Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Climatologia ad alta risoluzione spaziale dell'energia associata al moto ondoso nel Mediterraneo: mappe e indicatori di produttività

Adriana Carillo, Emanuela Lombardi, Gianmaria Sannino

Report RdS/PAR2013/167

CLIMATOLOGIA AD ALTA RISOLUZIONE SPAZIALE DELL'ENERGIA ASSOCIATA AL MOTO ONDOSO NEL MEDITERRANEO: MAPPE E INDICATORI DI PRODUTTIVITÀ

Adriana Carillo, Emanuela Lombardi, Gianmaria Sannino (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2013
Area: PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE
Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso
Obiettivo: Calcolo di indicatori di produttività energetica apartire dal clima ondoso
Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

Indice

SOMMARIO 4
1 INTRODUZIONE 4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI 5
2.1 CLIMATOLOGIA AD ALTA RISOLUZIONE PER IL BACINO MEDITERRANEO 5
2.2 VALIDAZIONE DEI RISULTATI 10
2.3 CARATTERIZZAZIONE DELL'ENERGIA PER SITI ITALIANI 12
2.4 PARTIZIONE DEGLI SPETTRI BIDIMENSIONALI 40
2.5 PRODUZIONE GIORNALIERA DI PREVISIONI DELLO STATO DEL MARE E DELL'ENERGIA 41
3 CONCLUSIONI 43
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 43

Sommario

Allo scopo di determinare la possibilità di utilizzare l'energia contenuta nelle onde come fonte rinnovabile, è necessario disporre di una accurata quantificazione della risorsa. Nel corso di questa annualità è stata quindi generata una climatologia ad alta risoluzione e di lungo periodo, per l'intero bacino Mediterraneo.

Il modello numerico WAM per la simulazione del moto ondoso è stato utilizzato alla risoluzione di 1/32° per produrre una climatologia delle onde per l'intero bacino Mediterraneo della durata di 25 anni, dal 1980 al 2004. Sono sati utilizzati come forzante superficiale i venti provenienti da una simulazione di un modello atmosferico regionale, forzato a sua volta dalle analisi del Centro Europeo per le Previsioni a Medio termine (ECMWF). Sono illustrate nel documento le mappe climatologiche relative all'altezza significativa e all'energia per le diverse stagioni ed è riportata la validazione dei dati ottenuti, tramite il confronto con i dati di altezza ricavati da satellite e con i dati misurati dalle boe ondametriche.

Oltre alle classiche grandezze integrate, quali altezza significativa dell'onda e direzione, in uscita dal modello WAM sono stati memorizzati gli spettri bidimensionali per 20 punti lungo la costa del bacino. Sono stati preliminarmente mostrati gli spettri ottenuti mediando nelle due dimensioni, frequenza e direzione, quindi è stato presentato per alcuni siti il calcolo della produttività annua in funzione della potenza installata. Allo scopo di ottenere una quantificazione realistica della produzione annua, i valori degli spettri per tutto il periodo della simulazione sono stati analizzati introducendo una selezione sui principali fattori che determinano la riduzione dell'energia prodotta dai convertitori, rispetto a quella totale contenuta nelle onde. La disponibilità degli spettri bidimensionali ha permesso di effettuare il calcolo della produttività considerando i limiti nelle frequenze delle onde e negli angoli di propagazione derivati dai reali intervalli di funzionamento dei convertitori. Dall'analisi degli andamenti ottenuti nei diversi siti, risulta l'importanza di questo tipo di studio preliminare che può fornire indicazioni fondamentali sia riguardo la scelta della tipologia di convertitore più idonea alla specifica situazione locale, che al dimensionamento economicamente più vantaggioso. E', per esempio, possibile quantificare la perdita di produttività legata all'estensione nelle direzioni angolari dei picchi di energia e valutare quindi la convenienza nella scelta di un convertitore di tipo puntuale rispetto ad altre tipologie.

Un'attività a parte, svolta nel corso della presente annualità, riguarda la catena operativa di previsione del moto ondoso e dell'energia associata, messa a punto nel corso dell'annualità precedente. Tale catena operativa fornisce le previsioni per tutto il bacino Mediterraneo alla risoluzione di 1/32° e per 10 sottobacini ad 1/128°. L'operatività del sistema è stata garantita quotidianamente per tutto l'anno corrente, rendendo disponibili su web le previsioni per i cinque giorni successivi.

1 Introduzione

L'attività svolta è finalizzata a fornire informazioni relative all'energia ricavabile dal moto ondoso all'interno del bacino Mediterraneo che costituiscono una base fondamentale per l'applicazione di tecnologie innovative di conversione del moto ondoso in energia. Nel corso delle annualità precedenti dell'Accordo di Programma è stata realizzata una climatologia del moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo, utilizzando il modello WAM [1] alla risoluzione spaziale di 1/16°. Tale climatologia copriva un arco di tempo di 10 anni. L'interesse che tale prodotto ha suscitato all'interno della comunità degli esperti nei convertitori di energia dal mare, ha suggerito di realizzare una nuova climatologia ad una risoluzione più elevata ed estesa su un maggiore arco temporale.

Le uscite del modello WAM sono costituite dalle variabili integrate rappresentative delle onde, quali altezza significativa e frequenza media, per ogni punto del grigliato di calcolo. La realizzazione di una nuova climatologia ha permesso inoltre di memorizzare gli spettri bidimensionali di energia relativi a 20 punti,

distribuiti lungo le coste del bacino Mediterraneo. Gli spettri forniscono la descrizione completa delle caratteristiche delle onde e sono stati utilizzati per costruire un dettagliato clima d'onda, funzione della frequenza e della direzione. Per i punti selezionati, è stata effettuata una valutazione della produzione di elettricità annua ricavabile in funzione della capacità installata, ipotizzando a titolo di esempio parametri del convertitore quali la soglia inferiore di energia ed i limiti di uso in frequenza e direzione.

L'attività di supporto modellistico alla installazione di convertitori di energia dal moto ondoso ha incluso, oltre alla produzione di una climatologia di lungo periodo ed alla sua analisi, una attività di tipo operativo. La previsione dello stato del mare costituisce infatti un elemento importante nella gestione dei sistemi di conversione, sia per la possibilità che taluni hanno di riconfigurarsi rispetto alle onde incidenti, sia per la necessità di valutare in anticipo la quantità di energia che verrà immessa in rete.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Climatologia ad alta risoluzione per il bacino Mediterraneo

Nel corso delle precedenti annualità era stata prodotta una climatologia dell'energia da moto ondoso per il bacino Mediterraneo alla risoluzione di 1/16°. Tale climatologia era stata ottenuta utilizzando come forzanti superficiali i campi di vento provenienti dalle analisi realizzate dal Centro Europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF). Tali dati ricoprivano il periodo 2001-2010 alla risoluzione spaziale di ¼°.
Considerato l'interesse riscontrato, è stata effettuata una climatologia per la stessa area ad una risoluzione maggiore e per un periodo di tempo più lungo. E' stato utilizzato il modello WAM sulla stessa griglia di calcolo, alla risoluzione di 1/32°, già utilizzata per il modello operativo realizzato nel corso delle precedenti annualità [2].
Per ottenere un forzante superficiale a maggiore risoluzione, sono stati utilizzati i risultati di una simulazione di *downscaling* effettuata con il modello atmosferico regionale REMO. La simulazione, forzata con le analisi provenienti dal ECMWF, copre un intervallo di tempo dal 1980 al 2004. I dati sono disponibili su una griglia regolare alla risoluzione di 1/8°, con frequenza temporale di 6 ore.

La simulazione con il modello WAM è estesa all'intero bacino Mediterraneo e copre l'area da 5.50°W a 36.125°E e da 30.2°N a 45.825°N. Lo spettro di densità di energia è stato discretizzato utilizzando 36 direzioni angolari, corrispondenti ad una risoluzione angolare di 10°, e 32 intervalli di frequenza, che aumentano con progressione logaritmica a partire da 0.05 Hz.

Sono stati memorizzati per tutto il periodo della simulazione e su tutta la griglia di calcolo, oltre ai valori dell'energia, i valori delle più importanti variabili integrate, quali altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione di propagazione. I campi sono stati memorizzati con la frequenza di 3 ore.
Nelle Figure 1-4 sono mostrate le climatologie relative all'altezza significativa per ciascuna stagione. Risulta evidente la forte stagionalità dei risultati, con il periodo invernale caratterizzato, su una vasta area del bacino, da valori medi superiori a 1.6 m di altezza significativa. La stagione estiva presenta valori molto bassi, inferiori a 0.8 m, in tutta la regione tranne in una piccola zona nel Mediterraneo orientale interessata dai venti etesiani. Nelle due stagioni intermedie è soprattutto evidente l'effetto dei venti da nord-ovest che interessano il bacino occidentale.

Nelle Figure 5-8 sono riportate le climatologie per il flusso di energia. Le differenze stagionali riscontrate nei valori di altezza significativa risultano ulteriormente intensificate nei campi di energia, che ne dipendono in maniera quadratica.

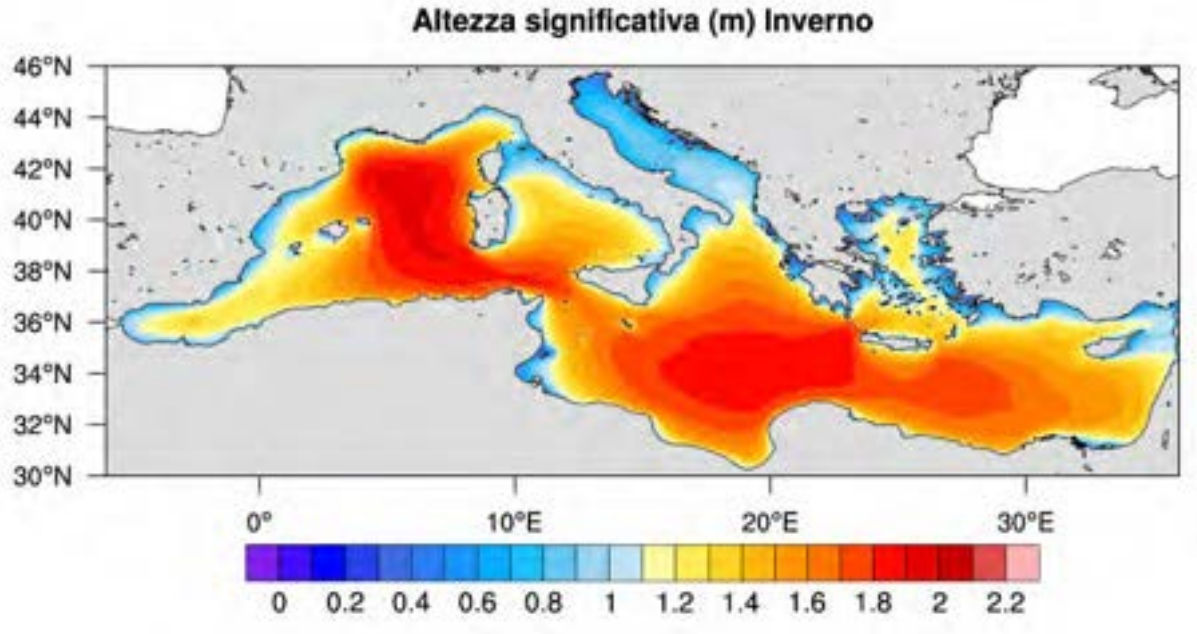


Figura 1. Climatologia dell'altezza significativa per la stagione invernale.

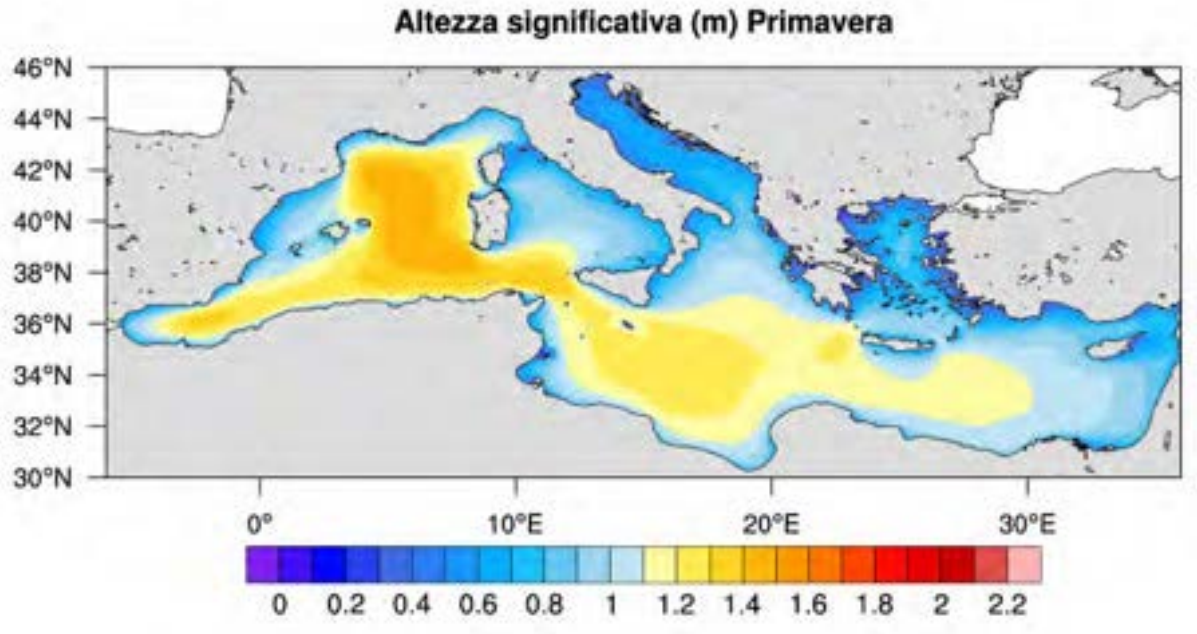


Figura 2. Climatologia dell'altezza significativa per la primavera.

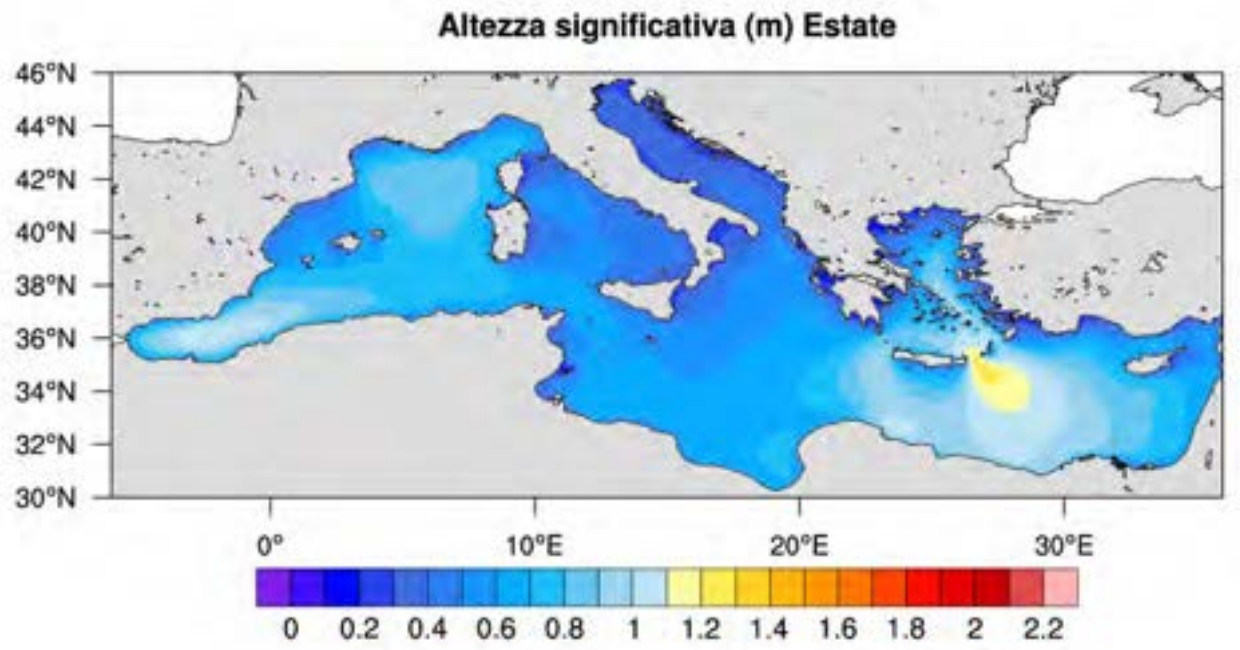


Figura 3. Climatologia dell'altezza significativa per la stagione estiva.

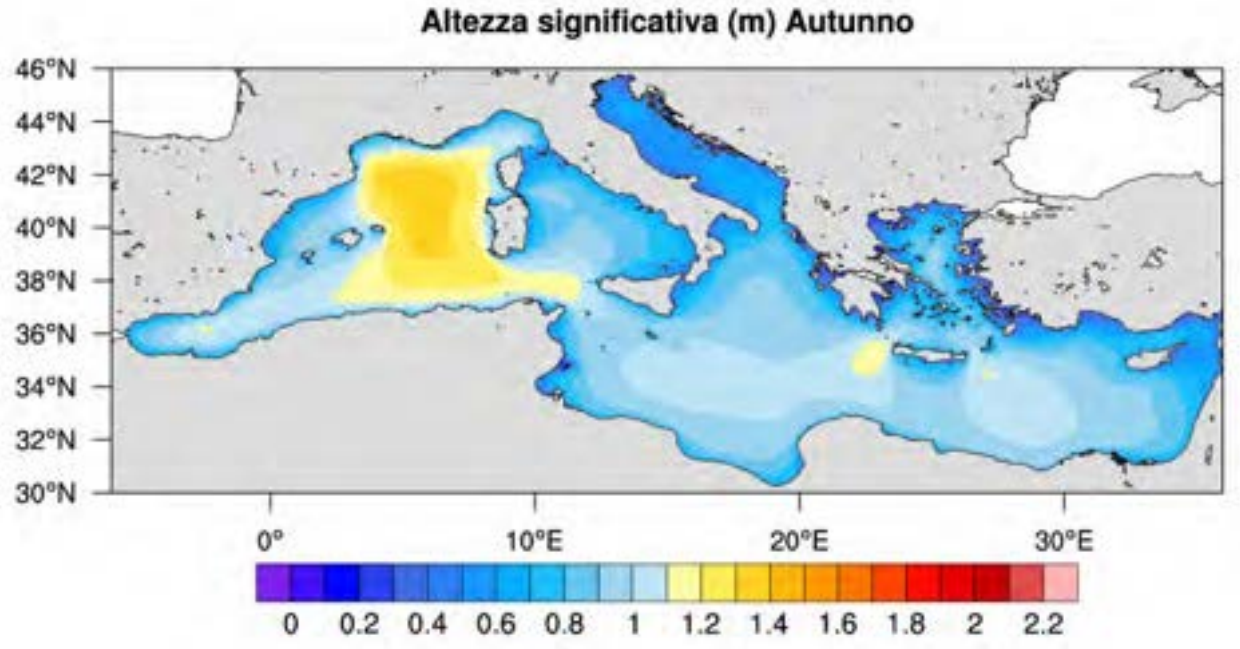


Figura 4. Climatologia dell'altezza significativa per la stagione autunnale.

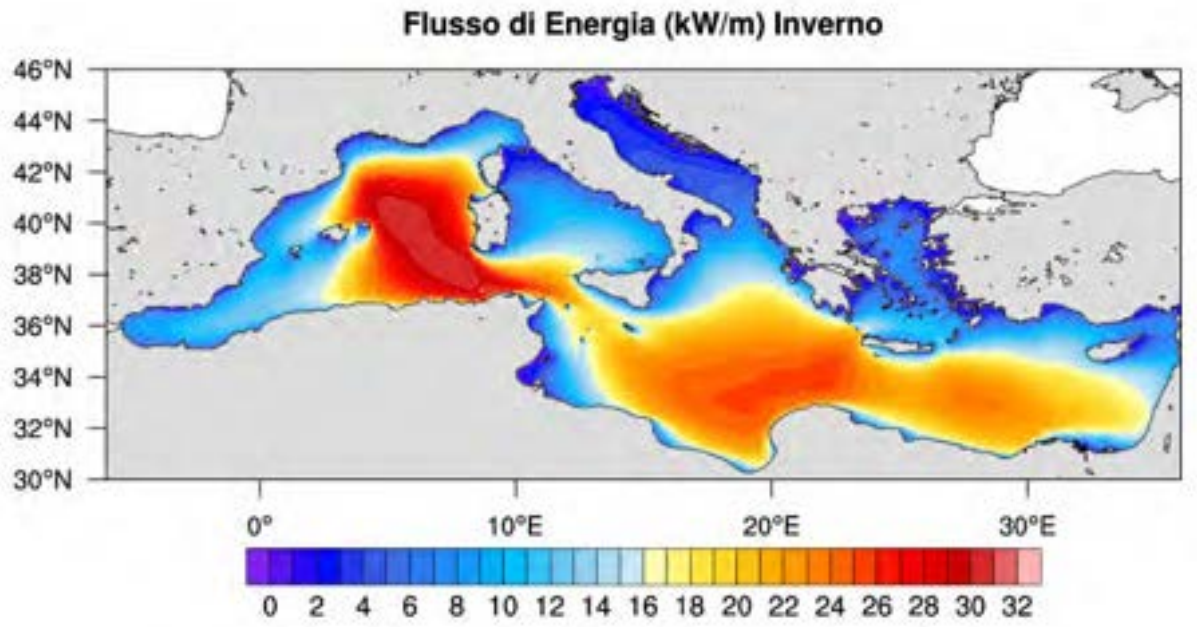


Figura 5. Climatologia del flusso di energia per la stagione invernale.

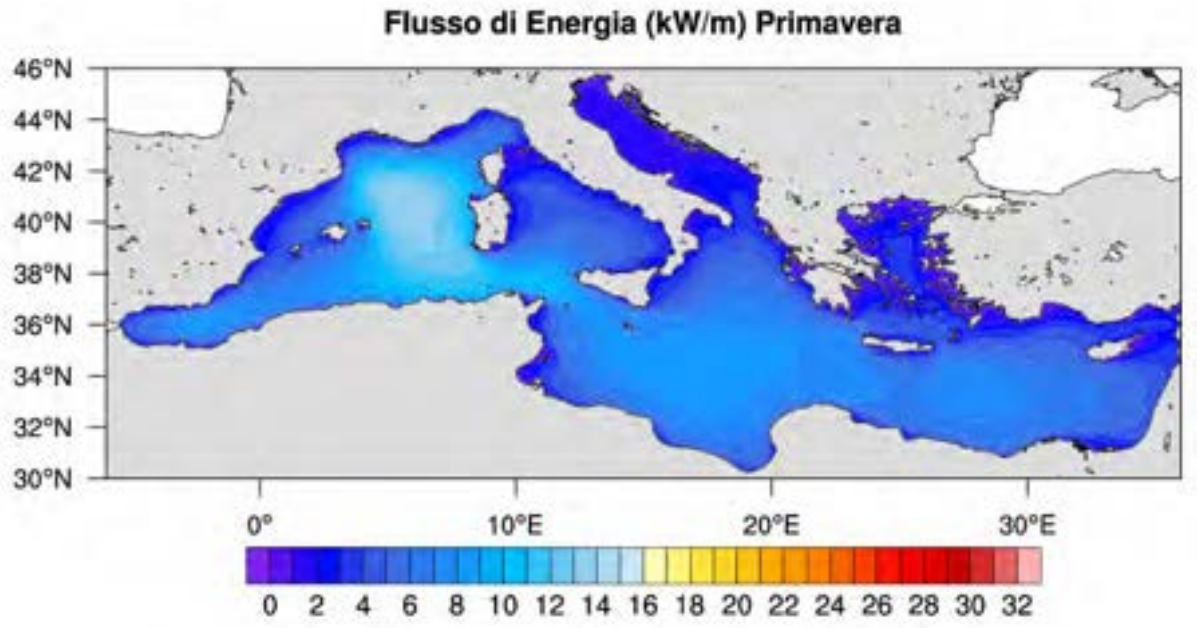


Figura 6. Climatologia del flusso di energia per la primavera.

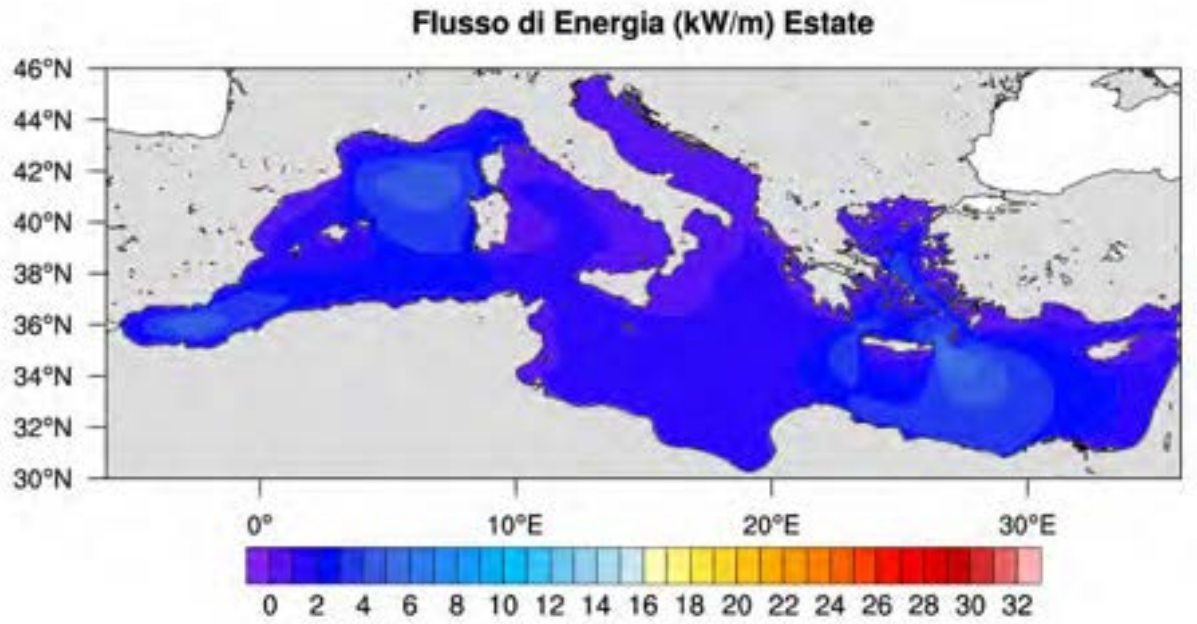


Figura 7. Climatologia del flusso di energia per la stagione estiva.

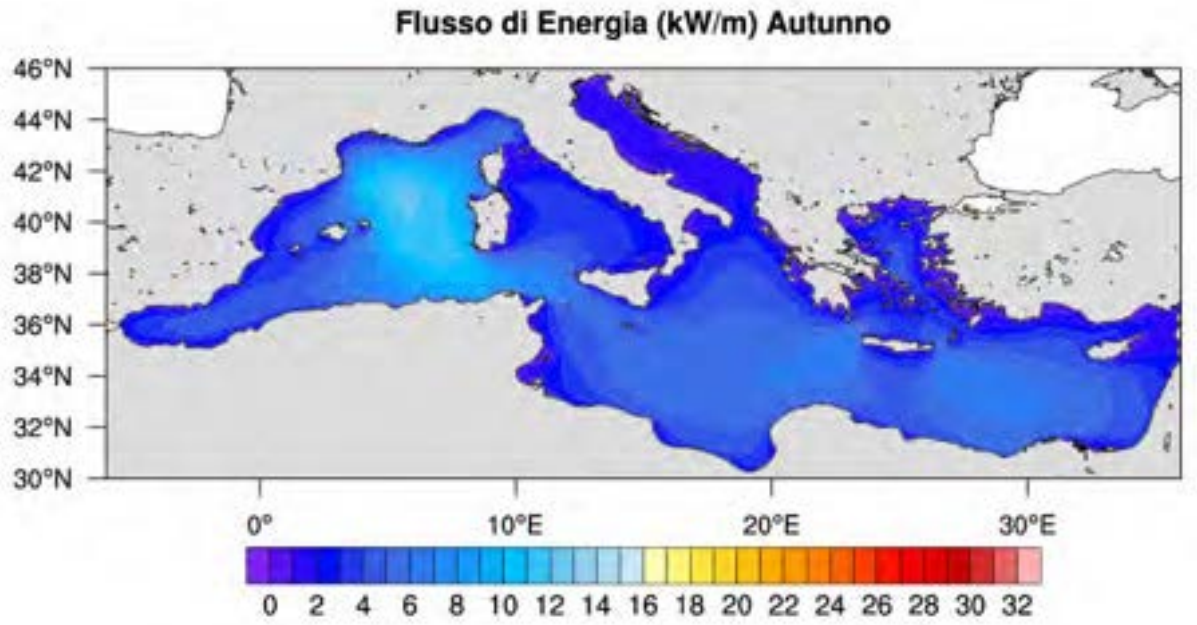


Figura 8. Climatologia del flusso di energia per la stagione autunnale.

2.2 Validazione dei risultati

I risultati del modello WAM relativi alla simulazione climatologica sono stati confrontati sia con le misure provenienti dalla Rete Ondametrica Nazionale (RON) che con i dati provenienti dagli altimetri satellitari. Mentre le boe registrano dati localizzati in zone costiere, i dati da satellite forniscono misure di altezza delle onde nelle aree lontane dalla costa, e permettono quindi di valutare il comportamento complessivo del modello su tutto il Mar Mediterraneo. In Tabella 1 sono elencate le misure altimetriche da satellite disponibili durante il periodo simulato.

Tabella 1 – Dati satellitari usati per la validazione dell'altezza significativa del modello.

Satellite	Ciclo (giorni)	Periodo usato	Distanza tracce all'equatore (km)
Topex-Poeidon	**10**	**Gen. 1992-Ott. 2003**	**315**
Jason-1	**10**	**Gen. 2002-Dic. 2004**	**315**
ERS-2	**35**	**Gen. 1995-Dic. 2004**	**80**

I dati dei satelliti sono stati scaricati dal sito AVISO [3] e processati. Sono stati eliminati i valori per i quali il satellite indicava profondità sostanzialmente diverse da quelle del modello, quindi sono stati rimossi i dati spuri, seguendo la metodologia descritta da Queffeulou e Bentamy [4] e basata sull'analisi statistica delle differenze tra dati consecutivi lungo la traccia. Dopo questa fase preliminare, i valori di altezza (Hs) sono stati confrontati con i valori del modello relativi al punto di griglia che includeva la posizione del dato da satellite, al tempo più vicino. Non è stata effettuata alcuna interpolazione spaziale o temporale né sui dati da satellite né sui dati del modello.

La valutazione statistica delle differenze è stata effettuata utilizzando i seguenti indici: errore quadratico medio (*rmse*), *bias* tra il modello e le misure, indice di dispersione (*si*) e pendenza della linea di *best fit* passante per l'origine degli assi (*slope*) così definiti:

$$bias = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)$$

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

$$si = \frac{rmse}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i}$$

$$slope = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i x_i}$$

Dove con x_i è indicata la serie dei dati misurati e con y_i la serie di valori ricavata dal modello.

La Tabella 2 riporta per ogni satellite i valori degli indici calcolati su tutti i valori disponibili.

Tabella 2 – Statistiche dei confronti tra il modello ed i satelliti dell'altezza di onda significativa (Hs) per l'intero Mediterraneo.

Satellite	Numero Campioni	Bias (m)	si	Rmse (m)	Slope
Topex-Poeidon	1265296	0.19	0.53	0.64	0.82
Jason-1	321675	0.16	0.53	0.63	0.84
ERS2	887581	0.11	0.66	0.71	0.81

Il valore del *bias,* inferiore a 0.2 m risulta piuttosto basso, mentre c'è una certa dispersione dei valori del modello rispetto ai dati da satellite. La pendenza inferiore ad 1 indica una certa sottostima dei valori di ampiezza del modello.

I valori di ampiezza significativa e direzione sono stati confrontati anche con le misure raccolte dalle boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'Istituto per la Protezione Ambientale (ISPRA). La rete è entrata in esercizio a partire dal luglio 1989 quando sono state installate in acque profonde le prime otto boe ondametriche. A queste se ne sono aggiunte alcune altre negli anni successivi, per il periodo di interesse sono state quindi considerate anche le boe di Cetraro e Ancona posizionate nel corso del 1999. Dai valori registrati dalle boe sono state estratte le direzioni di propagazione ed effettuati confronti statistici anche per queste grandezze.
In questo caso è stato calcolato il *bias* direzionale e la varianza ricavati dalle seguenti formule:

$$\bar{S} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \sin\,(y_i - x_i)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \cos\,(y_i - x_i)$$

$$\bar{R} = (\bar{C}^2 + \bar{S}^2\,)^{1/2}$$

$$bias^0 = \arctan\,(\frac{\bar{S}}{\bar{C}})$$

$$var^0 = (1 - \bar{R})$$

Dove in questo caso il campione di n dati è costituito dalle direzioni registrate (x_i) e da quelle del modello (y_i).

Tabella 3 – Dati disponibili dalle boe RON.

Boa	Inzio registr.	latitudine	longitudine
Alghero	01/07/1989	40.553	8.011
Catania	01/07/1989	37.440	15.147
Crotone	01/07/1989	39.023	17.220
La Spezia	01/07/1989	43.928	9.827
Mazara del Vallo	01/07/1989	37.645	12.582
Monopoli	01/07/1989	40.975	17.377
Ortona	01/07/1989	42.415	14.506
Ponza	01/07/1989	40.867	12.950
Cetraro	28/02/1999	39.452	15.929
Ancona	10/03/1999	43.829	13.714

Tabella 4 – Statistiche dei confronti tra altezze significative e direzioni tra il modello e le boe.

Boa	Altezza significativa			Direzione	
	bias	rmse	slope	Bias^0	Varianza^0
Alghero	-0.17	0.66	0.81	-2.04	0.26
Catania	-0.17	0.41	0.66	-8.07	0.33
Crotone	-0.06	0.48	0.85	-3.20	0.43
La Spezia	-0.02	0.44	0.95	0.59	0.37
Mazara del Vallo	-0.04	0.56	0.92	-10.86	0.36
Monopoli	-0.20	0.47	0.69	1.10	0.45
Ortona	-0.21	0.45	0.64	-7.35	0.36
Ponza	-0.10	0.53	0.84	-9.21	0.36
Cetraro	-0.10	0.46	0.77	-6.58	0.25
Ancona	-0.15	0.49	0.70	17.61	0.61

I confronti effettuati tra i valori calcolati dal modello e quelli registrati dalle boe confermano i risultati ottenuti dai confronti con i dati satellitari, mostrando una tendenza alla sottostima dei valori di ampiezza dell'onda come mostrato sia dal bias negativo che dalla *slope* ovunque inferiore a 1. La boa dove si ottiene un migliore accordo è quella di La Spezia dove la *slope* tra le ampiezze raggiunge il valore di 0.95 con un *bias* di -0.02. Il *bias* direzionale supera 10° solo nel confronto con la boa di Ancona, la varianza risulta ovunque molto bassa indicando quindi poca dispersione dei dati simulati rispetto ai valori misurati.

2.3 Caratterizzazione dell'energia per siti italiani

Il modello WAM calcola l'evoluzione nel tempo dello spettro direzionale dell'onda in ogni punto di griglia. Nel caso della simulazione climatologica per il Mediterraneo sono stati scelti 20 punti per i quali sono stati memorizzati gli spettri per tutta la durata della simulazione, con la frequenza di 1 ora. I punti sono distribuiti all'interno dell'area in modo da rappresentare le zone più significative del bacino ed in

particolare la costa italiana, le posizioni sono indicate nella mappa in Figura 9, le coordinate dei punti e la profondità corrispondente sono riportati in Tabella 5.

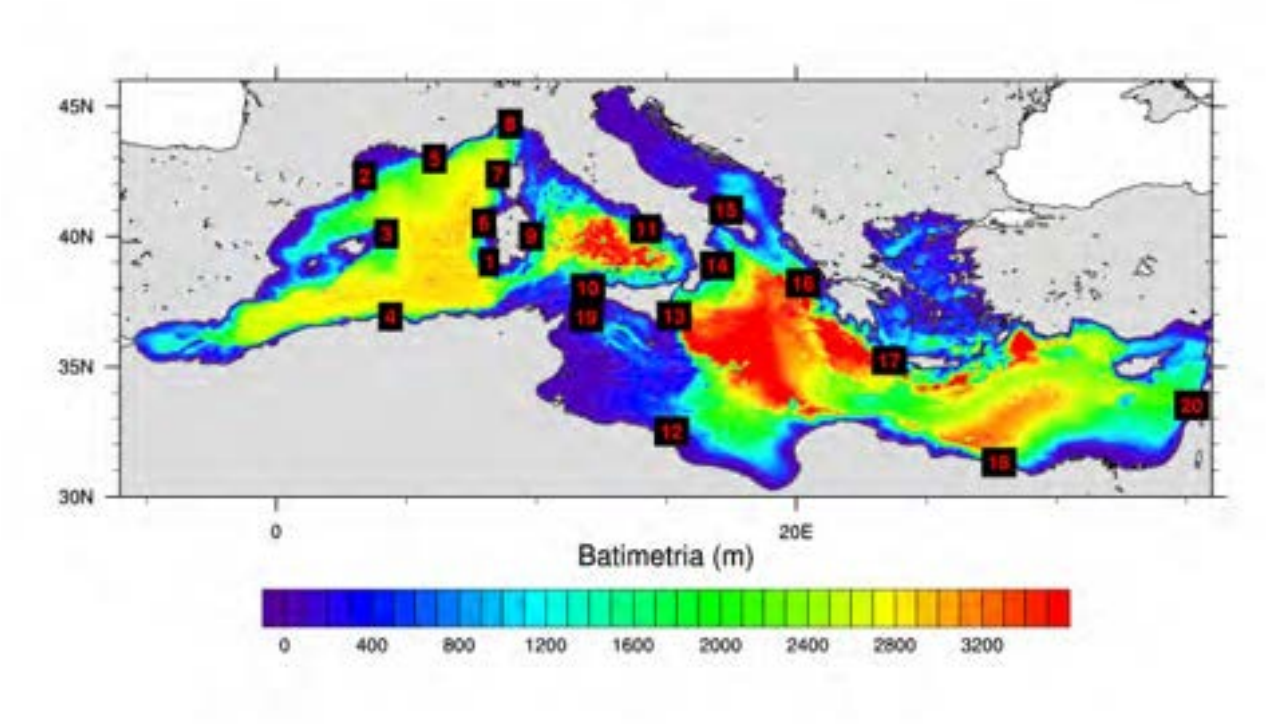


Figura 9. Le posizioni dei siti per i quali è stato memorizzato lo spettro bidimensionale sono mostrate sulla batimetria utilizzata dal modello WAM.

Tabella 5. Coordinate geografiche e profondità dei siti per i quali è stato memorizzato lo spettro bidimensionale.

Numero	longitudine	latitudine	profondità
1	8.187	39.012	115
2	3.406	42.325	350
3	4.250	40.106	135
4	4.406	36.919	181
5	6.094	42.981	148
6	8.000	40.513	119
7	8.531	42.388	185
8	9.000	44.325	123
9	9.812	40.013	305
10	12.000	38.013	229
11	14.219	40.294	416
12	15.219	32.513	190
13	15.312	36.950	102
14	16.969	38.888	87
15	17.312	41.012	306
16	20.281	38.200	480
17	23.594	35.231	99
18	27.812	31.325	337
19	11.938	36.888	495
20	35.219	33.513	197

Lo spettro direzionale dell'onda S(f,Θ) in unità di misura m^2/Hz/radianti, fatto evolvere numericamente nel modello WAM è la base dalla quale vengono calcolate tutte le grandezze integrate. Dallo spettro bidimensionale è possibile ricavare lo spettro non-direzionale S(f) in m^2/Hz calcolato numericamente come sommatoria sulle N direzioni:

$$S(f) = \Delta\theta \sum_{i=1}^{N} S(f, \theta_i)$$

I parametri caratteristici delle onde sono ricavati dai momenti spettrali m_0 e m_{-1}:

$$m_0 = \sum_{i=1}^{M} S(f_i)\ \Delta f_i$$

e

$$m_{-1} = \sum_{i=1}^{M} \frac{S(f_i)}{f_i}\ \Delta f_i$$

L'altezza significativa dell'onda è calcolata dal momento m_0:

$$H_s = 4\sqrt{m_0}$$

e il periodo di propagazione dell'energia dell'onda T_e dal rapporto dei due momenti:

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

Il contenuto di energia per unità di superficie del mare, in Joule/m^2, si ottiene dall'integrale dello spettro non-direzionale, usando per ρ il valore 1025 Kg/m^3

$$E = \rho\, g \int_0^{\infty} S(f) df = \rho\, g\, m_0 = \rho\, g\, \frac{H_s^2}{16}$$

L'energia di ogni componente armonica viaggia ad una velocità di gruppo c_g funzione della profondità *d* e della frequenza

$$c_g(f,h) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{k}\tanh(kh)}\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)$$

dove *k* è il numero d'onda dato dalla relazione di dispersione. In acque profonde, dove cioè la profondità è maggiore di metà lunghezza d'onda, tanh(kd)= 1, e la relazione di dispersione si riduce a:

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g\ k$$

Nella approssimazione di acque profonde quindi la velocità di gruppo è data da:

$$c_g = \frac{gT}{4\pi}$$

La densità totale di potenza in Watt per metro di cresta d'onda è calcolata dall'integrale

$$P = \rho\ g \int_0^\infty c_g\ (f,h) * S(f) df = \frac{\rho\ g^2}{4\pi} \int_0^\infty \frac{S(f)}{f}\ df$$

in pratica in acque profonde la densità di potenza può essere calcolata come:

$$P = \frac{\rho\ g^2}{4\pi}\ m_{-1}\ =\ \frac{\rho\ g^2}{64\pi}\ T_e\ (H_s)^2$$

L'energia in Watt/m può essere ricavata dallo spettro bidimensionale tramite il calcolo del momento m_{-1}.
Gli spettri bidimensionali relativi ai siti in tabella 5 sono stati utilizzati per analizzare la distribuzione dell'energia in funzione della frequenza e della direzione di propagazione; in questo caso sono state utilizzate le sommatorie nelle due dimensioni senza applicare nessun coefficiente moltiplicativo.
Il comportamento nei siti italiani è stato valutato utilizzando le medie mensili relative all'intero periodo della simulazione climatologica.

Nelle Figure 10-23 sono mostrati sia gli spettri calcolati in funzione della frequenza che in funzione della direzione. Si può in generale osservare la forte stagionalità dell'energia con i valori massimi raggiunti nei tre mesi invernali. Ampiezze di poco inferiori si possono osservare sia durante i mesi di marzo e aprile che nel mese di novembre. L'energia raggiunge i valori più elevati nelle zone occidentali della Sardegna e della Sicilia e a nord di Pantelleria, dove le basse frequenze indicano la prevalenza delle onde di lungo periodo che si propagano a partire dalla zona nord del bacino. La frequenza del picco di energia si sposta verso valori più alti all'inizio dell'autunno in corrispondenza con lo svilupparsi di forzanti locali. L'estate è caratterizzata da bassissimi valori di energia a frequenze significativamente più alte. Le differenze tra i diversi mesi risultano ridotte nella zona ligure dove si generano onde di vento durante la maggior parte dei mesi.
I due siti selezionati nella parte orientale della Sardegna e della Calabria, che non risentono delle onde provenienti da nord ovest, presentano ampiezze più basse in tutte le stagioni.
Anche la larghezza della distribuzione in funzione della direzione di propagazione risulta diversa nei vari siti: mentre ad esempio Pantelleria e la zona est della Calabria sono caratterizzate sostanzialmente da un unico picco, la distribuzione in direzione ad esempio ad est della Sardegna presenta due direzioni principali di propagazione che formano un angolo di circa 130°.

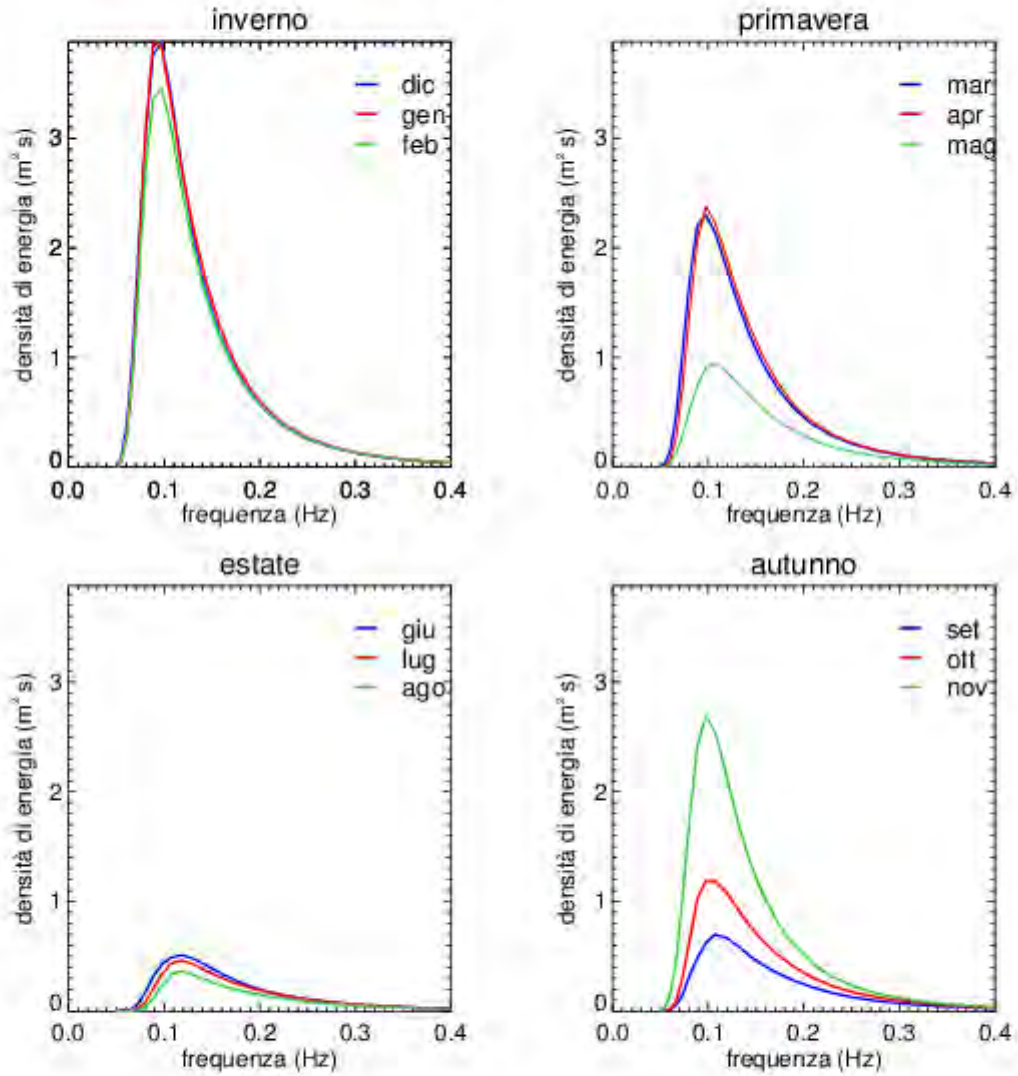


Figura 10. Spettro in funzione della frequenza calcolato per i singoli mesi nel sito 1 di figura 9 (sud-ovest Sardegna).

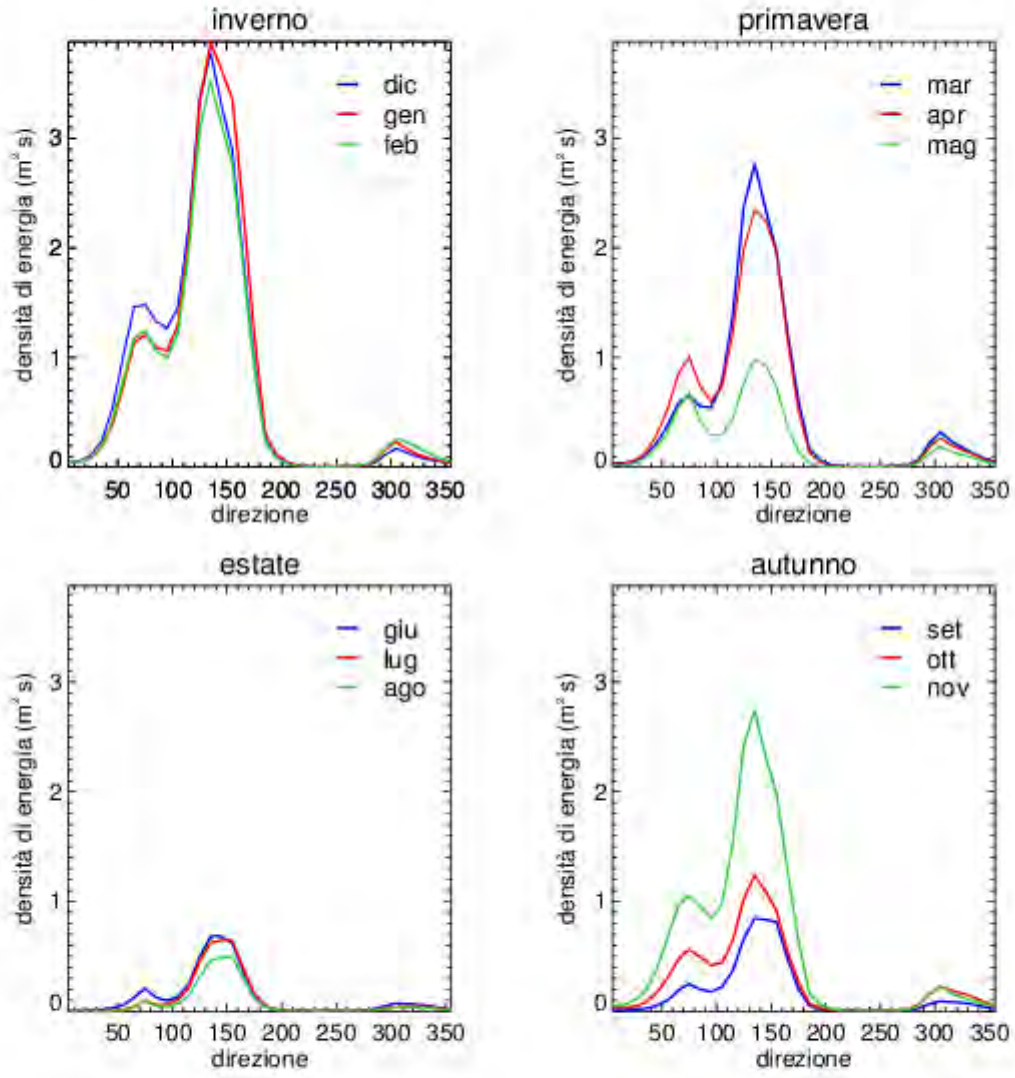


Figura 11. Spettro in funzione della direzione calcolato per i singoli mesi nel sito 1 di figura 9 (sud-ovest Sardegna).

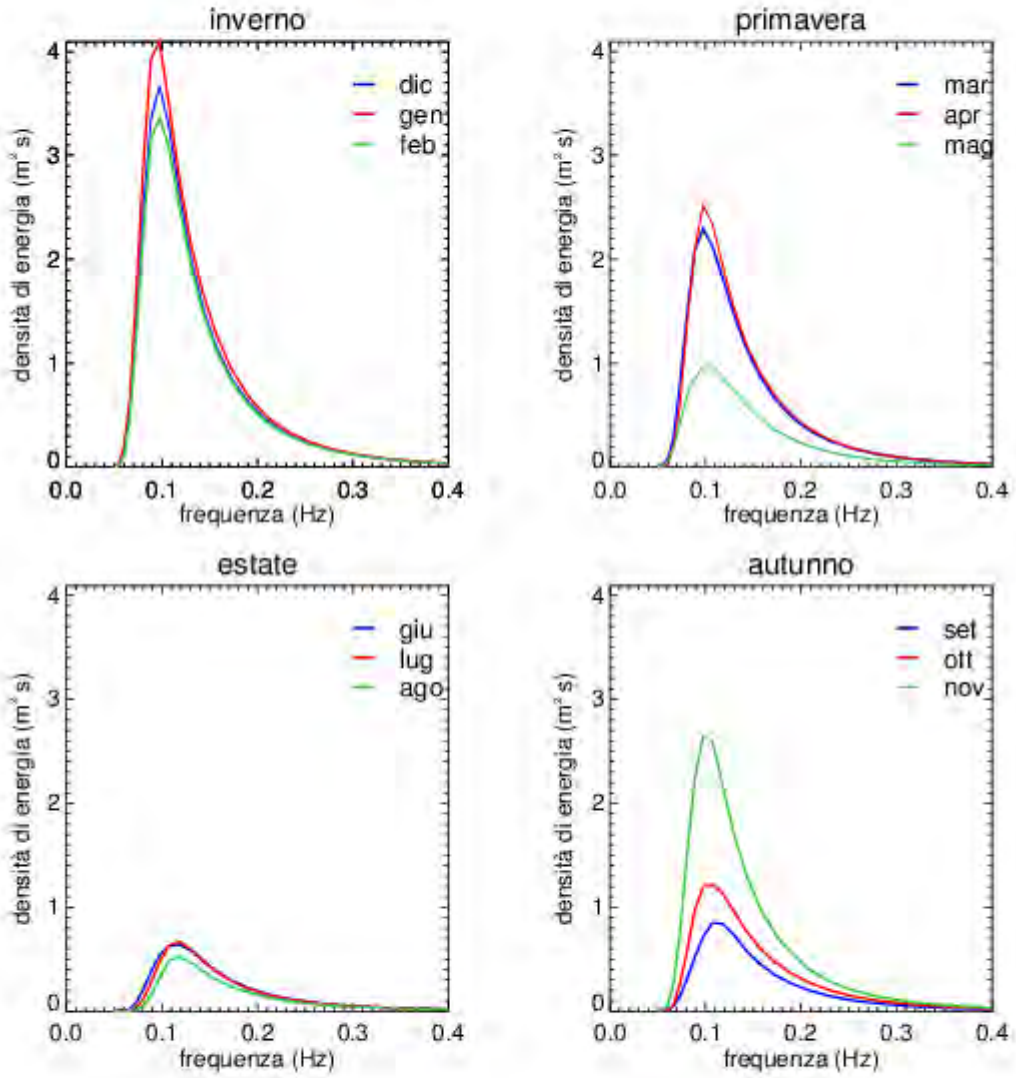


Figura 12. Spettro in funzione della frequenza calcolato per i singoli mesi nel sito 6 di figura 9 (nord-ovest Sardegna).

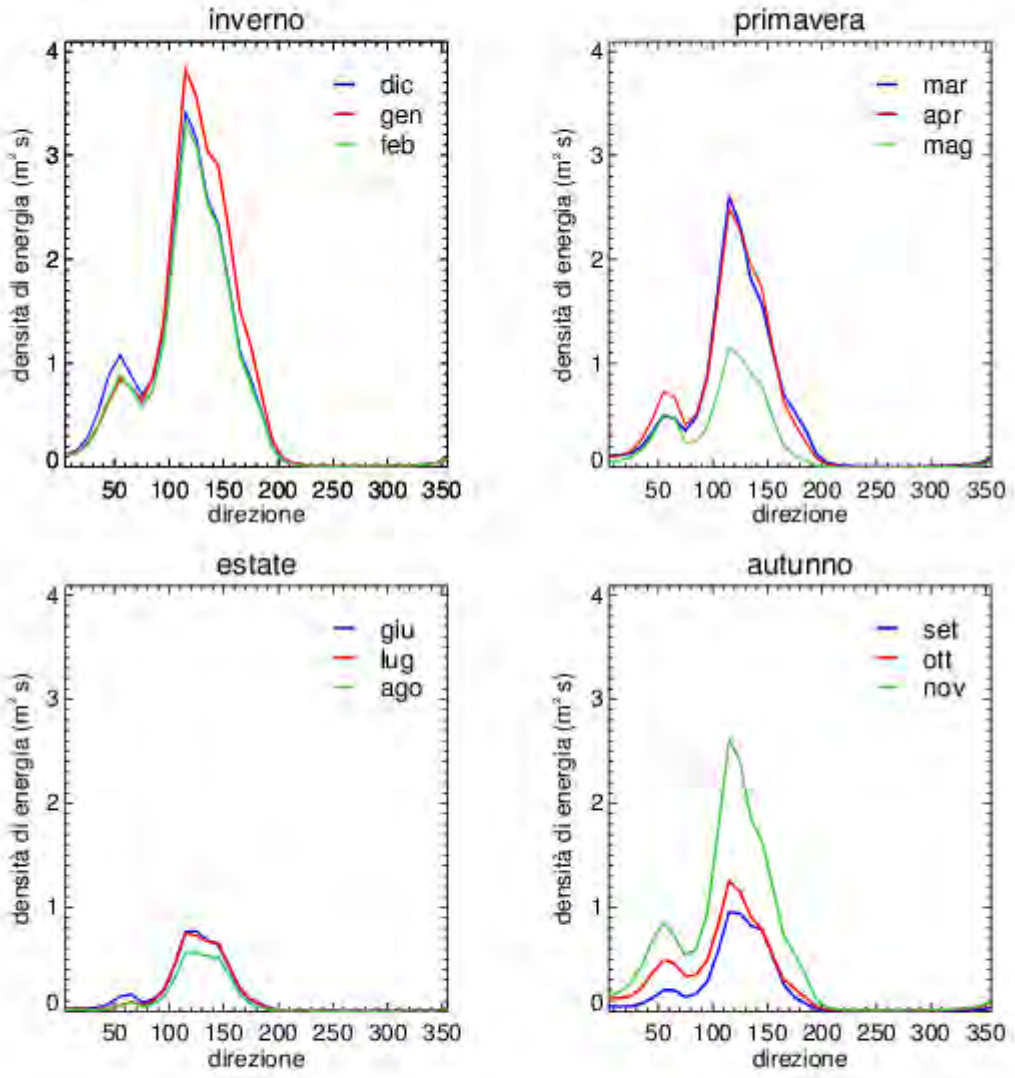


Figura 13. Spettro in funzione della direzione calcolato per i singoli mesi nel sito 6 di figura 9 (nord-ovest Sardegna).

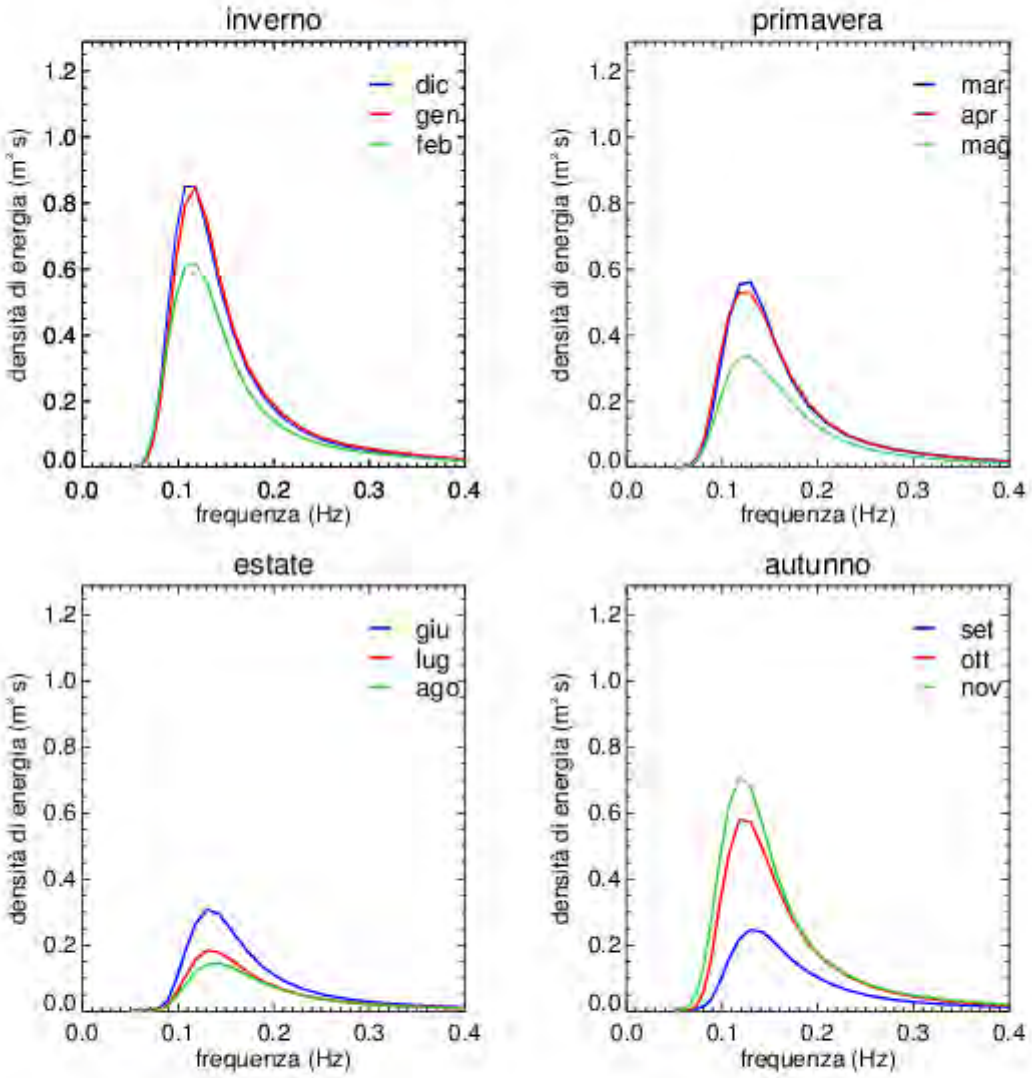


Figura 14. Spettro in funzione della frequenza calcolato per i singoli mesi nel sito 8 di figura 9 (mar ligure).

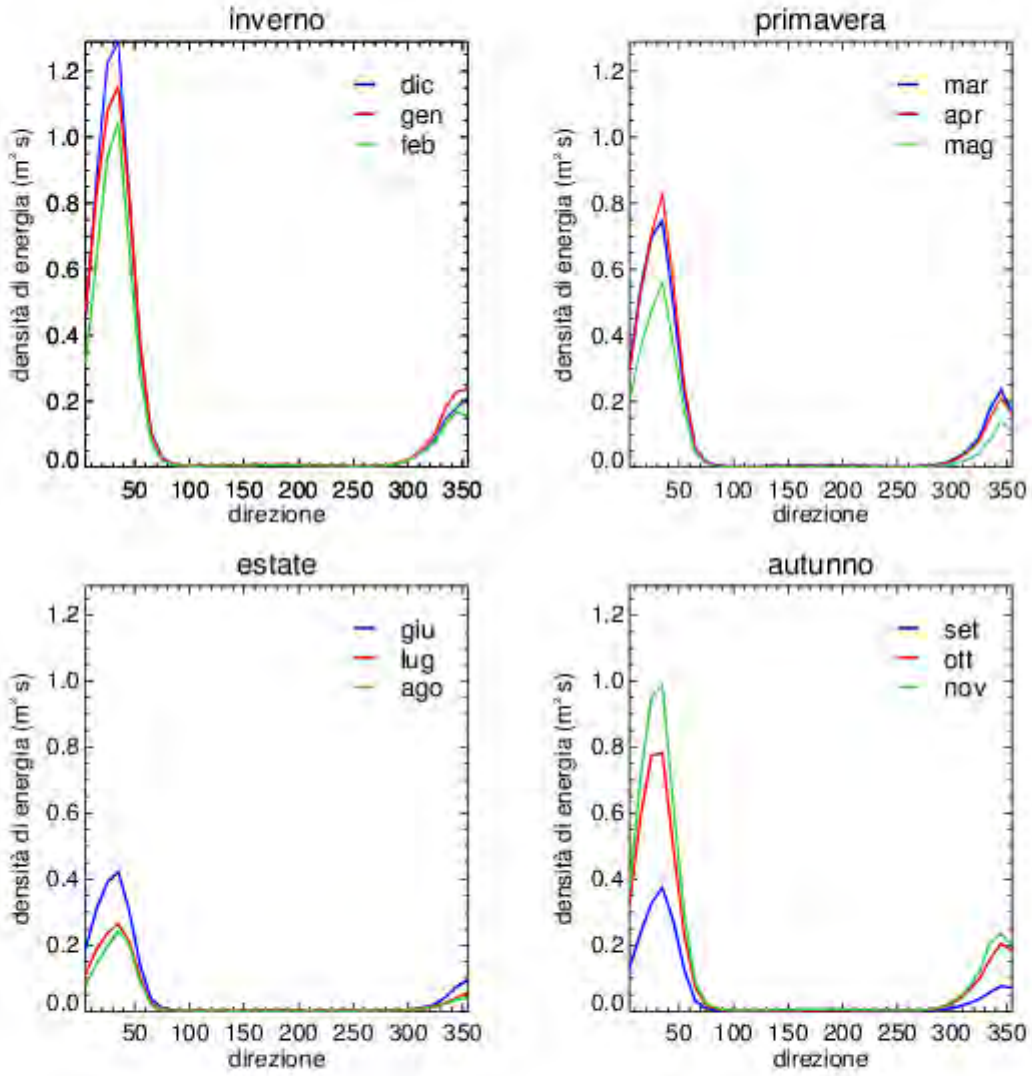


Figura 15. Spettro in funzione della direzione calcolato per i singoli mesi nel sito 8 di figura 9 (mar ligure).

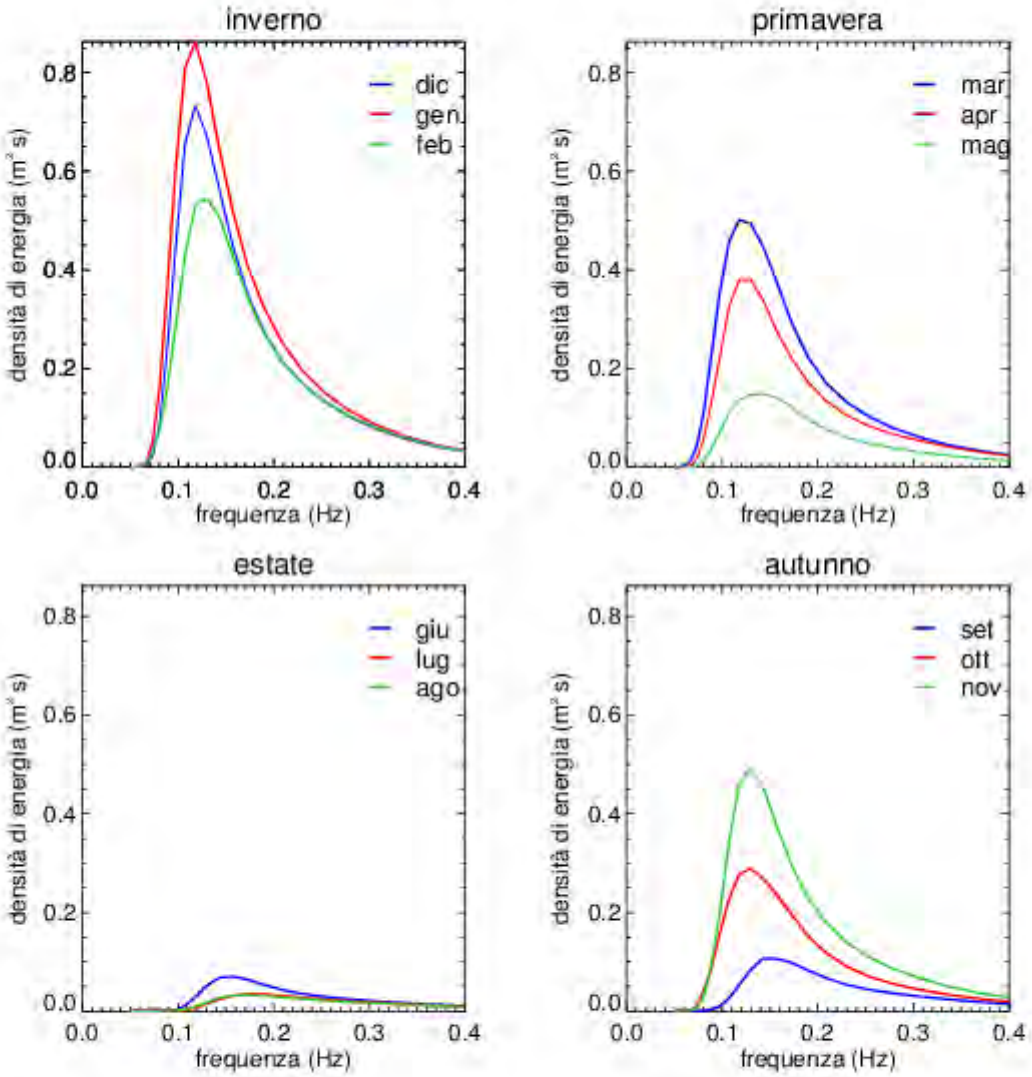


Figura 16. Spettro in funzione della frequenza calcolato per i singoli mesi nel sito 9 di figura 9 (est Sardegna).

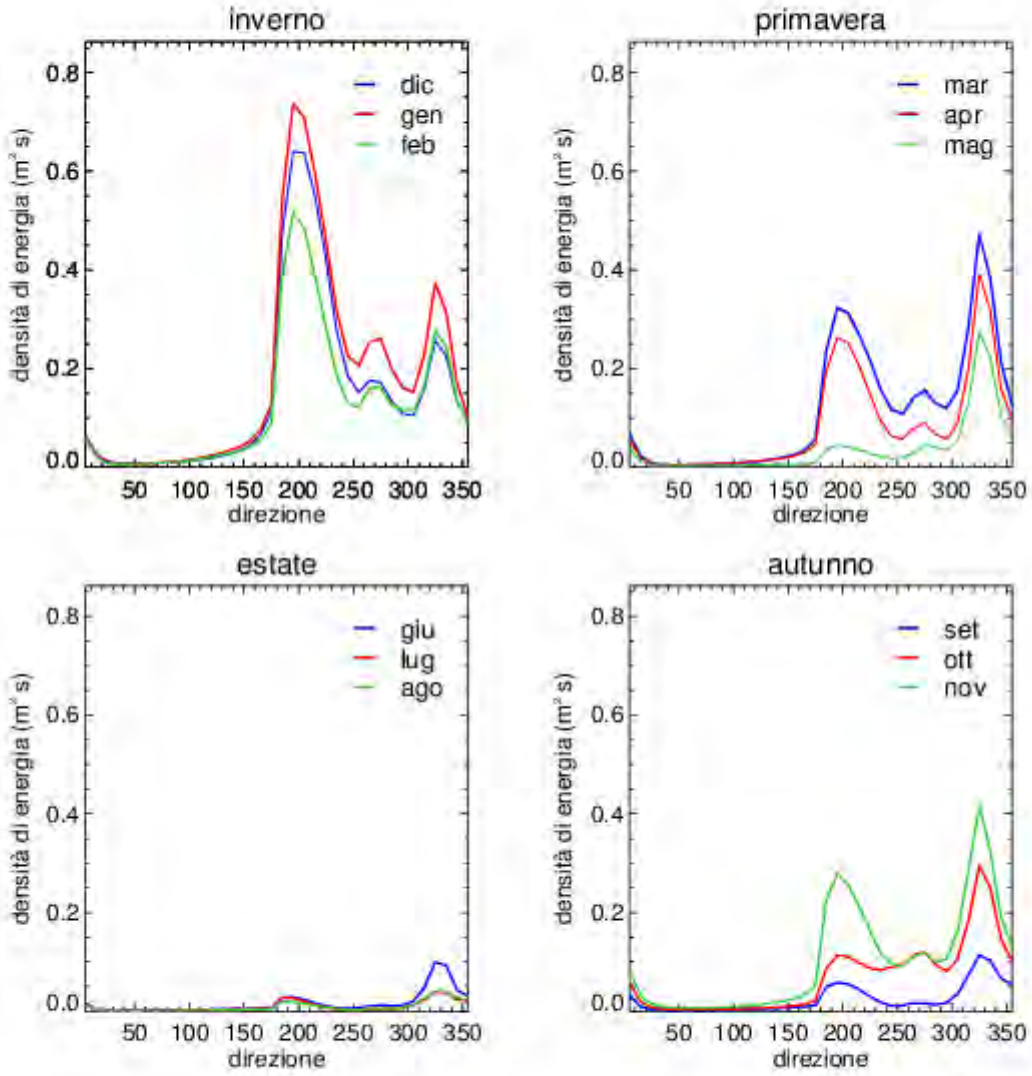


Figura 17. Spettro in funzione della direzione calcolato per i singoli mesi nel sito 9 di figura 9 (est Sardegna).

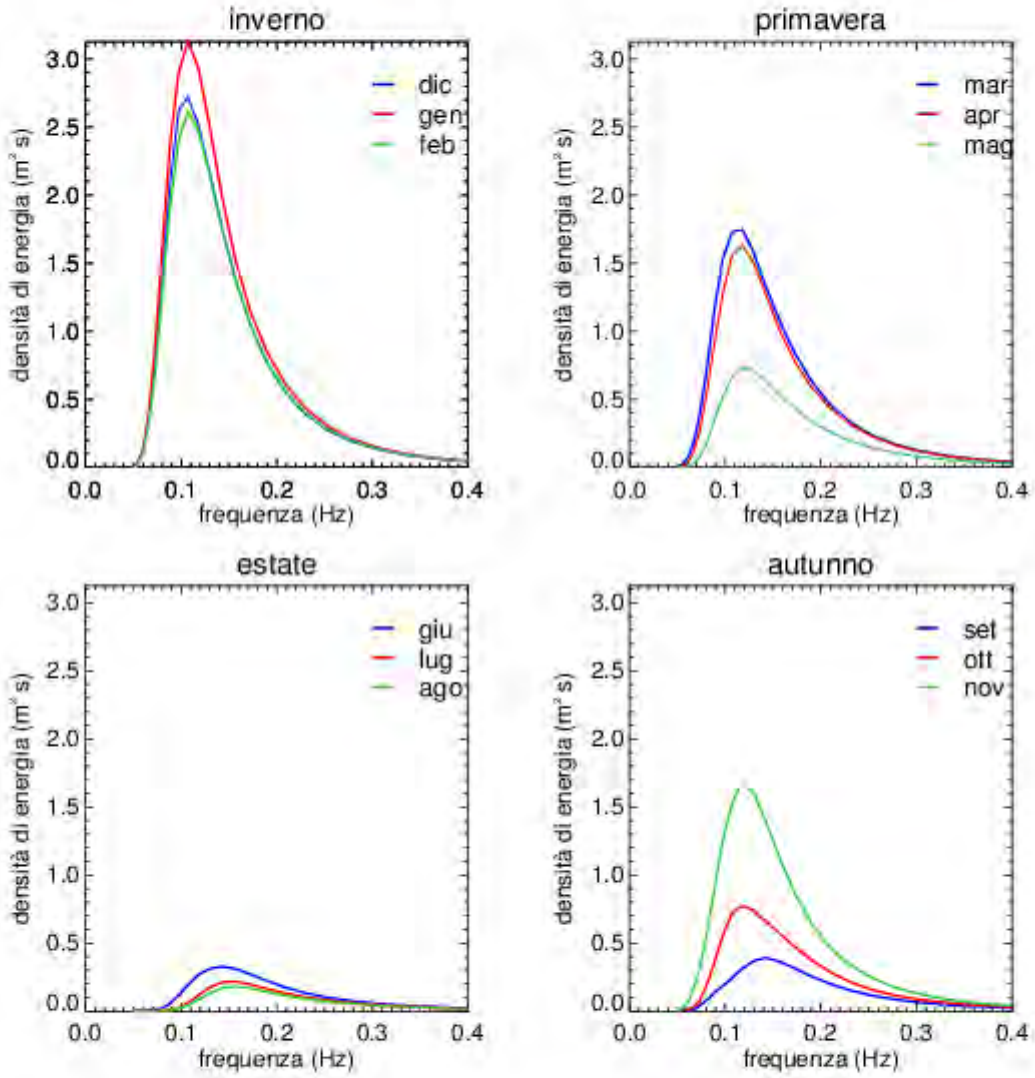


Figura 18. Spettro in funzione della frequenza calcolato per i singoli mesi nel sito 10 di figura 9 (nord-ovest Sicilia).

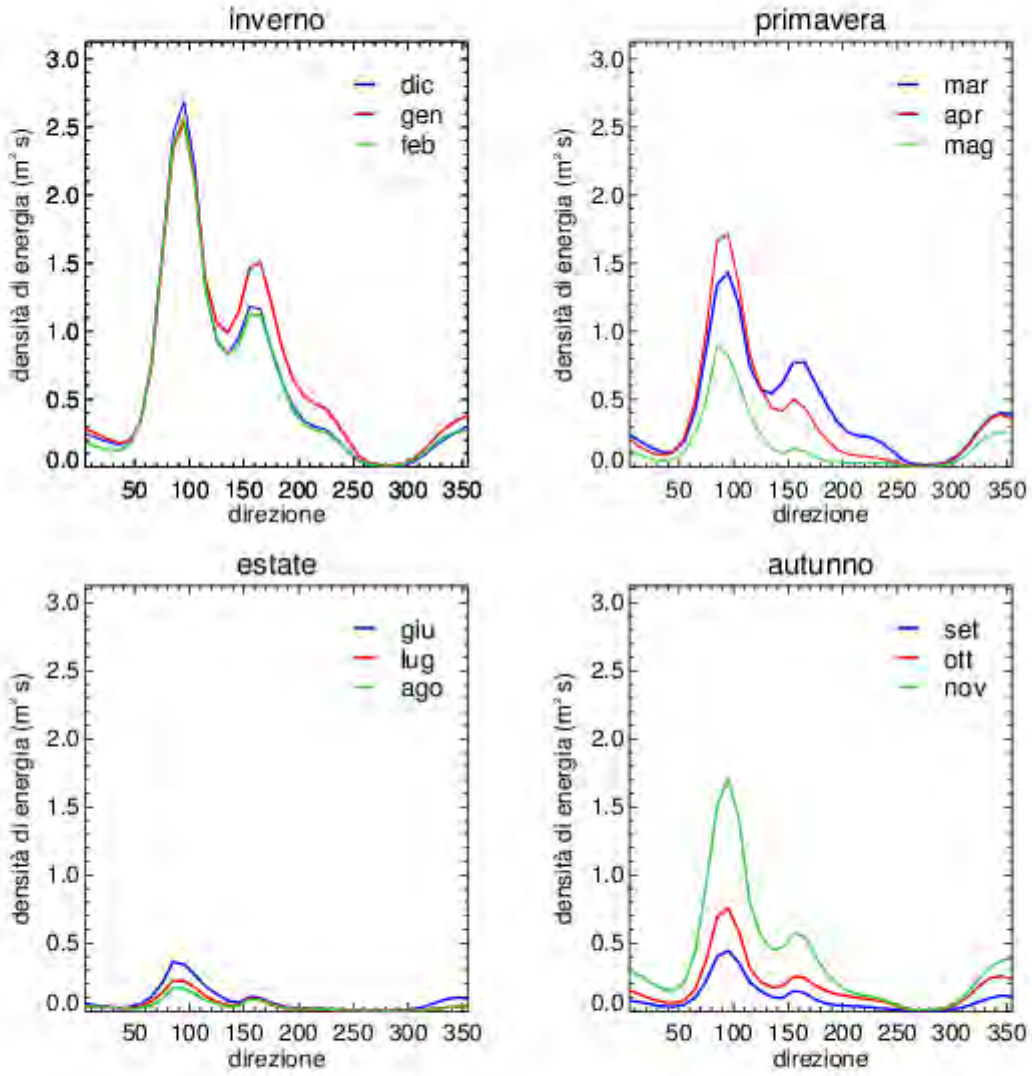


Figura 19. Spettro in funzione della direzione calcolato per i singoli mesi nel sito 10 di figura 9 (nord-ovest Sicilia).

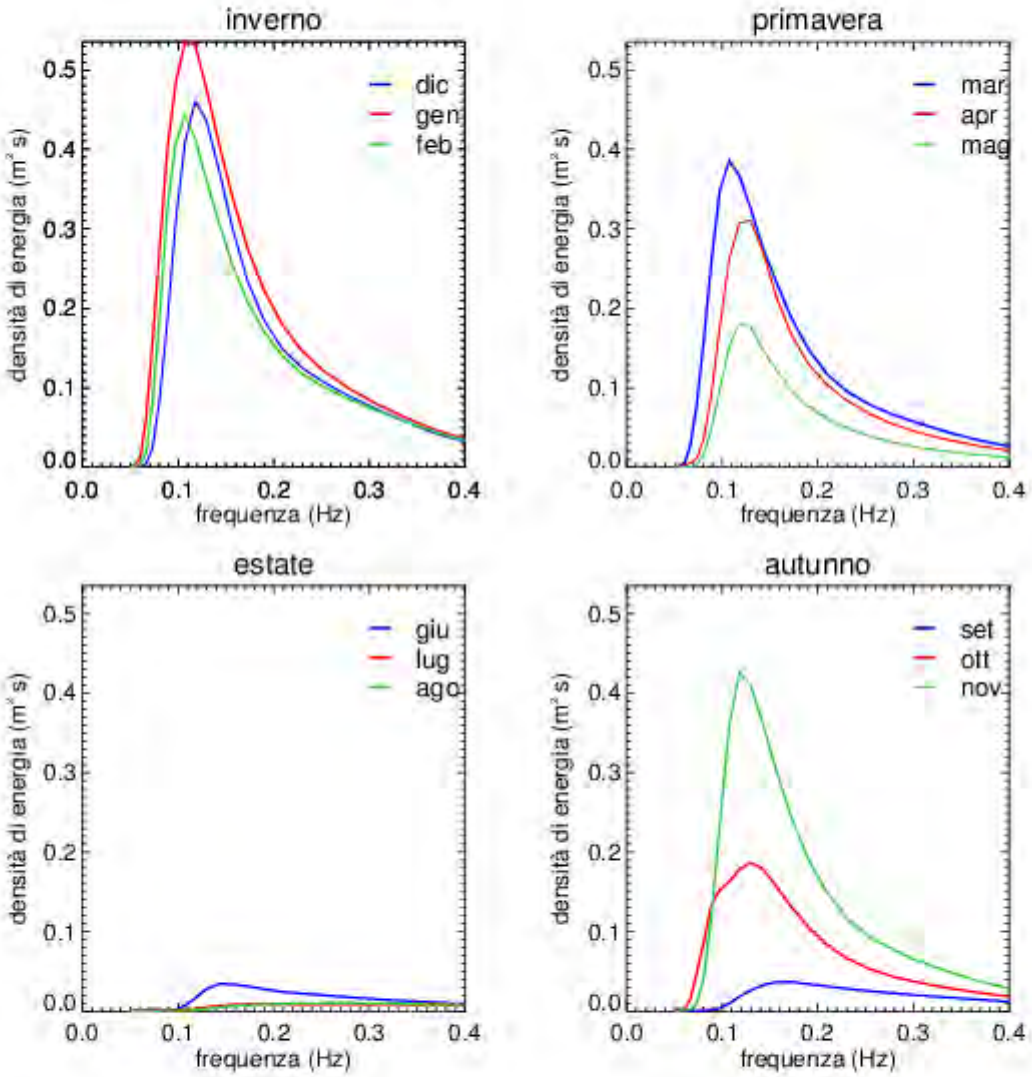


Figura 20. Spettro in funzione della frequenza calcolato per i singoli mesi nel sito 14 di figura 9 (est Calabria).

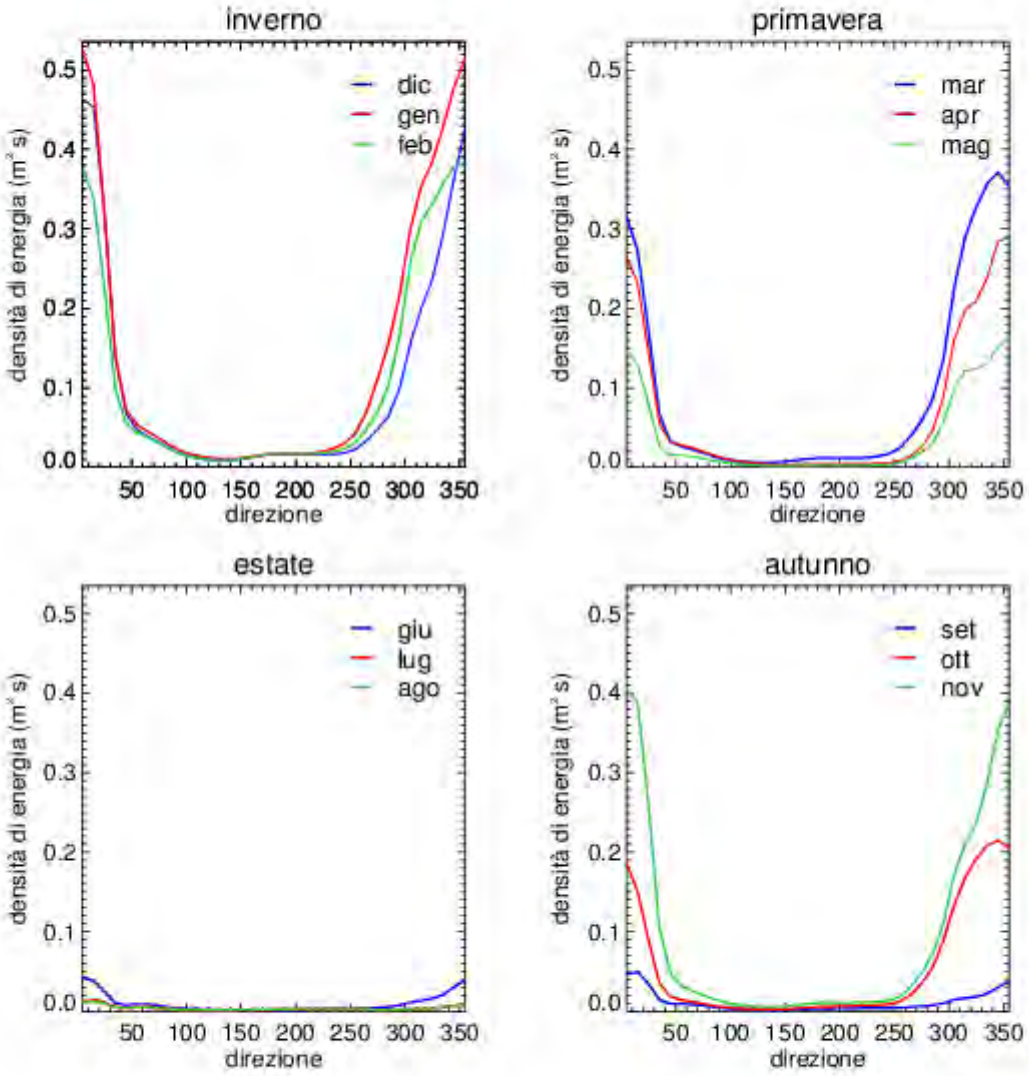


Figura 21. Spettro in funzione della direzione calcolato per i singoli mesi nel sito 14 di figura 9 (est Calabria).

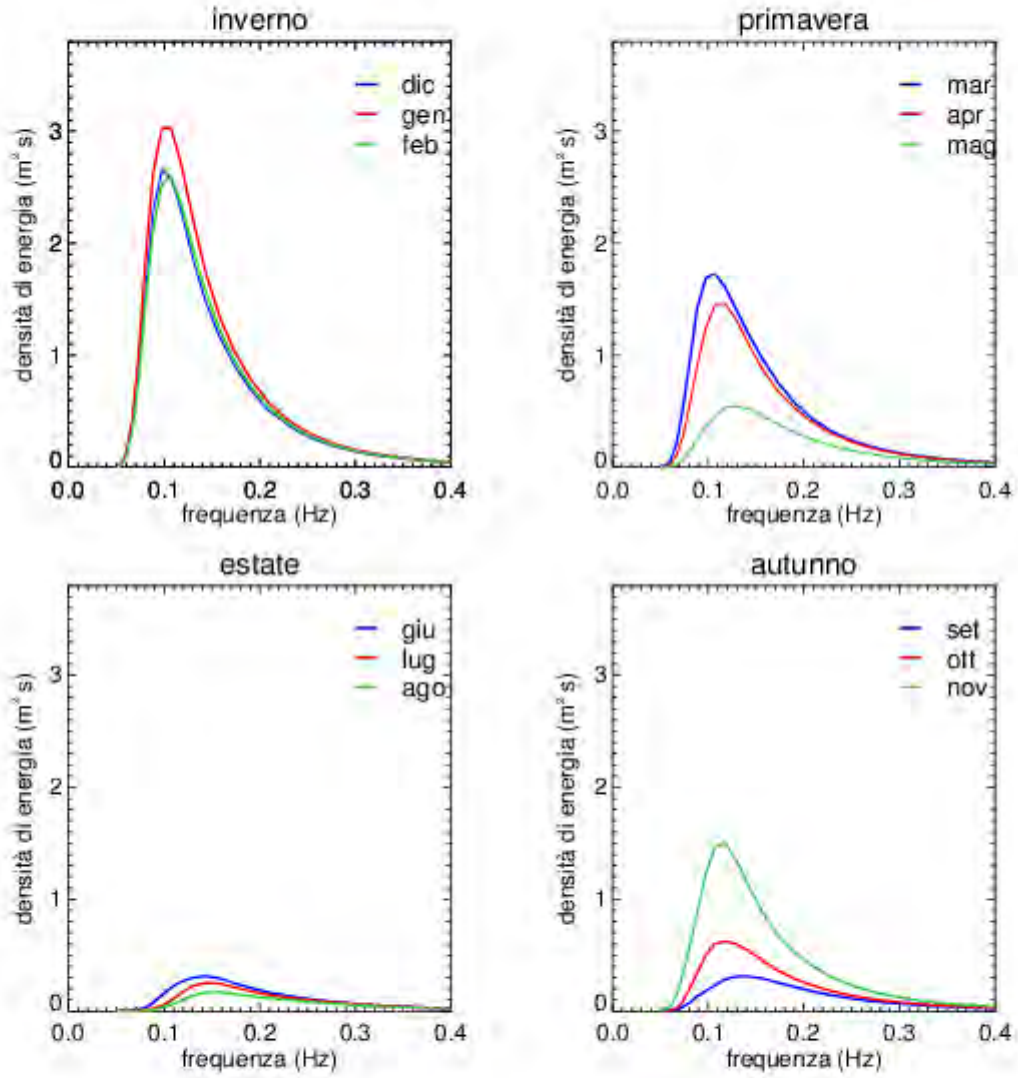


Figura 22. Spettro in funzione della frequenza calcolato per i singoli mesi nel sito 19 di figura 9 (Pantelleria).

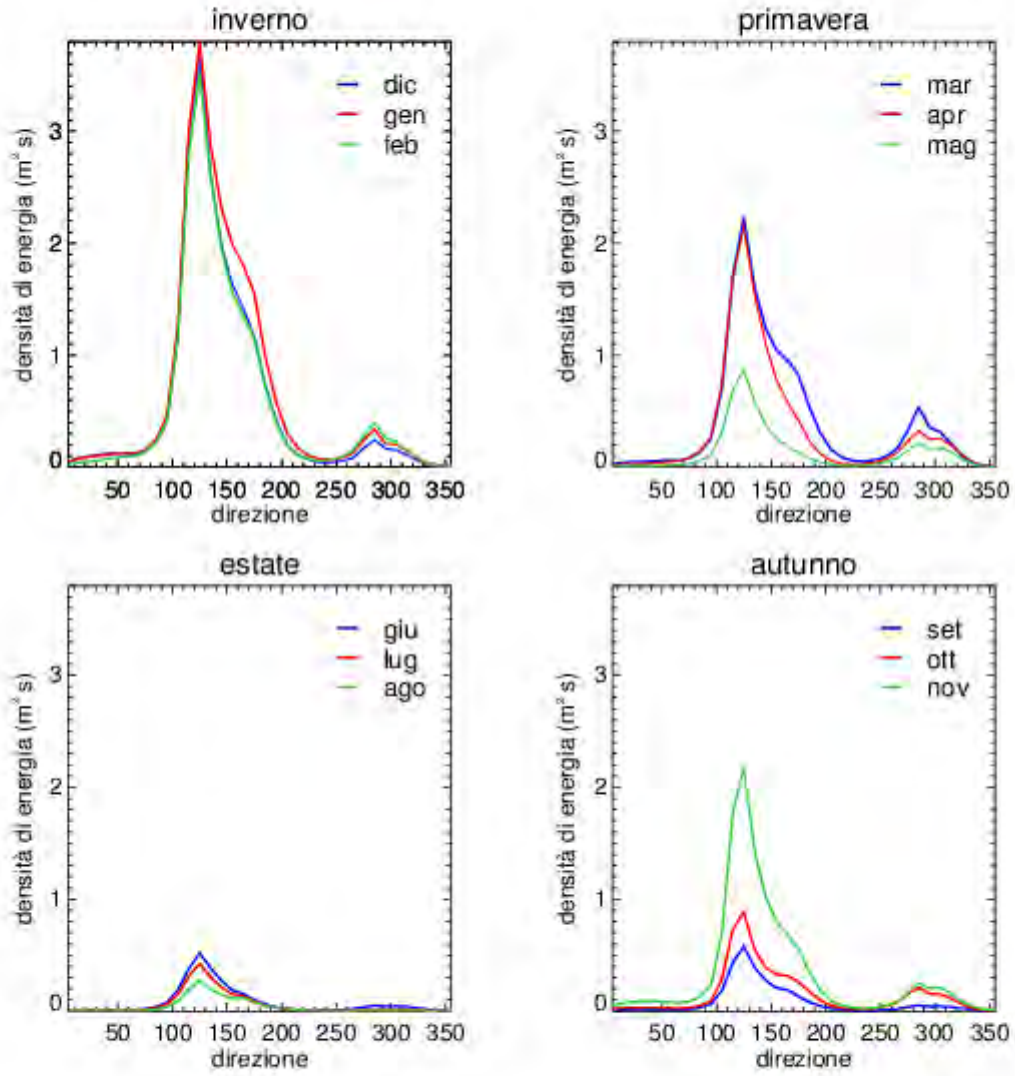


Figura 23. Spettro in funzione della direzione calcolato per i singoli mesi nel sito 19 di figura 9 (Pantelleria).

Preliminarmente all'installazione di qualsiasi tipo di convertitore di energia devono essere effettuate stime per valutare la convenienza dell'investimento. A questo proposito, nel caso dei convertitori di energia ondosa, sono fondamentali le climatologie dello stato del mare eseguite su un arco di tempo sufficientemente elevato, dell'ordine delle decine di anni. La possibilità di disporre dell'intero spettro bidimensionale di densità di energia delle onde risulta fondamentale se si vuole effettuare una stima realistica dell'energia annua prodotta dal singolo convertitore. Il calcolo dell'energia effettuato solamente sulla base della climatologia rappresenta il valore dell'energia disponibile ed indica quindi il massimo raggiungibile, senza tenere conto delle caratteristiche nella risposta al moto ondoso del convertitore.

La grandezza di maggiore interesse in campo energetico è rappresentata dalla produzione annuale di elettricità (AP) che indica, in questo caso, il valore realmente prodotto dallo specifico convertitore in un arco di tempo tipicamente di un anno ed è espressa in MWh/m/anno. Questa grandezza deve essere valutata a partire dalla potenza nominale installata (IC).

Seguendo la metodologia illustrata da [5], un primo elemento da tenere presente è la soglia minima di funzionamento sotto la quale il dispositivo non è in grado di attivarsi. Allo stesso modo si deve considerare una soglia superiore oltre la quale il dispositivo deve essere disattivato al fine di impedire danni all'apparato.
I dati degli spettri bidimensionali di alcune delle postazioni selezionate sono stati utilizzati per effettuare una prima stima della produzione di energia annua tendo conto delle soglie di funzionamento. Per quanto riguarda i limiti inferiore e superiore di funzionamento, per ogni valore di potenza installata (IC) possiamo fare l'ipotesi che il sistema sia in grado di attivarsi per valori di energia maggiori di una certa percentuale del valore nominale e possa funzionare fino al superamento dello stessa percentuale del valore nominale.
Nelle figure dalla 24 alla 28 sono stati riportati gli andamenti della produttività annua in funzione della potenza installata, considerando tre diversi livelli pari rispettivamente al 10%, 20% e 30%, per i siti con valori più elevati di energia. Si può notare l'andamento molto simile nei quattro siti interessati dai venti provenienti dal quadrante nord-occidentale (siti 1, 6, 10, 19), con un valore della produttività che aumenta al crescere della potenza installata. In entrambi i siti lungo la costa occidentale della Sardegna la produttività massima, raggiunta ipotizzando il livello del 10% di soglia, è pari a circa 60 MWh/anno e viene raggiunta in corrispondenza di 150 kW/m installati. Aumentando la soglia al 20% e al 30% il massimo viene raggiunto già a partire da circa 100 kW/m e non supera rispettivamente circa 47 e 40 MWh/anno. La riduzione della produttività all'aumentare della soglia scelta indica il peso che le condizioni di bassa energia hanno sul totale annuo, che non viene bilanciato dai rari valori di intensità elevata. Il sito posto nel mar ligure presenta un andamento decrescente della produttività già in corrispondenza di un valore di circa 30 kW/m.
Gli esempi mostrati illustrano chiaramente la necessità di questo tipo di analisi allo scopo di effettuare una stima preliminare di fattibilità per l'installazione di convertitori di energia e per la scelta delle dimensioni idonee alle condizioni locali che permettano di ottenere il massimo rendimento rispetto all'investimento effettuato.

L'energia che può essere realmente prodotta da un dispositivo non è però solo limitata dalle soglie di funzionamento inferiore e superiore. I convertitori di energia da moto ondoso sono di diverse tipologie, in generale la loro capacità di produrre energia è vincolata al verificarsi di alcune condizioni in termini di frequenza dell'onda incidente e di direzione di provenienza. Allo scopo di effettuare una valutazione della reale produttività dei siti analizzati, sono quindi stati realizzati diversi scenari che tengono conto di questi limiti.

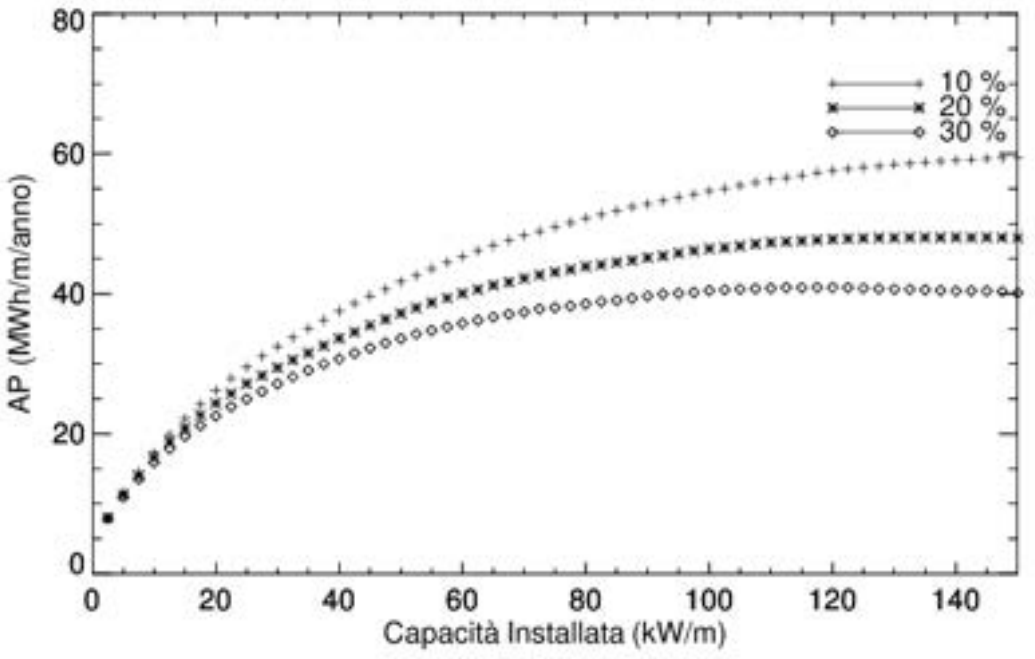


Figura 24. Produzione annua in funzione della capacità installata. Sono riportate le curve relative ad un valore minimo di attivazione pari al 10%, 20% e 30% della capacità nominale e corrispondente soglia superiore di funzionamento della stessa percentuale, sito 1 di figura 9 (sud-ovest Sardegna).

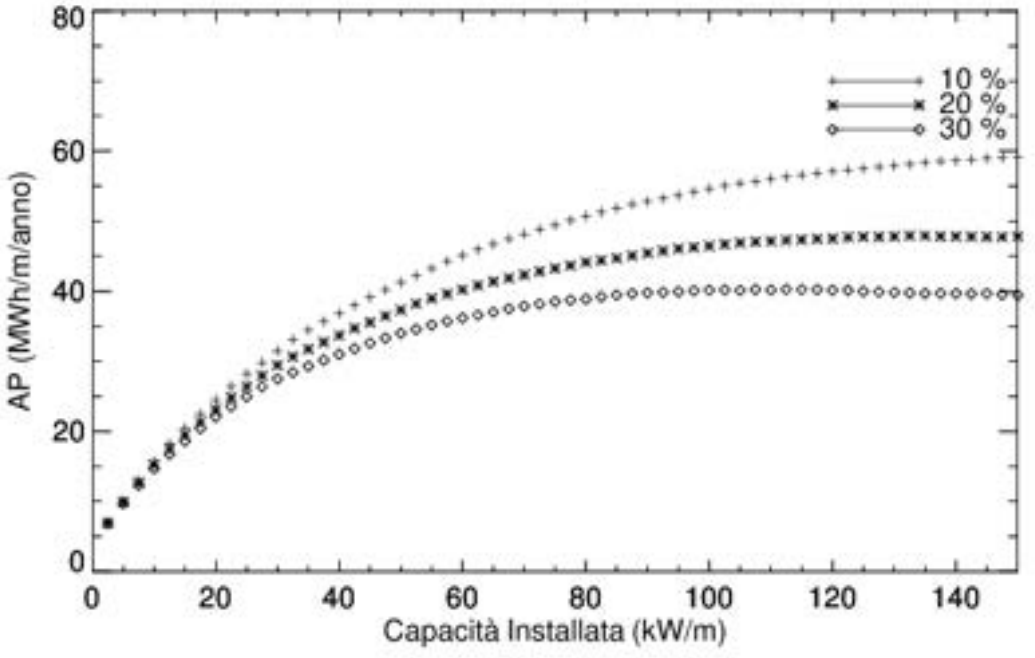


Figura 25. Produzione annua in funzione della capacità installata. Sono riportate le curve relative ad un valore minimo di attivazione pari al 10%, 20% e 30% della capacità nominale e corrispondente soglia superiore di funzionamento della stessa percentuale, sito 6 di figura 9 (nord-ovest Sardegna).

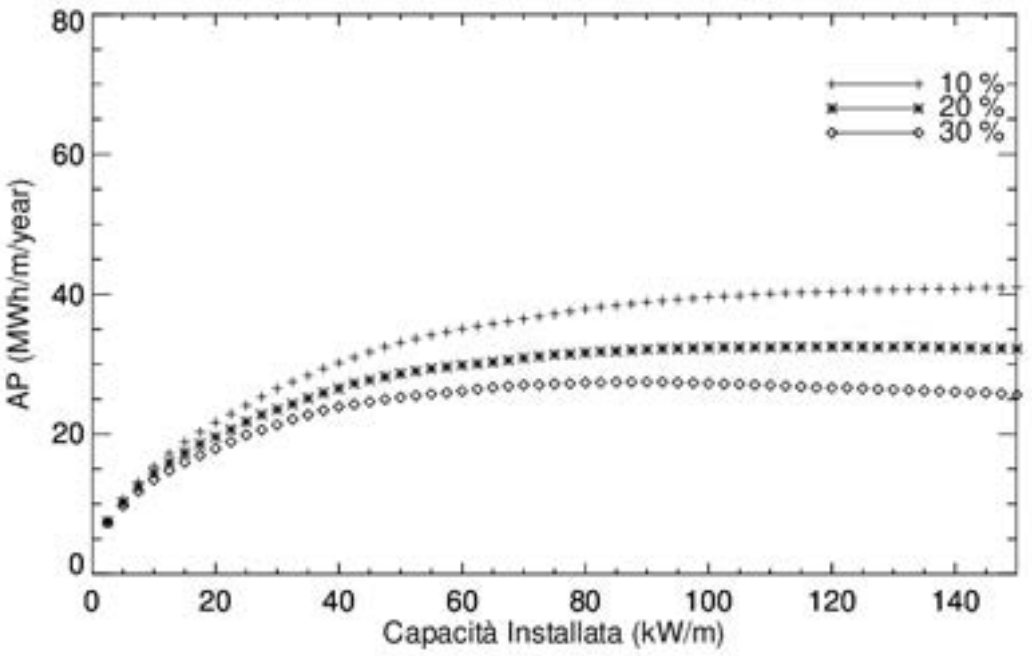


Figura 26. Produzione annua in funzione della capacità installata. Sono riportate le curve relative ad un valore minimo di attivazione pari al 10%, 20% e 30% della capacità nominale e corrispondente soglia superiore di funzionamento della stessa percentuale, sito 19 di figura 9 (Pantelleria).

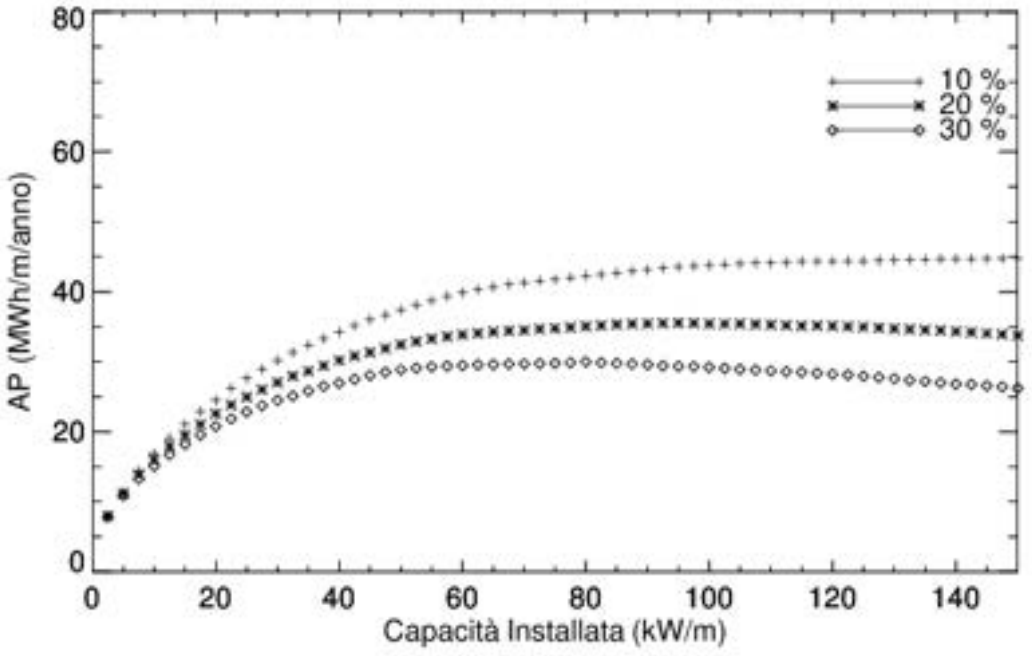


Figura 27. Produzione annua in funzione della capacità installata. Sono riportate le curve relative ad un valore minimo di attivazione pari al 10%, 20% e 30% della capacità nominale e corrispondente soglia superiore di funzionamento della stessa percentuale, sito 10 di figura 9 (ovest Sicilia).

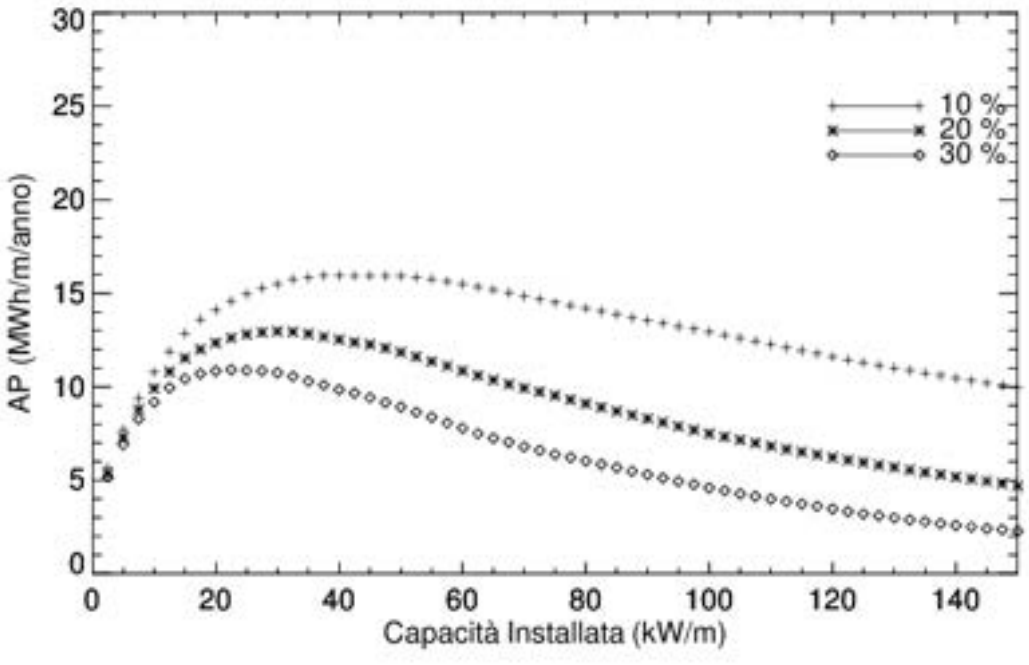


Figura 28. Produzione annua in funzione della capacità installata. Sono riportate le curve relative ad un valore minimo di attivazione pari al 10%, 20% e 30% della capacità nominale e corrispondente soglia superiore di funzionamento della stessa percentuale, sito 8 di figura 9 (mar ligure).

Per ognuna delle tre percentuali di funzionamento già descritte, sono stati previsti tre diversi scenari di funzionamento. Tutti gli scenari prevedono la selezione di frequenze di funzionamento all'interno dell'intervallo tra 0.05 Hz e 0.15 Hz. In generale il funzionamento dei convertitori avviene all'interno di un angolo di propagazione delle onde, esistono però convertitori di tipo puntuale in grado di allinearsi in modo da sfruttare l'energia proveniente da qualsiasi direzione.
Sono state quindi considerate le tre possibilità:

1) Nessun limite nelle direzioni
2) Un intervallo di funzionamento all'interno di un intervallo angolare di 60° centrato lungo la direzione di massima energia ricavata dagli spettri
3) Un intervallo di funzionamento all'interno di un intervallo angolare di 30° centrato lungo la direzione di massima energia ricavata dagli spettri

Nella tabella 6 sono riportati gli angoli di propagazione che sono stati utilizzati come valori centrali per l'intervallo di direzioni nel calcolo delle successive figure di produttività (dalla 29 alla 34). Questi valori sono stati ricavati dai massimi dagli spettri in funzione della direzione mostrati nelle figure precedenti.

Tabella 6 – Angolo di propagazione, calcolato da Nord, utilizzato per il calcolo della produttività annua.

Numero sito	Angolo centrale di propagazione
1	140.
6	120.
8	40.
9	200.
10	90.
19	120.

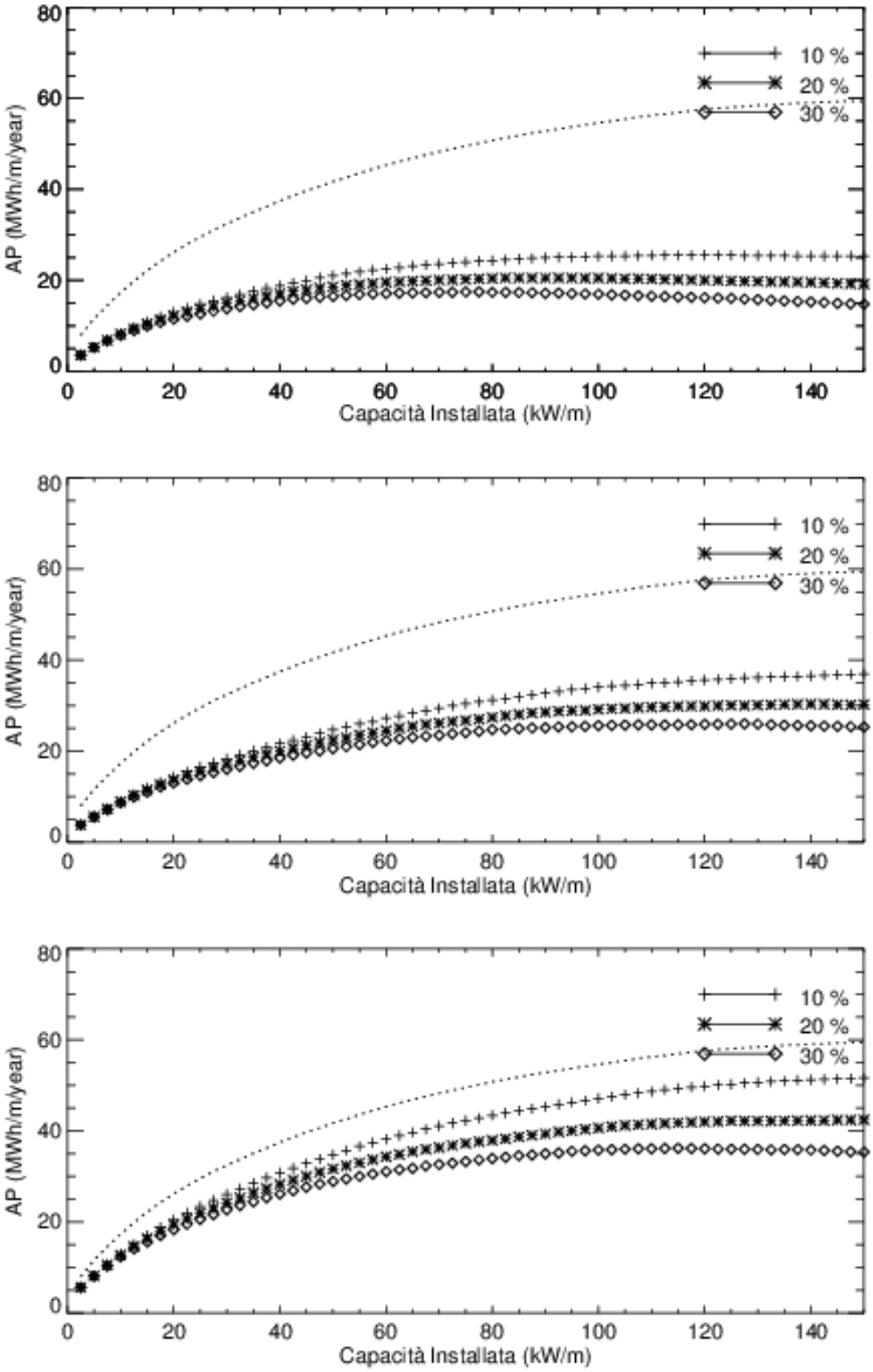


Figura 29. Produzione annua in funzione della capacità installata. Sono riportate le curve relative ad un valore minimo di attivazione pari al 10%, 20% e 30% della capacità nominale e corrispondente soglia superiore di funzionamento della stessa percentuale, Dal basso all'alto i casi corrispondenti agli scenari da 1 a 3. Per riferimento è riportata la curva relativa alla soglia del 10% calcolata senza altre limitazioni. Sito 1 di figura 9 (sud-ovest Sardegna).

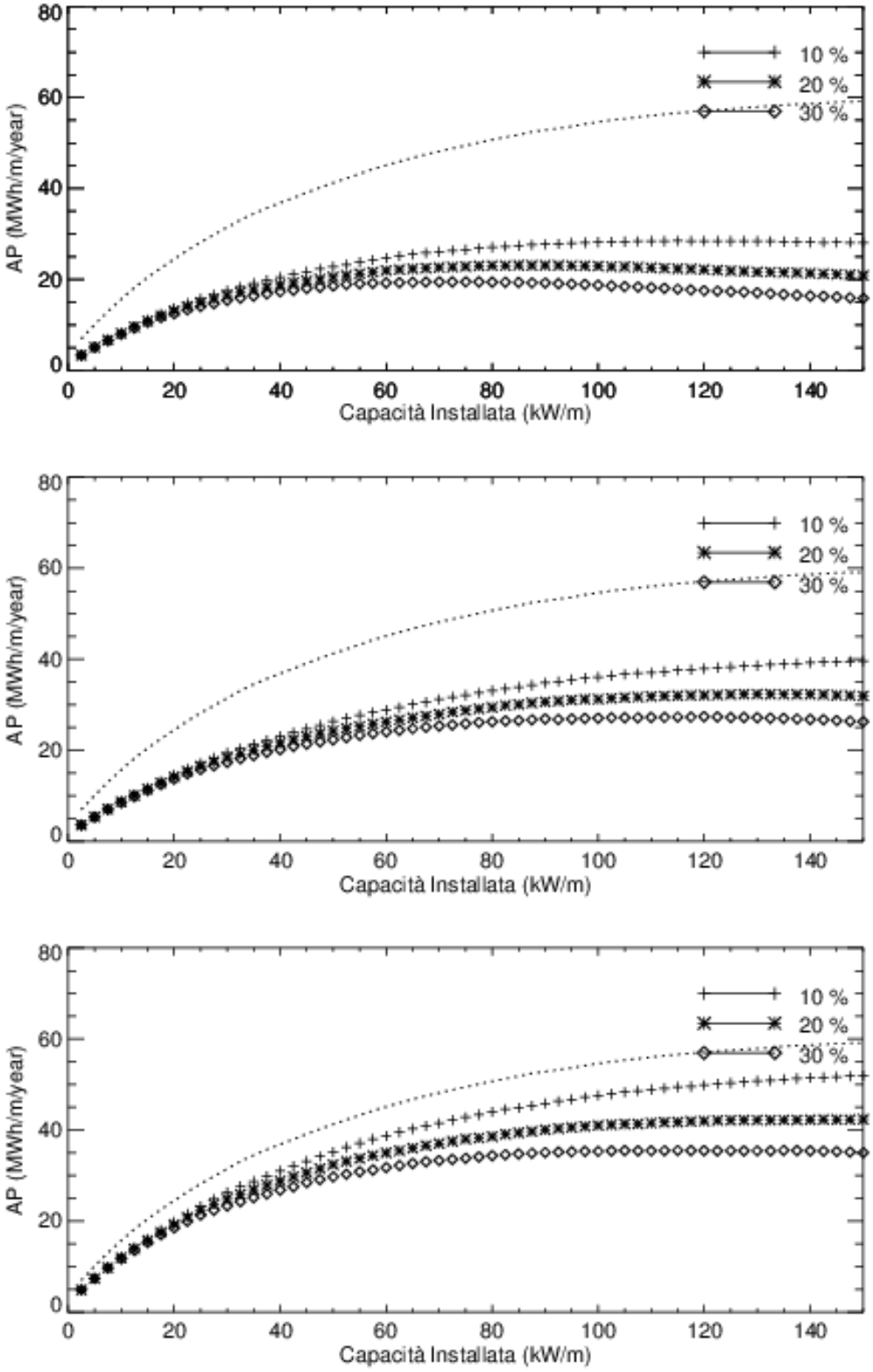


Figura 30. Come figura 29 per il sito 6 di figura 9 (nord-ovest Sardegna).

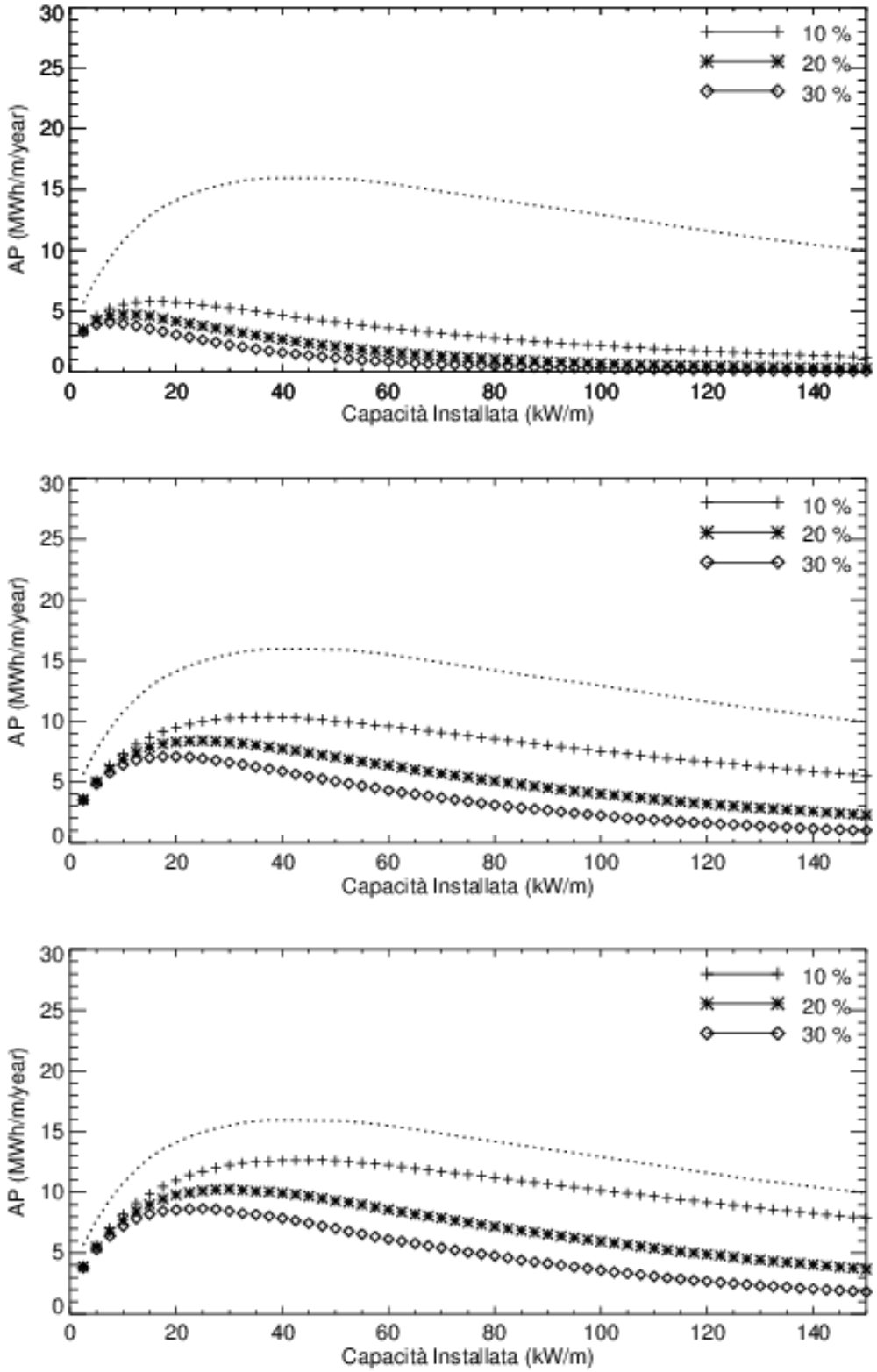


Figura 31. Come figura 29 per il sito 8 di figura 9 (mar ligure).

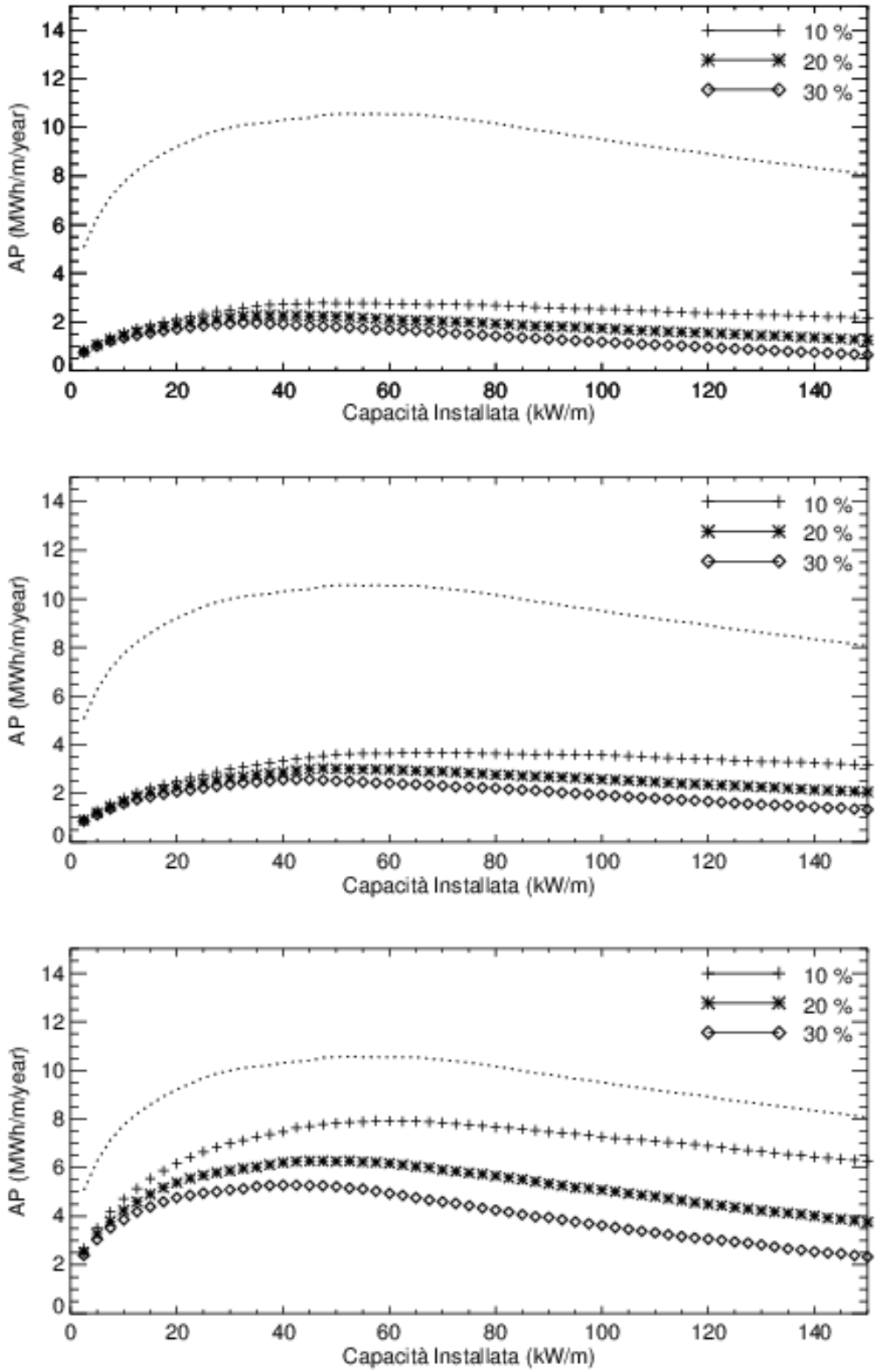


Figura 32. Come figura 29 per il sito 9 di figura 9 (est Sardegna).

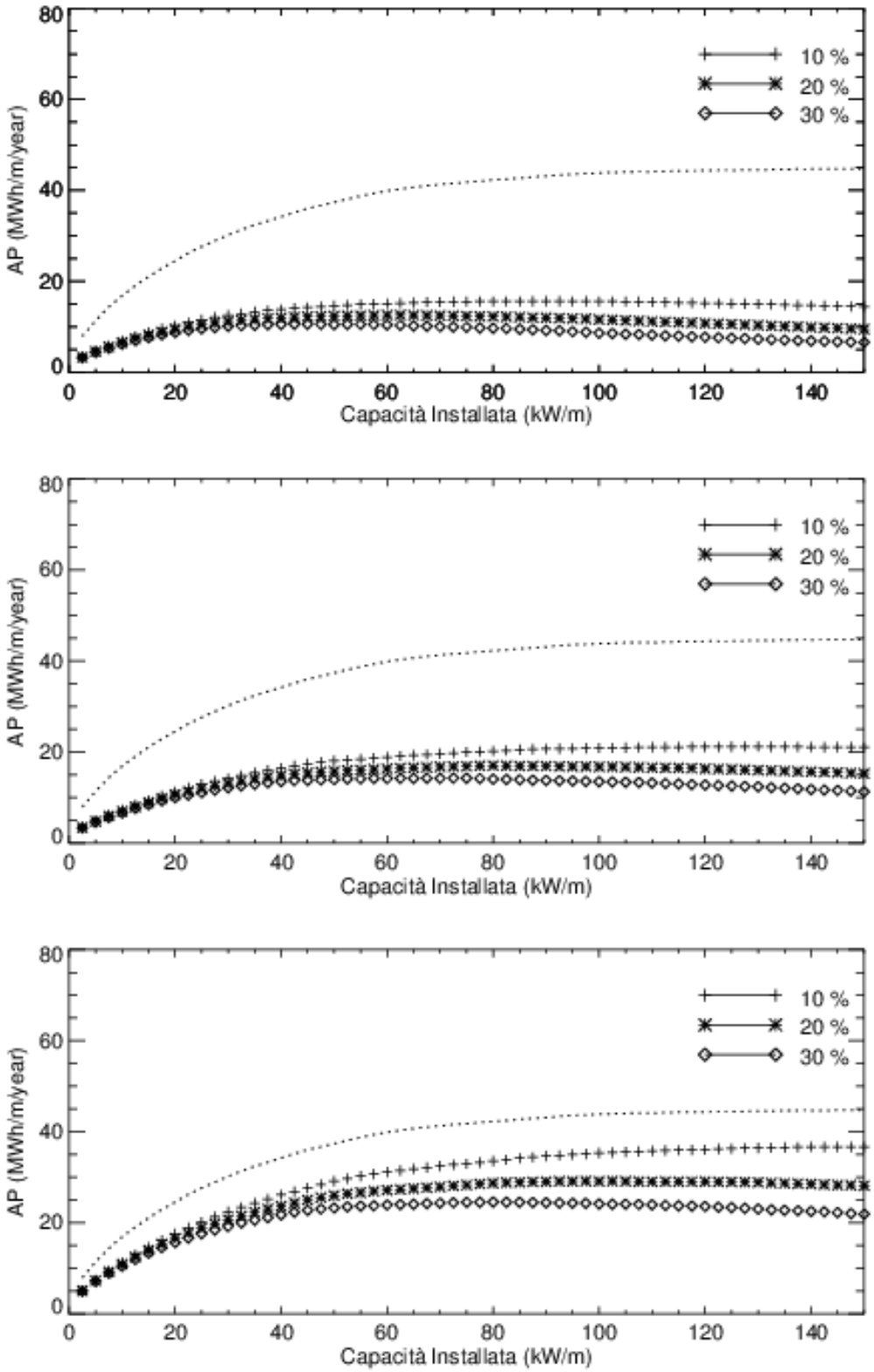


Figura 33. Come figura 29 per il sito 10 di figura 9 (nord-ovest Sicilia).

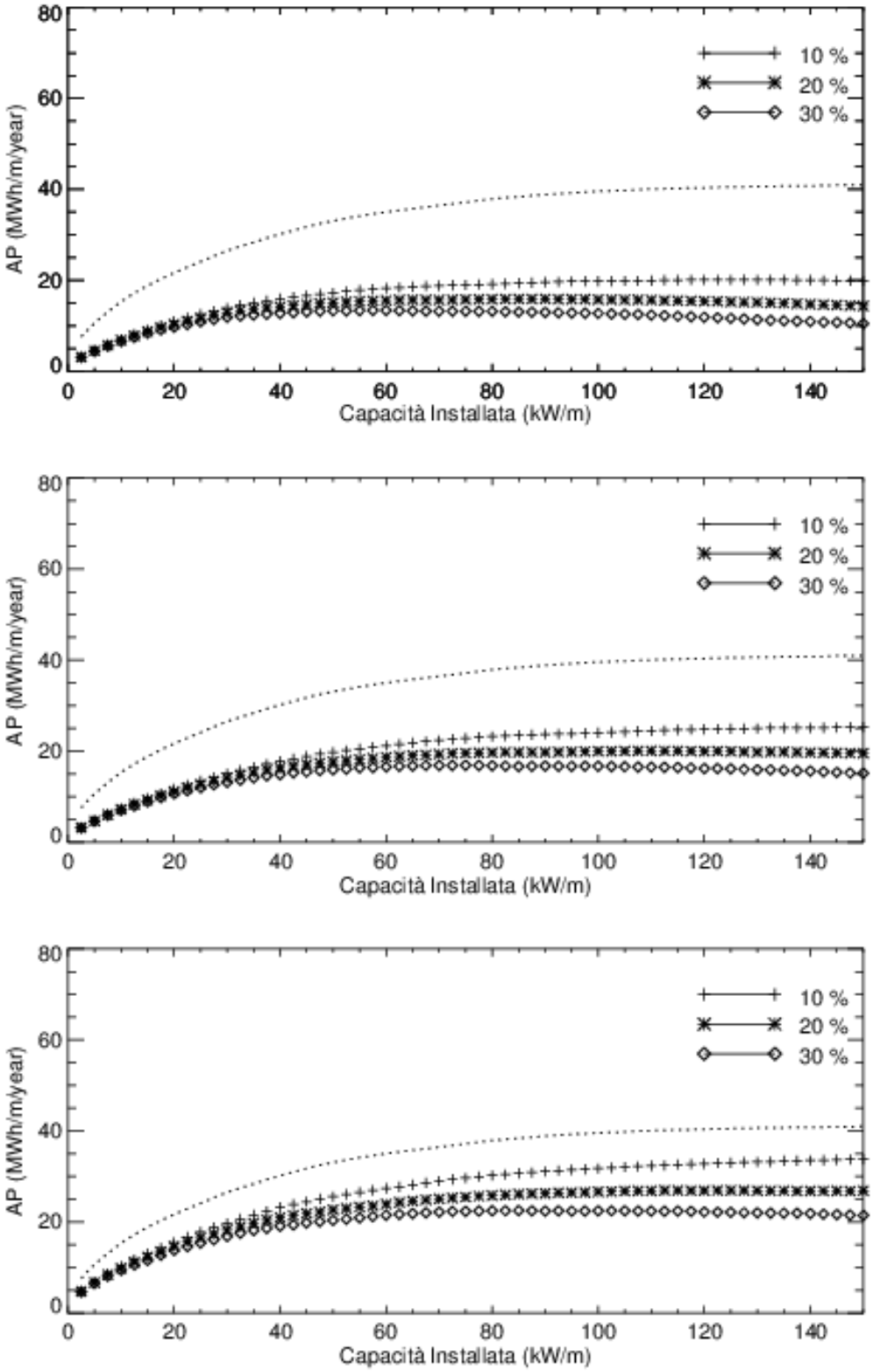


Figura 34. Come figura 29 per il sito 19 di figura 9 (Pantelleria).

Per ciascun tempo dell'intera simulazione è stata calcolata l'energia all'interno dell'intervallo delle frequenze e direzioni selezionate. La produttività annua è stata quindi calcolata dalla media sui 25 anni della climatologia. Le figure dalla 29 alla 34 mostrano la produttività annua in funzione della capacità installata considerando i tre scenari descritti, per riferimento in ciascuna delle figure è riportato anche l'andamento ottenuto considerando la soglia di funzionamento inferiore e superiore pari al 10% senza imporre altre restrizioni.
Mentre la sola limitazione in frequenza determina un calo limitato della produttività, la selezione di un differente angolo di funzionamento ne determina un abbassamento più evidente, con marcate differenze tra i siti.

Considerare solo valori all'interno di un angolo di 30° riduce la produttività quasi ad un terzo di quella ottenuta considerando solo la soglia del 10%, nel caso dei due siti sulla costa occidentale della Sardegna. Con le stesse condizioni, nel caso di Pantelleria, sito caratterizzato da una più evidente direzionalità dell'energia, si ottiene invece solo una riduzione del cinquanta per cento. La situazione opposta si verifica nel sito nel mar ligure, dove sono presenti nello spettro direzionale due picchi con intensità relativa diversa nelle diverse stagioni; in questo caso la curva di produttività si abbassa significativamente ed il massimo si sposta in corrispondenza di valori di capacità installata dell'ordine di 10-15 kW/m.

2.4 Partizione degli spettri bidimensionali

In questo paragrafo si vuole accennare ad un'altra analisi che può essere effettuata utilizzando gli spettri bidimensionali di energia e verrà eventualmente prodotta in una fase successiva del lavoro.

La condizione del mare in un dato istante di tempo è composta dalla somma di onde con caratteristiche di ampiezza, frequenza e direzione di propagazione, diverse. Gli spettri bidimensionali dell'energia, rappresentando quindi la somma delle diverse componenti, sia generate da venti locali che relative a onde provenienti da lontano, possono presentare più di un picco. Per separare le varie componenti è stata sviluppata una tecnica, detta del *partizionamento* [6], che viene principalmente utilizzata allo scopo di migliorare l'assimilazione di dati in modelli operativi di onde. Con questa tecnica, derivata dalle metodologie per l'individuazione dei bacini idrologici, una volta individuati i picchi nello spettro di energia si attribuisce ad una partizione l'area circostante, tenendo conto delle pendenze dello spettro.
A titolo di esempio nella figura 35 è mostrato lo spettro di energia ricavato per uno dei siti analizzati ad uno specifico tempo. Sono indicate con colori diversi le partizioni in cui esso può essere diviso, i tre picchi identificati sono caratterizzati da periodi e direzioni di propagazione diverse.

Sulla base di questa separazione è possibile con una successiva elaborazione identificare i picchi generati da vento locale e quelli derivati da eventi lontani, sulla base della velocità di fase delle onde e dell'angolo formato rispetto al vento locale. Le statistiche relative ad altezza direzione e frequenza, effettuate sulle partizioni possono fornire ulteriori informazioni utili alla caratterizzazione dei siti, ai fini della scelta e del dimensionamento del convertitore di energia.

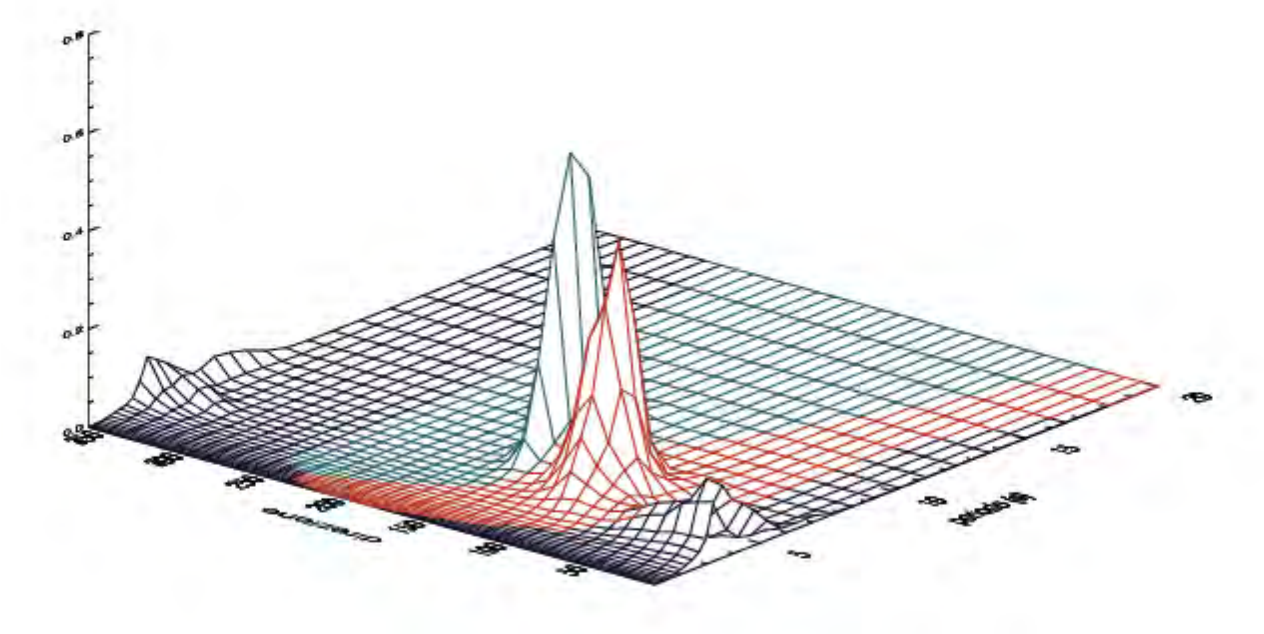


Figura 35 – Densità di energia in funzione del periodo e della direzione. Esempio di separazione in partizioni dello spettro relativo ad uno specifico tempo per il sito 10 di figura 9.

2.5 Produzione giornaliera di previsioni dello stato del mare e dell'energia

Nel corso delle annualità precedenti è stato messo a punto il sistema operativo relativo al moto ondoso per l'area Mediterranea e per 10 sottobacini [2]. La simulazione del moto ondoso è effettuata sull'intero bacino Mediterraneo con Il modello di onde WAM utilizzato alla risoluzione spaziale di 1/32°. Il dominio di calcolo copre l'area da 5.50°W a 36.125°E e da 30.2°N a 45.825°N con un numero di nodi di calcolo pari a 1333 x 501. Il modello descrive in maniera esplicita l'evoluzione dello spettro di densità di energia; lo spettro è stato discretizzato utilizzando 36 direzioni angolari, corrispondenti a 10°, e 32 intervalli di frequenza, a partire da 0.06 Hz.

Sono state definite 10 aree all'interno dei mari italiani, per le quali vengono effettuate le previsioni del moto ondoso ad una risoluzione pari ad 1/128°, corrispondente circa a 700-800 m. In questo caso viene utilizzato per il calcolo il modello SWAN [7], nato come evoluzione del modello WAM e sviluppato per l'uso in acque costiere.

La scelta delle aree è stata effettuata tenendo conto delle mappe climatologiche delle onde ricavate nel corso del PAR 2011 e quindi le due aree più estese sono state definite nella zona ovest della Sardegna e nell'area della Sicilia nord-occidentale. Inoltre sono state incluse aree su cui è in corso l'installazione di impianti di produzione di energia dal moto ondoso (come Civitavecchia) e zone che contengono grosse aree portuali (golfo di Genova e Golfo di La Spezia-Carrara e Golfo di Napoli). Infine sono state inserite aree relative ad alcune isole minori, per le quali sarebbe fondamentale raggiungere l'autosufficienza energetica. Le aree per cui vengono effettuate operativamente le simulazioni ad alta risoluzione sono mostrate in Figura 36.

La realizzazione di simulazioni operative del moto ondoso richiede in input campi di vento prodotti da un modello meteorologico eseguito in modalità operativa; tali dati devono essere disponibili in modo continuativo e affidabile in tempi brevi dopo la loro produzione. Tali requisiti sono soddisfatti dalle previsioni meteorologiche per l'area Mediterranea prodotte dal sistema SKIRON [8], sviluppato

dall'*Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group* dell'Università di Atene. Il sistema operativo SKIRON si basa sul modello meteorologico ad area limitata Eta/NCEP, la versione attualmente operativa ha una risoluzione orizzontale di 0.05°x0.05°.

Il sistema per la previsione dello stato del mare è stato attivato in modalità operativa sul computer centrale dell'unità di Modellistica Ambientale dell'ENEA a partire dal giugno 2013. Le previsioni della durata di 5 giorni, vengono effettuate quotidianamente e prevedono l'esecuzione della seguente sequenza di operazioni:

- i dati delle componenti del vento a 10 metri relativi alle previsioni effettuate con il modello SKIRON, vengono copiati tramite *ftp* dal sito del sistema operativo greco
- i venti vengono trasformati nel formato idoneo all'utilizzo dei codici di calcolo delle onde
- viene effettuata la simulazione con il modello WAM sull'area Mediterranea memorizzando le condizioni al contorno per le simulazioni dei sotto bacini
- vengono effettuate le simulazioni con il modello SWAN su tutti i sotto bacini

La catena di codici produce mappe orarie di previsioni per le principali grandezze integrate delle onde: altezza significativa, periodo di picco, energia su tutto il dominio di calcolo.
Sulla pagina web dell'ENEA sono rese disponibili per tutto l'intervallo della simulazione, sia per l'area Mediterranea che per i sotto-bacini, mappe con le previsioni relative all'energia da moto ondoso, all'altezza significativa dell'onda, ed al periodo medio. La frequenza dei campi in uscita è di un'ora.

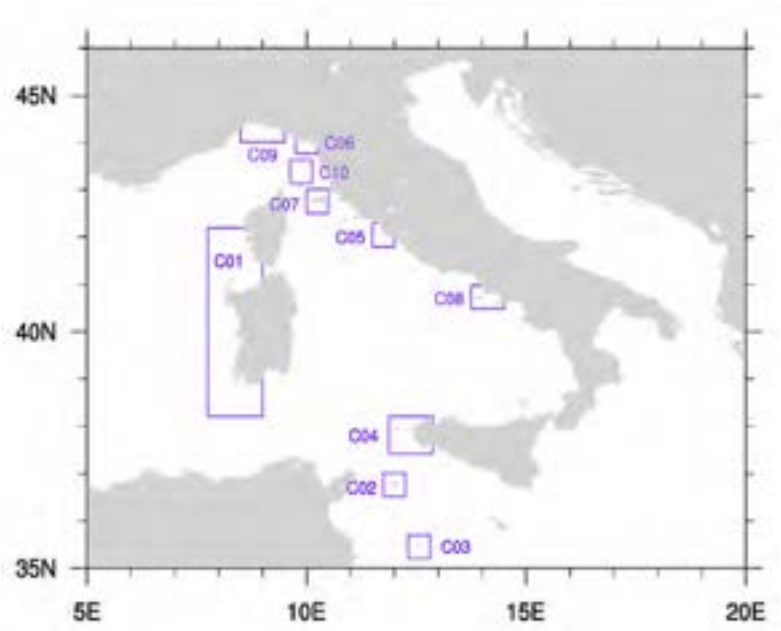


Figura 36. Mappa dei mari italiani con indicazione delle aree sulle quali vengono effettuate le simulazioni ad alta risoluzione del sistema operativo.

3 Conclusioni

L'attività svolta ha portato alla realizzazione di una climatologia delle onde relativa all'intero mar Mediterraneo. La climatologia è stata realizzata utilizzando il modello di onde WAM alla risoluzione spaziale di 1/32° per il periodo 1980-2004.
Oltre ai valori integrati relativi all'intera griglia di calcolo sono stati memorizzati, con risoluzione oraria, gli spettri bidimensionali di energia per 20 punti lungo le coste del bacino. E' stata effettuata l'analisi approfondita degli spettri relativi ai siti italiani producendo gli spettri di energia sia in funzione della frequenza che della direzione.
Sono state mostrate le potenzialità di uso degli spettri di energia per il calcolo della produttività in funzione della potenza installata, ipotizzando diversi scenari di risposta dei convertitori alle frequenze ed alla direzione di propagazione delle onde.
Infine si è fatto cenno alla possibilità di analizzare gli spettri di energia utilizzando una procedura di partizione dello spettro in diverse componenti, separando l'energia legata alle onde di vento da quella derivata dalla propagazione di onde da zone lontane. La caratterizzazione dei siti utilizzando questa tecnica può rappresentare un ulteriore sviluppo dell'attività di analisi degli spettri, indirizzata al supporto delle attività relative alla definizione dei convertitori di energia dal moto ondoso.
Nel corso dell'annualità è stata mantenuta la piena operatività del sistema di previsione dell'energia del moto ondoso realizzata nelle annualità precedenti. La procedura ha quindi permesso di pubblicare quotidianamente a mezzo web le previsioni relative ai cinque giorni successivi relativamente ai valori di altezza significativa, periodo medio ed energia del moto ondoso. Le previsioni sono effettuate alla risoluzione orizzontale di 1/32° per tutta l'area mediterranea e di 1/128° per 10 sottobacini del mare italiano.

4 Riferimenti bibliografici

1. H. Günther, A. Behrens, "The wam model validation document version 4.5.3." Tech. Rep. Institute of Coastal Research Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) (2011)
2. A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, "Report di sintesi sulla realizzazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia da moto ondoso" – Report RdS/2013/085 -2013
3. Aviso, ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/pub/oceano/AVISO/; 2011
4. Queffeulou P, Bentamy A. "Analysis of wave height variability using altimeter measurements: application to the Mediterranean sea". Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 2007;24(12):2078e92. doi:\bibinfo{doi}{10.1029/2006JC003924}.
5. J. Portilla, J. Sosa, L. Cavaleri, " Wave energy resources: Wave climate and exploitation". Renewable Energy, 57 (2013)
6. J E Aarnes, H E Krogstad, "Partitioning sequences for the dissection of directional Ocean Wave Spectra : a Review". Part of work package 4 (Wp4) of the EnviWave (EVG-2001-00017) research program under the EU Energy, Environment and Sustainable Development programme, 2001
7. The SWAN team, "SWAN User Manual", Delft University of Technology, The Netherlands, http://www.swan.tudelf.nl
8. G. Kallos, "The regional weather forecasting system SKIRON", Proceedings, symposium on regional weather prediction on parallel computer environments, 15-17 October 1997, Athens p. 9