

UNA METODOLOGIA SPERIMENTALE
PER LA DEFINIZIONE DEL
RISCHIO COSTIERO

Dr. Francesco Chirico

Tutor: Ing. Stefano Corsini
Con la collaborazione del prof. Ing. Guido Benassai

INDICE

Introduzione	3
Metodologia	5
Capitolo I – <i>Determinazione della pericolosità da inondazione marina.</i>	
1. Premesse	6
2. Statistica delle onde estreme	7
3. Persistenza sopra soglia degli stati di mare	10
4. Calcolo delle onde al frangimento	11
5. Calcolo del sovrizzo	13
5.1 Calcolo del wave setup	
5.2 Calcolo del wind setup	
5.3 Calcolo del barometro inverso	
5.4 Calcolo della marea astronomica	
5.5 Calcolo del sovrizzo complessivo	
6. Formule di Massel-Pelinovsky per il calcolo del Run-up sulle spiagge	16
7. Calcolo dell'erosione a breve termine	21
8. Studio sulla stabilità delle opere di difesa costiera	24
a. Danneggiamento delle opere emerse	
b. Trasmissione del moto ondoso a tergo di una barriera sommersa	
9. Determinazione dei livelli di pericolosità	30
9.1 Calcolo dell'indice di risalita orizzontale del moto ondoso	
9.2 Calcolo dell'indice di erosione a breve termine	
9.3 Calcolo dell'indice di danno alle opere di difesa costiera	
9.4 Calcolo dei livelli di pericolosità	
Capitolo II – <i>Determinazione del danno da inondazione marina.</i>	
1. Premesse	34
2. La vulnerabilità costiera	34
2.1 Popolazione residente in Rice	
2.2 Area urbanizzata e/o industrializzata in Rice	
2.3 Area ad alto potenziale ecologico in Rice	
2.4 Incremento area urbanizzata/industrializzata nella fascia costiera di 10km	
2.5 Indice di erosione a lungo termine	
2.6 Indice di vulnerabilità costiera	
3. Il valore esposto	41
4. Determinazione del danno potenziale	42
Capitolo III – <i>Valutazione del rischio da inondazione marina.</i>	
1. Premesse	44
2. La definizione del Rischio da inondazione marina	44

Capitolo IV – *Applicazione n°1: litorale di Guardia Piemontese*

1. Premesse	47
2. Caratteristiche generali	47
3. Analisi meteo-marina al largo del paraggio costiero	50
4. Studio del frangimento	52
5. Calcolo del sovrizzo	53
6. Calcolo della distanza orizzontale di risalita del moto ondoso	54
6.1 Il MIKE 21	
6.2 Il Run-up orizzontale	
7. Calcolo dell'erosione a breve termine	63
8. Determinazione dei livelli di pericolosità	64
8.1 Calcolo dell'indice di risalita del moto ondoso	
8.2 Calcolo dell'indice di erosione a breve termine	
8.3 Calcolo dell'indice di danno alle opere	
8.4 Calcolo dei livelli di pericolosità	
9. Stima del danno potenziale	68
9.1 La vulnerabilità costiera	
9.2 Il valore esposto	
9.3 Determinazione del danno potenziale	
10. Attribuzione dei livelli di rischio	70

Capitolo V – *Applicazione n°2: litorale di Monasterace*

1. Premesse	72
2. Caratteristiche generali	72
3. Analisi meteo-marina al largo del paraggio costiero	75
4. Studio del frangimento	78
5. Calcolo del sovrizzo	79
6. Calcolo della distanza orizzontale di risalita del moto ondoso	79
7. Calcolo dell'erosione a breve termine	80
8. Determinazione dei livelli di pericolosità	81
8.1 Calcolo dell'indice di risalita del moto ondoso	
8.2 Calcolo dell'indice di erosione a breve termine	
8.3 Calcolo dell'indice di danno alle opere	
8.4 Calcolo dei livelli di pericolosità	
9. Stima del danno potenziale	85
9.1 La vulnerabilità costiera	
9.2 Il valore esposto	
9.3 Determinazione del danno potenziale	
10. Attribuzione dei livelli di rischio	87

Conclusioni	89
-------------	----

Bibliografia	91
--------------	----

INTRODUZIONE

L'inondazione marina costituisce una fonte di preoccupazione a causa dei danni alle persone ed alle cose che vengono provocati in occasione di eventi estremi. Infatti, la necessità di tutelare sempre più la fascia costiera emerge sia dal notevole incremento demografico degli ultimi decenni, sia dal grande incremento delle attività economiche legate all'ambiente costiero. Lo studio condotto nel presente lavoro si pone l'obiettivo di individuare una metodologia sperimentale per la valutazione del rischio da inondazione costiera. Il rischio è definito dal DPCM, Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, 29/9/1998 come il prodotto tra la pericolosità ed il danno potenziale.

Nel primo capitolo si è proceduto al calcolo della pericolosità, definita attraverso un indice di impatto e dal periodo di ritorno dell'evento meteo-marino stimato pericoloso. Per effettuare una stima della pericolosità di evento meteo-marino, relativamente ad un particolare tratto costiero, è necessario valutare le caratteristiche fisiche dell'evento mediante l'analisi statistica delle onde estreme determinando in tal modo l'altezza d'onda significativa, il relativo periodo di ritorno e la durata. Calcolata l'altezza d'onda frangente che dipende dalla morfologia del litorale, oltre che dalle caratteristiche dei marosi, si procede all'individuazione dell'indice di impatto. Questi è dato dalla somma di tre di fattori quali la risalita del moto ondoso lungo la spiaggia, l'erosione a breve termine della linea di riva ed il danno prodotto alle opere di difesa costiera. L'indice di impatto permette di identificare l'altezza d'onda di riferimento, ovvero l'altezza d'onda minima capace di mettere in crisi il litorale, dal periodo di ritorno ad essa correlato si determina il livello di pericolosità.

Nel secondo capitolo si è proceduto alla determinazione del danno da inondazione marina definito, su indicazione del DPCM 29/9/98 e sulle indicazioni riportate nei PAI (Piani di Assetto Idrogeologico) redatti dalle Autorità di Bacino, come il prodotto tra la vulnerabilità ed il valore esposto. La vulnerabilità di un tratto costiero è determinata attraverso un indice di vulnerabilità costiera che tiene conto del livello di antropizzazione

della costa in esame, per la cui analisi sono state utilizzate alcune indicazioni del progetto Coastal Erosion in Europe (Eurosion), ciò ha permesso di individuare 3 differenti livelli di vulnerabilità costiera. Per quanto concerne il calcolo del valore esposto, ovvero del valore che è possibile associare agli elementi da difendere sul territorio costiero, si sono seguite le tabelle riportate in numerosi PAI. In tal modo sono stati individuati quattro differenti livelli di valore esposto i quali, incrociati con i tre livelli di vulnerabilità costiera, hanno permesso di individuare quattro livelli di danno potenziale.

Nel terzo capitolo si è proceduto alla valutazione del rischio da inondazione costiera, per fare ciò è stato necessario, innanzitutto, identificare le caratteristiche urbanistico-territoriali del litorale, in modo da poter identificare il danno potenziale prodotto dagli eventi meteomarinari estremi su di uno specifico tratto di costa, quindi valutare il rischio sulla base dell'incrocio tra i livelli di pericolosità, relativi allo studio meteo-marino, ed il danno relativo alla antropizzazione del territorio (presenza di fabbricati, di infrastrutture, etc.). La determinazione del rischio da mareggiata è stata effettuata quindi, sia rispetto all'esposizione costiera al moto ondoso che rispetto al danno potenziale alle persone ed alle cose in caso di inondazione costiera.

Nel quarto e quinto capitolo è stata effettuata una applicazione sperimentale della metodologia descritta nel presente lavoro, sui tratti costieri dei Comuni di Guardia Piemontese e di Monasterace Marina, collocati, rispettivamente, sul litorale tirrenico e ionico della regione Calabria. In particolare, per la valutazione della pericolosità, oltre alla trattazione analitica descritta, è stato utilizzato un modello matematico per il calcolo della risalita del moto ondoso sulla spiaggia (Mike 21). Invece, per l'identificazione del danno, sono state attinte informazioni da un lavoro di indagine conoscitiva delle coste calabresi, commissionato dall'Assessorato ai Lavori Pubblici della regione Calabria nel maggio 2003, tutte queste informazioni sono state organizzate in una piattaforma GIS.

METODOLOGIA

L'approccio metodologico utilizzato nella presente tesi di stage si è articolato nelle seguenti fasi:

- Studio ed individuazione dei processi legati al moto ondoso ed interazione delle onde con il litorale che si intende esaminare, al fine di definirne la pericolosità legata alla probabilità di accadimento di un evento estremo.
- Studio ed analisi delle realtà presenti sulla fascia costiera, al fine di determinarne il danno potenziale che si avrebbe in occasione del verificarsi dell'evento estremo analizzato.
- Individuazione del livello di rischio, dettato dalla normativa vigente in materia.

Per quanto attiene alle due applicazioni effettuate in questo lavoro, c'è da dire che, per ciò che riguarda i dati meteo-marini, questi risentono, soprattutto nel caso di Monasterace, dei pochi anni di esercizio delle boe; al contrario, per quanto concerne il calcolo dei valori degli indici che definiscono la pericolosità sono state utilizzate formule ben note in letteratura, la cui validità è stata ampiamente verificata.

Occorre sottolineare che, l'utilizzo del modello matematico di risalita del moto ondoso sulla spiaggia, il MIKE 21, ha consentito di validare le formule relative a quest'ultimo parametro, senza dubbio il più complesso poiché dipendente dai fenomeni di *rifrazione*, *shoaling*, *attrito*, di non facile parametrizzazione.

Discorso a parte merita la sintesi dei dati relativi all'uso del suolo, ottenuti dalle Ortofoto 1999 volo IT 2000 e da Corinne Land Cover 2000 immagini satellitari LANDSAT, questi dati risentono della distanza temporale rispetto al presente studio.

Si ritiene che la metodologia descritta sia valida ed applicabile su tutto il territorio nazionale, col presupposto che si sia in possesso di un banca dati aggiornata e verificata.

CAPITOLO I

DETERMINAZIONE DELLA PERICOLOSITA' DA INONDAZIONE MARINA

1. Premesse

In linea generale il concetto di pericolosità è definito, in ambito tecnico, come la probabilità di accadimento di un determinato evento calamitoso nell'ambito di una assegnata finestra temporale.

Essa è legata al periodo di ritorno T , che esprime l'intervallo di tempo nel quale l'intensità dell'evento viene superata mediamente una sola volta dalla relazione

$$P_t = 1 - (1 - 1/T)^t \quad (1.1)$$

dove P_t definisce la pericolosità, cioè la probabilità di osservare nel periodo t almeno un evento calamitoso.

Nel caso di stati di mare di particolare severità la pericolosità, connessa all'inondazione costiera, è correlata alle caratteristiche dell'evento meteo-marino e quindi dipende da quanto questo sia in grado di influire sulla dinamica costiera.

Pertanto è opportuno tener conto prima di tutto della durata in cui la severità dello stato di mare, identificata con il valore dell'altezza significativa, rimane al di sopra di una soglia prefissata (nel presente lavoro si è deciso di considerare come potenzialmente pericolose solo le mareggiate che presentano una altezza d'onda significativa al largo al di sopra di una soglia di 3 metri), occorre poi considerare il periodo di ritorno associato alla altezza d'onda prescelta. In secondo luogo, non per ordine di importanza, bisogna considerare la risposta della spiaggia in relazione alla capacità erosiva dell'attacco ondoso ed la distanza

di risalita del mare sulla spiaggia stessa, in ultimo occorre, laddove sono presenti opere di difesa costiera, verificarne la stabilità.

2. Statistica delle onde estreme

Al fine del calcolo della persistenza degli stati di mare è necessario effettuare un'analisi statistica delle onde estreme (Apat, 2004), si tratta di una metodologia di studio finalizzata alla determinazione del valore delle altezze d'onda significative, in acqua profonda, aventi assegnati tempi di ritorno.

Per effettuare un'analisi statistica si utilizzano le serie temporali dei parametri ondosi misurati da boe ondometriche rappresentative delle condizioni meteomarine locali, osservate con cadenza prefissata. Le popolazioni statistiche estratte dai dati osservati devono essere opportunamente selezionate per costituire il set di dati stocasticamente indipendenti da utilizzare nella statistica a lungo termine.

La definizione dell'evento "mareggiata" permette di semplificare l'identificazione del set di dati da analizzare. Tale evento è definito come la successione temporale degli stati di mare caratterizzati da valori d'altezza d'onda, periodo e direzione del moto ondoso, variabili determinate in fissati intervalli. In particolare si considera come "mareggiata" la successione temporale degli stati di mare caratterizzati da persistenza dell'altezza d'onda sopra la soglia di 1.0 metri maggiore di 12 ore consecutive, attenuazione dell'altezza d'onda sotto la soglia di 1.0 metri per meno di 6 ore consecutive, appartenenza della direzione di provenienza ad un determinato settore angolare ($\pm 30^\circ$ rispetto alla direzione iniziale).

Di regola la mareggiata viene caratterizzata assegnandole i valori d'altezza d'onda, periodo e direzione corrispondenti al culmine d'intensità della successione degli stati di mare.

Al fine di separare le classi di mareggiate generate, ad esempio, da venti di tempesta da quelle generate da brezze costiere, o, come nel caso dei nostri mari, in cui le aree di generazione sono limitate ed irregolari, per distinguere le mareggiate generate da vaste perturbazioni meteorologiche, che si estendono su scale continentali, da quelle generate da perturbazioni locali, che si estendono su scale regionali, si utilizza il metodo delle serie di durata parziale sopra soglia adottando una seconda soglia d'altezza d'onda più alta di quella prescelta nella definizione di mareggiata (ad esempio 2.0 m, 3.0 m).

Le funzioni analitiche di distribuzione a lungo termine maggiormente utilizzate per caratterizzare il clima ondoso di largo, con riferimento agli eventi estremi, sono a due parametri del tipo Gumbel ed a tre parametri del tipo Weibull con limite inferiore. Tali distribuzioni sono caratterizzate da un parametro di forma α che determina la forma base della particolare distribuzione, da un parametro di scala θ che fornisce una misura del livello di dispersione lungo l'asse delle ascisse, e da un parametro di posizione ε che localizza la posizione della densità di probabilità lungo l'asse delle ascisse.

La funzione di distribuzione di Gumbel, o Fisher-Tippet I, sviluppata da Gumbel (1958) nel contesto della previsione delle piene ed in seguito applicata alle altezze d'onda estreme da St. Denis (1969) presenta una probabilità cumulata data da:

$$P(H) = \exp\{-\exp[-(H - \varepsilon)/\theta]\} \quad (1.2)$$

Il piano probabilistico é definito in ascissa dai valori di H, ed in ordinata dai valori della variabile trasformata:

$$W = -\ln\{-\ln[P(H)]\} \quad (1.3)$$

La distribuzione di Weibull o Fisher-Tippet III, introdotta da Weibull (1951), è stata utilizzata nella forma limitata inferiormente da Battejes (1970) nell'applicazione alle altezze d'onda estreme, il limite inferiore può rappresentare una soglia al di sotto della quale gli stati di mare non vengono considerati severi. Tale distribuzione presenta la seguente probabilità cumulata:

$$P(H) = 1 - \exp\left\{-\left[(H - \varepsilon)/\theta\right]^\alpha\right\} \quad (1.4)$$

Il piano probabilistico è definito dai valori di $\ln H$ in ascissa, ed in ordinata dai valori della variabile trasformata

$$W = \ln\{-\ln[1 - P(H)]\} \quad (1.5)$$

L'adattamento dei dati alla distribuzione scelta viene effettuato riducendo le altezze d'onda selezionate ad un set di punti da plottare su carta probabilistica (Gringorten, 1963). A tal

fine i dati sono ordinati in senso decrescente, con riferimento ad un indice m tale che ad $m=1$ corrisponde l'onda più alta e ad $m=N$ l'onda più bassa:

$$C_{Hm} = \{H_m\}_{m=1}^N \quad (1.6)$$

Con la predetta operazione di ordinamento, la probabilità totale $P(H_m)$ e la probabilità di superamento $Q(H_m)$ da associare ad ogni H_m sono date dalle relazioni:

$$P(H_m) = 1 - m/(N+1) \quad (1.7) \quad Q(H_m) = m/(N+1) \quad (1.8)$$

le quali rappresentano le relazioni di base per precisare la forma della funzione analitica di distribuzione a lungo termine delle altezze significative, la cui conoscenza é necessaria per poter operare un'extrapolazione dei dati oltre il periodo di osservazione.

Per individuare la retta interpolatrice che costituisca il miglior adattamento dei dati alla distribuzione é necessario determinare i parametri di quest'ultima con:

- il metodo dei momenti, che si basa sull'eguaglianza tra il valore medio μ_H e la varianza σ_H^2 dedotti dalle altezze ottenute con la funzione analitica di distribuzione e quelli μ_{Hm} e σ_{Hm}^2 ottenuti a partire dalla popolazione statistica;
- il metodo dei minimi quadrati, che consente di determinare la pendenza m e l'intercetta q della retta che interpola i punti sperimentali.

Una volta effettuato l'adattamento dei dati alla distribuzione di probabilità, questa deve essere extrapolata allo scopo di individuare l'altezza d'onda di progetto corrispondente ad un prefissato periodo di ritorno. Questo é definito come l'intervallo di tempo medio tra due eventi ondosi consecutivi caratterizzati da stati di mare con altezze significative che eguagliano o superano l'altezza d'onda di progetto H_{TR} , ed é correlato alla probabilità di superamento di quest'ultima dalla relazione:

$$\frac{T_R}{r} = \frac{1}{1 - P(H_{TR})} = \frac{1}{Q(H_{TR})} \quad (1.9)$$

dove r é un parametro temporale, che rappresenta l'intervallo medio con cui si succedono nel tempo i dati della popolazione statistica.

La stima del periodo corrispondente all'altezza d'onda di progetto può essere effettuata utilizzando differenti tipi di approcci. Una relazione proposta da Boccotti (1989) e

largamente utilizzata in virtù della sua semplicità fornisce il periodo d'onda corrispondente all'altezza significativa attraverso la seguente relazione basata sui dati sperimentali:

$$T_{HR} = 0.95 \cdot 9\pi \{H_{TR} / 4g\}^{1/2} \quad (1.10)$$

3. Persistenza sopra soglia degli stati di mare

Ai fini della valutazione della pericolosità di un particolare evento meteomarinico, è necessario fornire informazioni statistiche sulla durata in cui la severità dello stato di mare, identificata con il valore dell'altezza significativa, rimane al di sopra di una soglia prefissata.

Un modello per la valutazione della persistenza media degli stati di mare al di sopra di una determinata soglia d'altezza d'onda significativa è stato adottato un modello parametrico proposto da Mathiesen (1993).

Tale metodo assume che la durata media di superamento di una determinata soglia possa essere calcolata attraverso la stima della funzione di distribuzione di probabilità di non superamento di soglie dell'altezza significativa ($F(H)$) e della relazione tra H_{mo} ¹ ed il tasso di variazione nel tempo di H_{mo} (tendenze).

L'espressione della durata media di superamento di una soglia H è esprimibile come:

$$\tau(H) = \frac{2F(H)}{f(H)S(H)} \quad (1.11)$$

dove $F(H)$ ha il significato precedentemente detto ed è calcolata mediante il metodo delle serie di durata parziale sopra soglia, $f(H)$ è la relativa funzione di densità di probabilità, mentre $S(H)$ è la tendenza assoluta, espressa come potenza r -esima dell'altezza H_{mo} :

¹ H_{mo} altezza significativa spettrale: stima dell'altezza significativa dello stato di mare in base al momento spettrale di ordine zero m_0

$$m_n = \int_{f_{min}}^{f_{max}} f^n S(f) df$$

$$S(H) = qH_{mo}^r \quad (1.12)$$

I coefficienti q ed r sono stati determinati adattando il modello (1.13) ai dati delle tendenze di H_{mo} , calcolati secondo la seguente relazione

$$S_i(H_j) = \frac{\Delta H_i}{\Delta t} \quad (1.14)$$

in cui

$$\Delta H_i = H_{mo_{i+1}} - H_{mo_i} \quad (1.15)$$

$$H_j = \frac{H_{mo_{i+1}} + H_{mo_i}}{2} \quad (1.16)$$

L'indice i chiaramente varia da 1 a $N-1$, essendo N il numero totale dei dati analizzati.

In dettaglio, l'adattamento del modello (1.13), alla serie delle tendenze assolute $S(H)$, è stato effettuato con il metodo dei minimi quadrati. In particolare, il campione di altezze d'onda significative viene diviso in classi di ampiezza 0.2 m. A ciascuna classe si associa poi, il valore medio della tendenza $S(H)$ calcolata con la (1.14), e su tali punti si è adattata la (1.13).

Da risultati ottenuti sperimentalmente si è osservato che la durata $\tau(H)$ è esprimibile parametricamente in funzione dell'altezza significativa come :

$$\tau(H) = \left(\frac{H_{mo}}{\xi} \right)^\psi \quad (1.17)$$

dove ξ e ψ sono ricavati con il metodo dei minimi quadrati.

4. Calcolo delle onde al frangimento

Il frangimento è uno dei processi più importanti della dinamica costiera. Esso comporta una dissipazione di energia ed è la causa delle correnti lungo costa e del rialzo del livello del mare.

Avvicinandosi alla costa la profondità diminuisce, la lunghezza d'onda L diminuisce, e la sua altezza può aumentare, in tal modo la sua ripidità H/L aumenta fino ad assumere un valore limite in corrispondenza del quale l'onda diventa instabile e frange.

La formula di Weggel (1972) per il calcolo del valore dell'indice di frangimento k è dato da :

$$\frac{H}{d} = k(m) = b(m) - a(m) \frac{d}{gT^2} \quad (1.18)$$

dove:

$$a(m) = 43.8 (1 - e^{-19m}) \quad e \quad b(m) = 1.56 (1 + e^{-19.5m})^{-1}$$

m è la pendenza del fondale,

d è la profondità.

e T è il periodo dell'onda di altezza massima H_s calcolato mediante la seguente formula

$$T = 0.95 \cdot 9 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{H_s}{4g}}$$

La trasformazione dell'onda dal largo a riva fornisce:

$$H_i = H_s K_r K_s \quad (1.19)$$

dove H_i è l'altezza d'onda incidente su un determinato fondale e $K_r K_s$ viene determinato attraverso l'abaco riportato nella Figura 1.

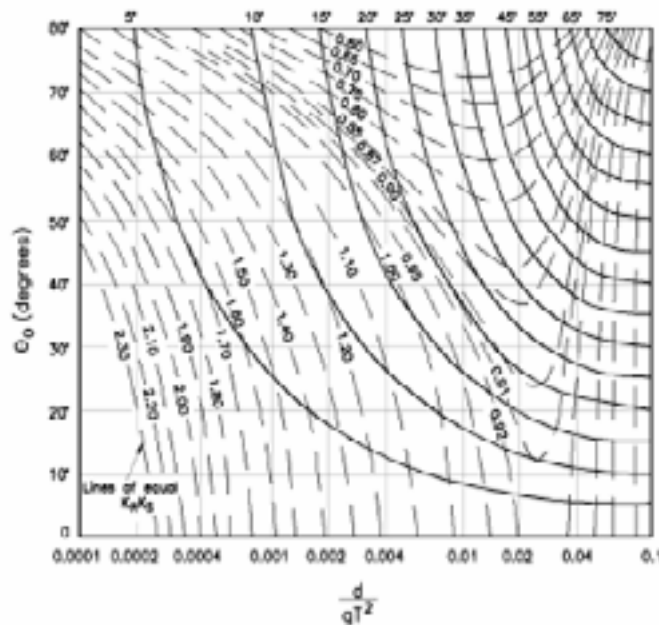


Figura 1 – Valori di $K_r K_s$ in funzione della profondità relativa

A questo punto, calcolato il $k(m)$ di Weggel dall'abaco, per i differenti valori di d calcolati, si ricava l'altezza d'onda frangente su valori di profondità attraverso la formula:

$$H_b = k(m) \cdot d \quad (1.20)$$

Dal confronto tra le H_b così ottenute e le H_i si ricava la profondità di frangimento d_b , che si ricorda essere la profondità alla quale vale $H_b < H_i$.

L'altezza d'onda significativa limite al frangimento risulta definita dalla seguente relazione (J. W. Kamphuis, 1999):

$$H_b = 0.56 \cdot e^{3.5m} d_b \quad (1.21)$$

dove d_b è la profondità di frangimento ricavata ed m è la pendenza del fondale.

I valori trovati di d_b e di H_b sono utilizzati nelle formule di Massel e Pelinovsky per il calcolo del Run-up sulla spiaggia.

E' necessario precisare che per avere una maggiore accuratezza del valore dell'altezza d'onda frangente, sarebbe opportuno utilizzare dei modelli di propagazione del moto ondoso sotto costa, del tipo Wave Watch III (WWIII) o SWAN, a scala regionale; in tal modo infatti, si terrebbe conto della complessità orografica della costa evitando eventuali errori che possono verificarsi utilizzando il solo metodo di Kamphuis per il trasferimento delle caratteristiche del moto ondoso dal largo alla costa.

5. Calcolo del sovrizzo d'onda

Le variazioni del livello del mare sono dovute a tre componenti:

- la marea astronomica;
- il sopralzo dovuto al frangimento delle onde, cioè il *wave set-up*;
- la variazione del livello del mare dovuta alle perturbazioni atmosferiche (*storm surge*), a sua volta distinta in *wind set-up* e *barometro inverso*.

E' importante considerare che la marea astronomica, avendo un andamento periodico, può essere predetta adeguatamente a partire da un'analisi di registrazioni di maree di un anno o poco più, la marea meteorologica invece, avendo un andamento che risente delle perturbazioni atmosferiche, deve essere analizzata sulla base dei valori osservati in intervalli di tempo di alcune decine di anni.

Per tale motivo in questo studio l'analisi della marea astronomica è stata effettuata dalle tavole di marea, la previsione della marea meteorologica è stata effettuata in base ad un'analisi statistica dei valori estremi.

5.1 Calcolo del wave set-up

Nella zona più prossima a riva si verificano delle variazioni del livello del mare associate alla propagazione del moto ondoso durante le mareggiate. Esse consistono in un piccolo abbassamento del livello del mare nella zona dei frangenti (wave set-down) ed in un successivo innalzamento progressivo verso costa (wave set-up). Il calcolo del massimo set-up sulla battigia, può essere effettuato in prima approssimazione in funzione della seguente relazione:

$$\zeta_{\max} = \frac{5}{16} \gamma H_b \quad (1.22)$$

dove γ è l'indice di frangimento, definito come rapporto tra l'altezza d'onda e profondità al frangimento ed è espresso dall'equazione

$$\gamma = \frac{H_b}{d_b} \quad (1.23)$$

5.2 Calcolo del wind set-up

L'azione del vento si esplica attraverso un duplice contributo alla variazione del livello medio-mare : da un lato il vento, secondo la teoria di Miles, incrementa l'altezza delle onde e quindi vi è un accrescimento del *wave set-up*; dall'altro le correnti orizzontali generate dall'azione del vento sulla superficie libera del mare, in prossimità della costa ed in particolare in situazioni di fondale a dolce pendenza causano innalzamento del livello medio del mare. Quest'ultimo meccanismo viene denominato *wind set-up* e dipende dall'intensità, dalla durata, dal cammino che compie la perturbazione, ed infine dall'angolo di incidenza del vento rispetto alla costa.

Il valore del *wind set-up* si ottiene dall'equazione linearizzata della quantità di moto in direzione trasversale alla costa che, risolta, fornisce la variazione del livello medio mare sulla linea di costa in funzione del parametro A dato da:

$$A = \frac{n \tau_{wx} l}{\rho g h_0^2} \quad (1.24)$$

in cui

n = costante numerica;

$$\tau_{wx} = c_{10} \rho_a V_{10} V_{10};$$

l = lunghezza dello shelf;

ρ = densità dell'aria;

g = accelerazione di gravità;

h_0 = profondità dello shelf.

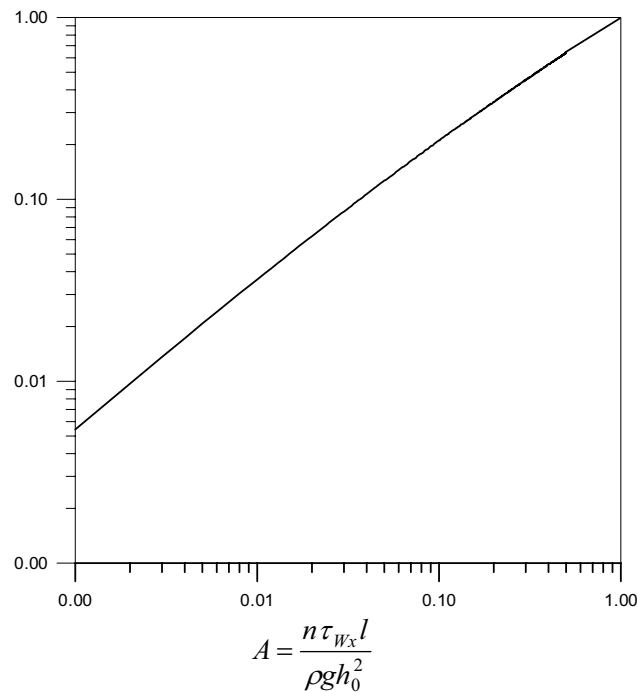


Figura 2 - Wind setup sulla linea di costa per spiaggia a pendenza costante

5.3 Calcolo del barometro inverso

Il sopralzo del livello medio del mare dovuto al barometro inverso si può considerare in prima approssimazione pari ad 1 cm di innalzamento del livello del mare per un abbassamento barico di 1 mb rispetto al valore normale (1013 mb). Considerando una tipica depressione atmosferica dell'ordine dei 30 mb, si ottiene un incremento del livello del mare di 0.30 m.

5.4 Calcolo della marea astronomica

Si indicano con il nome di maree le variazioni più o meno periodiche del livello dell'acqua marina dovute alle forze periodiche esercitate dall'attrazione gravitazionale della luna (70%) e del sole (30%). Le ampiezze ed i tempi di marea giornalieri sono prevedibili con esattezza per numerose località e per l'Italia sono pubblicati annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare di Genova nella Tavole di Marea. Il livello di marea delle predette tavole è riferito al livello di riferimento degli scandagli, che è un livello convenzionale, scelto in modo che raramente l'acqua scenda al di sotto di esso, e cioè il livello delle basse maree in corrispondenza delle sigizie. Pertanto per ottenere il valore massimo annuale di marea, per l'area oggetto di studio, è sufficiente sottrarre al valore di marea riportato nelle tavole la quota di riferimento degli scandagli per quell'area.

5.5 Calcolo del sovrizzo complessivo

Il valore di sovrizzo medio del mare, in condizioni estreme, è ottenuto dalla somma delle aliquote dovuta al *wave set-up*, *wind set-up*, *barometro inverso* ed al *sovrizzo di marea*.

6. Formule di Massel e Pelinovsky per il calcolo del Run-up sulle spiagge².

Il run-up può essere definito come la massima quota raggiunta dall'ondata rispetto al livello medio del mare.

I parametri che vengono usati per indicare il run-up sono $R_{u2\%}$ e $R_{u33\%}$, i quali rappresentano rispettivamente la media del 2% e del 33% dei valori massimi di run-up, e R_{\max} che è la quota massima di run-up.

Il valore di R_u dipende dall'altezza d'onda, dall'angolo di incidenza, dall'interazione con le onde riflesse, dalla pendenza e dalla permeabilità della superficie sulla quale le onde impattano.

² Il run-up oltre che con il procedimento analitico descritto nel presente paragrafo, può essere valutato con l'ausilio di modelli matematici come ad esempio il MIKE 21 (vedi capitoli 4 e 5).

La comprensione di questo fenomeno è di fondamentale importanza perché è un fattore decisivo per quanto riguarda il trasporto dei sedimenti, il modellamento delle spiagge, e soprattutto l'inondazione delle zone costiere.

Nel 2001 Massel e Pelinovsky hanno presentato un importante studio in cui hanno analizzato il fenomeno del run-up sulle spiagge, a differenza dei loro predecessori che avevano studiato la fenomenologia sulle scogliere.

Nel loro articolo Massel e Pelinovsky innanzi tutto osservano che attraverso le formule risultanti dagli studi precedenti sul run-up si ottiene una giusta quota di risalita dell'onda ma mancano informazioni sulla dinamica del run-up, vale a dire sulla posizione della superficie dell'acqua sulla spiaggia, sulla velocità di movimento della linea di costa e sul tempo di residenza dell'acqua su un particolare segmento di spiaggia.

La fascia costiera viene divisa in tre regioni, la prima è la regione di largo dove la profondità è maggiore di quella di frangimento e non si realizza nessun set-up, nella regione 2 invece si trova la profondità di frangimento ed è dove il livello del mare si modifica. La regione 3 infine è quella di maggior interesse per quanto riguarda il run-up dato che è localizzata in prossimità della battigia.

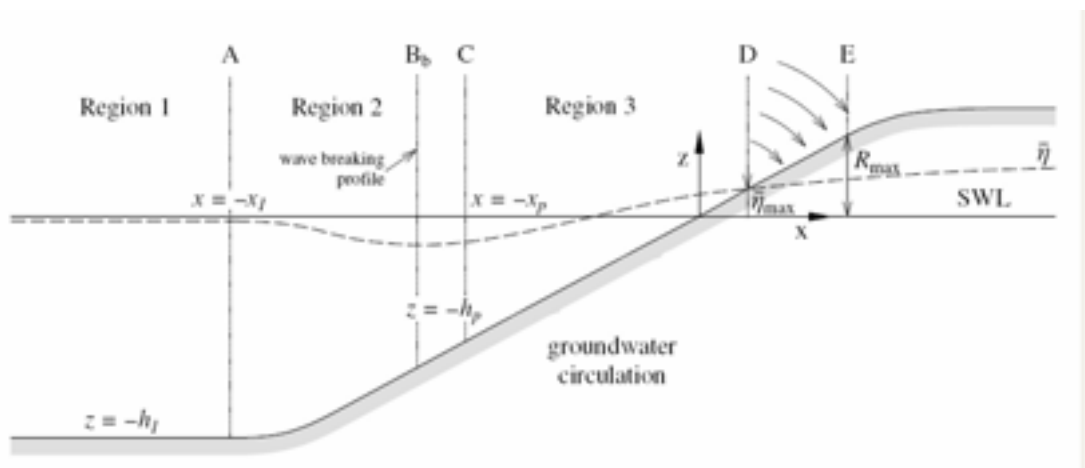


Figura-3 Suddivisione della spiaggia secondo Massel e Pelinovsky

Nella regione 3 chiusa dalla linea di costa la profondità è molto piccola, il moto delle onde viene descritto attraverso le equazioni non lineari delle acque costiere (Kaystrenko 1985, Massel 1989).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$

(1.25)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta) \bar{u}] = 0$$

dove ζ è l'elevazione superficiale, \bar{u} è la velocità orizzontale e h è la profondità.

Per definire l'importanza relativa dei termini nell'equazione precedente possiamo introdurre le seguenti variabili:

$$\begin{aligned}\tilde{t} &= \omega t \\ \tilde{x} &= \frac{\beta x}{H_i} \\ \tilde{\zeta} &= \frac{\zeta}{H_i} \\ \tilde{u} &= \frac{\beta \bar{u}}{H_i \omega}\end{aligned}$$

Usando queste variabili possiamo ottenere :

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{1}{B_r} \frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial \tilde{x}} = 0$$

(1.26)

$$\frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} [(-\tilde{x} + \tilde{\zeta}) \tilde{u}] = 0$$

con

$$B_r = \frac{H_i \omega^2}{g \beta^2}$$

Le equazioni (1.26) indicano che il run-up su una spiaggia è controllato un parametro che è molto importante per le procedure di modellizzazione.

Per chiarire il significato del parametro B_r possiamo riscrivere l'equazione precedente come:

$$\frac{1}{B_r} = \frac{g\beta^2}{H_i\omega^2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\beta}{\sqrt{\frac{H_i}{L_o}}} \right)^2 = \frac{1}{2\pi} (\xi_0)^2 \quad (1.27)$$

oppure

$$B_r = \frac{2\pi}{\xi_0^2} \quad (1.28)$$

con

$$\xi_0 = \frac{\beta}{\sqrt{\frac{H_i}{L_0}}}$$

e $L_0 = 2\pi g / \omega^2$ è la lunghezza d'onda in acqua profonda, con H_i che risulta essere l'altezza d'onda in acqua profonda

La soluzione alle equazioni (1.25) può essere trovata attraverso il metodo introdotto da Carrier e Greenspan (1958), con il quale le equazioni possono essere riscritte attraverso l'utilizzo di due parametri, s e l , che contengono le variabili x, u, t, z , definiamo s e l nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \lambda &= \bar{u} + g\beta t \\ \sigma &= 2\sqrt{g(\zeta - \beta x)} \end{aligned}$$

Un'ulteriore semplificazione può essere fatta introducendo il potenziale $\psi(\sigma, \lambda)$

$$\bar{u} = \frac{1}{\sigma} \frac{\delta\psi(\sigma, \lambda)}{\delta\sigma}$$

Le relazioni finali tra x, t, z , e s e l diventano:

$$\begin{aligned}
\zeta &= \frac{1}{2g} \left(\frac{\delta\psi}{\delta x} - \bar{u}^2 \right) \\
x &= \frac{1}{2g\beta} \left(\frac{\delta\psi}{\delta\lambda} - \bar{u}^2 - \frac{\sigma^2}{2} \right) \\
t &= \frac{\lambda - \bar{u}}{g\beta}
\end{aligned} \tag{1.29}$$

Attraverso queste relazione l'equazione non lineare (1.25) può essere trasformata in una equazione lineare in funzione del potenziale $\psi(\sigma, \lambda)$:

$$\frac{\delta^2 \psi(\sigma, \lambda)}{\delta \lambda^2} - \frac{\delta^2 \psi(\sigma, \lambda)}{\delta \sigma^2} - \frac{1}{\sigma} \frac{\delta \psi(\sigma, \lambda)}{\delta \sigma} = 0$$

considerando il valore limite $s=0$, che corrisponde alla linea di costa, si determina la distanza di run-up e il tempo di run-up, partendo dalle equazioni (1.27):

$$x = \frac{1}{2g\beta} \left[al \cos(l\lambda) - \frac{A^2 l^4}{4} \sin^2(l\lambda) \right]$$

e

$$t = \frac{1}{g\beta} \left[\lambda + \frac{Al^2}{2} \sin(l\lambda) \right]$$

Quindi la distanza massima di run-up su una spiaggia è :

$$x_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi\omega}{g}} \beta^{-5/4} (g|x_p|)^{1/4} H_p \tag{1.30}$$

con

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$H_p = H_b$ = altezza d'onda al frangimento, calcolata mediante la (1.21).

L'equazione precedente implica che su una spiaggia piana l'altezza del massimo run-up R_{\max} diventa:

$$\frac{R_{\max}}{H_p} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \omega}{\beta} \sqrt{\frac{h_p}{g}} \right)^{1/2} \quad (1.31)$$

dove β è la pendenza della spiaggia, $h_p = d_b$ è la profondità di frangimento ricavata come descritto nel paragrafo 4.

Il massimo run-up è definito come la distanza verticale tra l'elevazione massima dell'onda sulla spiaggia e il SWL misurato quando il set-up non viene preso in considerazione.

7. Calcolo dell'erosione a breve termine

Allo scopo di definire l'area costiera, priva di protezione, potenzialmente pericolosa, i valori di H_s ottenuti sono usati per calcolare la massima erosione in condizioni dinamiche, ovvero l'erosione nel breve periodo dovuta alle caratteristiche del moto ondoso che impatta sulla spiaggia.

Un semplice modello analitico per prevedere la risposta del profilo dinamico durante le mareggiate è il metodo di convoluzione di Kriebel a Dean (1993).

Questo metodo è basato sull'osservazione che le spiagge nel tempo tendono a disporsi secondo un nuovo profilo di equilibrio.

In condizioni di laboratorio, dove la spiaggia è immediatamente soggetta all'azione costante delle onde, la risposta della linea di costa in funzione del tempo $R(t)$ può essere approssimata dall'equazione:

$$R(t) = R_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \quad (1.35)$$

dove R_{∞} è la risposta del profilo di equilibrio dato dall'equazione (1.35) e T_s è il parametro di scala temporale del sistema.

Il risultato più generale per la risposta dinamica all'erosione può essere ottenuto notando che l'ultima equazione suggerisce che il tasso di risposta del profilo è proporzionale alla differenza tra la forma del profilo istantaneo e la forma del profilo di equilibrio finale.

Una equazione differenziale approssimata che governa la risposta del profilo alle variazioni temporali del livello dell'acqua può essere assunta nella forma:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{T_s} [R_\infty f(t) - R(t)] \quad (1.36)$$

dove $f(t)$ rappresenta funzione temporale per unità di lunghezza che descrive il sovrizzo dell'onda, dove R_∞ rappresenta la risposta dell'equilibrio della spiaggia per il livello di picco dell'acqua. La soluzione generale di questo sistema può essere espressa da:

$$R(t) = \frac{R_\infty}{T_s} \int_0^t f(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{T_s}} d\tau \quad (1.37)$$

Un' utile applicazione del metodo di convoluzione è quella di analizzare l'erosione associata ad un sovrizzo ideale. Consideriamo il caso in cui il sovrizzo è approssimato dalla seguente funzione:

$$S(t) = S \sin^2(\sigma t) = S f(t) \quad (1.38)$$

in cui $\sigma = \pi/T_D$ e T_D è la durata della mareggiata. Il massimo livello di sovrizzo S dovrebbe essere utilizzato per determinare la massima erosione potenziale R_∞ :

$$R_\infty = S \frac{W_b - \frac{d_b}{m_0}}{B + d_b - \frac{S}{2}} \quad (1.39)$$

in cui B è l'altezza delle berma, m_0 è la pendenza del fondale, d_b è la profondità di frangimento e W_b è l'ampiezza della zona di frangimento, calcolata da:

$$W_b = y_0 + \left(\frac{d_b}{A} \right)^{3/2} \quad (1.40)$$

A è il parametro di equilibrio e y_0 è una piccola area tra l'inclinazione della spiaggia e l'immaginaria origine del profilo di equilibrio, data da:

$$y_0 = \frac{4A^3}{27m_0^3} \quad (1.41)$$

Come mostrato da Kriebel and Dean (1993), la soluzione dell'integrale di convoluzione (1.37), con il termine forzante per unità di lunghezza $f(t)$ è pari alla funzione che dà la seguente risposta alla erosione temporale:

$$\frac{R(t)}{R_\infty} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\beta^2}{1+\beta^2} \exp\left(-\frac{2\sigma t}{\beta}\right) - \frac{1}{1+\beta^2} [\cos(2\sigma t) + \beta \sin(2\sigma t)] \right\} \quad (1.42)$$

in cui β è il rapporto tra la scala temporale dell'erosione e la durata della mareggiata, che è data da $\beta = 2\pi TS/T_D$, in cui T_D è la durata della mareggiata. Il valore massimo di R_{\max}/R_∞ è il massimo raggiunto dall'equazione (1.42) per dati valori di β e T_D .

Il valore di T_s è dato da:

$$T_s = 320 \frac{H_b^{3/2}}{g^{1/2} A^3} \left(1 + \frac{d_b}{B} + \frac{m_0 W_b}{d_b} \right)^{-1} \quad (1.43)$$

In figura 5 è illustrata la risposta relativa $R(t)/R_\infty$ per vari valori di β

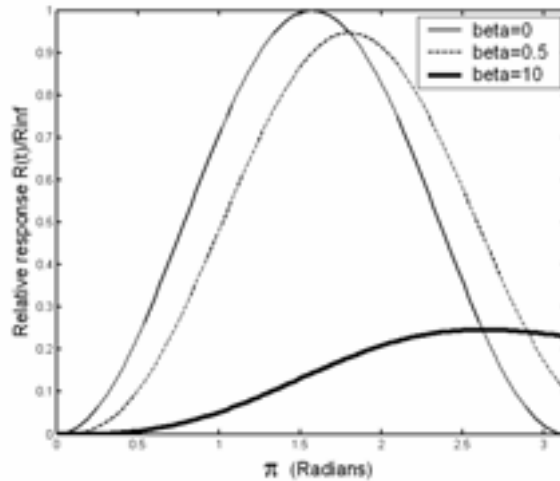


Figura 5

8. Studio sulla stabilità delle opere di difesa costiera

Le opere di difesa vengono distinte in opere emerse (dighe a scogliera, opere radenti, pennelli) ed in opere sommerse, queste ultime sempre più attuali per motivi ambientali.

Il comportamento di una diga a scogliera (Benassai E. 2006) al crescere dell'altezza dell'onda incidente è caratterizzato da tre fasi. Nella prima fase la diga resta indeformata sotto l'azione dell'onda salvo il rotolamento di alcuni blocchi il cui distacco non è significativo. Nella seconda fase, quando all'aumentare dell'altezza d'onda viene superato un certo valore di energia, detto "inizio delle avarie", la mantellata perde un certo numero di blocchi e subisce una deformazione che, al cessare dell'azione del moto ondoso, caratterizza una configurazione stabile per ogni stato di mare inferiore a quello che ha determinato il modellamento della mantellata; il numero di blocchi dislocati dipende solo dall'altezza d'onda e non dalla durata della sua azione. Si tratta di una fase di instabilità parziale, infatti, allorché un'onda di energia superiore alle precedenti attacca la diga i blocchi, che avevano precedentemente raggiunto un equilibrio, possono essere rimossi sotto l'azione del mare.

Nella terza ed ultima fase, il comportamento della diga cambia quando si raggiunge un determinato valore dell'energia d'onda, detto di "rottura totale". Il numero di blocchi che si distaccano cresce indefinitamente e la mantellata non riesce mai a raggiungere una condizione di equilibrio stabile; lo stato della diga è funzione solo del tempo ovvero dipende dalla durata della mareggiata e quindi dal numero di onde incidenti.

8.1 Danneggiamento delle opere emerse

In una serie di studi condotti al Delft Hydraulics sulla stabilità delle opere di difesa, Van der Meer (1988) introdusse nuove relazioni di facile applicazione che prendevano in esame parametri non considerati negli studi precedenti.

Con riferimento all'altezza d'onda significativa, Van der Meer ha fornito una formula di stabilità per opere a gettata in massi naturali; occorre preventivamente determinare il numero di Iribarren ξ_m

$$\xi_m = \tan \alpha \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{2}} = \tan \alpha (s_m)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.44)$$

con $s_m = H_0/L_0$ ripidità di largo e con α angolo della scarpa.

Il numero di Irribarren va confrontato con il suo valore critico ξ_c dato da:

$$\xi_c = \left(6.2 \cdot p^{0.31} \cdot \sqrt{\tan \alpha} \right)^{\frac{1}{p+0.5}} \quad (1.45)$$

Se ξ_m è minore di ξ_c il frangimento è di tipo “plunging”, altrimenti è di tipo “surging”, le relative formule trovate da Van der Meer sono:

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D_{50}} = 6.2 \cdot p^{0.18} \cdot \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \cdot \xi_m^{0.5} \quad \text{per frangimento di tipo “plunging”}; \quad (1.46)$$

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D_{50}} = 1.0 \cdot p^{0.13} \cdot \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \cdot \xi_m^p \cdot \sqrt{\cot \alpha} \quad \text{per frangimento di tipo “surging”}. \quad (1.47)$$

Nelle espressioni di Van der Meer sono riportati i seguenti parametri:

- $\Delta = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} - 1$ in cui γ_s e γ_0 sono rispettivamente il peso specifico della mantellata e dell’acqua;
- $D_{50} = (W/\gamma_s)^{1/3}$ diametro nominale;
- p è la permeabilità del complesso mantellata-strati filtro-nucleo dell’opera di difesa;
- N è la durata della mareggiata espressa in numero d’onde³;
- S_d è il grado di danneggiamento dell’opera;
- α è la pendenza della scarpa.

³ Il numero di onde N si ricava dalla semplice espressione $N = \frac{\tau}{T_m} \cdot 3600$ in cui τ è la durata della mareggiata e T_m è il periodo medio.

La permeabilità p è stata tenuta entro i limiti $0.10 \leq p \leq 0.60$ ed il valore di p viene scelto in funzione della dimensione dei massi della mantellata, degli strati filtro e del nucleo e dei relativi spessori.

La durata della mareggiata viene definita attraverso il numero delle onde N . Molte esperienze sono state condotte con un numero di onde variabile tra 1000 e 5000.

Il campo delle pendenze della mantellata è stato reso in modo che *cota* fosse compreso tra 1.5 e 5. La ripidità s_m è stata tenuta nel campo $0.005 < s_m < 0.05$; il peso specifico tra 2.0 e 3.1 t/m³.

Il danneggiamento di una struttura può essere definito come la conseguenza del superamento di un predefinito stato limite, quando le azioni del moto ondoso superano questo limite la struttura o parte di essa risponde con il danneggiamento.

Il danno S_d viene descritto dal rapporto tra l'area della porzione di mantellata soggetta al dislocamento (area oggetto di erosione) ed il quadrato del diametro nominale (fig. 6)

$$S_d = A_e / D_{50}^2 \quad (1.48)$$

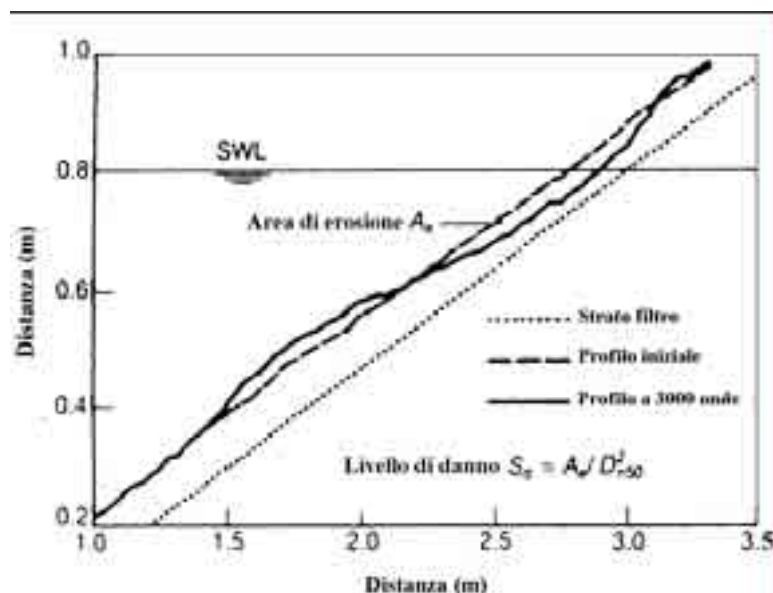


Figura 6 - Schema per la definizione di S_d

Attraverso lo schema è possibile rendersi conto dei dislocamenti subiti dall'opera di difesa. Il dissesto si raggiunge quando l'area della sezione erosa raggiunge il tetto dello strato filtro sottostante la mantellata.

Il limite di S_d dipende dalla scarpa della mantellata, la correlazione tra S_d e la scarpa dell'opera è riportata in tabella 1

Tabella 1-1- Valori di S_d			
Scarpa (cota)	Danno iniziale	Danno medio	Dissesto
1.5/1	2	3-5	8
2/1	2	4-6	8
3/1	2	6-9	12
4/1	3	8-12	17
6/1	3	8-12	17

Dalle equazioni di Van der Meer si evince quindi che il danno dell'opera è funzione della permeabilità (un aumento della permeabilità comporta un aumento della stabilità), della pendenza della scarpa, del peso specifico dei massi (un aumento del peso specifico comporta un aumento di stabilità) e del numero di onde.

In particolare si nota che un aumento della durata della mareggiata determina una diminuzione della stabilità. Si rileva come, nel caso di onde con frangimento di tipo plunging, la stabilità non è influenzata dalla pendenza della scarpa della mantellata, infatti in tale formula (1.46) non compare l'angolo di scarpa α .

Il grado di danno si ricava esplicitando S_d dalle equazioni 1.46 ed 1.47

L'influenza di ciascun parametro sulla stabilità dell'opera a gettata può essere messa in evidenza riportando l'altezza d'onda significativa H_s in funzione del numero di Irribarren :

$$\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L}}}$$

Un aumento di H_s significa maggiore stabilità: significa cioè che, a parità di tutti gli altri fattori, occorre, per raggiungere un certo grado di danneggiamento, un'altezza d'onda maggiore.

Dai grafici redatti da Van der Meer , riferiti ad opere a gettata in massi naturali, sono assunti come costanti tutti i parametri eccetto quello di cui si vuole studiare l'influenza sulla stabilità dell'opera stessa. Si nota dalle figure 7 e 8 come la stabilità aumenta al diminuire del numero d'onde N e come il grado di danno aumenta per H_s maggiori.

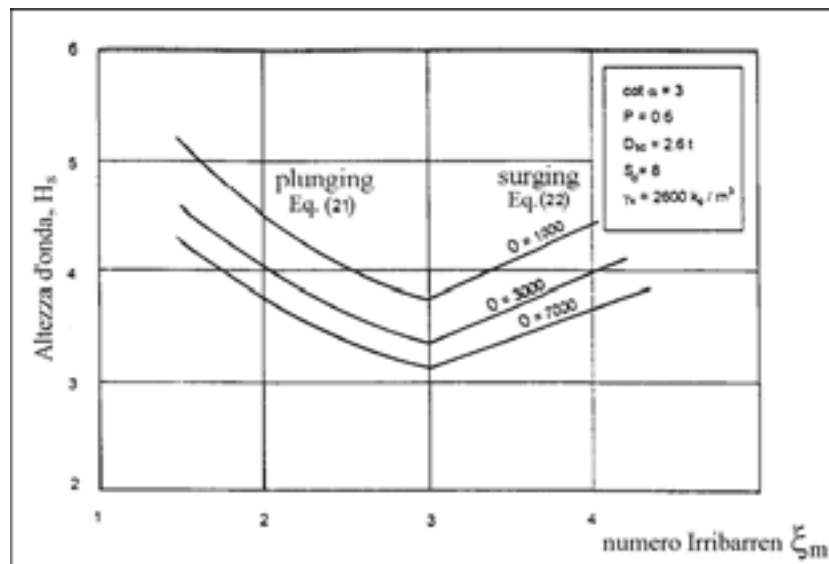


Figura 7 – influenza della durata della mareggiata N

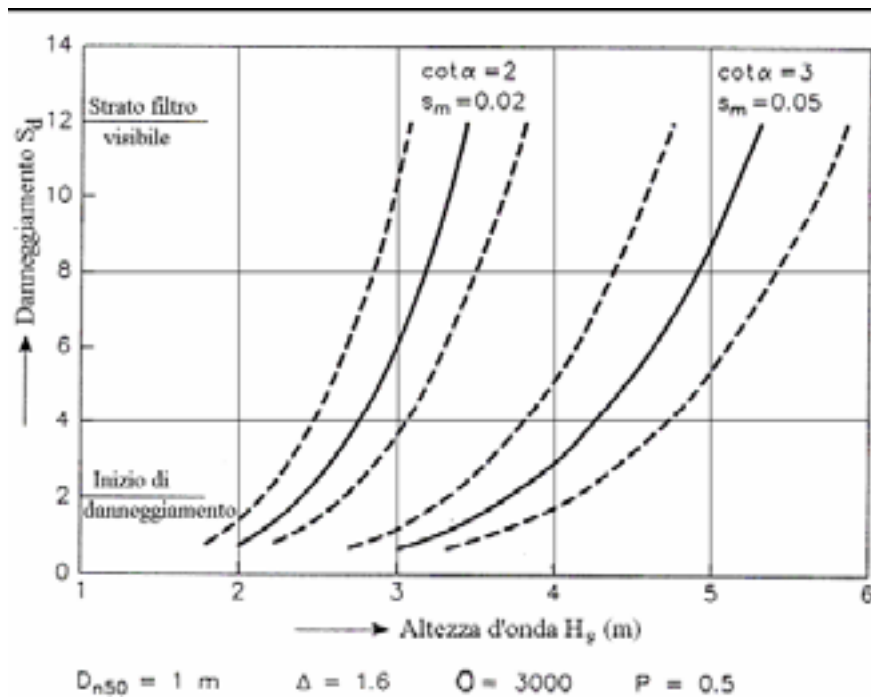


Figura 8 – il grado di danneggiamento in funzione di H_s ; le curve tratteggiate indicano un livello di affidabilità al 90%

8.2 Trasmissione del moto ondoso a tergo di una barriera sommersa

La trasmissione di energia ondosa a ridosso di un'opera a scogliera dipende principalmente dalla geometria della struttura, dalla quota di sommità R_c riferita al livello di quiete, dalla

larghezza B della berma di sommità, dalla permeabilità p e per quanto riguarda le condizioni ondose, principalmente dal periodo.

Dai risultati di numerose prove su modello, Van der Meer (1990) ha fornito una relazione tra il coefficiente di trasmissione C_t ed il rapporto tra la quota di sommità R_c (positiva per opere emerse, negativa per opere sommerse) e l'altezza significativa H_s :

$- 2.00 < R_c/H_s < -1.13$	$C_t = 0.80$
$- 1.13 < R_c/H_s < 1.20$	$C_t = 0.45 - 0.3 R/H$
$1.20 < R_c/H_s < 2.0$	$C_t = 0.10$

Altre ricerche sono state condotte recentemente da Seabrook e Hall (1998) presso i laboratori della Queen's University di Kingston, in Canada, per verificare l'efficacia delle opere a scogliera sommerse. Le prove condotte sotto diverse condizioni di moto ondoso incidente, sia in canale che in vasca, hanno evidenziato che le grandezze che maggiormente influenzano l'altezza d'onda trasmessa sono la sommersenza relativa, l'altezza d'onda incidente, la larghezza dell'opera⁴ (figura 9).

La formula proposta da Seabrook e Hall è la seguente:

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} = 1 - \left[e^{-0.65 \left(\frac{R_c}{H_i} \right) - 1.09 \left(\frac{H_i}{B} \right)} + 0.047 \frac{B \cdot R_c}{L \cdot D_{50}} - 0.067 \frac{R_c \cdot H_i}{B \cdot D_{50}} \right] \quad (1.49)$$

Gli autori suggeriscono di utilizzare tale equazione all'interno dei seguenti intervalli:

$$0 \leq \frac{B \cdot R_c}{L \cdot D_{50}} \leq 7.08 \quad 0 \leq \frac{R_c \cdot H_i}{B \cdot D_{50}} \leq 2.14$$

⁴ C_t è il coefficiente di trasmissione dato dal rapporto tra l'altezza d'onda significativa trasmessa e l'altezza d'onda incidente $C_t = H_t/H_i$

R_c è la quota della sommità dell'opera rispetto al livello di quiete

B è la larghezza del coronamento

L è la lunghezza d'onda incidente

D_{50} è il diametro medio del masso di mantellata

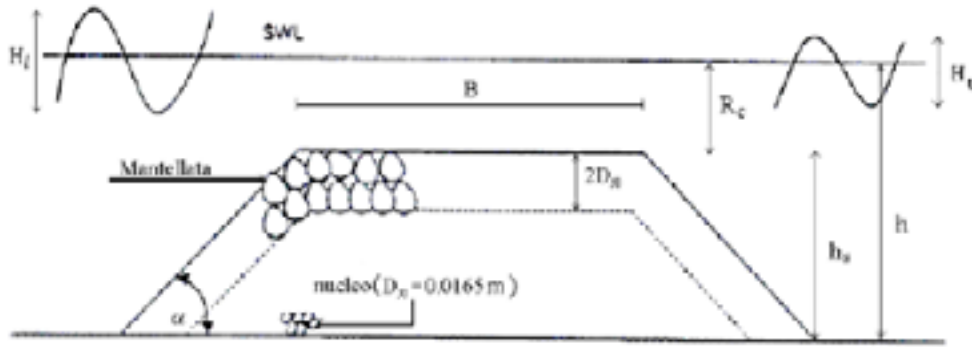


Figura 9 – Schema di riferimento preso in esame dai ricercatori della Queen’s University (1998)

I valori così ottenuti per l’altezza d’onda significativa trasmessa verranno utilizzati per il calcolo del Run-up e dell’arretramento della linea di riva R_{max} (eq. 1.34 e 1.35) per le spiagge protette da barriere sommerse.

9. Determinazione dei livelli di pericolosità

Per definire i livelli di pericolosità si è deciso di adottare degli indici legati ai parametri dai quali la pericolosità risulta dipendente; pertanto si definisce un indice di impatto I_i dato dalla seguente relazione

$$I_i = I_{Ru} + I_R + I_D \quad (1.50)$$

in cui

I_{Ru} = indice di risalita del moto ondoso;

I_R = indice di erosione a breve termine della linea di riva;

I_D = indice di danno alle opere di difesa costiera.

9.1 Calcolo dell’indice di risalita orizzontale del moto ondoso I_{Ru}

Per quanto riguarda la quota di Run-up orizzontale x_{max} , ovvero la distanza orizzontale percorsa dalle onde durante la risalita lungo la spiaggia, si è scelto, sulla base di numerosi dati sperimentali, di scegliere i seguenti intervalli di ampiezza:

$x_{max} < 20\%$ della spiaggia;

$20\% \leq x_{max} < 40\%$ della spiaggia;

$40\% \leq x_{max} < 60\%$ della spiaggia;

$60\% \leq x_{max} < 80\%$ della spiaggia;

$x_{max} \geq 80\%$ della spiaggia.

Sulla base di tali intervalli si assegnano i seguenti valori all'indice di risalita I_{Ru} :

	Run up orizzontale (%)				
	$x_{max} < 20$	$20 \leq x_{max} < 40$	$40 \leq x_{max} < 60$	$60 \leq x_{max} < 80$	$x_{max} \geq 80$
Indice di risalita I_{Ru}	0	1	2	3	4

Tabella 1-2

9.2 Calcolo dell'indice di erosione a breve termine I_R

Relativamente all'erosione a breve termine della linea di riva, dovuta ad un attacco ondoso, si è scelto di distinguere le seguenti classi di valori, sulla base della percentuale di spiaggia persa:

$R_{max} < 15\%$;

$15\% \leq R_{max} < 30\%$;

$R_{max} \geq 30\%$

Pertanto l'indice di arretramento I_R presenta valori tra 1 e 3 come indicato nella seguente tabella

	Arretramento linea riva (%)		
	$R_{max} < 15$	$15 \leq R_{max} < 30$	$R_{max} \geq 30$
Indice di arretramento I_R	1	2	3

Tabella 1-3

9.3 Calcolo dell'indice di danno alle opere di difesa costiera

Infine, per una completa trattazione della pericolosità da inondazione marina, occorre considerare l'eventuale danneggiamento che le opere di difesa costiera possono subire in occasione di un evento meteo-marino estremo; quindi è necessario introdurre tale indice di danno alle opere di difesa i cui valori sono riportati nella tabella seguente:

	Danno alle opere di difesa	
	No	Si
Indice di danno I_D	0	1

Tabella 1.4

9.4 Calcolo dei livelli di pericolosità

Come visto precedentemente la pericolosità si calcola definendo un indice di impatto dato dalla relazione (1.50) che riportiamo per comodità

$$I_i = I_{Ru} + I_R + I_D$$

Analizzando i valori che gli indici possono assumere, che vanno da un minimo di 1 ad un massimo di 8, si considera tale indice trascurabile per valori inferiori a 4:

- Impatto trascurabile per $I_i \leq 4$
- Impatto non trascurabile per $I_i > 4$

In questo modo si otterrà l'altezza significativa di riferimento (H_R), ovvero la minima altezza d'onda capace di mettere in crisi il litorale, per la quale l'indice di impatto non è trascurabile, come si può vedere nel seguente grafico esemplificativo (Fig.9):

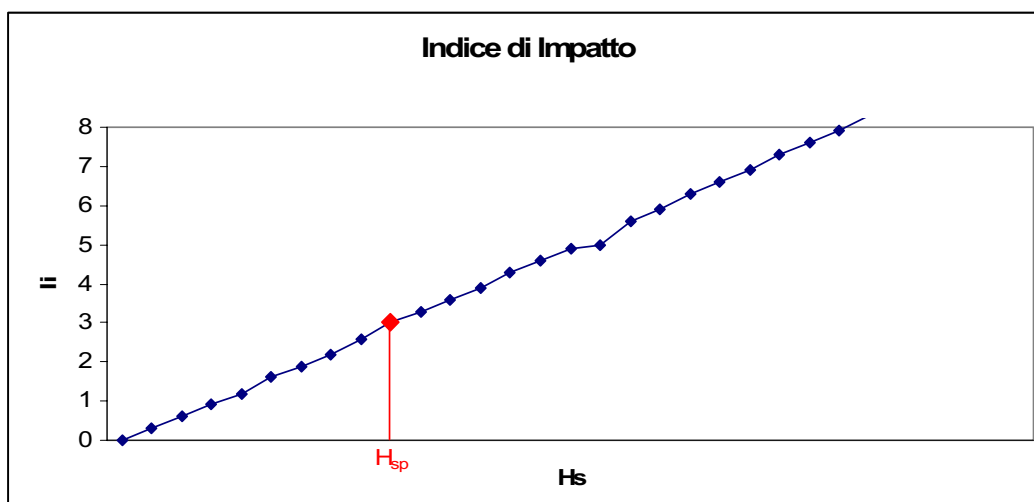


Figura 9 – In ascissa è riportato il valore dell' altezza d'onda di riferimento, in ordinata il valore dell'Indice di impatto.

Quindi, confrontando il valore dell'altezza di riferimento trovata, si valuta il periodo di ritorno ad essa associato in modo da determinare il livello di pericolosità che le compete come riportato nella seguente tabella:

	Periodo di ritorno T_R (anni)			
	≤ 2	≤ 10	≤ 25	≤ 50
H_R	P_4	P_3	P_2	P_1

Tabella 1-5

Con:

P_4 – pericolosità molto elevata.

P_3 – pericolosità elevata.

P_2 – pericolosità moderata.

P_1 – pericolosità bassa.

CAPITOLO II

DETERMINAZIONE DEL DANNO DA INONDAZIONE MARINA

1. Premesse

Il *danno* (**D**) è definito come il grado previsto di perdita di persone e/o beni, a seguito di un particolare evento calamitoso, esso dipende dall'uso del territorio e quindi dal *valore esposto* (**E**) degli elementi presenti, e dalla loro *vulnerabilità* (**V**), intesa come aliquota che andrebbe persa durante l'evento catastrofico:

Pertanto per determinare il livello di danno potenziale è necessario determinare la vulnerabilità costiera ed il valore degli elementi presenti lungo la costa.

2. La vulnerabilità costiera

In linea generale la *vulnerabilità* (**V**) rappresenta il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti al rischio risultante dal verificarsi dell'evento calamitoso temuto, ovvero la percentuale del valore di un elemento o di un gruppo di elementi che andrà perduto nel caso si verificasse l'evento calamitoso.

L'analisi della vulnerabilità costiera viene qui effettuata attraverso la valutazione di un *indice di vulnerabilità costiera* (**IVC**) (Dacquino, 2007) che misura il potenziale impatto dell'erosione delle coste e gli effetti dell'antropizzazione dell'area costiera che si intende esaminare. Tale analisi è stata condotta seguendo alcune indicazioni del progetto Coastal Erosion in Europe:

1. Popolazione residente all'interno dell'area identificata come RICE (Radium of Influence Coastal Erosion).
2. % di area urbanizzata e/o industrializzata in RICE.
3. % di area ad alto valore ecologico in RICE.
4. % di incremento di area urbanizzata nella fascia costiera di RICE.
5. Velocità di erosione nel lungo periodo dell'area costiera.

L'area costiera identificata come RICE è il luogo geometrico dei punti che obbediscono ad una o entrambe le seguenti condizioni:

- . distanza non superiore ai 500m dalla costa
- . altezza sul livello del mare non superiore ai 10m.

Si è scelto il valore di 10m, rispetto ai 5m indicati da Eurosion, per motivi di cautela e per tenere conto del grado di approssimazione del DTM (Digital Terrain Model) disponibile a scala nazionale.

Il DTM, infatti, è influenzato da una serie di errori:

- . la scala della cartografia di partenza;
- . l'approssimazione nel tracciamento delle isolinee sulla cartografia di partenza e l'equidistanza delle isolinee stesse;
- . l'errore nell'acquisizione digitale delle isolinee stesse;
- . il metodo usato per il calcolo delle quote;
- . l'errore di arrotondamento che nel caso specifico è pari a 0.5m, essendo le quote arrotondate al metro.

Tutti questi errori si sommano quadraticamente a formare un errore del DTM, che varia in funzione della quota media della zona e della morfologia della stessa.

Per quote basse questo errore può essere quantificato nell'ordine di 1 o 2m; se si assume, cautelativamente, l'errore di 2 m ed un livello di significatività di 0.01 (normalmente usato nei test statistici), la soglia di cut-off che garantisce che siano considerati nel RICE tutti i punti, significativamente, minori o uguali a 5m, è data dalla relazione (test ad una coda):

$$\frac{q_{cut-off} - 5}{2} = 2.33 \quad (2.1)$$

da cui

$$q_{cut-off} = 5 + 4.66 = 9.66 \cong 10 \quad (2.2)$$

L'area costiera identificata come RICE si ottiene dalla combinazione della fascia costiera di 500m di ampiezza con le aree a quota ≤ 10 m s.l.m. estratte dal DTM, disponibile a scala nazionale su un grigliato a maglie quadrate di 20m di lato.

Per lo studio della vulnerabilità costiera si possono prendere a riferimento le carte di uso del suolo CORINE Land Cover del 1990 e del 2000⁵, articolate come descritto nella tabella 2-1.

Uso del suolo 1° livello		Uso del suolo 2° livello		Uso del suolo 3° livello	
Codice	Descrizione	Codice	Descrizione	Codice	Descrizione
1.	Superfici artificiali	1.1	<i>Zone urbanizzate di tipo residenziale</i>	1.1.1	Zone residenziali a tessuto continuo
				1.1.2	Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado
		1.2	<i>Zone industriali, commerciali ed infrastrutturali</i>	1.2.1	Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati
				1.2.2	Reti stradali, ferroviarie e infrastrutture tecniche
				1.2.3	Aree portuali
				1.2.4	Aeroporti
		1.3	<i>Zone estrattive, cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati</i>	1.3.1	Aree estrattive
				1.3.2	Discariche
				1.3.3	Cantieri
		1.4	<i>Zone verdi artificiali non agricole</i>	1.4.1	Aree verdi urbane
				1.4.2	Aree ricreative e sportive
2.	Superfici agricole utilizzate	2.1	<i>Seminativi</i>	2.1.1	Seminativi in aree non irrigue
				2.1.2	Seminativi in aree irrigue
				2.1.3	Risaie
		2.2	<i>Colture permanenti</i>	2.2.1	Vigneti
				2.2.2	Frutteti e frutti minori
				2.2.3	Oliveti

⁵ Per semplicità di esposizione della metodologia descritta si è suggerito di utilizzare le carte CLC, è ovvio che qualora si disponesse di informazioni più dettagliate si consiglia l'uso di queste ultime nella fase applicativa della presente metodologia.

		2.3	<i>Prati stabili (foraggiere permanenti)</i>	2.3.1	Prati stabili (foraggiere permanenti)
		2.4	<i>Zone agricole eterogenee</i>	2.4.1	Colture temporanee associate a colture permanenti
				2.4.2	Sistemi colturali e particellari complessi
				2.4.3	Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
				2.4.4	Aree agroforestali
3.	Territori boscati e ambienti semi-naturali	3.1	<i>Zone boscate</i>	3.1.1	Boschi di latifoglie
				3.1.2	Boschi di conifere
				3.1.3	Boschi misti di conifere e latifoglie
		3.2	<i>Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea</i>	3.2.1	Aree a pascolo naturale e praterie
				3.2.2	Brughiere e cespuglietti
				3.2.3	Aree a vegetazione sclerofilla
				3.2.4	Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione
		3.3	<i>Zone aperte con vegetazione rada o assente</i>	3.3.1	Spiagge, dune e sabbie
				3.3.2	Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti
				3.3.3	Aree con vegetazione rada
				3.3.4	Aree percorse da incendi
				3.3.5	Ghiacciai e nevi perenni
4.	Zone umide	4.1	<i>Zone umide interne</i>	4.1.1	Paludi interne
				4.1.2	Torbiere
		4.2	<i>Zone umide marittime</i>	4.2.1	Paludi salmastre
				4.2.2	Saline
				4.2.3	Zone interditali
5.	Corpi idrici	5.1	<i>Acque continentali</i>	5.1.1	Corsi d'acqua, canali e idrovie
				5.1.2	Bacini d'acqua
		5.2	<i>Acque marittime</i>	5.2.1	Lagune
				5.2.2	Estuari
				5.3.3	Mari ed oceani

Tabella 2-1 – Legenda CORINE Land Cover

2.1 Popolazione residente in RICE

Tale fattore rappresenta la popolazione comunale residente nell'area del RICE (P_{RICE}), stimata in base alla seguente relazione (fonti: ISTAT⁶ e CORINE Land Cover 2000):

$$P_{RICE} = D_u \cdot A_{URICE} + D_A \cdot A_{ARICE} + D_N \cdot A_{NRICE} \quad (2.3)$$

in cui

A_{URICE} = area urbanizzata (codice 1) comunale contenuta nel RICE

A_{ARICE} = area agricola (codice 2) comunale contenuta nel RICE

A_{NRICE} = area naturale (codice 3) comunale contenuta nel RICE

D_U = densità abitanti in aree urbanizzate = $0.7485 \cdot \text{Pop} / A_U$

D_A = densità abitanti in aree agricole = $0.217 \cdot \text{Pop} / A_A$

D_N = densità abitanti in aree naturali = $0.035 \cdot \text{Pop} / A_N$

A_U = area urbanizzata comunale

A_A = area agricola comunale

A_N = area naturale comunale

Pop = popolazione comunale

In conformità alle indicazioni del progetto EUROSION sono stati assegnati i seguenti punteggi in funzione della PRICE calcolata per ogni comune costiero (tabella 2-2).

Indicatore	1punti	2 punto	3 punti
Popolazione in RICE	<5000	5000÷20000	>20000

Tabella 2-2

2.2 Area urbanizzata e/o industrializzata in RICE (U_{RICE})

Rappresenta la percentuale di area comunale urbanizzata o industrializzata (codici 1.1 – 1.2) presente nell'area di RICE rispetto al totale della superficie comunale interna al RICE stesso (fonte: CORINE Land Cover 2000).

⁶ E' preferibile usare aggiornamenti ISTAT recenti se disponibili.

In conformità alle indicazioni del progetto EUROSION sono stati assegnati i seguenti punteggi in funzione della area di RICE urbanizzata o industrializzata, calcolata per ogni comune costiero (tabella 2-3).

Indicatore	1 punti	2 punto	3 punti
% area urbanizzata o industrializzata in RICE	<10%	10÷40%	>40%

Tabella 2-3

2.3 Area ad alto potenziale ecologico in RICE (E_{RICE})

Rappresenta la percentuale di area comunale ad alto potenziale ecologico presente nell'area di RICE rispetto al totale della superficie comunale interna al RICE stesso (fonte: CORINE Land Cover 2000).

In conformità alle indicazioni del progetto EUROSION sono stati assegnati i seguenti punteggi in funzione della area di RICE ad alto potenziale ecologico, calcolata per ogni comune costiero (tabella 2-4).

Indicatore	0 punti	1 punto	2 punti
% area ad alto potenziale ecologico in RICE	<5%	5÷30%	>30%

Tabella 2-4

2.4 Incremento area urbanizzata/industrializzata nella fascia costiera di 10km (U_{10km})

Rappresenta l'incremento percentuale di area comunale urbanizzata e/o industrializzata (codici 1.1÷1.2) all'interno della fascia costiera di 10 km nel periodo 1990-2000 (fonti: CORINE Land Cover 1990 e 2000).

In conformità alle indicazioni del progetto EUROSION sono stati assegnati i seguenti punteggi in funzione dell'incremento di area urbanizzata/industrializzata nella fascia costiera di 10km, calcolato per ogni comune costiero (tabella 2-5).

Indicatore	0 punti	1 punto	2 punti
% incremento area urbanizzata o industrializzata nella fascia costiera di 10km	<5%	5÷10%	>10%

Tabella 2-5

2.5 Indice di erosione a lungo termine E

Al fine della valutazione della vulnerabilità costiera bisogna tenere conto della dinamica del litorale che si vuole esaminare, pertanto sarà necessario stimare la velocità di erosione della spiaggia in esame. In letteratura si suole considerare come valore soglia che indica una condizione di erosione la perdita di spiaggia con velocità almeno pari a 2 metri/anno. Quindi, è possibile attribuire all'indice di erosione a lungo termine i valori riportati nella seguente tabella:

Indice di erosione E	Velocità di erosione (metro/anno)	
	< 2	≥ 2
	0	1

Tabella 2-6

2.6 Indice di vulnerabilità costiera

L'indice di vulnerabilità costiera (IVC) si calcola, quindi, a partire dai fattori sopra descritti, come somma dei punteggi attribuiti a ciascun fattore:

$$IVC = P_{RICE} + U_{RICE} + E_{RICE} + U_{10km} + E \quad (2.4)$$

Tale indice assumerà valori compresi tra 2 e 11 in base ai quali è possibile attribuire dei livelli di vulnerabilità come descritto nella seguente tabella:

Vulnerabilità V	Indice di vulnerabilità costiera I_{VC}		
	≤ 3	≤ 7	≤ 11
	V_1	V_2	V_3

Tabella 2-7

Con

V_3 – vulnerabilità alta.

V_2 – vulnerabilità media.

V_1 – vulnerabilità bassa.

3. Il valore esposto

Per valore esposto si intende il valore che è possibile associare agli elementi “da difendere” sul territorio pertanto alla costituzione di detto fattore parteciperanno non solo le vite umane ed i beni immobili, ma anche le risorse ambientali e culturali così come dettato dalle legge 183/1989 e successive integrazioni.

La determinazione del *valore esposto* rappresenta un’attività particolarmente complessa in quanto si basa sulla necessità di definire, in maniera tendenzialmente omogenea, categorie di elementi estremamente differenziati tra loro. In linea generale potremmo definire i seguenti criteri per la determinazione del *valore esposto*:

- quando gli elementi presenti sul territorio sono beni monetizzabili, il loro valore esposto è rappresentato dal loro valore monetario;
- quando gli elementi presenti sul territorio sono persone, il loro valore esposto è rappresentato dal loro valore numerico;
- quando gli elementi presenti sul territorio sono risorse e beni ambientali e culturali, ecc., unici e di così grande rilevanza da costituire un patrimonio irrinunciabile per la collettività, il loro valore esposto è rappresentato dal bene stesso.

Risulta particolarmente utile distinguere quattro livelli di valore esposto:

E4 = valore esposto altissimo

E3 = valore esposto alto

E2 = valore esposto medio

E1 = valore esposto basso o nullo

Il **valore esposto altissimo** comprende: i centri urbani, le zone di completamento e di espansione, i nuclei di edificazione diffusa non presenti nel PRG, le spiagge i laghi e le aree di riserva integrale e generale delle aree protette.

Il **valore esposto alto** comprende: le aree attraversate da linee di comunicazione e da servizi di rilevante interesse, edificato produttivo di tipo industriale, le aree archeologiche, i SIC e le aree di riserva controllata delle aree protette. In queste aree si possono avere problemi per l'incolumità delle persone e per la funzionalità del sistema economico.

Il **valore esposto medio** comprende: le aree extraurbane, poco abitate, sede di edificazione sparsa, di infrastrutture secondarie, destinante sostanzialmente ad attività agricole o a verde pubblico, edificato produttivo.

Il **valore esposto basso** comprende: aree libere da insediamenti a prevalente destinazione agricola, incolte o protette.

4. Determinazione del danno potenziale

Il danno (D), come detto in precedenza, dipende, per ogni evento critico, dall'uso del territorio e quindi dal valore esposto degli elementi presenti e dalla loro vulnerabilità; esso è determinato dal prodotto dell'indice di vulnerabilità (IVC) con il valore esposto (E):

$$D = E \times V \quad (2.5)$$

Si distinguono quattro differenti livelli di danno determinati dall'incrocio dei valori calcolati per la vulnerabilità e per il valore esposto come mostrato in tabella 2-8:

Danno = E x V	V₃	V₂	V₁
E₄	D ₄	D ₃	D ₂
E₃	D ₃	D ₂	D ₁
E₂	D ₂	D ₁	
E₁	D ₁		

Tabella 2-8 – stima del danno potenziale

D4 = danno altissimo – in queste aree un evento calamitoso di particolare severità può provocare la perdita di vite umane, di ingenti beni economici e di valori ambientali e culturali inestimabili.

D3 = danno alto – in queste aree si possono avere problemi per l'incolumità delle persone e per la funzionalità del sistema economico.

D2 = danno medio – in tali aree sono improbabili problemi per l'incolumità delle persone e sono limitati gli effetti sul tessuto socio economico.

D1 = danno basso o nullo – in tali aree non esistono problemi per l'incolumità delle persone e sono limitati gli effetti sul tessuto socio economico.

CAPITOLO III

VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA INONDAZIONE MARINA

1. Premesse

L'approccio metodologico per l'identificazione del rischio, relativo al verificarsi di un evento calamitoso, è piuttosto complesso, infatti esso dipende dalla stima della pericolosità, che costituisce il presupposto essenziale per la valutazione del rischio sul territorio. Il rischio, difatti, è dato dalla combinazione della probabilità di accadimento del prefissato evento calamitoso, appunto la pericolosità, con il danno che subiscono gli elementi esposti al quel particolare evento.

La valutazione quantitativa del danno, come visto nel precedente capitolo, richiede, oltre ad una conoscenza dettagliata degli elementi esposti al fenomeno calamitoso, la stima della vulnerabilità, caratterizzata, quest'ultima da numerosi elementi di complessità e di aleatorietà.

2. La definizione del Rischio da inondazione marina

La definizione del rischio viene effettuata sulla base delle disposizioni del *DPCM del 29/09/1998, atto di indirizzo e di coordinamento* per la redazione dei Piani di Bacino, in base al quale il rischio è il risultato del prodotto di tre fattori:

- pericolosità o probabilità di accadimento dell'evento calamitoso;
- valore degli elementi di rischio (intesi come persone, beni localizzati, patrimonio ambientale);

- vulnerabilità degli elementi a rischio (che dipende sia dalla loro capacità di sopportare le sollecitazioni esercitate dall'evento, sia dall'intensità dell'evento stesso).

Il *rischio* (**R**) è definito come l'entità del danno atteso in una data area ed in un certo intervallo di tempo in seguito al verificarsi di un particolare evento calamitoso, esso è dato dalla relazione:

$$\mathbf{R = D \times P} \quad (3.1)$$

In cui $D = E \times V$ rappresenta il *danno*, così come definito nel Capitolo II, dato dal prodotto del *valore esposto* E per la *vulnerabilità* V, e P rappresenta la *pericolosità* così come definita nel Capitolo I.

Al fine della valutazione del rischio da inondazione marina è stato necessario quindi individuare innanzitutto i livelli di pericolosità costiera sulla base delle caratteristiche delle mareggiate, e, successivamente, valutare il danno potenziale in relazione al livello di antropizzazione del territorio costiero.

Le diverse condizioni di rischio sono dunque ottenute mediante l'incrocio del dato relativo al danno potenziale, che potrebbe subire l'elemento, con la classe di pericolosità del particolare evento calamitoso, come mostrato nella seguente tabella:

RISCHIO		Pericolosità			
Danno		P₄	P₃	P₂	P₁
	D₄	R ₄	R ₃	R ₂	R ₁
	D₃	R ₃	R ₂	R ₁	
	D₂	R ₂	R ₁		
	D₁	R ₁			

Tabella 3-1 Definizione del rischio da inondazione marina

Il DPCM 29/9/98 definisce quattro livelli di rischio:

- **R1 rischio moderato, area di attenzione:** per il quale i danni sociali, economici ed al patrimonio ambientale sono marginali.
- **R2 rischio medio, area di alta attenzione:** per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture ed al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività socio economiche.
- **R3 rischio elevato, area di rischio:** per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici ed alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, l'interruzione della funzionalità delle attività socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale.
- **R4 rischio molto elevato, area di alto rischio:** per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture ed al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche.

CAPITOLO IV

APPLICAZIONE N°1: LITORALE DI GUARDIA PIEMONTESE

1. Premesse

Nel presente capitolo è stata applicata la metodologia di valutazione del rischio da inondazione marina, descritta nei precedenti capitoli, sul tratto costiero del Comune di Guardia Piemontese, cittadina Calabrese che si affaccia sul Mar Tirreno.

Occorre preliminarmente fare alcune precisazioni:

- L'analisi statistica delle onde estreme è stata effettuata su un numero di anni di registrazione di dati di soli 4 anni (1999-2003), pertanto l'estrapolazione del periodo di ritorno delle onde presenta un certo grado di approssimazione.
- La scelta delle altezze d'onda fissate a 3, 4, 5, 6, e 7 metri, è dipesa da una esigenza esclusivamente esemplificativa, tenendo comunque conto del fatto che si tratta di altezze molto probabili al largo del Mar Tirreno.
- Per il calcolo del Run-up sulla spiaggia, al metodo analitico descritto nel Cap. I paragrafo 6, è stato affiancato il modello matematico di inondazione costiera MIKE 21, le cui caratteristiche saranno brevemente illustrate in seguito.

2. Caratteristiche generali⁷

Il tratto costiero su cui è stata applicata la metodologia descritta nei precedenti capitoli, è compreso tra Punta Intavolata a Nord ed il confine del centro abitato di Marina di Guardia Piemontese a Sud. Il litorale si sviluppa in direzione Nord Ovest – Sud Est per una lunghezza complessiva di circa 3.5 Km, interessando i Comuni di Acquappesa e Guardia Piemontese della Provincia di Cosenza.

⁷ Le informazioni descritte sono state fornite dalla Regione Calabria, Autorità di Bacino.

Negli anni più recenti la morfologia del litorale è caratterizzata da una sostanziale stabilità, la spiaggia antistante il promontorio è molto stretta ed è posta di fronte ad una scogliera radente che protegge la massicciata ferroviaria. Procedendo a sud verso Marina di Guardia Piemontese, l'arenile, difeso da una serie di frangiflutti paralleli alla costa, si allarga. In questo tratto la spiaggia è composta prevalentemente da ghiaia, ciottoli e massi. Più a sud, scogliere e rivestimenti che proteggono la spiaggia interna e il rilevato ferroviario. Al termine dell'area di interesse l'arenile torna a restringersi, con larghezza della spiaggia variabile da 20 a 30 m.

Le strutture presenti sul litorale sono costituite prevalentemente da alcune abitazioni nell'area urbana di Marina di Guardia Piemontese e dalla massicciata ferroviaria, che lungo l'intero tratto costiero si affacciano sul mare.

Nella figura 10 sono illustrate una corografia dell'area campione, in cui è evidenziata la posizione geografica della stessa, e la Carta Topografica d'Italia relativa all'area in questione, a cura dell'I.G.M., in scala 1:50.000, nella quale sono segnalati i limiti dell'area campione.



Cartografia dell'area campione n° 1 - Guardia Piemontese



Figura 1.1: Localizzazione dell'area campione n° 1 - Guardia Piemontese

Figura 10 – Inquadramento di Guardia Piemontese

3. Analisi meteo-marina al largo del paraggio costiero

Il paraggio del litorale d'interesse, che si affaccia nel basso Tirreno, è limitato a Sud-Est dal confine di Marina di Guardia Piemontese e a Nord-Ovest da Punta Intavolata e riguarda il settore compreso tra 170°N e 310°N. Il settore di traversia principale è compreso nel settore 230-290°N.

I dati utilizzati per l'analisi meteo-marina sono quelli della boa di Cetraro, della Rete Ondametrica Nazionale, durante il periodo di esercizio 1999-2003, nella figura 11 si possono vedere le principali direzioni di provenienza del moto ondoso, con la frequenza di apparizione delle altezze significative.

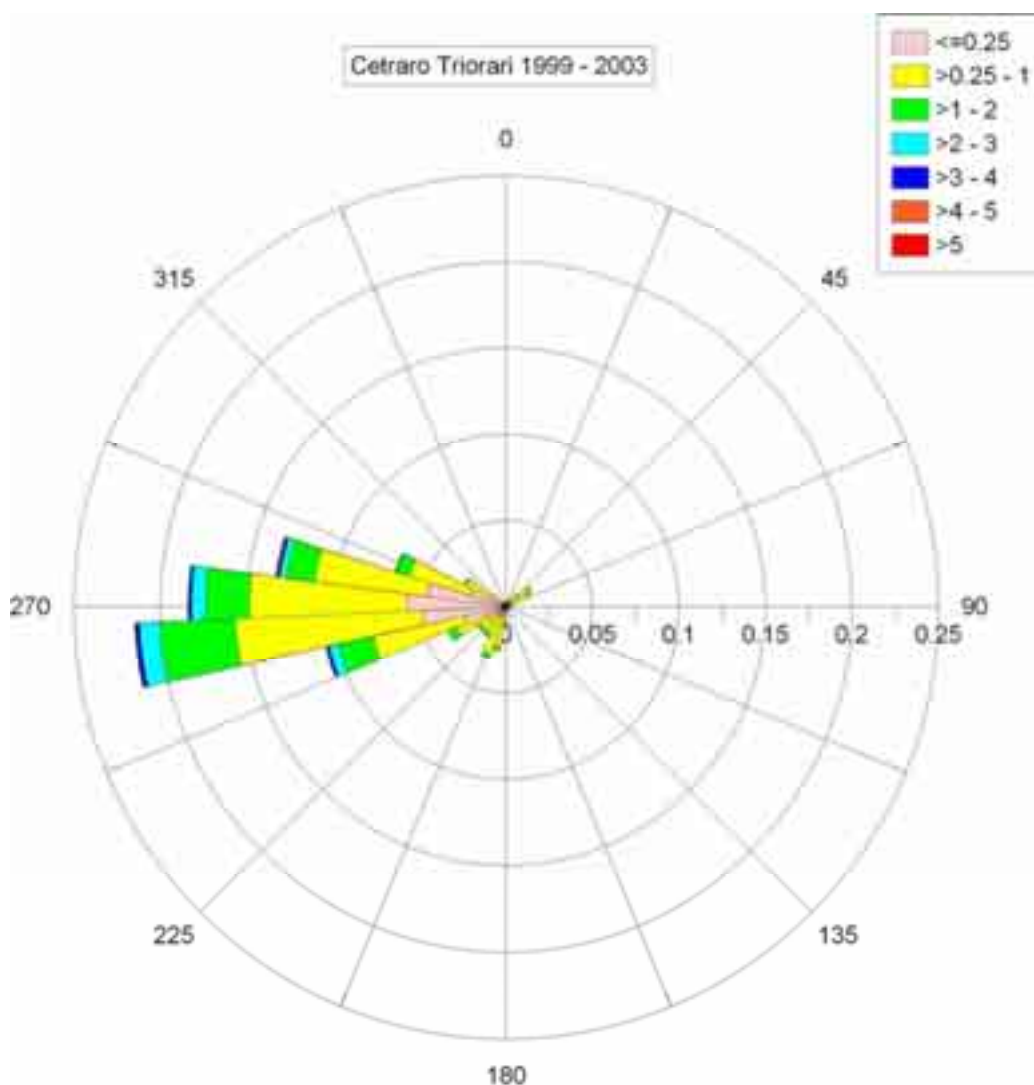


Figura 11 – Guardia Piemontese, moto ondoso al largo.

Si nota come le onde più alte, caratterizzate da altezze significative di circa 4 metri, provengano dal settore 230-280° N.

Per la determinazione della cosiddetta “onda di riferimento” , indispensabile per lo sviluppo del presente lavoro, è necessario eseguire un’elaborazione statistica delle altezze d’onda maggiori registrate al culmine di mareggiate indipendenti relative alla serie storica di riferimento desunta dai dati ondametrici. E’ possibile ricavare le caratteristiche del moto ondoso (definite in termini di altezza significativa e periodo) da associare ad assegnati periodi di ritorno mediante il metodo denominato Pick Over Treshold (POT, cfr. Cap. I paragrafo 2 e 3).

Dal punto di vista statistico il metodo POT consiste nello schematizzare il fenomeno ondoso attraverso il processo estratto dai massimi locali delle mareggiate eccedenti un’altezza di soglia H_0 opportunamente prestabilita e nel valutare le caratteristiche temporali con cui le mareggiate si manifestano. Da tale analisi si sono dedotti i risultati visualizzati in figura 12 e riportati in tabella 4-1

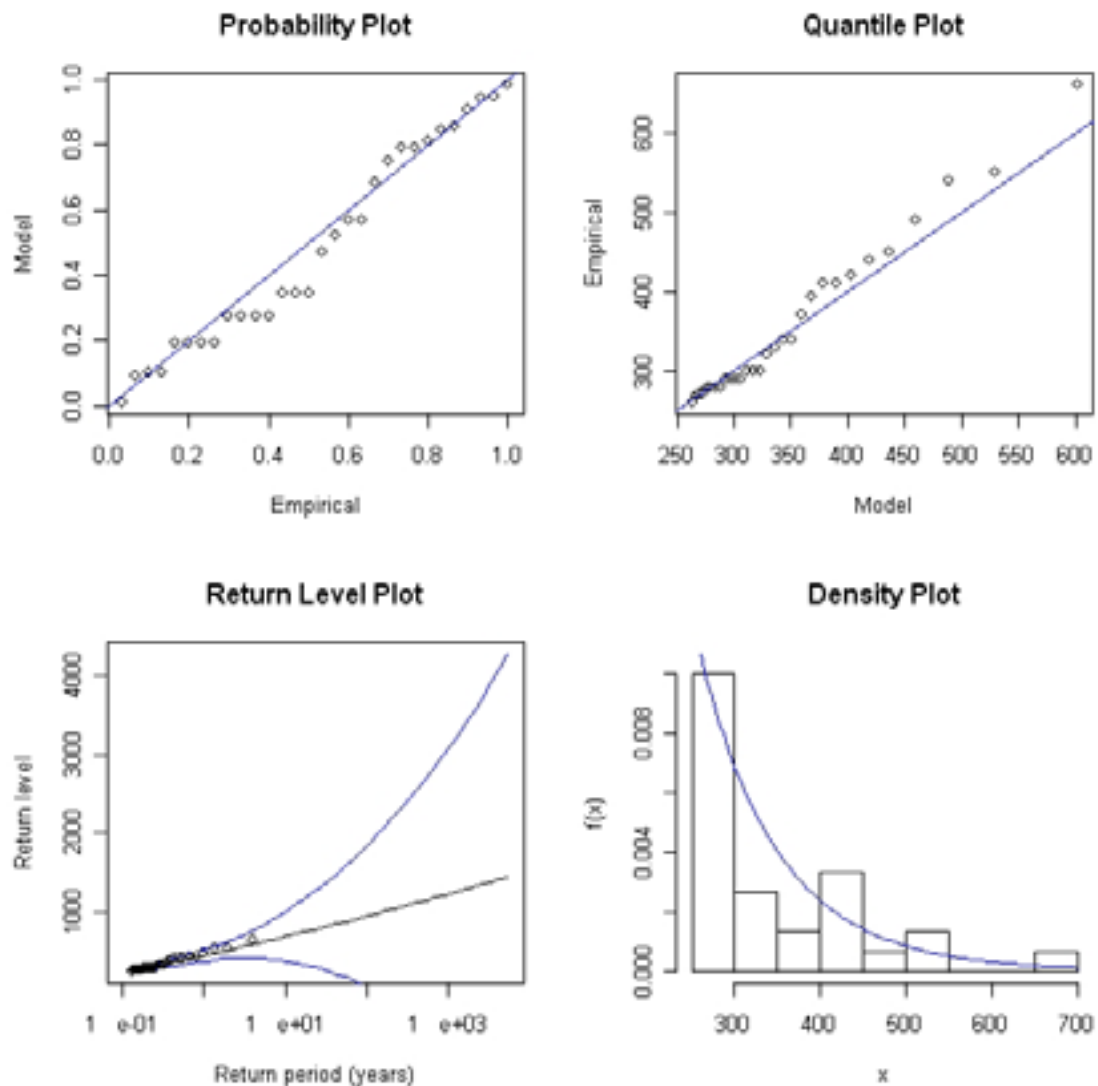


Figura 12 – livelli di ritorno per la boa di Cetraro.

	Periodo di Ritorno T_R (anni)
Hs=3 metri	< 2 anni
Hs=4 metri	< 2 anni
Hs=5 metri	2 anni
Hs=6 metri	< 5 anni
Hs=7 metri	10 anni

Tabella 4-1 – Periodi di ritorno omnidirezionali.

4. Studio del frangimento

Il tratto costiero di Guardia Piemontese è stato analizzato per tre diversi profili (Figura 13), in ognuno dei quali è stato effettuato uno studio del frangimento delle onde.

Profilo 1 – è rappresentativo del tratto costiero più a Nord del litorale di Guardia Piemontese che va da Punta Intavolata al promontorio di Palmentello.

Profilo 2 – è rappresentativo del tratto costiero che va dal promontorio di Palmentello alla foce della Fiumara dei Bagni.

Profilo 3 – è rappresentativo del tratto costiero che va dalla Fiumara dei Bagni al termine dell'abitato di Guardia Piemontese.

Le informazioni relative alla pendenza ed alle caratteristiche morfologiche della spiaggia, ai rilievi batimetrici ed alle caratteristiche sedimentologiche del fondale sono state fornite dall'Autorità di Bacino della Regione Calabria.

Il procedimento di calcolo delle onde frangenti rispettivamente di 3, 4, 5, 6, e 7 metri, per ciascuno dei tre profili, descritto nel Capitolo I paragrafo 4, ha fornito i risultati riassunti nella tabella 4-2.

Altezza d'onda al largo (metri)	Profilo 1		Profilo 2		Profilo 3	
	d_b (m)	H_b (m)	d_b (m)	H_b (m)	d_b (m)	H_b (m)
$H_s=3$ metri	3.00	1.87	3.00	1.89	3.00	1.89
$H_s=4$ metri	4.00	2.50	4.00	2.51	4.00	2.51
$H_s=5$ metri	5.00	3.12	5.00	3.14	5.00	3.14
$H_s=6$ metri	5.50	3.43	5.50	3.46	5.50	3.46
$H_s=7$ metri	6.50	4.06	6.50	4.09	6.50	4.09

Tabella 4-2 – Altezze d'onda al frangimento con le rispettive profondità.

In tabella sono riportati i valori delle altezze d'onda al frangimento (H_b) e delle rispettive profondità di frangimento (d_b), che saranno poi utilizzati per il calcolo del Run-up e per il calcolo dell'arretramento della spiaggia come descritto nei successivi paragrafi.

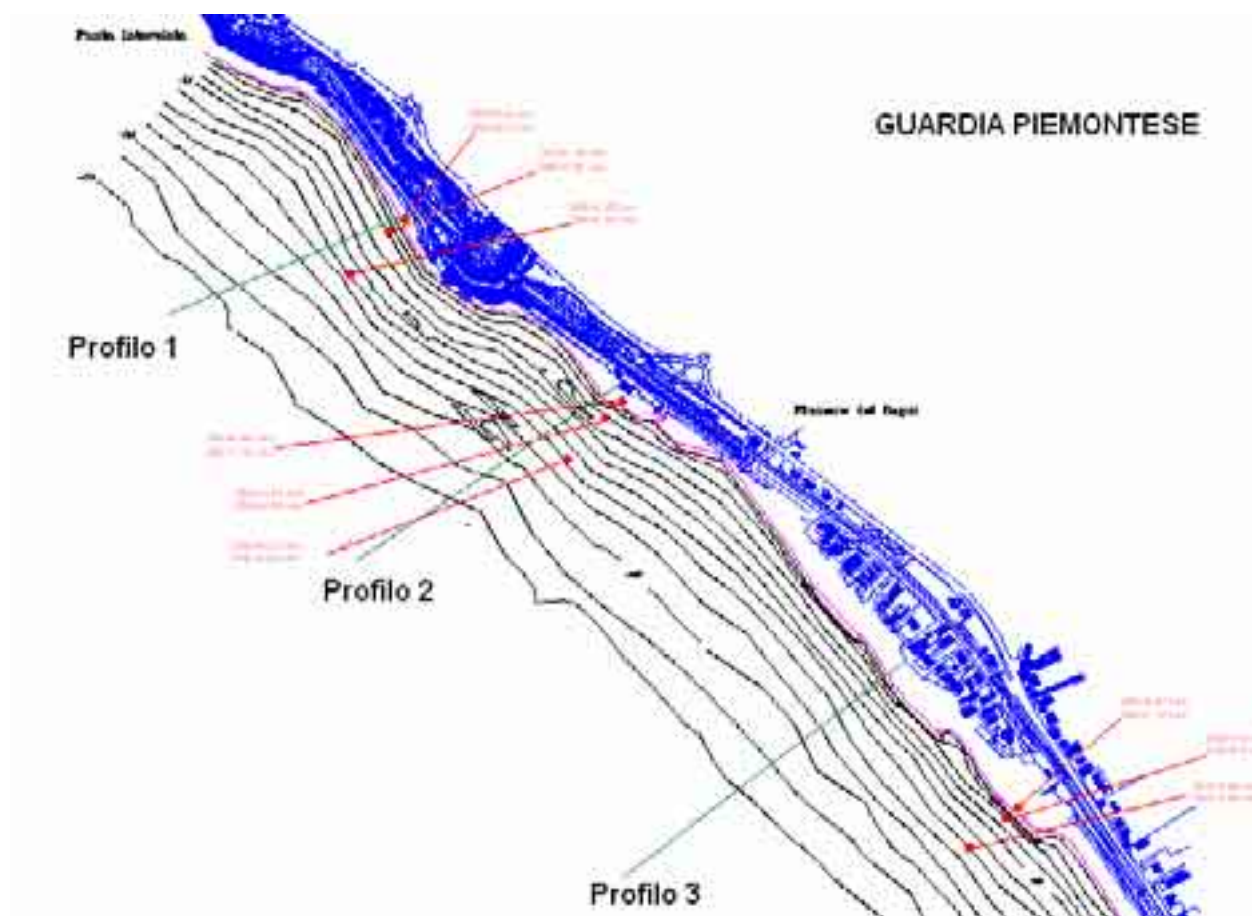


Figura 13 – Individuazione dei profili rappresentativi del tratto costiero.

5. Calcolo del sovrizzo

Il percorso analitico che porta alla stima del sovrizzo complessivo è descritta nel Capitolo I paragrafo 5, pertanto nella tabella seguente (tabella 4-3) si riportano i risultati ottenuti per il litorale di Guardia Piemontese.

Altezza d'onda al largo (metri)	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3
	S	S	S
$H_S=3$ metri	0.88	0.88	0.88
$H_S=4$ metri	1.00	1.00	1.005
$H_S=5$ metri	1.12	1.13	1.13
$H_S=6$ metri	1.18	1.19	1.19
$H_S=7$ metri	1.30	1.31	1.31

Tabella 4-3 – Valori del sovrizzo (S) in metri, per Guardia Piemontese.

6. Calcolo della distanza orizzontale di risalita del moto ondoso

Il calcolo della distanza di risalita del moto ondoso lungo spiaggia, ovvero del Run-up orizzontale, è stato effettuato mediante le formule di Massel e Pelinovsky descritte nel Capitolo I paragrafo 6. A tale procedimento analitico è stato affiancato, al fine di validarne i risultati numerici, l'utilizzo del modello matematico di inondazione costiera MIKE 21.

6.1 Il MIKE 21

Il MIKE 21 è un pacchetto software ingegneristico professionale di simulazione delle correnti a pelo libero con schema bidimensionale, applicabile in ambiente fluviale e marino indistintamente. Il MIKE 21 è utilizzabile per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi, estuari, baie, aree costiere e mari, comprendenti trasporto solido, qualità delle acque, propagazione delle onde, run-up costiero, eutrofizzazione, trasporto di sedimenti coesivi ed altro.

Oltre ai fenomeni idrodinamici, di trasporto-dispersione e di qualità dell'acqua, simulati da tre codici HD, AD e WQ, MIKE 21 è in grado di rappresentare anche i fenomeni di propagazione del moto ondoso sottocosta, che sono responsabili della generazione delle correnti litoranee, di fenomeni come il run-up e il frangimento delle onde, e di tenere conto degli effetti direzionali del vento che possono sovrapporsi alla corrente idrica nel portare alla deriva gli inquinanti scaricati dalle foci fluviali o da altri scarichi puntuali.

I fenomeni di run up sono stati simulati dal codice BW (Boussinesq wave) del MIKE 21 ed in particolare dal modulo monodimensionale (1DH).

Il codice BW risolve le equazioni di Boussinesq formulate da Madsen e Sorensen (1992) .

In questa versione è possibile scegliere tra due tipi di equazioni:

- Equazioni di Boussinesq classiche
- Equazioni di Boussinesq integrate

Le equazioni di Boussinesq classiche sono utilizzate se il rapporto tra la massima

profondità della colonna d'acqua e la lunghezza d'onda in acque profonde , $\frac{h_{\max}}{L_0}$, è minore di 0.22.

Le equazioni di Boussinesq integrate includono i cosiddetti "deep water terms", permettendo di estendere il modello nelle acque più profonde con un più piccolo periodo d'onda, definito, $h_{\max}/L_0 = 0.5$.

La versione utilizzata del MIKE 21 BW (Boussinesq waves) 2001 include due moduli:

- Modulo 2DH
- Modulo 1 DH

Modulo 2DH

Il modulo 2DH (2 punti nel piano orizzontale) risolve le equazioni integrate di Boussinesq attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Il modulo è tradizionalmente applicato per il calcolo dei coefficienti di agitazione delle onde incidenti all'interno di un porto.

Il modulo include la rappresentazione dei seguenti fenomeni fisici:

- Shoaling
- Rifrazione
- Diffrazione
- Parziale riflessione e trasmissione
- Interazione non lineare tra le onde

Le equazioni sono risolte in termini dell'elevazione superficiale e delle componenti della velocità integrate lungo la profondità, P e Q.

Modulo 1DH

Con il modulo 1DH sono simulate in tempo reale le dinamiche della "surf zone" e della "swash zone" per ogni profilo costiero. In aggiunta ai fenomeni descritti per il modulo 2DH (eccetto la rifrazione), questo modulo include:

- Wave breaking
- Moving Shoreline
- Trasformazione di onde non lineari dalle acque profonde, attraverso la zona di frangimento fino alla battigia
- Calcolo del run-up ed undertow



Figura 14- Vista grafica del modulo 1DH

In questo modulo sono, inoltre, descritti fenomeni come la generazione e il rilascio di energia a bassa frequenza dovuto principalmente alla trasformazione delle onde. Questo è molto importante per descrivere i processi di risonanza all'interno dei porti e i processi costieri.

Generalmente nel modulo 1DH BW del MIKE 21 sono risolte le equazioni di Boussinesq (Madsen 1983) integrate in cui sono inclusi i cosiddetti "deep waters terms".

Queste sono risolte attraverso un metodo agli elementi finiti definito metodo di Galerkin (Madsen 1991).

Dati di Input:

I dati di base di Input per il modulo BW del MIKE 21 consistono di:

- Selezione del modulo
- Dati batimetrici
- Tipo di equazioni
- Periodo di simulazione
- Condizioni al contorno
- Dati ondametrici

Selezione del modulo

A questo punto bisogna semplicemente scegliere se utilizzare il modulo 1DH oppure il modulo 2DH, con tutte le differenziazioni suddette. In questo studio è stato utilizzato il primo.

Dati batimetrici

Immettere dei dati batimetrici corretti e adeguati al modello è essenziale per ottenere dei risultati il più vicino possibile alla realtà, infatti il valore di profondità massima è correlato al periodo delle onde, e il valore di profondità minima è correlato al valore di altezza d'onda massima, ciò implica che dovremmo inserire delle griglie molto fitte per definire con la massima precisione la profondità in ogni punto ma questo non è possibile perché si andrebbero ad allungare in modo determinante i tempi di calcolo del computer. E' quindi necessario trovare un giusto compromesso tra una corretta batimetria e un corretto regime ondoso.

Per settare la batimetria sono richiesti delle griglie 2D (formato file : .dfs2 oppure .dt2 , per il modulo) per il modulo 2DH, mentre viene utilizzato un profilo monodimensionale (formato file : .dsf1, o .dt1) per il modulo 1DH, denominato cross-shore profile.



Figura 15- Esempio di profilo batimetrico

Tipo di Equazioni

In questa finestra bisogna decidere se includere o meno i termini di acqua profonda, solitamente per far diminuire i tempi di calcolo si escludono, in considerazione del fatto che non portano a grandi variazioni nei risultati in uno studio di questo tipo.

Periodo di simulazione

A questo punto dobbiamo trovare un adeguato numero di time step, e una corretta durata del time step, ovviamente dal prodotto di questi due termini si ottiene il periodo di simulazione. L'adeguatezza della durata del time step può essere controllata attraverso il numero di Courant, che viene riportato in basso nella finestra (Figura 16), il quale non deve superare il valore di 0.5, perché in generale oltre questo valore il modello ha problemi di stabilità anche se ciò può dipendere anche dai dati batimetrici inseriti.

Il numero di Courant è definito come:

$$C_R = c \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

con

c = celerità delle onde

Δt = passo temporale (time step)

Δx = passo spaziale (grid spacing)

In definitiva per scegliere un adeguato time step dobbiamo seguire i seguenti passaggi:

- determinazione della spaziatura della griglia Δx
- determiniamo il massimo valore del numero di Courant che il modello può sopportare
- possiamo quindi determinare il valore del time step massimo

$$\Delta t_{\max} = \Delta x \frac{C_r}{c}$$



Figura 16- Finestra per l'immissione del periodo di simulazione

Condizioni al contorno

Dopo aver inserito la batimetria un'altra cosa fondamentale da fare è la definizione delle condizioni al contorno, esse possono essere generate dal programma stesso attraverso l'utilizzo del Pre- e Post-processing. oppure si possono definire esplicitamente, essi possono essere aperti o chiusi.

Anche le onde incidenti sono specificate attraverso la determinazione delle condizioni al contorno e possono essere specificate lungo i contorni aperti o generate internamente con il modello.

Lungo i contorni aperti, l'energia delle onde incidenti è ottenuta da una serie temporale di elevazioni della superficie o da un flusso di densità perpendicolare ai contorni. Se vengono inclusi i termini di acque profonde sono richieste delle informazioni aggiuntive circa la derivazione dell'elevazione superficiale e il moto delle onde riflesse che uscenti dai contorni aperti. E' importante notare che i contorni aperti sono riflettenti al 100%, questo è il motivo per il quale la generazione interna delle onde è spesso preferita alla generazione con contorni aperti.

Contrariamente a quelli aperti con contorni chiusi con c'è flusso attraverso i bordi, in questo caso non devono essere specificate le condizioni al contorno come l' elevazione superficiale, questo tipo di contorno è riflettente solo se non viene accoppiato ad uno strato poroso.

Dati ondametrici

L'immissione di questo tipo di dati si fa attraverso il Mike 21 Toolbox, dove si trova la tool per le onde, come si può notare dalla Figura 17 per ottenere un file delle onde bisogna specificare la teoria che si vuole utilizzare, l'altezza significativa, il periodo significativo e successivamente il periodo di simulazione del fenomeno ondoso con il corrispettivo time step.

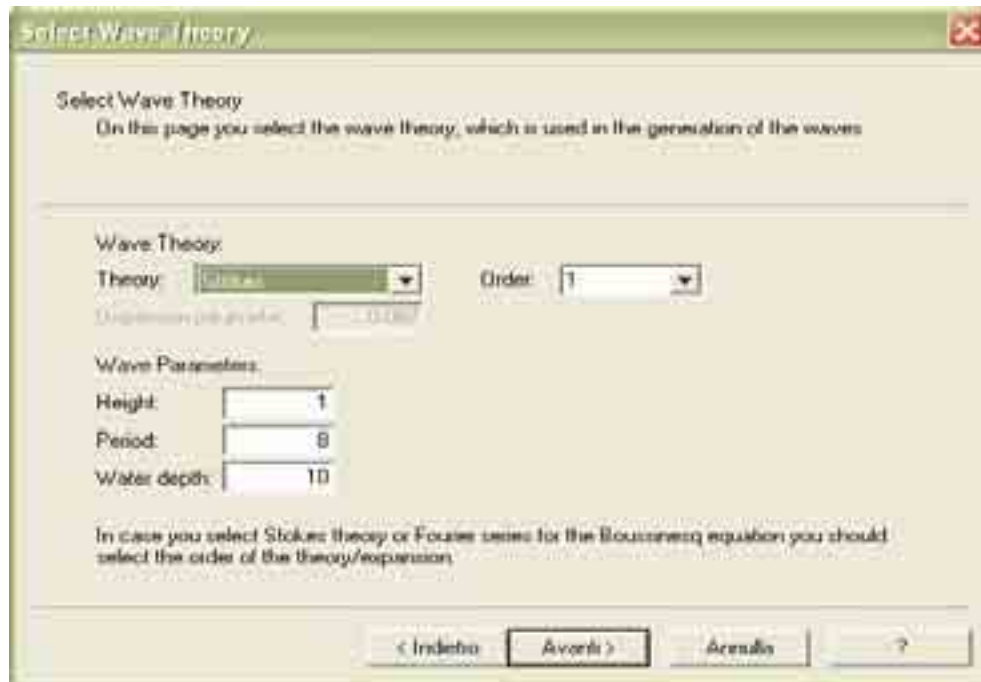


Figura 17- Finestra per l'immissione dei dati ondametrici

Dati di Output

I risultati del modulo del MIKE 21 BW 1DH includono i seguenti tipi di output:

- Deterministic output
- Phase-average output
- Moving Shoreline output

Deterministic output

I risultati del modulo consistono in arrays monodimensionali contenenti una o più delle seguenti quantità

- Velocità nella direzione x integrata lungo la profondità U:

$$U = \frac{P}{d + \xi}$$

- La profondità istantanea h :

$$h = d + \xi$$

- Livello medio dell'acqua

Il livello medio dell'acqua è quello definito dalla batimetria scelta e non varia nel tempo.

- Elevazione superficiale
- Variabile ausiliare w

$$w = \frac{\delta}{\partial x} \left(d \frac{d\xi}{\partial x} \right)$$

- Velocità nella direzione x integrata lungo la profondità La velocità U è definita da:

$$U = \frac{P}{d + \xi}$$

Phase-averaged output

Sono determinati i seguenti parametri di output:

- Altezza d'onda significativa H_{m0}

$$H_{m0} = 4\sigma$$

dove σ è la deviazione standard dell'elevazione superficiale.

- Massima altezza d'onda H_{\max}
- Massima elevazione superficiale ξ_{\max}
- Minima elevazione superficiale ξ_{\min}
- Elevazione superficiale media ξ_{mean}
- Velocità media u_0

$$u_0 = \frac{P - c\delta}{d + \xi - \delta}$$

- Skewness S

$$S = \frac{E(\xi^3)}{(E(\xi^2))^{\frac{3}{2}}}$$

- Kurtosis K

$$K = \frac{E(\xi^4)}{(E(\xi^2))^2} - 3$$

Moving shoreline output:

L'output consiste in serie temporale contenente i seguenti tre parametri di output:

- Run-up orizzontale
- Run-up verticale
- Run-up totale

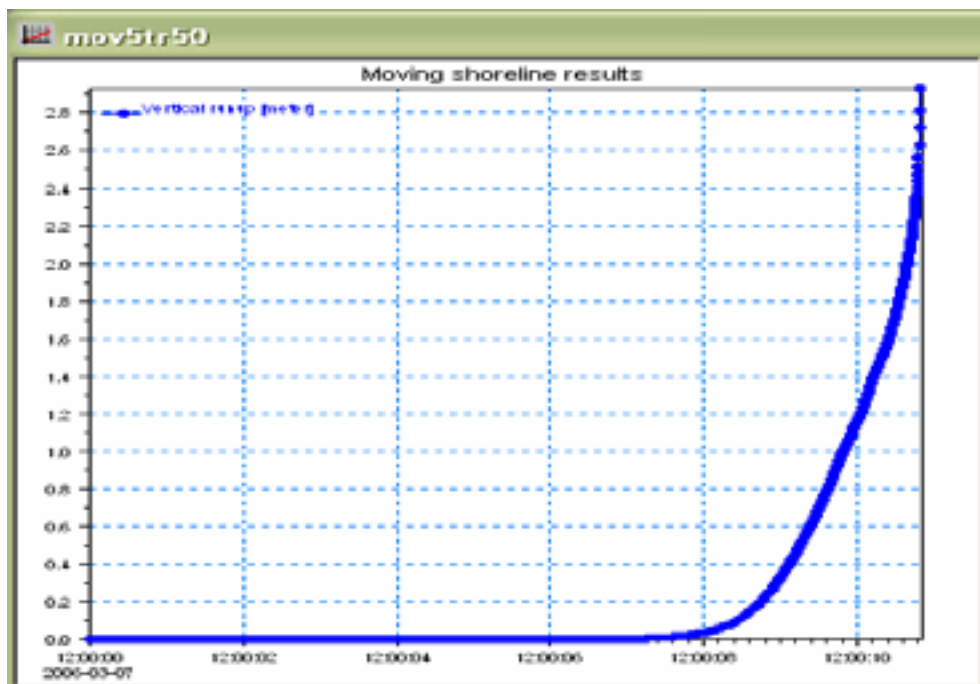


Figura 18 - Run-up verticale

6.2 Il Run-up orizzontale x_{max}

Nella tabella (tabella 4-4) riportata di seguito sono riassunti i risultati per il Run-up orizzontale ottenuti, per ciascuno dei tre profili del litorale di Guardia Piemontese, mediante le formule di Massel-Pelinovsky ed il software MIKE 21.

	Profilo 1 (21m - 19%)			
	Mike 21		Massel - Pelinovsky	
	run-up (m)	xmax (m)	run-up (m)	xmax (m)
$H_s=3m$	1,29	5,19	1,04	6,83
$H_s=4m$	2,40	10,88	1,39	9,99
$H_s=5m$	2,87	13,24	1,73	12,84
$H_s=6m$	3,32	15,52	1,86	14,37
$H_s=7m$	3,40	15,87	2,21	17,27

Profilo 2 (45m - 8,3%)				
	Mike 21		Massel - Pelinovsky	
	<i>run-up (m)</i>	<i>xmax (m)</i>	<i>run-up (m)</i>	<i>xmax (m)</i>
$H_s=3m$	1,43	14,21	1,58	18,62
$H_s=4m$	2,60	24,40	2,11	28,23
$H_s=5m$	2,87	30,43	2,64	34,24
$H_s=6m$	2,94	35,62	2,84	38,47
$H_s=7m$	3,55	40,11	3,37	46,32

Profilo 3 (43m - 9,9%)				
	Mike 21		Massel - Pelinovsky	
	<i>run-up (m)</i>	<i>xmax (m)</i>	<i>run-up (m)</i>	<i>xmax (m)</i>
$H_s=3m$	1,64	13,12	1,45	13,81
$H_s=4m$	2,65	23,42	1,93	19,28
$H_s=5m$	2,73	24,33	2,42	25,20
$H_s=6m$	2,84	25,31	2,60	28,87
$H_s=7m$	3,40	30,99	3,08	34,81

Tabella 4-4 - Confronto tra i risultati del Mike 21 e le formule di Massel-Pelinovsky. Nella tabella, in parentesi dopo la scritta *Profilo*, sono riportate rispettivamente la lunghezza e la pendenza media della spiaggia.

Dal confronto si evince una buona corrispondenza dei risultati, e si nota come, generalmente, il MIKE 21 sottostimi i risultati calcolati con Massel e Pelinovsky.

7. Calcolo dell'erosione a breve termine

In questo paragrafo sono riportati i risultati dello studio dell'erosione a breve termine, secondo i criteri descritti nel Capitolo I paragrafo 7.

Si tratta della frazione di metri lineari di spiaggia (R_{max}) che vanno persi a seguito dell'azione del moto ondoso. Nella tabella seguente (tabella 4-5) sono riportati tali valori per i tre tratti di costa di Guardia Piemontese, corrispondenti alle diverse altezze d'onda:

	Profilo 1 (21m)	Profilo 2 (45m)	Profilo 3 (43m)
	$R_{max} (m)$	$R_{max} (m)$	$R_{max} (m)$
$H_s=3m$	3,1	3,6	1,6
$H_s=4m$	6,0	6,7	3,8
$H_s=5m$	9,3	10,1	6,4
$H_s=6m$	11,0	11,9	7,9
$H_s=7m$	14,6	15,7	11,0

Tabella 4-5 – metri lineari di spiaggia persa a seguito di un attacco ondoso.

8. Determinazione dei livelli di pericolosità

Per definire i livelli di pericolosità, è necessario calcolare preliminarmente un indice di impatto determinato dalla formula (1.50)

$$I_i = I_{Ru} + I_R + I_D$$

In questo modo, trovati i valori dei tre indici che lo compongono, dal valore assunto dall'indice di impatto, si ricava l'altezza d'onda di riferimento H_R che rappresenta la minima altezza d'onda capace di mettere in crisi il litorale.

8.1 Calcolo dell'indice di risalita del moto ondoso I_{Ru}

Partendo dai risultati riportati nella tabella 4-4 possiamo agevolmente calcolare la percentuale di spiaggia interessata dalla risalita del moto ondoso per differenti altezze significative, indispensabile per attribuire un punteggio all'indice I_{Ru} .

Nelle tabelle che seguono sono riportati, per ciascuno profilo, i valori della lunghezza della spiaggia emersa, del run-up orizzontale calcolato mediante il Mike 21 e mediante Massel-Pelinovsky, la percentuale di spiaggia emersa interessata dalla risalita del moto ondoso; nell'ultima colonna è infine riportato il valore dell'Indice di risalita del moto ondoso calcolato secondo quanto descritto nel Capitolo I paragrafo 9.1.

Profilo 1					
	Larghezza spiaggia	$x_{max} (M21)$	$x_{max}(M-P)$	% spiaggia	I_{Ru}
Hs=3m	21 m	5,19 m	6,83 m	29 %	1
Hs=4m	21 m	10,88 m	9,99 m	51 %	2
Hs=5m	21 m	13,24 m	12,84 m	62 %	3
Hs=6m	21 m	15,52 m	14,37 m	71 %	3
Hs=7m	21 m	15,87 m	17,27 m	79 %	3

Profilo 2					
	Larghezza spiaggia	$x_{max} (M21)$	$x_{max}(M-P)$	% spiaggia	I_{Ru}
Hs=3m	45 m	14.21 m	18.62 m	36 %	1
Hs=4m	45 m	24.40 m	28.23 m	58 %	2
Hs=5m	45 m	30.43 m	34.24 m	72 %	3
Hs=6m	45 m	35.62 m	38.47 m	82 %	4
Hs=7m	45 m	40.11 m	46.32 m	96 %	4

Profilo 3					
	Larghezza spiaggia	$x_{max} (M21)$	$x_{max}(M-P)$	% spiaggia	I_{Ru}
Hs=3m	43 m	13.12m	13.81 m	31 %	1
Hs =4m	43 m	23.42 m	19.28 m	50 %	2
Hs=5m	43 m	24.33 m	25.20 m	58 %	2
Hs=6m	43 m	25.31 m	28.87 m	63 %	3
Hs=7m	43 m	30.99 m	34.81 m	76 %	3

Tabella 4-6 – Calcolo dell'indice di inondazione costiera per i tre profili di Guardia Piemontese

8.2 Calcolo dell'indice di erosione a breve termine I_R

A tale indice è attribuito un punteggio (cfr. Capitolo I paragrafo 9.2) in funzione dell'aliquota di spiaggia che viene persa a seguito di un attacco ondoso. Nella tabella seguente sono riassunti i valori di tale indice per il litorale di Guardia Piemontese.

Profilo 1				
	Larghezza spiaggia	R_{max}	% spiaggia	I_R
$H_s=3m$	21 m	3.1 m	14.7%	1
$H_s=4m$	21 m	6.0 m	28.5%	2
$H_s=5m$	21 m	9.3 m	44.2%	3
$H_s=6m$	21 m	11.0 m	52.3%	3
$H_s=7m$	21 m	14.6 m	69.5%	3

Profilo 2				
	Larghezza spiaggia	R_{max}	% spiaggia	I_R
$H_s=3m$	45 m	3.6 m	8 %	1
$H_s=4m$	45 m	6.7 m	14.8 %	1
$H_s=5m$	45 m	10.1 m	22.4 %	2
$H_s=6m$	45 m	11.9 m	26.4 %	2
$H_s=7m$	45 m	15.7 m	34.8 %	3

Profilo 3				
	Larghezza spiaggia	R_{max}	% spiaggia	I_R
$H_s=3m$	43 m	1.6 m	3.7 %	1
$H_s=4m$	43 m	3.8 m	8.8 %	1
$H_s=5m$	43m	6.4 m	14.8 %	1
$H_s=6m$	43 m	7.9 m	18.3 %	2
$H_s=7m$	43 m	11 m	25.5 %	2

Tabella 4-7 – Indice di erosione a breve a termine.

8.3 Calcolo dell'indice di danno alle opere I_D

Sebbene il tratto centrale di Guardia Piemontese presenti numerose scogliere parallele ormai contigue alla spiaggia per effetto dei tomboli, nessuno dei tre profili scelti incontra un'opera di difesa costiera e pertanto il valore dell'indice di danno I_D sarà pari a 0 (zero) per ciascuno di essi.

8.4 Calcolo dei livelli di pericolosità

In base a quanto analizzato finora, siamo in grado di attribuire un valore alla pericolosità da inondazione marina sul litorale di interesse. Occorre quindi valutare l'indice di impatto che ricordiamo essere dato dalla formula $I_i = I_{Ru} + I_R + I_D$

Profilo 1

Profilo 1				
	I_{Ru}	I_R	I_D	I_i
$H_s=3m$	1	1	0	2
$H_s=4m$	2	2	0	4
$H_s=5m$	3	3	0	6
$H_s=6m$	3	3	0	6
$H_s=7m$	3	3	0	6

Tabella 4-8 – Calcolo dell'Indice di Impatto

Dalla definizione di Indice di Impatto (Cap. I par. 10.4), secondo la quale tale indice non è trascurabile per valori superiori a 4, si evince che l'altezza d'onda di riferimento H_r è pari a 5 metri, quindi, si ricava la pericolosità confrontando il periodo di ritorno di H_r con la

tabella 1.5. Si ricava che la Pericolosità del tratto di costa del Comune di Guardia Piemontese, identificato con il Profilo 1, è molto elevata per altezze d'onda significative \geq a 4 metri:

H_r (metri)	T_R (anni)	Pericolosità
5	2	P4

Tabella 4-9 – Attribuzione del livello di pericolosità

Profilo 2

	Profilo2			
	I_{Ru}	I_R	I_D	I_i
$H_s=3m$	1	1	0	2
$H_s=4m$	2	1	0	3
$H_s=5m$	3	2	0	5
$H_s=6m$	4	2	0	6
$H_s=7m$	4	3	0	7

Tabella 4-10 – Calcolo dell'Indice di Impatto

H_r (metri)	T_R (anni)	Pericolosità
5	2 anni	P4

Tabella 4-11 – Attribuzione del livello di pericolosità

Per il profilo 2 si ricava che l'altezza d'onda di riferimento è pari a 5 metri, essendo il periodo di ritorno ad essa correlato inferiore ai 5 anni, la pericolosità sarà molto elevata (P4).

Profilo 3

	Profilo3			
	I_{Ru}	I_R	I_D	I_i
$H_s=3m$	1	1	0	2
$H_s=4m$	2	1	0	3
$H_s=5m$	2	1	0	3
$H_s=6m$	3	2	0	5
$H_s=7m$	3	2	0	5

Tabella 4-12 – Calcolo dell'Indice di Impatto

H _r (metri)	T _R (anni)	Pericolosità
6	< 5	P4

Tabella 4-13 - Attribuzione del livello di pericolosità

Per il profilo 3 si ricava che l'altezza d'onda di riferimento è pari a 6 metri, essendo il periodo di ritorno ad essa correlato inferiore ai 5 anni, la pericolosità sarà pertanto molto elevata (P4).

9. Stima del danno potenziale

Il danno potenziale è stato definito nel Capitolo II del presente lavoro come il prodotto della vulnerabilità per il valore esposto, pertanto, per attribuire un valore al danno per il litorale di Guardia Piemontese, è necessario determinare questi ultimi due valori.

9.1 La Vulnerabilità Costiera

La Vulnerabilità è definita da un Indice di Vulnerabilità Costiera (IVC) dato dalla relazione $IVC = P_{RICE} + U_{RICE} + E_{RICE} + U_{10km} + E$ (2.4). Esso è definito come la somma degli Indici di Popolazione, Urbanizzazione, Valore Ecologico, Incremento dell'urbanizzazione, Erosione nel lungo periodo; per la metodologia di determinazione di essi si rimanda al Capitolo II paragrafo 2.

Per il litorale di Guardia Piemontese sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- $P_{RICE} = D_u \cdot A_{URICE} + D_A \cdot A_{ARICE} + D_N \cdot A_{NRICE} =$
 $= 0.002 \times 666153 + 0.0002 \times 307879 + 0.000003 \times 180941 = 1394$
- $U_{RICE} = 48\%$
- $E_{RICE} = 0\%$
- $U_{10km} = 0\%$

tali valori sono validi per ciascuno dei tre profili di Guardia Piemontese.

La velocità di erosione a lungo termine varia per i tre profili come di seguito riportato:

- profilo 1: spiaggia in accrescimento;
- profilo 2: spiaggia in accrescimento;
- profilo 3: 1 metro/anno.

Nella tabella seguente è riportato, per ciascun profilo, il valore assunto dall'Indice di Vulnerabilità Costiera:

	P_{RICE}	U_{RICE}	E_{RICE}	U_{10km}	E	IVC	Vulnerabilità
Profilo 1	1	1	0	0	0	2	V₁
Profilo 2	1	2	0	0	0	3	V₁
Profilo 3	1	3	0	0	0	4	V₂

Tabella 4-14 – L'Indice di Vulnerabilità Costiera

Sulla base del punteggio attribuito all' IVC, si ricava, dalla tabella 2-7, che per i profili 1 e 2 la Vulnerabilità è bassa (V1), mentre per il profilo 3 è media (V2).

9.2 Il Valore Esposto

Il Valore Esposto, come visto nel Capitolo II paragrafo 3, è fortemente dipendente dai beni, siano essi persone o cose, che caratterizzano il retrospiaggia.

Per ciascuno dei tre tratti in cui è stato suddiviso il litorale di Guardia Piemontese, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- Profilo 1: tratto costiero da Punta Intavolata al promontorio di Palmentello.
Tale tratto è caratterizzato dalla presenza del rilevato ferroviario, sono presenti inoltre elementi di edificazione sparse; pertanto il Valore Esposto è alto: E₃.
- Profilo 2: tratto costiero dal promontorio di Palmentello alla foce della Fiumara dei Bagni.
Tale tratto è caratterizzato dalla presenza del rilevato ferroviario e dalla strada statale immediatamente dietro; sono presenti abitazioni sparse. Il Valore Esposto di tale tratto è alto: E₃.
- Profilo 3: tratto costiero dalla Fiumara dei Bagni al termine dell' abitato di Guardia Piemontese.
Tale tratto è caratterizzato dal centro abitato di Guardia Piemontese oltre che dalla presenza della linea ferroviaria, della strada statale e da edificato produttivo.
Il Valore Esposto è dunque altissimo: E₄.

9.3 Determinazione del danno potenziale

Il danno potenziale (D) è ottenuto dalla tabella 2-8 incrociando il valore esposto con la vulnerabilità:

Danno = ExV	V₃	V₂	V₁
E₄	D ₄	D ₃	D ₂
E₃	D ₃	D ₂	D ₁
E₂	D ₂	D ₁	
E₁	D ₁		

Applicando tale metodo ad i tre tratti di Guardia Piemontese otteniamo:

	<i>Vulnerabilità</i>	<i>Valore Esposto</i>	Danno
Profilo 1	V₁	E ₃	D₁
Profilo 2	V₁	E ₃	D₁
Profilo 3	V₂	E ₄	D₃

Tabella 4-15 – Il danno potenziale

Per i profili 1 e 2 il danno potenziale è basso (D₁) ovvero non ci sono problemi per l'incolumità delle persone e sono limitati gli effetti sul tessuto socio-economico. Invece, per il profilo 3 il danno potenziale è alto (D₃) ovvero si possono avere problemi per l'incolumità delle persone e per la funzionalità del sistema economico.

10. Attribuzione dei livelli di rischio

Come dimostrato nel Capitolo III, il rischio ,definito dal DPCM 29/09/1998, è il risultato del prodotto tra il danno potenziale e la pericolosità come si può evincere dalla tabella 3-1.

RISCHIO	Pericolosità				
Danno		P₄	P₃	P₂	P₁
	D₄	R ₄	R ₃	R ₂	R ₁
	D₃	R ₃	R ₂	R ₁	
	D₂	R ₂	R ₁		
	D₁	R ₁			

Pertanto dai risultati ottenuti in questo Capitolo, relativamente allo studio da inondazione marina per il litorale di interesse, compreso tra i Comuni di Acquappesa e Guardia Piemontese, si ricavano i livelli di rischio riportati in tabella 4-16.

	<i>Pericolosità</i>	<i>Danno Potenziale</i>	Rischio
Profilo 1	P ₄	D ₁	R₁
Profilo 2	P ₄	D ₁	R₁
Profilo 3	P ₄	D ₃	R₃

Tabella 4-16 – Il rischio da inondazione costiera.

In conclusione, dallo studio effettuato sul litorale in esame, si desume che:

- il tratto di costa che va da Punta Intavolata alla foce della Fiumara dei Bagni, ricadente nei Comuni di Acquappesa e Guardia Piemontese, identificati con i profili 1 e 2, presenta un rischio moderato (R₁), si tratta infatti di un'area di attenzione per la quale i danni sociali, economici ed al patrimonio ambientale, che possono derivare da stati di mare di particolare severità, sono marginali.
- Il tratto di costa che va da dalla Fiumara dei Bagni al termine dell' abitato di Guardia Piemontese, identificato con il profilo 2, ricadente nel Comune di Guardia Piemontese, presenta un rischio elevato (R₃). Si tratta di un'area di rischio per la quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici ed alle infrastrutture, interruzione di attività socio economiche.

CAPITOLO V

APPLICAZIONE N°2: LITORALE DI MONASTERACE

1. Premesse

Nel presente capitolo è stata applicata la metodologia di valutazione del rischio da inondazione marina, descritta nei precedenti capitoli, sul tratto costiero del Comune di Monasterace, cittadina Calabrese che si affaccia sul Mar Ionio.

Occorre preliminarmente fare alcune precisazioni:

- L'analisi statistica delle onde estreme è stata effettuata su un numero di anni di registrazione di dati di soli 3 anni (2003-2006) e pertanto l'estrapolazione del periodo di ritorno delle onde presenta un certo grado di approssimazione.
- La scelta delle altezze d'onda fissate a 3, 4, 5, 6, e 7 metri, è dipesa da una esigenza esclusivamente esemplificativa, tenendo comunque conto del fatto che si tratta di altezze molto probabili al largo del Mar Tirreno.
- Per il calcolo del Run-up sulla spiaggia, al metodo analitico descritto nel Cap. I paragrafo 6, è stato affiancato il modello matematico di inondazione costiera MIKE 21, le cui caratteristiche sono brevemente illustrate nel Capitolo precedente.

2. Caratteristiche generali⁸

L'area campione di Monasterace è compresa tra Punta Stilo (dove sfocia la fiumara Assi) a Nord e la foce della fiumara Stilaro a Sud: il litorale si sviluppa in direzione nord-sud per una lunghezza complessiva di circa 3,6 km, interessando il Comune di Monasterace della

⁸ Le informazioni relative alle caratteristiche urbanistico-territoriali e morfologiche, riportate nel presente Capitolo, sono state attinte dalla Regione Calabria, Autorità di Bacino.

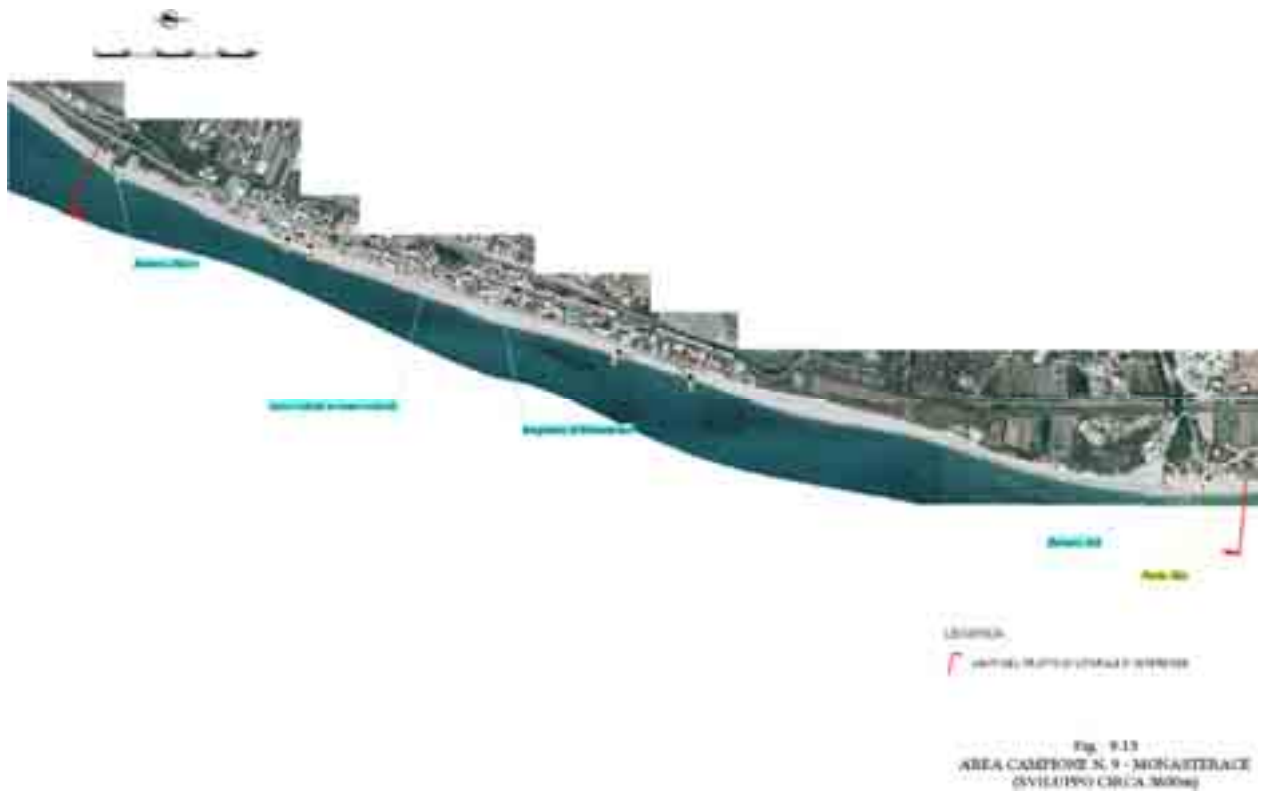
Provincia di Reggio Calabria. Il litorale è caratterizzato dalle foci delle fiumare Assi e Stilaro alle estremità nord e sud rispettivamente, mentre il tratto centrale è occupato dall'agglomerato di Monasterace Marina, che lungo l'intero tratto costiero si affaccia sul mare. La zona di litorale antistante l'abitato di Monasterace è dominata dalla presenza del lungomare, che si sviluppa per circa 1.4 km e costituisce un'importante risorsa al servizio delle attività turistiche della riviera.

Nella zona del lungomare la spiaggia si restringe a larghezze inferiori a 30 m per effetto sostanzialmente dell'erosione innescata dai fenomeni di riflessione delle onde sulla parete verticale del muro di sostegno della strada litoranea, mentre la larghezza di spiaggia non desta particolari preoccupazioni in prossimità delle foci. L'unica opera di difesa presente lungo il litorale è una scogliera radente in pietrame naturale di pezzatura fino a 1 m, posta a protezione del tratto di lungomare più esposto all'azione diretta del moto ondoso. Tale opera si estende per circa 600 m nella zona sud del lungomare e ricopre l'arenile per tutta la sua larghezza.

Nella figura 19 sono illustrate una corografia dell'area campione, in cui è evidenziata la posizione geografica della stessa, e la Carta Topografica d'Italia relativa all'area in questione, a cura dell'I.G.M., in scala 1:50.000, nella quale sono segnalati i limiti dell'area campione.



19a



19b



19c

Figura 19- a) Corografia del Mar Ionio; b) tratto costiero di interesse; c) inquadramento di Monasterace.

3. Analisi meteo-marina al largo del paraggio costiero

Il paraggio del litorale d'interesse, che si affaccia nel Mar Ionio, risulta limitato a Nord-Est dalla direzione che si appoggia a Capo Rizzuto (40°N) e a Sud-Ovest dalla direzione che si appoggia a Capo Spartivento (220°N).

I fetches geografici interni al settore di traversia (40°N - 220°N) sono limitati a Nord-Est dalla penisola Balcanica (250-350 Km), ad Est dalla penisola greca (350-450 Km), a Sud dalle coste dell'Egitto e della Libia (600-1000 Km), a Sud-Ovest dalle coste della Libia e della Tunisia (600-700 Km).

La distribuzione dei fetches geografici individua un settore di traversia del moto ondoso che risulta molto esposto.

I dati utilizzati per l'analisi meteo-marina sono quelli della boa di Roccella Jonica, della Rete Ondametrica Calabrese, durante il periodo di esercizio 2003-2006, nella figura 20 si possono vedere le principali direzioni di provenienza del moto ondoso, con la frequenza di apparizione delle altezze significative.

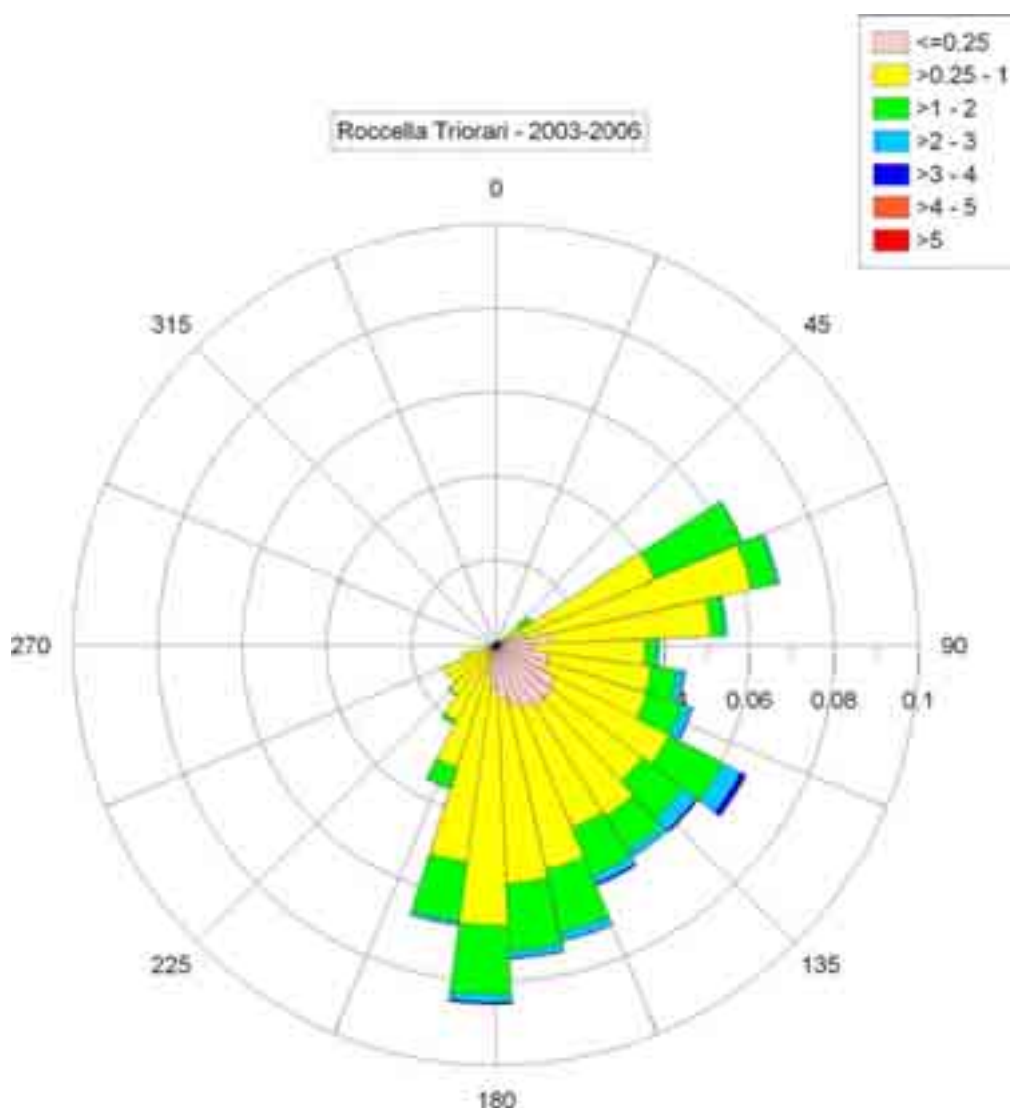


Figura 20

Per la determinazione della cosiddetta “onda di riferimento”, indispensabile per lo sviluppo del presente lavoro, è necessario eseguire un’elaborazione statistica delle altezze d’onda maggiori registrate al culmine di mareggiate indipendenti relative alla serie storica di riferimento desunta dai dati ondametrici. E’ possibile ricavare le caratteristiche del moto ondoso (definite in termini di altezza significativa e periodo) da associare ad assegnati

periodi di ritorno mediante il metodo denominato Pick Over Treshold (POT, cfr. Cap. I paragrafo 2 e 3).

Dal punto di vista statistico il metodo POT consiste nello schematizzare il fenomeno ondoso attraverso il processo estratto dai massimi locali delle mareggiate eccedenti un'altezza di soglia H_0 opportunamente prestabilita e nel valutare le caratteristiche temporali con cui le mareggiate si manifestano. Da tale analisi si sono dedotti i risultati visualizzati in figura 21 e riportati in tabella 5-1.

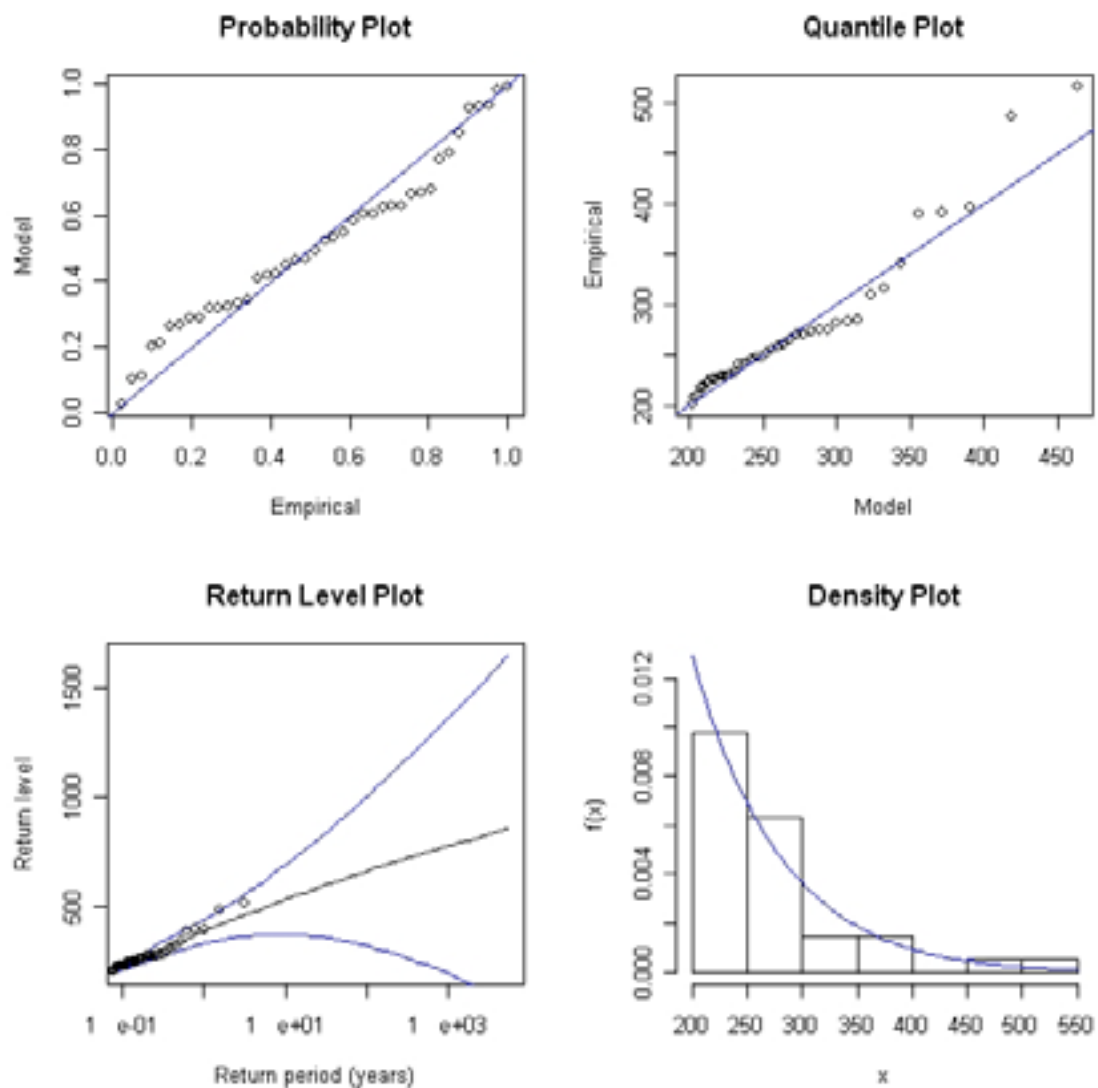


Figura 21- Livelli di ritorno per la boa di Rocella.

	Periodo di Ritorno T_R (anni)
Hs=3 metri	1 anno
Hs=4 metri	2 anni
Hs=5 metri	6 anni
Hs=6 metri	35 anni
Hs=7 metri	>50 anni

Tabella 5-1 – Periodi di ritorno omnidirezionali.

4. Studio del frangimento

Il tratto costiero di Monasterace è stato analizzato per tre diversi profili (Figura 22), in ognuno dei quali è stato effettuato uno studio del frangimento delle onde.

Profilo 1 – situato ad 1 km dalla foce della fiumara Assi, è rappresentativo del tratto costiero più a Nord del litorale di Monasterace.

Profilo 2 – situato a 2 km dalla foce della fiumara Assi, è rappresentativo del tratto centrale del litorale in esame, caratterizzato dall’agglomerato urbano di Monasterace Marina.

Profilo 3 – situato a 3 km dalla foce della fiumara Assi, è rappresentativo del tratto costiero più a Sud del litorale di Monasterace.

Le informazioni relative alla pendenza ed alle caratteristiche morfologiche della spiaggia, ai rilievi batimetrici ed alle caratteristiche sedimentologiche del fondale sono state fornite dall’Autorità di Bacino della Regione Calabria.

Il procedimento di calcolo delle onde frangenti rispettivamente di 3, 4, 5, 6, e 7 metri, per ciascuno dei tre profili, descritto nel Capitolo I paragrafo 4, ha fornito i risultati riassunti nella tabella 5-2.

Altezza d’onda al largo (metri)	Profilo 1		Profilo 2		Profilo 3	
	d_b (m)	H_b (m)	d_b (m)	H_b (m)	d_b (m)	H_b (m)
$H_s=3$ metri	3.50	2.13	3.00	1.83	3.00	1.85
$H_s=4$ metri	4.00	2.44	4.00	2.44	4.00	2.46
$H_s=5$ metri	5.00	3.05	5.00	3.06	5.00	3.08
$H_s=6$ metri	6.00	3.65	6.00	3.67	6.00	3.69
$H_s=7$ metri	6.50	3.96	6.50	3.97	6.50	4.00

Tabella 5-2 – Altezze d’onda al frangimento con le rispettive profondità.

In tabella sono riportati i valori delle altezze d'onda al frangimento (H_b) e delle rispettive profondità di frangimento (d_b), che saranno poi utilizzati per il calcolo del Run-up e per il calcolo dell'arretramento della spiaggia come descritto nei successivi paragrafi.

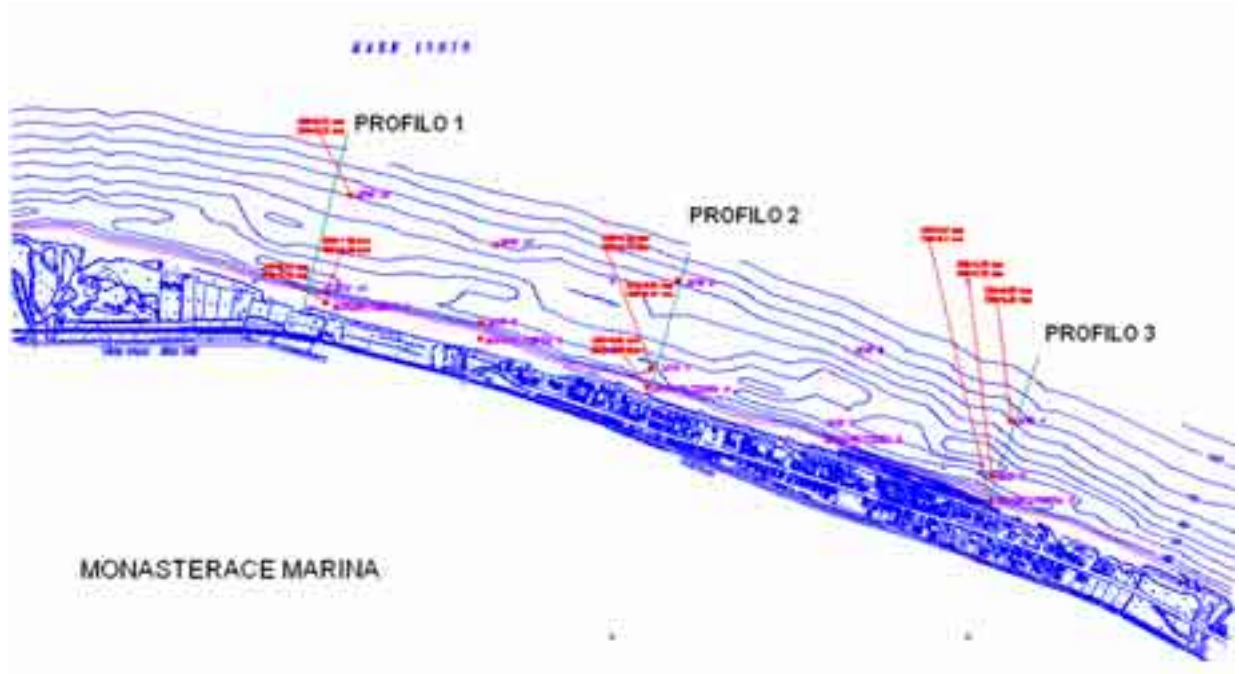


Figura 22 – Individuazione dei profili rappresentativi del tratto costiero.

5. Calcolo del sovrizzo

Il percorso analitico che porta alla stima del sovrizzo complessivo è descritta nel Capitolo I paragrafo 5, pertanto nella tabella seguente (tabella 5-3) si riportano i risultati ottenuti per il litorale di Monasterace:

Altezza d'onda al largo (metri)	Profilo 1	Profilo 2	Profilo 3
	S	S	S
$H_s=3$ metri	0.92	0.86	0.86
$H_s=4$ metri	0.97	0.98	0.98
$H_s=5$ metri	1.09	1.09	1.10
$H_s=6$ metri	1.20	1.21	1.22
$H_s=7$ metri	1.26	1.27	1.28

Tabella 5-3 – Valori del sovrizzo (S) in metri, per Monasterace.

6. Calcolo della distanza orizzontale di risalita del moto ondoso

Nella tabella 5-4, riportata di seguito, sono riassunti i risultati per il Run-up orizzontale (x_{max}) ottenuti, per ciascuno dei tre profili del litorale di Monasterace, mediante le formule di Massel-Pelinovsky ed il software MIKE 21.

Profilo 1 (57m - 15%)				
	Mike 21		Massel - Pelinovsky	
	<i>run-up</i> (m)	<i>xmax</i> (m)	<i>run-up</i> (m)	<i>xmax</i> (m)
$H_s=3m$	1,23	6,80	1,33	10,45
$H_s=4m$	2,86	16,96	1,52	13,10
$H_s=5m$	3,81	22,83	1,90	16,84
$H_s=6m$	3,84	22,92	2,23	20,55
$H_s=7m$	4,30	25,91	2,43	22,64

Profilo 2 (27,5m - 19%)				
	Mike 21		Massel - Pelinovsky	
	<i>run-up</i> (m)	<i>xmax</i> (m)	<i>run-up</i> (m)	<i>xmax</i> (m)
$H_s=3m$	0,51	1,24	1,02	6,69
$H_s=4m$	1,45	5,75	1,36	9,79
$H_s=5m$	2,17	9,63	1,70	12,57
$H_s=6m$	2,62	12,00	1,99	15,35
$H_s=7m$	2,81	13,05	2,16	16,91

Profilo 3 (10m - 23%)				
	Mike 21		Massel - Pelinovsky	
	<i>run-up</i> (m)	<i>xmax</i> (m)	<i>run-up</i> (m)	<i>xmax</i> (m)
$H_s=3m$	1,20	2,29	0,93	5,30
$H_s=4m$	1,82	5,85	1,24	7,76
$H_s=5m$	1,88	6,55	1,55	9,97
$H_s=6m$	1,96	6,71	1,82	12,17
$H_s=7m$	1,97	8,49	1,98	13,41

Tabella 5-4 - Confronto tra i risultati del Mike 21 e le formule di Massel-Pelinovsky. Nella tabella, in parentesi dopo la scritta *Profilo*, sono riportate rispettivamente la lunghezza e la pendenza media della spiaggia.

7. Calcolo dell'erosione a breve termine

In questo paragrafo sono riportati i risultati dello studio dell'erosione a breve termine, secondo i criteri descritti nel Capitolo I paragrafo 7.

Si tratta della frazione di metri lineari di spiaggia (R_{max}) che vanno persi a seguito dell'azione del moto ondoso. Nella tabella seguente (tabella 5-5) sono riportati tali valori per i tre tratti di costa di Monasterace, corrispondenti alle diverse altezze d'onda:

	Profilo 1 (57m)	Profilo 2 (27,5m)	Profilo 3 (10m)
	$R_{max} (m)$	$R_{max} (m)$	$R_{max} (m)$
$H_s=3m$	1,45	0,56	0,35
$H_s=4m$	2,24	1,88	1,51
$H_s=5m$	4,14	3,70	3,21
$H_s=6m$	6,38	5,89	5,31
$H_s=7m$	7,61	7,09	6,47

Tabella 5-5 – metri lineari di spiaggia persa a seguito di un attacco ondoso.

8. Determinazione dei livelli di pericolosità

Per definire i livelli di pericolosità, è necessario calcolare preliminarmente un indice di impatto determinato dalla formula (1.50)

$$I_i = I_{Ru} + I_R + I_D$$

In questo modo, trovati i valori dei tre indici che lo compongono, dal valore assunto dall'indice di impatto, si ricava l'altezza d'onda di riferimento H_r che rappresenta la minima altezza d'onda capace di mettere in crisi il litorale.

8.1 Calcolo dell'indice di risalita del moto ondoso I_{Ru}

Partendo dai risultati riportati nella tabella 5-4 possiamo agevolmente calcolare la percentuale di spiaggia interessata dalla risalita del moto ondoso per differenti altezze significative, indispensabile per attribuire un punteggio all'indice I_{Ru} . Nelle tabelle che seguono sono riportati, per ciascuno profilo, i valori della lunghezza della spiaggia emersa, del run-up orizzontale calcolato mediante il Mike 21 e mediante Massel-Pelinovsky, la percentuale di spiaggia emersa interessata dalla risalita del moto ondoso; nell'ultima colonna è infine riportato il valore dell'Indice di risalita del moto ondoso calcolato secondo quanto descritto nel Capitolo I paragrafo 9.1.

Profilo 1					
	Larghezza spiaggia	$x_{max} (M21)$	$x_{max}(M-P)$	% spiaggia	I_{Ru}
$H_s=3m$	57 m	6,80	10,45	15%	0
$H_s=4m$	57 m	16,96	13,10	26%	1
$H_s=5m$	57 m	22,83	16,84	35%	1
$H_s=6m$	57 m	22,92	20,55	38%	1
$H_s=7m$	57 m	25,91	22,64	42%	2

Profilo 2					
	Larghezza spiaggia	$x_{max} (M21)$	$x_{max}(M-P)$	% spiaggia	I_{Ru}
$H_s=3m$	27,5 m	1,24	6,69	14%	0
$H_s=4m$	27,5 m	5,75	9,79	28%	1
$H_s=5m$	27,5 m	9,63	12,57	40.5%	2
$H_s=6m$	27,5 m	12,00	15,35	50%	2
$H_s=7m$	27,5 m	13,05	16,91	54%	2

Profilo 3					
	Larghezza spiaggia	$x_{max} (M21)$	$x_{max}(M-P)$	% spiaggia	I_{Ru}
$H_s=3m$	10 m	2,29	5,30	38%	1
$H_s=4m$	10 m	5,85	7,76	50%	2
$H_s=5m$	10 m	6,55	9,97	82%	4
$H_s=6m$	10 m	6,71	12,17	94%	4
$H_s=7m$	10 m	8,49	13,41	109%	4

Tabella 5-6 – Calcolo dell'indice di inondazione costiera per i tre profili di Monasterace

8.2 Calcolo dell'indice di erosione a breve termine I_R

A tale indice è attribuito un punteggio (cfr. Capitolo I paragrafo 9.2) in funzione dell'aliquota di spiaggia che viene persa a seguito di un attacco ondoso. Nella tabella seguente sono riassunti i valori di tale indice per il litorale di Monasterace.

Profilo 1				
	Larghezza spiaggia	R_{max} (m)	% spiaggia	I_R
$H_s=3m$	57 m	1,45	2.5 %	1
$H_s=4m$	57 m	2,24	4 %	1
$H_s=5m$	57 m	4,14	7 %	1
$H_s=6m$	57 m	6,38	11 %	1
$H_s=7m$	57 m	7,61	13 %	1

Profilo 2				
	Larghezza spiaggia	R_{max}	% spiaggia	I_R
$H_s=3m$	27.5 m	0,56	2 %	1
$H_s=4m$	27.5 m	1,88	7 %	1
$H_s=5m$	27.5 m	3,70	13 %	1
$H_s=6m$	27.5 m	5,89	21 %	2
$H_s=7m$	27.5 m	7,09	26 %	2

Profilo 3				
	Larghezza spiaggia	R_{max}	% spiaggia	I_R
$H_s=3m$	10 m	0,35	3.5 %	1
$H_s=4m$	10 m	1,51	15 %	2
$H_s=5m$	10 m	3,21	32 %	3
$H_s=6m$	10 m	5,31	53 %	3
$H_s=7m$	10 m	6,47	65 %	3

Tabella 5-7 – Indice di erosione a breve a termine.

8.3 Calcolo dell'indice di danno alle opere I_D

Sebbene il tratto centrale di Monasterace presenti nel tratto centrale una lunga scogliera radente in massi naturali, si è preferito non far ricadere il profilo su di essa per una maggiore semplicità di esposizione, pertanto il valore dell'indice di danno I_D sarà pari a 0 (zero) per ciascuno di essi.

8.4 Calcolo dei livelli di pericolosità

In base a quanto analizzato finora, siamo in grado di attribuire un valore alla pericolosità da inondazione marina sul litorale di interesse. Occorre quindi valutare l'indice di impatto che ricordiamo essere dato dalla formula $I_i = I_{Ru} + I_R + I_D$.

Profilo 1

	Profilo 1			
	I_{Ru}	I_R	I_D	I_i
$H_s=3m$	0	1	0	1
$H_s=4m$	1	1	0	2
$H_s=5m$	1	1	0	2
$H_s=6m$	1	1	0	2
$H_s=7m$	2	1	0	3

Tabella 5-8 – Calcolo dell'Indice di Impatto

Dalla definizione di Indice di Impatto (Cap. I par. 10.4) si evince che l'altezza d'onda di riferimento H_r per il profilo 1, è pari a 7 metri, quindi, si ricava la pericolosità confrontando il periodo di ritorno di H_r con la tabella 1.5. Si ricava che la Pericolosità del tratto di costa del Comune Monasterace, identificato con il Profilo 1, è bassa per altezze d'onda significative \geq a 7 metri:

H_r (metri)	T_R (anni)	Pericolosità
7	> 50	P1

Tabella 5-9 – Attribuzione del livello di pericolosità

Profilo 2

	Profilo2			
	I_{Ru}	I_R	I_D	I_i
$H_s=3m$	1	1	0	2
$H_s=4m$	1	1	0	2
$H_s=5m$	1	1	0	2
$H_s=6m$	2	2	0	4
$H_s=7m$	2	2	0	4

Tabella 5-10 – Calcolo dell'Indice di Impatto

H _r (metri)	T _R (anni)	Pericolosità
6	35	P1

Tabella 5-11– Attribuzione del livello di pericolosità

Per il profilo 2 si ricava che l'altezza d'onda di riferimento è pari a 6 metri, essendo il periodo di ritorno ad essa correlato compreso tra 25 e 50 anni, la pericolosità sarà bassa (P1).

Profilo 3

	Profilo3			
	I_{Ru}	I_R	I_D	I_t
$H_s=3m$	1	1	0	2
$H_s=4m$	2	2	0	4
$H_s=5m$	4	3	0	7
$H_s=6m$	4	3	0	7
$H_s=7m$	4	3	0	7

Tabella 5-12 – Calcolo dell'Indice di Impatto

H _r (metri)	T _R (anni)	Pericolosità
5	6	P3

Tabella 5-13 - Attribuzione del livello di pericolosità

Per il profilo 3 si ricava che l'altezza d'onda di riferimento è pari a 5 metri, essendo il periodo di ritorno ad essa correlato inferiore ai 10 anni, la pericolosità sarà elevata (P3).

9. Stima del danno potenziale

9.1 La Vulnerabilità Costiera

La Vulnerabilità è definita da un Indice di Vulnerabilità Costiera (IVC) dato dalla relazione $IVC = P_{RICE} + U_{RICE} + E_{RICE} + U_{10km} + E$ (2.4). Esso è definito come la somma degli Indici di Popolazione, Urbanizzazione, Valore Ecologico, Incremento

dell'urbanizzazione, Erosione nel lungo periodo; per la metodologia di determinazione di essi si rimanda al Capitolo II paragrafo 2.

Per il litorale di Monasterace sono stati ottenuti i seguenti risultati:

$$\begin{aligned}
 - P_{RICE} &= D_u \cdot A_{URICE} + D_A \cdot A_{ARICE} + D_N \cdot A_{NRICE} = \\
 &= 0.005 \times 575536 + 0.00005 \times 2245644 + 0.0001 \times 185275 = 3007 \\
 - U_{RICE} &= 23\% \\
 - E_{RICE} &= 0\% \\
 - U_{10km} &= 24.9\%
 \end{aligned}$$

Tali valori sono validi per ciascuno dei tre profili di Monasterace.

La velocità di erosione a lungo termine varia per i tre profili come di seguito riportato:

- profilo 1: 1.5 metri/anno;
- profilo 2: spiaggia in accrescimento;
- profilo 3: 1.5 metri/anno.

Nella tabella seguente è riportato, per ciascun profilo, il valore assunto dall'Indice di Vulnerabilità Costiera:

	P_{RICE}	U_{RICE}	E_{RICE}	U_{10km}	E	IVC	Vulnerabilità
Profilo 1	1	1	0	2	0	4	V₂
Profilo 2	1	1	0	2	0	4	V₂
Profilo 3	1	1	0	2	0	4	V₂

Tabella 5-14 – L'Indice di Vulnerabilità Costiera

Sulla base del punteggio attribuito all' IVC, si ricava, dalla tabella 2-7, che per i profili 1,2,3 la Vulnerabilità è media (V2).

9.2 Il Valore Esposto

Il Valore Esposto, come visto nel Capitolo II paragrafo 3, è fortemente dipendente dai beni, siano essi persone o cose, che caratterizzano il retrospiaggia.

Per ciascuno dei tre tratti in cui è stato suddiviso il litorale di Monasterace, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- Profilo 1: posto a metri 1000 dalla foce della fiumara Assi, rappresentativo del litorale nord. Esso è caratterizzato dalla presenza del rilevato ferroviario, e da vaste aree ad uso agricolo, pertanto il valore esposto è medio: E₂.

- Profilo 2: posto a 2000 m dalla foce della fiumara Assi, è rappresentativo del tratto centrale del litorale di interesse. Risulta caratterizzato dalla presenza di nuclei di abitazione diffusa, pertanto il valore esposto è altissimo: E₄.
- Profilo 3: posto a 3000 m dalla foce della fiumara Assi, è rappresentativo del tratto sud del litorale di Monasterace. Risulta caratterizzato dal centro abitato di Monasterace Marina e pertanto il valore esposto è elevatissimo: E₄.

9.2 Determinazione del danno potenziale

Il danno potenziale (D) è ottenuto dalla tabella 2-8 incrociando il valore esposto con la vulnerabilità:

Danno = E x V	V₃	V₂	V₁
E₄	D ₄	D ₃	D ₂
E₃	D ₃	D ₂	D ₁
E₂	D ₂	D ₁	
E₁	D ₁		

Applicando tale metodo ad i tre tratti di Monasterace otteniamo:

	<i>Vulnerabilità</i>	<i>Valore Esposto</i>	Danno
Profilo 1	V ₂	E ₂	D₁
Profilo 2	V ₂	E ₄	D₃
Profilo 3	V ₂	E ₄	D₃

Tabella 5-15 – Il danno potenziale

Per il profilo 1 il danno potenziale è basso (D₁) ovvero non ci sono problemi per l'incolumità delle persone e sono limitati gli effetti sul tessuto socio-economico. Invece, per i profili 2 e 3 il danno potenziale è alto (D₃) ovvero si possono avere problemi per l'incolumità delle persone e per la funzionalità del sistema economico.

10. Attribuzione dei livelli di rischio

Come dimostrato nel Capitolo III, il rischio ,definito dal DPCM 29/09/1998, è il risultato del prodotto tra il danno potenziale e la pericolosità come si può evincere dalla tabella 3-1.

RISCHIO	Pericolosità				
Danno		P₄	P₃	P₂	P₁
	D₄	R ₄	R ₃	R ₂	R ₁
	D₃	R ₃	R ₂	R ₁	
	D₂	R ₂	R ₁		
	D₁	R ₁			

Pertanto dai risultati ottenuti in questo Capitolo, relativamente allo studio da inondazione marina per il litorale di interesse, compreso nel Comune di Monasterace, si ricavano i livelli di rischio riportati in tabella 5-16.

	<i>Pericolosità</i>	<i>Danno Potenziale</i>	Rischio
Profilo 1	P ₁	D ₁	
Profilo 2	P ₁	D ₃	
Profilo 3	P ₃	D ₃	R₂

Tabella 5-16 – Il rischio da inondazione costiera.

In conclusione, dallo studio effettuato sul litorale in esame, si desume che:

- Il tratto di costa posto a nord del centro abitato di Monasterace, che va da Punta Stilo fino a circa 1500m dalla fiumara Assi, identificato dal profilo 1, presenta un rischio trascurabile.
- Il tratto centrale del litorale di Monasterace, che si spinge fino a circa 2500 metri dalla foce della fiumara Assi, identificato dal profilo 2, presenta anch'esso un rischio trascurabile.
- Il tratto di costa identificato dal profilo 3, interessa la zona più a sud del litorale di Monasterace, tale tratto presenta un rischio medio (R₂). Si tratta di un'area di rischio per la quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture ed al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività socio economiche.

CONCLUSIONI

Dalla sperimentazione della metodologia sullo studio del rischio da inondazione marina, redatta nel presente lavoro ed applicata ai tratti costieri di Guardia Piemontese e di Monasterace, si possono trarre le seguenti conclusioni.

- Il tratto costiero che va da Punta intavolata al promontorio di Palmetello, ricadente nel Comune di Acquappesa, è classificato con una pericolosità molto elevata (P_4) per un'onda di riferimento al largo di 4 metri. Tuttavia il danno potenziale che può occorrere in occasione di eventi estremi è basso (D_1) dal momento che non vi sono realtà abitative diffuse, pertanto, nonostante la presenza del rilevato ferroviario che percorre il litorale in corrispondenza della fine della spiaggia, il rischio associato a tale tratto costiero è moderato (R_1).

- Il tratto costiero che va dal promontorio Palmetello alla fiumara Bagni, ricadente nei Comuni di Acquappesa e di Guardia Piemontese, è classificato anch'esso con una pericolosità molto elevata (P_4), ma per un'altezza d'onda di riferimento di 5 metri. Anche in questo tratto il danno potenziale è basso (D_1) e quindi il rischio è moderato (R_1).

- Il tratto costiero che va dalla foce della fiumara Bagni al termine del centro abitato di Guardia Piemontese, ricadente nel Comune di Guardia, è classificato con una pericolosità molto elevata (P_4) per altezze d'onda di riferimento pari a 6 metri. In questo caso il danno potenziale è alto (D_3), infatti il retrospiaggia è caratterizzato dal centro abitato di Guardia Piemontese, mentre il rischio è classificato alto (R_3).

- Il tratto costiero si estende dalla foce della fiumara Assi fino a circa 1200m da essa, ricadente nel Comune di Monasterace, presenta una pericolosità bassa (P_1), così come il danno potenziale (D_1) trattandosi di un tratto di costa con una spiaggia molto ampia e con retrospiaggia destinato nella sua totalità ad attività agricole. Da tali considerazioni ne deriva che il rischio da inondazione è trascurabile per tale tratto costiero.

- Il tratto costiero che si estende da 1220 a 2400 metri dalla fiumara Assi, nel Comune di Monasterace, è caratterizzato da una pericolosità bassa (P_1) per onde con altezza di riferimento pari a 6 metri, e sebbene il danno potenziale sia elevato (D_3), il rischio risulta trascurabile.

- Il tratto costiero che va da circa 2400 metri dalla fiumara Assi alla foce della fiumara Stilaro, ricadente nel comune di Monasterace, presenta una pericolosità elevata, identificata con (P_3), per altezze d'onda di riferimento pari a 5 metri. Il danno potenziale associato a tale tratto è elevato (D_3). Il rischio è quindi medio (R_2), questo il tratto costiero merita particolare attenzione essendo caratterizzato da una spiaggia molto stretta a dalla presenza del centro abitato immediatamente ridossato ad essa.

In conclusione, la metodologia per lo studio del rischio da inondazione marina, proposta in questa tesi di stage, evidenzia la necessità di redigere, su scala Nazionale, delle linee guida per l'uso del territorio costiero, che possano essere di supporto alle scelte degli Enti Locali, al fine di minimizzare il rischio connesso all'inondazione marina. Inoltre, avendo tale metodologia un'applicazione su scala territoriale piccola, può rappresentare un utile strumento di riferimento per le Amministrazioni Pubbliche, nella scelta delle priorità degli interventi.

Risulta evidente dalle applicazioni effettuate in questo lavoro, che una corretta metodologia non può prescindere da un notevole numero di dati certi, pertanto, in quest'ottica, appare chiara l'importanza di avere informazioni del moto ondoso ad un sufficiente livello di copertura, di avere rilievi batimetrici di dettaglio e dati territoriali aggiornati. La complessità della dinamica costiera, impone che tale lavoro di ricerca venga riproposto per lo stesso territorio con una certa frequenza; a tal fine occorre senz'altro incrementare l'utilizzo di tecniche satellitari di telerilevamento necessarie per ottenere informazioni maggiormente dettagliate sull'uso del suolo della fascia costiera, in tempi più rapidi e meno costosi rispetto alle esplorazioni in situ.

BIBLIOGRAFIA

ABBOTT, M B, MCCOWAN, A D & WARREN, I R (1981) Numerical Modelling of Free-Surface Flows that are Two-Dimensional in Plan. In Transport Models for Inland and Coastal Waters, Symp. Predictive Ability, editor M.B. Fischer, Academic Press, New York.

ABBOTT, M B, MCCOWAN, A D & WARREN, I R (1984) Accuracy of Short-Wave Numerical Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 110, No 10, pp 1287-1301.

ABBOTT, M B, PETERSEN, H M & SKOVGAARD, O (1978) On the Numerical Modelling of Short Waves in Shallow Water. *Journal of Hydraulic Research*, Vol 16, No 3, pp 173-203

AHRENS, J. P., AND HEIMBAUGH, M. S. 1988. "Approximate upper limit of irregular wave runup on riprap," Technical

APAT, 2004. Atlante delle onde nei mari Italiani. APAT, Roma.

APAT, 2005, Progetto Atlante Costiero, APAT, Roma

BENASSAI E., 2006. Le dighe marittime. Istituto Italiano per gli Studi Filosofici.

BENASSAI G., De MAIO, SANSONE E., 1994. Previsione delle onde estreme e persistenza delle mareggiate nel Golfo di Napoli. *Annali dell'Università di Napoli Parthenope*, pp. 47-60

BENASSAI G., 2006. Introduction to Coastal Dynamics and Shoreline Protection. WIT PRESS

BOCCOTTI , 1986. Previsione delle onde per i mari italiani. XX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Padova, A8-A9.

BOUWS, E. and G. J. KOMEN, 1983: On the balance between growth and dissipation in an extreme depth-limited wind-sea in the southern north sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1653-1658.

CHARNOCK, H., 1955: Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 81, 639-640.

CHALIKOV, D. V., 1995: The parameterization of the wave boundary layer. *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 1333-1349.

CHALIKOV, D. V. and M. Y. BELEVICH, 1993: One-dimensional theory of the wave boundary layer. *Bound. Layer Meteor.*, 63, 65-96.

CHRISTOFFERSEN, J. B., 1982: Current depth refraction of dissipative water waves. Series Paper 30, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Techn. Univ. Denmark.

DACQUINO C., 2007. Indice di Vulnerabilità Costiera. In corso di pubblicazione

DE WAAL, J. P., and VAN DER MEER, J. W. (1992). "Wave runup and overtopping on coastal structures," Proceedings of the 23rd International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, 2, 1758-1771.

HASSELMANN, K., 1962: On the non-linear transfer in a gravity wave spectrum, part 1. General theory. *J. Fluid Mech.*, 12, 481-500.

HASSELMANN, K., 1963a: On the non-linear transfer in a gravity wave spectrum, part 2, Conservation theory, wave-particle correspondence, irreversibility. *J. Fluid Mech.*, 15, 273-281.

HASSELMANN, K., 1963b: On the non-linear transfer in a gravity wave spectrum, part 3. Evaluation of energy flux and sea-swell interactions for a Neuman spectrum. *J. Fluid Mech.*, 15, 385-398.

HASSELMANN K., et al., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deut. Hydr. Zeit.*, volA12, pp.1-95

HASSELMANN, S., K. HASSELMANN, J. H. ALLENDER and T. P. BARNETT, 1985: Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1378-1391.

HEADQUARTERS, U.S. Army Corps of Engineers. (2001). Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100, Washington, DC.

HERTERICH, K. and K. HASSELMANN, 1980: A similarity relation for the non linear energy transfer in a finite-depth gravity-wave spectrum. *J. Fluid Mech.*, 97, 215-224.

HUGHES, S. A. (2003a). "Wave momentum flux parameter for coastal structure design," ERDC/CHL CHETN-III-67, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

HUGHES, S. A. (2003b). "Estimating irregular wave runup on smooth, impermeable slopes," ERDC/CHL CHETN-III-68, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

HUGHES, S. A. (2004a). "Wave momentum flux parameter: A descriptor for nearshore waves," *Coastal Engineering*. Elsevier, 51(11), 1067-1084.

HUGHES, S. A. (2004b). "Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter," *Coastal Engineering*. Elsevier, 51(11), 1085-1104.

- JANSSEN, P. A. E. M., 1989: Wind-induced stress and the drag of air-flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 745-754.
- KAHMA, K. K. and C. J. CALKOEN, 1992: Reconciling discrepancies in the observed growth rates of wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1389-1405.
- KAHMA, K. K. and C. J. CALKOEN, 1994: Konten et al. (1994). Chap. II.8 Growth curve observations, pp. 174-182. Cambridge Univ. Press.
- KOMEN, G. 1, S. HASSELMANN and K. HASSELMANN, 1984: On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- KUIK, A. 1, G. Ph. VAN VLEDDER and L. HOLTHUIJSEN, 1988: A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1020-1034.
- LARSEN, J & DANCY, M (1983) Open Boundaries in Short Wave Simulations - A New Approach. *Coastal Engineering*, Vol 7, pp 285-297.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. and R. W. STEWART, 1961: The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents. *J. Fluid Mech.*, 10, 529-549.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. and R. W. STEWART, 1962: Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf-beats'. *J. Fluid Mech.*, 10, 529-549.
- MEI, C. C., 1983: The applied dynamics of ocean surface waves. Wiley, New York, 740 pp.
- MADSEN, P A (1983) Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber. *Coastal Engineering*, 7, pp 381-396.
- MADSEN, P A, MURRAY, R & SØRENSEN, O R (1991) A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics (Part 1). *Coastal Engineering*, Vol 15, No 4, pp 371-388.
- MADSEN, P A & SØRENSEN, O R (1992) A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics, Part 2: A Slowly-Varying Bathymetry. *Coastal Engineering*, Vol 18, No 1, pp 183-204.
- MADSEN, P A & SØRENSEN, O R (1993) Bound Waves and Triad Interactions in Shallow Water. *Ocean Eng.*, Vol 20, No 4.
- MADSEN, P A & WARREN, I R (1984) Performance of a Numerical Short-Wave Model. *Coastal Engineering*, 8, pp 73-93.
- MASSEL, PELINOVSKY (2001) "Run-up of dispersive and breaking waver on beaches", *Oceanologia*, 43(1), 2001 pp 61,97
- PHILLIPS, O. M., 1977: The dynamics of the upper ocean, second edition. Cambridge Univ. Press, 336 pp.

PIERSON, W. J. and L. MOSKOWITZ, 1964: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69, 5181-5190.

PIERSON, W. J. and L. MOSKOWITZ, 1964: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69, 5181-5190.

SHEMDIN, O., K. HASSELMANN, S. V. HSIAO and K. HETERICH, 1978: Nonlinear and linear bottom interaction effects in shallow water. in *Turbulent fluxes through the sea surface, wave dynamics and prediction*, pp. 347-365. NATO Conf Ser. V, Vol I.

RESIO, D. T. and W. PERRIE, 1991: A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-wave interactions. Part 1: Methodology and basic results. *J. Fluid Mech.*, 223, 609-629.

SNYDER, R. L., F. W. DOBSON, J. A. ELLIOT and R. B. LONG, 1981: Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *J. Fluid Mech.*, 102, 1-59.

VAN DER MEER, J. W., AND STAM, C. M. (1992). "Wave runup on smooth and rough slopes of coastal structures," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers, 118(5), 534-550.

YOUNG I.R., 1997. The growth rate of finite depth wind-generated waves. *Coastal Eng.*, vol. 32, pp.181-195.

WAMDIG, 1988: The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1809.

WEBB, D. I., 1978: Non-linear transfers between sea waves. *Deep-Sea Res.*, 25, 279-298.

WHITHAM, G. B., 1965: A general approach to linear and non-linear dispersive waves using a Lagrangian. *J. Fluid Mech.*, 22, 273-283.

WU, I., 1982: Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *J. Geophys. Res.*, 87, 9704-9706.

.