autovalori maggiori, in modo indipendente per i due periodi. In questo modo sono stati ottenuti due insiemi di autovalori, uno relativo al periodo 2001-2010 e l'altro relativo al periodo 2041-2050. In Figura 41-46 sono riportate le prime tre EOF relative a ciascun periodo.

Si può osservare che la prima EOF è un campo di H_s coerente, in quanto questa eof non presenta valori negativi, pertanto essa rappresenta una effettiva situazione tipica di altezza d'onda con i valori massimi posizionati ad ovest e a sud della Sardegna e in parte

nello Ionio. Questo pattern è coerente con lo stato del mare in condizioni di vento proveniente da ovest, nord-ovest, ovvero come conseguenza di un sistema frontale proveniente dall'Atlantico. Le altre EOF non sono di per se strutture tipiche dello stato del mar Mediterraneo, occorre infatti combinarle con la prima EOF per ottenere strutture caratteristiche di altre situazioni meteorologiche. A titolo di esempio, combinando la prima con la seconda EOF, si può ottenere un pattern corrispondente a un vento prodotto dallo stesso sistema frontale ma ad un tempo successivo, quando questo ha attraversato la regione appenninica, causando venti provenienti da nord nelle regioni centrali italiane ma con provenienza nord-ovest nel bacino sud-est del Mediterraneo.

Il confronto tra le prime EOF, relative al decennio 2001-2010 (Figure 39-41-43), rispetto a quelle del decennio 2041-2050 (Figure 40-42-44), mostra che ci sono differenze alquanto limitate, constatazione che è estesa anche alle EOF successive almeno fino alla 9°. Questo implica che i due periodi presi in considerazione sono praticamente indistinguibili dal punto di vista della statistica climatologica a scala decennale, per quanto riguarda l' altezza d'onda.

Questa conclusione è confermata prendendo in esame, per le prime EOF, la percentuale di varianza spiegata. Questa valutazione è facilmente calcolabile dagli autovalori delle diverse EOF:

$$\text{Frazione della varianza totale dovuta alla EOF}_k = \frac{\lambda_k^2}{\sum \lambda_k^2}$$

I valori percentuali della frazione di varianza sono riportati per le prime 10 EOF nella Tabella 3, per entrambi i decenni studiati.

EOF	Periodo 2001-2010	Periodo 2041-2050
1	15.73 %	15.32 %
2	9.64 %	9.76 %
3	6.44 %	6.41 %
4	5.04 %	5.08 %
5	4.19 %	4.31 %
6	4.06 %	4.22 %
7	3.57 %	3.35 %
8	3.04 %	3.01 %
9	2.71 %	2.84 %
10	2.61 %	2.61 %

Tabella 3: Confronto dei valori percentuali della frazione di varianza per le prime 10 EOF calcolate per il periodo 2001-2010 e 2041-2050.

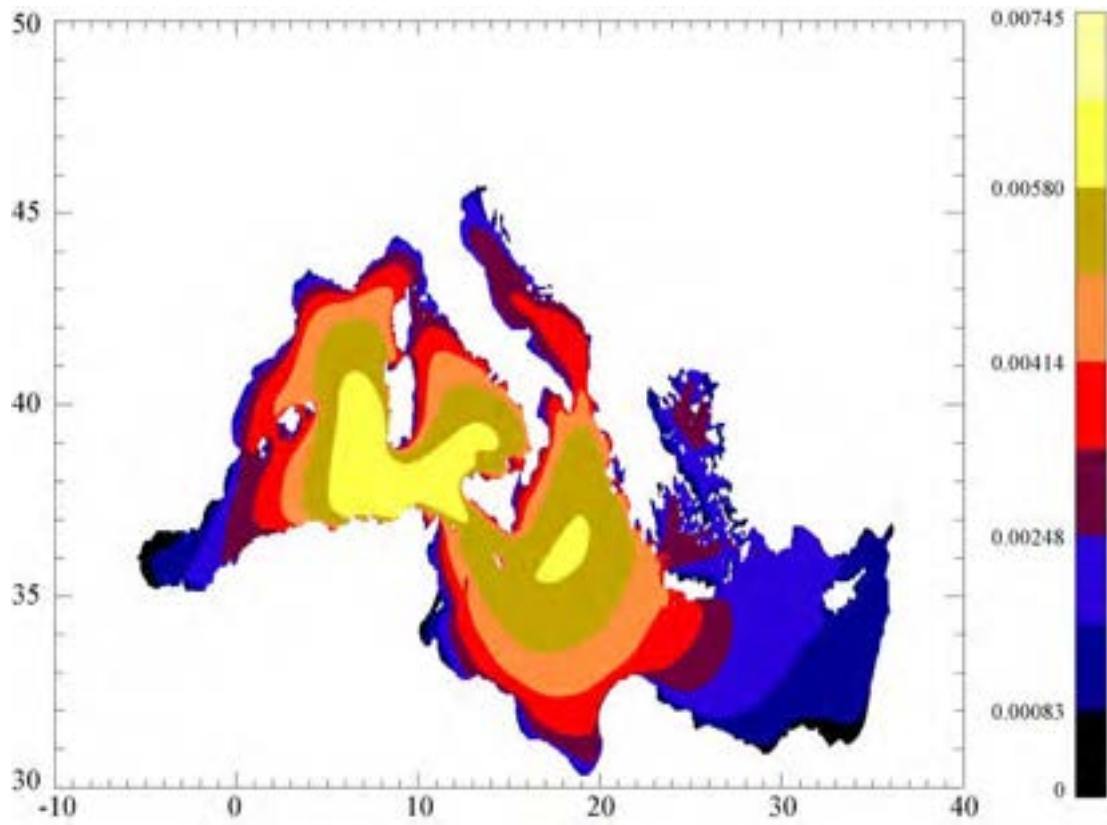


Figura 41: EOF 1 relativa al periodo 2001-2010.

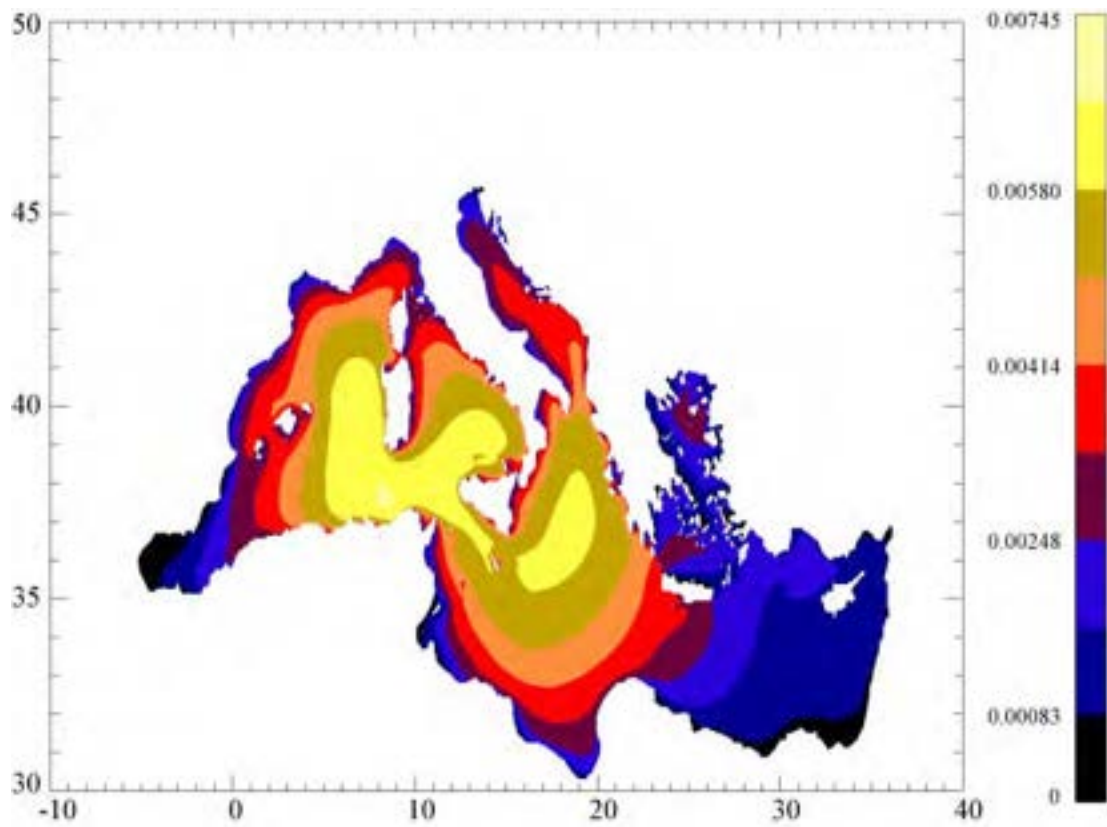


Figura 42: EOF 1 relativa al periodo 2041-2050.

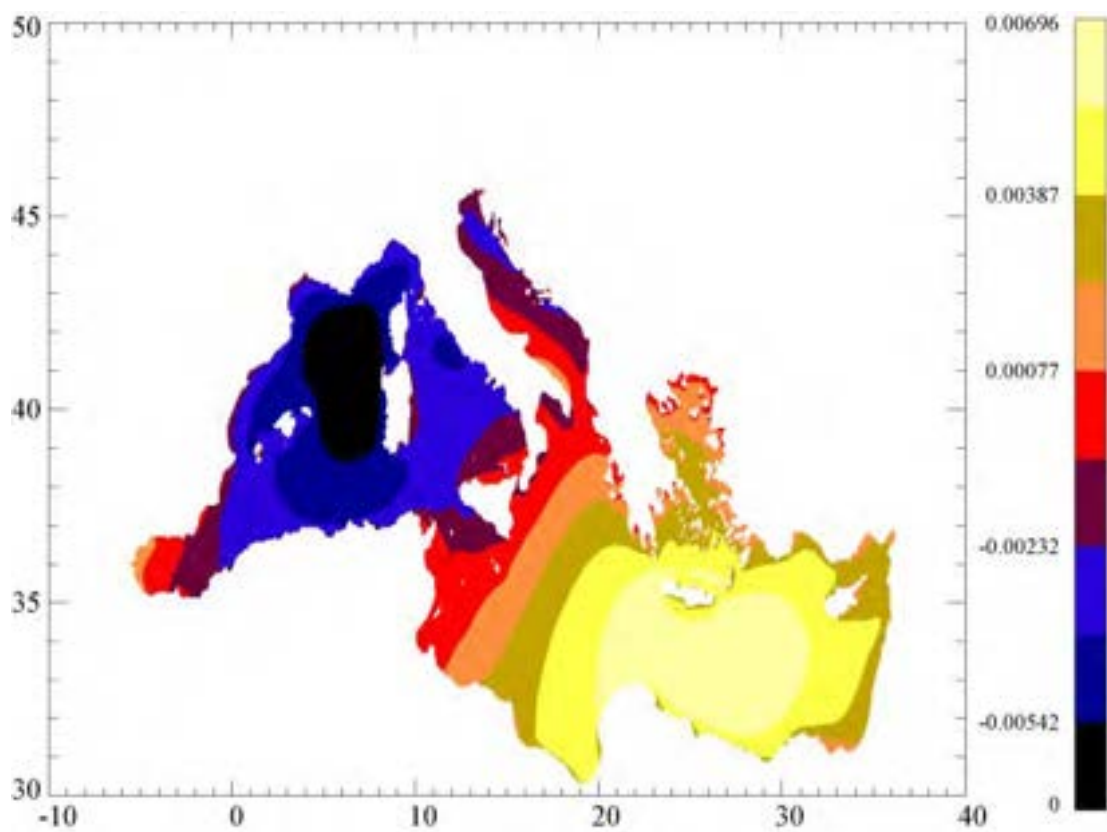


Figura 43: EOF 2 relativa al periodo 2001-2010.

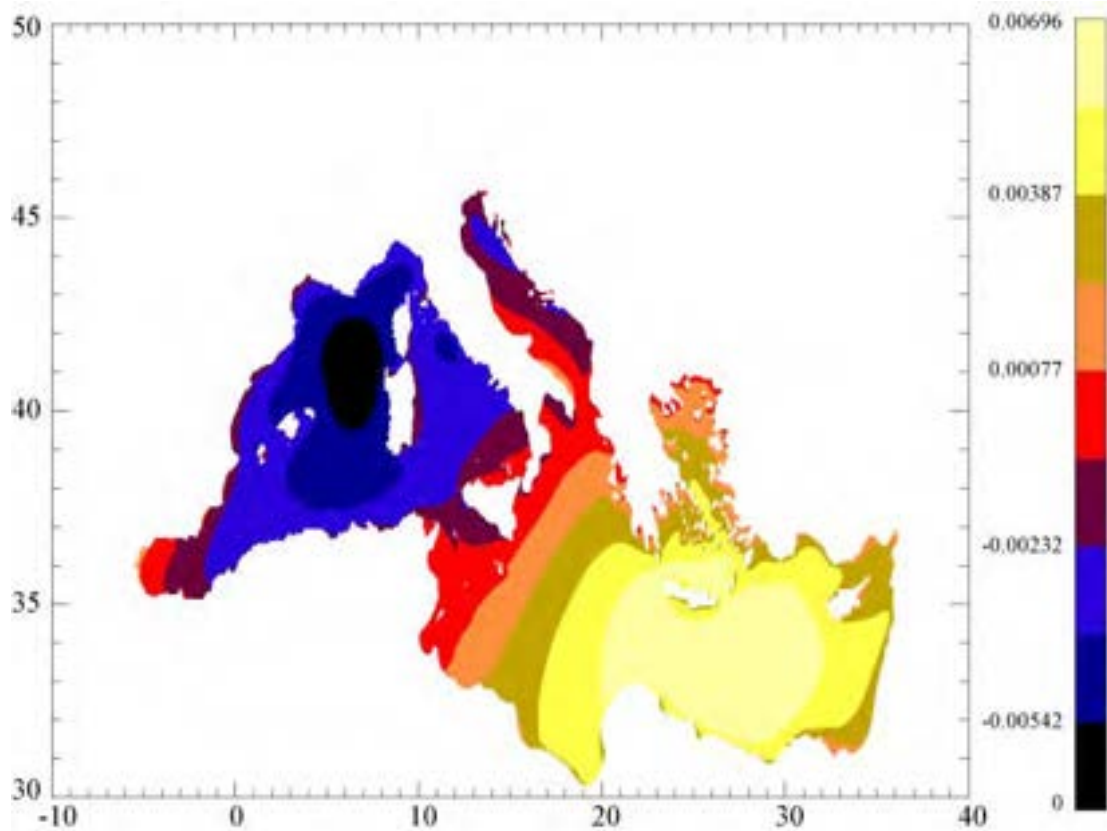


Figura 44: EOF 2 relativa al periodo 2041-2050.

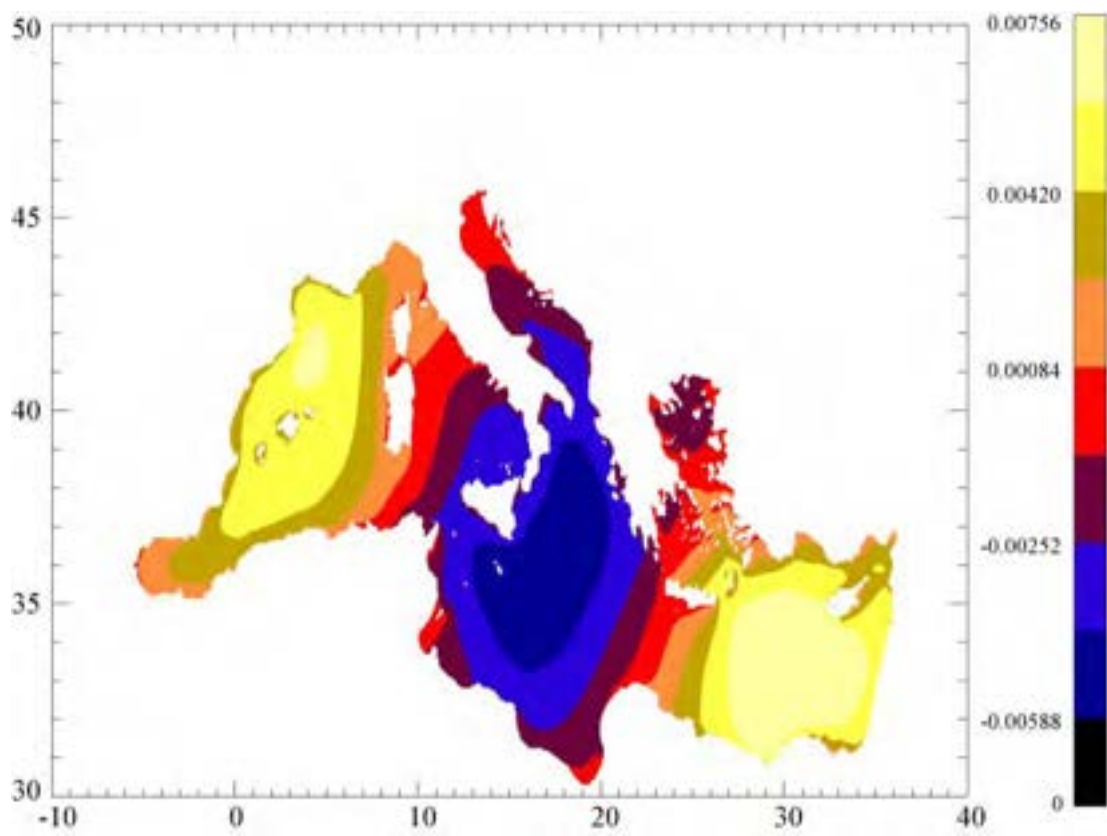


Figura 45: EOF 3 relativa al periodo 2001-2010.

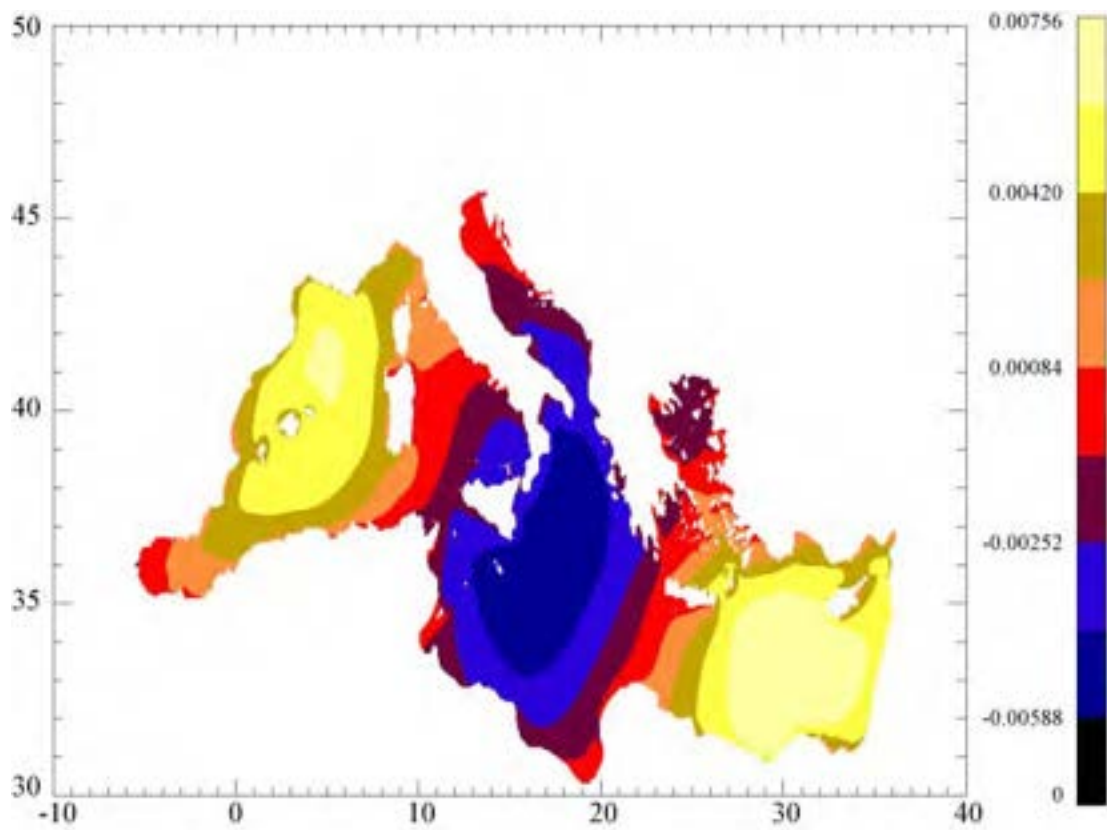


Figura 46: EOF 3 relativa al periodo 2041-2050.

5. BIBLIOGRAFIA

Dati Rete Ondametrica Nazionale (RON)- URL: <http://www.idromare.it/>.

WAMDI-group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L., Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, 1988. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Ocean.* 18, 1775 - 1810.

Janssen P. and Bidlot J.R. – ECMWF Wave Model Operational implementation 9 April 2002 – IFS Documentation Cy25R1

ECMWF Wave Model Operational implementation 26 January 2010 – IFS Documentation Cy36R1