

Sistema di monitoraggio multidisciplinare per una gestione resiliente delle aree costiere - Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas



Attività 4.3: Sviluppo del sistema di allertamento da allagamenti costieri a scala di unità fisiografica - Deliverable 4.3.1

Tratto di costa con sistema di allertamento degli allagamenti

Dicembre 2023

Sistema di monitoraggio multidisciplinare per una gestione resiliente delle aree costiere - Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas

Attività 4.3: Sviluppo del sistema di allertamento da allagamenti costieri a scala di unità fisiografica - Deliverable 4.3.1

Tratto di costa con sistema di allertamento degli allagamenti

Partner responsabile:

- Università degli Studi di Catania – Coord. Prof. L. Cavallaro

## Sommario

Indice delle Figure .....	4
1 Premessa.....	5
2 Introduzione.....	6
3 Modello di propagazione del moto ondoso .....	10
3.1 Generalità .....	10
3.2 Il codice SWAN.....	10
3.3 Griglie di calcolo.....	12
4 Modello empirico per la stima della risalita del moto ondoso ....	14
4.1 Generalità .....	14
4.2 Valutazione delle caratteristiche morfologiche della spiaggia in corrispondenza dei transetti selezionati.....	14
4.3 Metodologia adottata per la stima della risalita del moto ondoso .....	16
5 Rete neurale artificiale .....	18
6 Calibrazione della rete neurale.....	20
6.1 Generalità .....	20
6.2 Selezione degli stati di mare .....	20
6.3 Ottimizzazione del numero di neuroni.....	21
7 Conclusioni .....	27
Bibliografia .....	29

## Indice delle Figure

Figura 1.	Individuazione dell'area in esame.....	8
Figura 2.	Individuazione delle sezioni utilizzate nello studio (1/3). Ad ogni sezione è stato associato un codice identificativo.....	8
Figura 3.	Individuazione delle sezioni utilizzate nello studio (2/3). Ad ogni sezione è stato associato un codice identificativo.....	9
Figura 4.	Individuazione delle sezioni utilizzate nello studio (3/3). Ad ogni sezione è stato associato un codice identificativo.....	9
Figura 5	Dominio di calcolo comprendente le coste della Sicilia (fonte: PRCEC,2020). .....	12
Figura 6	Rappresentazione schematica della rete neurale tipo utilizzata nel presente studio.....	19
Figura 7	Dati di moto ondoso selezionati a largo. Il grafico riporta gli stati mare stimati nel punto griglia del CMEMS di coordinate 36.5208°N- 15.0833°E e in rosso i dati di moto ondoso selezionati con il metodo MDA. ....	21
Figura 8	Sezione 813. Confronto tra i dati di risalita del moto ondoso stimati mediante il modello empirico e quelli valutati mediante la rete neurale. ....	23

## 1 Premessa

Nell'ambito del progetto di ricerca *REMACO Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas*, il Work Package 4 (WP4) ha l'obiettivo di sviluppare un modello di previsione della risalita del moto ondoso lungo le spiagge e quindi delle aree allegate.

La presente relazione riporta pertanto i risultati delle analisi condotte per lo sviluppo di un modello di previsione della risalita del moto ondoso in un tratto di costa ricadente nei territori di Ragusa e Siracusa con un'estensione totale di oltre 35 km.

## 2 Introduzione

Il presente progetto si focalizza sulle misure di preparazione e, in particolare, sullo sviluppo di sistemi di *Early Warning* per la previsione degli allagamenti dovuti al moto ondoso.

In generale, la previsione di fenomeni di allagamento nelle zone costiere può essere condotta adottando i dati meteomarini forniti dai centri di previsioni. Tuttavia, i modelli numerici adottati da tali centri non consentono di stimare le caratteristiche del moto ondoso in prossimità della costa, né tanto meno di stimare gli effetti sottocosta del moto ondoso. Per tale motivo è necessario adottare ulteriori modelli numerici che consentono di riprodurre adeguatamente i processi che avvengono durante la propagazione dell'onda da largo fino alla riva. Tuttavia, tali modelli possono richiedere elevati tempi computazionali.

Una possibile strategia per superare tale limite è l'impiego di reti neurali che consentono di stimare in tempi estremamente ridotti gli effetti del moto ondoso sottocosta come, ad esempio, la risalita del moto ondoso e le aree allagate.

Al fine di adottare tali reti è necessario realizzare un database costituito da dati di input, che rappresentano le condizioni meteomarine a largo e da dati di output, che rappresentano delle misure degli effetti del moto ondoso sottocosta. Attraverso un processo di allenamento, le reti neurali riescono ad individuare i legami funzionali tra i dati di input e i dati di output. Pertanto, una volta note le condizioni a largo è possibile istantaneamente valutare gli effetti sottocosta del moto ondoso.

Tale metodologia è stata adottata per l'area di studio ricadente nei territori di Siracusa e Ragusa. Il tratto di costa considerato ha un'estensione totale pari a oltre 35 km.

La Figura 1 riporta l'individuazione del tratto di costa oggetto del presente studio.

Dalla Figura 2 alla Figura 4 si riporta invece la localizzazione delle sezioni adottate per discretizzare il tratto di costa considerato. In particolare, i punti in verde indicano le posizioni dei punti griglia da cui sono stati stimati i dati di moto ondoso sottocosta, i punti bianchi sulla costa indicano le sezioni ricadenti sulle spiagge basse e i punti rossi indicano invece altre tipologie di costa in cui si ritenuto non applicabile il metodo proposto.

Il presente studio si è focalizzato sulle 72 sezioni relative alle spiagge basse rappresentative di un tratto di costa complessivo di 35.5 km.

La presente relazione è stata articolata nel seguente modo: il capitolo successivo riporta una descrizione del modello numerico adottato per la propagazione del moto ondoso da largo fino alla riva. Il terzo capitolo descrive la metodologia adottata per la stima della risalita del moto ondoso. Nel quarto capitolo si riporta una descrizione della struttura della rete neurale. Nel quarto capitolo si riporta la descrizione del processo di calibrazione condotto sulla rete neurale per le diverse sezioni considerate. Infine, il quinto capitolo riporta delle note conclusive sul lavoro svolto.

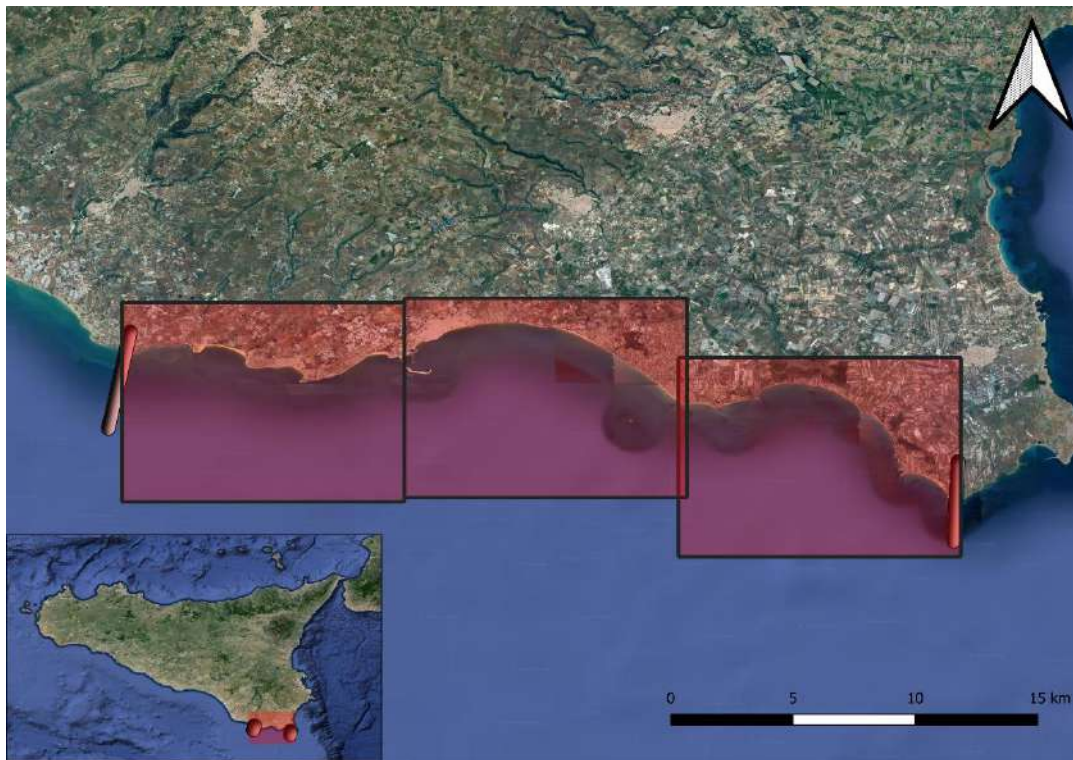


Figura 1. Individuazione dell'area in esame.



Figura 2. Individuazione delle sezioni utilizzate nello studio (1/3). Ad ogni sezione è stato associato un codice identificativo.





Figura 3. Individuazione delle sezioni utilizzate nello studio (2/3). Ad ogni sezione è stato associato un codice identificativo.



Figura 4. Individuazione delle sezioni utilizzate nello studio (3/3). Ad ogni sezione è stato associato un codice identificativo.

## 3 Modello di propagazione del moto ondoso

### 3.1 Generalità

La ricostruzione del moto ondoso sottocosta e dei relativi processi idrodinamici è stata effettuata mediante l'impiego del modello SWAN, che permette di simulare la propagazione del moto ondoso da largo verso la costa.

Le condizioni al contorno per il modello numerico sono state definite sulla base dei dati forniti da *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) per il periodo compreso tra il 1993 e il 2023.

Nei successivi paragrafi si riporta una descrizione sintetica del modello numerico.

### 3.2 Il codice SWAN

Il modello numerico SWAN (Booij *et al.*, 1999), acronimo di *Simulating WAve Nearshore*, è stato sviluppato presso la *Delft University of Technology* ed è un'estensione alle acque a bassa profondità dei modelli di terza generazione impiegati a profondità infinita (WAM). Il modello, che può essere impiegato a varie scale rilevanti per le onde gravitazionali generate dal vento, consente di ottenere stime dei parametri delle onde in zone costiere, laghi ed estuari, generate dal vento e influenzate dai fondali o dalle correnti. I processi di generazione e di dissipazione sono: generazione dal vento; dissipazione dai fenomeni di whitecapping; dissipazioni causate da frangimento; dissipazioni indotte dai fondali. I processi impiegati nella propagazione delle onde sono: propagazione nello spazio; rifrazione a causa di variazioni dei fondali e delle correnti; diffrazione; shoaling; trasmissione; riflessione. Il modello è di tipo spettrale, con evidenti vantaggi dal punto di vista computazionale per l'analisi di stati di mare. Infatti, le onde generate dal vento sono caratterizzate da altezze e periodi irregolari, a causa della natura irregolare del vento. Quest'ultima determina appunto che l'elevazione della superficie del mare varia continuamente, cosa che produce enormi difficoltà nell'utilizzo di un approccio di tipo deterministico. Inoltre, una

descrizione statistica degli stati di mare mediante l'altezza d'onda media, periodo medio e direzione media è caratterizzata da piccole variazioni nel tempo e nello spazio se confrontate con il periodo e la lunghezza d'onda.

Tutte le informazioni sulla superficie del mare possono essere espresse mediante lo spettro di energia delle onde  $E(\sigma, \theta)$ , funzione della frequenza dell'onda  $\sigma$  e della direzione di propagazione  $\theta$ . Nei modelli numerici è più utile fare riferimento alla densità di azione  $N$ , definita come il rapporto  $E/\sigma$ . Il vantaggio dell'impiego di tale parametro è dato dal fatto che esso si conserva durante il processo di propagazione in presenza di correnti, al contrario di  $E$  (Whitman, 1974).

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa dell'onda  $\sigma$  (misurata rispetto ad un sistema di riferimento che si muove con la velocità di propagazione dell'azione d'onda) e la direzione dell'onda  $\theta$  (direzione perpendicolare alla cresta di ciascuna componente spettrale). Come è noto, l'evoluzione di  $N$  è regolata dalla seguente espressione:

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

Il primo membro è la parte cinematica. In esso troviamo i seguenti elementi: il primo termine indica la variazione della densità d'azione rispetto al tempo, il secondo termine indica la propagazione dell'onda nelle due dimensioni geografiche nello spazio  $\vec{x}$ , dove  $\vec{c}_g$  è la velocità di gruppo delle onde e  $\vec{U}$  è il vettore corrente; il terzo termine rappresenta gli effetti del cambiamento di frequenza a causa della profondità e delle correnti medie (con la velocità di propagazione  $c_{\sigma}$  riferita allo spazio delle frequenze  $\sigma$ ); il quarto rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalle correnti (con la velocità di propagazione  $c_{\theta}$  riferita allo spazio delle direzioni d'onda  $\theta$ ). Tali velocità di propagazione sono definite dalla teoria dell'onda lineare di Stokes al 1° ordine.

Il secondo membro racchiude le grandezze che immettono energia nel sistema, le grandezze che causano la dissipazione di energia e le interazioni non lineari onda-onda.

Per maggiori dettagli si rimanda al manuale del modello (*SWAN User Manual*).

### 3.3 Griglie di calcolo

Per la simulazione della propagazione del moto ondoso attorno alle coste siciliane si è fatto riferimento a domini di calcolo i cui contorni sono stati definiti in funzione dei punti griglia in cui sono noti i dati CMEMS a largo. In particolare, sono stati selezionati i punti prossimi alle aree di studio e comunque, ove possibile, caratterizzati da profondità maggiori di 100 m.

Le simulazioni sono state condotte adottando il dominio di calcolo riportato nella Figura 5.

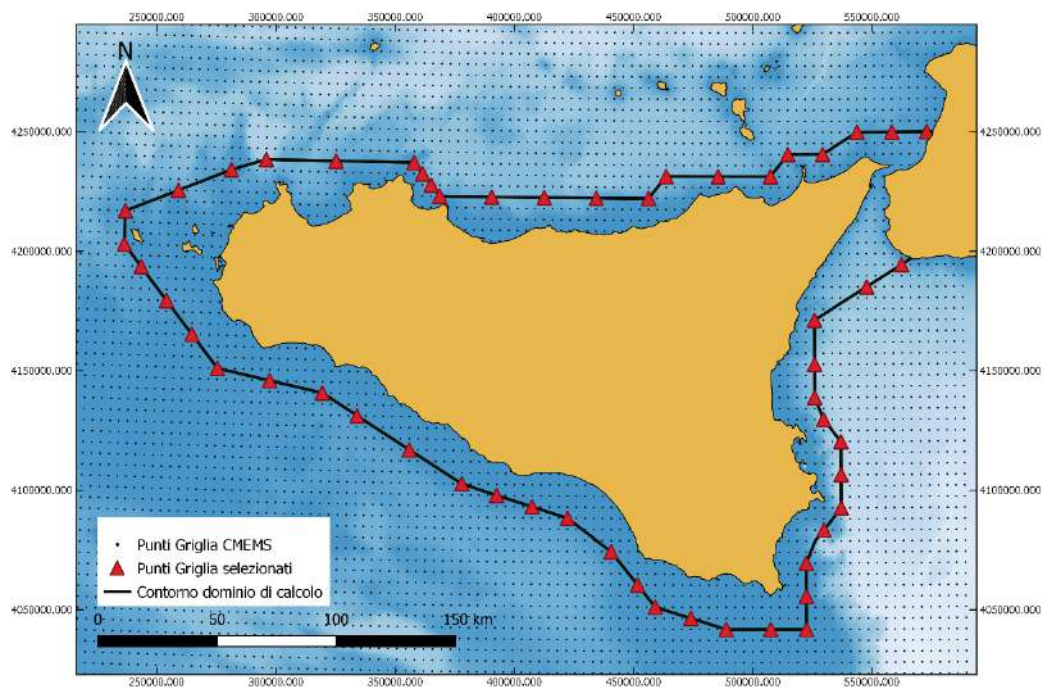


Figura 5 Dominio di calcolo comprendente le coste della Sicilia (fonte: PRCEC,2020).

I dati batimetrici sono stati interpolati su una griglia di calcolo non strutturata. Ciò consente di avere una maggiore risoluzione della griglia sottocosta, ovvero laddove le variazioni batimetriche e l'interazione del moto ondoso con i fondali è maggiore. La dimensione della griglia di calcolo è stata definita in relazione alla profondità dei fondali e all'estensione del dominio di calcolo.

Per quanto concerne la definizione della griglia di calcolo, si è fatto riferimento a criteri analoghi a quelli adottati nell'ambito degli studi di supporto al PRCEC (PRCEC, 2020) cercando di infittire la griglia di calcolo nelle zone in prossimità della riva caratterizzate da elevate pendenze.

Per il dominio attorno le coste della Sicilia, considerata l'elevata superficie coperta, è stata fissata una lunghezza delle celle pari a 5000 m per profondità superiori o uguali a 100 m e pari a 500 m per profondità inferiori o uguali a 50 m. Per le profondità intermedie tra 50 m e 100 m la dimensione delle celle varia linearmente tra 500 m e 5000 m. In corrispondenza delle zone sottocosta, caratterizzate da una elevata pendenza, la lunghezza delle celle è stata modificata da 500 m a circa 250 m.

## 4 Modello empirico per la stima della risalita del moto ondoso

### 4.1 Generalità

Per la stima della risalita del moto ondoso è stata adottata la procedura empirica sviluppata da Stockdon et al. (2006). Tale modello richiede come informazione di input i dati di moto ondoso e la pendenza della spiaggia. Per quanto concerne la stima di quest'ultima grandezza è stato necessario ricostruire il profilo della spiaggia per ogni sezione.

Nel presente Capitolo si riporta pertanto la descrizione della metodologia adottata sia per la ricostruzione del profilo di spiaggia che per la stima della risalita del moto ondoso lungo la spiaggia.

### 4.2 Valutazione delle caratteristiche morfologiche della spiaggia in corrispondenza dei transetti selezionati

Per quanto concerne la ricostruzione dei dati plano-altimetrici dei singoli transetti si è fatto riferimento a due distinte procedure rispettivamente per la spiaggia emersa e per quella sommersa.

Più precisamente, l'elevazione della spiaggia emersa è stata ricostruita sulla base dei dati estratti da un modello digitale del terreno. In particolare, si è fatto riferimento ai rilievi da scansione *lidar* con risoluzione a terra di 2 m acquisiti dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare nell'ambito del progetto PON Monitoraggio delle Aree Marine Protette Interessate da Reati Ambientali (MAMPIRA).

Per quanto concerne la porzione sommersa della spiaggia, vista l'ampia area coinvolta e la limitata disponibilità di dati batimetrici sottocosta, si è deciso di ricostruire l'andamento plano-altimetrico attraverso un approccio speditivo. Tale approccio consente di valutare il profilo della spiaggia in condizioni di equilibrio, ossia il profilo che si svilupperebbe se il moto ondoso si presentasse con le stesse caratteristiche per un periodo abbastanza prolungato nel tempo. Un'espressione frequentemente usata per la descrizione del profilo di equilibrio è quella di Bruun (1954):

$$y = Ah^{2/3}$$

in cui:  $h$  è la profondità;  $y$  è la distanza dalla linea di spiaggia;  $A$  è un fattore dimensionale [ $m^{1/3}$ ] che risulta dipendere soprattutto dalla granulometria dei sedimenti. Tale parametro può essere stimato con la seguente relazione:

$$A = 0.067 w_s^{0.44}$$

dove  $w_s$  è la velocità di sedimentazione dei sedimenti. Per tale velocità, usualmente definita come la velocità finale raggiunta da un granulo che si deposita in un fluido in quiete sotto l'azione della gravità, si è fatto riferimento alla metodologia proposta da Soulsby definita attraverso la seguente relazione:

$$w_s = \frac{v}{d} \left[ (10.36^2 + 1.049 D_*^3)^{1/2} - 10.36 \right]$$

dove:  $v$  è la viscosità cinematica del fluido;  $d$  è il diametro mediano dei sedimenti;  $D_*$  è il diametro dei sedimenti adimensionale

$$D_* = \left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} d$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $s$  è il rapporto tra la densità del sedimento e quello dell'acqua.

Pertanto, una volta noto il diametro mediano dei sedimenti di spiaggia è possibile ricavare la velocità di sedimentazione e il valore del parametro  $A$ . Tale informazione è successivamente impiegata per valutare la pendenza della spiaggia.

Per quanto concerne le informazioni relative alle dimensioni dei sedimenti si è fatto riferimento ai rilievi di campo condotti dal Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra (MIFT) dell'Università degli Studi di Messina e sui dati riportati nel Piano Regionale Contro l'Erosione Costiera. Inoltre, si è fatto riferimento anche

alle informazioni riportate nell'Atlante delle Spiagge Italiane edito dal CNR.

#### 4.3 Metodologia adottata per la stima della risalita del moto ondoso

Il runup, ossia la altezza verticale rispetto al livello medio del mare della risalita del moto ondoso lungo una spiaggia, è definito come la somma del setup, ossia la variazione del livello medio del mare provocata dal moto ondoso, e lo swash ossia le oscillazioni nel tempo della linea di riva. Convenzionalmente il runup è caratterizzato attraverso il valore che è superato solo nel 2% dei casi osservati ( $R_{2\%}$ ).

Lo studio condotto da Stockdon et al (2006) per lo sviluppo di una metodologia empirica per la stima del runup e del setup si basa su dati raccolti da dieci esperimenti condotti sulla costa orientale e occidentale degli Stati Uniti e nei Paesi Bassi.

Per ogni serie temporale del livello dell'acqua, la pendenza della spiaggia  $\beta_s$  è stata definita come la pendenza media su una fascia di  $\pm 2\sigma$  attorno a  $\langle \eta \rangle$ , dove  $\sigma$  è la deviazione standard della registrazione continua del livello dell'acqua,  $\eta(t)$ .

Il metodo di Stockdon et al (2006) per la stima del runup si basa sulla seguente relazione:

$$R_{2\%} = \begin{cases} 0.043 \sqrt{H_0 L_0} & \text{per } \xi_0 < 0.3 \\ 1.1 \left[ 0.35 \beta_s (H_0 L_0)^{1/2} + \frac{\sqrt{H_0 L_0 (0.563 \beta_s^2 + 0.004)}}{2} \right] & \text{per } \xi_0 > 0.3 \end{cases}$$

dove:

$H_0$  è l'altezza d'onda valutata in acque profonde;

$L_0$  è la lunghezza d'onda associata al periodo dell'onda;

$\beta_s$  è la pendenza della spiaggia;



$\xi_0$  è il parametro di Iribarren valutato attraverso la seguente relazione

$$\xi_0 = \frac{\beta_s}{\sqrt{H_0/L_0}}$$

Per la stima del setup, Stockdon et al (2006) ha proposto la seguente relazione

$$S=0.35\beta_s \sqrt{H_0L_0}$$

Per la stima delle caratteristiche del moto ondoso si è fatto riferimento ai dati stimati del modello numerico SWAN, descritto nel capitolo precedente, considerando i punti griglia riportati dalla Figura 2 alla Figura 4. Alla generica sezione sottocosta è stato associato il moto ondoso relativo al punto griglia di SWAN più vicino.

## 5 Rete neurale artificiale

Le reti neurali sono modelli matematici del tipo *black box* caratterizzati da strutture e da processi di calibrazione che si ispirano al comportamento del cervello umano. Le reti neurali possono essere considerate come delle regressioni multiple che sono in grado di valutare e interpretare le relazioni non lineari tra grandezze di input e di output.

Le reti neurali sono costituite dalle seguenti componenti: unità di input; unità nascoste; unità di output. Le unità di input e di output rappresentano le variabili per le quale si vogliono individuare eventuali legami. Le unità nascoste sono costituite, a loro volta, da unità computazionali detti neuroni che possono essere suddivisi in più *layer*. Nell'ambito del presente studio si è fatto riferimento alle reti con struttura *feedforward a strato singolo*. In tale struttura i neuroni sono organizzati sotto forma di strati. Nella forma più semplice di una rete a strati, si rileva uno strato di input di nodi sorgente che proietta su uno strato di output di neuroni (nodi di calcolo), ma non viceversa. In altre parole, questa rete è strettamente di tipo *feedforward* o aciclico (le informazioni si muovono solo in una direzione, avanti, rispetto a nodi d'ingresso fino ai nodi d'uscita).

Lo schema tipo della rete neurale utilizzata nel presente studio è riportato in Figura 6.

Come si evince dalla suddetta figura, le capacità della rete neurale sono state sfruttate per individuare un legame tra le caratteristiche del moto ondoso a largo e il runup, ossia la risalita del moto ondoso lungo le spiagge.

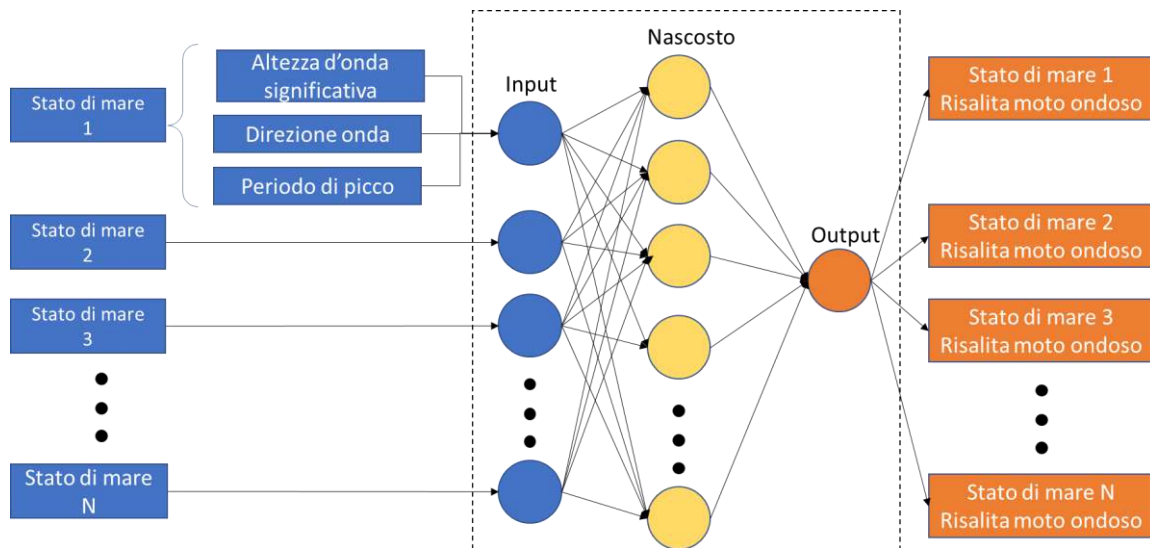


Figura 6 Rappresentazione schematica della rete neurale tipo utilizzata nel presente studio.

L'ottimizzazione della rete neurale può essere condotta utilizzando varie metodologie. Nel nostro caso è stata utilizzata quella denominata "*Bayesian regularization*" accoppiata al metodo *Early stopping*.

La "*Bayesian regularization*" prevede l'allenamento della rete neurale in accordo con una funzione obiettivo definita dalla seguente relazione:

$$E_{DW} = \beta E_D + \alpha E_W$$

dove  $E_W$  rappresenta la somma dei quadrati dei pesi della rete neurale e  $\alpha$  e  $\beta$  sono due parametri della funzione obiettivo. Al fine di ridurre problemi connessi all'*overfitting*, è stato impiegato anche il metodo *Early stopping*. Tale metodo prevede la suddivisione del *dataset* in tre parti: il *dataset* per l'allenamento, il *dataset* per la validazione e il *dataset* di test. Il primo *dataset* viene usato per addestrare la rete, il secondo serve a validarla dopo ogni iterazione. Il processo di allenamento viene concluso quando le performance sul *dataset* di validazione non subiscono ulteriori miglioramenti all'avanzare delle iterazioni. Il *dataset* di test non influenza l'allenamento della rete neurale e pertanto può essere utilizzato per il confronto con altre configurazioni della rete neurale.

## 6 Calibrazione della rete neurale

### 6.1 Generalità

La calibrazione della rete neurale è stata condotta utilizzando nella fase di allenamento i dati di moto ondoso a largo, forniti dal CMEMS, e i dati di risalita del moto ondoso stimati mediante il modello empirico di Stockdon (2006).

Dalla serie di dati disponibili relativi al periodo 1993-2023 per il punto griglia del CMEMS di coordinate 36.5208°N- 15.0833°E, posizionato a largo del tratto di litorale in esame, sono stati selezionati un numero rappresentativo di mareggiate. Tale processo è stato effettuato mediante la metodologia Maximum Dissimilarity Algorithm (MDA). L'applicazione di tale metodologia ha consentito di ridurre i tempi di allenamento delle reti neurali mantenendo comunque un dataset rappresentativo delle effettive condizioni del sito di analisi.

### 6.2 Selezione degli stati di mare

La selezione degli stati di mare da adottare per la calibrazione della rete neurale è stata effettuata mediante un algoritmo di selezione denominato Maximum Dissimilarity Algorithm (MDA). Tale algoritmo permette di selezionare un dataset in modo uniforme nello spazio con alcuni punti rappresentativi del contorno spaziale (Camus et al., 2011).

Nello specifico, lo scopo del MDA è selezionare un sottoinsieme rappresentativo di dimensione  $M$  da un database di dimensione  $N$ . Pertanto, dato un campione di dati  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  costituito da  $N$  vettori  $n$ -dimensionali, si ottiene un sottoinsieme di  $M$  vettori  $\{v_1, v_2, \dots, v_M\}$  che rappresentano la diversità dei dati. La selezione inizia trasferendo un vettore dal campione di dati  $\{v_1\}$ . Il resto dei  $M-1$  elementi vengono selezionati iterativamente, calcolando la dissomiglianza tra ciascun dato rimanente nel database e gli elementi del sottoinsieme e trasferendo quello più dissimile al sottoinsieme. Il processo termina quando l'algoritmo raggiunge le  $M$  iterazioni.

Adottando tale procedura sono stati selezionati 1000 stati di mare caratterizzati da altezze d'onda significative maggiori di 1 m, periodo di picco superiori a 3 s e direzioni media di provenienza del moto ondoso comprese tra 90°N e 290 °N.

La Figura 7 riporta gli stati mare stimati nel punto griglia del CMEMS di coordinate 36.5208°N- 15.0833°E e in rosso i dati di moto ondoso selezionati con il metodo MDA.

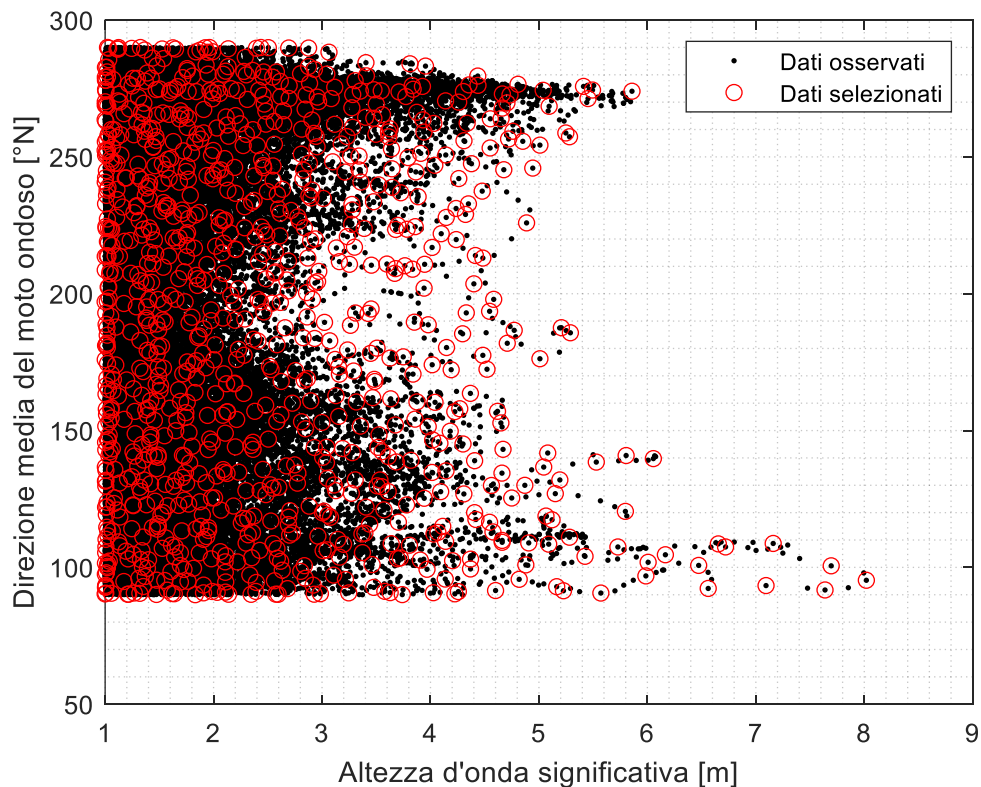


Figura 7 Dati di moto ondoso selezionati a largo. Il grafico riporta gli stati mare stimati nel punto griglia del CMEMS di coordinate 36.5208°N- 15.0833°E e in rosso i dati di moto ondoso selezionati con il metodo MDA.

### 6.3 Ottimizzazione del numero di neuroni

Al fine di individuare la migliore configurazione della rete neurale è stata condotta un'analisi sulle prestazioni attraverso i seguenti parametri: *Bias*, inteso come la media della differenza tra il modello e le osservazioni (idealmente pari a zero); RSME, è lo scarto quadratico medio (il più piccolo

possibile), calcolato come radice quadrata del rapporto tra il quadrato della differenza fra le osservazioni e il modello e il numero delle osservazioni;  $d$ , *Index of Agreement* (Willmott *et al.*, 1985), rappresenta la covarianza tra il modello e le osservazioni, Willmott delimita  $d$  all'estremità inferiore, ma quando è pari a 0 si nota che il modello è fuori fase con le simulazioni (*Short Communication a refined index of model performanc. J. Willmott*, 2001);  $R$ , coefficiente di correlazione, ossia il rapporto tra la covarianza e la varianza tra i dati di output della rete neurale e i l'output di Xbeach. Tali parametri sono definiti dalle seguenti relazioni:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|X_i'| + |Y_i'|)^2}$$

dove  $|X_i'| = |X_i - \bar{X}|$  e  $|Y_i'| = |Y_i - \bar{Y}|$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

in cui  $X_i$  corrisponde ai valori osservati;  $Y_i$  rappresenta i valori simulati;  $n$  il numero di punti utilizzati.

Le configurazioni indagate sono caratterizzate da un numero variabile di neuroni presenti nel layer nascosto. In particolare, sono stati considerati i seguenti valori 1, 5, 10, 30 e 100.

La Figura 8 riporta per la sezione 813 il confronto tra i dati di output di diverse configurazioni della rete neurale utilizzando come input i dati di

moto ondoso a largo e i dati stimati mediante il metodo di Stockdon et al (2006) utilizzando come input i dati in prossimità della costa.

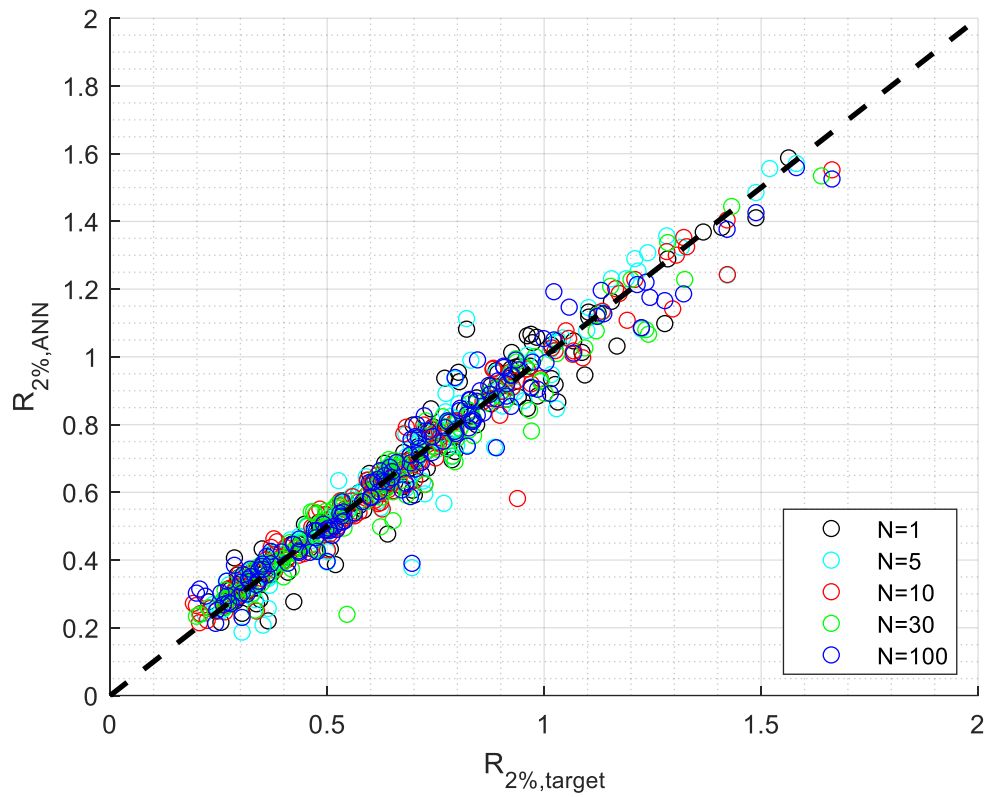


Figura 8 Sezione 813. Confronto tra i dati di risalita del moto ondoso stimati mediante il modello empirico e quelli valutati mediante la rete neurale.

Tabella I Prestazioni delle reti neurali selezionate per le diverse sezioni considerate nel presente studio.

Nome della sezione	Numero di neuroni	<i>Bias</i>	<i>RMSE</i>	<i>d</i>	<i>R</i>
813	10	0.0026	0.054	0.992	0.985
814	30	-0.0049	0.041	0.994	0.989
816	30	-0.0025	0.036	0.996	0.992
817	5	-0.0112	0.058	0.990	0.981
818	100	0.0050	0.062	0.991	0.984
819	10	-0.0064	0.043	0.991	0.984
820	5	0.0029	0.033	0.995	0.990
823	30	0.0017	0.035	0.994	0.989
828	100	0.0011	0.045	0.992	0.986
829	30	-0.0002	0.030	0.996	0.992
830	100	-0.0003	0.030	0.996	0.992
831	100	0.0011	0.033	0.995	0.989
832	10	-0.0018	0.040	0.994	0.988
834	10	-0.0006	0.033	0.994	0.988
835	5	-0.0022	0.032	0.996	0.992
836	30	0.0030	0.043	0.992	0.984
837	100	0.0039	0.032	0.995	0.991
838	30	-0.0032	0.040	0.993	0.986
839	10	-0.0040	0.034	0.995	0.990
840	10	-0.0002	0.032	0.995	0.991
841	5	0.0010	0.035	0.995	0.989
842	100	-0.0015	0.027	0.997	0.993
843	10	0.0002	0.042	0.992	0.984
845	10	-0.0046	0.038	0.995	0.990
849	5	-0.0009	0.033	0.996	0.991
851	5	-0.0037	0.035	0.994	0.989
852	5	0.0029	0.040	0.994	0.989
855	5	0.0024	0.038	0.994	0.987
856	10	-0.0092	0.049	0.991	0.982
858	1	-0.0034	0.049	0.989	0.980
859	5	-0.0090	0.054	0.988	0.978
860	10	-0.0047	0.080	0.981	0.962
861	30	-0.0068	0.053	0.989	0.978



Nome della sezione	Numero di neuroni	<i>Bias</i>	<i>RMSE</i>	<i>d</i>	<i>R</i>
862	10	-0.0065	0.051	0.990	0.980
863	10	-0.0046	0.036	0.995	0.990
864	100	0.0000	0.057	0.987	0.974
865	100	0.0046	0.064	0.981	0.964
866	30	0.0034	0.069	0.982	0.965
867	10	-0.0108	0.052	0.989	0.981
868	10	-0.0107	0.044	0.992	0.986
869	10	-0.0039	0.043	0.992	0.984
870	100	-0.0025	0.038	0.994	0.989
871	30	-0.0046	0.038	0.994	0.989
872	10	0.0033	0.049	0.989	0.979
874	10	-0.0075	0.054	0.989	0.979
875	100	-0.0015	0.052	0.989	0.979
876	5	0.0025	0.047	0.991	0.982
877	100	0.0087	0.064	0.985	0.973
878	10	0.0029	0.040	0.993	0.987
879	100	-0.0025	0.052	0.988	0.977
880	100	-0.0025	0.036	0.995	0.991
881	10	-0.0026	0.040	0.992	0.985
882	5	-0.0013	0.045	0.991	0.982
883	1	0.0004	0.083	0.971	0.945
887	30	0.0000	0.036	0.995	0.990
888	100	-0.0099	0.046	0.992	0.984
889	100	0.0008	0.041	0.992	0.984
890	100	-0.0009	0.046	0.992	0.984
891	100	-0.0022	0.048	0.991	0.982
900	10	-0.0022	0.048	0.990	0.981
901	30	-0.0079	0.056	0.989	0.979
908	10	-0.0045	0.056	0.987	0.976
909	10	-0.0039	0.049	0.988	0.977
910	1	-0.0116	0.069	0.976	0.955
911	5	0.0011	0.046	0.991	0.983
912	30	-0.0086	0.056	0.987	0.975
913	10	0.0071	0.059	0.983	0.971
916	10	0.0002	0.048	0.988	0.977

Nome della sezione	Numero di neuroni	<i>Bias</i>	<i>RMSE</i>	<i>d</i>	<i>R</i>
917	30	-0.0081	0.047	0.991	0.983
918	10	0.0041	0.066	0.981	0.965
919	30	-0.0025	0.047	0.991	0.982
920	100	0.0024	0.050	0.988	0.978

## 7 Conclusioni

Nell'ambito del progetto di ricerca *REMACO Multi-disciplinary monitoring system for a resilient management of coastal areas*, il Work Package 4 (WP4) è stato sviluppato un modello di previsione speditivo della risalita del moto ondoso lungo le spiagge basato sulle reti neurali.

Tale modello è stato implementato per l'area di studio ricadente nei territori di Siracusa e Ragusa. Il tratto di costa considerato ha un'estensione totale pari a oltre 35 km ed è stato discretizzato in 72 sezioni rappresentative ognuna di un tratto di spiaggia di circa 500 m.

La ricostruzione del moto ondoso sottocosta e dei relativi processi idrodinamici è stata effettuata mediante l'impiego del modello SWAN, che permette di simulare la propagazione del moto ondoso da largo verso la costa. Le condizioni al contorno per il modello numerico sono state definite sulla base dei dati forniti da *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* per il periodo compreso tra il 1993 e il 2023.

Per la stima della risalita del moto ondoso è stata adottata la procedura empirica sviluppata da Stockdon et al. (2006). Tale modello richiede come informazione di input i dati di moto ondoso e la pendenza della spiaggia. Per quanto concerne la stima di quest'ultima grandezza è stata implementata un'apposita metodologia per ricostruire il profilo della spiaggia per ogni sezione.

La calibrazione della rete neurale è stata condotta utilizzando nella fase di allenamento i dati di moto ondoso a largo, forniti dal CMEMS, e i dati di risalita del moto ondoso stimati mediante il modello empirico di Stockdon (2006). In particolare, al fine di ridurre i tempi computazionali per la calibrazione delle reti neurali, dalla serie di dati disponibili relativi al periodo 1993-2023 per il punto griglia del CMEMS di coordinate 36.5208°N- 15.0833°E sono stati selezionati 1000 stati di mare rappresentativi del moto ondoso a largo del litorale in esame. Tale processo è stato effettuato mediante la metodologia Maximum Dissimilarity Algorithm (MDA).

Nell'ambito del presente studio, per ogni sezione considerata, sono state confrontate diverse configurazioni della rete neurale ottenute variando il numero di neuroni nel layer nascosto. Attraverso la stima di indici di performance è stato possibile individuare per ogni sezione la configurazione della rete che consente di minimizzare le differenze con i dati target.

I file delle reti neurali sviluppati in ambiente MATLAB per il presente studio sono riportati nell'archivio informatico allegato.

## Bibliografia

Booij, N., R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation, *J. Geophys. Res.*, 104(C4), 7649–7666, doi:10.1029/98JC02622.

Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), 851-862.

Churchland, & Sejnowski. (1992). *The computational brain*. A Bradford Book.

Kuik, A.J., van Vledder, G.Ph. and Holthuijsen, L.H. (1988). A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1020-1034.

MacKay ,D.J., (1992a). Bayesian interpolation. *NeuralComput.* 4 (3), 415–447.

MacKay, D.J., (1992 b). A practical Bayesian framework for backpropagation networks. *NeuralComput.* 4( 3), 448–472.

McGranahan, G., Balk, D., Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and urbanization*.

PAI (2009). *Piano Stralcio di bacino per l’assetto Idrologico*, Relazione Generale, Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente – Servizio 4 “Assetto del Territorio e difesa del suolo”.

Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. V. T., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56 (11-12), 1133-1152.

Roelvink D.J.A., van Dongeren A., McCall R., Hoonhout B., van Rooijen A, van Geer P., de Vet L., Nederhoff K., Quataert E. (2015). “XBeach Technical Reference: Kingsday Release”. Deltares.

Small, C., Nicholls, R.J. (2003). A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of coastal research*;:584-599.

Soulsby, R. (1997) *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford, London.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7), 573-588.

Van Rijn L. C. (1985), *Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110: 1733-1754.

Whitham, G.B. (1974): *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York, 636 pg.

Zijlema M., Stelling G. S. (2008). "Efficient computation of surf zone waves using the nonlinear shallow water equations with non-hydrostatic pressure". *Coastal Engineering*, 55(10):780–790