



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Stima del potenziale energetico associato al moto ondoso in regioni campione della costa italiana

*A. Carillo, A. Bargagli, E. Caiaffa, R. Iacono, G. Sannino*

Report RdS/2012/170

STIMA DEL POTENZIALE ENERGETICO ASSOCIATO AL MOTO ONDOSO IN REGIONI CAMPIONE DELLA COSTA ITALIANA

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

Settembre 2012

Report Ricerca di 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 del Progetto: Gianmaria Sannino, ENEA

## Indice

<b>Sommario</b> .....	<b>4</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>5</b>
<b>Distribuzione dell'energia in funzione di altezza e periodo dell'onda</b> .....	<b>5</b>
<b>Descrizione del modello SWAN</b> .....	<b>12</b>
<i>Equazioni di base</i> .....	12
<i>Interazione con il vento</i> .....	14
<i>Termine di dissipazione di withecapping</i> .....	15
<i>Termine dissipativo dovuto all'attrito sul fondo</i> .....	16
<i>Rottura dell'onda causata dalla diminuzione di profondità</i> .....	17
<i>Interazione non lineare: schema a 4 onde (DIA)</i> .....	17
<b>Simulazioni ad alta risoluzione</b> .....	<b>18</b>
<b>Tecnologie GIS per la valutazione della risorsa energia dal mare</b> .....	<b>24</b>
<b>Conclusioni</b> .....	<b>29</b>
<i>Riferimenti bibliografici</i> .....	30

## Sommario

Nel corso dell'attività svolta nella precedente annualità era stata prodotta una mappa del potenziale energetico ricavabile dal moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo. Questi risultati sono stati analizzati con maggior dettaglio nel corso di questa annualità mostrando, per alcuni punti campione, la distribuzione di energia in funzione di periodo e altezza significativi.

Dall'analisi della climatologia, calcolata sul decennio 2001-2010, la costa occidentale della Sardegna e la zona nord-ovest della Sicilia erano risultate le più promettenti dal punto di vista energetico. Un approfondimento dello studio relativo ha quindi comportato la realizzazione di simulazioni modellistiche a più alta risoluzione per queste due zone. Una terza zona analizzata con maggiore dettaglio è quella circostante l'isola di Pantelleria, che, anche se caratterizzata da una energia media inferiore, può risultare interessante per lo sfruttamento di energia ondosa a causa delle particolari difficoltà di approvvigionamento energetico.

Sono quindi state effettuate simulazioni climatologiche per queste tre zone, alla risoluzione spaziale di  $1/120^\circ$ , corrispondente a distanze inferiori al chilometro. In questo caso le simulazioni sono state realizzate utilizzando il modello SWAN (Simulating WAVes Nearshore) più idoneo alla simulazione in zone caratterizzate da acque poco profonde. Le condizioni laterali sono state ricavate dalle simulazioni effettuate durante l'annualità precedente e sono stati utilizzati come forzanti superficiali gli stessi campi di vento provenienti dal Centro Europeo per le previsioni meteo a medio termine (ECMWF).

Nella presente relazione, dopo una descrizione delle equazioni di base del modello SWAN utilizzato, sono presentate le mappe di potenziale energetico ricavato dal moto ondoso relative ai risultati climatologici per le tre zone.

## Introduzione

Il settore delle energie alternative sta subendo nel corso degli ultimi anni una crescita significativa, che riguarda anche l'attività relativa allo sviluppo di tecnologie rivolte allo sfruttamento dell'energia delle onde. L'attività svolta all'interno di questo progetto è dedicata alla stima delle risorse energetiche disponibili nei mari italiani, necessaria alla individuazione dei siti più idonei all'installazione di generatori. Le caratteristiche del clima d'onda sono fondamentali non solo per una stima preliminare dell'energia ricavabile in uno specifico sito, ma anche per la definizione della tecnologia più idonea da utilizzare. La conoscenza delle condizioni d'onda specifiche del sito è necessaria da un lato per la definizione delle condizioni estreme a cui il generatore può essere sottoposto e dall'altro allo scopo di ottimizzare il convertitore di energia rispetto alle condizioni che si presentano con maggiore frequenza.

Differenze anche significative in termini di distribuzione di energia in funzione di altezza significativa e periodo, possono verificarsi anche a distanze minime, dell'ordine delle centinaia di metri, la stima delle risorse disponibili deve quindi essere effettuata a questa risoluzione spaziale.

La Rete Ondametrica Nazionale (RON), costituita da 15 boe distribuite nelle acque circostanti la costa italiana, può essere utile solo ad una analisi preliminare delle aree di studio ed ad una validazione dei dati modellistici ottenuti, ma non fornisce una copertura spaziale adeguata. E' quindi necessario l'utilizzo di dati provenienti da simulazioni modellistiche ad alta risoluzione spaziale.

L'attività svolta nel corso di questa annualità va quindi ad integrare quella svolta nell'annualità precedente nella valutazione del potenziale energetico del moto ondoso attraverso strumenti modellistici. Nel corso dell'annualità precedente è stata realizzata la climatologia delle onde per il mar Mediterraneo, per il periodo 2001-2010, utilizzando il modello WAM (WAVE Model) alla risoluzione spaziale di  $1/16^\circ$ , pari circa a 7 km. Il modello è stato forzato con dati di vento superficiale prodotti in modo operativo dal Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF). Le simulazioni sono state validate con ottimi risultati tramite il confronto con i dati misurati dalle boe.

Tale attività ha consentito di evidenziare le zone della costa italiana caratterizzate da valori più elevati di potenziale energetico delle onde. Nel corso dell'attività svolta in questa annualità sono state implementate specifiche simulazioni alla risoluzione spaziale di  $1/120^\circ$  per tre zone particolarmente significative dal punto di vista energetico. I dati delle simulazioni per l'intero Mediterraneo sono stati utilizzati come condizioni al contorno per la realizzazione delle simulazioni a più alta risoluzione.

La scelta delle zone più idonee allo sfruttamento dell'energia ondosa deve essere effettuato considerando oltre all'energia disponibile, parametri ambientali che possono costituire un ostacolo alla installazione dei dispositivi. A questo scopo i risultati sono stati inseriti all'interno di un sistema GIS (Geographic Information System) in grado di legare tra loro diversi strati informativi.

## Distribuzione dell'energia in funzione di altezza e periodo dell'onda

Nella relazione relativa alla precedente annualità era stata presentata la climatologia del moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo. Era stata effettuata una simulazione con il modello WAM alla risoluzione di  $1/16^\circ$  per l'intervallo di dieci anni dal 2001 al 2010, forzata con dati di vento provenienti dalle analisi prodotte dal ECMWF. I valori di altezza e direzione delle onde erano stati ampiamente validati rispetto alle boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON).

Si riporta in figura 1 la mappa del potenziale energetico medio sul bacino Mediterraneo calcolata sul periodo 2001-2010.

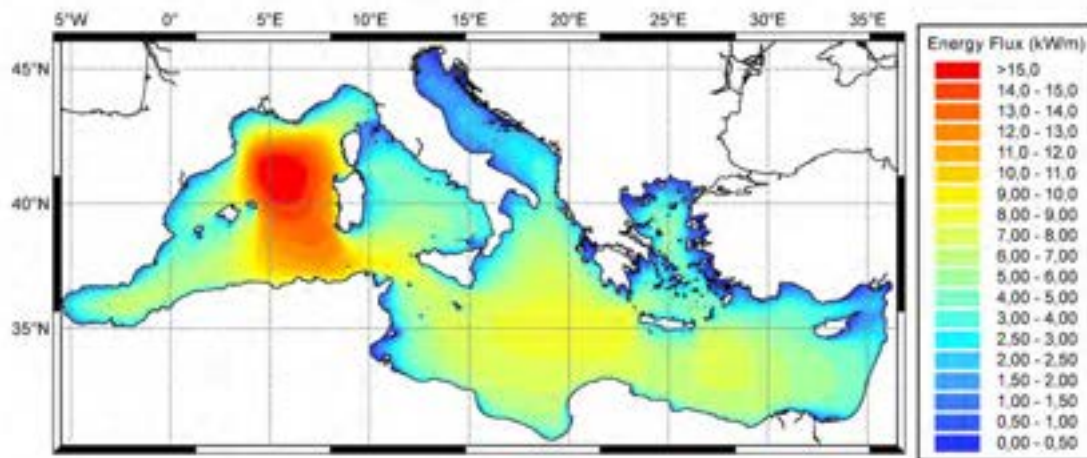


Figura 1 – Distribuzione della potenza media sul periodo 2001-2010, calcolata con il modello WAM alla risoluzione di 1/16°.

La parte occidentale del bacino Mediterraneo risulta essere caratterizzata dai valori più elevati di energia. Nella zona che si estende tra le isole Baleari e la costa della Sardegna vengono raggiunti valori superiori a 15 Kw/m, l'area più energetica si allunga poi verso il canale di Sicilia dove i valori medi restano comunque inferiori a 10 Kw/m. Per quanto riguarda la costa italiana quindi i valori più elevati di potenziale sono ottenuti lungo tutta la costa ovest della Sardegna e la costa sud-ovest della Sicilia. Nelle figure 2 e 3 sono riportate le distribuzioni di potenza media lungo queste due zone lungo una fascia distante 12 km dalla costa.

Una prima fase dell'attività svolta in questa annualità ha riguardato l'approfondimento dello studio dei risultati ottenuti, anche in considerazione del loro utilizzo a scopi ingegneristici. Poiché i WECs (Wave Energy Converter) operano efficacemente su determinati intervalli di altezze d'onda e periodi, lo studio di fattibilità per la produzione di energia dalle onde deve essere effettuato considerando le condizioni di mare più rappresentative in termini di produzione energetica.

La potenza media è un parametro utile per identificare le aree più promettenti per la produzione di energia delle onde, tuttavia, i suoi valori derivano dal contributo di diverse condizioni del mare distribuite su una gamma di altezze d'onda, periodi e direzioni. La potenza delle condizioni del mare più energiche e meno frequenti può facilmente superare di più di un ordine di grandezza i valori osservati in condizioni tipiche. Tuttavia lo sfruttamento dell'energia del moto ondoso associata agli stati più energici non può essere presa in considerazione in quanto richiede infrastrutture sovradimensionate e l'uso di WECs che probabilmente non sono in grado di funzionare bene in condizioni di mare meno energetiche.

Il flusso di energia disponibile per unità di cresta può essere espresso come:

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2$$

Dove J è il flusso di energia in Watt per metro di cresta d'onda, g è l'accelerazione di gravità, ρ è la densità del mare con valore pari a 1025 kg/m<sup>3</sup>, H<sub>s</sub> è l'altezza significativa delle onde e T<sub>e</sub> rappresenta il periodo significativo dell'onda.

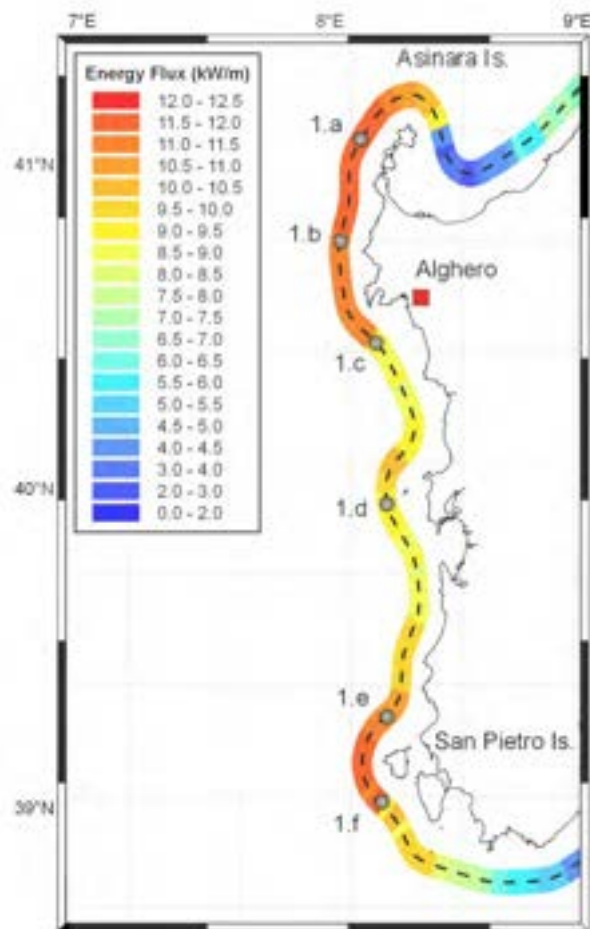


Figura 2 – Distribuzione della potenza media lungo la costa ovest della Sardegna. Valori calcolati alla distanza di 12 km dalla costa. Sono riportate con il numero e la lettera le posizioni dei punti utilizzati in Figura 4.

Le figure 4 e 5 mostrano la distribuzione di potenza d'onda tra altezze d'onda, periodi e direzioni per località selezionate lungo la costa occidentale della Sardegna e la costa nord-occidentale e meridionale della Sicilia. Nel pannello inferiore sinistro delle figure, il grafico di dispersione rappresenta la distribuzione di energia media annua in termini di  $T_e$  (periodo significativo) e di  $H_s$  (altezza significativa), valutata sul periodo di 10 anni della simulazione. Contributi all'energia totale da parte di singole condizioni di mare sono raggruppati in intervalli di  $T_e$  di 0.25s e intervalli di  $H_s$  di 0.25m. I contributi alla potenza d'onda da parte delle singole condizioni di mare ottenute in uscita dal modello ogni 3 ore, sono calcolati usando l'equazione precedente. Linee di potenza costante sono disegnate sui grafici di dispersione per evidenziare la variabilità della potenza delle onde. Sui pannelli superiore e destro di ciascuna curva di dispersione, due istogrammi rappresentano la distribuzione dell'energia media annuale del moto ondoso rispettivamente in funzione di  $T_e$  e di  $H_s$ . Gli intervalli utilizzati in questi istogrammi sono il doppio degli intervalli utilizzati nella dispersione per una migliore rappresentazione grafica. In ogni istogramma una linea rossa rappresenta la percentuale cumulata di energia totale disponibile in funzione di  $T_e$  e di  $H_s$  i simboli presenti sulla linea cumulata sono posizionati ogni 10° percentile. Nel pannello in alto a destra un diagramma a rosa descrive la distribuzione direzionale di energia media annua in intervalli di 30° di larghezza. Ogni cerchio concentrico rappresenta il 20% del contributo totale di energia.

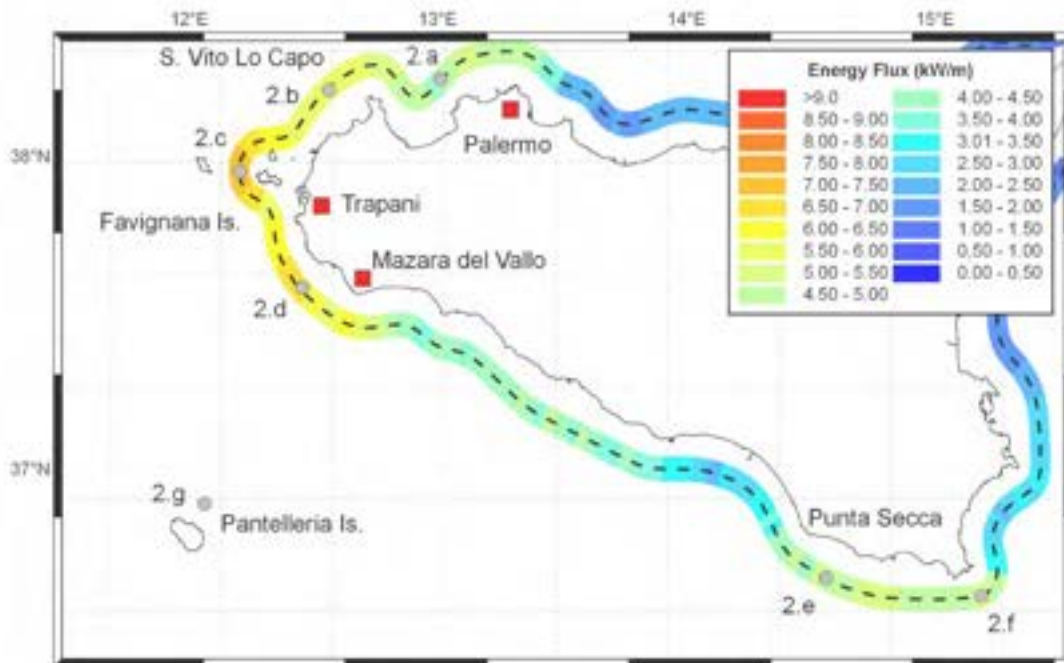


Figura 3 – Distribuzione della potenza media lungo la costa ovest della Sicilia. Valori calcolati alla distanza di 12 km dalla costa. Sono riportate con il numero e la lettera le posizioni dei punti utilizzati in figura 5.

I grafici in figura 4 si riferiscono a punti situati lungo la costa occidentale della Sardegna (vedi figura 2). Una quantità di energia pari a circa il 40% del totale è contenuta rispettivamente in condizioni di mare con altezze d'onda significativa comprese tra 2 a 4 m e periodi significativi tra gli 8 ed i 10 s. I punti 1.a e 1.b, che si trovano nella parte settentrionale della costa, a soli 50 km di distanza, hanno valori simili di flusso di potenza media, superiori a 11 kW/m, e quasi la stessa distribuzione rispetto a  $T_e$  e  $H_s$ , ma le direzioni prevalenti sono ruotate di quasi 45 gradi. In questi due punti la quantità di energia fornita dalle condizioni di mare con  $H_s$  maggiore di 4 m, è circa il 40% del totale, mentre nelle altre località questo contributo si riduce a circa il 30%. Questo si può osservare sia per i punti 1.c e 1.d, che sono molto meno energici con valori inferiori a 10 kW/m, che per i punti 1.e e 1.f che condividono gli stessi livelli di potenza totale dei primi due punti. I punti 1.c e 1.d hanno tra loro lo stesso contenuto energetico, ma diverse distribuzioni direzionali.

La distribuzione di energia del moto ondoso lungo i punti al largo della costa siciliana segue un modello diverso, come mostrato in figura 5. In questo caso i contributi più energetici, che si trovano a valori inferiori di  $T_e$ , nell'intervallo tra 6 e 8 s, rappresentano il 50% del totale. Allo stesso modo, il contributo principale all'energia in termini di  $H_s$ , pari al 50% del totale, si trova in un intervallo di valori più basso, tra 1.5 e 3.5 m. La distribuzione direzionale dell'energia delle onde ha una componente prevalente W-NW in tutti i punti tranne il punto 2.f dove i valori molto bassi indicano una elevata dispersione angolare. L'energia del moto ondoso nei punti 2.e e 2.f è distribuita in una banda più ristretta di  $H_s$  rispetto agli altri punti, con quasi il 70% dell'energia totale nell'intervallo tra 1 e 3.5 m.

Una analisi più dettagliata è stata rivolta oltre che alle zone costiere della Sardegna e della Sicilia, in quanto caratterizzate dai valori più elevati di energia ondosa, anche alla zona circostante l'isola di Pantelleria. In questo caso lo sfruttamento della risorsa energetica derivata dal moto ondoso può risultare vantaggiosa anche a causa della difficoltà dell'approvvigionamento energetico da fonti tradizionali.

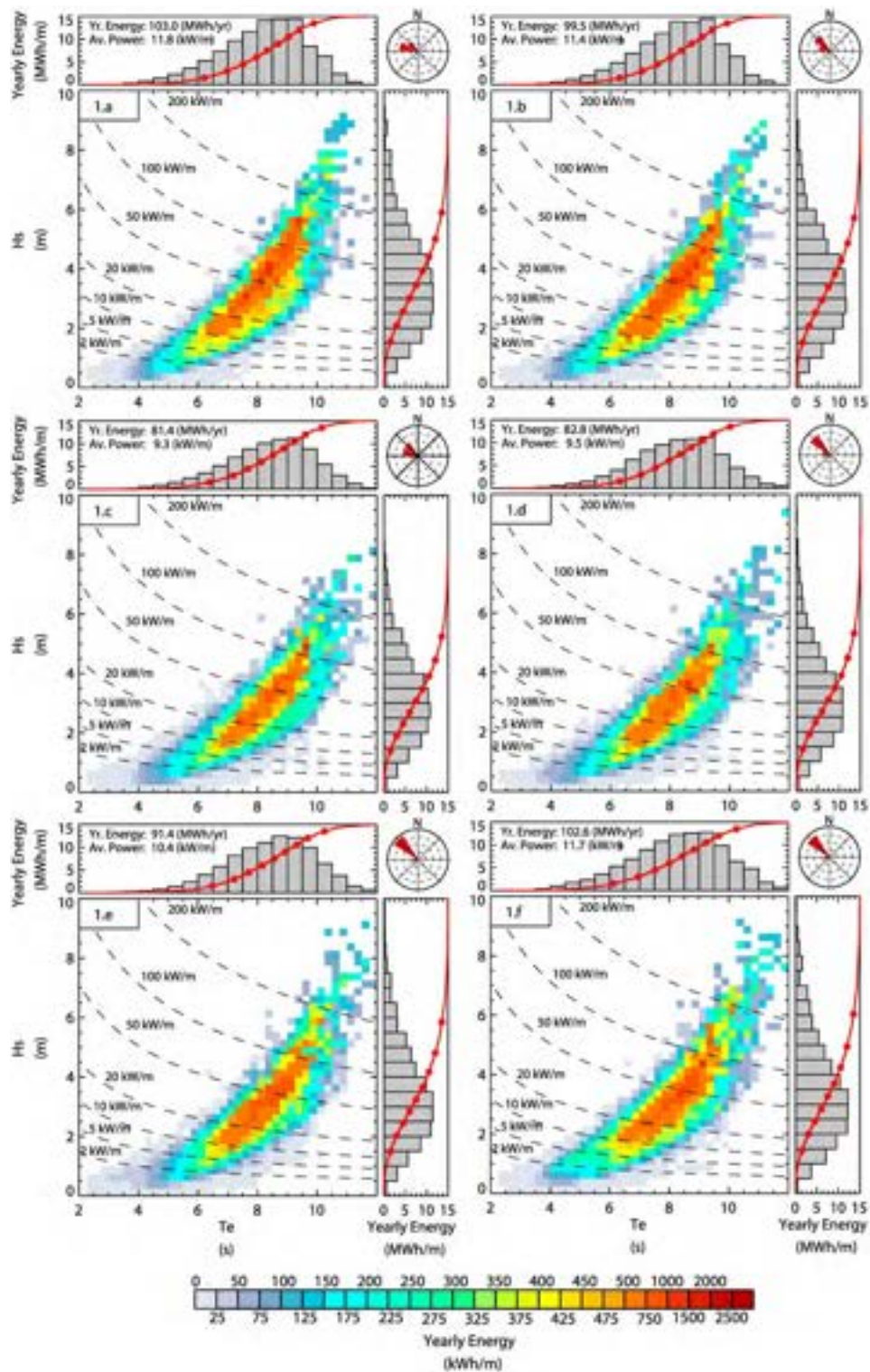


Figura 4 – Distribuzione dell'energia da onda in funzione del periodo significativo e dell'altezza significativa in punti collocati lungo la costa della Sardegna e individuati dalle lettere sulla figura 2.

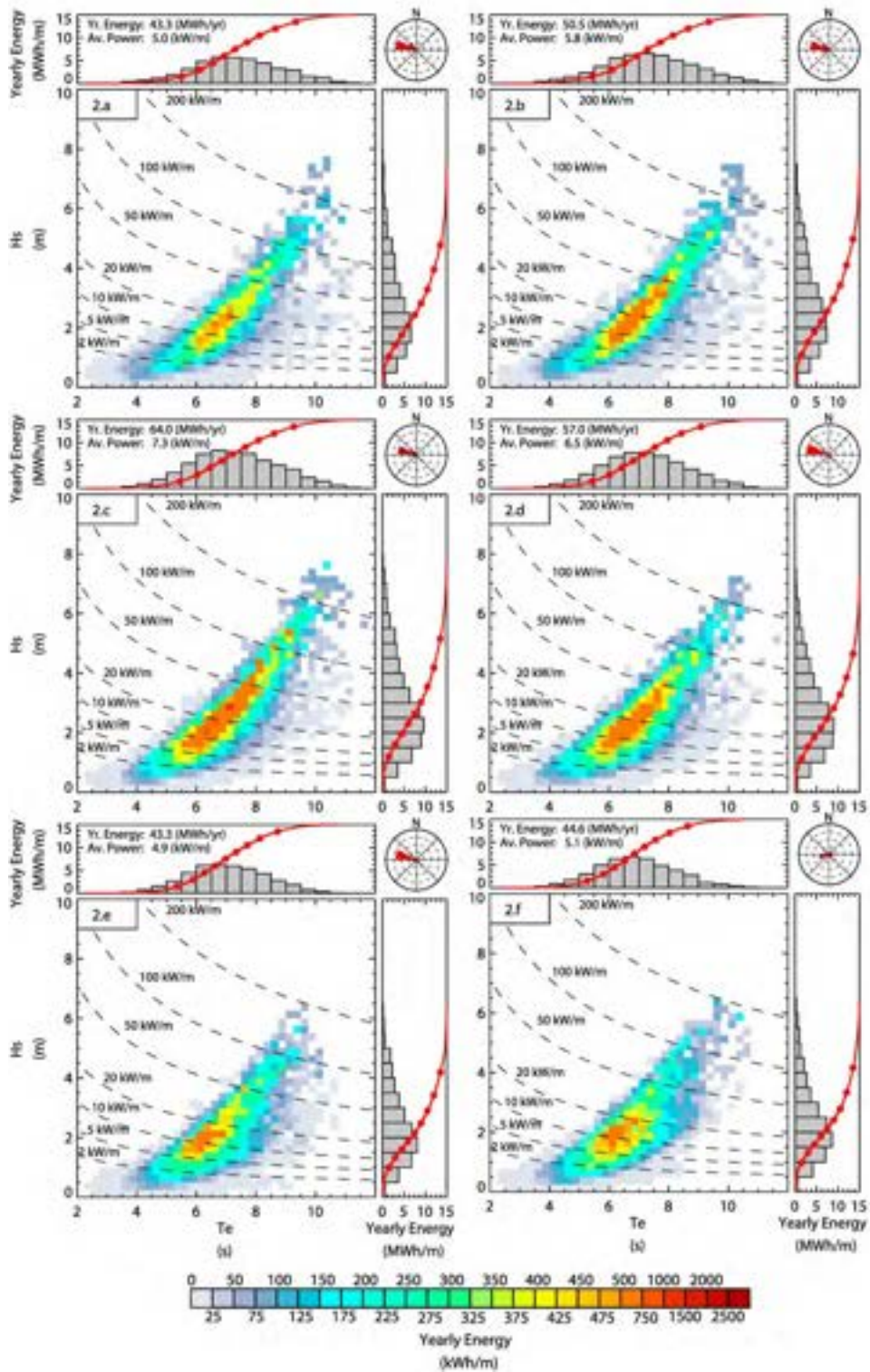


Figura 5 – Distribuzione dell’energia da onda in funzione del periodo significativo e dell’altezza significativa in punti collocati lungo la costa della Sicilia e individuati dalle lettere sulla figura 3.

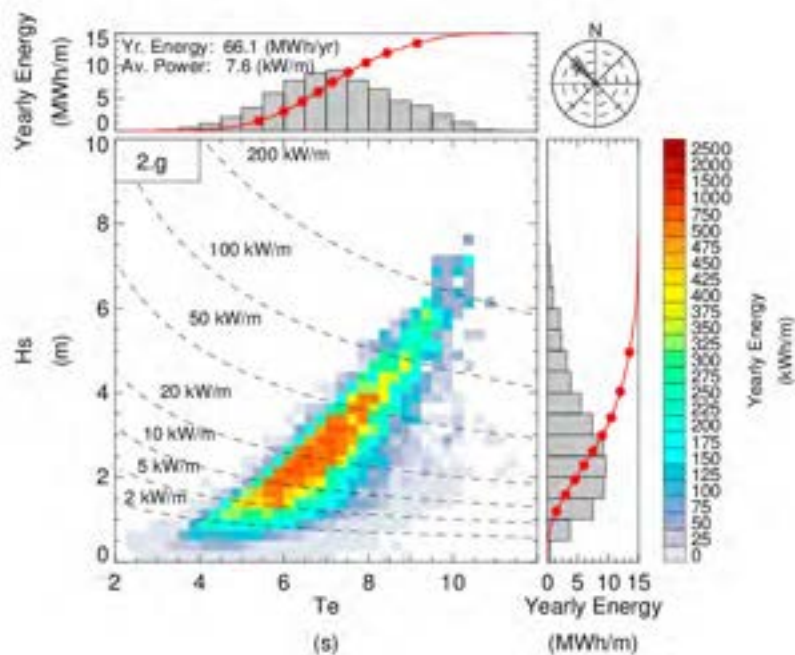


Figura 6 – Distribuzione dell’energia da onda in funzione del periodo significativo e dell’altezza significativa per un punto a nord dell’isola di Pantelleria.

La figura 6 mostra il diagramma di dispersione per un punto che si trova al largo dell’isola di Pantelleria. Il valore di potenza media annuale, pari a 7.6 kW/m, è maggiore rispetto ai valori ottenuti lungo la costa siciliana. La distribuzione è caratterizzata da un contributo significativo delle onde con  $H_s$ , fino a 4 m. La principale componente direzionale è quella da NW.

Un altro indicatore interessante per definire se un sito è idoneo all’installazione di convertitori di energia dalle onde è rappresentato dalla distribuzione temporale di energia dell’onda. E’ infatti importante non solo conoscere in anticipo il valore medio dell’energia disponibile ma anche quanto questo valore sia costante nel tempo. Nella relazione relativa all’annualità precedente [1] era stata mostrata la variabilità stagionale dell’energia ondosa nel bacino Mediterraneo, evidenziando i valori più elevati in inverno ed in autunno e le condizioni di energia ridotta nella stagione estiva.

L’ampiezza della fluttuazione inter-annuale può essere stimata attraverso il calcolo di un coefficiente di variazione (COV) definito come:

$$COV = \sigma/\mu$$

dove  $\sigma$  e  $\mu$  rappresentano rispettivamente la media e la deviazione standard della potenza media annua. Questo valore misura la variabilità dei dati rispetto alla loro media, quindi un valore pari a zero corrisponde ad una serie temporale di valore costante mentre un valore pari ad 1 indica che la deviazione standard è uguale alla media.

La figura 7 mostra la distribuzione spaziale calcolata sui dati della simulazione di 10 anni (2001-2010) con il modello WAM. Intorno alla penisola italiana si osservano valori in generale intorno a 0.2. Valori più elevati, maggiori di 0.4, si osservano nel Tirreno meridionale. Lungo la costa occidentale della Sardegna e lungo la costa occidentale e meridionale della Sicilia le fluttuazioni inter-annuali non superano 0.25. Anche dal punto di vista della variabilità, si può quindi considerare Sardegna occidentale e Sicilia occidentale e meridionale come i siti della costa italiana più idonei per la produzione di energia dalle onde.

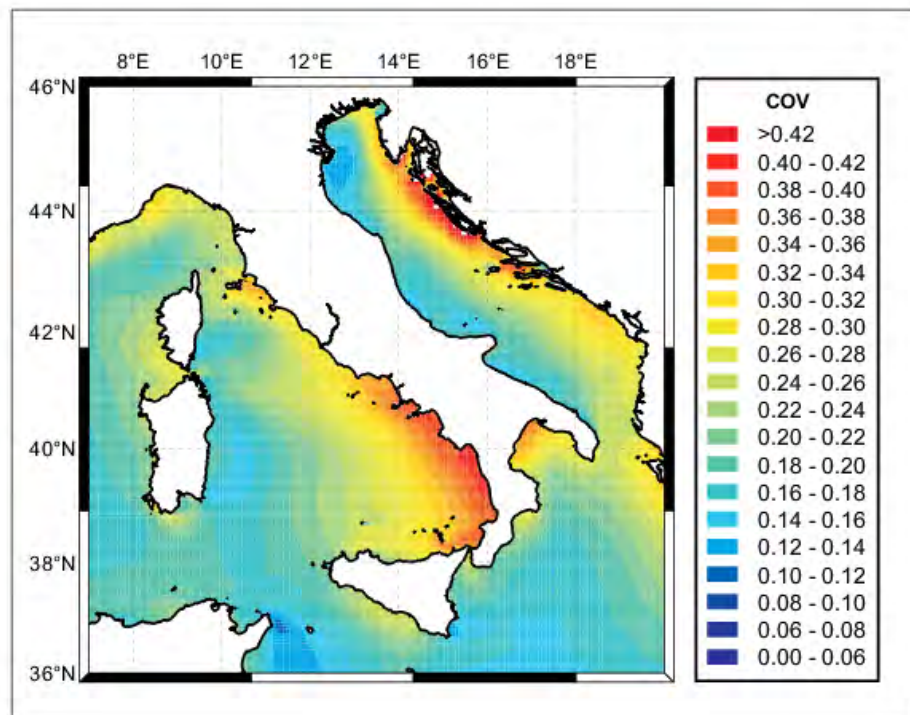


Figura 7 – Distribuzione del coefficiente di variazione del flusso di potenza media annua calcolato per i 10 anni di simulazione 2001-2010.

## Descrizione del modello SWAN

Il Modello numerico SWAN è stato sviluppato dalla “Delft University of Technology” in Olanda (<http://www.swan.tudelft.nl>) ed è nato come evoluzione del modello WAM ciclo-3 sviluppato dal WAMDI Group dal 1988 ed operativo da alcuni anni al ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast) di Reading.

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) è un modello numerico pensato per operare anche vicino alla costa e non solo in acque profonde come WAM.

### Equazioni di base

Il vento genera onde irregolari in ampiezza e periodo, comunque le proprietà statistiche della superficie marina quali altezza media, periodo medio e direzione media dell’onda cambiano più lentamente delle effettive strutture dinamiche quali altezza della superficie marina e corrente marina istantanee. E’ possibile pertanto descrivere lo stato del mare in termini delle sopra citate quantità medie e della loro variazione nel tempo e nello spazio. Lo stato del mare è quindi rappresentabile come una sommatoria di vari contributi ondulatori:

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i)$$

Dove  $\eta$  è la elevazione del mare rispetto ad un livello medio,  $a_i$  è l'ampiezza dell'onda,  $\sigma_i$  è la frequenza radiante relativa e  $\alpha_i$  è la fase del componente ondulatorio  $i$ -esimo. Queste quantità medie ( $a_i, \sigma_i, \alpha_i$ ) sono a loro volta funzione della posizione geografica e del tempo (ad una scala maggiore del periodo medio) . Nel caso la corrente marina media  $\vec{u}$  sia non nulla occorre introdurre la frequenza radiante assoluta:

$$\omega_i = \sigma_i + \vec{k}_i \cdot \vec{u} \quad \text{con } \vec{k}_i \text{ il numero d'onda della componente } i.$$

La relazione tra frequenza relativa e numero d'onda è detta relazione di dispersione e nel caso di approssimazioni lineari questa relazione è:  $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$  dove "g" è l'accelerazione di gravità e "d" la profondità del mare.

La variabile fondamentale in un modello d'onda come SWAN è lo spettro di "densità di varianza", quantità che è strettamente collegata allo spettro di "densità di energia", infatti:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho_w g \langle \eta^2 \rangle$$

dove la densità di varianza  $\langle \eta^2 \rangle$  è la funzione di auto-correlazione  $C(0)$  dell'elevazione  $\eta$  :  $C(\tau) = \langle \eta(t)\eta(t+\tau) \rangle$  cioè  $\langle \eta^2 \rangle = C(0) = \int_0^{+\infty} E(f) df$  con  $f > 0$  la frequenza in Hertz. A sua volta  $E(f)$  è la densità di energia alla frequenza  $f$  indipendentemente dalla direzione di propagazione cioè:  $E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta$  con  $\theta$  indicante l'angolo della direzione perpendicolare alle creste d'onda.

Quindi lo scopo di SWAN è definire e prevedere il campo di  $E(f, \theta)$ , cioè il valore di densità di varianza (funzione della frequenza e della direzione di propagazione d'onda) in ogni punto di data posizione geografica. A questo scopo utilizzando la teoria lineare delle onde si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = (c_x, c_y) = \vec{c}_g + \vec{u} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2|\vec{k}|d}{\sinh(2|\vec{k}|d)} \right) \frac{\sigma \vec{k}}{k^2} + \vec{u}$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = c \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right) - c_\sigma \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial s}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right)$$

Dove  $\vec{c}_g$  è la velocità di gruppo ovvero la velocità di propagazione dell'energia d'onda la variabile "s" è la coordinata spaziale lungo la direzione di propagazione del fronte d'onda cioè in direzione  $\theta$  ed "m" è la coordinata spaziale in direzione perpendicolare ad "s". Inoltre  $\vec{k} = (k_x, k_y) = (|\vec{k}| \cos \theta, |\vec{k}| \sin \theta)$  e l'operatore  $\frac{d}{dt}$  è così definito:  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{c}_g + \vec{u}) \cdot \nabla_{\vec{x}}$ .

La relazione fondamentale che permette di calcolare  $E(f, \theta)$  sfrutta la proprietà della "densità di azione"  $N = E/\sigma$ , cioè l'equazione differenziale che definisce la tendenza dell'azione:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{u})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

Il termine sulla destra ( $S_{tot}$ ) rappresenta tutte le possibili sorgenti, ovvero quelle forzanti che contribuiscono a incrementare o dissipare o redistribuire nel dominio spettrale l'azione d'onda, mentre i termini sulla sinistra sono termini avvevativi ed in particolare il 2° termine rappresenta l'effetto della propagazione nel dominio spaziale (la cui velocità di propagazione è la somma della velocità di gruppo e della corrente), il 3° termine rappresenta l'effetto della propagazione nel dominio delle frequenze cioè l'effetto di cambio di frequenza dovuto alla variazione di profondità e di corrente, il quarto termine, cioè la propagazione nel dominio angolare  $\theta$ , rappresenta la rifrazione delle onde cioè il cambio della direzione di

propagazione del fronte d'onda sempre dovuto alla variazione di profondità e corrente. Quindi i termini  $c_\theta$  e  $c_\sigma$  sono le velocità di propagazione nel dominio spettrale  $(\sigma, \theta)$ .

Introducendo le coordinate sferiche longitudine  $\lambda$  e latitudine  $\varphi$  è possibile definire le nuove velocità  $c_\lambda$  e  $c_\varphi$ :

$$\frac{d\lambda}{dt} = c_\lambda = \frac{1}{R \cos \varphi} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2|\vec{k}|d}{\sinh(2|\vec{k}|d)} \right) \frac{\sigma \vec{k} \cos \theta}{k^2} + u_\lambda \right]$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = c_\varphi = \frac{1}{R} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2|\vec{k}|d}{\sinh(2|\vec{k}|d)} \right) \frac{\sigma \vec{k} \sin \theta}{k^2} + u_\varphi \right]$$

Tenendo conto dell'equazione di Clairaut ( $R \cos \varphi \cos \theta = costante$ ) si può riscrivere l'equazione (1) in funzione di latitudine e longitudine:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_\lambda N}{\partial \lambda} + \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial c_\sigma \cos \varphi N}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial \tilde{c}_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2)$$

Dove  $\tilde{c}_\theta = c_\theta - \frac{c_x \cos \theta + c_y \sin \theta}{R} \cos \theta \tan \varphi$  (questa relazione è valida solo per acque profonde e senza corrente).

Ovviamente il termine forzante  $S_{tot}$  è determinante al fine di predire lo sviluppo dell'onda ed è parametrizzato come somma di sei contributi:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}$$

Questi termini rappresentano rispettivamente: la crescita dovuta al vento, il trasferimento non lineare di energia (nel dominio spettrale) dovuto ad interazioni di 3 onde (nl3) e di 4 onde (nl4), il decadimento o dissipazione d'onda dovuta al fenomeno del whitecapping ( $d_{s,w}$ ), ovvero la rottura della cresta d'onda, l'attrito sul fondo ( $d_{s,b}$ ) e la rottura dell'onda indotta dal cambio di profondità ( $d_{s,br}$ ).

### Interazione con il vento

Il campo di vento sopra la superficie del mare è associato ad una onda di pressione che si propaga nella direzione e con la velocità del vento, quando questa onda di pressione entra in fase con il campo d'onda marino, produce un accoppiamento di risonanza che trasferisce l'energia del vento all'onda. Questo trasferimento è tanto più efficiente quanto maggiore è l'ampiezza d'onda, pertanto il termine  $S_{in}$  è parametrizzato con un contributo di crescita lineare "A" ed uno detto di crescita esponenziale "B":  $S_{in}(\sigma, \theta) = A + B E(\sigma, \theta)$  dove sia il coefficiente lineare A che quello esponenziale B dipendono da ampiezza e direzione del vento.

Le parametrizzazioni di questo tipo usano la "friction velocity"  $U_*$  mentre SWAN utilizza il vento a 10 m ( $U_{10}$ ) e la relazione tra questi ( $U_* = C_D U_{10}^2$ ) usa il coefficiente di drag  $C_D$  definito  $1.2875 \times 10^{-3}$  per venti inferiori a 7,5 m/s mentre per venti superiori  $C_D = (0.6 + 0.065 U_{10}) 10^{-3}$ .

Il coefficiente A di crescita lineare è espresso secondo [2] con l'aggiunta di un filtro H introdotto da Tolman per eliminare la crescita alle basse frequenze, definendo le quantità  $C_0 = \cos(\theta - \theta_{wind})$  e  $C_1 = \max\{0, C_0\}$ :

$$A = \frac{0.0015}{2\pi g^2} H [U_* C_1]^4 \quad \text{con il filtro } H = e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*}\right)^{-4}}; \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi$$

Dove  $\sigma_{PM}^*$  è la frequenza di picco quando lo stato del mare è pienamente sviluppato.

Per quanto riguarda la parametrizzazione del coefficiente di crescita esponenziale  $B$ , in SWAN, sono disponibili due formulazioni la prima è dovuta a Komen [3] che utilizza la quantità  $\mathbf{Y}$  ( $\mathbf{Y} = \frac{U_*}{C_{ph}}$  dove  $C_{ph}$  è la velocità di fase), quindi il coefficiente di crescita esponenziale è così definito da Komen:

$$B = \sigma 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \max\{0, [28 \mathbf{Y} C_0 - 1]\}$$

La seconda formulazione di  $B$  è dovuta a Janssen [4,5]:

$$B = \sigma \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} [\mathbf{Y} C_1]^2 \quad \text{con: } \beta = \frac{1.2}{\mathcal{K}^2} \Lambda (\ln \Lambda)^4; \Lambda \leq 1; \Lambda = \frac{g z_e}{C_{ph}^2} e^r; r = \frac{\mathcal{K} C_{ph}}{U_* \cos(\theta - \theta_{wind})}$$

Dove  $\mathcal{K} = 0.41$  è la costante di Von Karman e  $Z_e$  la “rugosità superficiale effettiva”, nel caso che  $\Lambda > 1$  la costante di Miles  $\beta$  è posta uguale a 0.

Janssen assume che il profilo di vento sia:  $U(z) = \frac{U_*}{\mathcal{K}} \ln \left[ \frac{z+Z_e-z_0}{z_e} \right]$

con  $z_0$  la “lunghezza di rugosità” che, a sua volta, è formulata tramite la “rugosità superficiale effettiva”  $Z_e$  e lo “stress superficiale totale”  $\tau$ :

$$Z_e = \frac{z_0}{\sqrt{1 - \frac{|\bar{\tau}_w|}{|\bar{\tau}|}}} ; Z_0 = \hat{\alpha} \frac{U_*^2}{g}$$

dove  $\tau$  è funzione di  $U_*$ :  $\vec{\tau} = \rho_a |\vec{U}_*| \vec{U}_*$ ; infine il wave-stress  $\tau_w$  dipende dall’integrale totale dell’energia d’onda:  $\vec{\tau}_w = \rho_w \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma B E(\sigma, \theta) \frac{\vec{k}}{k} d\sigma d\theta$ .

In questa formulazione di Janssen quindi la “friction velocity”  $U_*$  è formulata in funzione di  $U_{10}$  e delle sopra scritte relazioni cioè

$$U_* = \frac{\mathcal{K} U(10.)}{\ln \left[ \frac{10.+Z_e-z_0}{z_e} \right]}$$

occorre quindi una procedura iterativa che è quella di Mastenbroek [6].

Una ulteriore parametrizzazione di questo termine sorgente dovuto al vento è derivata da Yan (utilizzata in SWAN abbinata alla parametrizzazione withecapping di Van Der Westhuysen [7]) ed è simile a quella di Komen solo che dipende anche da un valore quadratico di  $\mathbf{Y} = \frac{U_*}{C_{ph}}$ :

$$B = \sigma \frac{\rho_a}{\rho_w} \{D\mathbf{Y}^2 C_0 + E\mathbf{Y} C_0 + F C_0 + H\} \quad \text{definendo cioè un } \beta_{fit} = D\mathbf{Y}^2 C_0 + E\mathbf{Y} C_0 + F C_0 + H$$

In SWAN questi parametri sono ottimizzati con i seguenti valori:  $D=0.04$ ,  $E=0.00552$ ,  $F = 5.2 \times 10^{-5}$ ,  $H = 3.02 \times 10^{-4}$ .

### Termine di dissipazione di withecapping

Il processo di withecapping è formulato in funzione del numero d’onda medio  $\tilde{k}$  e della pendenza d’onda globale  $\tilde{S}$ :

$$S_{ds,w} = \Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta)$$

Dove i termini  $\tilde{\sigma}$  e  $\tilde{k}$  rappresentano frequenza e numero d’onda medi, la dipendenza dalla pendenza d’onda è nella formulazione del parametro  $\Gamma = C_{ds} \left[ (1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \right] \left( \frac{\tilde{S}}{\tilde{S}_{PM}} \right)^p$

Dove la pendenza d'onda globale è così definita:  $\tilde{S} = \tilde{k}\sqrt{E_{tot}}$ , mentre  $p$ ,  $C_{ds}$  e  $\delta$  sono coefficienti da regolare empiricamente, il valore di  $\tilde{S}$  nel caso dello spettro di Pierson-Moskowitz è  $\tilde{S}_{PM} = \sqrt{0.00302}$  [8].

Il numero medio d'onda e di frequenza sono così definiti in SWAN:  $\tilde{\sigma} = E_{tot} / \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$ ;

$$\tilde{k} = \left( E_{tot} / \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^2 \quad \text{e} \quad E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta .$$

La formulazione di Komen per il vento, definita precedentemente, corrisponde alla formulazione di WAM-Cycle 3 e in essa vengono usati i seguenti parametri:  $C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$ ,  $\delta = 0$  e  $p=4$ ; mentre la formulazione di Janssen, corrispondente al Cycle 4 di WAM, usa  $C_{ds} = 4.1 \times 10^{-5}$ ,  $\delta = 0.5$  e  $p=4$ .

Una formulazione completamente alternativa è quella dovuta a Van Der Westhuysen [7], nella quale non si considera la dipendenza dai parametri usati sopra (numero d'onda e pendenza d'onda medi) ma si tiene conto dell'apparente correlazione tra pacchetti d'onda e dissipazione di tipo withecapping. In particolare la "saturazione azimutale spettrale integrata"  $B(\mathbf{k}) = \int_0^{2\pi} c_g \mathbf{k}^3 E(\sigma, \theta) d\theta$  è correlata positivamente con il withecapping. Alle frequenze in cui  $B(\mathbf{k})$  supera un valore di soglia  $B_r = 0.00175$  si ha la rottura dell'onda, pertanto la funzione  $\ddot{B}(\mathbf{k}) = \sqrt{B(\mathbf{k})/B_r}$  diventa un fattore critico per valori di  $\ddot{B}(\mathbf{k}) > 1$ , cioè quando c'è la rottura dell'onda.

Tramite questo fattore è costruita una funzione  $F\{\ddot{B}(\mathbf{k})\} = \tanh[10(\ddot{B}(\mathbf{k}) - 1)]$  che transita rapidamente tra -1 e +1 vicino al valore critico di  $\ddot{B}(\mathbf{k}) = 1$ . Pertanto tramite questa funzione sono parametrizzati sia l'esponente "p" che il fattore " $f_{br}(\mathbf{k})$ " che sono utilizzati per descrivere il termine di sorgente dissipativo  $S_{ds,w}$  composto da due quantità una che valuta il contributo dissipativo in caso di rottura dell'onda (break) l'altro quando non c'è rottura (non-break) e il fattore che combina queste due quantità è  $f_{br}(\mathbf{k})$  che dipende direttamente dalla funzione  $F\{\ddot{B}(\mathbf{k})\}$ :  $f_{br}(\mathbf{k}) = \frac{1}{2}(1 + F\{\ddot{B}(\mathbf{k})\})$  ed in modo analogo l'esponente p:  $p = p_0 \frac{1}{2}(1 + F\{\ddot{B}(\mathbf{k})\})$

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = f_{br}(\mathbf{k}) S_{ds,break}(\sigma, \theta) + (1 - f_{br}(\mathbf{k})) S_{ds,non-break}(\sigma, \theta)$$

$$S_{ds,break}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} (\ddot{B}(\mathbf{k}))^p \sqrt{gk} (\tanh(kd))^{(2-p_0)/4} E(\sigma, \theta)$$

$$S_{ds,non-break}(\sigma, \theta) = C_{ds} \left[ (1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \right] \left( \frac{\tilde{S}}{\tilde{S}_{PM}} \right)^{p_1} \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta)$$

cioè la componente non-break è uguale alla precedente parametrizzazione della dissipazione di withecapping.

In SWAN sono usati i seguenti valori dei parametri:  $C'_{ds} = 5 \times 10^{-5}$  mentre  $p_0$  è posto uguale a 4 per valori di  $\mathbf{Y} = \frac{U_*}{c_{ph}} > 0.1$  e  $p_0=2$  per  $\frac{U_*}{c_{ph}} < 0.1$  ( $c_{ph}$  = velocità di fase =  $\sqrt{g \tanh(kd)/k}$ ).

La parametrizzazione di Van Der Westhuysen è utilizzata in abbinamento alla parametrizzazione del vento di Yan.

### Termine dissipativo dovuto all'attrito sul fondo

Il termine dissipativo  $S_{ds,b}$  dovuto all'attrito sul fondo è parametrizzato in SWAN da un lavoro di Hasselmann nel Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) [9]:

$$S_{ds,b} = -C_b \left( \frac{\sigma}{g \sinh(kd)} \right)^2 E(\sigma, \theta) \quad \text{con} \quad C_b = C_{JON} = 0.038 \text{m}^2 \text{s}^{-3} \text{ (oppure } 0.067 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$$

secondo Komen). Collins deriva una formulazione per il coefficiente  $C_b$ :  $C_b = C_f g U_{rms}$  (con  $C_f = 0.0015$ ) che è funzione del movimento orbitale  $U_{rms}$  rappresentato da:

$$U_{rms}^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \left( \frac{\sigma}{g \sinh(kd)} \right)^2 E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

Madsen con una formulazione simile per  $S_{ds,b}$  usa anche un coefficiente di attrito superficiale simile  $C_b = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms}$  ma il fattore  $f_w$  è ulteriormente parametrizzato in funzione della “lunghezza di scala dovuta all’attrito”  $K_N$  e dell’ “escursione di ampiezza vicino al fondo”  $a_b$  (per valori  $\frac{a_b}{K_N} < 1.57$  si ha  $f_w = 0.3$ ):  $\frac{10^{1/4} \sqrt{f_w}}{4 \sqrt{f_w}} = \frac{a_b}{K_N} 10^{m_f}$  con  $m_f = -0.08$ .

### Rottura dell’onda causata dalla diminuzione di profondità

La quantità di energia dissipata tramite rottura dell’onda in caso di variazione della profondità è parametrizzata ricorrendo alla “frazione di rottura”:  $Q_{br}$ . Questa quantità è formulata in funzione dell’altezza massima di onda verificabile ad una data profondità  $H_{max}$ :

$$\frac{1 - Q_{br}}{\ln(Q_{br})} = -8 \frac{E_{tot}}{H_{max}^2}$$

Tramite  $Q_{br}$  è possibile calcolare il tasso di dissipazione di energia per unità di superficie  $D_{tot}$  dovuto alla rottura dell’onda per effetto della diminuzione di profondità del mare:

$$D_{tot} = \alpha_{BJ} Q_{br} \tilde{\sigma} \frac{H_{max}^2}{8\pi}$$

Dove  $\alpha_{BJ} = 1$  e la relazione è presa da un lavoro di Battjes e Janssen [10]. Mediante  $D_{tot}$  è infine possibile definire il termine dissipativo di rottura dell’onda dovuto alla diminuzione di profondità  $S_{ds,br}$

$$S_{ds,br} = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

L’altezza massima d’onda  $H_{max}$  è calcolata in funzione della profondità  $d$  secondo la semplice relazione  $H_{max} = \gamma d$ , dove il coefficiente  $\gamma$  varia a secondo del tipo di batimetria tra 0.6 e 1.59 con un valore medio di 0.79.

Thornton e Guza [11] proposero una differente formulazione della energia per unità di superficie  $D_{tot}$  che, nel loro lavoro, dipende dalla “densità di probabilità di rottura d’onda”  $p_b(H)$  che è il prodotto della “frazione di rottura”:  $Q_{br}$  per la “probabilità di altezza d’onda di Rayleigh”  $p(H)$ :  $p_b(H) = Q_{br} p(H) = Q_{br} \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-(H/H_{rms})^2}$  ma anche  $Q_{br}$  è formulata diversamente:  $Q_{br} = \left(\frac{H_{rms}}{\varepsilon d}\right)^n$  dove  $\varepsilon$  è l’indice di rottura e  $n=4$ . Con questi parametri, Thornton e Guza introducendo un altro coefficiente di proporzionalità  $B$ , formulano così il “tasso di dissipazione di energia per unità di superficie”:  $D_{tot} = \frac{B^3 \tilde{\sigma}}{8\pi d} \int_0^\infty H^3 p_b(H) dH = \frac{3B^3 \tilde{\sigma}}{32\sqrt{\pi} d} Q_{br} H_{rms}^3$  facilmente riconducibile ad una differente parametrizzazione del termine dissipativo  $S_{ds,br}$ .

### Interazione non lineare: schema a 4 onde (DIA)

L’interazione non lineare tra onde è stata studiata da Hasselmann e prevede che esista una interazione tra pacchetti composti da 4 onde con frequenze e numeri d’onda tali che verifichino le relazioni:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3 + \sigma_4 \text{ e } \vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4.$$

In questo caso l’intensità di tale interazione è prescritta dall’integrale di Boltzmann che determina la tendenza della densità di azione  $N_1$  alla frequenza  $\sigma_1$ :

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \iiint \ddot{\delta} G(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) (N_1 N_2 (N_3 + N_4) - N_3 N_4 (N_1 + N_2)) d\vec{k}_2 d\vec{k}_3 d\vec{k}_4$$

Con  $\ddot{\delta} = \delta(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 - \vec{k}_4) \cdot \delta(\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4)$  tale da garantire tramite le funzioni delta “ $\delta()$ ” il rispetto dei vincoli tra numeri d’onda e frequenze (relazioni **3a**), mentre G è un complicato coefficiente di accoppiamento funzione dei 4 vettori numero d’onda  $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4$ .

Il calcolo diretto dell’integrale di Boltzmann è realizzabile solo ad un costo computazionale non proponibile, pertanto Hasselmann propose una approssimazione chiamata DIA (Discrete Interaction Approximation) che, supposte certe condizioni di simmetria, mantiene alcune caratteristiche della soluzione completa, quali il lento spostamento della frequenza di picco verso le frequenze inferiori e la stabilizzazione dello forma dello spettro.

La DIA presuppone che il quadrupletto di onde che interagiscono abbiano uguali due frequenze ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ) e i relativi numeri d’onda coincidenti ( $\vec{k}_1 = \vec{k}_2$ ), mentre le altre due frequenze seguono la relazione:

$$\sigma_3 = \sigma_+ = \sigma_1(1 + a); \quad \sigma_4 = \sigma_- = \sigma_1(1 - a)$$

con  $a=0.25$  in SWAN.

Queste condizioni, insieme a quelle più generali **(3a)** e alla relazione di dispersione, determinano anche i valori dei vettori numero d’onda  $\vec{k}_3, \vec{k}_4$  che risultano in due soluzioni consistenti in:

- 1)  $\vec{k}_3$  orientato a  $-11.48^\circ$  rispetto a  $\vec{k}_1$  associato a  $\vec{k}_4$  orientato a  $+33.56^\circ$ , sempre rispetto a  $\vec{k}_1$

Oppure la coppia speculare costituita dalle onde con:

- 2)  $\vec{k}_3$  orientato a  $+11.48^\circ$  associato con  $\vec{k}_4$  orientato a  $-33.56^\circ$ , sempre rispetto a  $\vec{k}_1$ .

Con queste approssimazioni l’integrale di Boltzmann è semplificabile nelle seguenti formulazioni dei termini sorgente che parametrizzano l’effetto dell’interazione non lineare alla frequenza  $\sigma_1$  e alle frequenze con essa interagenti ( $\sigma_+, \sigma_-$ ):

$$\begin{pmatrix} S_{nl4} \\ S_{nl4+} \\ S_{nl4-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{C_{nl4}}{g^4} \sigma \left[ E^2 \left( \frac{E_+}{(1+a)^4} + \frac{E_-}{(1-a)^4} \right) - 2E \frac{E_+ E_-}{(1-a^2)^4} \right]$$

Dove  $E = E(\sigma, k)$ ;  $E_+ = E(\sigma_+, k_3)$ ;  $E_- = E(\sigma_-, k_4)$  in SWAN il coefficiente  $C_{nl4} = 3 \cdot 10^7$

Nell’implementazione numerica il valore  $E$  alla frequenza  $\sigma$  che deve essere risolta numericamente per il tempo successivo, necessita dei valori al tempo attuale di  $E_+$  e  $E_-$  alle frequenze  $\sigma_+, \sigma_-$  che saranno ottenute per interpolazione tra le frequenze risolte più vicine.

## Simulazioni ad alta risoluzione

Come detto in precedenza, sono state identificate tre aree nel bacino Mediterraneo più interessanti dal punto di vista dell’energia dal mare. Per queste zone sono state effettuate simulazioni ad alta risoluzione spaziale. Le condizioni al contorno sono state ricavate dalla simulazione per l’intero bacino Mediterraneo effettuata con WAM, memorizzate alla risoluzione temporale di 3 ore.

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando una discretizzazione dello spettro in 32 livelli di frequenza a partire da 0.06 Hz e 36 direzioni angolari. Per consistenza con la simulazione dell’intero Mediterraneo, anche in questo caso il modello è stato forzato in superficie con i campi di analisi del vento a 10 m, prodotti alla frequenza di 6 ore dal ECMWF alla risoluzione di  $\frac{1}{4}^\circ$ .

Nelle figure 8 e 9 sono riportati i domini di calcolo per i modelli ad alta risoluzione e la batimetria utilizzata, ricavata dalla Carta Batimetrica degli Oceani (GEBCO) alla risoluzione di 30 arco-secondi [12]. Si può notare che la parte di mare a ovest della Sicilia e circostante le isole Egadi è caratterizzata da ampie zone con profondità inferiori a 100 m. Valori dello stesso ordine si trovano nella zona nord della Sardegna nel Golfo dell’Asinara, e lungo tutta la fascia costiera. Per quanto riguarda invece l’isola di Pantelleria, le profondità nella zona nord-ovest raggiungono nel giro di pochi chilometri valori superiori ai 400 m.

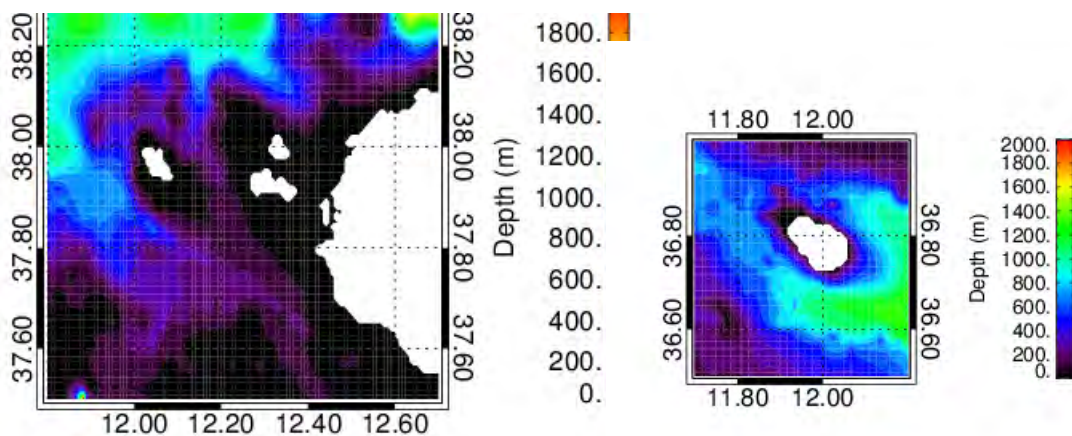


Figura 8 – Batimetria della dominio ad alta risoluzione ( $1/120^\circ$ ) per la zona nord-occidentale della Sicilia e per l'isola di Pantelleria.

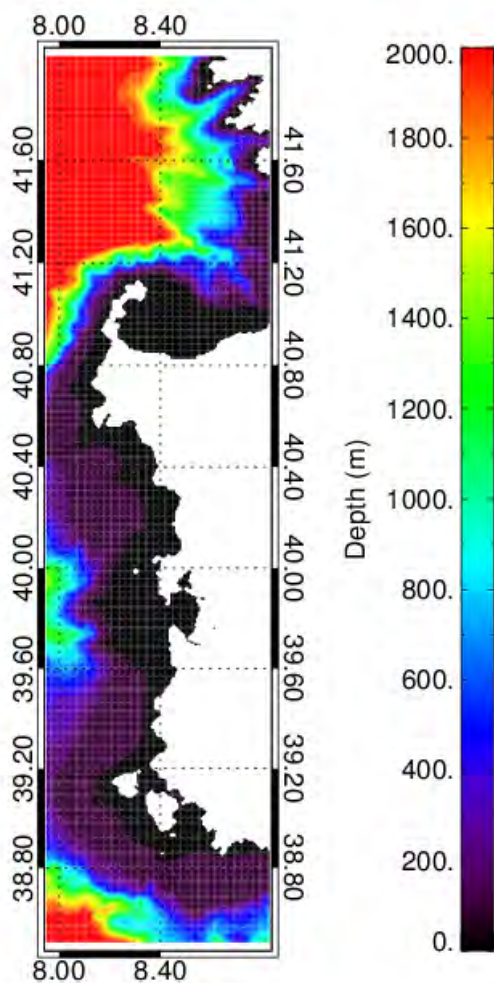


Figura 9 – Batimetria del dominio ad alta risoluzione ( $1/120^\circ$ ) per la zona occidentale della Sardegna.

Per la simulazione ad alta risoluzione della Sardegna è stato adottato un dominio di calcolo particolarmente esteso latitudinalmente, che include tutta la costa occidentale dell'isola e raggiunge a nord la latitudine di 42°. Questa scelta è stata fatta per inserire all'interno del dominio una zona caratterizzata da un forzante di vento particolarmente intenso.

Dall'analisi della batimetria esposta in precedenza, si è deciso di utilizzare il dominio relativo all'isola di Pantelleria per evidenziare il solo effetto della risoluzione spaziale tramite il confronto tra la climatologia realizzata con il codice WAM alle due diverse risoluzioni di 1/16° e di 1/120°. In figura 10 è mostrato il confronto tra le due simulazioni relativo all'energia media calcolata nel periodo 2001-2010. Le due mappe risultano uguali negli aspetti generali; la maggior parte dell'energia raggiunge l'isola di Pantelleria provenendo dal canale di Sicilia, i valori più elevati vengono quindi raggiunti nella zona nord. La schermatura fornita dall'isola risulta molto meglio definita nella simulazione a 1/120°.

Nella figura sono indicate anche le posizioni di due punti: (a) vicino alla costa e (b) a circa 10 Km al largo in direzione NW. Per questi punti nelle figure 11 e 12 è riportata la distribuzione dell'energia media annua in funzione del periodo  $T_e$  e dell'altezza significativa  $H_s$ . In entrambi la direzione principale di provenienza è NW ma la distribuzione direzionale è più concentrata vicino costa (80%) che nel punto al largo (60%). L'energia media annua si riduce di più del 20% verso costa, passando da 6.7 kW/m a 5.2 kW/m tra i due punti. La distribuzione di energia è simile ma con un leggero aumento vicino costa della frazione degli stati d'onda con periodo alto e bassa altezza significativa. Per la simulazione a più bassa risoluzione un solo punto di griglia rappresenta entrambe le posizioni ed assume un valore analogo a quello del punto al largo.

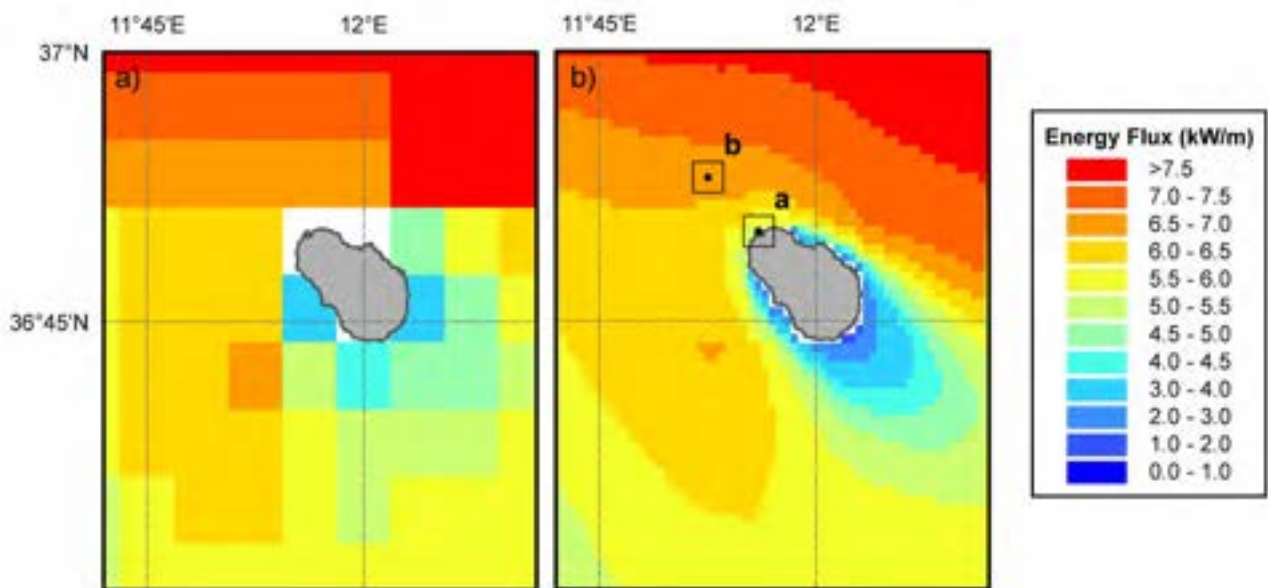


Figura 10 – Distribuzione dell'energia media intorno all'isola di Pantelleria. Confronto tra il risultato ottenuto con il modello WAM ad 1/16° ed ad 1/120°. Con (a) e (b) sono indicati i punti per cui è riportata la distribuzione di energia nelle Figure 11 e 12.

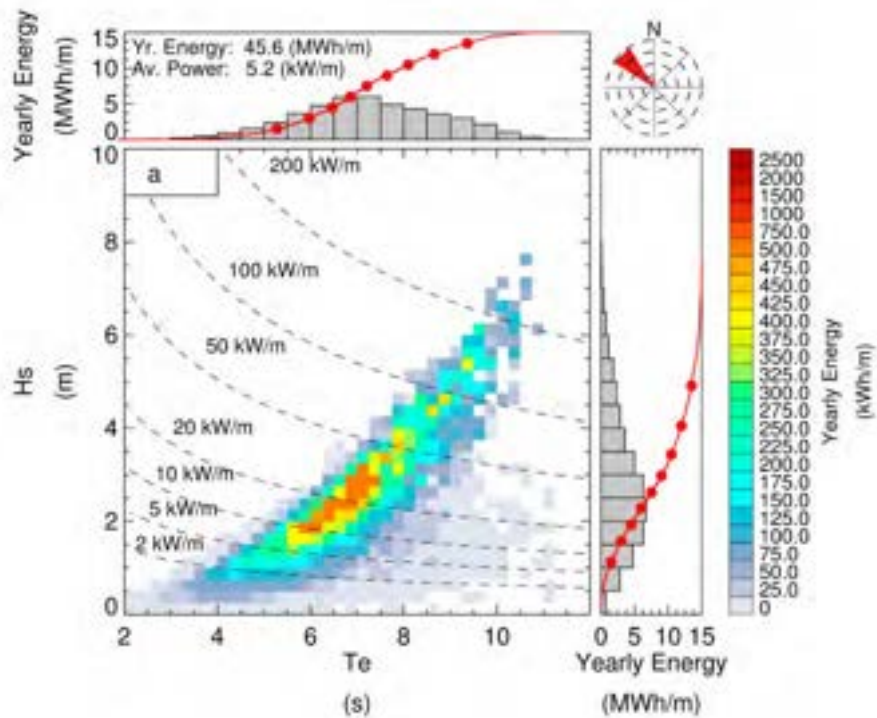


Figura 11 – Energia media annua in funzione del periodo  $T_e$  e dell'altezza significativa  $H_s$  per il punto (a) in prossimità dell'isola di Pantelleria. Media sul periodo 2001-2010 relativa alla simulazione alla risoluzione di  $1/120^\circ$  con il modello WAM.

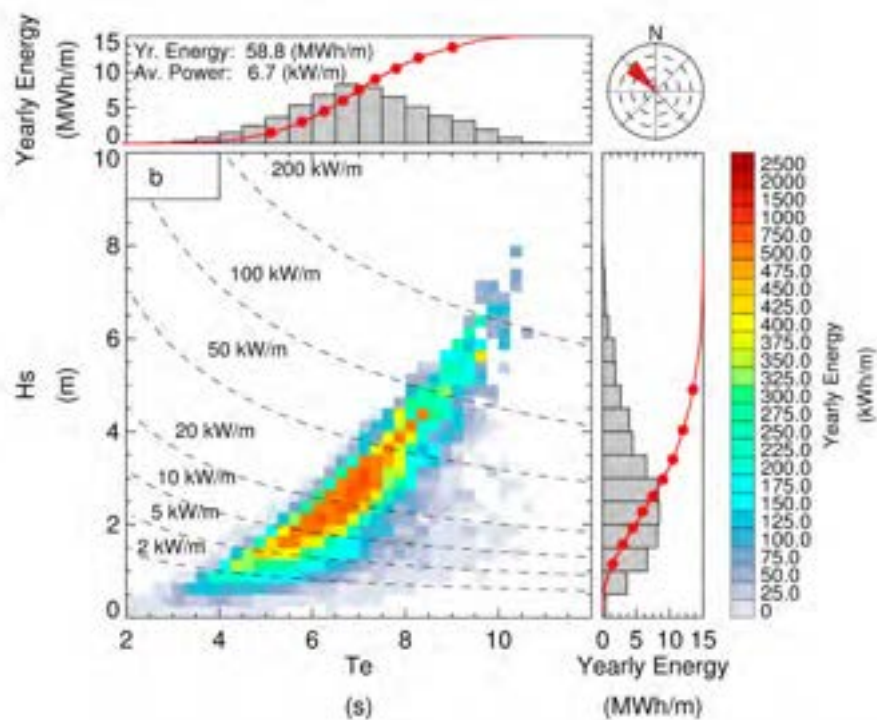


Figura 12 – Energia media annua in funzione del periodo  $T_e$  e dell'altezza significativa  $H_s$  per il punto (b) in prossimità dell'isola di Pantelleria. Media sul periodo 2001-2010 relativa alla simulazione alla risoluzione di  $1/120^\circ$  con il modello WAM.

Per le simulazioni delle altre due aree considerate: la costa nord-occidentale della Sicilia e la costa occidentale della Sardegna è invece stato applicato il modello SWAN alla stessa risoluzione di  $1/120^\circ$ . Lo spettro di energia dell'onda è stato rappresentato con lo stesso numero di valori di frequenza (32) e lo stesso numero di direzioni (36) usate per il codice WAM. La scelta del codice SWAN ha però consentito di introdurre la rappresentazione di processi fisici caratteristici della propagazione d'onda in acque basse come la rifrazione, la dissipazione da attrito sul fondo o da rottura delle onde. Le climatologie sono state calcolate in questo caso su simulazioni della lunghezza di 5 anni dal 2001 al 2005.

La mappa della potenza media per la Sicilia, in figura 13, mostra valori intorno a  $6 \text{ kW/m}$  solo nelle zone più esterne verso ovest e una rapida diminuzione verso costa, con una vasta area di valori inferiori a  $4 \text{ kW/m}$ . Si può quindi notare che le potenze intorno al valore di  $7 \text{ kW/m}$  che erano state calcolate utilizzando la simulazione ad  $1/16^\circ$ , per una distanza dalla costa di  $12 \text{ km}$ , risultano notevolmente ridotte.

In figura 14 è riportata la mappa della potenza media per la zona della Sardegna. La situazione risulta in questo caso molto diversa con una riduzione limitata della potenza rispetto a quella ricavata dalla simulazione dell'intero bacino Mediterraneo. In particolare nella zona a nord di Alghero, vengono raggiunti valori di potenza dell'ordine di  $10 \text{ kW/m}$  in prossimità della costa.

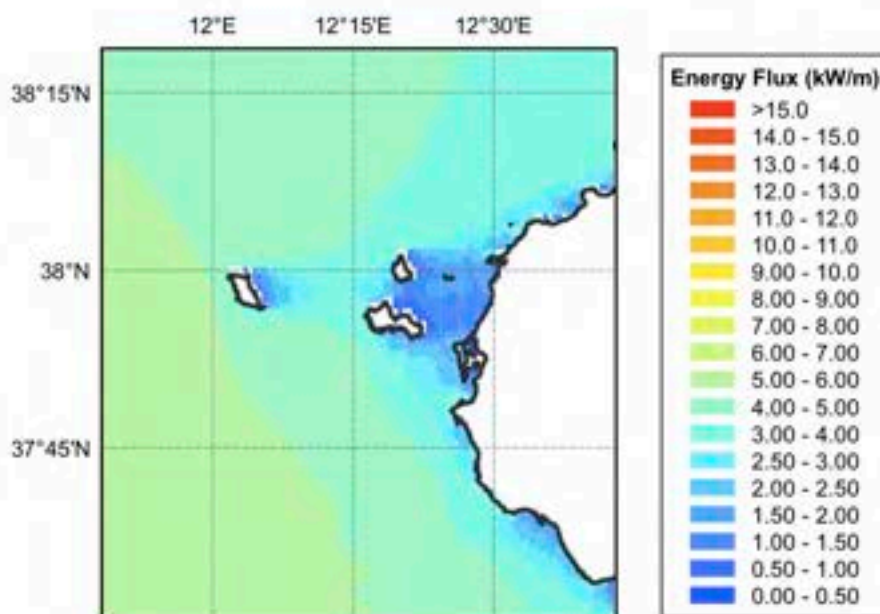


Figura 13 – Distribuzione dell'energia media per la costa nord-occidentale della Sicilia. Risultato ottenuto con il modello SWAN alla risoluzione di  $1/120^\circ$ . Media calcolata per il periodo 2001-2005.

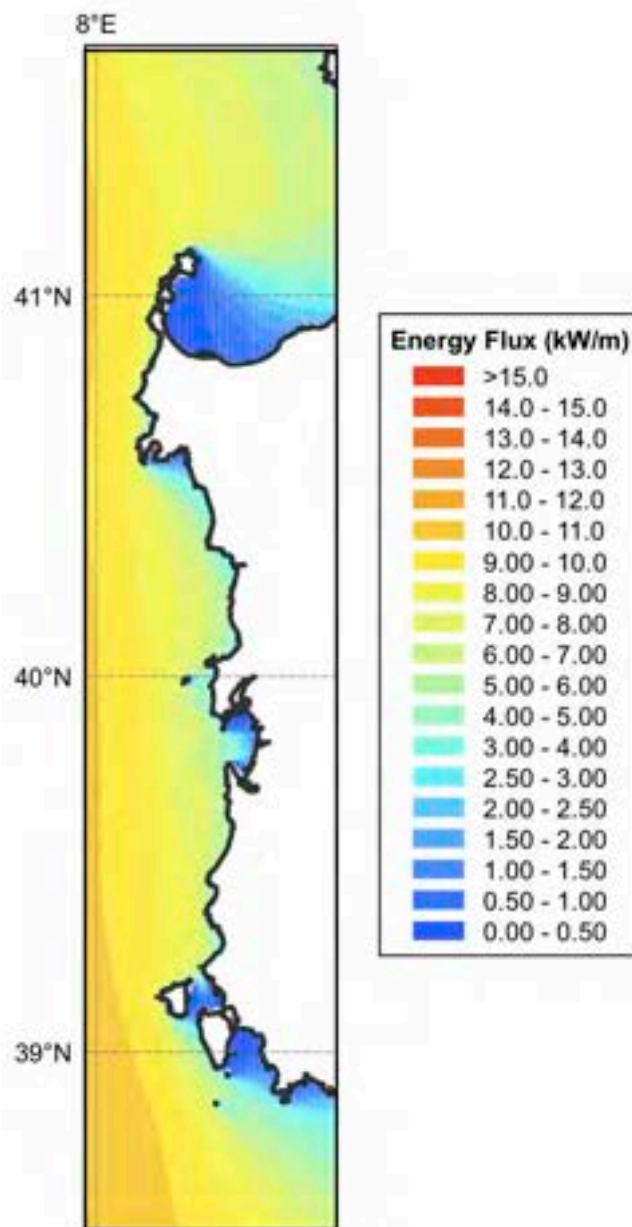


Figura 14 - Distribuzione dell'energia media per la zona occidentale della Sardegna. Risultato ottenuto con il modello SWAN alla risoluzione di 1/120°. Media calcolata per il periodo 2001-2005.

## Tecnologie GIS per la valutazione della risorsa energia dal mare

Il Geographic Information System (GIS) è una applicazione software che consente l'acquisizione, la memorizzazione, il controllo, l'integrazione, l'elaborazione e la rappresentazione di dati che sono spazialmente riferiti alla superficie terrestre.

Il crescente interesse suscitato dalla Scienza dell'Informazione Geografica combinato al successo delle sempre più sofisticate tecnologie GIS (Geographic Information System) ha fortemente incentivato lo sviluppo di nuovi campi di applicazione per la conduzione dei quali i Sistemi Informativi Geografici si sono rivelati uno strumento efficace ed insostituibile. Tali circostanze hanno determinato lo sviluppo di nuove tecniche, sia hardware che software, rendendo di fatto possibile l'utilizzo di applicazioni GIS, in campi fino a ieri inesplorati, capaci di soddisfare le più svariate richieste provenienti non solo dal mondo della ricerca scientifica (modellistica climatica, oceanografia, analisi territoriale ambientale, elaborazioni geostatistiche, assessment) ma anche da quello della pianificazione del territorio, delle politiche ambientali, del monitoraggio socio-economico di un territorio, e, non ultimo, dei servizi offerti ai cittadini nell'era dell'Information Communication Technology (ICT) (eGovernment).

Le applicazioni condotte con l'uso del GIS hanno come risultato finale la creazione di carte tematiche che costituiscono l'essenza del GIS stesso e dalla loro lettura è possibile cogliere, analizzare, risolvere, situazioni di criticità di carattere ambientale, sociale, economico, antropico ecc. ovvero tutte quelle situazioni legate alla valutazione, al controllo ed alla gestione di un territorio.

La tecnologia GIS oltre a fornire uno strumento per correlare dati di natura assai diversa tra loro, ha introdotto la possibilità di *vedere* i dati e/o l'ammontare dei dati stessi su una mappa fornendo anche la posizione di dette informazioni in spazio e tempo. La rappresentazione dinamica della realtà permette di indagare sullo stesso aspetto in diversi modi. Inoltre per mezzo della tecnologia GIS è possibile legare al dato geografico, avere in linea ed analizzare, numerosi indicatori statistici con la possibilità di conoscere il tipo e l'ammontare dell'attività antropogenica nell'area sotto valutazione.

I Geographic Information Systems costituiscono lo strumento attraverso il quale la conoscenza scientifica dei problemi ambientali, ottenuta attraverso le tecniche di misura, la manipolazione e l'interpretazione dei dati, arricchita dalla possibilità di usare serie storiche di dati, si accordano con le reali necessità delle pubbliche amministrazioni e dei cittadini allo scopo di aiutarli a risolvere i loro problemi sociali e/o socioeconomici.

In questo capitolo viene descritto come le tecnologie GIS siano in grado di fornire un utile strumento per la valutazione della risorsa energia dal mare, consentendo una collocazione di questa risorsa nello spazio e nel tempo. I risultati qui presentati sono l'evoluzione della precedente relazione che ha ampiamente trattato la rappresentazione GIS del potenziale energetico lungo le coste italiane. Il GIS consente di associare alla rappresentazione grafica di ogni elemento del territorio tutti gli attributi che ne definiscono le proprietà non solo spaziali, ma anche fisiche, temporali etc. Gli attributi risiedono in un database: ogni operazione eseguita nel database, secondo le sue funzionalità tipiche, può essere visualizzata nel suo risultato grafico.

Lo strumento GIS può aiutare a capire se l'energia sia di facile sfruttamento, valutando le realtà sociali, ambientali e naturalistiche che insistono nelle zone dove sarebbe potenzialmente possibile installare dispositivi per una produzione di energia elettrica che andrebbero ad impattare con il mare aperto e con l'ambiente costiero.

Per quanto riguarda la fascia costiera italiana, i dati ondametrici disponibili provengono principalmente 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 informazioni relative a queste boe sono state inserite all'interno del sistema GIS.

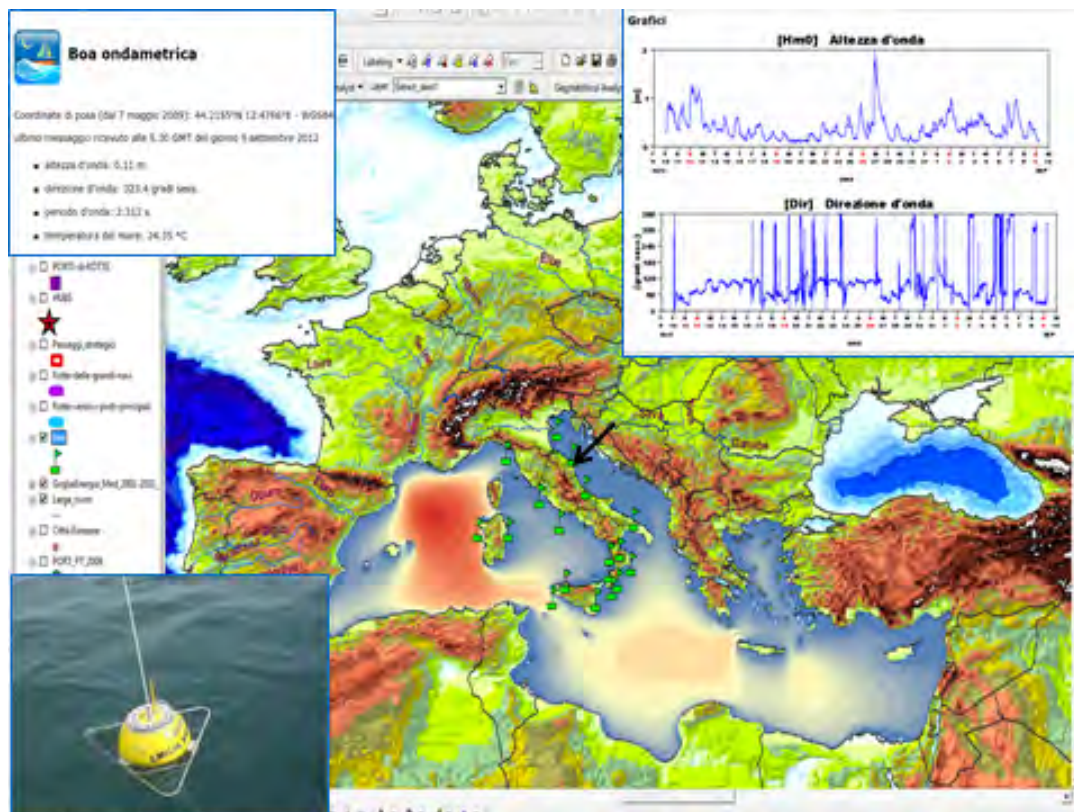


Figura 15 – Strato informativo rete ondometrica nazionale sovrapposto allo strato del potenziale energetico da onde.

La mappa GIS della figura 15 mostra lo strato informativo rete ondometrica nazionale. Trovandoci in ambiente GIS, cliccando ad esempio sulla boa indicata dalla freccia, si attiva la funzione *Identify*, che produce l'apertura di finestre contenenti informazioni come, ad esempio, l'esatta posizione in coordinate geografiche e l'immagine della boa a mare. Si possono inoltre consultare i risultati delle misure effettuate dai dispositivi montati sulla boa stessa.

I risultati delle simulazioni modellistiche effettuate con il modello WAM su tutto il bacino del Mediterraneo sono stati inseriti all'interno del sistema GIS. In questo caso sono quindi disponibili informazioni sull'intero bacino relative al potenziale energetico delle onde. I risultati sono stati memorizzati sotto forma di files in formato NetCDF (Network Common Data Form). Tali files sono statici e non permettono la sovrapposizione di altri tipi di informazioni caratterizzanti.

Tramite opportune elaborazioni condotte con *tools* presenti all'interno dei software GIS, i files NetCDF sono stati trasformati in un formato GIS compatibile e caricati in un progetto GIS per le elaborazioni territoriali. In questo modo, si possono visualizzare degli *spot* sulle aree a maggiore significatività, dal punto di vista del potenziale energetico, e combinare tale potenziale con altri tipi di dati caratterizzanti l'area anche dal punto di vista socio-economico.

Da una mappa di questo tipo (figura 16) si possono fare ulteriori visualizzazioni a spot sulle aree a maggiore significatività e, usando l'*Identify*, si ottiene il risultato mostrato nella figura 17. Cliccando sull'area del grigliato del potenziale, si legge l'energia potenziale in quel punto.

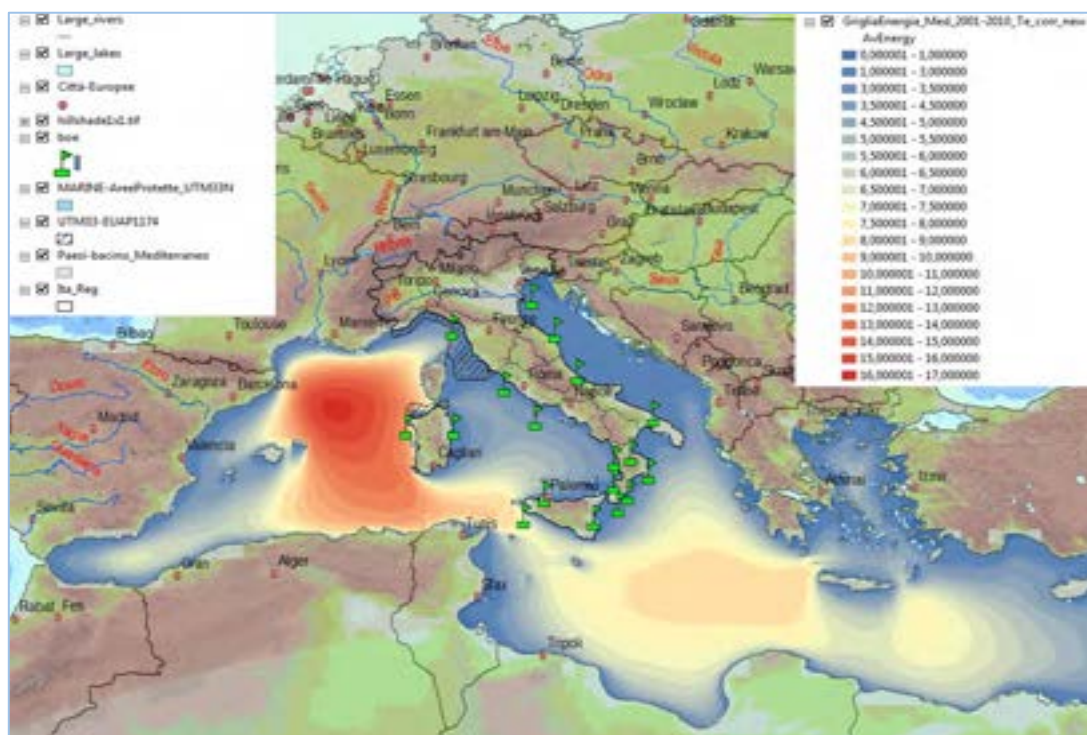


Figura 16 – Strato informativo del potenziale energetico da onde.

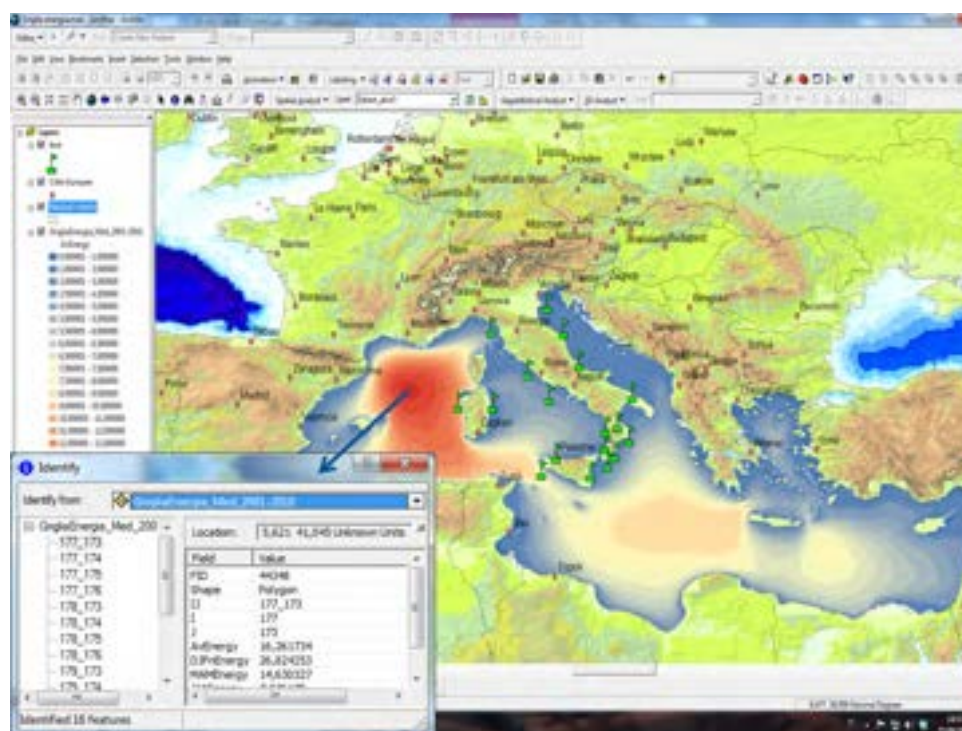


Figura 17 – Strato informativo del potenziale energetico da onde con interrogazione dei valori in un punto.

Il software GIS è stato utilizzato anche per inserire i risultati delle simulazioni ad alta risoluzione all'interno delle mappe ottenute per l'intero Mediterraneo. Nelle figure 18 e 19 sono mostrati degli *spot* relativi ai dati di potenziale energetico centrati sulla zona della Sardegna.

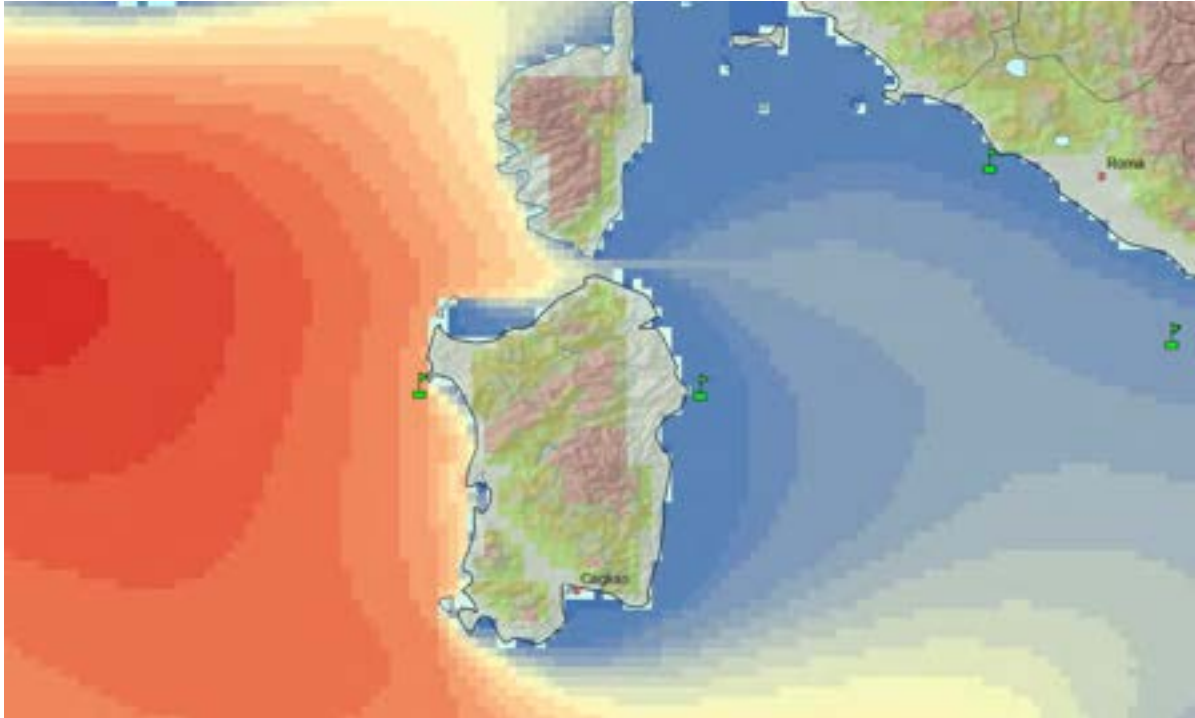


Figura 18 Spot potenziale energetico per il Mediterraneo occidentale alla risoluzione di  $1/16^\circ$ .

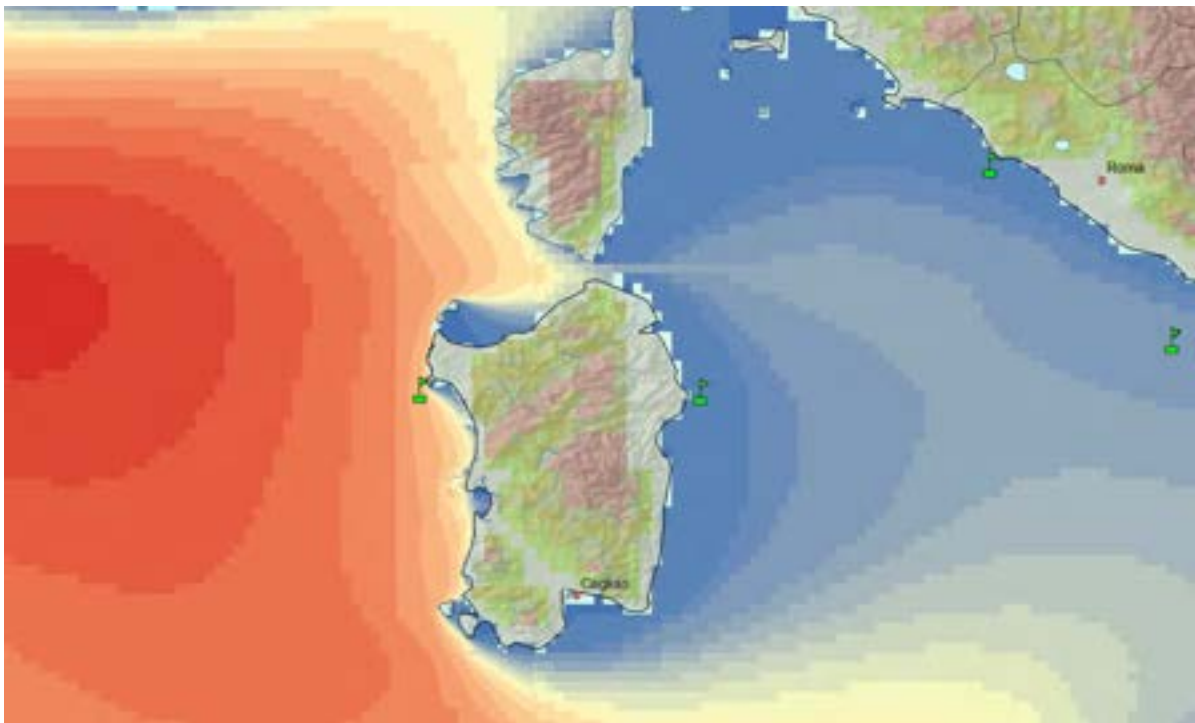


Figura 19 Spot potenziale energetico per il Mediterraneo occidentale con inserimento del potenziale calcolato a più alta risoluzione.

La figura 20 mostra i dati del sistema GIS importati all'interno di Google Earth con dati relativi ai siti dei porti, dei grandi porti, degli hubs, delle rotte delle grandi navi ecc.

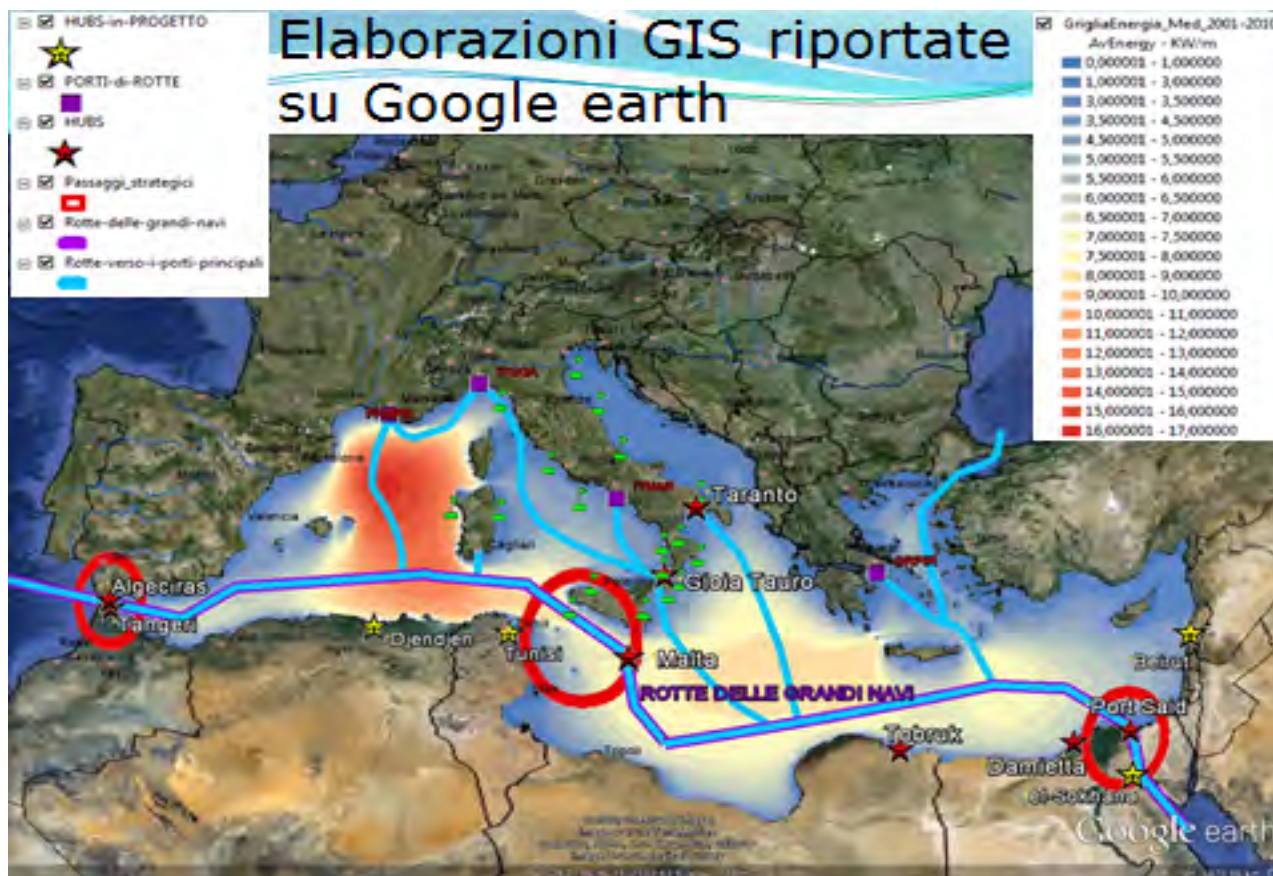


Figura 20 –Elaborazioni GIS riportate su Google Earth, dati tratti dalla rivista LIMES.

La “combinazione” dei dati relativi al potenziale energetico del bacino del Mediterraneo con dati attinenti a una serie di attività umane, che si svolgono nel bacino stesso o lungo le coste della penisola italiana, rende possibile una valutazione della possibilità di installare dispositivi di produzione di energia.

Si possono individuare diversi tipi di impatti che possono essere evidenziati con l’uso di mappe tematiche GIS:

- Impatto economico-commerciale: visualizzazione ed individuazione sulla carta delle rotte delle grandi navi, delle autostrade del mare, delle rotte per la pesca commerciale con grandi reti, ecc.;
- Impatto socio-politico: visualizzazione dei passaggi strategici che derivano dalla morfologia stessa del bacino del Mediterraneo e che caratterizzano le rotte delle grandi navi;
- Impatto commerciale: la ricca distribuzione lungo le coste del bacino del Mediterraneo di grandi porti, hubs, ecc. che caratterizzano l’andamento delle autostrade del mare;
- Impatto naturalistico-ambientale: verifica della posizione delle aree, a elevato potenziale energetico, rispetto a parchi marini, parchi costieri, ecc.

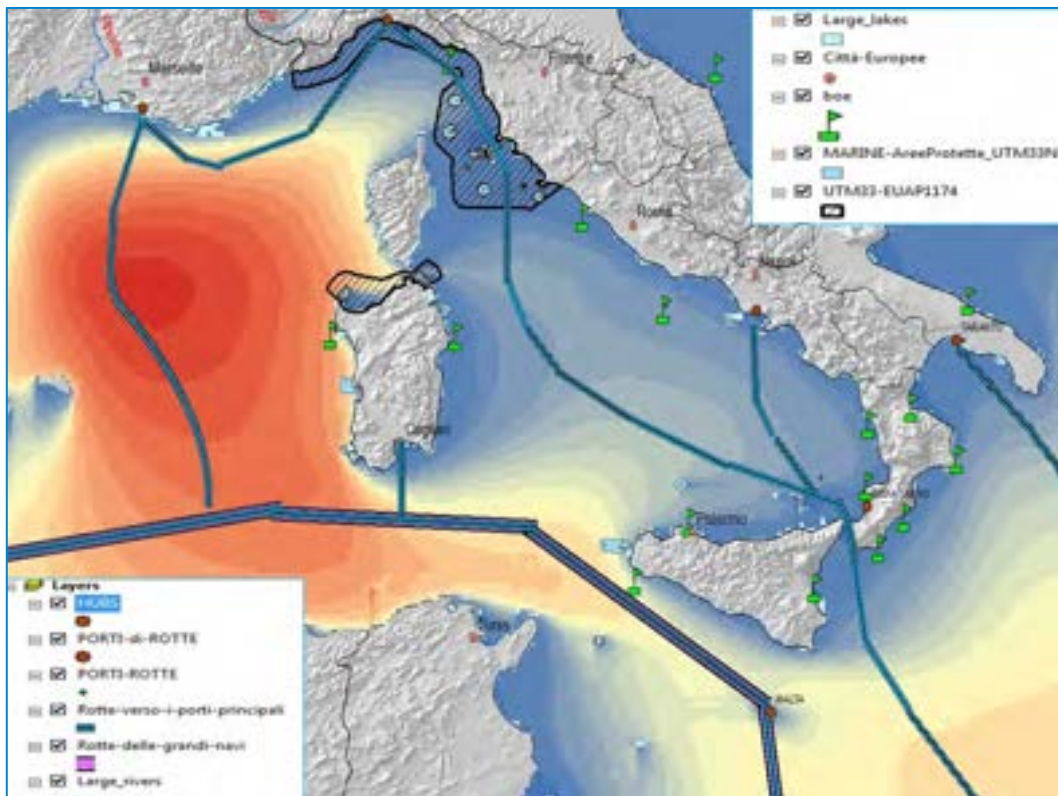


Figura 21 –Elaborazioni GIS riportate su Google Earth, dati tratti dalla rivista LIMES.

Nella figura 21 viene mostrato un ingrandimento di come il potenziale energetico si inquadra rispetto alle aree marine protette, alle autostrade del mare, alle rotte delle grandi navi, ecc. nella zona del Mediterraneo occidentale.

All'interno del GIS verranno inserite nel seguito dell'attività altre tematizzazioni di tipo naturalistico quali gli impatti su fauna e flora.

I principali impatti da considerare sulla fauna marina sono:

- i suoni creati nel mare dai movimenti prodotti dai dispositivi di conversione che potrebbero produrre l'allontanamento di specie autoctone e magari attrarne delle altre;
- i campi elettromagnetici per il trasporto a terra dell'energia prodotta a mare, che potrebbe risolversi con l'interramento dei cavi stessi sotto il livello del fondale marino.

## Conclusioni

Un modello di onde alla risoluzione di  $1/120^\circ$  è stato utilizzato per costruire mappe ad alta risoluzione dell'energia disponibile da moto ondoso, calcolate su base climatologica. Le simulazioni sono state effettuate per tre zone della costa italiana individuate in base allo studio effettuato nella precedente annualità. In particolare sono state scelte le aree caratterizzate da una maggiore disponibilità di energia da moto ondoso: la costa occidentale della Sardegna e quella sud-occidentale della Sicilia. La terza area selezionata è stata quella relativa all'isola di Pantelleria che può risultare interessante per la produzione di energia dal mare anche per la difficoltà di approvvigionamento energetico.

Un confronto tra la climatologia ricavata alla risoluzione di  $1/16^\circ$  e quella ad  $1/120^\circ$  ha evidenziato l'importanza dell'utilizzo di risoluzioni dell'ordine delle centinaia di metri per consentire l'individuazione dei siti più idonei al fine di installazioni a scopo energetico, anche in considerazione della riduzione dell'energia all'approssimarsi della costa.

Un ulteriore strumento per la scelta dei siti è stato individuato nel GIS (Geographic Information System) che consente di analizzare, simultaneamente all'energia disponibile, gli altri parametri che devono essere presi

in considerazione per la scelta dei siti idonei. I valori di potenziale energetico sono quindi stati inseriti in un sistema GIS insieme con le principali tematizzazioni di interesse.

## Riferimenti bibliografici

1. G. Sannino, A. Bargagli, A. Carillo, E. Caiaffa, E. Lombardi, P. Monti, G. Leuzzi - Valutazione del potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste Italiane - Report RdS/2011/151 - 2011
2. L. Cavaleri, P. Malanotte-Rizzoli, "Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications". : J. Geophys. Res., 86, No. C11 (1981) 10,961-10,973
3. G.J. Komen, S. Hasselmann, and K. Hasselmann, 1984, On the existence of a fully developed wind - sea spectrum, J. Phys. Oceanogr., Vol. 14, pp. 1271-1285
4. P.A.E.M. Janssen, "Wave induced stress and the drag of air flow over sea waves", J. Phys. Oceanogr., 19, (1989) 745-754
5. P.A.E.M. Janssen, "Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting", J. Phys. Oceanogr., 21, (1991) 1631-1642
6. C., Mastenbroek, G. Burgers, P.A.E.M. Janssen, "The dynamical coupling of a wave model in a storm surge model through the atmospheric boundary layer", J. Phys. Oceanogr., 23, (1993) 1856-1866
7. A.J. Van der Westhuysen, M. Zijlema, J.A. Battjes, "Nonlinear saturation based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water", Coast. Engng., 54, (2007) 151-170
8. W.J. Pierson, L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii", J. Geophys. Res., 69, 24, (1964) 5181-5190
9. K.Hasselmann , T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, H. Walden, "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)", Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8 (1973)
10. J. A. Battjes, and J.P.F.M. Janssen, 1978, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp. 569 -587
11. E.B. Thornton, R.T. Guza, " Transformation of wave height distribution", J. Geophys. Res., 88, C10, (1983) 5925-5938
12. GEBCO. [http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry/data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry/data/). 2010