

1. INTRODUZIONE

Quanto avvenuto nel corso dei decenni e la memoria storica portano a valutare seriamente l'eventualità che, durante eventi di mareggiata, alcuni territori dell'entroterra provinciale veneziano vengano allagati.

Quando la fascia litorale non era occupata dall'uomo questi accadimenti facevano parte del naturale corso della natura, che soprattutto lungo la costa esplica la sua capacità di trasformazioni repentine, talora catastrofiche. Solo a seguito del progressivo utilizzo agricolo delle aree costiere, avvenuto tra le due guerre e il successivo sviluppo insediativo-turistico iniziato dopo il secondo dopoguerra ciò che rappresentava un evento naturale si è inevitabilmente trasformato in un pericolo per l'uomo.

La valutazione del "rischio", inteso come la reale capacità di un evento dannoso di mettere a repentaglio vite umane, beni e risorse legati all'uomo, diventa quindi uno strumento indispensabile per la gestione del territorio e per la programmazione nel campo della protezione civile.

L'allagamento in sé rappresenta sicuramente un elemento di danno che deve essere annullato o mitigato attraverso opportune strategie difensive, anche se l'assetto dei litorali e l'insieme delle difese messe in atto o rinforzate dopo la mareggiata del 1966 hanno completamente eliminato, fatte salve accidentalità, la possibilità che possano essere messe a repentaglio vite umane.

Ciò che risulta ancor oggi in parte vulnerabile sono le infrastrutture e l'attività umana che si esplica lungo l'entroterra costiero, che per la sua conformazione presenta spesso quote molto basse o addirittura al di sotto del livello medio del mare.

Sotto questo aspetto la risorsa spiaggia, che oggi ha assunto valori elevatissimi in virtù del suo potenziale turistico-ricreativo, diviene un bene da tutelare anche per la sua capacità di smorzare l'effetto distruttivo delle onde.

La valutazione del rischio da mareggiata può essere fatta mediante più approcci, da quello meramente modellistico a quello più analitico, che considera lo stato dei litorali, la sua evoluzione nel tempo, le tipologie difensive messe in atto o naturalmente già esistenti, la pressione turistica e le caratteristiche morfologiche e d'uso dell'entroterra.

Il presente lavoro rappresenta l'aggiornamento della valutazione effettuata nel 2001; l'approccio di tipo analitico allora seguito, è stato nel frattempo testato in altre realtà costiere italiane e quindi qui riproposto con alcune modifiche e migliorie. Esso permette, mediante opportune assunzioni, di ottenere una buona indicizzazione dei tratti costieri sulla base di parametri comunque indispensabili per la realizzazione di un modello.

Malgrado non sia stata affrontata specificatamente l'analisi della propagazione del moto ondoso sotto costa, che rappresenta una variabile importante per determinare l'effettiva

pericolosità associata a ciascun tratto costiero, si è assunto un pericolo uniforme, valutato sulla ricorrenza delle mareggiate alla scala temporale delle osservazioni esistenti.

Inoltre non è stato ritenuto significativo utilizzare la carta del microrilievo predisposta dalla Provincia di Venezia, principalmente per l'assenza dei rilevati artificiali, utili alla definizione dei deflussi delle acque di esondazione, e secondariamente per il non sufficiente dettaglio del rilievo, soprattutto in considerazione dell'uniformità delle quote lungo i litorali oggetto di studio.

Il rischio è stato quindi associato alle sole tipologie d'uso delle fasce litoranee, in relazione alle capacità di attenuazione delle onde da parte delle spiagge e/o delle strutture difensive.

Si ritiene tuttavia che, la modularità del metodo qui adottato sia tale da consentire, in fase successiva, un affinamento dei risultati, una volta noti i parametri d'onda specifici e le quote dettagliate dell'entroterra relativi a ciascun tratto costiero esaminato.

Nelle pagine che seguono vengono analizzate in dettaglio le caratteristiche specifiche dei tratti di costa del territorio provinciale, desunte da dati che coprono un periodo secolare. Per la valutazione delle tipologie difensive esistenti si è proceduto mediante rilievo diretto in campo, con misura e controllo delle quote di rispetto sia per quanto riguarda gli apparati dunosi che per le strutture artificiali. La costa provinciale è stata suddivisa in tratti omogenei per tipologie di difesa, per ciascuno dei quali è stata redatta una scheda riassuntiva, talora corredata da fotografie.

Infine, mediante la creazione di un Geodatabase, si è potuta testare e proporre una banca dati interrogabile nella quale sono riportati vulnerabilità e rischio associato a differenti tipologie di entroterra, che seguono i criteri già definiti nel Programma Provinciale di Previsione e Prevenzione in Materia di Protezione Civile del 1999, oltre a tutti i dati morfologici dei tratti costieri, e costituisce quindi uno strumento utilizzabile anche per altri scopi quali ad esempio la pianificazione territoriale.

Ringraziamenti

Questo lavoro utilizza una grande mole di dati, in parte inediti, in parte editi o raccolti presso strutture che gentilmente hanno messo a disposizione il materiale per la consultazione. A tale proposito è doveroso ringraziare il Genio Civile OO.MM. di Venezia nella persona del Geom. Biscontin per la disponibilità dimostrata e per i preziosi consigli; il Magistrato alle Acque di Venezia - Consorzio Venezia Nuova, nelle persone degli ingg. Ardone, Ceconi, Libardo e Rosselli per aver permesso la consultazione dell'archivio dati presso il Centro Informativo e per aver fornito i dati più recenti sui rilievi lungo il litorale in formato digitale. Un sentito ringraziamento va inoltre ai Comuni di Jesolo, Eraclea, Caorle e S. Michele al Tagliamento per aver fornito informazioni e studi aggiornati riguardanti i tratti costieri di competenza. Si ringraziano infine gli amici Castelli e Sabbatani della Te.Ma di Faenza, per l'aggiornamento sui dati dei capisaldi del territorio provinciale, nonché tutti gli studenti che nel corso degli anni hanno condiviso con noi l'entusiasmo per lo studio della dinamica costiera e delle problematiche erosive delle spiagge.

1.1 L'AREA COSTIERA VENEZIANA

L'area costiera della provincia di Venezia si estende dalla foce del fiume Adige a sud alla foce del fiume Tagliamento a nord, per 88 km circa. Il territorio provinciale di Venezia copre pertanto la quasi totalità della fascia costiera sabbiosa della regione Veneto. Il litorale è costituito interamente da spiagge di varia ampiezza, generalmente a bassa pendenza, e per lunghi tratti è marcato da insediamenti urbani e da un continuo susseguirsi di opere di difesa. Entrambi hanno sostituito i lunghi e spesso potenti allineamenti dunosi che fino a qualche decennio fa caratterizzavano il litorale e ne costituivano l'unica difesa. La continuità del litorale è interrotta dalla presenza di foci fluviali e bocche portuali lagunari e di valle.

L'occupazione degli spazi costieri, avvenuta principalmente dopo il secondo dopoguerra, ha innescato il problema della salvaguardia delle spiagge, intese non solo come zone di fruizione turistica ma anche come baluardo difensivo contro l'ingressione marina. La spiaggia, infatti, è una morfologia in continua evoluzione ed è soggetta a cambiamenti anche repentini, prodotti dall'azione erosiva del moto ondoso o dai fenomeni ripascitivi da parte delle correnti litoranee cariche di sedimento di origine fluviale.

Il depauperamento delle risorse sedimentarie fluviali causata dalle opere di regimentazione dei corsi d'acqua e dai prelievi di inerti in alveo da un lato, e il limitato grado di libertà evolutiva degli arenili, causato dalla rigidità dei complessi insediativi a ridosso della linea di riva o degli argini di conterminazione delle aree di bonifica dall'altro, sono tra le maggiori cause del fenomeno noto come "erosione delle spiagge". Nel corso degli ultimi decenni questo fenomeno è andato via via accentuandosi, culminando nella tristemente nota mareggiata del novembre 1966, che ha prodotto estesi allagamenti nel basso entroterra costiero.

Dal 1966 ad oggi molti interventi sono stati realizzati per rinforzare le difese a mare e per contenere l'erosione della costa, con esiti a volte controversi. Negli ultimi anni il tratto costiero centro-meridionale, compreso tra la foce dell'Adige e quella del Piave è stato interessato da una complessa operazione di rinforzo e riqualificazione dei litorali ad opera del Magistrato alle Acque - Consorzio Venezia Nuova, attraverso la ricostruzione totale o la ricarica degli arenili con sabbie prelevate sui fondali marini al largo delle coste veneziane. Gli interventi, alcuni dei quali sono tuttora in corso, hanno interessato il litorale di Isola Verde, Sottomarina, Pellestrina, Cavallino, Jesolo ed Eraclea Mare, e sono in previsione anche per il tratto del Lido.

2. IL RISCHIO DA MAREGGIATA

2.1 INTRODUZIONE

Esistono varie definizioni del concetto di “rischio” ed altrettante metodologie di valutazione. Secondo la terminologia adottata dall’UNESCO e quella proposta dall’UNDRO (United Nations Disaster Relief Office) ad esempio, con il termine *pericolosità* o *pericolo* si definisce la “probabilità che in una zona si verifichi un potenziale evento dannoso con una certa intensità entro un dato periodo di tempo (tempo di ritorno)”. Pertanto, in base a questa definizione, la *pericolosità* è anche funzione del tempo di ritorno dell’evento.

Nell’applicazione pratica di metodologie di valutazione di rischio, si possono individuare situazioni in cui la pericolosità è elevata ma il rischio è nullo o quasi, come ad esempio nelle zone non antropizzate. Ne consegue che il fenomeno fisico espresso attraverso la pericolosità, perché sia dannoso deve essere inserito nel contesto territoriale in termini di presenze umane, attività ed infrastrutture. Questi ultimi costituiscono gli elementi a rischio, cioè il valore esposto all’evento.

Altro importante parametro da definire è la “*vulnerabilità*”, che esprime l’attitudine di un dato elemento o contesto territoriale a sopportare gli effetti di un evento dannoso in funzione dell’intensità dell’evento stesso. Con la vulnerabilità si esprime quindi il grado di perdita di un dato elemento o di una serie di elementi al verificarsi di un fenomeno di una data magnitudo (intensità).

Per quantificare le conseguenze derivanti dal manifestarsi di un evento dannoso, cioè la perdita attesa, è sufficiente moltiplicare la vulnerabilità per gli elementi a rischio, ottenendo così il rischio specifico.

Il rischio totale è definito quindi attraverso la pericolosità P, la vulnerabilità V e il valore esposto E, che è associato all’attività antropica. In ultima analisi il rischio esprime le perdite di vite umane, feriti, danni a proprietà e distruzioni di attività economiche.

In ambito territoriale esistono diversi percorsi metodologici di analisi del rischio, che tuttavia presuppongono sempre una preliminare ed attenta analisi della ricorrenza del pericolo e della sua intensità, della vulnerabilità intrinseca del sistema ambientale a sopportare l’evento dannoso e dell’assetto del territorio, in termini di presenze e attività umane.

2.2 METODOLOGIA APPLICATA

La presente metodologia di valutazione del rischio da mareggiata lungo i litorali sabbiosi della Provincia di Venezia costituisce un’applicazione ed una parziale modifica del metodo ideato ed utilizzato da FONTOLAN (2001) per il “Programma di previsione e prevenzione in materia di Protezione Civile” della Provincia di Venezia. Il metodo segue un percorso analitico che conduce alla definizione di P, V ed E, attraverso la creazione di un database territoriale e di

alcune semplici procedure di calcolo, che verranno di seguito riassunte.

Per motivi che verranno in seguito esposti in maniera più approfondita, si è assunto un pericolo uniforme, valutato sulla ricorrenza delle mareggiate alla scala temporale delle osservazioni esistenti.

Il nodo fondamentale della metodologia di valutazione è rappresentato dalla quantificazione della vulnerabilità, che nel caso specifico è stata definita come la capacità di attenuazione delle onde da parte delle spiagge e/o delle strutture difensive esistenti sul litorale ed è stata quantificata attraverso due passaggi:

- **Vulnerabilità potenziale** (V_p): rappresenta la vulnerabilità del litorale, nell'ipotesi che non esista alcun tipo di difesa (morbida o rigida) dall'ingressione marina, quantificata attraverso una serie di variabili che definiscono le condizioni morfologiche ed evolutive della costa;

- **Vulnerabilità reale** (V_r): rappresenta la vulnerabilità potenziale mitigata dall'effetto della presenza di difese, descritte attraverso una serie di variabili atte a definirne la capacità dissipativa.

La struttura logica è data quindi dal percorso:

$$\text{Vulnerabilità potenziale } (V_p) \Rightarrow \text{vulnerabilità reale } (V_r) \Rightarrow \text{rischio } (R)$$

Dei diversi approcci possibili per quantificare la vulnerabilità è stato scelto quello tra i più largamente impiegati in campo ambientale (GORNITZ ET AL., 1994; CIVITA, 1994; CIVITA E DE MAIO, 1997), esso è rappresentato da una regressione multipla del tipo:

$$V = v_1 k_1 + v_2 k_2 + v_3 k_3 + \dots + v_n k_n$$

dove V rappresenta l'indice di vulnerabilità, v il valore della variabile e k il peso ad essa assegnato, e può essere facilmente ricondotto ad una struttura logica tipicamente utilizzata nell'ambito dei GIS.

Attraverso una serie di test, GORNITZ ET AL. (1994) hanno trovato che l'algoritmo basato sulla somma delle variabili è meno sensibile ad errori di omissione o di classificazione dei valori rispetto agli algoritmi basati sul prodotto delle variabili stesse. L'ulteriore vantaggio del metodo è quello di essere assolutamente indipendente dal numero di casi, una volta stabilite con precisione le variabili e i pesi. Questo significa che, a differenza degli approcci basati sull'analisi statistica multivariata (DAL CIN & SIMEONI, 1994; JELGERSMA ET AL., 1993) qualsiasi ulteriore caso (ad esempio un nuovo tratto costiero da codificare) è facilmente indicizzabile mediante calcolo svincolato dall'insieme dei dati esistenti. Il fatto che, nel caso del litorale veneziano, siano tuttora in corso interventi di riqualificazione della fascia costiera e che altri siano previsti a

breve scadenza, indica come necessità imprescindibile che il database possa venir aggiornato con facilità e con altrettanta facilità sia possibile aggiornare i valori di vulnerabilità e rischio solo per alcuni tratti, caratteristica che non sarebbe consentita dall'analisi multivariata.

Al fine di applicare la procedura scelta è necessario in primo luogo attribuire delle categorie di valori (GORNITZ ET AL., 1994) o di importanza (BUSH ET AL., 1999) nell'ambito di ogni variabile.

L'insieme numerico dei dati relativi alle variabili che concorrono alla vulnerabilità potenziale è stato perciò normalizzato in un intervallo compreso tra 0 e 4 attribuendo il valore massimo corrispondente alla condizione di vulnerabilità maggiore. Reciprocamente, all'insieme dei parametri utilizzati per la definizione delle difese, è stato assegnato il valore più elevato (4) alla condizione di efficienza massima contro le mareggiate. A ciascuna variabile è stato assegnato un coefficiente (k) a seconda del grado di importanza della variabile stessa all'interno del sistema.

Infine il rischio (R) è stato definito applicando la seguente relazione $R = Vr \cdot E$

dove E, ossia il valore esposto, è stato quantificato attraverso la tipologia d'uso dell'entroterra, che è stata indicizzata in 4 classi, a seconda dell'importanza dell'insediamento (centri urbani=4, nuclei di case=3, case sparse e aree agricole=2, aree naturali=0).

2.3 VARIABILI

L'erosione marina lungo la fascia costiera della provincia di Venezia è un fenomeno per gran parte determinato dalle basse quote del terreno e dalla limitata capacità dissipativa delle spiagge attuali, compromesse dalla forte pressione antropica. La vulnerabilità del territorio immediatamente retrostante al litorale è già stata constatata in più occasioni, specialmente durante la mareggiata del novembre 1966. La maggior parte delle difese costiere fu infatti realizzata a seguito dei danni arrecati dalla mareggiata e in virtù delle oggettive condizioni di pericolo di molti centri residenziali, spesso ubicati a quote prossime o inferiori al livello medio del mare (Fig. 2.1).

Il criterio per definire sia le aree maggiormente vulnerabili all'ingressione marina sia quelle a maggior rischio per la popolazione e per le abitazioni deve basarsi sulla valutazione oggettiva delle caratteristiche fondamentali dei diversi tratti di costa, rappresentate da un insieme di variabili riferite a 5 comparti distinti:

- 1) Condizioni meteomarine
- 2) Condizioni geologico-morfologiche e pressione d'uso delle spiagge
- 3) Tendenze evolutive delle spiagge
- 4) Tipologia delle strutture difensive lungo costa e nell'entroterra
- 5) Uso del suolo e tipologie insediative dell'entroterra

L'insieme delle variabili che rientrano nei primi 4 comparti costituiscono la base per la zonazione del litorale, tradotta in termini di vulnerabilità. Il quinto comparto stabilisce invece l'oggetto del rischio.

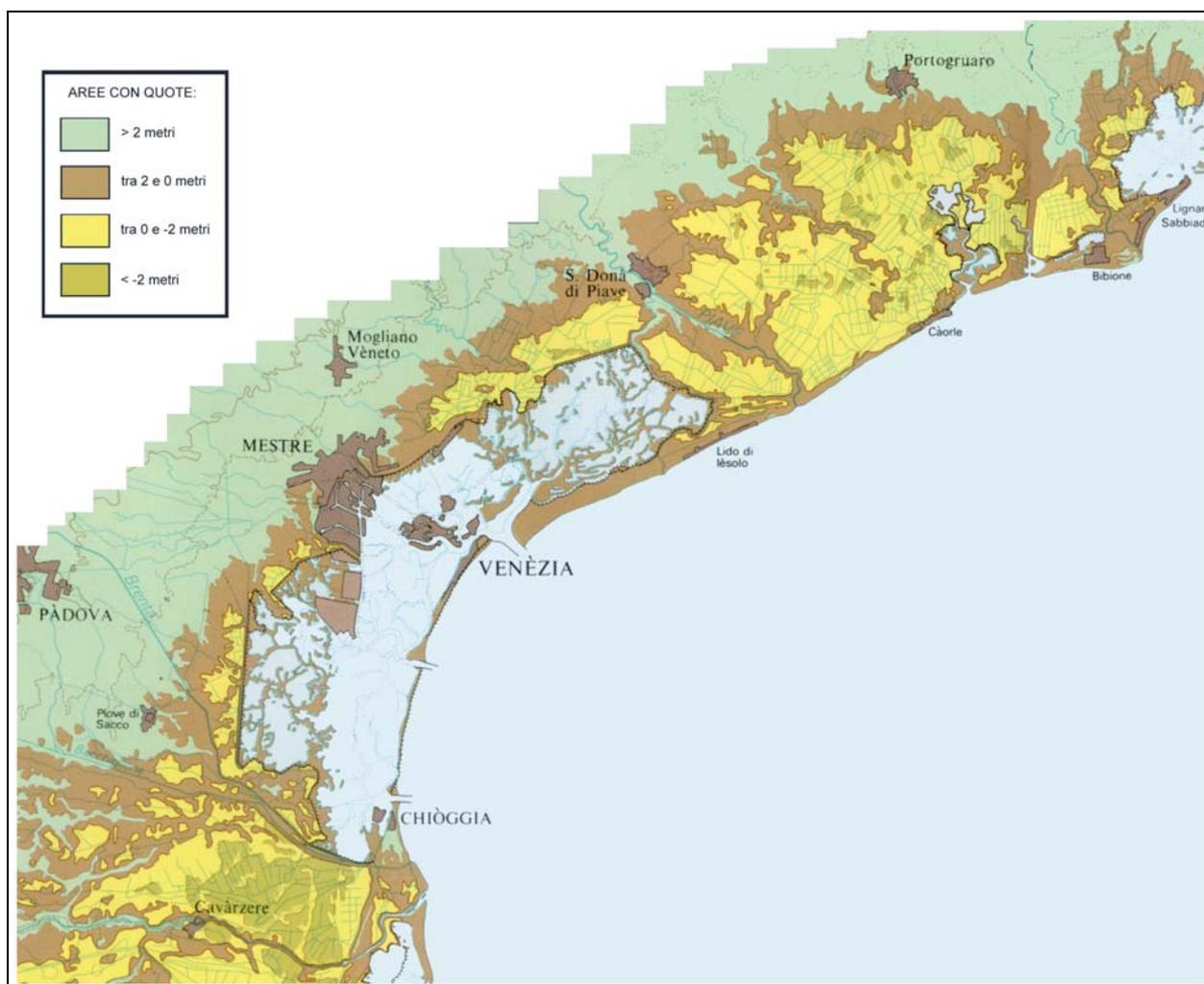


Fig. 2.1 – Altimetria del territorio costiero della provincia di Venezia (da Bondesan et al., 1995: modificato).

2.3.1 Condizioni meteomarine

Il clima di moto ondoso dell'area in esame rappresenta la condizione di base per la valutazione del rischio da esondazione, poiché la mareggiata è il parametro che costituisce la pericolosità, nell'accezione già definita in precedenza. Tuttavia i dati ad oggi disponibili sono piuttosto frammentari o caratterizzati da statistiche limitate nel tempo. Limitandosi alle statistiche finalizzate alla pericolosità, per la quantificazione degli eventi estremi, il Consorzio Venezia Nuova (CVN, 1985) riporta una stima aggiornata di probabilità di eventi di mareggiata computata sulla base dei dati registrati da tre differenti fonti (CNR, ENEL, KNMI). Da tale studio risulta che non è possibile estrapolare una statistica attendibile per tempi di ritorno (Tr)

superiori a 10 anni, in quanto le osservazioni continue si limitano a 7 anni di registrazioni con funzionamento pari al 68% del tempo (dati ENEL periodo 1976-82). Il CVN (1985) riporta comunque una ridistribuzione dell'altezza d'onda significativa al largo in condizioni estreme ($H_s > 2$ m) per tempi di ritorno superiori (50, 100 anni). Come risulta dalla tab. 2.1 sia in condizioni di Bora che di Scirocco le massime altezza d'onda significative (H_s) con $Tr=10$ anni sono pari a poco meno di 5 m.

DATI	n. anni di registrazioni	Direzione	Numero eventi totali	H_s (m) per $Tr = 10$ anni
ENEL	7	Bora	36	4.92
		Scirocco	24	4.82
CNR	1.125	Bora	9	5.04
		Scirocco	4	3.71
KNMI	16	Bora	16	N.A.
		Scirocco	16	3.95
Ricostruzioni	9	Bora	9	4.30
	11	Scirocco	11	6.52

Tab. 2.1 – Statistica degli eventi di mareggiata computati sulla base di diversi dati o mediante ricostruzione con modello matematico. N.A. = non attendibile (da CVN, 1985, semplificata).

CAVALERI ET AL. (1996) giungono a conclusioni simili utilizzando i dati di moto ondoso registrati dopo il 1972 alla piattaforma CNR. Gli eventi di mareggiata considerati (con $H_s > 2$ m) sono complessivamente 90, di cui 72 di Bora e 18 di Scirocco. Per $Tr = 10$ anni e probabilità P pari al 90% i valori di H_s durante le mareggiate di bora e scirocco risultano di 4.9 m e 5.2 m circa, rispettivamente.

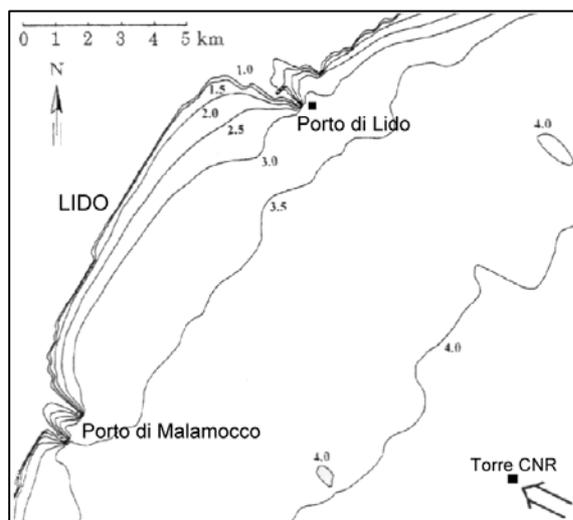


Fig. 2.2 – Isolinee di altezza d'onda per una mareggiata di scirocco (Cavaleri et al., 1996: modificato).

La pericolosità degli eventi estremi è associata al valore di H_s in prossimità della costa. Per tale ragione i valori fin qui riportati possono essere considerati solo come base per il calcolo della propagazione del moto ondoso sotto riva. E' noto infatti che le onde che si propagano verso i bassi fondali tendono a trasformarsi e a dissipare la propria energia, a causa della rifrazione, dello *shoaling* e dell'effetto d'attrito con il fondo. Una stima del decadimento dei valori estremi è fornita da CAVALERI ET AL. (1996): in condizioni di scirocco con H_s al largo di 5,0-6,5 m, la riduzione in altezza tende asintoticamente a 3,20-3,50 m approssimativamente in corrispondenza della testata della bocca del Lido di Venezia, ad una profondità di 5 m circa (Fig. 2.2).

L'aspetto interessante del fenomeno è che l'andamento delle isolinee di altezza d'onda, e quindi di energia associata, corrisponde alla configurazione batimetrica dei fondali dell'area dell'Alto Adriatico.

In mancanza di un corretto modello di calcolo che stabilisca l'esatta ripartizione dell'energia del moto ondoso sotto riva (CAVALERI et al., 1996), è possibile in prima ipotesi considerarla equamente distribuita lungo il tratto costiero in esame (dal Piave al Tagliamento), che presenta una configurazione batimetrica piuttosto uniforme e grossomodo parallela alla linea di riva.

In sintesi, ai fini della pericolosità, può essere considerato come evento estremo una mareggiata con H_s max pari a 3,5 m in corrispondenza dell'isobata -5 m. A tale valore è opportuno sommare la variazione del livello marino (Δh) dovuta principalmente alla marea, che può raggiungere i 130 cm con $Tr = 10$ anni, come valore statistico combinato agli eventi di mareggiata (CVN, 2000).

Gli effetti di tale evento sul litorale saranno determinati dalla configurazione del profilo sommerso della spiaggia (tra -5 m e la linea di riva), che rientra nel comparto delle variabili indicate nel punto successivo.

2.3.2 Condizioni geologico-morfologiche

L'assetto morfologico del litorale è determinato da due variabili: pendenza dei fondali e ampiezza della spiaggia. Poiché i litorali del Veneto sono molto sfruttati turisticamente, un fattore destabilizzante dell'assetto naturale è dato dalla pressione d'uso, intesa come numero di presenze turistiche, che implicano indirettamente strategie d'utilizzo del bene spiaggia non sempre finalizzate alla sua preservazione.

- Pendenza dei fondali

E' un parametro che esprime il potere dissipativo del tratto di spiaggia considerato nei confronti del moto ondoso. Un profilo meno ripido e caratterizzato dalla presenza di barre e truogoli è più efficiente nella dissipazione dell'energia. Per calcolare la pendenza esistono diversi metodi che si differenziano nella scelta dell'estremo verso mare del tratto di profilo sottomarino da considerare. Per CAROBENE & BRAMBATI (1975) la zona a barre e truogoli, identificata come la zona dinamica della spiaggia sottomarina, ha come limite inferiore il piede della barra più esterna. BRAMBATI & FINOCCHIARO (1988) evidenziano però alcune difficoltà nell'identificazione univoca di questo limite, soprattutto in mancanza di una forma ben distinta di barra esterna.

HALLERMEIER (1978, 1981) propone un metodo matematico per l'individuazione del limite del profilo attivo della spiaggia sottomarina (profondità di chiusura), che utilizza i parametri di altezza e periodo dell'onda incidente sul litorale considerato. Viste le difficoltà di cui sopra e

dato che all'interno del presente studio il calcolo della pendenza è finalizzato a valutare l'interazione del fondale con il moto ondoso, si è ritenuto più corretto utilizzare quest'ultimo metodo. Esso permette una determinazione univoca di tale limite e applicabile anche dove la barra non sia presente. Secondo HALLERMEIER la profondità di chiusura (d_1) è data da:

$$d_1 = 2.28H_{s0.137} - 68.5(H_{s0.137}^2 / gT_s^2)$$

dove $H_{s0.137}$ è l'altezza dell'onda significativa sotto costa che ha una frequenza di 0.137% (12 ore) in un anno, T_s è il periodo associato all'onda e g l'accelerazione di gravità. Utilizzando per i litorali considerati valori di H_s e T_s grossomodo compresi entro il range 1.8-2.5 m e 5-6 s (CNR, 1976; TOFFOLO & TOMASINO, 1984; CVN, 1985) si ottengono valori di d_1 compresi tra 3.5 e 4.5 m. Considerando il margine d'errore nella determinazione dell'altezza dell'onda sotto costa e confortati dalla corrispondenza tra il passaggio tessiturale sabbie e sabbie pelitiche (BRAMBATI et al., 1988) e l'isobata -5m, quest'ultima profondità è stata considerata la più opportuna (PILLON, 1999).

Il valore della pendenza è stato calcolato come rapporto tra la profondità -5 m e la sua distanza dalla linea di riva, sia essa naturale o antropica.

- Ampiezza della spiaggia emersa

E' un altro indicatore fondamentale della capacità del litorale di assorbire un evento di mareggiata. Questa risulterà maggiore nel caso in cui sia presente una fascia più o meno ampia di avandune. Pertanto l'ampiezza è stata considerata comprensiva dei corpi dunari, qualora presenti, considerando come limite verso terra l'inizio della fascia della vegetazione arborea o arbustiva. Nei sistemi fortemente antropizzati il limite è stato invece posto in corrispondenza delle strutture presenti nel retrospiaggia, siano esse argini, opere di difesa o strade costiere.

- Pressione d'uso

I litorali in esame sono, per la quasi totalità, interessati da intenso sfruttamento turistico. La pressione d'uso può essere quindi intesa come numero di presenze turistiche, che reca in sé alcune importanti conseguenze in riferimento alle condizioni del litorale. Lo sfruttamento si esplica soprattutto attraverso cospicue e continue movimentazioni di sabbia sulle spiagge interessate, per consentire una completa fruizione turistica. Le spiagge ne risultano spesso spianate, con un profilo topografico anomalo, dal ridotto potere dissipativo. Il mancato sviluppo della vegetazione spontanea, inoltre, aumenta la vulnerabilità della spiaggia nei confronti dell'erosione eolica.

2.3.3 Tendenza evolutiva delle spiagge

E' rappresentata dalla variazione della linea di riva e dei fondali, entro il limite dato dalla profondità di chiusura.

- Evoluzione della linea di riva (tendenza recente)

Le fluttuazioni della linea di riva, sia naturali che indotte dall'azione antropica, possono modificare fortemente nel tempo l'ampiezza della spiaggia emersa, sia in negativo, che in positivo. Tali fluttuazioni possono essere di tipo stagionale, comprese in un range relativamente basso, che non influenzano la stabilità della spiaggia, oppure a lungo termine, decennali, che provocano variazioni importanti nella superficie di spiaggia emersa disponibile.

- Evoluzione della linea di riva (tendenza storica)

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva storica, cioè riguardante un periodo di tempo di più di 50 anni, è complementare a quella della tendenza recente in quanto permette di discriminare tra situazioni contingenti e croniche. Variazioni a lungo termine determinate da una situazione generale di aumento/diminuzione del livello medio mare, subsidenza della terraferma, posizione rispetto alle fonti sedimentarie e al trasporto longshore, possono in alcuni casi venir invertite da situazioni ed eventi contingenti. Come esempio è possibile citare il litorale di Caorle Ponente, il cui trend storico negativo, in seguito alla costruzione del molo guardiano di foce Livenza, si è trasformato in trend recente positivo.

- Trend evolutivo dei fondali

Individuata la profondità di -5m come limite della zona dinamica della spiaggia sottomarina, è stata considerata l'evoluzione dei fondali relativamente a questo intervallo spaziale. Questo valore ci dà un indice della stabilità nel tempo dell'efficienza dissipativa della spiaggia sottomarina. Un trend evolutivo fortemente negativo determina un aumento della pendenza nel tempo e quindi una diminuzione del potere dissipativo.

2.3.4 Strutture difensive lungo costa e nell'entroterra

Il litorale in esame presenta numerose tipologie di opere difensive, sia di tipo morbido che rigido. Tale classificazione è stata mantenuta, distinguendo, nel caso delle difese rigide, quelle poste a mare, quelle radenti (cioè aderenti alla linea di riva) e quelle nel retrospiaggia.

- Difese morbide

Il litorale veneziano è, per le sue caratteristiche naturali, estremamente favorevole allo sviluppo di dune costiere. La loro presenza, in maniera continua lungo tutto il litorale, è testimoniata fino agli anni '50. Successivamente, come già visto, il boom edilizio unitamente alla

crisi erosiva diffusa, hanno determinato lo smantellamento della maggior parte dei cordoni dunosi, sia quelli immediatamente alle spalle della spiaggia emersa (avanduna), sia quelli dell'entroterra. Oggigiorno solo in alcuni casi sopravvivono ancora dune allo stato naturale, mentre nella maggior parte del litorale la duna non è più presente, sostituita dalle opere rigide di cui si parlerà nei punti successivi. In alcuni tratti rimangono i residui degli antichi cordoni dunosi, inglobati in un sistema spiaggia - retrospiaggia ormai completamente antropizzato.

Allo scopo del presente studio sono state inserite in un'unica categoria, indicata con il termine “difese morbide”, sia le dune naturali, che quelle più o meno antropizzate, fino ai casi di falsa duna, cioè di argini, costituiti da rilevati in sabbia privi di alcun carattere di naturalità (Figg. 2.3 - 2.4).

La scelta di inserire casi così diversi in un'unica tipologia, è motivata dal fatto che pur avendo essi un ruolo morfodinamico completamente diverso, assumono significati e funzioni simili per quel che riguarda il potere di difesa dalle mareggiate. Si tratta, in entrambi i casi, di difese senza strutture rigide, in cui l'unico consolidamento può essere



Fig. 2.3 – Esempio di duna a sviluppo naturale sul litorale di Ca'Roman.

costituito dalla presenza di una copertura vegetale. Il potere

dissipativo dipende sostanzialmente da elevazione e forma. Per una corretta analisi e valutazione del grado di stabilità e dell'efficienza dissipativa dell'argine o della duna sono stati considerati i seguenti parametri fondamentali:

Altezza della difesa: rappresentata dalla quota media dei punti più elevati del cordone difensivo.

Indice di ripidità: espresso dal rapporto tra elevazione e ampiezza dell'apparato dunoso, considerando il fianco rivolto verso mare.

Copertura vegetale: rappresentata dalla percentuale di copertura vegetale s.l. sulla superficie delle dune.

Indice di discontinuità: rappresenta il rapporto tra l'ampiezza complessiva dei varchi e la lunghezza totale della difesa, varchi inclusi. I varchi, ovvero le interruzioni alla continuità della difesa, possono essere sia di tipo naturale (“*blowout*”), che indotti dall'uomo (prevalentemente varchi di accesso alla spiaggia).



Fig. 2.4 – La “falsa duna” di Bibione, costruita in tempi recenti a difesa della porzione urbanizzata del litorale.

Presenza di avandune incipienti: fornisce un’indicazione della naturalità del sito e delle sue buone condizioni generali, inoltre costituisce un’ulteriore, efficace fascia di difesa soprattutto per gli eventi non troppo intensi.

Presenza di staccionate frangivento: costituisce soprattutto un ausilio nella difesa delle dune. Da un lato impedisce il calpestio, fonte di danneggiamento della copertura vegetale e quindi responsabile dell’innesco di processi erosivi; dall’altro limita l’erosione eolica favorendo, laddove possibile, l’accumulo di sabbia.

- Difese rigide

Come difese rigide sono state considerate tutte quelle difese artificiali in cemento armato o pietra, poste in opera per la salvaguardia dell’entroterra. Come già detto, le difese artificiali si suddividono generalmente in due grandi categorie: parallele e

trasversali alla linea di riva. Nella categoria delle difese trasversali si collocano tutte quelle strutture che si protendono dalla spiaggia verso mare, trasversalmente alla linea di riva: pennelli e moli foranei. La loro funzione è principalmente quella di intercettare il carico solido trasportato dalle correnti lungoriva ed offrono perciò una protezione molto limitata, se non nulla, dalle mareggiate. Sono state quindi considerate solo le difese appartenenti alla categoria delle parallele, che è stata ulteriormente suddivisa in tre classi in base alla posizione delle opere rispetto alla linea di riva. Oltre alla posizione che occupa rispetto alla linea di riva, la caratteristica fondamentale che definisce il grado di protezione assicurato dalla difesa è la sua quota massima sul livello del mare.



- Difese a mare: si tratta delle opere poste in mare, ad una certa distanza dalla linea di riva, generalmente costruite in massi. Queste opere possono essere emerse, come le scogliere frangiflutti che si trovano in destra Tagliamento, oppure sommerse come le barre artificiali di fronte a Pellestrina. La loro funzione è in entrambi i casi di portare l’onda a frangenza prima che essa raggiunga la linea di riva, in modo da ridurre l’energia d’impatto delle onde sulla

battigia o sulle strutture radenti. Le difese emergenti risultano tuttavia più efficienti di quelle sommerse nel dissipare il moto ondoso.

- Difese radenti: si tratta delle opere che sostituiscono la linea di riva, o che hanno un tratto di spiaggia prospiciente molto limitato (~10m). Possono essere in cemento armato, come la gradonata di Valle Altanea, oppure in massi come i murazzi. I murazzi sono presenti generalmente laddove sia necessario preservare i centri abitati che siano direttamente esposti al moto ondoso, come il centro storico di Caorle e i lidi veneziani, e sono perciò molto imponenti, di ampia sezione e altezza tale da non essere superati dalle onde più alte.



- Difese del retrospiaggia: in genere si tratta di muretti e passeggiate rilevate rispetto alla spiaggia che si trovano sul limite tra spiaggia e centro urbano. Hanno la funzione



primaria di impedire l'insabbiamento delle zone residenziali del retrospiaggia, ma si dimostrano valide anche come difesa dall'acqua alta, qualora la spiaggia venga completamente sommersa. In questa categoria ricadono ad esempio i muretti di Caorle Levante. Rientrano in questa tipologia di difesa anche i muri paraonde costruiti appositamente per proteggere dal moto ondoso e dall'acqua alta le zone del retrospiaggia. Ne troviamo un esempio

lungo il litorale di Bibione, nel suo tratto orientale o sul litorale del Cavallino.

2.3.5 Uso del suolo e tipologie insediative dell'entroterra

Il rischio da mareggiata diviene tale se esiste un pericolo oggettivo principalmente per le persone e le abitazioni. É quindi fondamentale valutare quale sia l'uso del suolo, in senso lato, nell'immediato entroterra, stabilendo anche un ordine categorico di valenze, partendo da quelle massime, rappresentate dagli insediamenti abitativi, e finendo con quelle minime, rappresentate dalle aree non urbanizzate. Particolare importanza assumono a questo riguardo anche le valenze di tipo ambientale come la presenza nel retrospiaggia di aree tutelate, quali ad esempio i SIC. Queste pur non essendo qualificabili in termini tradizionali di valutazione del rischio, ossia in

termini di vite umane, rappresentano un elevato valore aggiunto, quantificabile in termini economici e sociali.

2.4 BANCA DATI

Per l'aggiornamento e la successiva quantificazione delle variabili si è reso necessario eseguire sia ricognizioni in campo, sia una raccolta di dati pregressi. L'insieme delle informazioni è stata quindi codificata nella banca dati, riferita a tratti omogenei del litorale, riportata nel GIS e in parte nelle Schede Monografiche allegate.

2.4.1 Ricognizioni e georeferenziazione

Tutti i litorali esaminati sono stati oggetto di una campagna di osservazione diretta qualitativa. L'osservazione qualitativa, completata da riprese fotografiche, è stata necessaria per l'individuazione delle tipologie difensive, per la ricognizione dello stato attuale dei litorali e per la raccolta di dati per l'aggiornamento della Carta Tecnica Regionale (CTR) fornita in formato digitalizzato. Per l'aggiornamento della CTRN sono state utilizzati gli ortofotopiani digitali georeferenziati, riferiti alla levata aerofotogrammetrica del 1998, gentilmente messi a disposizione per la consultazione dalla Provincia di Venezia. Le immagini digitali sono state sovrapposte come raster alla base CTRN. In questo modo è stato possibile segnalare le urbanizzazioni recenti, tracciare la linea di riva, e mappare con precisione i campi di dune eventualmente presenti.

Sulla base di questi dati sono stati individuati tratti omogenei di costa, ovvero i tratti che per tutta la loro lunghezza presentassero le stesse caratteristiche difensive per un'estensione di almeno 50 m. Tali tratti sono stati indicizzati con una serie di due o tre lettere dell'alfabeto, dove la prima o le prime due indicano la denominazione turistica del litorale cui appartengono (C per Caorle, IV per Isola Verde, etc.), e l'ultima indica la posizione dall'estremo meridionale (lettera A) a quello settentrionale all'interno di uno stesso litorale (CA, CB, CC, etc. per Caorle; IVA, IVB, per Isola Verde). In conseguenza di alcuni lavori costieri sono mutate le caratteristiche difensive di alcuni litorali, pertanto alcuni tratti sono variati e non sono pertanto confrontabili con i tratti omonimi nello studio del 2001.

2.4.2 Composizione della Banca Dati

Alle informazioni ricavate mediante rilevamento si affiancano quelle di bibliografia o di Studi effettuati per conto di Enti Pubblici. La banca dati, secondo la suddivisione in comparti, risulta così composta:

Condizioni geologico-morfologiche

Pendenza dei fondali

Per il calcolo della pendenza dei fondali sono stati utilizzati i dati più aggiornati riferiti alle seguenti fonti:

- Rilievi batimetrici eseguiti nel 2004 dalla TE.MA. per conto del Consorzio Venezia Nuova lungo i litorali di Isola Verde, Sottomarina, Pellestrina, Cavallino e Jesolo.
- Rilievi batimetrici eseguiti nel 2002 dalla TE.MA. per conto del Consorzio Venezia Nuova lungo i litorali compresi tra la foce del Piave e la foce del Tagliamento (litorali di Eraclea e Valle Altanea, Caorle, Valle Vecchia, Bibione).
- Rilievi batimetrici eseguiti nel 1997 dal Consorzio Venezia Nuova lungo il litorale di Lido.

La distanza tra la linea di riva e la quota di -5 m è stata misurata direttamente sulle sezioni disponibili in formato Autocad.

Trend evolutivo dei fondali

Il metodo più corretto per valutare l'evoluzione del profilo della spiaggia sottomarina consiste nella sovrapposizione delle due sezioni di confronto, previo controllo dell'aggancio a terra comune, e nel calcolo delle differenze di area. Dato che l'ubicazione dei profili non coincide necessariamente tra levate batimetriche eseguite da enti diversi in annate diverse, è stato necessario creare dei profili fittizi per operare il confronto. Per ottenere un risultato il più possibile realistico è stato preso in considerazione il rilievo più recente, poiché in genere più dettagliato, ovvero caratterizzato dalla più alta densità di sezioni rilevate. Sulla base di questi rilievi è stato costruito, per mezzo dell'estensione *3dAnalyst* del software *ESRI ArcGis 8*, un modello digitale dei fondali di ogni tratto di litorale. Per mezzo di un'estensione aggiuntiva, *Easy Profiler*, sono stati estratti i profili in corrispondenza di quelli della levata più vecchia. Tali profili sono stati poi riportati in Autocad in sovrapposizione di quelli della levata precedente, ed è stato effettuato il calcolo delle differenze, positive, negative e nette, delle superfici delle sezioni. I limiti su cui sono state tagliate le sezioni (linea di riva. e -5 m) si riferiscono al profilo più recente. Il risultato è stato poi diviso per l'intervallo di anni che separa le due levate di

confronto, ottenendo così il tasso in m³/m/anno. Successivamente, in base alla posizione dei profili rispetto ai tratti di litorale, si è proceduto all'assegnazione dei valori di tasso, operando una media laddove risultasse necessario.

Di seguito sono riportate le diverse levate batimetriche utilizzate per il computo volumetrico.

- Per il litorale di Isola Verde i computi volumetrici sono stati eseguiti per le annate di confronto 1968-1980, sulla base dei rilievi svolti dal CNR e dal Genio Civile OO.MM. di Venezia.

- Per il litorale di Sottomarina i dati di confronto utilizzati sono relativi al periodo 1982-2004, sulla base dei rilievi effettuati rispettivamente dal Genio Civile OO.MM. di Venezia e dalla TE.MA per il Consorzio Venezia Nuova.

- Per i litorali di Lido e Pellestrina i dati di confronto si riferiscono al periodo 1968-1992 (rilievi CNR), i cui computi volumetrici sono stati eseguiti da CASTELLI et al. (1994). Per il Lido non è stato possibile reperire rilievi recenti. Per il litorale di Pellestrina non è stato ritenuto significativo operare un confronto con i rilievi post-rifluimento, dato che si tratta di un intervento protetto da una barra sottomarina in massi, opera che vincola di fatto il profilo della spiaggia sottomarina.

- Per il litorale di Cavallino il confronto, relativo al periodo 1992-2004 è basato sui rilievi del CNR e quelli più recenti.

- Per il litorale di Jesolo i dati di confronto sono relativi al periodo 1988-2003, sulla base dei rilievi svolti dal Genio Civile OO.MM. di Venezia e di quelli della TE.MA per il Consorzio Venezia Nuova.

- Per i litorali di Eraclea e Valle Altanea, Caorle, Valle Vecchia e Bibione il confronto è relativo al periodo 1988-2002, sulla base dei rilievi svolti dal Genio Civile OO.MM. di Venezia e da TE.MA. per conto del Consorzio Venezia Nuova.

Ampiezza della spiaggia emersa

L'ampiezza della spiaggia emersa è stata calcolata tramite software ArcGIS 8 utilizzando la linea di riva ricavata dai rilievi effettuati da TE.MA per conto del Consorzio Venezia Nuova nel 2002 (litorali di Eraclea e Valle Altanea, Caorle, Valle Vecchia, Bibione) e dal Consorzio Venezia Nuova nel 2003 (litorale di Jesolo) e nel 2004 (litorali di Isola Verde, Sottomarina, Pellestrina e Cavallino). Per ogni tratto, è stata effettuata la media delle misurazioni effettuate lungo gli stessi transetti utilizzati per il computo dell'evoluzione della linea di riva.

Per il litorale di Lido, il calcolo è stato eseguito tramite l'ausilio del programma Autocad 14 partendo dalle ortofoto georeferenziate fornite dalla Provincia di Venezia (levata 1998).

Pressione d'uso

Per la quantificazione della pressione d'uso ci si è avvalsi dei dati ISTAT riportati nell'Annuario Statistico della Provincia di Venezia (Edizione 2000). Secondo tale studio, il litorale della Provincia di Venezia risulta suddiviso nei comprensori balneari di Chioggia (per i litorali di Sottomarina e Isola Verde), Lido, Cavallino, Iesolo, Eraclea, Caorle e Bibione. Pellestrina è l'unico tratto costiero privo di strutture turistico-ricettive.

Per ciascun comprensorio viene riportato il "numero di presenze" definito come "numero delle notti trascorse dai clienti nelle strutture ricettive alberghiere o extra-alberghiere". In particolare nel 1998 Chioggia ha fatto registrare 2.134.420 presenze turistiche a fronte di una popolazione residente in tutto il comune pari a 52.039 persone, Lido 519.757 presenze (non è disponibile il dato dei residenti dell'isola), Cavallino 5.437.420 a fronte di 11.900, Iesolo 5.290.487 a fronte di 22.839, Eraclea 587.611 a fronte di 12.528, Caorle 3.603.549 a fronte di 11.416 persone, Bibione 4.786.618 a fronte di soli 11.798 residenti.

Ovviamente il peso delle presenze turistiche deve essere considerato in base all'estensione del litorale; le presenze inoltre si distribuiscono in modo diverso sui diversi tratti di litorale e va quindi valutato caso per caso. La valutazione è stata fatta sulla base di un "indice di fruizione turistica" (i_t), che assegna un peso diverso (compreso tra 0 e 1), a diverse tipologie, secondo lo schema seguente:

- 0 litorali naturali e non, privi di interesse turistico o non balneabili;
- 0.05 litorali naturali di interesse turistico, adatti alla balneazione ma di difficile accesso, oasi naturali ad accesso limitato;
- 0.1 litorali naturali di interesse turistico e/o naturalistico, privi di infrastrutture turistiche ma interessati da una certa presenza data dalla relativa comodità di accesso;
- 0.6 litorali sfruttati dal punto di vista turistico (spiagge in concessione), forniti di infrastrutture turistiche e sui quali insiste un entroterra caratterizzato in prevalenza da campeggi e/o aree verdi attrezzate;
- 0.8 litorali sfruttati dal punto di vista turistico (spiagge in concessione), fornite di infrastrutture turistiche e sulle quali insiste un entroterra caratterizzato dalla presenza, in misura comparabile, di aree edificate (alberghi o residence) e di campeggi e/o aree verdi attrezzate;
- 1 litorali sfruttati dal punto di vista turistico (spiagge in concessione), fornite di infrastrutture turistiche, sulle quali insiste un entroterra caratterizzato dalla presenza preponderante di aree edificate (alberghi o residence).

Poiché l'indice di fruizione turistica (i_t) definisce l'attitudine ricettivo-ricreativa di ciascun tratto costiero, il numero di turisti per ogni tratto (p_t) sarà definito dal prodotto tra il numero complessivo di turisti (P) e un indice di fruizione normalizzato sulla base della lunghezza (in metri) di ciascun tratto (l_t), ovvero:

$$p_t = i_n P$$

dove i_n rappresenta il nuovo indice di fruizione normalizzato sulla lunghezza del tratto:

$$i_n = \frac{l_t \cdot i_t}{\sum (l_t \cdot i_t)}$$

La pressione d'uso per ogni tratto (p_i) deve tuttavia considerare il numero di presenze al metro lineare di spiaggia, ridefinibile mediante la semplice relazione:

$$p_i = \frac{p_t}{l_t}$$

Tendenza evolutiva delle spiagge

Evoluzione della linea di riva (tendenza recente)

L'evoluzione della linea di riva recente è stata ricavata dal confronto tra la CTRN della Regione Veneto (aggiornamenti del 1983 dal Tagliamento al promontorio di Caorle; 1987 da Caorle alla foce dell'Adige) e la posizione della linea di riva più recente estratta, tramite il programma Autocad, dai rilievi effettuati dalla TE.MA. di Faenza per conto del Consorzio Venezia Nuova, nello specifico:

- rilievi effettuati nel 2004 lungo i litorali di Isola Verde, Sottomarina, Pellestrina, Cavallino e Jesolo.

- rilievi eseguiti nel 2002 lungo i litorali compresi tra la foce del Piave e la foce del Tagliamento (litorali di Eraclea e Valle Altanea, Caorle, Valle Vecchia, Bibione).

Il confronto è stato effettuato con l'ausilio del software *ESRI ArcView 3.2a* e dell'estensione appositamente creata dallo USGS (Servizio Geologico degli Stati Uniti), denominata *DSAS, Digital Shoreline Analysis System* (sistema digitale di analisi della linea di riva). Tale estensione è in grado di eseguire la tracciatura automatica di transetti perpendicolari alla linea di riva, e di calcolare per ognuno di essi la distanza in metri tra le linee di riva, distinguendo le variazioni positive e negative. La spaziatura tra i transetti è stata impostata a 100 m. Il tasso di evoluzione (m/anno) è stato calcolato dividendo la variazione (positiva o negativa) per l'intervallo di anni trascorsi tra la levata della CTRN e il dato più recente di posizione della linea di riva. Per l'attribuzione al tratto di litorale è stata calcolata la media tra i transetti ricadenti nel tratto stesso.

Per il litorale di Lido il confronto è stato effettuato tra la CTRN della Regione Veneto aggiornata al 1987 e le ortofoto 1998, calcolando la differenza in metri lungo le divisioni dei tratti e dividendo per l'intervallo 1987-1998. E' stato così ottenuto il trend in m/anno, calcolato come valore medio dei due tassi relativi agli estremi di ogni tratto.

Evoluzione della linea di riva (tendenza storica)

Per il trend di evoluzione sono stati utilizzati i dati riportati da ZUNICA (1971), relativi ai confronti tra il 1892 e il 1961-62 (fatti salvi alcuni casi in cui il periodo di confronto risulta limitato al 1951), basati sulla cartografia storica.

Tipologia delle strutture difensive lungo costa e nell'entroterra

Le difese morbide e rigide, radenti e del retrospiaggia, sono state caratterizzate in base alla loro elevazione rispetto al livello medio del mare, nota dalla documentazione consultata o misurata durante la campagna di rilevamento del 2000. Nei casi in cui erano disponibili più misure, è stato assegnato un valore medio. Analogamente, l'indice di ripidità è stato ricavato sulla base delle misure effettuate. Gli altri indici di efficienza e stabilità delle dune (copertura vegetale, indice di discontinuità, presenza di avandune incipienti e di staccionate frangivento) sono stati desunti mediante osservazione diretta e controllo su ortofoto. In particolare, il grado di copertura vegetale è stato distinto in 5 categorie descrittive: totale, abbondante, discontinua, scarsa, nulla, che possono grossomodo essere assimilate ai 5 stadi evolutivi delle avandune indicati da HESP (1988) Analogamente l'indice di discontinuità è stato diviso in 3 categorie: < 10%, tra 10% e 20% e > 20%; avandune incipienti e staccionate sono state distinte in 3 categorie: presenti, scarse, assenti.

Per le difese a mare si è mantenuta la distinzione tra emergenti e sommerse.

Uso del suolo e tipologie insediative dell'entroterra

Per classificare la tipologia dell'entroterra sono state utilizzate classi simili a quelle riportate nel *Programma di Previsione e Prevenzione in materia di Protezione Civile della Provincia di Venezia* (1999) per la definizione del rischio idraulico. Essa prevede la suddivisione del territorio in 4 classi sulla base della densità abitativa; nel nostro caso le classi di densità abitativa sono state ridotte a tre, per la particolare tipologia offerta dalla zona prossima al litorale, contraddistinta in prevalenza da insediamenti a nastro.

Le tre classi considerate sono, secondo la definizione riportata nell'*Annuario Statistico della Provincia di Venezia* (Edizione 2000):

CASE SPARSE: le case disseminate nel territorio comunale a distanza tale tra loro da non poter costituire nemmeno un nucleo abitato.

NUCLEI DI CASE: la località abitata priva del luogo di raccolta che caratterizza il centro abitato, costituita da un gruppo di case contigue o vicine con almeno 5 famiglie e con interposte strade, sentieri, spiazzi, aie, piccoli orti, piccoli incolti e simili, purché l'intervallo tra casa e casa non superi una trentina di metri e sia in ogni modo inferiore a quello intercorrente tra il nucleo stesso e la più vicina delle case manifestamente sparse.

CENTRO ABITATO: aggregato di case contigue o vicine con interposte strade, piazze e simili, o comunque brevi soluzioni di contiguità, caratterizzato dall'esistenza di servizi od esercizi pubblici costituenti la condizione di una forma autonoma di vita sociale.

Secondo quanto indicato nel Programma di Previsione e Prevenzione in materia di Protezione Civile della Provincia di Venezia (1999), le aree agricole sono state assimilate, ai fini del rischio, alla tipologia "Case Sparse".

E' stata utilizzata una quarta tipologia di uso del suolo (AREA NATURALE) per i pochi casi di entroterra privi di abitazioni e con presenza di aree naturali.

Infine è stato considerato un valore aggiunto, nei casi in cui l'entroterra risulti compreso nella perimetrazione di un'area SIC (Sito d'Importanza Comunitaria definiti sulla base della Direttiva "Uccelli" 79/409/CEE e della direttiva "Habitat" 92/43/CEE. Attualmente i SIC compresi in provincia di Venezia sono i seguenti (Tab. 2.2):

Codice Natura 2000	SIC (REGIONE BIOGEOGRAFICA CONTINENTALE)
IT3250003	PENISOLA DEL CAVALLINO: BIOTOPHI LITORANEI
IT3250013	LAGUNA DEL MORT E PINETE DI ERACLEA
IT3250023	LIDI DI VENEZIA: BIOTOPHI LITORANEI
IT3250033	LAGUNA DI CAORLE - FOCE TAGLIAMENTO
IT3250034	DUNE RESIDUE DEL BACUCCO

Tab. 2.2 - Fonte: www.regione.veneto.it

In tab. 2.3 (a, b, c, d, e) viene riportato un quadro riassuntivo delle variabili utilizzate per ciascun tratto.

2.5 STRUTTURAZIONE DEL GEODATABASE E METODOLOGIA DI CALCOLO

Per costruire la banca dati è stato utilizzato uno strumento molto diffuso nei GIS, ovvero il database geografico. Il database geografico è uno strumento molto potente in quanto consente di associare tutte le capacità di un database per l'inserimento, la gestione e l'interrogazione dei dati, agli strumenti di elaborazione dei dati geografici tipici del GIS. In questo modo il database può essere gestito e consultato separatamente dal GIS.

E' stato utilizzato il programma *ESRI ArcGIS 8*, molto diffuso e il cui formato dati (shp) è supportato anche in altri GIS. Il database geografico utilizzato da questo software viene denominato Geodatabase e consiste in un database vero e proprio consultabile con Microsoft Access (l'estensione del file è mdb, ovvero quella tipica di Access). In questo caso la gestione del database è ancora più semplice in quanto è totalmente contenuto in un unico file.

2.5.1 Struttura del Geodatabase

Il geodatabase è costituito come un sistema di "scatole cinesi" (fig. 2.5), di seguito viene riportata la struttura gerarchica dei vari livelli e il loro contenuto.

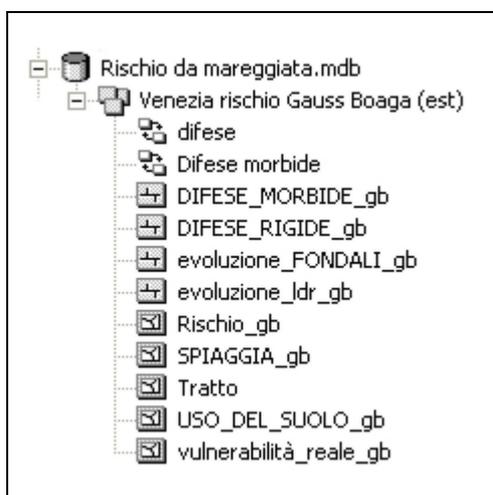


Fig. 2.5 – Schema gerarchico del geodatabase.

- **Geodatabase:** è il contenitore più esterno. A questo livello si possono impostare i *domini* (*domains*), che sono i campi di esistenza dei valori delle variabili. In questo modo è possibile validare i dati già nella fase di inserimento, annullando così gli errori imputabili all'operatore che compila/aggiorna il database. I domini possono essere impostati come range di valori per i campi numerici, oppure come valori codificati (*coded values*) per i campi di tipo testo. In quest'ultimo caso si decidono in anticipo le categorie previste per un campo. Il Geodatabase è stato denominato *Rischio da mareggiata*.

- **Feature dataset:** è il contenitore vero e proprio dei dati geografici di cui si compone il database, in quanto il *feature dataset* determina il sistema di coordinate geografiche in cui è riferito il database stesso. Un Geodatabase può contenere più *feature dataset*, anche con sistemi di coordinate diverse. Il *feature dataset* è stato denominato *Venezia rischio Gauss Boaga (est)*, in quanto il sistema di coordinate utilizzate è il Sistema Nazionale Italiano Gauss-Boaga, fuso Est. Tramite il *Toolbox* di *ArcGIS* è possibile creare una copia del *feature dataset* riferita in un altro sistema di coordinate.

- **Feature class:** sono gli oggetti geografici contenuti nel *feature dataset*, alle quali sono associate le variabili utili al calcolo della vulnerabilità e del rischio. La posizione spaziale corrisponde a quella dell'elemento geografico che rappresentano, per altre la funzione spaziale è solo di rappresentazione visiva dei dati in essa contenuti. Le *feature class* possono essere di tipo puntuale (point), lineare (polyline) e areale (polygon). Ogni *feature class* ha una corrispondente tabella contenente le variabili associate.

Idealmente sarebbe stato possibile creare una sola *feature class* che rappresenti il litorale, a cui poi associare diverse tabelle, poste nello stesso *feature dataset*, contenenti le variabili necessarie al calcolo. Tuttavia è preferibile che alcuni fattori morfologici (come le dune, ad esempio) siano associati ad una *feature* che li rappresenti nella loro posizione geografica precisa. In questo modo il geodatabase può diventare anche uno strumento di pianificazione territoriale.

Di seguito vengono descritte le singole *feature class*, e i dati in esse contenuti. La descrizione segue l'ordine spaziale procedendo dalla terraferma verso il mare (Fig 2.6).

Uso_del_suolo_gb: è un poligono che racchiude la terraferma esondabile. La tabella contiene il nome del tratto di litorale e la classificazione del suolo secondo le categorie del Piano Territoriale della Provincia di Venezia. Le categorie sono: area naturale, zone agricole, case sparse, nuclei di case e centro abitato. E' stato creato un dominio di tipo *coded values*, anche per semplificare l'aggiornamento. E' inoltre presente un codice di presenza/assenza di area SIC.

Difese_morbide_gb: è una polyline che rappresenta le difese morbide, argini in terra oppure dune. È solitamente disegnata in corrispondenza della mezzeria dell'argine, oppure in corrispondenza della linea di cresta del cordone di dune più significativo. La tabella contiene il nome del tratto, la quota media sul l.m.m. della sommità, l'efficienza della difesa espressa come percentuale, l'anno di aggiornamento.

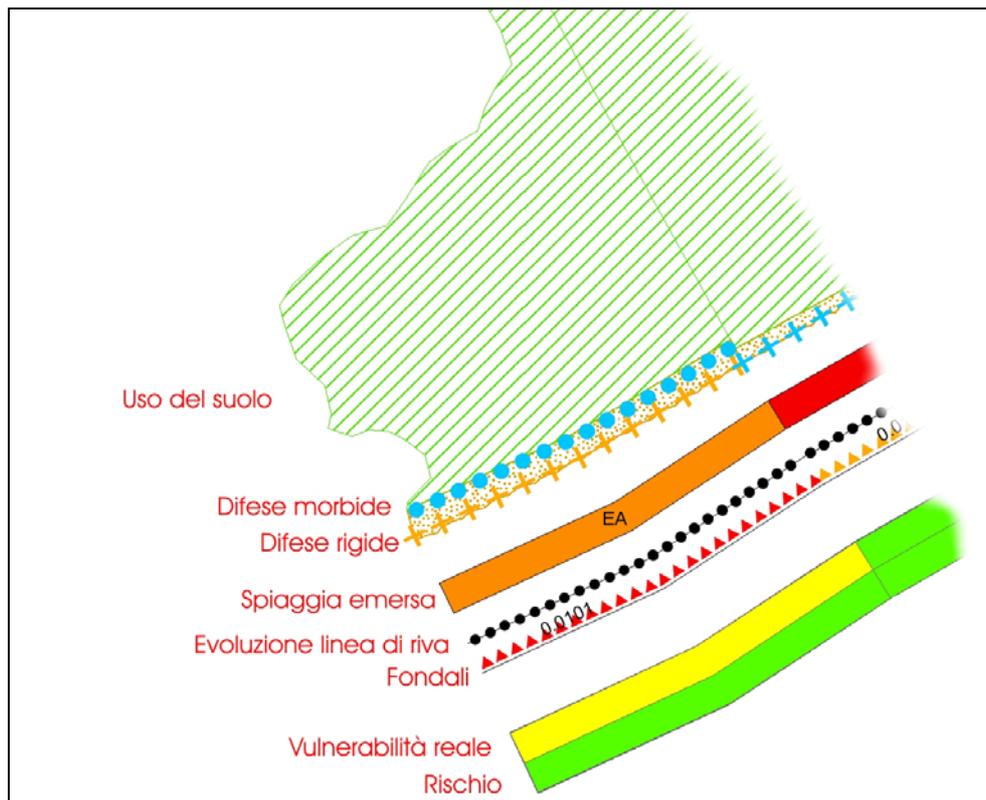


Fig. 2.6 – Schema della rappresentazione del Geodatabase.

Difese_rigide_gb: é una polyline che rappresenta le difese rigide. É disegnata in corrispondenza della difesa. La tabella contiene il nome del tratto, la tipologia della difesa, la sua lunghezza in metri, la quota sul l.m.m. della sommità, la posizione rispetto alla linea di riva, l'anno di aggiornamento dei dati. Per la posizione rispetto alla linea di riva è stato creato un dominio di tipo *coded values*, i cui valori sono: difesa radente, difesa entroterra, difesa a mare emersa e difesa a mare sommersa.

Spiaggia_gb: è un poligono allungato con il lato lungo parallelo all'andamento della costa. La tabella contiene il nome del tratto, l'ampiezza media della spiaggia, l'intensità d'uso della spiaggia, l'anno di aggiornamento dell'ampiezza e la lunghezza del tratto di litorale considerato.

Evoluzione_ldr_gb: è una polyline che rappresenta l'evoluzione recente della linea di riva e segue l'andamento della linea di riva più recente. Non è stata posta in corrispondenza della linea di riva, ma ad una certa distanza da essa, per consentire una lettura chiara della linea di riva più recente. La tabella contiene il nome del tratto, l'evoluzione storica, l'evoluzione recente, l'intervallo di tempo considerato per il calcolo dell'evoluzione recente.

Evoluzione_fondali_gb: è una polyline che rappresenta l'evoluzione dei fondali, ed è parallela alla feature class precedente. La tabella contiene il nome del tratto, l'evoluzione dei fondali, la pendenza della spiaggia sottomarina, l'intervallo di tempo considerato per il calcolo dell'evoluzione dei fondali e l'anno di aggiornamento della pendenza.

Vulnerabilità_reale_gb: è un poligono allungato, con il lato lungo parallelo alle feature class precedenti. La tabella contiene il nome del tratto, il valore della Vulnerabilità potenziale e della Vulnerabilità reale.

Rischio_gb: è un poligono allungato, con il lato lungo in comune con il poligono *vulnerabilità_reale_gb*. La tabella contiene il nome del tratto e il valore del rischio.

Tratto: è stato da ultimo creato un feature class poligonale, coincidente con la spiaggia emersa, che contiene tutti i dati della linea di riva, dei fondali, la vulnerabilità reale e il rischio. In questo modo è possibile eseguire tutte le interrogazioni spaziali necessarie, dal momento che i dati sono presenti all'interno della feature class, oppure in una feature a contatto diretto (*uso_del_suolo_gb*) o sovrapposta (*difese_morbide* e *difese_rigide*).

Sono state infine create due *Relationship class*, ovvero due relazioni di interdipendenza tra le difese morbide e rigide e i rispettivi tratti di litorale. In questo modo interrogando il tratto è possibile sapere quali difese sono presenti e viceversa interrogando le difese è possibile conoscere tutti i dati del tratto corrispettivo.

2.5.2 Normalizzazione delle variabili e calcolo degli indici di vulnerabilità e rischio

Come già esposto, per la quantificazione del rischio si è deciso di operare attraverso la definizione preliminare dell'indice di vulnerabilità, che rappresenta una misura della capacità del sistema spiaggia di contrastare l'esondazione marina. Tale capacità è valutabile attraverso l'insieme delle condizioni del litorale, rappresentate dai valori delle variabili indicate in precedenza.

In questo caso le variabili utilizzate per la regressione multipla sono solamente 6 e rappresentate dal primo gruppo di tabella 2.3:

1) Pendenza fondali PF, 2) trend evolutivo fondali TEF, 3) Ampiezza spiaggia emersa ASP, 4) Evoluzione recente della linea di riva ERR, 5) evoluzione storica della linea di riva ESR, 6) pressione d'uso PU.

I dati relativi a ciascuna variabile per ciascun tratto costiero sono stati normalizzati all'interno di un intervallo compreso tra 0 e 4, dove 4 corrisponde alle condizioni di massima vulnerabilità (cfr. Tab. 2.4). E' stata apportata questa significativa modifica rispetto alle versione precedente del calcolo (FONTOLAN, 2001) per evitare le discrepanze date dalla discretizzazione dei dati in 4 classi, che vincolava molto il risultato agli intervalli di attribuzione delle classi. Per la normalizzazione sono state utilizzate delle funzioni lineari, con l'eccezione della variabile PF, dove è stata utilizzata una funzione logaritmica, che meglio si adatta alla normalizzazione di una variabile derivata da un rapporto tra numeri.

Variabile	0	4
Pendenza fondali	0.0065	0.015
Ampiezza spiaggia	140 m	0 m
Evoluzione dei fondali	30 mc/m/anno	-30 mc/m/anno
Evoluzione storica linea di riva	5 m/anno	-5 m/anno
Evoluzione recente linea di riva	5 m/anno	-5 m/anno
Pressione d'uso della spiaggia	0 presenze/m	400 presenze/m

Tab. 2.4 – Intervalli di normalizzazione delle variabili.

I valori ottenuti per ciascuna delle variabili considerate sono riportati per tutti i tratti costieri in Tab. 2.5 (a-b). A ciascuna delle variabili è stato quindi attribuito un peso sulla base della rilevanza ai fini della mitigazione del rischio. In questo modo solo le variabili PF e ASP assumono valore massimo (pari a 1) poiché rappresentano le condizioni di dissipazione dell'energia del moto ondoso, prima a mare e poi sul tratto immediatamente subaereo. Le variabili TEF e ERR costituiscono un insieme che definisce l'attuale tendenza evolutiva; poiché la loro importanza può essere considerata paritetica, si è deciso di attribuire loro un peso uguale (0.5) con somma 1, evitando in tal modo una ridondanza che potesse inficiare il valore delle due precedenti variabili. Sia ESR che PU rappresentano due indicatori di potenziale destabilizzazione del litorale, che tuttavia hanno un basso peso nel computo dell'indice di vulnerabilità. Nel primo caso si è deciso di assegnare un peso pari a 0.1, in quanto l'evoluzione della linea di riva è già ben rappresentata dal trend recente; nel secondo caso è stato attribuito un peso di 0.2, che corrisponde ad una stima del 20% di abbattimento della valenza della spiaggia emersa.

L'algoritmo per il calcolo di V_p risulta dunque:

$$V_p = PF + SE + 0.5 TEF + 0.5 ERR + 0.1 ESR + 0.2 PU$$

La vulnerabilità potenziale può variare da un minimo e massimo teorici di 0 e 13.2.

La vulnerabilità reale V_r che rappresenta la vulnerabilità del litorale, mitigata dalle difese naturali e artificiali, è stata ricavata secondo la procedura descritta in seguito.

Idealmente ciascun tipo di difesa può efficacemente assolvere al suo compito, qualora le condizioni e la struttura stessa della difesa siano ottimali, come nel caso di un murazzo alto e ben consolidato o di una duna molto elevata, ben strutturata e priva di discontinuità. Tuttavia le difese costiere non sempre presentano queste caratteristiche, perdendo quindi efficacia o richiedendo interventi supplementari di rinforzo. In pratica, assumendo cautelativamente che nessuna delle tipologie difensive possa assolvere indefinitamente al proprio compito, può essere stabilita una sorta di graduatoria che identifica come difese più efficaci - sia strutturalmente che temporalmente - quelle rigide.

Per ogni tipo di difesa è stato quindi attribuito un coefficiente di efficacia C così ripartito:

- Difese morbide: $C_d = 0.6$
- Difese a mare: $C_m = 0.5$
- Difese radenti del retrospiaggia $C_e C_r = 0.8$

Tali coefficienti indicano che le difese rigide (cemento e massi) poste in aderenza o nel retrospiaggia sono in grado di abbattere la vulnerabilità potenziale fino all'80%. Un analogo comportamento si verifica per le altre categorie di difese, nella misura del 50% per quelle a mare (computato stimando cautelativamente un pari abbattimento dell'energia dell'onda) e del 60% per quelle morbide, in virtù della loro maggior fragilità rispetto a quelle rigide. La variabile considerata fondamentale per valutare l'efficacia delle difese è la quota (d). La normalizzazione nell'intervallo 0-4 dei dati relativi alle quote delle difese è stata effettuata utilizzando un valore soglia massimo (quota di sicurezza) di 4 m per le difese rigide radenti e di 3.2 m per quelle del retrospiaggia, giudicate più efficienti a parità di quota, rispetto alle prime. Le difese del retrospiaggia infatti, vengono più difficilmente investite dall'azione diretta del moto ondoso dissipato in prevalenza dalla spiaggia antistante e devono soprattutto fronteggiare l'aumento di livello del mare spesso concomitante all'evento di mareggiata.

Un discorso a parte è stato fatto per le difese morbide, in quanto la loro efficienza e stabilità non è determinata solamente dal valore di altezza assoluta (in questo caso discretizzata per classi), ma anche da un insieme di fattori (ripidità, copertura vegetale, discontinuità, etc.) indicati dalle 5 variabili riportate nel secondo gruppo di Tab. 2.3. L'effetto combinato di queste 5 variabili deve tradursi in un indice di efficienza e stabilità (IES) che varia da 0 a 1:

$$IES = \frac{\sum V_i}{20}$$

dove V_i indica l'insieme delle 5 variabili descrittive delle difese morbide, la cui importanza è considerata uguale. Il denominatore 20 è dato dalla somma dei massimi valori attribuiti alle variabili e serve per normalizzare l'indice nell'intervallo 0-1.

L'efficacia di ogni difesa D_i è rappresentata da:

$$D_i = d \cdot \frac{13.2}{4}$$

dove d rappresenta la quota della difesa normalizzata tra 0 e 4 col metodo sopra esposto e il rapporto $13.2/4$ rappresenta il coefficiente di normalizzazione dei valori delle difese nell'intervallo della vulnerabilità potenziale.

La vulnerabilità reale può quindi essere così definita:

$$V_r = V_p - (D_d \cdot IES \cdot C_d + D_m \cdot C_m + D_r \cdot C_r + D_e \cdot C_e)$$

dove D_d , D_m , D_r e D_e rappresentano i nuovi valori di efficacia (D_i) rispettivamente per le difese morbide, le difese rigide a mare, quelle radenti e quelle dell'entroterra.

Definita la vulnerabilità reale, è semplice calcolare il valore del rischio, che tiene in considerazione la valenza della fascia retrostante alle spiagge, definita dalle classi di uso del suolo e delle tipologie insediative dell'entroterra. I massimi valori sono attribuiti quindi ai centri urbani (4) e i minimi alle aree naturali (0), sottintendendo il rischio associato primariamente alle vite umane e subordinatamente al valore economico delle abitazioni e dell'attività produttiva. L'attribuzione di valenza nulla per le aree naturali è dovuta al fatto che in esse non ricade nessuna delle caratteristiche legate all'attività antropica.

Il rischio si ottiene pertanto dal prodotto tra la vulnerabilità reale e la valenza dell'entroterra (E):

$$R = V_r \cdot E$$

La valenza di alcune aree naturali costiere (aree SIC) è stata riconosciuta come valore aggiunto e quindi valutata a parte in termini di rischio (R_2) nel seguente modo:

$$R_2 = V_r \cdot (E+1)$$

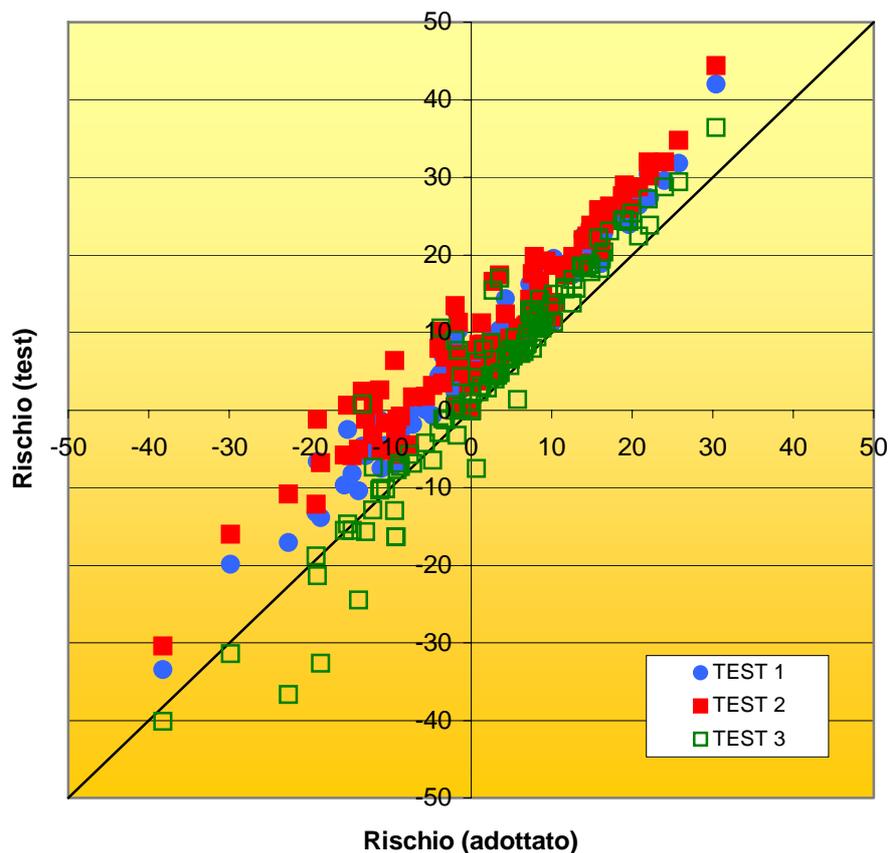
In Fig. 2.7 è riassunto schematicamente l'algoritmo di calcolo per la Vulnerabilità e il Rischio.

2.5.3 Test dei coefficienti delle variabili

Per verificare l'incidenza dei coefficienti attribuiti alle variabili adottate per il calcolo della vulnerabilità potenziale e reale, è stato eseguito un test di stima del rischio, adottando valori

differenti che prevedono, in ogni caso, massimi indici per le variabili di sistema ambientale (ampiezza spiaggia, pendenza dei fondali, evoluzione recente della linea di riva e dei fondali). Cautelativamente non è mai stato assegnato un indice massimo (1) a nessuna difesa.

I risultati dimostrano (Fig. 2.8) che nel campo dei valori positivi del rischio le proporzioni reciproche tra i tratti costieri non cambiano significativamente.



Variabili	coefficienti adottati	Coefficienti testati		
		Test 1	Test 2	Test 3
Amp. Spiaggia	1.0	0.8	1.0	1.0
Pendenza fondali	1.0	0.8	1.0	1.0
Evoluzione linea riva (recente)	0.5	1.0	1.0	0.6
Evoluzione fondali (recente)	0.5	1.0	1.0	0.6
Evoluzione linea riva (storica)	0.1	0.1	0.1	0.1
Pressione d'uso	0.2	0.2	0.2	0.4
Difese a mare	0.5	0.5	0.5	0.8
Difese radenti	0.8	0.6	0.5	0.5
Difese entroterra	0.8	0.6	0.5	0.8
Difese morbide	0.6	0.4	0.5	0.5

Fig. 2.8 – Risultati del test eseguito con l'utilizzo di diversi coefficienti