



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

**DIFESA E CONSERVAZIONE DEL SUOLO, VULNERABILITÀ
AMBIENTALE E PROTEZIONE IDROGEOLOGICA**

Ciclo **XXVIII**

TITOLO TESI

**VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DELLE COSTE DELLA
SARDEGNA A FENOMENI DI EROSIONE ED INONDAZIONE DOVUTI
ALL'IMPATTO DEGLI EVENTI ESTREMI METEO- MARINI**

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

GEO/04

Presentata da:	Francesco Maria Sole
Coordinatore Dottorato	Prof. Giorgio Ghiglieri
Tutor	Prof. Felice Di Gregorio
Relatore	Prof. Jose Jiménez

Esame finale anno accademico 2014 – 2015



RINGRAZIAMENTI

La presente tesi è stata prodotta durante la frequenza del corso di dottorato in *Dottorato in Difesa e conservazione del suolo, vulnerabilità ambientale e protezione idrogeologica* dell'Università degli Studi di Cagliari, a.a. 2014/2015- ciclo **XXVIII**, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. SARDEGNA F.S.E. 2007-2013 - Obiettivo competitività regionale e occupazione, Asse IV Capitale umano, Linea di Attività 1.3.1 “Finanziamento di corsi di dottorato finalizzati alla formazione di capitale umano altamente specializzato, in particolare per i settori dell’ICT, delle nanotecnologie e delle biotecnologie, dell'energia e dello sviluppo sostenibile, dell'agroalimentare e dei materiali tradizionali”.

Ringrazio fortemente i direttori della mia tesi, il Professore Felice Di Gregorio ed il Professore José Jiménez Quintana, dell'Università Politecnica della Catalogna per avermi dato l'opportunità di realizzare questo dottorato ed in generale per l'appoggio incondizionato che mi hanno dato durante questi tre anni di lavoro. Senza di loro quest'impresa non sarebbe stata possibile.

Un grazie speciale a Babbo e Mamma che, non so come, mi adorano e mi sopportano da più 38 anni.

Ed infine, ma non per importanza, un grazie speciale alla mia musa ispiratrice senza la quale non sarei la persona che sono diventato.

INDICE

Abstract	i
Lista Figure.....	ii
Lista Tabelle	iii

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Motivazioni	1
1.2 Obiettivi e struttura della tesi	3

CAPITOLO 2

Vulnerabilità costiera

2.1 Definizione di Vulnerabilità.....	5
2.2 Stato dell'arte: antecedenti sulla vulnerabilità costiera.....	7
2.3 Schema metodologico adottato	9

CAPITOLO 3

Area di studio e dati disponibili

3.1 Area di studio	14
3.2 Dati meteo-marini di moto ondoso	14
3.2.1 Calibrazione Modello Era-Interim con dati Ondametrici	16
3.3 Caratteristiche geomorfologiche delle spiagge	17
3.4 Classificazione delle spiagge a scala regionale.....	23

CAPITOLO 4

Metodologia

4.1 Introduzione	28
4.2 Le tempeste di mare in Sardegna	30
4.2.1 Definizione ed identificazione degli eventi estremi	30

4.2.2 Caratterizzazione degli eventi estremi	32
4.3 Valutazione della pericolosità costiera in termini probabilistici.....	35
4.3.1 Introduzione	35
4.3.2 Parametrizzazione dell'erosione	37
4.3.3 Parametrizzazione dell'inondazione	40
4.3.3 Distribuzione di probabilità estrema della pericolosità.....	42
4.4 Valutazione della vulnerabilità	43
4.4.1 Definizione dell'indice di vulnerabilità all'erosione e all'inondazione.....	44
4.4.2 Scelta del periodo di ritorno.....	48
4.5 Valutazione del fenomeno dell' "Overtopping"	49
4.6 Metodologia per valutare il potenziale rischio costiero	51

CAPITOLO 5

Risultati

5.1 Classificazione tempeste di mare	53
5.1.1 Direzionalità e stagionalità degli eventi estremi	55
5.2 Valutazione delle Pericolosità estreme	59
5.3 Vulnerabilità costiera	62
5.3.1 Vulnerabilità delle spiagge della Sardegna a fenomeni di erosione ed inondazione	62
5.3.2 Vulnerabilità delle spiagge della Sardegna a fenomeni di overtopping.....	76
5.3.3 Vulnerabilità a scala regionale: unità amministrative e territoriali.....	80
5.4 Valutazione del rischio costiero potenziale	96
5.5 Validazione qualitativa del metodo.....	96

CAPITOLO 6

Discussioni e Conclusioni

6.1 Discussioni	100
6.2 Conclusioni	103
6.3 Lavori futuri proposti	107

BIBLIOGRAFIA	108
---------------------------	-----

ABSTRACT

The main goal of this work is to provide a regional assessment of the coastal vulnerability of Sardinian sandy beaches to storm impacts. To do this we have assessed the geomorphic coastal vulnerability taking into account the intensity of storm induced hazards and the adaptation capacity of the system. The methodology applied allows to calculate quantitatively -in a separate manner- the erosion and inundation hazards induced by the storms associated to a given probability of occurrence. The practical application of this method is to provide information that allows stakeholders to manage resource allocation and mitigate consequences.

This framework has been developed by covering the following steps:(i). Define forcing conditions for the Sardinian coast using a storm classification method; to obtain this we have divided the Sardinian coast in 4 different sectors. For each sector storm events have been defined from hindcast wave data obtained for the period between 1979-2012. (ii) Find out the induced beach response to each storm class measured by the quantification of the flooding and erosion hazards. In each sector sandy beaches have been characterized in terms of their slope, height, width and grain size. (iii) Estimation of a coastal vulnerability index formulated in terms of these two intermediate variables by means of a linear function that ranges from a minimum value of 0 (optimum state) to a maximum of 1 (failure state), defining 5 qualitative categories (Very Low, Low, Medium, High, Very High). (iv) Assessment and mapping of the coastal vulnerability index along different sectors of the island.

In terms of prospective analysis we have built a projected timeline of beach hazard based on existing storm data fitted into an extreme probability function. Once the probability of occurrence of the flooding and erosion hazards has been assessed and a risk level defined by the stakeholders, the spatial distribution of vulnerabilities associated to selected probability level will permit to "robustly" compare areas along the coast to identify the most endangered zones.

Lista Figure	pag.
Figura 1.1 Immagini di alcune località della Sardegna colpite dagli eventi estremi 1) e 2) Poetto 3) Torre Grande, 4) S. Giovanni di Sinis	2
Figura 2.1 Schema metodologico per valutare la vulnerabilità costiera delle spiagge della Sardegna alle tempeste di mare.....	13
Figura 3.1 Variazione dell'altezza H_s del moto ondoso in funzione della direzione di travessia scelta per 4 Settori ondosi considerati in questo lavoro (dati ondosi dal 1979 al2012).....	16
Figura 3.2 Correlazione tra le altezze d'onda misurate dalla boa di Alghero ed il corrispdente nodo (41° - 10°) del modello numerico ECMWF usato nel nostro studio.....	17
Figura 3.3 Esempio della zonazione costiera effettuata in <i>spiagge e celle litorali</i> nel caso dell'unità fisiografica 10 (Capo Ferrato- Capo Bellavista).....	18
Figura 3.4 Localizzazione delle Unità Fisiografiche della Sardegna con le correndenti spiagge digitalizzate in questo lavoro	20
Figura 3.5 Esempio del criterio usato per il calcolo dei parametri ottenuti dai profili topografici provenienti dall'analisi 3D-Gis del DEM.....	21
Figura 3.6 Esempio che mostra la distribuzione spaziale dei profili topografici digitalizzati lungo alcune spiagge dell'Ogliastra.	22
Figura 3.7 Classificazione delle spiagge in funzione della pendenza del profilo attivo (dato proveniente dall'Atlante delle spiagge sarde, Di Gregorio et al., 1998).....	24
Figura 3.8 Classificazione delle spiagge in funzione della pendenza: a sinistra si considera la pendenza della spiaggia, mentre a destra quella della battigia	25
Figura 3.9 Classificazione delle spiagge in funzione della larghezza: a sinistra si cosnidera l'ampiezza media, mentre a destra si considera la minima.....	26
Figura 3.10 Classificazione delle spiagge in funzione dell'altezza della duna: a sinistra si considera l'altezza media, mentre a destra si considera la minima	27
Figura 4.1 Schema metodologico applicato in questo lavoro per la stimare la vulnerabilità delle coste della Sardegna alle tempeste di mare.....	30
Figura 4.2 Diagramma che rappresenta i due pericoli potenziali indotti dalle tempeste di mare, erosione ed inondazione (da Bosom et Jimenez ,2009).	35
Figura 4.3 Stralcio dell'Unione Sarda che mostra notizie di danni provocati da una tempesta nel marzo 2013 nell'area del golfo di Cagliari.	36
Figura 4.4 Esempio dei parametri calcolati con il modello <i>Sbeach</i> : Volume eroso di sedimenti ed arretramento della linea di riva.	37

Figura 4.5 Profili tipo utilizzati per caratterizzare il profilo attivo sommerso delle spiagge della Sardegna.....	38
Figura 4.6 Funzione strutturale per il calcolo dell'arretramento della linea di riva a partire dai volumi erosi simulati dal modello <i>Sbeach</i>	40
Figure 4.7 Esempio dei due profili “pre” e “post” evento corrispondenti all’impatto della stessa tempesta (st 143, con altezza d’onda $H_s = 4$ metri).	44
Figure 4.8 Relazione funzionale per la normalizzazione della vulnerabilità.....	45
Figure 4.9: Esempio della scelta della soglia di vulnerabilità all’erosione: definizione dell’ampiezza ottima di controllo e dello stato di fallimento (da Bosom et al, 2008)	47
Figura 4.10 Schema delle condizioni di overtopping (da Pullen et al., 2007).....	50
Figura 4.11 Schema del Modello di Hedges and Reis (1998) per overtopping.....	50
Figura 4.12 Esempio della classificazione degli usi costieri in “naturali” o “antropici” per la zona di Capoterra / Giorgino.	52
Figura 5.1 Differenti parametri che caratterizzano le 5 classi delle tempeste di mare classificate.....	54
Figura 5.2 Distribuzione delle direzioni delle tempeste classificate in Sardegna nei diversi settori ondosi.....	56
Figura 5.3 Distribuzione dei tipi diversi di tempeste nei diversi settori ondosi della Sardegna.....	57
Figura 5.4 Distribuzione stagionale del numero di eventi estremi appartenenti alle 5 categorie tipo, divisi per mese di accadimento	58
Figura 5.5 Valori estremi del run up per i 4 settori della Sardegna ed i 4 tipi di spiaggia differenti usando la pendenza della battigia.....	60
Figura 5.6 Valori estremi del run up per i 4 settori della Sardegna ed i 4 tipi di spiaggia differenti usando la pendenza della spiaggia interapi.	60
Figura 5.7 Valori estremi dei volumi erosi per i 4 settori della Sardegna e per i 2 tipi principali di spiagge (riflettenti e dissipative)	61
Figura 5.8 Valori estremi dell’arretramento della linea di riva per i 4 settori della Sardegna e per i 2 tipi principali di spiagge (riflettenti e dissipative).	61
Figura 5.9 Vulnerabilità all’erosione (media e massima) indotta dalle tempeste di mare per tutte le spiagge situate all’interno dell’area di studio della Sardegna (scala regionale)	63
Figura 5.10 Vulnerabilità all’erosione (media e massima) indotta dalle tempeste di mare per tutte le spiagge situate all’interno dell’area di studio della Sardegna (scala regionale)	64

- Figura 5.11** Percentuale di km di costa che corrispondono ad ogni categoria di vulnerabilità all'erosione per un periodo di ritorno di 50anni. La vulnerabilità media (sinistra) è stata calcolata considerando l'ampiezza media della spiaggia al momento di definire le variabili intermedie di vulnerabilità, mentre l'ampiezza minima della spiaggia è stata usata per la vulnerabilità massima (destra). 65
- Figura 5.12** Percentuale di km di costa che corrispondono ad ogni categoria di vulnerabilità all'inondazione per un periodo di ritorno di 50 anni. La vulnerabilità media (sinistra) è stata calcolata considerando l'altezza media della cresta massima della spiaggia al momento di definire le variabili intermedie di vulnerabilità, mentre l'altezza minima della spiaggia è stata usata per la vulnerabilità massima (destra). 65
- Figura 5.13** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di erosione media raggruppando le spiagge per settori; in basso i km espressi in % rispetto al settore. 67
- Figura 5.14** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di erosione massima raggruppando le spiagge per settori; in basso i km espressi in % rispetto al settore. 68
- Figura 5.15** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di inondazione media raggruppando le spiagge per settori ; in basso i km espressi in % rispetto al settore..... 69
- Figura 5.16** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di inondazione massima raggruppando le spiagge per settori; in basso i km espressi in % rispetto al settore 70
- Figura 5.17** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità media considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in % 72
- Figura 5.18** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'erosione massima considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in % 73
- Figura 5.19** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'inondazione media considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in % 74
- Figura 5.20** In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'inondazione massima considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in % 75
- Figura 5.21** Percentuale di costa corrispondente ad ogni categoria di vulnerabilità all'overtopping 76
- Figura 5.22** Percentuale di costa corrispondente ad ogni categoria di vulnerabilità all'overtopping della spiaggia emersa a sinistra e dell'entroterra a destra. 77

Figura 5.23 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'overlapping dell'entroterra considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %	78
Figura 5.24 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'overlapping della spiaggia considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %	79
Figura 5.25 Km di spiaggia appartenenti divisi per appartenenza alla Provincia amministrativa ...	80
Figura 5.26 Indice di erosione media per Province; % km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità rispetto al totale delle Province.....	83
Figura 5.27 Indice di erosione massimo per Province; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità; in basso i km espressi in % rispetto alla Provincia.	84
Figura 5.28 Indice di inondazione media per Province; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità; in basso i km espressi in % rispetto alla Provincia	86
Figura 5.29 Indice di inondazione massima per Province; a in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto alla Provincia.	87
Figura 5.30 Chilometri di spiaggia appartenenti alle varie unità fisiografiche.....	88
Figura 5.31 Indice di Erosione Media per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.	90
Figura 5.32 Indice di Erosione Massima per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.....	91
Figura 5.33 Indice di Inondazione Media per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.	92
Figura 5.34 Indice di Inondazione Massima per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.	93
Figura 5.35 Indice di Overlapping dell'entroterra per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.....	94
Figura 5.36 Indice di Overlapping della spiaggia per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.....	95
Figura 5.37 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'erosione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero.....	97
Figura 5.38 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'inondazione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero...	98
Figura 5.39 Sovrapposizione dei punti critici di erosione ed inondazione riscontrati in bibliografia con i risultati degli indici di vulnerabilità massima	99

Figura A2-1 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 01- id 18).	135
Figura A2-2 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 19- id 30).	136
Figura A2-3 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 33- id 44).	137
Figura A2-4 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 45- id 59).	138
Figura A2-5 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 60- id 71).	139
Figura A2-6 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 72- id 78).	140
Figura A2-7 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 79- id 87).	141
Figura A2-8 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 88- id 109).	142
Figura A2-9 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 110- id 122).	143
Figura A2-10 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione(id 122- id 129)	144
Figura A3-1 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 01- id 18).	145
Figura A3-2 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 19- id 30).	146
Figura A3-3 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 33- id 44).	147
Figura A3-4 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 45- id 59).	148
Figura A3-5 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 60- id 71).	149
Figura A3-6 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 72- id 78).	150
Figura A3-7 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 79- id 87).	151

Figura A3-8 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 88- id 109).	152
Figura A3-9 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 110- id 122).	153
Figura A3-10 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 122- id 129).	154

Lista Tabelle	pag.
Tabella 3.1 Settori ondosi con le rispettive direzioni di travessia considerate	1
Tabella 3.2 Esempio della zonazione effettuata a partire dalle spiagge come unità minime di analisi.....	19
Tabella 3.3 Parametri utilizzati per caratterizzare le spiagge in funzione dei processi analizzati e delle fonti utilizzate.....	19
Tabella 4.1. Valori limite di Hs (quantile 0.99) utilizzati nell'identificazione delle tempeste considerando un valore per ogni settore ondoso.	33
Tabella 4.2. Valori limite di Hs (quantile 0.99) utilizzati nell'identificazione delle tempeste considerando un valore per i settori orientali ed uno per i settori occidentali.	33
Tabella 4.3 Esempio di classificazione utilizzata per gli eventi estremi delle coste Atlantiche nordorientali (Scala di Dolan-Davis).	34
Tabella 4.4 Caratteristiche dei profili utilizzati per descrivere le spiagge della Sardegna	38
Tabella 4.5 Limiti massimi e minimi scelti per le variabili intermedie che definiscono gli indici di vulnerabilità	46
Tabella 5.1 Risultati che mostrano la classificazione delle tempeste della Sardegna in 5 gruppi secondo il metodo del legame medio	53
Tabella 5.2 Caratterizzazione dei settori ondosi in funzione del numero e del tipo di tempeste classificate	57
Tabella 5.3 Diversi tipi di risposta della costa utilizzati per calcolare gli indicatori di vulnerabilità	62
Tabella 5.4 Caratteristiche medie delle spiagge suddivise per Province	81
Tabella 5.5 Km di costa appartenenti alle categorie di vulnerabilità raggruppati per Province considerando l'indice di erosione media (in alto) e massima (in basso)	82
Tabella 5.6 Km di costa appartenenti alle categorie di vulnerabilità raggruppati per Province considerando l'indice di inondazione media (in alto) e massima (in basso)	85
Tabella 5.7 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'erosione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero.....	96
Tabella 5.8 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'inondazione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero.....	97
Tabella A1-1 Spiagge catalogate in questo lavoro.....	131-133
Tabella A1-2 Limiti delle Unità Fisiografiche della Sardegna (Resmar, 2013)	134

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Motivazioni

Le aree costiere sono sempre risultate zone di alto interesse per gli insediamenti umani grazie ai servizi sociali, economici ed ecologici che forniscono. In accordo con Small & Nicholls (2003) il 23% della popolazione mondiale (1.2 miliardi di persone) viveva nel 1990 ad una distanza di meno di 100 km dalla linea di costa e si è incrementata fino al 42% (2.5 miliardi di persone) nel 2003 (Martinez et al., 2007). Stime più recenti indicano che questa tendenza sta continuando fino ai giorni nostri con un 44% della popolazione mondiale che vive a meno di 150 Km dalla linea di costa secondo il report della Nazioni Unite (UN) e dell'Atlante degli Oceani (Atlas of the Oceans, 2010). Questo comportamento globale è confermato anche in Italia ed in Sardegna. La densità di popolazione delle zone costiere in Italia rappresenta il doppio della media nazionale con il 30% della popolazione che vive in insediamenti presenti nella zona costiera. Le coste della Sardegna sono caratterizzate da un basso grado di densità di popolazione e da un'alta densità di complessi turistici, infatti il turismo rappresenta la principale fonte di ingressi per l'isola con più di 2700 imprese dedicate all'industria terziaria (www.istat.it).

Le aree costiere sono spesso soggette a diversi pericoli naturali che possono produrre importanti danni economici ed ambientali (Perez-Maqueo et al., 2007). A causa dell'elevata densità di popolazione queste aree concentrano un ampio rango di attività e di infrastrutture che si sono incrementate progressivamente nel corso degli ultimi decenni lungo la zona costiera. Secondo Jimenez et al. (2012) i danni causati dall'impatto delle tempeste lungo la costa catalana sono aumentati con un tasso approssimato di un 40% ogni 10 anni nel corso degli ultimi 50 anni. Ciononostante tale studio indica che i pericoli indotti dalle tempeste non mostrano una

particolare tendenza durante lo stesso periodo ed identifica altri fattori come lo sviluppo costiero e l'arretramento generalizzato della costa quale causa principale di questo incremento.

Le tempeste sono uno dei pericoli costieri più frequenti ed importanti, ed è importante sviluppare ed utilizzare metodi di analisi per valutare la vulnerabilità dei sistemi costieri all'impatto di questo tipo di fenomeni. Questi strumenti saranno di cruciale importanza per lo sviluppo dei piani di gestione costiera poiché permettono di individuare usi e risorse costiere potenzialmente vulnerabili e forniscono ai gestori costieri importanti informazioni sulle potenziali conseguenze dell'impatto delle tempeste in modo da poter applicare strategie di mitigazione e/o adattamento (Godschalk et al., 1989).



Figura 1.1 Immagini di alcune località della Sardegna colpite da eventi estremi 1) e 2) Poetto, 3) Torre Grande, 4) S. Giovanni di Sinis.

Nel nostro lavoro la vulnerabilità è intesa come il potenziale di un sistema costiero ad essere danneggiato da un evento estremo. Durante gli ultimi anni l'importanza di includere i pericoli e le valutazioni di vulnerabilità all'interno delle politiche di gestione della zona costiera si è convertito in una preoccupazione sempre più crescente infatti l'uso del concetto di vulnerabilità costiera e proposte di metodologie per la propria valutazione sono stati sempre più frequenti

negli ultimi decenni. Un esempio è rappresentato dal recente Protocollo per la Gestione Integrata della Zona Costiera per il Mar Mediterraneo (PAR/RAC 2007) che raccomanda specificatamente ai paesi partecipanti di intraprendere valutazioni di rischio e di vulnerabilità per meglio comprendere gli effetti dei disastri naturali che agiscono nella zona costiera. In particolare il termine è stato spesso associato alla valutazione di situazioni di disastri, specialmente dovuto al fatto che questo tipo di fenomeni sta aumentando di intensità con conseguenze ed implicazioni economiche, sociali e naturali significative (IPCC 2007).

1.2 Obiettivi e struttura della tesi

Il principale obiettivo di questo lavoro è valutare la vulnerabilità costiera indotta dagli eventi meteo marini estremi sulle coste della Sardegna attraverso un approccio probabilistico. La metodologia, che si basa sullo schema di Bosom & Jiménez (2011), ci permette di quantificare l'impatto delle tempeste in funzione dei fenomeni d'inondazione e di erosione che si producono sulle spiagge della Sardegna quando sono colpite da questo tipo di eventi. In questo lavoro si considera la funzione di protezione della spiaggia, intesa come ultima difesa del territorio all'impatto delle tempeste di mare che possono danneggiare le strutture presenti nella zona retrostante la fascia costiera. Oltre a provocare danni e problematiche nelle aree colpite, i processi che si innescano sono differenti tra loro, pertanto il gestore dovrebbe conoscere quale di questi è dominante rispetto all'altro per una determinata tempesta associata alla sua probabilità di accadimento. Di conseguenza la metodologia utilizzata permette di valutare la vulnerabilità costiera all'**erosione** ed all'**inondazione** in maniera separata per ognuno dei due processi, considerati indipendenti l'uno dall'altro.

L'obiettivo generale del metodo, non è effettuare un'analisi dettagliata su tutte le spiagge della Sardegna, ma quello di fornire un'analisi precisa, su scala regionale, per identificare quelle zone più sensibili all'erosione ed all'inondazione aiutando quindi le Amministrazioni che si occupano della gestione costiera. Infatti una volta identificate le zone critiche si possono concentrare gli sforzi maggiormente su di esse analizzandole molto più in dettaglio con altri tipi di modelli che lavorano ad una scala molto più precisa e dettagliata.

Il documento si divide in 6 capitoli principali e 3 allegati con i seguenti contenuti:

- Capitolo 1: Introduzione e presentazione degli obiettivi dello studio.
- Capitolo 2: Definizione della vulnerabilità costiera, visione generale dei lavori precedenti sulla vulnerabilità costiera; schema della metodologia proposta
- Capitolo 3: Descrive le principali caratteristiche dell'area di studio, le coste della Sardegna e le fonti dati utilizzate.
- Capitolo 4: Si incentra nella descrizione dettagliata della metodologia sviluppata per valutare la vulnerabilità costiera all'erosione e all'inondazione indotta dalle tempeste di mare seguendo i tre passi principali che caratterizzano il metodo (*Caratterizzazione eventi estremi, parametrizzazione della pericolosità e valutazione della vulnerabilità*).
- Capitolo 5: Si presentano i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo alla costa sarda: classificazione delle tempeste di mare in funzione del contenuto energetico, la caratterizzazione della risposta costiera ed i risultati finali di vulnerabilità.
- Capitolo 6: Discussioni e conclusioni principali di questo studio; implicazioni nella gestione costiera. Invito alla continuazione degli studi sul tema considerato
- Bibliografia Presenta una lista delle referenze citate in questo lavoro
- Allegato 1 Contiene la lista completa delle spiagge con le unità corrispondenti secondo la scala dell'analisi (Celle litorali, Comuni, Province, Unità Fisiografiche).
- Allegato 2 :Contiene una serie di mappe della vulnerabilità indotta dalle tempeste, alla scala della spiaggia considerando i contributi dei vari processi e degli indici medi utilizzati.
- Allegato 3 Contiene una serie di mappe della vulnerabilità indotta dalle tempeste, alla scala della spiaggia considerando i contributi dei vari processi e degli indici massimi utilizzati, che considerano le condizioni peggiori.

CAPITOLO 2

Vulnerabilità costiera

2.1 Definizione di Vulnerabilità costiera

La nozione di vulnerabilità è emersa come principio fondamentale per la comprensione e la gestione dell'ambiente costiero. Le diverse comunità accademiche hanno sviluppato differenti concetti sulla vulnerabilità dandone discordanti definizioni. Infatti gli stessi risultano imprecisi quando si deve valutare la vulnerabilità, perché trattasi di concetti molto generali che, o non sono compiutamente definiti, o non spiegano le relazioni funzionali tra le variabili che entrano in gioco (Hinkel e Klein, 2007). Tali defizioni hanno dato luogo a vari tipi di approcci metodologici e queste metodologie, sempre piú complesse, sono passate dalla focalizzazione sull'impatto alla capacità di adattamento che possiede il sistema (Füssel e Klein, 2006).

Molti studi di vulnerabilità nella zona costiera si sono basati sui tradizionali punti di vista scientifici fisici o sociali, sulla natura del cambio e sul valore delle risorse (Mc Fadden e Green, 2007). In ingegneria il concetto di Vulnerabilità è maggiormente vincolato ad oggetti fisici (case, veicoli, strutture, etc) per cui, in termini quantitativi la vulnerabilità si associa con il grado di danno strutturale causato da un determinato processo (de Bruijn et al., 2011).

Ciononostante per gli ecologisti la vulnerabilità è messa in relazione con la biodiversità (Holling, 1973). Il concetto di resilienza è entrato a far parte dell'analisi di vulnerabilità provenendo da quest'area e studia la capacità di un sistema di recuperarsi rispetto ad uno stato di riferimento dopo che è passata un perturbazione e la capacità di mantenere certe strutture e funzioni nonostante le perturbazioni (Turner et al., 2003).

Da un punto di vista geomorfologico, un'analisi di vulnerabilità è strettamente relazionata a periodi di calma, che riflettono il tempo necessario perché un sistema costiero si adatti morfologicamente ad un cambio e raggiunga una forma di equilibrio. Esaminare il rapporto tra i tempi di calma ed i periodi di ritorno degli eventi perturbanti permette di determinare il grado in cui un sistema ha bisogno di un intervento prima che possa presentarsi un'altra perdita di equilibrio (Pethick e Crooks, 2000).

Nella letteratura relativa al cambio climatico, esistono più modi per definire la vulnerabilità.

Nel terzo rapporto di valutazione (TAR) dell'IPCC (Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico) la vulnerabilità può essere compresa in funzione del danno potenziale causato da un evento climatico. In questo caso il termine vulnerabilità si definisce come “il grado in cui un sistema è suscettibile o incapace ad affrontare gli effetti negativi del cambio climatico, includendo la variabilità climatica. La vulnerabilità è quindi una funzione del carattere, dell'intensità e del tasso di variazione climatica a cui è sottoposto un sistema insieme alla propria sensibilità ed alla sua capacità di adattamento (IPCC, 2001, p995).

Secondo Brooks, (2003), la definizione di vulnerabilità è data dalla combinazione del rischio, dell'esposizione e della sensibilità e può essere denominata “ vulnerabilità biofisica”. Questo termine indica sia la componente fisica associata alla natura del pericolo, sia i suoi impatti fisici di prim'ordine, come la componente biologica o sociale associata alle proprietà del sistema danneggiato, che agisce amplificando o riducendo il danno che risulta da questi impatti.

Da un altro punto di vista il termine vulnerabilità si considera a volte come punto di partenza per le analisi dell'impatto. Infatti, così come affermano Kelly e Adger (2000) il termine vulnerabilità, dal latino “vulnerabilis”, indicava per i romani lo stato di un soldato ferito in battaglia, ossia in condizione di rischio in caso di eventuali nuovi attacchi. In questo senso classico del termine, la vulnerabilità si definisce principalmente dal danno anteriore (la ferita già esistente) e non dal danno futuro (qualsiasi altro attacco). In analogia quindi la vulnerabilità ad un pericolo naturale è determinata principalmente da una situazione già esistente nel sistema prima di affrontare l'evento, ossia per la sua capacità di rispondere a questo pericolo.

La vulnerabilità dipende dal tipo di pericolo a cui il sistema analizzato si trova esposto, dato che certe proprietà del sistema lo faranno più esposto ad alcuni pericoli rispetto ad altri. Pertanto la

vulnerabilità deve essere sempre vincolata ad un pericolo specifico o ad una serie di pericoli, in modo che tali concetto rimangano inseparabili (Kelly e Adger, 2000).

In questa tesi il termine vulnerabilità si valuta da un punto di vista geomorfologico, includendo quindi solo i danni fisici che soffre un sistema costiero quando è colpito da un pericolo. In questa definizione non si inglobano gli impatti a livello sociale, culturale, ecologico o economico, prodotti sulla costa. In questo modo, dato che il punto finale dell'analisi è il valore/risultato integrato, la vulnerabilità non si identifica con la suscettibilità del sistema a determinati impatti, bensì consiste nel risultato combinato dell'intensità dell'agente induttore (pericolo) la sensibilità del sito e la capacità di risposta di quest'ultimo.

2.2 Stato dell'arte: antecedenti sulla vulnerabilità costiera

Durante gli ultimi decenni il concetto di vulnerabilità costiera è emerso come tema importante nella comprensione e nella gestione dei rischi costieri. Tale concetto è stato associato principalmente a situazioni di disastri naturali a causa della crescente preoccupazione per l'aumento dell'intensità e quindi delle conseguenze che hanno questi eventi eccezionali (Alcàntara-Araya, 2002; Gaddis et al., 2007). Inoltre molti autori hanno sottolineato l'importanza di sviluppare strumenti che integrino la vulnerabilità negli schemi di gestione costiera (McFadden et al., 2007; McFadden and Green, 2007; Meur-Fèrec et al., 2008).

La complessità dei sistemi costieri ha portato a diverse definizioni del termine di vulnerabilità nella letteratura esistente, specialmente quando vengono considerati gli aspetti socio economici (Green e McFadden, 2007). Spesso questo tipo di definizioni risultano ambigue ed imprecise con complicazioni nell'applicazione per ottenere valutazioni quantitative (Hinkel and Klein, 2007). Cosicché negli ultimi decenni si è data molta importanza alla definizione di schemi concettuali della vulnerabilità (Brooks, 2003; Füssel, 2007). In questo lavoro la vulnerabilità costiera è intesa come il potenziale di un sistema ad essere danneggiato dall'impatto di un evento estremo marino (Gouldby and Samuels, 2005).

Una valutazione esaustiva dei diversi approcci per definire la vulnerabilità da un punto di vista pratico e teorico così come le implicazioni in termini di gestione possono trovarsi in McFadden et al (2007). Questo libro riunisce il contributo di vari esperti di fama internazionale sul tema in

questione ed indica la necessità di sviluppare studi di vulnerabilità a scala regionale che possano risultare utili ai gestori costieri a piccola scala.

Una delle prime applicazioni del concetto di vulnerabilità ai sistemi costieri corrisponde all'analisi degli effetti relativi all'aumento del livello del mare in zone costiere, sviluppato dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CZMS 1992). Tuttavia la mancanza di discussione a riguardo degli aspetti pratici della sua applicazione, come la raccolta dei dati e la successiva implementazione, implica delle difficoltà al momento di applicare il metodo (Klein et al., 1999).

Per quanto riguarda le valutazioni di vulnerabilità più recenti che tengano in conto altri agenti rispetto al cambio climatico riscontriamo un'ampia variabilità di approcci e metodi che dipendendo da diversi aspetti tali come i processi impulsori, la scala dell'analisi ed il tipo di vulnerabilità considerata (Sánchez-Arcilla et al., 1998; Pethick and Crooks, 2000; Boruff et al., 2005; Youssef et al., 2009; Furlan et al., 2011; Alves et al., 2011; Mahendra et al., 2011; Martins et al., 2012; Torresan et al., 2012).

Generalmente l'applicazione delle stime di vulnerabilità a una scala minore è più limitata incentrandosi spesso sui danni e sul rischio più che sulla vulnerabilità. In questi casi l'utilizzo della metodologia sviluppata a scala globale implica che le analisi di vulnerabilità vengono effettuate senza considerare lo stato attuale dei processi costieri a piccola scala (De Pippo et al., 2008).

Dovuto al fatto che spesso la vulnerabilità si relaziona con disastri naturali, gli impatti indotti dalle tempeste di mare risultano essere il processo costiero più analizzato a piccola scala, specialmente in termini di erosione della spiaggia e/o della duna. In questo senso, negli ultimi decenni, si sono sviluppati molti approcci concettuali e metodologici per caratterizzare la vulnerabilità indotta dalle tempeste di mare a diverse scale spaziali. Sallenger (2000) definì una scala per l'impatto degli eventi estremi che categorizza le tempeste tropicali ed extra tropicali nelle isole barriere naturali all'interno di quattro diversi regimi. Questa classificazione si ottiene attraverso la comparazione dei livelli di acqua con la morfologia della duna. Considerando questo approccio Stockdon et al. (2009) svilupparono un algoritmo per determinare con esattezza la morfologia della duna a partire da dati LIDAR (Light Detecting And Ranging). Incentrandosi sulle dune costiere Judge et al. (2003) crearono un parametro che fornisce informazioni sulla vulnerabilità alle tempeste basato su una revisione di quelli già esistenti.

Negli Stati Uniti negli la FEMA (Federal Emergency Management Agency) ed il USGS (United Stated Geological Survey) sviluppano il metodo HAZUS (HAZard US), uno strumento per stimare perdite potenziali provocate da uragani fra gli altri disastri naturali a scala nazionale (Vickery et al., 2006b a,b).

In Europa il progetto Micore pretende valutare i rischi derivati dall'erosione e dall'inondazione costiera con l'obiettivo finale di creare un sistema di allerta per prevenire disastri e preservare i beni umani e naturali prossimi al mare. Questo approccio non è solo a scala Europea, infatti le autorità della costa occidentale degli Stati Uniti stanno sviluppando già da tempo sistemi di allerta paragonabili a quello utilizzato in Micore, che si basano su modello regionali e locali per valutare il moto ondoso e la morfologia (Barnard et al., 2009)

Nel Mar Mediterraneo si deve distaccare la metodologia sviluppata da Mendoza (2009) e successivamente implementata da Bosom (2011) che consiste di un paio di indicatori che valutano separatamente la vulnerabilità all'inondazione e all'erosione per diversi tipi di tempeste, considerando variabili fisiche. I risultati ottenuti attraverso questi indicatori parziali si integrano per ottenere le categorie finali dell'indice di vulnerabilità indotto dalle tempeste. Questa metodologia fu applicata a scala regionale per valutare la vulnerabilità della costa della Catalogna, fatto che ha richiesto una classificazione previa delle tempeste nell'area studiata. Il nostro lavoro farà riferimento a questa metodologia che verrà applicata alle coste della Sardegna adattandola alle caratteristiche specifiche dell'isola ed aggiungendo un'analisi di **overtopping** (flusso d'acqua che tracima dalla duna o dalla berma della spiaggia che è considerata come un'opera di protezione costiera).

2.3 Schema metodologico applicato

Lo schema metodologico utilizzato in questo studio permette di valutare la vulnerabilità costiera alle tempeste di mare in funzione dei processi di erosione e di inondazione indotti e di identificare i punti più vulnerabili di una regione. Da questo punto di vista è necessario segnalare che il proposito di questo studio non è descrivere in dettaglio il comportamento di ogni spiaggia di fronte all'impatto delle tempeste, bensì quello di ottenere una stima dell'ordine di grandezza di questi impatti e di valutarne la variabilità spaziale a scala regionale.

Il concetto di vulnerabilità costiera è strettamente legato a quello del rischio, infatti, a differenza di quanto si è soliti intendere nel linguaggio comune, il "rischio" non definisce la semplice probabilità di un evento dannoso per l'ambiente e/o le attività umane, bensì rappresenta un parametro composto definito dalla relazione:

$$\mathbf{R} = \mathbf{P} * \mathbf{Vu} * \mathbf{Va}$$

Si tratta dell'espressione di quantificazione del rischio proposta dall'Unesco (1972) e ripresa da Fournier d'Albe nel testo "Objectives of Volcanic Monitoring and Prediction" (1979). Secondo questa definizione il rischio **R** di un evento in un dato sito è dato dalla relazione fra la pericolosità **P**, intesa come la probabilità di accadimento ed intensità dell'evento per **Vu** intesa come la vulnerabilità dei beni relativamente all'evento considerato. In parole semplici significa quale probabilità ha una certa zona di essere danneggiata da un certo pericolo. Il termine **Va** si riferisce al valore economico/naturale che possiedono quelle risorse che si vedrebbero danneggiate in relazione ad un determinato evento.

Quindi dalle definizioni delle sue componenti risulta che il rischio può intendersi come "danno atteso" in termini di danni socio-economici provocati dall'evento considerato nel sito in esame. Si tratta di un fattore *estrinseco*, collegato alla distribuzione ed alla densità dei beni che possono essere messi a repentaglio dall'evento stesso. Seguendo questo criterio la definizione di vulnerabilità adottata in questo lavoro si può descrivere come:

$$\mathbf{Vulnerabilità} = \mathbf{Impatto (P)} - \mathbf{Effetto dell'Adattamento (Vu)}$$

Quando si applica al sistema costiero l'impatto è prodotto dai processi litorali naturali che agiscono sulla costa (**P**: *erosione* ed *inondazione*) mentre la capacità di adattamento (*resilienza costiera*) è determinata dalle proprietà/caratteristiche del sistema (**Vu**: risposta della costa, geomorfologia).

Un diagramma semplificato dello schema metodologico proposto si mostra nella figura 2.1. Considerando che il principale obiettivo di questo lavoro è determinare la distribuzione spaziale dei processi indotti dalle tempeste, si è considerato anche il processo dell'overtopping valutando quei casi in cui la spiaggia non compie la sua funzione di protezione e viene superata da uno strato di acqua che possiede una certa velocità; nel nostro caso si valuterà il flusso che scorre verso terra.

Come risultato finale abbiamo quindi considerato in questo studio un totale di tre processi diversi:

- Erosione indotta da tempeste (volume eroso ed arretramento della linea di riva).
- Inondazione indotta da tempeste (inteso come elevazione verticale del livello dell'acqua).
- Overtopping potenziali indotti dalle tempeste (espresso come flusso di volume di acqua che sorpassa la cresta della spiaggia).

L'intensità dell'inondazione e dell'erosione indotte dalle tempeste si usa per caratterizzare l'impatto delle tempeste, mentre l'abilità del sistema costiero a resistere a questi impatti si definisce dalla geomorfologia della spiaggia (ampiezza trasversale ed altezza verticale rispettivamente per l'erosione e l'inondazione). Come risultato possiamo valutare la vulnerabilità alle tempeste per la configurazione attuale delle spiagge della Sardegna e prevedere possibili configurazioni future. È da sottolineare che il contributo di questi agenti può anche essere valutato separatamente, cosa che permette identificare la rilevanza di ogni processo rispetto agli altri. Il metodo proposto si sviluppa in 5 fasi principali:

- 1) *Definizione degli eventi estremi (tempeste di mare)*
- 2) *Valutazione della pericolosità costiera*
- 3) *Risposta della spiaggia*
- 4) *Valutazione della vulnerabilità all'erosione e all'inondazione*
- 5) *Valutazione di fenomeni di overtopping*

Prima di tutto devono essere definite e stimate le variabili che definiscono le condizioni dell'agente forzante marino. In questo senso è stato utilizzato il moto ondoso per definire le tempeste di mare utilizzate come base per definire l'intensità di ogni processo indotto che viene considerato pericolosità per potenziali danni. Successivamente l'intensità dei processi indotti dalle tempeste si confronta con le caratteristiche geomorfologiche che definiscono la propria capacità di adattamento della stessa. Come risultato si ottengono due indicatori di vulnerabilità separati, uno per l'erosione ed uno per l'inondazione. Questi indicatori si adattano ad una funzione di vulnerabilità che va da zero a uno e che definisce 5 categorie differenti. I limiti delle funzioni descrivono la situazione di vulnerabilità minima (0) e massima (1) per ognuno dei processi indotti dalle tempeste, che possono variare in funzione del grado di sicurezza dell'analisi.

Uno degli aspetti principali di questa metodologia sta nel suo approccio probabilistico. Qui la vulnerabilità non si valuta per una tempesta determinata, bensì per una certa probabilità di accadimento di un determinato evento. In questo modo possono essere confrontate le differenze di vulnerabilità sotto le stesse condizioni di moto ondoso. Un altro aspetto rilevante di questo metodo è il ruolo dei gestori costieri nella definizione del livello di sicurezza dell'analisi in funzione del periodo di ritorno da considerare. Per prendere questa decisione definendo il grado di sicurezza dell'analisi in forma obiettiva bisogna considerare le caratteristiche dell'entroterra (hinterland) in termini di importanza del potenziale danno economico che si causa alle risorse costiere.

Come risultato dell'applicazione di questo metodo otteniamo due indici di vulnerabilità, uno relativo all'erosione ed uno all'inondazione, valutati separatamente. Il fatto che questi due pericoli siano valutati in forma indipendente permette di identificare quale dei processi sia il più rilevante. I risultati ottenuti si rappresentano mediante piattaforma GIS, in modo tale che la vulnerabilità può essere confrontata spazialmente e sovrapposta a qualsiasi altra fonte di informazione territoriale rilevante.

Per concludere con la descrizione generale della metodologia proposta dobbiamo menzionare la sua versatilità che ne permette l'applicazione in diverse regioni costiere. Infatti in precedenza è stato applicata alla costa catalana (Bosom et al 2010) ed in questo studio lo abbiamo utilizzato sulla costa sarda aggiungendo il fenomeno dell'overtopping. Pertanto lo stesso procedimento potrebbe implementarsi ad altre zone costiere del Mar Mediterraneo considerando altri processi/pericoli e soprattutto in funzione delle caratteristiche specifiche dell'area di studio.

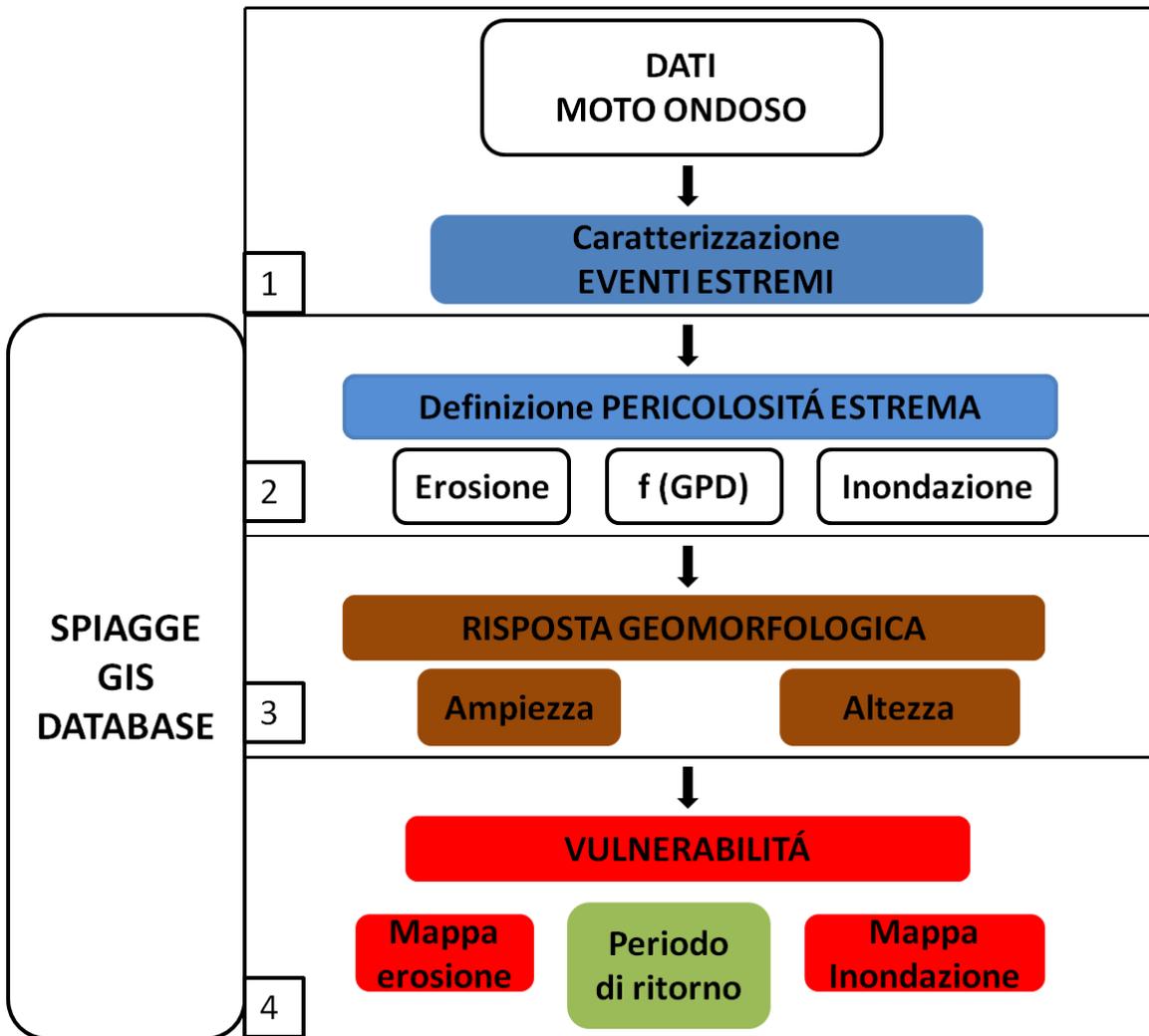


Figura 2.1 Schema metodologico per valutare la vulnerabilità costiera delle spiagge della Sardegna alle tempeste di mare

CAPITOLO 3

Area di studio e dati disponibili

3.1 Area di studio

La Sardegna è situata al centro del bacino del Mar Mediterraneo ed è caratterizzata principalmente da coste alte e rocciose che comprendono una gran geo-diversità di tipi costieri: lunghe spiagge, "pocket beaches", baie, scogliere, promontori ed anche zone artificiali dovute agli insediamenti umani come porti, marine o infrastrutture costiere. Lungo la costa sono presenti 78 municipalità che comprendono circa il 20 % della superficie della Sardegna ed ospitano circa il 40% della popolazione totale regionale (<http://www.istat.it/>).

La lunghezza del perimetro della linea di costa della Sardegna, secondo lo studio azione coste (ResMAR 2013) è di circa 2200 km dove le spiagge coprono una lunghezza di 582 km (26% della costa) In base ai dati disponibili e considerando che in questo lavoro si sono valutate spiagge con lunghezza maggiore di 500 m come unità su cui effettuare le analisi di vulnerabilità, la lunghezza totale del perimetro sedimentario stimato per le spiagge della Sardegna è risultata essere di circa 247 km (circa il 13% del perimetro costiero). D'ora in avanti, ogni volta che ci si riferirà alla lunghezza totale della costa sedimentaria, si utilizzerà questo valore.

3.2 Dati meteo-marini

Uno degli aspetti da considerare nell'applicare la metodologia proposta è la necessità di una serie temporale di dati sufficientemente lunga da ottenere distribuzioni estreme dei parametri considerati (Hs, Tp, Dir) affidabili. Per questo motivo le proprietà delle tempeste di mare lungo le coste della Sardegna sono state caratterizzate utilizzando la miglior fonte di informazione disponibile che, non possedendo serie di dati strumentali complete, consiste nel modello

numerico di moto ondoso Era 40 sviluppato dal Centro Europeo di Calcolo per le Previsioni Meteorologiche (<http://www.ecmwf.int/>).

Sono state usate delle serie storiche temporali dell'altezza d'onda significativa, Hs, periodo di picco Tp, e Direzione del moto ondoso, simulati ogni sei ore dal 1979 al 2012 (33anni). Attraverso questi dati verranno definite le tempeste di mare e la loro probabilità di accadimento attraverso un'analisi estrema . Avendo a che fare con un'isola abbiamo ritenuto opportuno considerare 4 nodi del modello che si riferiscono ai quattro bordi costieri principali della costa (sud-est; est, nord ovest, ovest) così come mostrato nella figura 3.2. Per l'analisi si sono considerate come settore di travessia solo i dati relativi alle direzioni che sono state ritenute influenti per generare un impatto sulla costa in funzione della propria orientazione che vengono così riassunte nella tabella 3.1:

Id	Settore	Direzione di travessia
1	Sud-Est	45°-225°
2	Est	0°-180°
3	Nord-Ovest	270°-90°
4	Ovest	90°-360°

Tabella 3.1 Settori ondosi con le rispettive direzioni di travessia considerate

Nella figura 3.1 si mostra la distribuzione delle altezze d'onde caratteristiche di ogni settore misurate nei 33 anni in funzione della direzioni di provenienza del moto ondoso. Nel grafico per ciascuna direzione i bracci sono colorati con bande corrispondenti alle classi di altezza dell'onda; la lunghezza dei bracci varia proporzionalmente con la frequenza di Hs in ciascuna direzione.

Si puo notare come il clima ondoso dei settori occidentali sia caratterizzato unicamente da direzioni provenienti da nord-ovest (maestrale) mentre il clima ondoso dei settori occidentali presenta direzioni Sud Est e Sud Ovest per il settore Sud e direzione Nord Est per il settore Est.

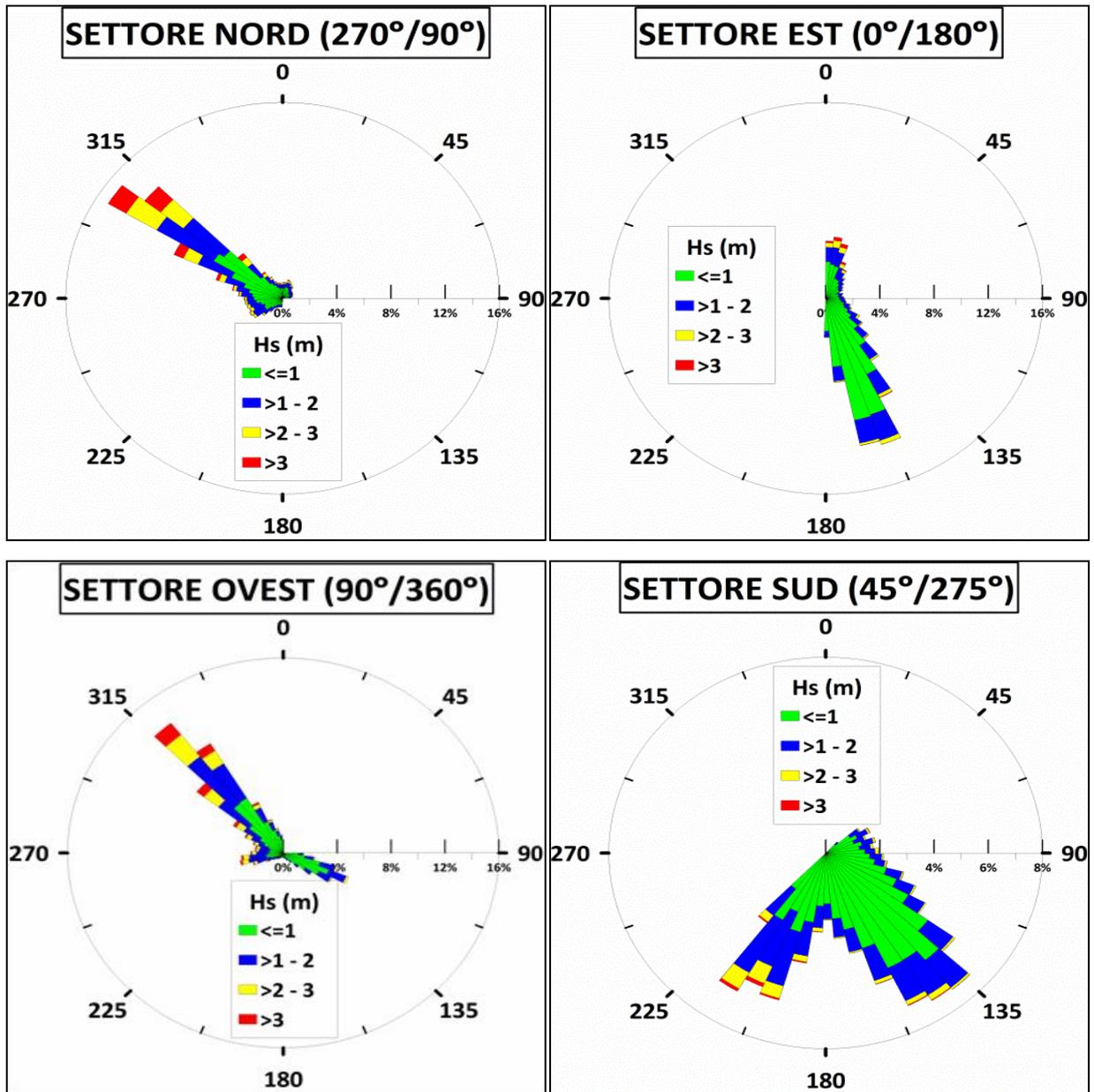


Figura 3.1 Variazione dell'altezza H_s del moto ondoso in funzione della direzione di travessia scelta per i 4 Settori ondosi considerati in questo lavoro (dati ondosi dal 1979 al 2012).

3.2.1 Calibrazione dati reali con dati simulati

È importante sottolineare l'importanza della calibrazione dei dati di moto ondoso che provengono da un modello numerico con dati reali che provengono da ondometri che riproducano le condizioni locali dell'area di studio. Anche se in generale i dati simulati tendono a sottostimare i dati reali misurati dall'ondametro in questo caso, la boa di Alghero (Figura 3.2), confrontata con il nodo del modello ERA-Interim presenta valori maggiori di quelli del modello, dimostrando una correlazione molto significativa (coefficiente di correlazione 0.948) e che il

risultati delle Hs del modello sono più bassi di un 20% rispetto delle altezze reali, rilevate nello stesso intervallo temporale (Caiaffa et al., 2011).

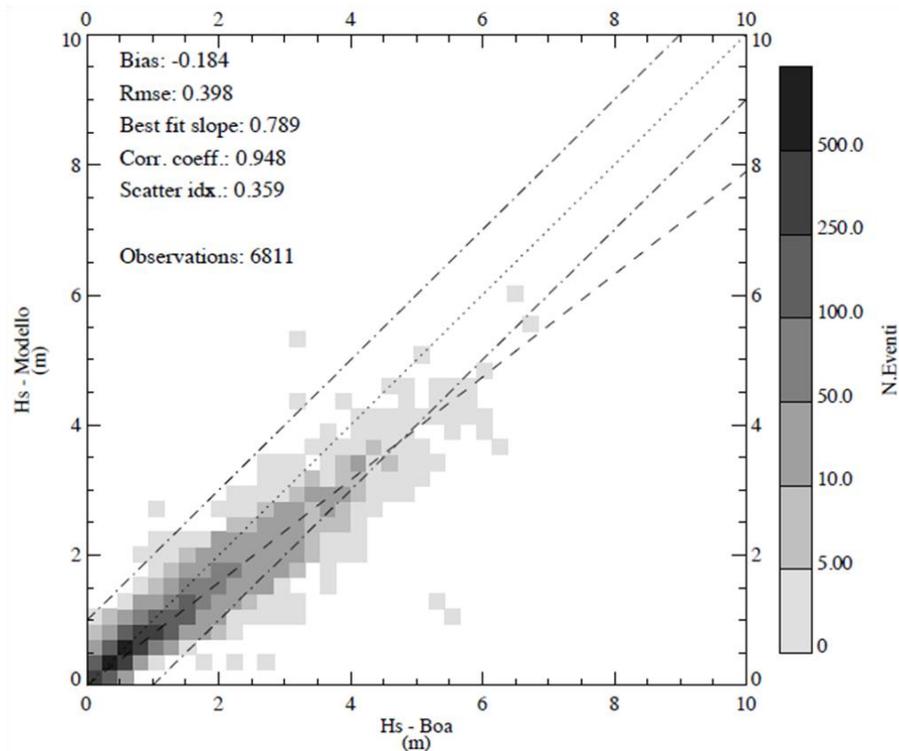


Figura 3.2 Correlazione tra le altezze d’onda misurate dalla boa di Alghero ed il corrispondente nodo (41°-10°) del modello numerico ECMWF usato nel nostro studio (da Caiaffa et al., 2011).

3.3 Dati geomorfologici delle spiagge

Per caratterizzare la risposta geomorfologica della costa è stata effettuata una zonazione del territorio costiero da un punto di vista morfodinamico. Ad una scala minore si è considerata la “spiaggia” come unità minima di analisi dal punto di vista della gestione. Ad una scala maggiore la costa è stata suddivisa in celle litorali in accordo con l’Atlante delle spiagge della Sardegna (Di Gregorio et al., 1998). Come livello di zonazione a carattere regionale si prendono in considerazione i limiti delle Unità Fisiografiche identificate del Piano Azione Coste, che si intendono come tratti costieri con caratteristiche idrodinamiche e geomorfologiche omogenee. Infine si integrano i risultati con la corrente suddivisione amministrativa dove si identificano amministrazioni provinciali e comunali che dovrebbero essere responsabili della gestione delle risorse costiere. È importante sottolineare la duttilità e flessibilità del metodo dovuto al fatto che le unità minime dell’analisi, le spiagge possono essere considerate singolarmente o possono essere raggruppati i risultati in funzione della scala di gestione che si desidera analizzare (Cella litorale, Comune, Provincia, Unità Fisiografica).

Attraverso la foto interpretazione delle ortofoto più recenti a disposizione (2008, Geoportale Regione Sardegna) e dall'analisi tridimensionale del modello digitale del terreno (2008, DTM passo 1 metro-fonte Regione Sardegna) è stato possibile creare una base dati in piattaforma Gis delle spiagge della Sardegna con una lunghezza costiera superiore a 500 m. Sono state identificate e digitalizzate 129 *spiagge* appartenenti a 69 *celle litorali* e a 10 unità fisiografiche (Figura 3.3 e 3.4) pertinenti alle amministrazioni di 7 Province e 45 comuni costieri come si può vedere nell'allegato 1 (lista completa delle spiagge con le unità corrispondenti secondo la scala dell'analisi). Mancando i fogli del DTM relativi alla zona Nord orientale (da Capo Comino a Santa Teresa di Gallura) e alla zona costiera di Alghero, le spiagge di queste zone non sono state considerate nell'analisi.

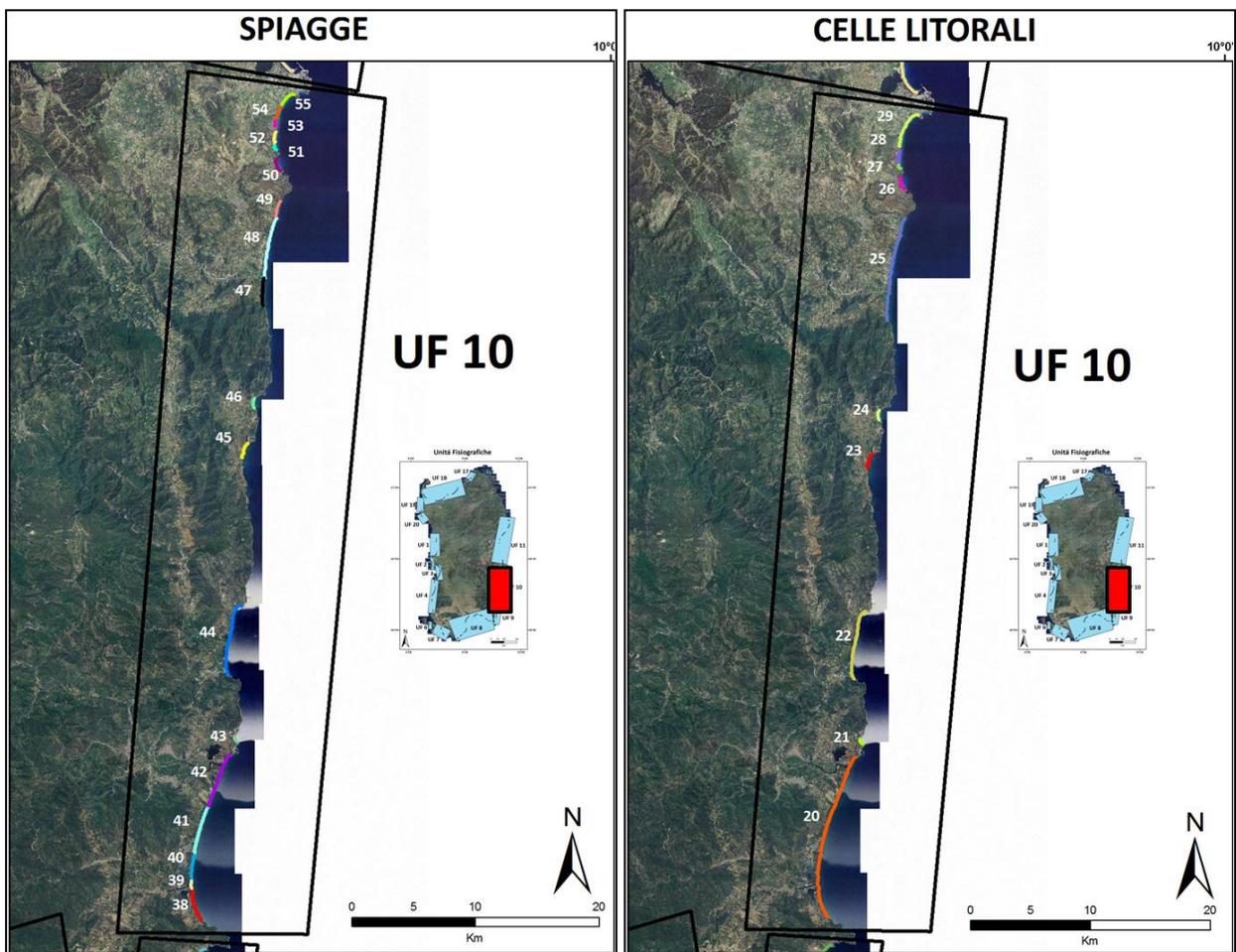


Figura 3.3 Esempio della zonazione costiera effettuata in *spiagge* e *celle litorali* nel caso dell'unità fisiografica 10 (Capo Ferrato- Capo Bellavista).

ID SPIAGGIA	TOPONIMO	ID CELLA	CELLA	SETTORE	UF	COMUNE	PROVINCIA
38	Feraxi	20	Muravera	2	10	MURAVERA	CAGLIARI
39	Colostrai Foce			2	10	MURAVERA	CAGLIARI
40	Hotel Colostrai			2	10	MURAVERA	CAGLIARI
41	Colostrai Mirto e mare			2	10	MURAVERA	CAGLIARI
42	Torre Salinas			2	10	VILLAPUTZU	CAGLIARI
43	Porto Tramatzu	21	P.Tramatzu	2	10	VILAPUTZU	CAGLIARI
44	Cala Murtas	22	Quirra	2	10	VILLAPUTZU	CAGLIARI
45	Foxi Mordegu	23	Melisenda	2	10	TERTENIA	OGLIASTRA
46	Cala Sa Brecca	24	Cala SaBrecca	2	10	TERTENIA	OGLIASTRA
47	Marina di Cardedu	25	Barisardo	2	10	CARDEDU	OGLIASTRA
48	Camping ultima spiaggia			2	10	BARI SARDO	OGLIASTRA
49	Torre Bari			2	10	BARI SARDO	OGLIASTRA
50	Spiaggia di Cea	26	Cea	2	10	TORTOLI'	OGLIASTRA
51	Cala Ginepro	27	Cala Ginepro	2	10	TORTOLI'	OGLIASTRA
52	Foxi Lioni	28	Foxi Lioni	2	10	TORTOLI'	OGLIASTRA
53	Spiaggia del Lido Orri	29	Lido Orri	2	10	TORTOLI'	OGLIASTRA
54	Campeggio Orri			2	10	TORTOLI'	OGLIASTRA
55	Aeroporto Tortoli			2	10	TORTOLI'	OGLIASTRA

Tabella 3.2 Esempio della zonazione effettuata a partire dalle spiagge come unità minime di analisi.

Ogni spiaggia si rappresenta con uno shapefile ad ognuno dei quali sono associati come attributi tutti i parametri calcolati per caratterizzare la risposta del sistema costiero ai processi costieri indotti dalle tempeste di mare. Nella tabella 3.1 si mostrano tali parametri con le rispettive fonti da cui sono stati ottenuti.

Parametro	Processo	Fonte
Lunghezza	Erosione, Inondazione	Ortofoto 2008
Pendenza della battigia	Inondazione	DEM 2008
Pendenza della spiaggia emersa	Inondazione	DEM 2008
Altezza massima della dune	Inondazione	DEM 2008
Altezza del piede della duna	Inondazione	DEM 2008
Ampiezza	Erosione	DEM 2008, Orto 2008
Pendenza spiaggia sommersa	Erosione	Bibliografia
Granulometria	Erosione	Bibliografia

Tabella 3.3 Parametri utilizzati per caratterizzare le spiagge in funzione dei processi analizzati e delle fonti utilizzate.

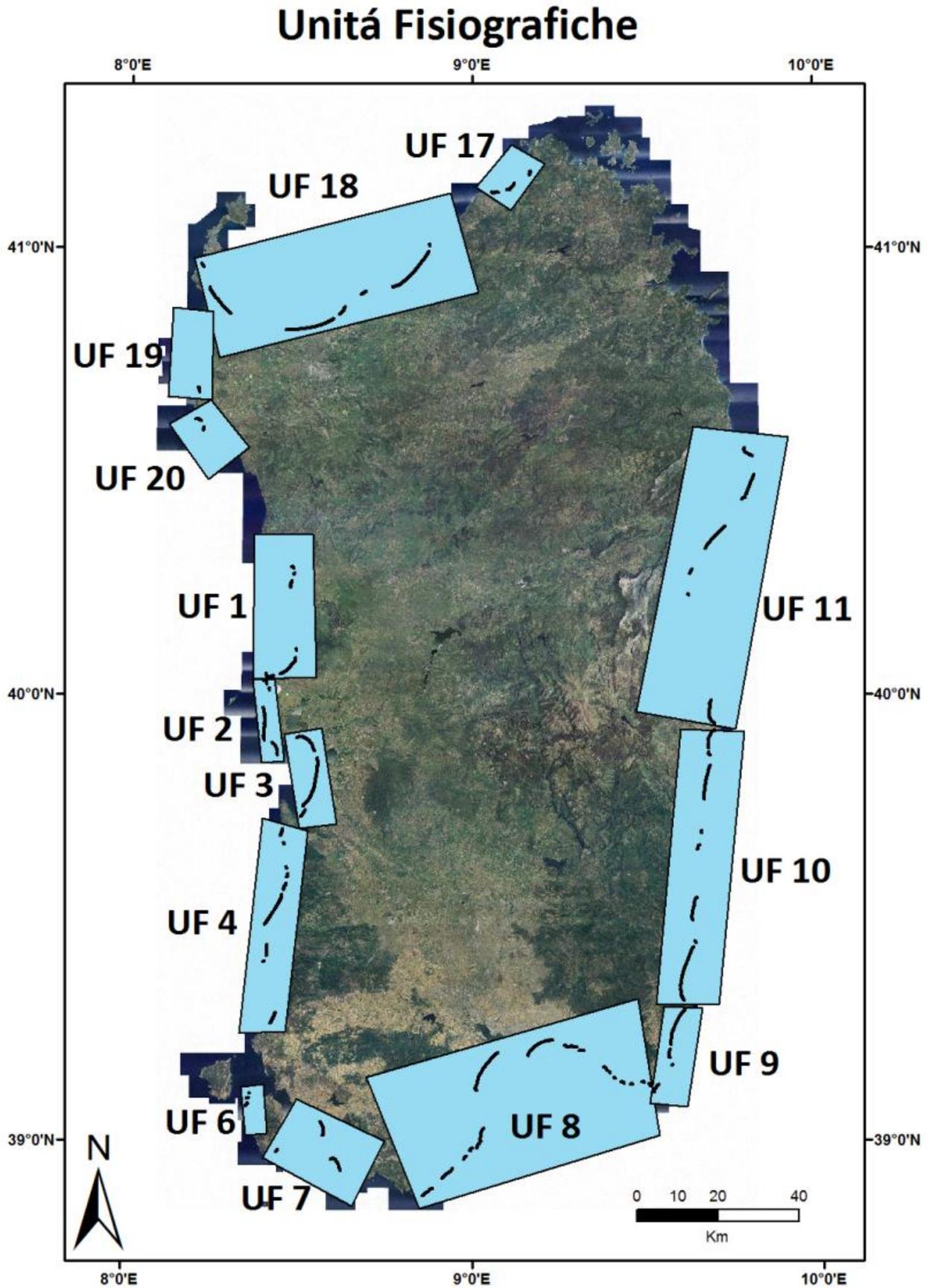


Figura 3.4 Localizzazione delle Unitá fisiografiche della Sardegna con le corrispondenti spiagge digitalizzate in questo lavoro.

La lunghezza (1) è l'estensione longitudinale della linea di riva, intesa come la distanza compresa fra due limiti laterali che delimitano l'unità morfodinamica spiaggia. Questa misura si è ottenuta attraverso fotointerpretazione e servirà per quantificare la longitudine delle categorie della vulnerabilità associata ad ogni spiaggia.

Per caratterizzare la risposta della spiaggia alla risalita dell'onda che ne causa l'allagamento bisogna conoscere la morfologia del sistema recettore, pertanto i parametri che vengono considerati sono:

- Pendenza della battigia (2)
- Pendenza della spiaggia emersa (3)
- Altezza massima della dune (4)
- Altezza del piede della duna (5)

Per ottenere i valori dei parametri (2), (3), (4) e (5) si è effettuata un'analisi tridimensionale in piattaforma GIS del Modello digitale del Terreno (passo 1 m) in cui si sono estrapolati 850 profili topografici di spiaggia emersa uno ogni 300 m di spiaggia. Per ogni profilo sono i calcolati i quattro parametri considerati seguendo il criterio mostrato nella figura 3.5.

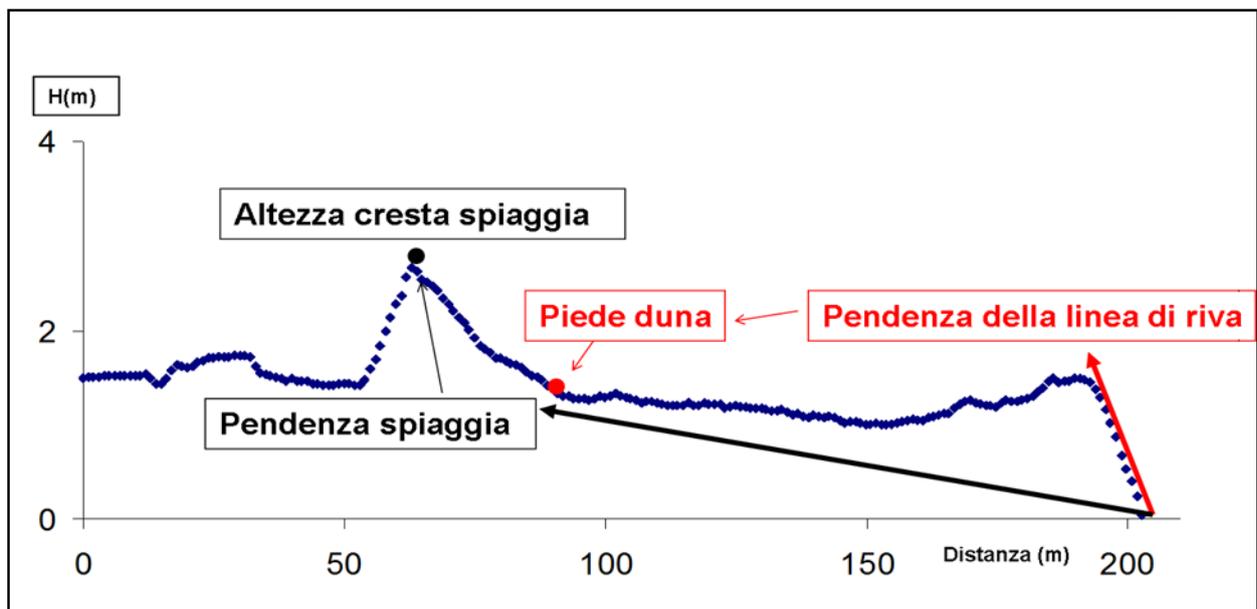


Figura 3.5 Esempio del criterio usato per il calcolo dei parametri ottenuti dai profili topografici provenienti dall'analisi 3D-Gis del DEM

Ad ognuna delle 129 spiagge è stata attribuito il valore risultante dalla media delle misure di tutti quei profili topografici che appartengono alla stessa spiaggia (Figura 3.6). In questo modo è stato possibile calcolare per ogni spiaggia i valori medi ed i valori minimi dei parametri che servono a caratterizzare la risposta delle spiagge agli eventi estremi.

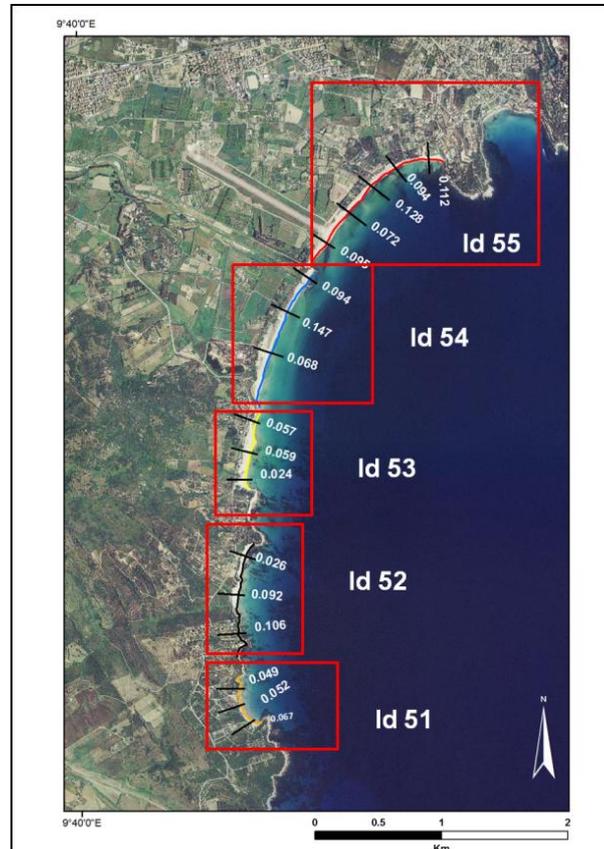


Figura 3.6 Esempio che mostra la distribuzione spaziale dei profili topografici digitalizzati lungo alcune spiagge dell'Ogliastro.

Questi parametri sono stato utilizzati per valutare l'indicatore di vulnerabilità all'inondazione in questi termini (Figura 3.5): la pendenza della linea di riva si usa per calcolare l'inondazione della spiaggia emersa cosiderando il fenomeno dell'overtopping in cui si considera l'altezza del piede piede della duna come punto di massima difesa; la pendenza della spiaggia intera invece viene considerata sia per valutare la vulnerabilità dell'entroterra sia in termini di overtopping che per l'indice d'inondazione usando l'altezza massima della cresta della duna per stimare la risposta della spiaggia in termini di difesa del litorale.

Quando abbiamo a che fare con i fenomeni di erosione entra in gioco la parte sommersa del profilo della spiaggia che chiameremo profilo attivo, ossia quella parte di profilo che va dalla linea di riva fino alla profondità di chiusura. La profondità di chiusura è intesa come quella

profondità in cui i sedimenti non sono soggetti all'azione del moto ondoso. In maniera restrittiva questa misura andrebbe calcolata per ogni spiaggia ma data la scala di lavoro regionale ed i dati a disposizione, questa misura si è stata considerata uguale a -10 metri, che corrisponde alla zona più interna della costa che ingloba la parte più attiva del profilo.

L'ampiezza (6) è intesa come distanza trasversale compresa tra la linea di riva ed il limite che delimita la spiaggia posteriormente. Questa misura, ottenuta attraverso fotointerpretazione, è una variabile importante per quantificare la risposta del sistema all'erosione. Per l'impatto degli eventi estremi infatti si produce spesso un arretramento della linea di costa che sarà più o meno significativo in funzione dell'ampiezza della spiaggia. Inoltre la larghezza della spiaggia ci permette conoscere quale sarà la risorsa di spiaggia disponibile dopo l'impatto di una o varie tempeste sulla costa.

Non avendo a disposizione i mezzi per effettuare una campagna di rilevamento per i parametri (7) ed (8) si è fatto riferimento all'Atlante delle spiagge della Sardegna (Di Gregorio et al., 2006). Considerando la scala di lavoro regionale si sono utilizzati due profili tipo per rappresentare le spiagge della Sardegna, seguendo come casi quelli della classificazione idrodinamica di Wright & Short (1983). Pertanto si sono considerati un profilo per rappresentare le spiagge a comportamento idrodinamico riflettente intermedio ed un profilo per rappresentare le condizioni intermedie.

3.4 Classificazione delle spiagge a scala regionale

La geomorfologia delle spiagge è stata utilizzata sia per valutare la risposta della costa all'impatto degli eventi estremi sia per caratterizzare le pericolosità marine, in quanto per definire il run up del moto ondoso bisogna conoscere la pendenza della spiaggia emersa mentre per valutare l'entità dell'erosione entrano in gioco la pendenza della parte attiva del profilo di spiaggia sommersa. Considerata la scala del lavoro si è ritenuto opportuno classificare le spiagge catalogate in funzione di quei parametri che servono per calcolare le pericolosità marine e di conseguenza si sono raggruppate le spiagge in maniera diversa per ognuno dei due processi esaminati in funzione dei parametri principali che li definiscono.

Per quanto riguarda l'erosione le spiagge si sono divise in 2 tipi caratteristici in funzione della pendenza del profilo attivo (Figura 3.7). Si nota come la distribuzione sia abbastanza omogenea

con le spiagge dissipative che presentano una maggior presenza rispetto a quelle a comportamento più dissipativo.

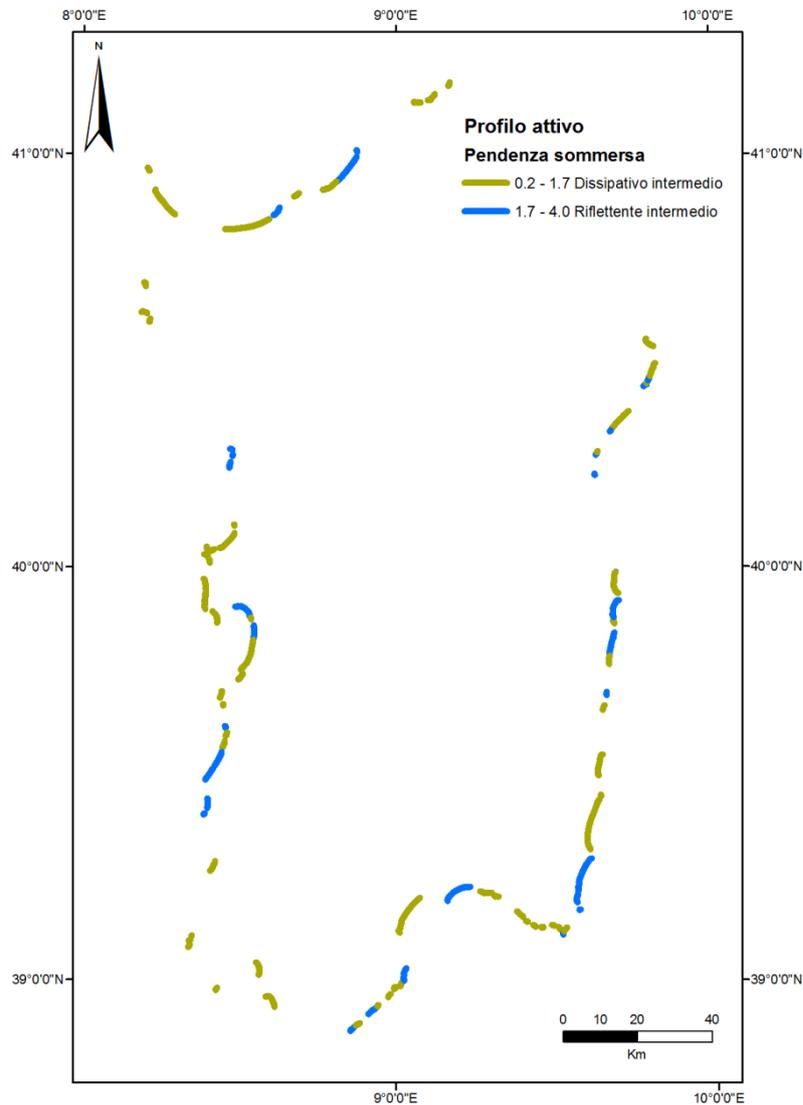


Figura 3.7 Classificazione delle spiagge in funzione della pendenza del profilo attivo (dato proveniente dall'Atlante delle spiagge sarde, Di Gregorio et al., 1998).

Nel caso dell'inondazione (Figura 3.8) si sono considerati 4 tipi distinti di spiaggia in funzione della pendenza della stessa e della pendenza della battigia.

Al momento di caratterizzare la risposta della costa entrano in gioco altri parametri geomorfologici che servono ad indicarci la resilienza dei litorali arenosi ai pericoli costieri che sono l'ampiezza della spiaggia (media e minima) per l'erosione (Figura 3.9) l'altezza (media e minima) del recettore spiaggia per quanto riguarda l' inondazione (Figura 3.10).

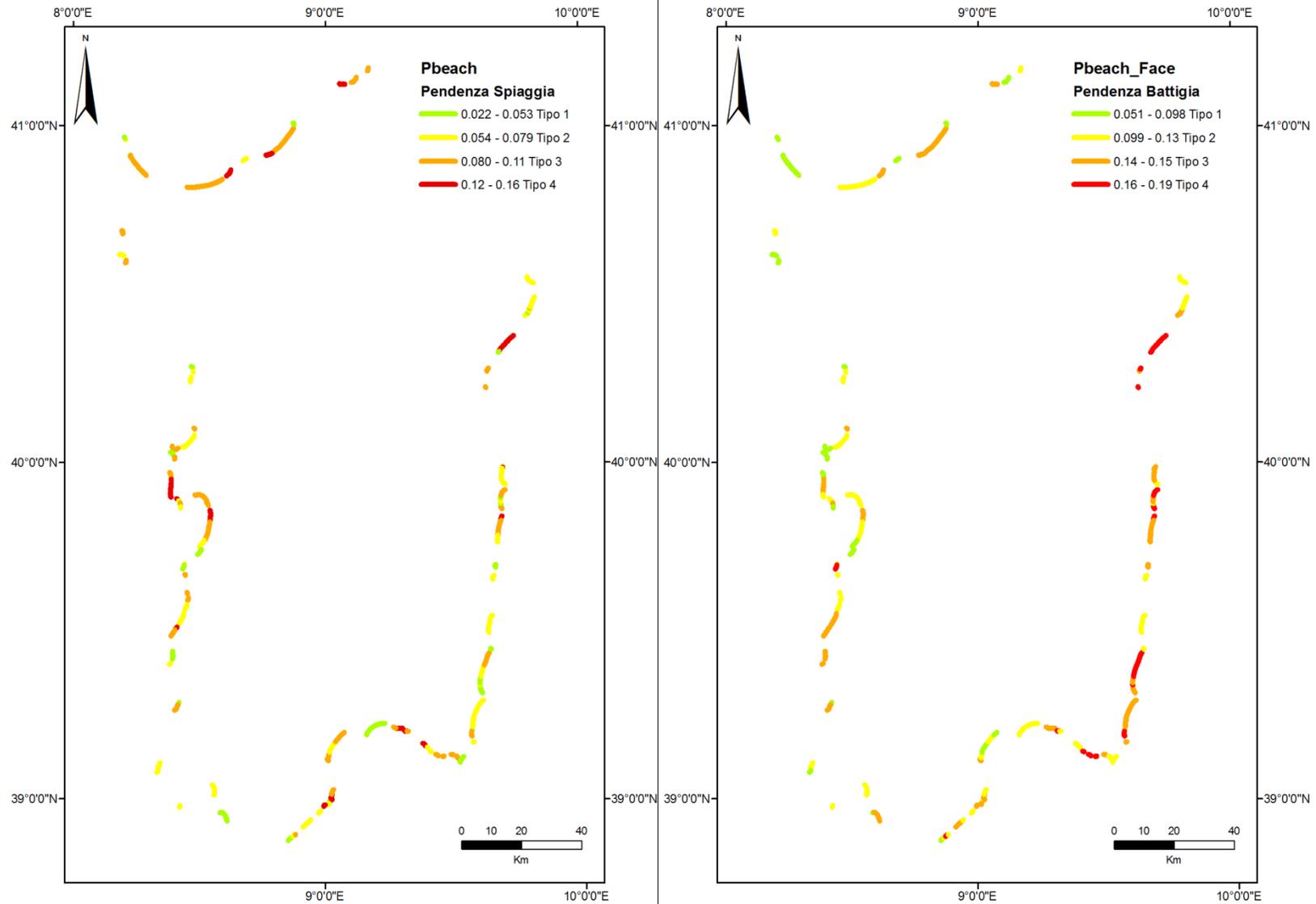


Figura 3.8 Classificazione delle spiagge in funzione della pendenza: a sinistra si considera la pendenza della spiaggia, mentre a destra quella della battigia.

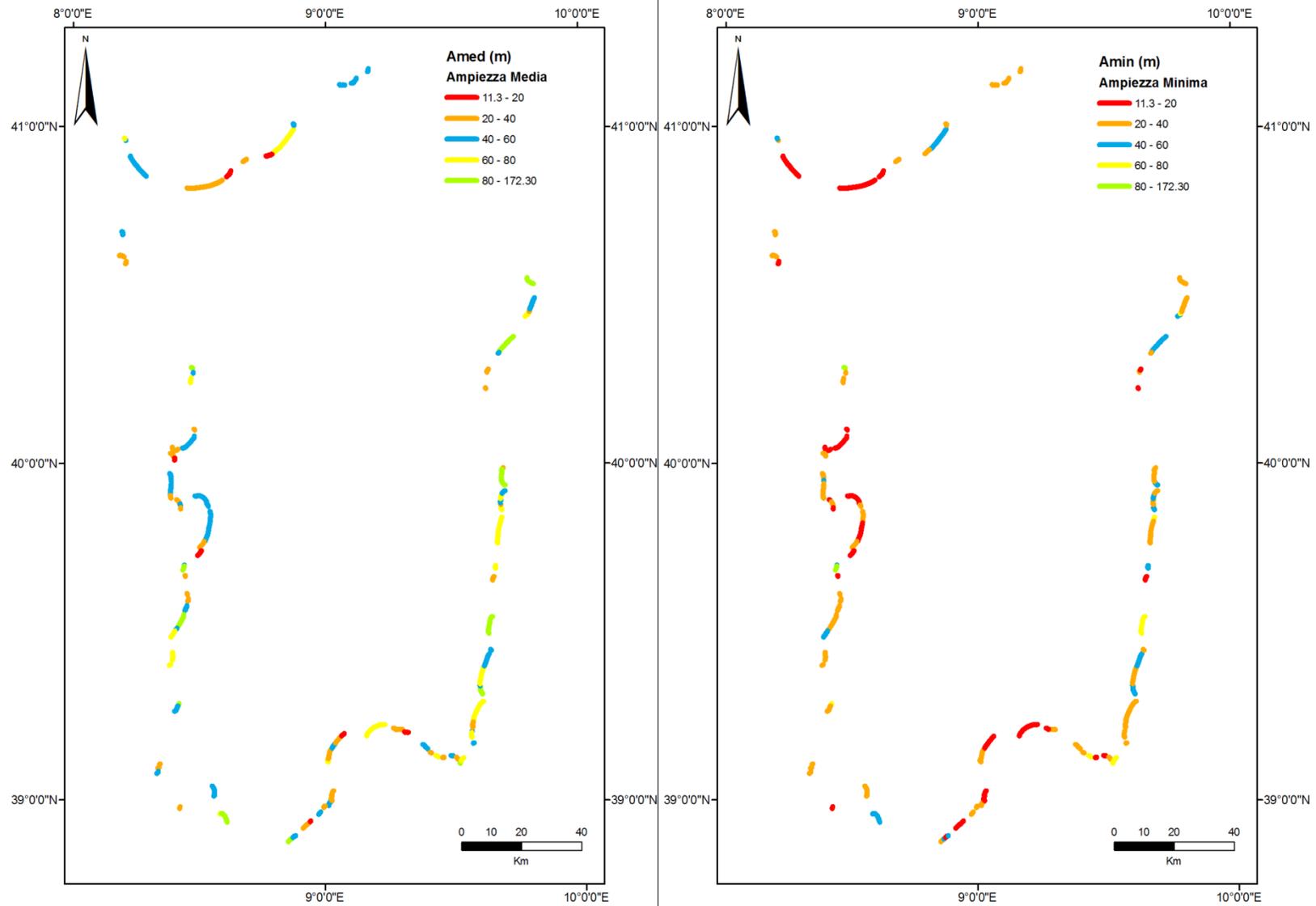


Figura 3.9 Classificazione delle spiagge in funzione della larghezza: a sinistra si considera l'ampiezza media, mentre a destra si considera la minima.

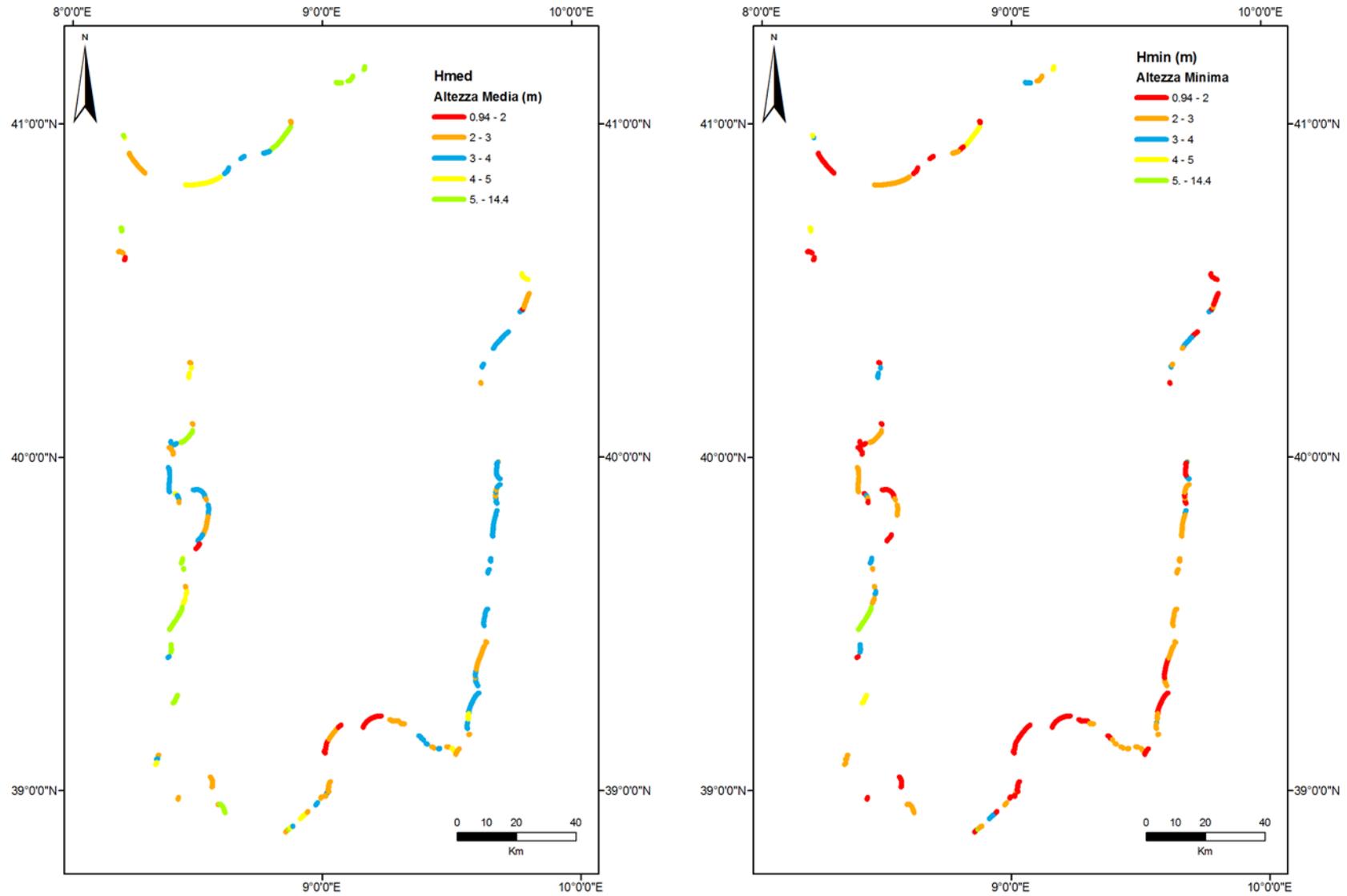


Figura 3.10 Classificazione delle spiagge in funzione dell'altezza della duna: a sinistra si considera l'altezza media, mentre a destra si considera la minima.

CAPITOLO 4

Metodologia

4.1 Introduzione

In questo capitolo viene presentata la metodologia utilizzata su scala regionale per valutare la vulnerabilità costiera delle spiagge della Sardegna agli eventi meteo marini estremi. L'obiettivo pratico del metodo è fornire informazioni utili alle amministrazioni locali per pianificare la gestione delle risorse della zona costiera e poter mitigare, su scala regionale, i potenziali danni indotti dalle tempeste meteo-marine.

Come scala regionale si intende una scala di varie centinaia di chilometri e da un punto di vista della gestione è stata selezionata perché comprende tutte le unità amministrative, ciascuna di esse con le proprie competenze legali, in questo caso della Regione Autonoma della Sardegna che potrebbe essere l'equivalente di uno stato all'interno di una repubblica federale.

Quando si parla di tempeste di mare, la vulnerabilità viene quantificata confrontando l'intensità dell'impatto della tempesta con la capacità di adattamento del sistema costiero. Nel caso dell'erosione, per esempio, si confronterà il retrocesso della linea di battigia con la larghezza della stessa spiaggia, mentre nel caso dell'inondazione la risalita dell'onda generata dal moto ondoso si relazionerà con l'altezza della duna emersa.

La metodologia si divide in tre parti principali:

- 1) *Definizione e caratterizzazione dell'Agente forzante marino*
- 2) *Parametrizzazione e valutazione della Pericolosità*
- 3) *Parametrizzazione e valutazione della Vulnerabilità*

Nella prima parte vengono definiti gli eventi meteo marini estremi (che chiameremo tempeste di mare) in funzione dell'altezza d'onda al picco della tempesta (H_s), del periodo di picco (T_p) e della durata. Nella seconda fase vengono create le serie storiche delle tempeste di mare che verranno poi utilizzate insieme alle caratteristiche geomorfologiche basiche delle spiagge con lo scopo di valutare l'intensità dei due principali processi indotti considerati, l'erosione e l'inondazione marina.

Le serie temporali, che rappresentano le intensità delle pericolosità, sono adattate ad una distribuzione di valori estremi in maniera tale che le suddette vengono messe in relazione con le rispettive probabilità di accadimento.

Infine l'ultimo passaggio consiste nel calcolo della vulnerabilità confrontando le intensità delle pericolosità calcolate in precedenza con le proprietà fisiche della spiaggia determinandone così la capacità di adattamento agli impatti considerati. Ogni passaggio della metodologia viene spiegato dettagliatamente nei seguenti paragrafi.

In questo lavoro si adotta un approccio probabilistico che ci permette, una volta stimate e valutate la probabilità di accadimento delle pericolosità indotte lungo la costa e definito il livello di rischio da parte degli operatori, di confrontare la distribuzione spaziale delle intensità degli impatti ed identificare con facilità le zone potenzialmente più danneggiabili. Quindi, invece di valutare la vulnerabilità di tutte le spiagge, causata da un unico evento estremo, il nostro obiettivo è calcolare la vulnerabilità associata ad un determinato tempo di ritorno in ogni spiaggia considerata. Con questo tipo di metodologia, dovendo prendere decisioni, si può scegliere un'accettabile probabilità di accadimento (periodo di ritorno) che può variare lungo la costa in funzione dell'importanza che viene dato all'entroterra. Nel caso in cui si selezionano livelli di rischio che variano spazialmente, questo potrebbe desumersi confrontando vulnerabilità associata a diverse probabilità di accadimento. Infine bisogna considerare che, anche se questa metodologia può essere applicata a qualsiasi zona costiera, delle piccole variazioni delle procedure specifiche qui usate qui potrebbero aver bisogno di qualche cambiamenti in funzione delle caratteristiche dell'area che si desidera analizzare.

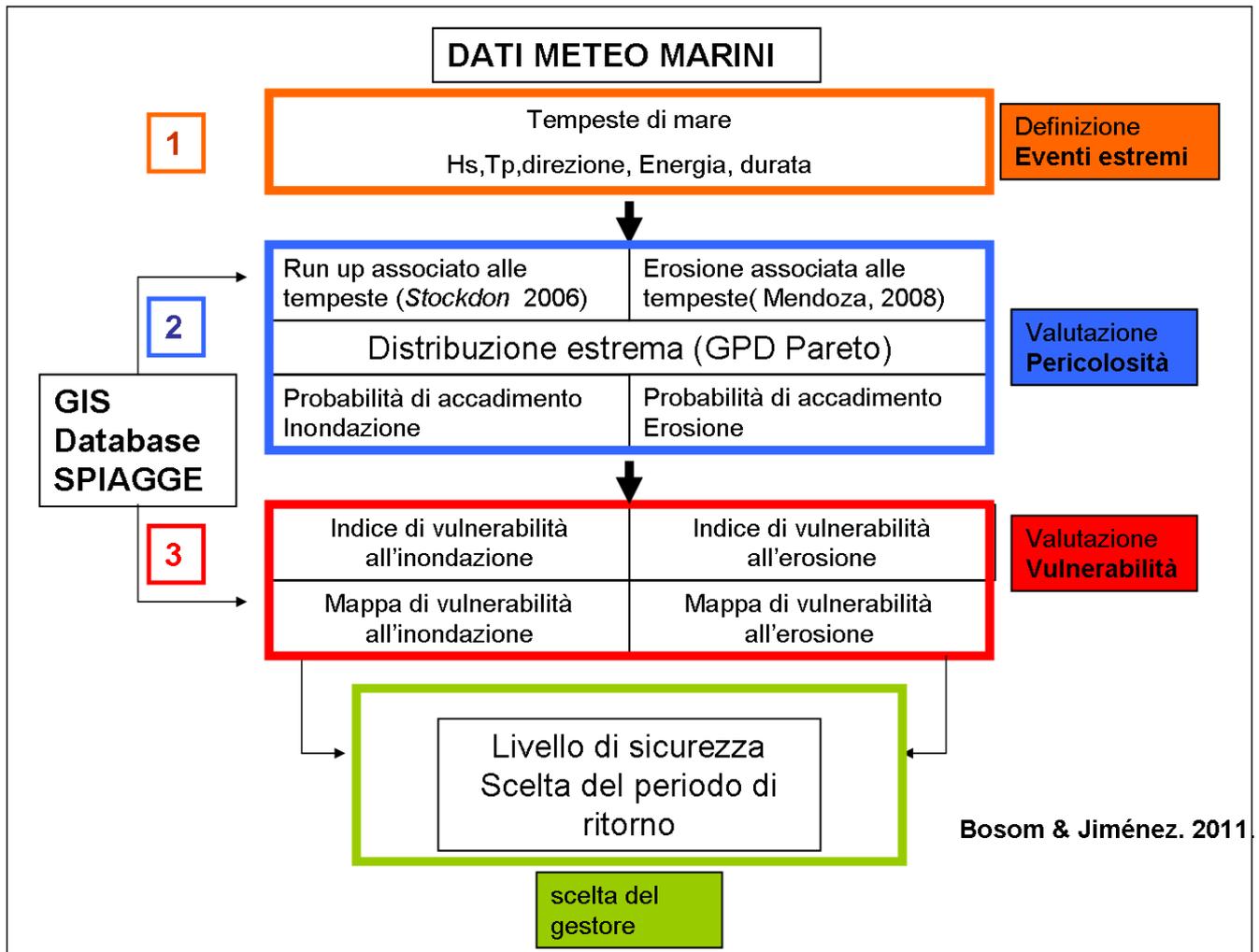


Figura 4.1 Schema metodologico applicato in questo lavoro per la stimare la vulnerabilità delle coste della Sardegna alle tempeste di mare (Da Bosom e Jiménez, 2011)

4.2 Le tempeste di mare in Sardegna

4.2.1 Definizione ed identificazione degli eventi estremi

Una tempesta di mare può essere definite in forma semplice come una perturbazione atmosferica violenta accompagnata tra gli altri elementi, da forti venti. Quando il fenomeno si manifesta in mare, gli effetti più immediati sono l'incremento della altezza dell'onda e del livello del mare (marea meteorologica). In questo lavoro si considererà solo il run-up dovuto al moto ondoso poiché anche se il contributo della marea meteorologica non è infrequente (Jimenez et al, 1997bzs), l'ampiezza è molto inferiore rispetto all'innalzamento dovuto dal run-up. (Mendoza and Jimenez, 2008).

Le tempeste hanno conseguenze importanti sulla geomorfologia costiera, in particolare le grandi tempeste, dovuto al fatto che il potere delle onde è una funzione quadratica dell'altezza dell'onda e pertanto possiede l'abilità di ridistribuire rapidamente grandi volumi di sedimento, accelerare i tassi di erosione e accrescimento e controllare i movimenti costieri a breve termine (Morton et al., 1995).

E anche comune che le tempeste provochino un aumento della risalita verticale dell'onda "run up" che aumenta il livello dell'impatto delle onde sulla costa; livelli maggiori di acqua permettono che le onde di una determinata dimensione, tracimino la costa e penetrino nell'entroterra provocando fenomeni di overtopping e di overwashing.

Gli eventi estremi hanno conseguenze socio-economiche importanti, infatti d'accordo con le compagnie assicuratrici (Munich Reinsurance Group, 2004; Swiss Reinsurance Company, 2004) questi eventi sono responsabili di un gran numero di morti ogni anno (35.000 nel 2003) ed implicano costi annuali significativi (circa 49.5 miliardi di euro nel 2003) in danni ad installazioni portuarie, infrastrutture turistiche e proprietà private. Inoltre cresce la preoccupazione per gli effetti del cambio climatico che include la possibilità di crescita dell'intensità delle tempeste delle latitudini medie come sostiene (Lambert, 1995; McLean et al., 2001).

Questa situazione giustifica la necessità di conoscere i regimi di tempesta dell'area colpita, in termini delle sue caratteristiche meteo-marine, così come gli impatti previsti. Questa necessità è soprattutto evidente nel caso dei gestori costieri che devono riconoscere in forma adeguata la fonte dei possibili rischi e l'intensità prevista dei processi che determinano i danni lungo la costa.

Lo sviluppo della classificazione delle tempeste segue tre passi: la definizione e l'identificazione delle tempeste, la scelta dei parametri che caratterizzano le tempeste ed il metodo di classificazione. Date le caratteristiche del moto ondoso della zona si ritiene che questa classificazione sia valida per le aree costiere della parte centro-occidentale del Mar Mediterraneo.

4.2.2 Caratterizzazione e classificazione delle tempeste di mare in Sardegna

Per caratterizzare le condizioni estreme del moto ondoso bisogna definire quando un evento è considerato estremo (tempesta). Una tempesta si definisce come un evento di moto ondoso nel quale l'altezza delle onde supera un determinato valore limite durante un certo periodo di tempo. Il primo passo è quindi la definizione della soglia di altezza dell'onda. Tradizionalmente la scelta viene fatta considerando le caratteristiche locali del regime del moto ondoso o basato nel criterio di robustezza della serie dei dati se gli eventi vengono usati per un'analisi statistica (Pandey et al., 2001).

Nel caso del Mediterraneo Mendoza e Jimenez (2006) e (Ciavola et al 2007) definiscono una tempesta come un evento nel quale l'Hs significativa supera il valore di 2 metri durante un periodo minimo di 6 ore e con direzione costante. Applicando il valore di 2 m come criterio si è ottenuto un elevato numero di eventi (>800 per ogni settore) che abbiamo considerato troppo elevato e non rappresentativo per un'analisi estrema pertanto si è effettuata un'analisi statistica descrittiva dell'altezza d'onda Hs per ognuno dei quattro settori ondosi (Sud; Est; Nord ; Ovest). Per definire le tempeste si è quindi utilizzato il valore di Hs corrispondente al quantile 0.99 della serie temporale completa disponibile (1979-2012). I risultati (tabella 1) mostrano un comportamento differente per i settori orientali (SE ed E) caratterizzati da valori inferiori sia come Hs che come frequenza di eventi rispetto alla costa occidentale (Settore NO ed O). Questo si deve al fatto che in Sardegna i settori occidentali sono caratterizzati da eventi più energici di moto ondoso (Caiaffa et al 2011) dato che i venti che soffiano da nord-est sono più intensi rispetto alle direzioni provenienti dai quadranti sud orientali. Si è scelto quindi di differenziare i valori tra le due coste, assegnando il valore di 3.17 m come limite per i settori Sud ed Est e di 4.37 m per definire le tempeste dei Settori Nord e Ovest.

La durata minima che si usa per definire l'evento è di 6 ore, condizione necessaria per generare una risposta geomorfologica significativa della costa sedimentaria quando è colpita da un evento estremo. Infine, come afferma da Mendoza (2008) sono state considerate le tempeste caratterizzate dal presentare due picchi superiori al valore limite appartenenti allo stesso evento. Due picchi massimi separati da meno di 72 ore ognuno dall'altro sono considerati come un unico evento, mentre per una durata tra i due inferiore a 3 giorni si considera un unico evento a doppio picco.

SETTORE	Hs (quantile 99)	Numero tempeste (509)
SUD EST	3.17	54
EST	3.17	75
NORD OVEST	4.37	166
OVEST	4.37	117

Tabella 4.1. Valori limite di Hs (quantile 0.99) utilizzati nell'identificazione delle tempeste considerando un valore per ogni settore ondoso.

SETTORE	Hs (quantile 99)	Numero tempeste (412)
SUD EST	3.17	54
EST	3.17	75
NORD OVEST	4.37	166
OVEST	4.37	117

Tabella 4.2. Valori limite di Hs (quantile 0.99) utilizzati nell'identificazione delle tempeste considerando un valore per i settori orientali ed uno per i settori occidentali.

Sono state identificate 412 tempeste di mare che coprono un periodo di 33 anni. Nella tabella 2 si mostra il numero di eventi suddivisi per settore ondoso in funzione dei limiti finali considerati per l'analisi. Come ci si poteva aspettare all'aumento del valore limite corrisponde una diminuzione del numero di eventi che passa da 509 del primo caso (tabella 1) ai 412 del caso finale.

Il primo passo per realizzare una classificazione delle tempeste consiste essenzialmente nella categorizzazione come funzione di un parametro rappresentativo del processo da analizzare. In questo senso esistono alcune proposte di classificazione che si basano sulla intensità del vento e dalla durata. (Simpson, 1971; Saffir, 1979; Allen, 1981) o sulle caratteristiche del moto ondoso (Mendoza 2008, Bryant, 1988; Dolan & Davis, 1992).

Considerando che l'obiettivo finale del lavoro è prevedere l'impatto prodotto dalle tempeste sulla costa. Si è optato per utilizzare il metodo di Mendoza (2008) nella scelta delle variabili che si utilizzano per caratterizzare le tempeste si è incentrata nella descrizione del potenziale di erosione ed inondazione. Pertanto come parametro principale per definire l'intensità degli eventi estremi si utilizza il contenuto energetico E definito dall'equazione

$$E = \int_{t_2}^{t_1} H_s^2 * dt$$

Dove t_1 e t_2 definiscono la durata della tempesta (con $H_s > H_s$ limite). Un simile approccio è stato utilizzato da Dolan & Davis (1992) in una classificazione basata sull'energia relativa della tempesta, anche se usando una singola misura di H_s -media o massima- si può sovrastimare o sottostimare la attuale energia della tempesta. Nel nostro caso si utilizzerà l'altezza massima della tempesta.

Le tempeste vengono quindi identificate e caratterizzate calcolando per ognuna di essa H_s max, T_p max, durata, direzione predominante, il contenuto energetico e successivamente viene realizzato il processo di classificazione attraverso un'analisi di gruppi gerarchica ("Cluster analysis") utilizzando il contenuto energetico come principale variabile di raggruppamento. L'analisi cluster riduce la quantità di dati al categorizzare e raggruppa i dati in classi di somiglianza utilizzando algoritmi aggregativi. Per questo studio si utilizza la tecnica del **legame medio** (*average linkage*) che richiede che la distanza tra due gruppi si computi sulla base della media aritmetica delle distanze tra il caso da aggregare ed i gruppi che sono già stati formati. Per ridurre la tendenza ad avere un elevato numero di gruppi e per mantenere l'analogia con scale di classificazione già esistenti in bibliografia (Simpson, 1971; Saffir, 1979; Dolan & Davis, 1992), si applica una classificazione guidata che determina la creazione di una scala composta da cinque categorie finali. I- Debole (weak), II- moderato (moderate), III- significativo (significant), IV- severo (severe) and V- estremo (extreme).

Categoria	H_s (m)	Durata (ore)	Energia ($m_2 * t$)
1	2.0	8	32
2	2.5	18	107
3	3.3	34	353
4	5	63	1455
5	7	96	4548

Tabella 4.3 Esempio di classificazione utilizzata per gli eventi estremi delle coste Atlantiche nordorientali (Scala di Dolan-Davis).

A partire da questa caratterizzazione delle tempeste da un punto di vista energetico sono state selezionate 25 tempeste rappresentative in modo da coprire tutto il rango di variabilità delle tipologie dei casi in termini dei parametri caratteristici. Successivamente questi eventi sono stati

utilizzati per implementare la parte relativa alle caratteristiche degli eventi estremi del modello numerico Sbeach con cui si simulerà la risposta di un profilo trasversale di spiaggia in termini del volume di sedimenti erosi e dell'arretramento della linea di riva.

4.3 Valutazione della Pericolosità

4.3.1 Introduzione

Quando un evento meteo-marino estremo impatta su una spiaggia sabbiosa produce differenti risposte morfodinamiche che modificano rapidamente e significativamente la forma del paesaggio costiero. I suddetti cambi e processi sono controllati dalla combinazione di diversi fattori che essenzialmente possiamo rappresentare come le caratteristiche dell'evento estremo e le caratteristiche geomorfologiche della costa (Morton, 2002; Morton and Sallenger, 2003). Avendo adottato un approccio a scala regionale possiamo semplificare l'analisi ritenendo che i due più importanti processi costieri indotti dagli eventi estremi sono erosione ed inondazione secondo lo schema mostrato nella figura 4.2.

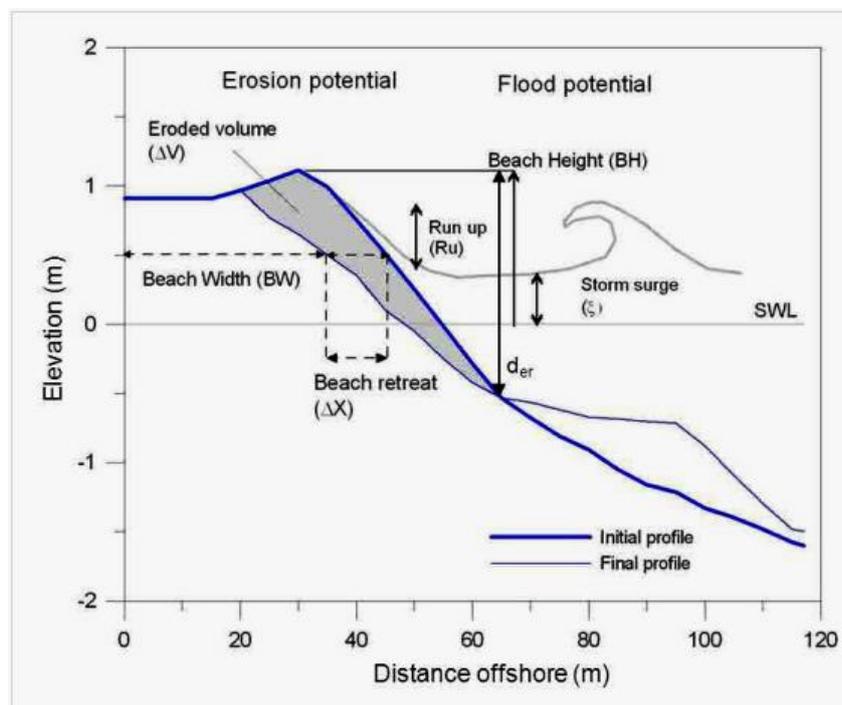


Figura 4.2 Diagramma che rappresenta i due pericoli potenziali indotti dalle tempeste di mare, erosione ed inondazione (da Bosom et Jimenez, 2009).

Essendo questi processi potenzialmente pericolosi per la stabilità della zona costiera e potendo apportare danni alle risorse ed agli usi esistenti, sono comunemente considerati come pericoli. Poiché l'intensità di ognuno di questi pericoli costieri dipende dalle diverse proprietà delle tempeste e dalle caratteristiche della spiaggia, essi non saranno necessariamente della stessa importanza durante un evento estremo dato. Inoltre i propri danni indotti nelle aree costiere saranno quindi differenti e, di conseguenza, gli amministratori dovrebbero essere interessati a conoscere quale pericolo risulta essere dominante durante una determinata tempesta. Di conseguenza il metodo permette di valutare separatamente i fenomeni di erosione e di inondazione e di parametrizzarne l'intensità attraverso l'utilizzo di un indicatore rappresentativo che include informazioni sulle proprietà delle tempeste e sulle caratteristiche geomorfologiche delle spiagge.

Nella figura 4.3 si mostrano alcune immagini dei danni provocati dall'impatto delle tempeste di mare in alcune spiagge delle coste della Sardegna: più precisamente alla zona del Golfo degli Angeli, rappresentata nel nostro studio nel settore Sud.



Figura 4.3 Stralcio dell'Unione Sarda che mostra notizie di danni provocati da una tempesta nel marzo 2013 nell'area del golfo di Cagliari.

Per caratterizzare l'intensità dei processi indotti dalle tempeste, erosione ed inondazione sono state parametrizzate separatamente. Con lo scopo di lavorare in maniera solida ed essenziale a scala regionale, si sono raggruppate le spiagge in gruppi diverse in funzione delle caratteristiche geomorfologiche, in modo tale che la pericolosità viene calcolata per i gruppi di spiagge anziché per ogni singola spiaggia appartenente all'area di studio.

4.3.2 Parametrizzazione dell'erosione

Il metodo per caratterizzare la potenziale erosione delle spiagge dovuta ai fenomeni meteo marini estremi si sviluppa in due fasi. Il primo passo consiste nella stima della potenziale erosione indotta da un determinato temporale modellando il suo effetto su 4 profili rappresentativi delle spiagge della Sardegna utilizzando il modello numerico Sbeach (Storm-induced BEAch CHange Model) basato sulla stima dell'erosione in funzione dei cambi del profilo di spiaggia sommersa. Si tratta di un modello semiempirico per determinare i processi di trasporto sedimentario trasversale che variano nel tempo lungo un profilo di spiaggia arbitrario. Una dettagliata descrizione del modello si può osservare in Larson and Kraus,(1989) ed in Wise et al., (1996).

La risposta della costa viene caratterizzata attraverso due parametri (Figura 4.4): l'arretramento della linea di riva ed il volume di sedimenti eroso nella parte interna della spiaggia emersa. In entrambi i casi si considera come condizione di contorno che la spiaggia non abbia limiti rigidi nel suo limite posteriore come una scogliera o un muro di contenimento che diminuirebbero l'erosione della spiaggia. Pertanto conseguenza la risposta valutata dovrebbe rappresentare il massimo potenziale di erosione indotto dalle tempeste.

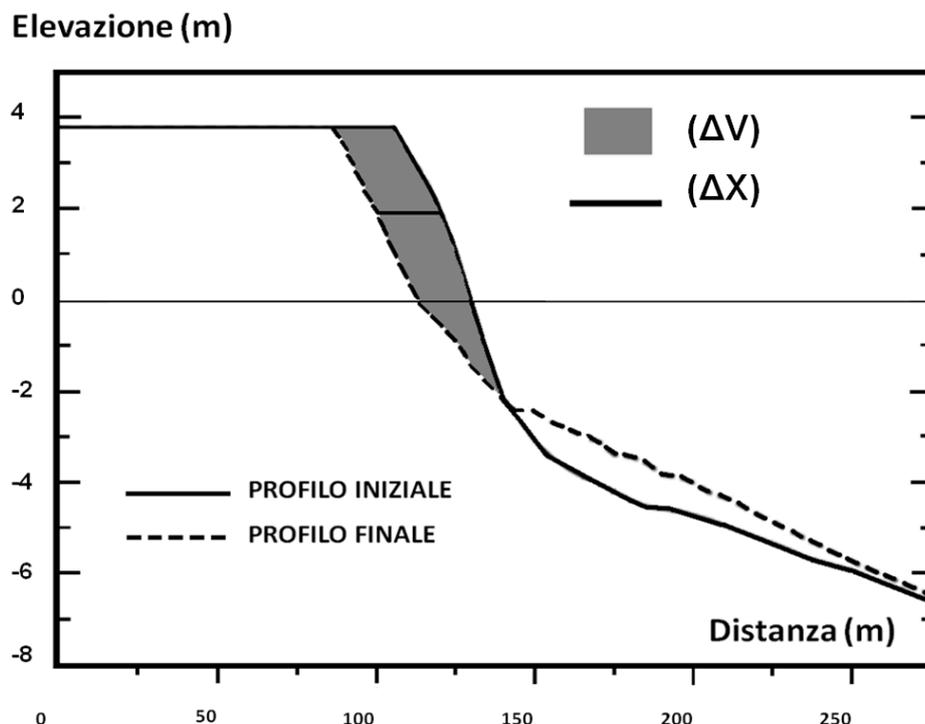


Figura 4.4 Esempio dei parametri calcolati con il modello *Sbeach*: Volume eroso di sedimenti ed arretramento della linea di riva.

La funzione strutturale del modello viene quindi derivata in questo modo:

- si implementa il modello Sbeach con 25 tempeste tipo che coprono tutto il rango di variazione degli eventi estremi riscontrati storicamente in Sardegna
- si calcolano lo spostamento della linea di riva ed i volumi erosi simulando le 25 tempeste su 4 profili rappresentativi dei 4 tipi di spiaggia sommersa rappresentanti l'area di studio le cui caratteristiche vengono mostrate nella tabella 4.4. I parametri d'erosione vengono calcolati geometricamente dai risultati delle simulazioni.

	Granulometria	Velocità di caduta	Pendenza profilo attivo
Tipo profilo	d_{50} (mm)	W_s	0-10 m
QUIRRA profilo riflettente	0.65	0.0855	0.081
SOLANAS semi-riflettente	0.5	0.0658	0.036
SINIS semi-dissipativo	0.35	0.0461	0.0172
S.MARGHERITA dissipativo	0.15	0.016	0.011

Tabella 4.4 Caratteristiche dei profili utilizzati per descrivere le spiagge della Sardegna

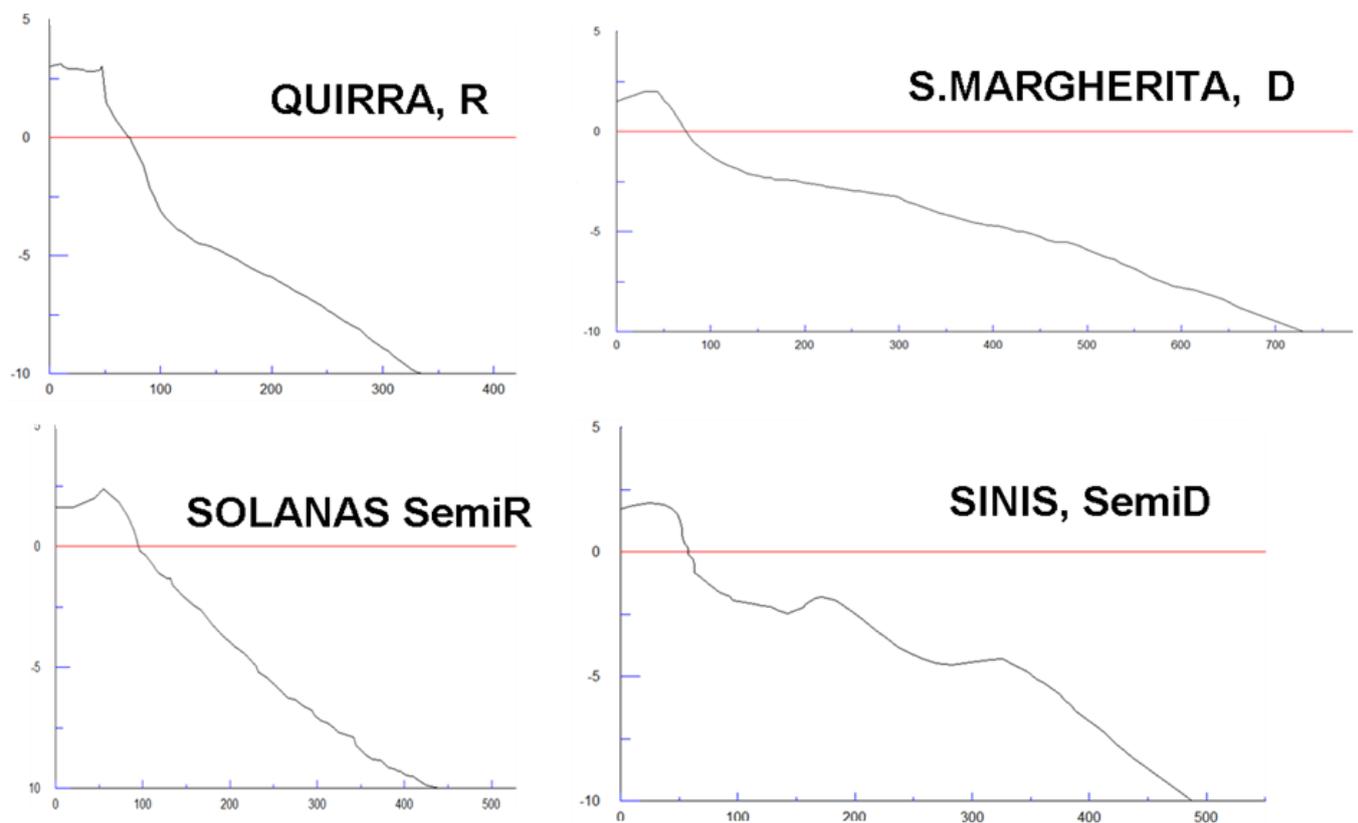


Figura 4.5 Profili tipo utilizzati per caratterizzare il profilo attivo sommerso delle spiagge della Sardegna

Il profilo tipico riflessivo rappresentato dalla spiaggia di Quirra è caratterizzato da sabbie grossolane ($d_{50} > 0.6\text{mm}$) e da una pendenza abbastanza elevata (0.088) mentre come tipico

profilo dissipativo è stato considerato quello di S. Margherita di Pula presentando i valori minori per quanto riguarda la granulometria (0.15mm) e la pendenza del profilo attivo. I casi di Solanas e di S. Giovanni di Sinis presentano valori intermedi e corrispondono rispettivamente ai casi riflessivo intermedio e dissipativo intermedio.

I risultati così ottenuti si mettono successivamente in relazione con un parametro di morfodinamica costiera, il parametro adimensionale $JA\tau$ (Jimenez et al., 1993, 1997a). Tale parametro serve a prevedere i cambi del profilo della spiaggia attraverso dei semplici predittori capaci di valutare appropriatamente l'ordine di grandezza della risposta indotta. Infine viene eseguita un'analisi di regressione lineare per ottenere un'equazione parametrica specifica per le coste della Sardegna per il calcolo dei volumi di sedimento erosi dalle tempeste di mare.

Basandoci su quanto detto l'equazione utilizzata è la seguente:

$$\Delta V = 4.77(JA\tau) + 9.86 = [2.9(|Deq - D| 0.5 \tan\beta) \tau] + 9.86$$

dove τ è la durata della tempesta, Ja il parametro caratteristico per i cambi del profilo di spiaggia proposto da Jimenez et al. (1993), $D = (H/T * Wf)$ è il parametro adimensionale velocità di caduta (Dean, 1973), Deq è il valore nelle condizioni di equilibrio (quando le condizioni sono per acque profonde), $\tan\beta$ la pendenza della spiaggia sommersa, H è l'altezza d'onda, Wf è la velocità di caduta del sedimento, T è il periodo del moto ondoso.

L'arretramento della linea di costa è si è calcolato a partire dai risultati del volume eroso precedentemente ottenuti. I risultati si esprimono in funzione di due profili tipo rappresentativi, riflettente intermedio e dissipativo intermedio secondo la relazione funzionale ottenuta, che si mostra in figura 4.6.

È importante ricordare l'importanza del segno del parametro $Deq - D$, che indica il tipo di cambio che avviene nel profilo, quando i valori sono negativi segnalano un profilo di erosione. Pertanto l'equazione è valida solo nei casi in cui la combinazione della tempesta con la resilienza della spiaggia risultano in condizioni erosive. E da menzionare che la morfologia pre-evento influenzerà, tra gli altri fattori l'erosione che colpirà la spiaggia (e.g. Morton, 2002). Come conseguenza l'approccio adottato è una semplificazione del comportamento reale della risposta della spiaggia all'azione del moto ondoso. In ogni modo l'obiettivo non è riprodurre la completa

risposta della spiaggia all'impatto delle tempeste ma stimare l'ordine di grandezza della potenziale erosione attesa.

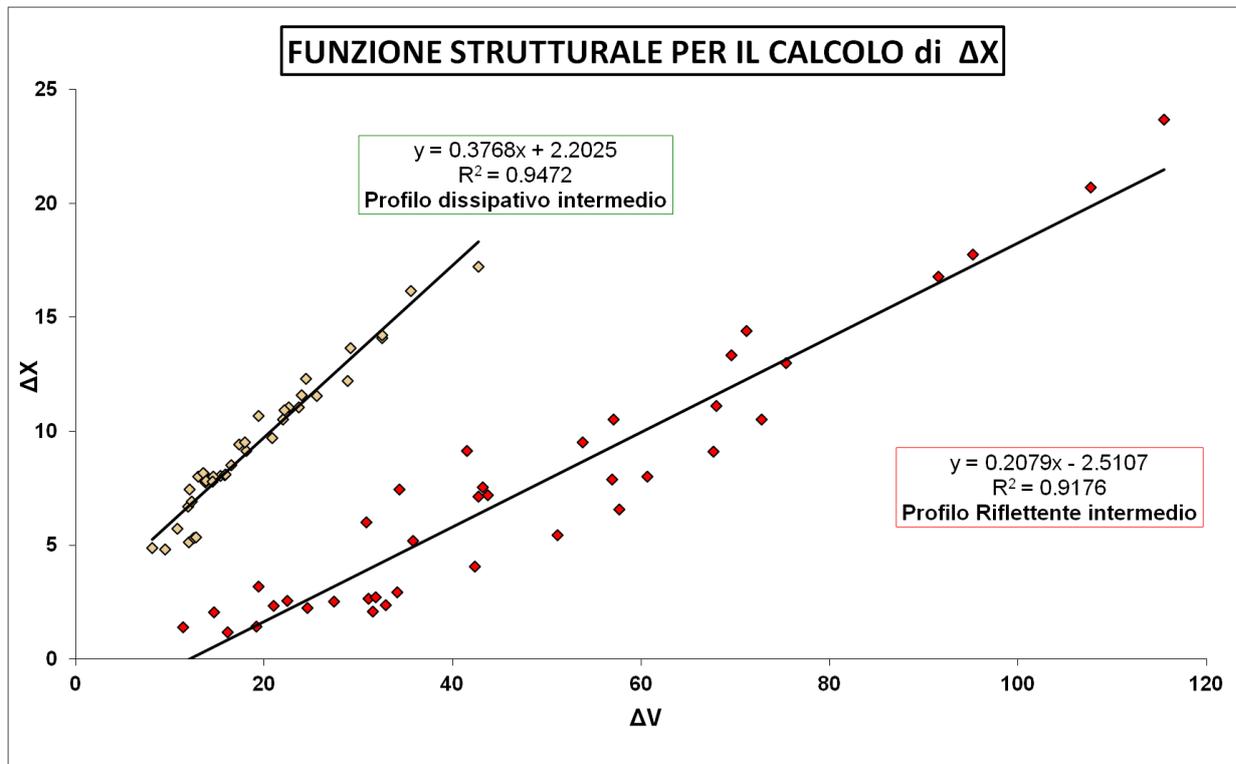


Figura 4.6 Funzione strutturale per il calcolo dell'arretramento della linea di riva a partire dai volumi erosi simulati dal modello *Sbeach*.

4.3.3 Parametrizzazione dell'inondazione

L'inondazione costiera generalmente è causata da una combinazione di livelli di acqua alta (marea metrologica, marea astronomica) e dall'azione del moto ondoso. Per valutare appropriatamente in termini probabilistici i livelli che raggiunge l'acqua, si realizza un'analisi congiunte delle probabilità della marea meteorologica e del run-up dovuto al moto ondoso.

Dato che la marea meteorologica può essere considerata poco significativa rispetto all'effetto del run up del moto ondoso per le tempeste delle coste del Mar Mediterraneo occidentale secondo Jimenez et al 1997, il contributo dell'innalzamento relativo del livello del mare (marea metrologica) non si considera al momento di valutare l'analisi di vulnerabilità. Pertanto in questo lavoro abbiamo considerato solo il "run-up" causato dal moto ondoso per caratterizzare l'intensità del fenomeno dell'inondazione, poiché la marea meteorologica anche se non è infrequente (e.g. Jimenez et al., 1997b), non raggiunge l'entità della risalita dell'onda dovuto alle

onde (Mendoza, 2008). Formalmente ciò significa che per caratterizzare la vulnerabilità all'inondazione si utilizzerà solo la componente dovuta al moto ondoso che è stata parametrizzata in accordo con il modello di Stockdon et al. (2006) formulato nella seguente maniera:

$$Ru_{2\%} = 1.1 * 0.35 \tan \beta (H_s L_0)^{1/2} + [(H_s L_0) * (0.563 \tan \beta^2 + 0.004)]^{1/2}$$

Dove H_s è l'altezza d'onda in acque profonde, L_0 è la lunghezza d'onda in acque profonde associata al periodo di picco T_p e $\tan \beta$ è la pendenza della spiaggia. Questa formula è stata selezionata poichè è derivata specificatamente per spiagge sabbiose ed è stata implementata solo con dati provenienti da campagne di rilevamento.

Nella figura 4.8 si mostra lo schema della funzione di protezione che svolge una spiaggia durante l'impatto di una tempesta. Avendo a disposizione due tipi di dati di pendenza, uno che si riferisce alla battigia ed uno che si riferisce alla spiaggia intera dato che il "run up" dovuto al moto ondoso dipende dalla pendenza della spiaggia si sono valutate due tipi di fenomeni differenti:

-1) Inondazione della spiaggia: si usa la pendenza della battigia e per calcolare il run up e successivamente si confronterà con l'altezza del piede della duna per valutare quando si inonda la spiaggia emersa analizzando il fenomeno dell'overtopping. In questo caso si possono trarre delle indicazioni importanti dal punto di vista della gestione della spiaggia nella stagione invernale, periodo in cui sono frequenti le tempeste marine. Ad esempio se una spiaggia risulta altamente vulnerabile a questo tipo di mareggiata si consiglia di non lasciare nessun tipo di struttura o concessione marittima usata nella stagione balneare per evitarne il danneggiamento a causa dell'arrivo dell'acqua di mare (passerelle, infrastrutture, concessioni).

-2) Inondazione dell'entroterra: si considera la pendenza della spiaggia al momento di applicare la formula per il calcolo de "run up" e successivamente si confronterà con l'altezza della cresta della duna per valutare quando si inonda la parte retrostante alla spiaggia, l'entroterra. In questo caso la spiaggia viene considerata come un ultimo baluardo in difesa del territorio costiero retrostante la duna, che solitamente tende ad essere altamente urbanizzato soprattutto in quelle zone della Sardegna che maggiormente si sono sviluppate dal punto di vista turistico - ricreazionale .

Nel primo caso si considera la vulnerabilità delle strutture presenti nella spiaggia durante la stagione delle tempeste che si potrebbero danneggiare se inondate (passerelle, bar, occupazione da concessioni varie). Nel secondo caso invece si considera la spiaggia come una barriera naturale che protegge l'entroterra dall'azione delle onde, che potrebbero danneggiare ad esempio una strada, una proprietà privata o qualsiasi altro tipo di bene di valore presente nella zona retrostante la spiaggia.

4.3.4 Distribuzione di probabilità estrema della pericolosità

Dopo aver applicato le equazioni di parametrizzazione si può ottenere il clima estremo delle pericolosità. Con clima estremo di erosione e di inondazione si intende che al posto di valutare un clima onda-metrico estremo di come si presentano le tempeste durante il periodo di studio, si ottengono l'intensità dell'erosione e dell'inondazione associata ad un evento estremo con un determinato periodo di ritorno. Ciò significa che per una probabilità di accadimento data si può valutare l'entità dell'erosione e dell'inondazione che si produrrà sulle spiagge considerate.

Per stimare l'impatto morfodinamico di una tempesta si valuta la probabilità di accadimento di ogni processo morfodinamico indotto. Per ottenere tale scopo si utilizza il metodo della risposta. (Sánchez Arcilla et al., 2009; Garrity et al., 2006) che si basa direttamente su una serie di dati misurati nella realtà che nel nostro caso sono dati simulati con il modello numerico Era_Interim. Si calcolano l'erosione e l'inondazione indotta da ognuna delle tempeste registrate (clima estremo ondamentrico) e si adatta ad una distribuzione di probabilità estrema (GPD Distribuzione Generalizzata di Pareto) degli eventi che si considerano come tempeste indipendenti le une dalle altre. In questo modo il parametro morfodinamico d'interesse associato ad un determinato periodo di ritorno si ottiene direttamente dalla distribuzione estrema. Per la selezione e l'analisi delle onde estreme è stato impiegato il metodo delle serie tronche, detto anche "delle serie di durata parziale sopra soglia" o "Peak Over Threshold"(POT). Pertanto per ogni settore di moto ondoso si calcolano l'erosione e l'inondazione indotte dalle tempeste di mare associate ad una probabilità di accadimento determinata.

Per caratterizzare la risposta della costa si sono raggruppate le spiagge in maniera diversa per ognuno dei due processi esaminati in funzione dei parametri principali che li definiscono. Pertanto per l'erosione si sono considerati 2 profili tipo con d50 e pendenza attiva caratteristici,

mentre per il “run up” si sono considerate sempre 4 categorie in funzione però della pendenza della spiaggia come parametro di classificazione (Paragrafo 3.4)

Avendo utilizzato il metodo POT (Peak-Over Threshold), successivamente adattato alla distribuzione generalizzata di Pareto (GPD), si è dovuto definire un livello limite come soglia per definire quando un evento è considerato estremo (Doherty et al., 2011). Nel nostro caso è stata effettuata un’analisi statistica descrittiva per meglio interpretare il valori della soglia che serve a definire la distribuzione estrema delle pericolosità scegliendo il quantile 0.99 come valore limite. Tali valori limite sono stati scelti in funzione dei diversi settori di clima ondoso (SUD, EST, NORD ed OVEST) ed in funzione dei tipi di spiaggia (spiagge intermedie riflettenti o intermedie dissipative per le analisi di erosione e spiagge a diverse pendenza per quanto riguarda i calcoli relativi al fenomeno dell’inondazione.

4.4 Valutazione della vulnerabilità costiera

Il passo finale della metodologia consiste nell’includere nel calcolo della vulnerabilità, la capacità di resistenza del sistema costiero all’impatto indotto dalle tempeste. Per fare questo viene scelta una variabile intermedia che permette quantificare la vulnerabilità comparando l’intensità dei processi con la resilienza delle spiagge.

Successivamente si definisce una funzione di vulnerabilità separatamente per ogni processo con cui otterremo un indice di vulnerabilità suddiviso in 5 categorie. Prima di arrivare a questo punto, e considerando l’approccio probabilistico della metodologia, si deve scegliere il periodo di ritorno per effettuare l’analisi.

Si ricorda che si considera la spiaggia come difesa di protezione dell’entroterra dagli eventi estremi, per cui la vulnerabilità si riferisce a tutte quelle aree di suolo limitrofe al limite posteriore della spiaggia, e che sono potenzialmente danneggiabiliggiata dall’impatto delle tempeste. Se la spiaggia non svolge la sua funzione di protezione, erodendosi ed inondandosi completamente lascia il litorale esposto alla furia delle tempesta, aumentando quindi la proibabilità che il territorio venga danneggiato.

4.4.1 Definizione dell'indice di vulnerabilità all'inondazione e all'erosione

La valutazione finale della vulnerabilità costiera all'erosione ed all'inondazione richiede la caratterizzazione della capacità di risposta della spiaggia. Nel caso dell'indice di vulnerabilità all'erosione (*IVE*), il parametro utilizzato come indicatore di resilienza della spiaggia è l'ampiezza della suddetta (*Amed*). Pertanto quanto maggiore sarà l'ampiezza della spiaggia tanto minore sarà la probabilità che essa si eroda completamente e di conseguenza danneggi le infrastrutture e le risorse presenti nell'entroterra costiero. La variabile intermedia viene formulata in questi termini:

$$IVE = \frac{\Delta X}{Amed}$$

In cui ΔX è l'arretramento della linea di costa e *Amed* è l'ampiezza media della spiaggia. L'arretramento della linea di riva è stato calcolato a partire dai risultati delle simulazioni del Modello Sbeach in funzione dei risultati delle simulazioni del modello Sbeach. Questo criterio è stato scelto dopo aver realizzato una valutazione usando il modello numerico Sbeach (Larson and Kraus, 1989; Wise et al., 1996) che riproduce il comportamento di una spiaggia sottoposta all'azione di una tempesta. Il modello è stato implementato introducendo i dati di quattro profili diversi considerati come rappresentativi delle spiagge della Sardegna (vedere tabella 4).

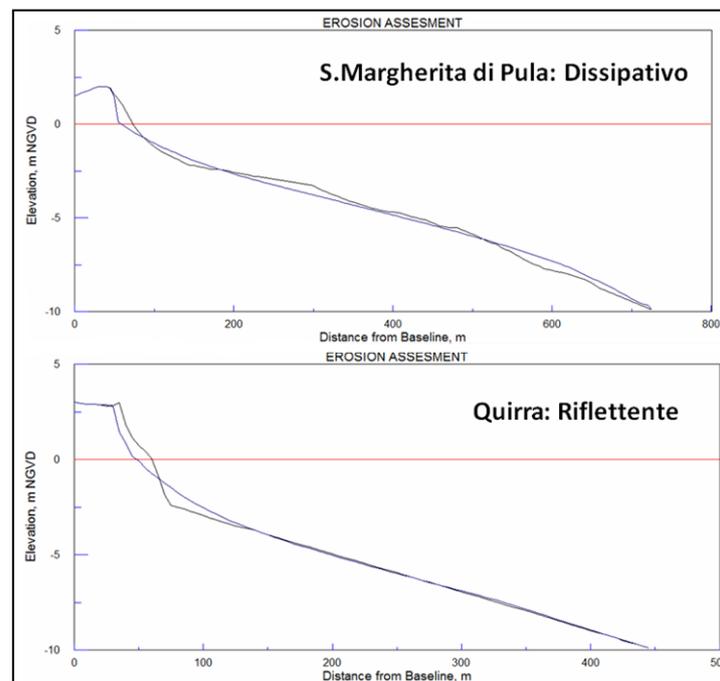


Figure 4.7 Esempio dei due profili “pre” e “post” evento corrispondenti all’impatto della stessa tempesta (st 143, con altezza d’onda $H_s = 4$ metri).

Nel caso dell'indice di vulnerabilità all'inondazione *IVI* il parametro intermedio utilizzato come indicatore di resilienza della spiaggia è l'altezza massima della duna (*Cmax*) o in sua assenza l'altezza massima della berma. Perciò quanto maggiore sarà l'altezza della spiaggia tanto minore risulterà l'inondazione della stessa. La variabile intermedia verrà espressa secondo la formula:

$$IVI = \frac{Ru}{Cmax}$$

In cui *Ru* è il Run up (associato ad una determinata probabilità di accadimento) e *Cmax* è l'altezza massima della duna o della spiaggia. Bisogna notare che incluso in un contesto in cui le condizioni delle tempeste rimangono costanti, la vulnerabilità della spiaggia potrebbe cambiare per un cambio nella morfologia della stessa (ampiezza ed altezza). Per considerare questa potenziale variazione la base dati costiera deve mantenersi aggiornata (periodicamente o dopo l'impatto di un evento significativo) per rappresentare in forma appropriata le caratteristiche della spiaggia. La vulnerabilità finale viene formulata in termini di queste due variabili intermedie attraverso la relazione funzionale che si mostra nella figura 4.8.

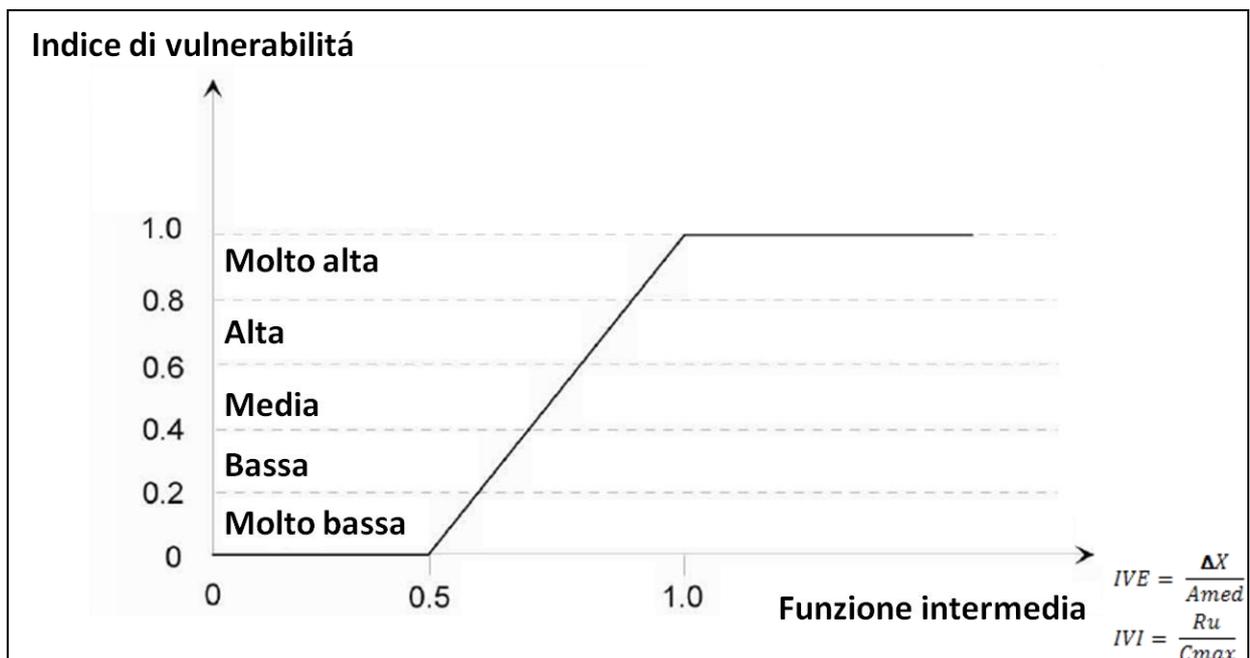


Figure 4.8 Relazione funzionale per la normalizzazione della vulnerabilità.

Come si può notare il rango della scala va da un valore minimo di zero (stato ottimo) ad un massimo di 1 (stato di fallimento) ed è divisa in 5 categorie (molto bassa, bassa, media, alta, molto alta). In questo caso assumiamo che la vulnerabilità dipende in forma lineare dalle variabili intermedie, dove la pendenza della curva rappresenta il livello di sicurezza dell'analisi.

Pertanto le analisi più conservatrici (quelle che indicando maggior vulnerabilità per le stesse condizioni di pericolo) avranno curve più acclivi e viceversa. Il livello di sicurezza dell'analisi dipende dai valori scelti per le variabili intermedie negli estremi della scala. Questi limiti di vulnerabilità minima e massima si possono definire in funzione delle tre principali funzioni che svolge una spiaggia (ricreativa, protezione e naturale). Dato che le tempeste si presentano principalmente nelle stagioni autunnali e primaverili e che il loro impatto può produrre danni alle proprietà pubbliche e private, questo lavoro si è incentrato sulla funzione di protezione del territorio che svolge la spiaggia, valutando la vulnerabilità dell'entroterra costiero a subire danni dovuti all'erosione all'inondazione generati dalle tempeste.

Vulnerabilità	V=0	V=1
Processo	limite minimo	limite massimo
Inondazione	$C_{max} = 2 R_u$	$C_{max} = R_u - 2$
Erosione	$A_{min} + \Delta X(T_r) + 2\Delta X(T_{50})$	$A_{min} + \Delta X(T_r)$

Tabella 4.5 Limiti massimi e minimi scelti per le variabili intermedie che definiscono gli indici di vulnerabilità.

La tabella 4.5 definisce i limiti massimi e minimi selezionati per entrambi i processi. Nel caso dell'erosione il valore massimo di vulnerabilità (1) è stato fissato nella situazione in cui la ampiezza della spiaggia è uguale all'ampiezza di controllo della spiaggia (A_{min}) più l'arretramento indotto dalla tempesta (ΔX). E' stata scelta un'ampiezza di 5 metri come larghezza di controllo intesa in questo in questo caso come il valore minimo richiesto per mantenere la spiaggia operativa ed evitare l'esposizione diretta dell' entroterra all'azione delle onde.

Questo valore può essere utilizzato come margine di sicurezza per garantire una ampiezza minima che permetta affrontare l'impatto di multiple tempeste o come si assume in questo lavoro, si sceglie un'ampiezza minima fissa che permetta l'accesso ed il lavoro dei macchinari utilizzati per riparare i danni provocati nell'entroterra. (riparare passeggiate marittime). In accordo con questo criterio abbiamo scelto di utilizzare un valore di 5 metri.

Per quanto riguarda i limiti delle funzioni, la vulnerabilità minima (0) si verificherà quando l'ampiezza della spiaggia è uguale all'ampiezza di controllo della spiaggia più l'arretramento indotto dalla tempesta con dato T_r ($\Delta X * T_r$), più due volte l'arretramento della linea della spiaggia associata alla tempesta che ha il 50% di probabilità di accadimento (periodo di ritorno

di 50 anni). In termini più semplici la soglia massima rappresenta la situazione nella quale, quando un pericolo indotto dalla tempesta corrispondente al periodo di ritorno selezionato accade, la spiaggia scompare quasi completamente, essendo incapace di proteggere l'entroterra dalle possibili tempeste successive. Al contrario, la soglia minima definisce la situazione in cui, incluso presentandosi un evento estremo corrispondente al periodo di ritorno scelto, la ampiezza della spiaggia sarebbe ancora abbastanza grande per far fronte al doppio dell'arretramento della spiaggia associato ad un pericolo con una probabilità di accadimento maggiore (50% della probabilità di accadimento).

La figura 4.9 mostra un esempio dei limiti di vulnerabilità all'erosione che definiscono la configurazione ottima e quella peggiore in cui la funzione della spiaggia fallisce. La configurazione ottima è quella che conduce alla minore vulnerabilità o è uguale a zero per una tempesta determinata, mentre la configurazione del fallimento corrisponde a valori di vulnerabilità uguali o maggiori di uno.



Figure 4.9: Esempio della scelta della soglia di vulnerabilità all'erosione e definizione dell'ampiezza ottima di controllo e lo stato di fallimento (da Bosom et al, 2008)

Per quanto riguarda l'inondazione il valore minimo (0) si definisce nella situazione in cui l'intensità del run-up è uguale alle metà dell'altezza della berma massima, mentre il valore massimo (1) si presenterà quando il run-up supera di 2 metri l'altezza massima della berma.

Questi valori sono stati scelti arbitrariamente in funzione delle caratteristiche dell'area di studio e, nel caso massimo, rappresenta le condizioni di portata tracimante (overtopping) con volumi significativi di acqua che scorrono in direzione dell'entroterra. Per applicare questa metodologia in altre aree o con altri obiettivi questi valori devono essere adattati alle condizioni/requisiti specifici dell'area o della funzione che si vuole analizzare.

Al momento di definire la variabile di resilienza della costa nel calcolo degli indici si sono considerati due tipi di risposta: risposta media e risposta massima. Nel primo caso si utilizza il valore medio del recettore spiaggia (altezza media, larghezza media) in maniera da valutare il comportamento generale dell'unità analizzata. Nel secondo caso invece si utilizza il valore minimo del parametro che caratterizza la risposta (altezza minima, larghezza minima) in modo tale da mettere in risalto quelle zone della spiaggia considerate più vulnerabili, e che verrebbero modulate usando solo il valore medio visto che la scala del lavoro è regionale. Pertanto gli indici che si considerano sono quattro:

- IVE_{Med} Erosione Media
- IVE_{Max} Erosione Massima
- IVI_{Med} Inondazione Media
- IVI_{Max} Inondazione Massima

4.4.2 Scelta del periodo di ritorno

La scelta del periodo di ritorno (Tr) utilizzato nella valutazione della vulnerabilità dipende dal livello di sicurezza richiesto dai gestori costieri che allo stesso modo dipendono dall'importanza della zona retrostante alla spiaggia. In accordo con questa importanza si sceglie una probabilità di accadimento R e successivamente si stima il periodo di ritorno corrispondente per il periodo in questione L . La relazione tra queste tre variabili può essere espressa secondo (Borgman, 1963):

$$R = 1 - \left(\frac{1}{Tr}\right)^L$$

Come esempio dei criteri usati per determinare le variabili incluse in questa equazione il PAI che raccomanda un periodo minimo di interesse L di 25 anni per i lavori di protezione e ripascimenti

costieri. Questo valore viene considerato appropriato per la nostra analisi assumendo che le spiagge proteggono l'entroterra dall'impatto delle tempeste e pertanto funziona come opere di protezione costiera. Nella maggior parte delle spiagge mediterranee il fallimento della funzione di protezione della spiaggia probabilmente avrebbe ripercussioni economiche che vanno da basse a medie, che corrisponde con la probabilità massima ammissibile R, 0.5 and 0.3, rispettivamente. La sostituzione di questi valori nell'equazione appena vista dà come risultato un periodo di ritorno fra i 37 e 71 anni rispettivamente. Come conseguenza si è scelto un periodo di ritorno medio di approssimativamente 50 anni come criterio principale per valutare la vulnerabilità indotta dalle tempeste.

4.5 Metodo per valutare il fenomeno di “Overtopping”

Nelle situazioni in cui il run up supera la cresta della barriera naturale che viene considerata (duna o della berma), la parte retrostante alla barriera risulterà temporaneamente inondata. Nelle coste basse, dove è molto comune incontrare zone di alto valore naturale ed antropico e nelle zone dell'entroterra retrostanti le spiagge, sarebbe importante stimare non solo la probabilità di accadimento del rapporto run up / altezza duna ma anche fino la quantità di acqua che scorre verso terra (overtopping).

Quando il run-up indotto dal moto ondoso è significativamente maggiore della altezza delle strutture costiere si verificherà il fenomeno dell'overtopping e questo determinerà il volume totale di acqua che scorre verso l'entroterra e come conseguenza può servire come indicatore di quanto si inonderà l'entroterra in maniera temporale. Anche se tradizionalmente l'overtopping si calcola solo per le strutture di protezione costiera come scogliere o muri di contenimento marino, esiste un numero sempre più crescente di studi in cui si applica questo calcolo anche per dune e spiagge, dato che si assume che esse si comportino come elemento di protezione per far fronte alle inondazioni. (e.g. Kerper et al., 2006; Tuan et al.2006; Figlus et al. 2010).

Nella figura 4.10 possiamo osservare uno schema delle condizioni in cui avviene il fenomeno appena citato che determina il livello totale dell'acqua marina che arriva sulla costa durante una tempesta (Pullen et al., 2007) L'overtopping è una funzione dell'altezza della struttura durante un evento estremo, ad esempio la quota di un muro di sostegno o l'altezza della duna nei casi di ambienti naturali quali le spiagge.

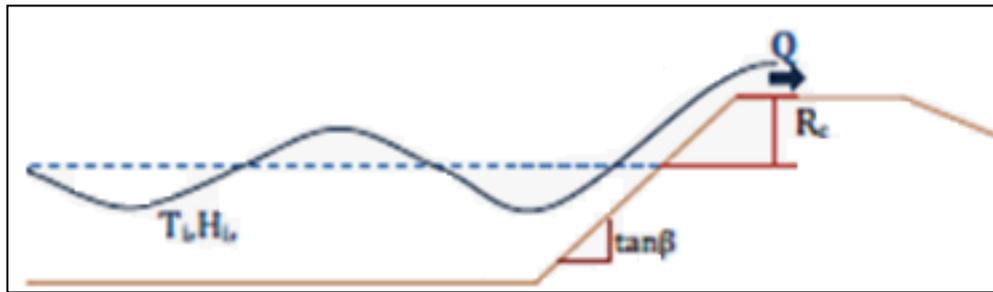


Figura 4.10 Schema delle condizioni di overtopping (da Pullen et al., 2007).

Per calcolare il flusso di acqua associato al fenomeno dell’overtopping a partire dai dati delle onde sono state proposte diverse metodologie, molte delle quali sono state utilizzate per caratterizzare il fenomeno della tracimazione dell’acqua del mare su una struttura costiera come una scogliera marittima o un frangiflutti. Ciononostante esiste un abbondante numero di studi in cui queste formulazioni sono state adattate per essere utilizzate per valutare la tracimazione di una duna o di una spiaggia(e.g. Kobayashi et al., 1996; Tuan et al. 2006).

Tra tutti i modelli proposti viene utilizzato il modello di Hedges and Reis (1998) con i coefficienti modificati successivamente da (2008). Il modello da come risultato il valore della portata di acqua che sorpassa la duna espressa come volume su metro lineare (m³/m). Le formulazioni del modello si mostrano nella Figura 4.11

$$\frac{Q}{\sqrt{gR_c^3}} = \begin{cases} A \left(1 - \frac{R_c}{\gamma r R_{max}}\right)^B & 0 \leq \frac{R_c}{\gamma r R_{max}} < 1 \\ 0 & \frac{R_c}{\gamma r R_{max}} \geq 1 \end{cases}$$

$$A = \begin{cases} 0.0033 & \text{for } 0.05 \leq \tan \beta < 0.1 \\ 0.0033 + \frac{0.0025}{\tan \beta} & \text{for } 0.083 \leq \tan \beta \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 10.2 - \frac{0.275}{\tan \beta} & \text{for } 0.05 \leq \tan \beta < 0.1 \\ 2.8 + \frac{0.65}{\tan \beta} & \text{for } 0.13 \leq \tan \beta \leq 0.2 \end{cases}$$

Figura 4.11 Schema del Modello di Hedges and Reis (1998) per il calcolo dell’overtopping.

R_{max} rappresenta il valore massimo del run up durante una tempesta, γr è il coefficiente di rugosità (1 per le sabbie) R_c è l’elevazione massima della duna/cresta relativamente al livello del mare, A e B sono dei coefficienti numerici dati da (Reis et al. 2008).

Ordine di grandezza Overtopping Q	Categoria di vulnerabilità
$10^{-6} - 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$	Molto Bassa
$10^{-5} - 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$	Bassa
$0.001 - 0.01 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$	Media
$0.01 - 0.1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$	Alta
$> 0.1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$	Molto Alta

Tabella:4.6 Ordine di grandezza dei volumi d'acqua dovuti dell'overtopping e categorie di vulnerabilità associate a tali valori secondo il modello Hedges and Reis.

L'analisi dell'overtopping si effettua per due situazioni differenti:

- 1) Inondazione della spiaggia. Nel calcolo delle categorie di vulnerabilità si usa la pendenza della battigia per il calcolo del run up ed il piede della duna come altezza limite nella formula. In questo modo si valuta la vulnerabilità della spiaggia emersa ad essere allagata dalle mareggiate.
- 2) Inondazione dell'entroterra. Nel calcolo delle categorie di vulnerabilità si usa la pendenza della spiaggia per il calcolo del run up e l'altezza massima della duna come altezza limite nella formula. In questo caso invece si considera la vulnerabilità dell'entroterra costiero ad essere inondato, considerando la spiaggia intera come una barriera di difesa verticale

4.6 Metodologia per valutare il potenziale rischio costiero

Come accennato nel paragrafo 2.3 per effettuare un'analisi del rischio costiero bisognerebbe quantificare il danno socio economico associato ai danni causati dalle delle tempeste. Considerando che in questo lavoro le spiagge sono state considerate come funzione di protezione dell'entroterra costiero è importante conoscere le risorse presenti in queste zone che si vedrebbero danneggiate nel caso in cui la spiaggia smette di svolgere la sua funzione: pertanto è stata eseguita un'analisi dell'uso del suolo (fonte regione Sardegna 2003) della fascia costiera restrostante la linea di riva delle spiagge, considerando una fascia di 300 metri di ampiezza (buffer analysis_Gis) ed identificando i tipi di habitat presenti nell'entroterra con le rispettive superfici di appartenenza (Figura 4.12).

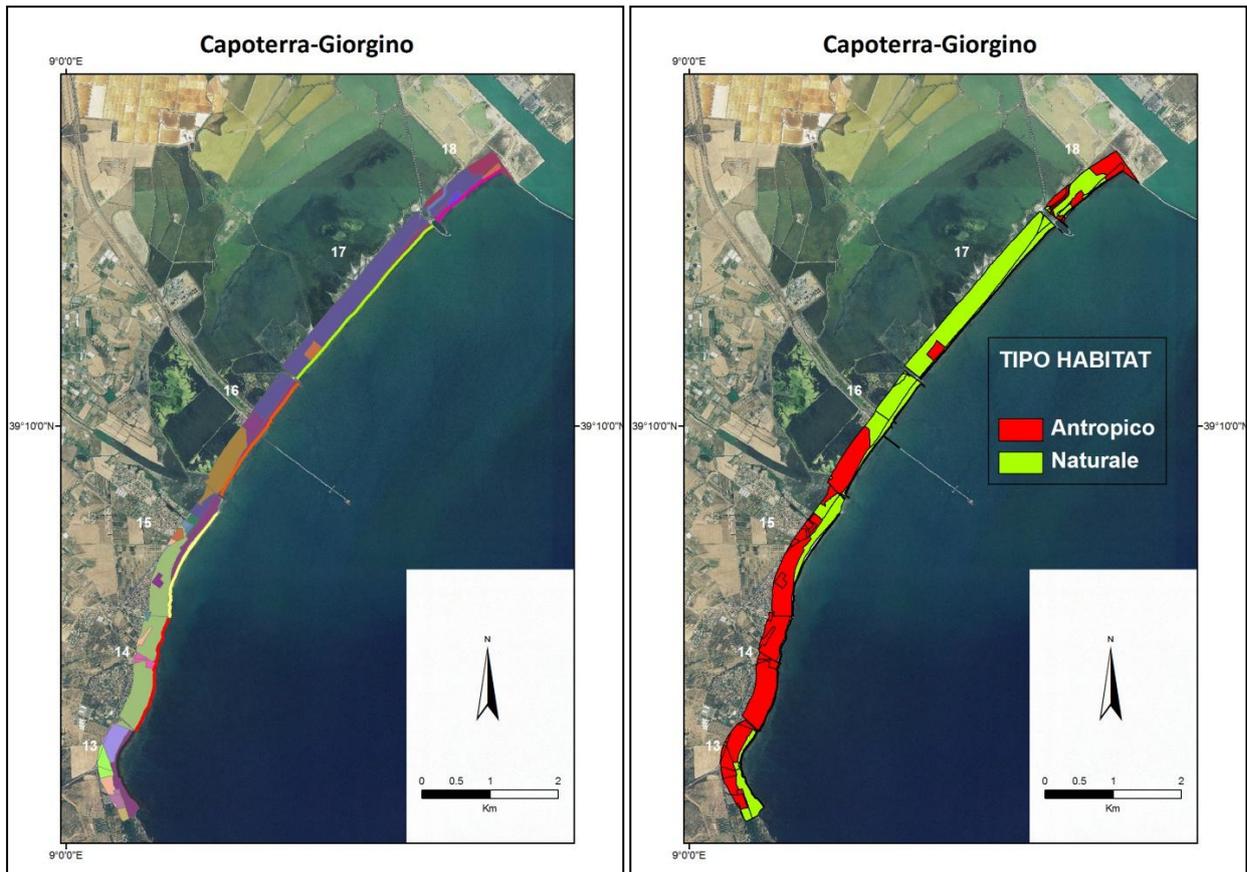


Figura 4.12 Esempio della classificazione degli usi costieri in “naturali” o “antropici” per la zona di Capoterra / Giorgino.

Una volta identificati, gli usi sono stati classificati in due grandi categorie, facendo la distinzione tra zone naturali e zone antropizzate, in modo da evidenziare le zone più sensibili da un punto di vista economico ad un possibile danneggiamento. Di tali categorie è stata calcolata la proporzione areale all'interno di ogni unità spiaggia e le stesse proporzioni sono state assegnate alla lunghezza della spiaggia corrispondente in modo da poter confrontare i risultati con quelli della vulnerabilità (espressi in longitudine).

CAPITOLO 5

Risultati della ricerca

5.1 Classificazione Tempeste di mare

I risultati della classificazione gerarchica in 5 gruppi effettuata sulle 412 tempeste identificate utilizzando il contenuto energetico come principale variabile di raggruppamento si mostrano nella tabella 5.1. Le tempeste di tipo 1 - Deboli - sono le più numerose (179) con una durata media breve (8 ore) ed una Hs media di approssimativamente 4.11 m. Anche il tipo 2 – Moderate - è abbastanza frequente (148 tempeste) con una durata circa il doppio rispetto alla categoria precedente (17 ore). Il numero degli eventi della classe 3 – Significative - si mantiene relativamente alto (66 tempeste) con una durata media di 37 ore. Il gruppo 4 - Severe - presenta un numero relativamente basso di eventi (13) con una durata media di 65 ore ed un'altezza massima di circa 5.83 m. Infine la categoria 5 –estreme- è rappresentata da 6 eventi con una durata media di ben 94 ore, quasi 4 giorni. Bisogna ricordare che nello studio si considerano anche gli eventi a doppio picco, che sono come delle tempeste doppie considerate nello stesso evento se tra i picchi di due tempeste successive non passano più di 72 ore.

Categorie Tempeste	Numero Tempeste	Hs (m)	Tp (sec)	Energia (m ² *dt)	Durata (Ore)
Tipo 1: Deboli	179	4.11	8.33	115	8
Tipo 2: Moderate	148	4.87	9.19	328	17
Tipo 3: Significative	66	5.44	9.56	727	37
Tipo 4: Severe	13	5.83	10.01	1373	65
Tipo 5: Estreme	6	6.18	10.05	2130	94

Tabella 5.1 Risultati che mostrano la classificazione delle tempeste della Sardegna in 5 gruppi secondo il metodo del legame medio.

La figura 5.1 mostra la caratterizzazione delle 5 categorie di tempeste in funzione dei principali parametri usati per la classificazione (Hs, Tp, Durata, Energia). Si può notare come all'aumentare dell'intensità delle diverse classi di tempeste, aumentino proporzionalmente tutti i parametri che descrivono le tempeste, con il contenuto energetico e la durata caratterizzati da maggior variabilità rispetto ai valori di Hs e Tp, la cui poca variabilità risulta essere dovuta probabilmente al fatto che i dati di moto ondoso siano simulati e non reali.

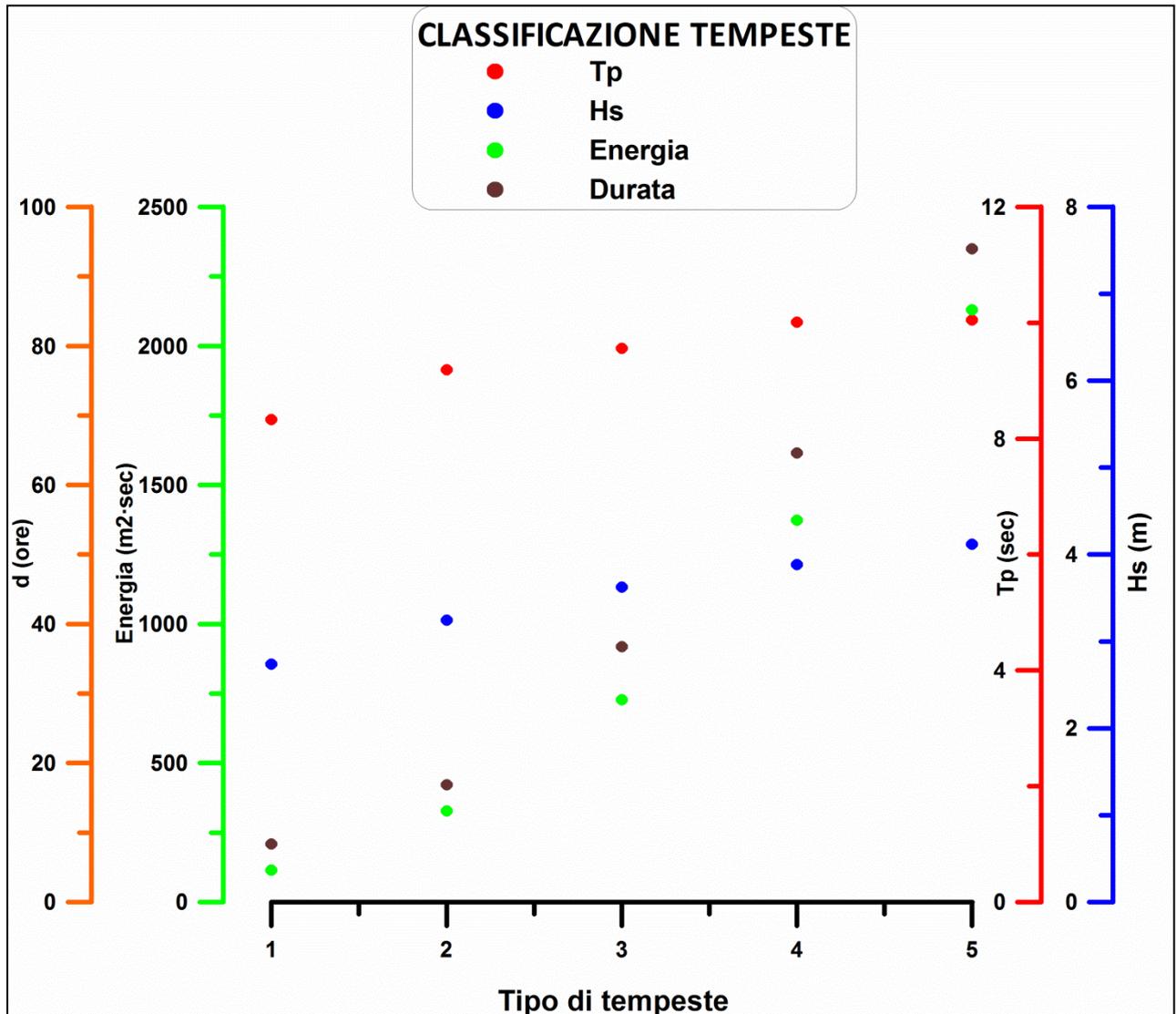


Figura 5.1 Differenti parametri che caratterizzano le 5 classi delle tempeste di mare classificate.

5.1.1 Direzione e stagionalità

Dato che la direzione del moto ondoso e la distribuzione stagionale sono importanti al momento di valutare l'impatto sulla costa, entrambe le variabili sono state analizzate. La direzione del moto ondoso durante le tempeste ha un'influenza importante nella variabilità spaziale dell'intensità dell'impatto, visto che l'orientazione relativa della costa rispetto alle onde "estreme" e la configurazione geomorfologica, determineranno il grado di esposizione. Nel nostro caso, lavorando a scala regionale, si sono considerate tutte le direzioni di travessia possibili che possono interagire con le spiagge, considerando un gruppo di direzioni di moto ondoso entrante caratteristico per ogni settore ondoso in funzione dell'orientazione della costa e dei dati disponibili (tabella 5.2). D'altro lato anche la distribuzione stagionale determina il tipo e l'intensità dell'impatto atteso in alcune zone dato che l'uso della spiaggia varia in funzione delle stagioni (configurazione estiva o invernale) e di conseguenza, l'accadimento delle tempeste in diversi periodi dell'anno può generare differenti impatti in termini dell'uso della spiaggia colpita. Un esempio di questa interazione succede quando in un anno climatico qualche tempesta "tardiva" avviene (fuori dalle normali stagioni di tempesta) in spiagge che hanno bisogno di un'ampiezza di spiaggia "ottima" determinata all'inizio della stagione estiva per soddisfare le esigenze turistiche. Pertanto la spiaggia non potrà essere usata in maniera efficiente a causa della potenziale perdita di ampiezza ottima (Valdemoro & Jiménez, 2006). In questo caso la conoscenza della probabilità di accadimento delle tempeste di una determinata intensità durante l'anno, permetterà ai gestori identificare le possibili interazioni con l'uso della spiaggia o determinare la stagione dell'anno nella quale bisognerebbe assicurare la funzione di protezione della spiaggia, considerando la mitigazione dell'impatto sulle infrastrutture esistenti.

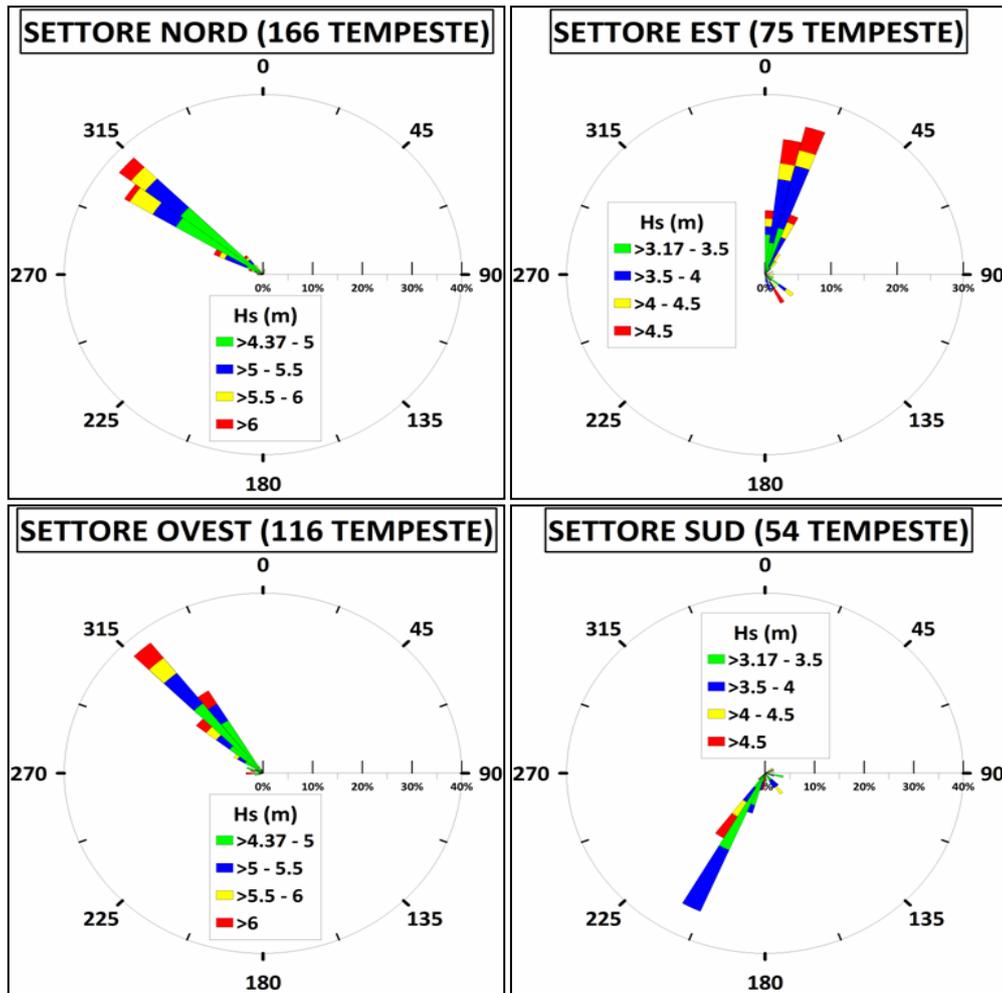


Figura 5.2 Distribuzione delle direzioni delle tempeste classificate in Sardegna nei diversi settori ondosi.

La figura 5.2 illustra la distribuzione direzionale delle tempeste nell'area di studio divise per i settori ondosi selezionati. Si nota come l'isola presenti direzioni predominanti differenti: i settori occidentali (Nord ed Ovest) sono caratterizzati principalmente da eventi di maestrale mentre nei settori Sud ed Est predominano rispettivamente eventi di libeccio (Sud Est) ed eventi di grecale (Nord Est).

Considerando la variabilità spaziale delle tempeste che agiscono sulle coste della Sardegna, è interessante valutare la distribuzione delle diverse categorie nei vari settori ondosi della costa. Dalla tabella 5.2 si mostrano i risultati di come si suddividono gli eventi estremi classificati nei vari settori ondosi della Sardegna. Ancora una volta si nota come ci si poteva aspettare una diversità dei risultati per i settori orientali e per quelli occidentali. Gli eventi di tipo 4 e 5, considerati i più energetici, si presentano solo nei settori Nord ed Ovest, mentre nella costa orientale sono presenti solo le prime 3 categorie, facendo eccezione per un'unica tempesta

registrata nel settore Est classificata come “severa”. Inoltre si puo notare come gli eventi siano piu numerosi per i settori Nord ed Ovest (166 e 117 rispettivamente) rispetto ai settori Est e Sud (54 e 75 rispettivamente).

SETTORE	Numero Tempeste	Settore Travessia	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
SUD	54	45° / 270°	38	12	3	0	0
EST	75	0° / 180°	48	16	10	0	1
NORD	166	270° / 90°	56	68	29	10	3
OVEST	117	90° / 360°	37	52	23	3	2

Tabella 5.2 Caratterizzazione dei settori ondosi in funzione del numero e del tipo di tempeste classificate

Nella figura 5.3 si mostra la distribuzione dei tipi diversi di tempeste nei diversi settori ondosi della Sardegna espressa in % rispetto ai settori. Risulta evidente che le classi di tempeste deboli e moderate appaiano principalmente nei settori orientali con piu dell’80% delle tempeste che appartengono a queste due categorie e che gli eventi considerati piu estremi (tipo 4 e 5) rappresentino meno del 10% rispetto al totale.

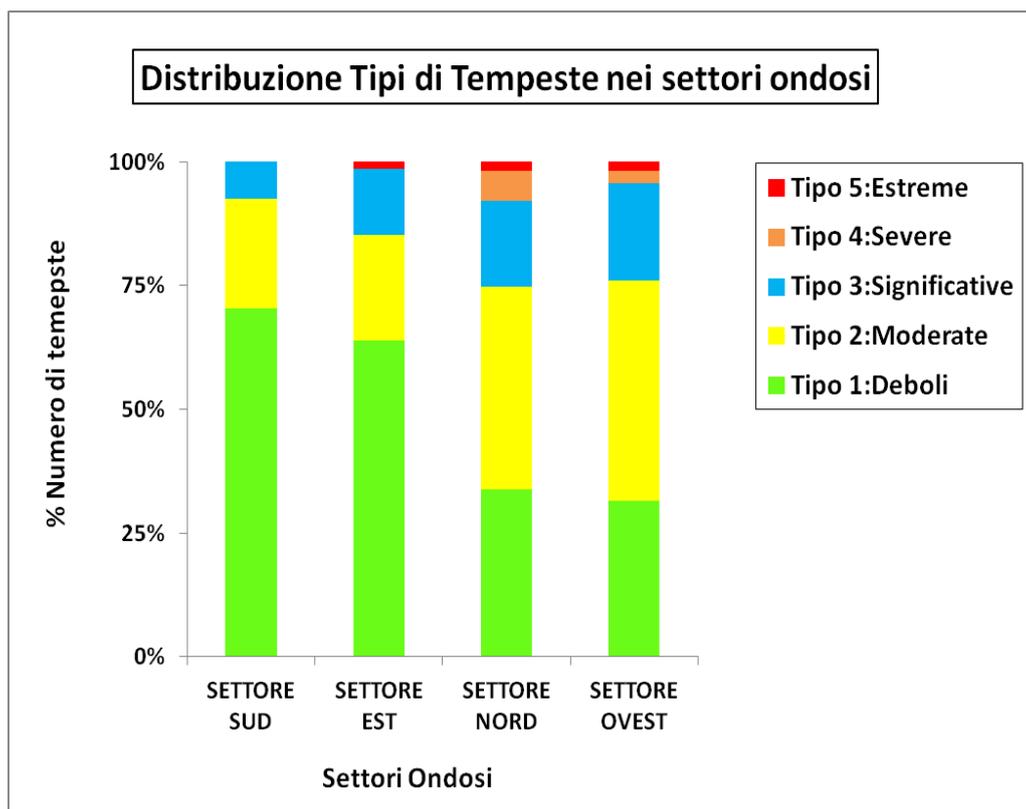


Figura 5.3 Distribuzione dei tipi diversi di tempeste nei diversi settori ondosi della Sardegna

Questa analisi della distribuzione stagionale delle tempeste registrate nell’area ci permette definire un anno climatico medio con 2 stagioni distinte in funzione delle tempeste di moto

ondoso predominante: la stagione di tempesta che si estende da novembre a marzo e la stagione di calma che va da aprile ad ottobre (Figura 5.4)

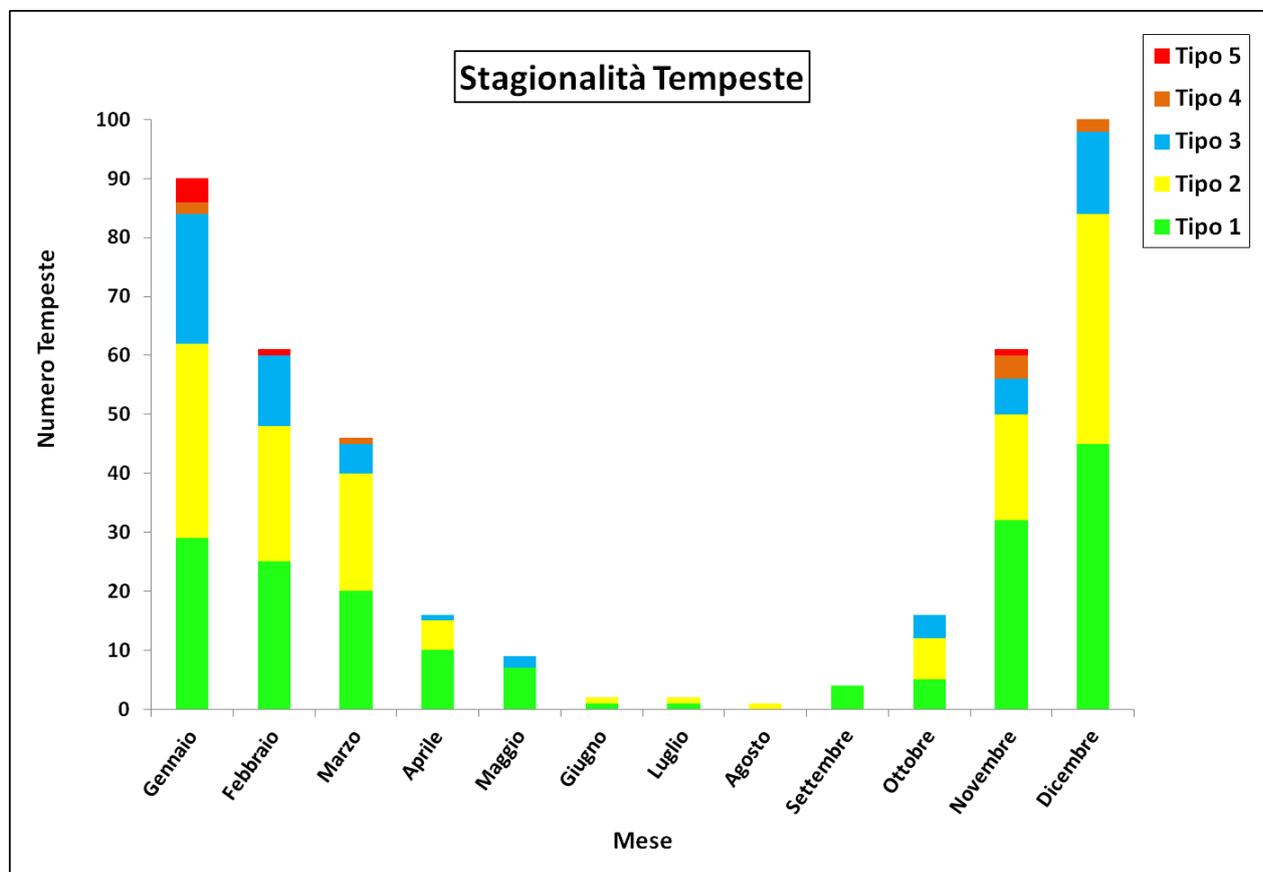


Figura 5.4 Distribuzione stagionale del numero di eventi estremi appartenenti alle 5 categorie tipo, divisi per mese di accadimento.

Il tipo di tempeste 1 e 2 si presentano durante tutto l'anno con una maggiore frequenza nella stagione invernale. Viceversa le classi più energetiche (tipo 3, 4, 5) si sono registrate solo durante le stagioni tormentose. Infine bisogna menzionare che la maggior parte degli eventi di tipo 5 si verificano nel mese di gennaio (4) mentre gli eventi di tipo 4 sono più frequenti nei mesi di novembre e dicembre.

5.2 Valutazione delle Pericolosità estreme

Dopo aver identificato e caratterizzato le tempeste di mare si calcolano le serie temporali dell'erosione e dell'inondazione associate ad ogni tempesta. Queste serie vengono successivamente adattate ad una distribuzione estrema, la distribuzione generalizzata di Pareto in maniera da ottenere i valori delle pericolosità estreme definite in funzione del periodo di accadimento del fenomeno. Nel caso dell'inondazione si considera il pericolo di allagamento dell'entroterra considerando la pendenza della spiaggia nei calcoli della risalita dell'onda (run up) mentre nel caso dell'erosione si considera l'arretramento della linea di costa ed il volume di sedimenti erosi ottenuti con le equazioni strutturali del modello Mendoza-Jimenez adattato alle caratteristiche delle coste della Sardegna.

Nella figura 5.5 e 5.6 si possono osservare i valori estremi del run up calcolati per i quattro tipi diversi di spiagge e per i quattro settori di moto ondoso considerati. Possiamo osservare come i valori maggiori di run up corrispondano a valori di pendenze maggiori (tipo 3 e tipo 4) e che appartengono ad i settori occidentali, caratterizzati dall'avere condizioni meteo-marine più intense (settore Nord, e settore Ovest).

Nella figura 5.7 si possono osservare i valori estremi del volume di sedimenti eroso dall'impatto delle tempeste, per i quattro settori di moto ondoso e per i 2 tipi principali di spiaggia, le spiagge riflettenti intermedie e quelle dissipative intermedie. Si nota in generale come le spiagge più riflettenti siano caratterizzate da maggiori valori di sedimento eroso e dal grafico si mostrano ancora una volta le differenze nelle caratteristiche delle condizioni ondose e morfologiche, con le coste occidentali caratterizzate da valori più alti di erosione. Questo dovuto al fatto che le spiagge della costa occidentale hanno in generale un comportamento idrodinamico dissipativo intermedio, per cui l'arretramento della linea di riva è più elevato rispetto alle spiagge più riflettenti, caratterizzate da maggiori valori di erosione di volume di sedimento.

Nella figura 5.8 si possono osservare i valori estremi dell'arretramento della linea di riva calcolati a partire dalle equazioni parametriche per i quattro settori di moto ondoso e per i 2 tipi principali di spiaggia, le spiagge con caratteristiche riflettenti intermedie e quelle dissipative intermedie. Si nota come in questo caso, al contrario del precedente, siano le spiagge a carattere dissipativo a presentare i valori maggiori di arretramento della linea di riva con le coste occidentali caratterizzate da valori più alti di erosione.

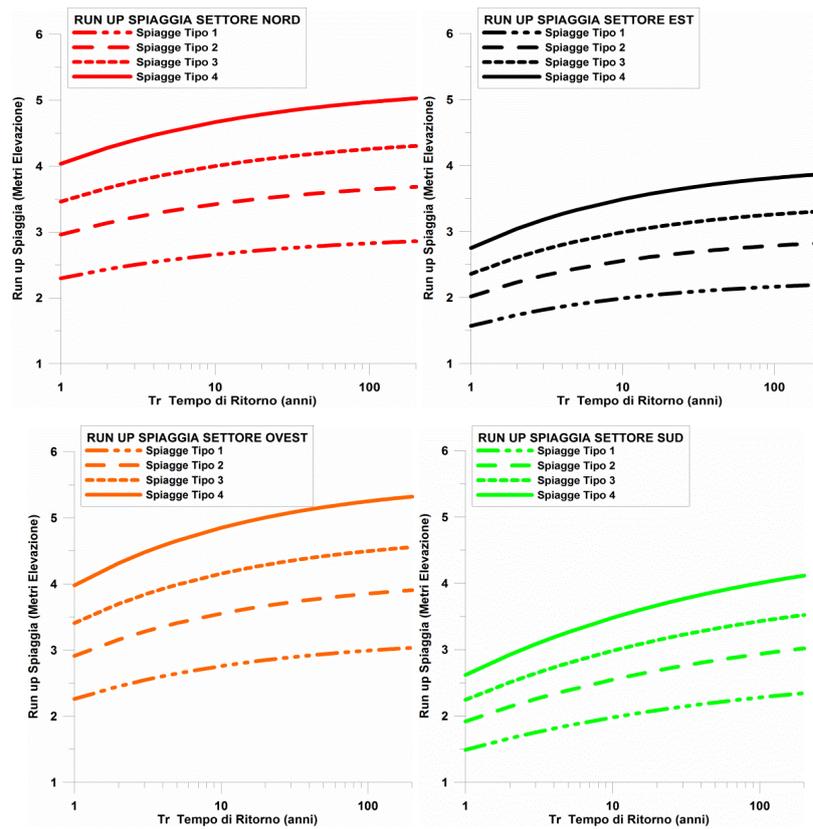


Figura 5.5 Valori estremi del run up per i 4 settori della Sardegna ed i 4 tipi di spiaggia differente usando la pendenza della battigia

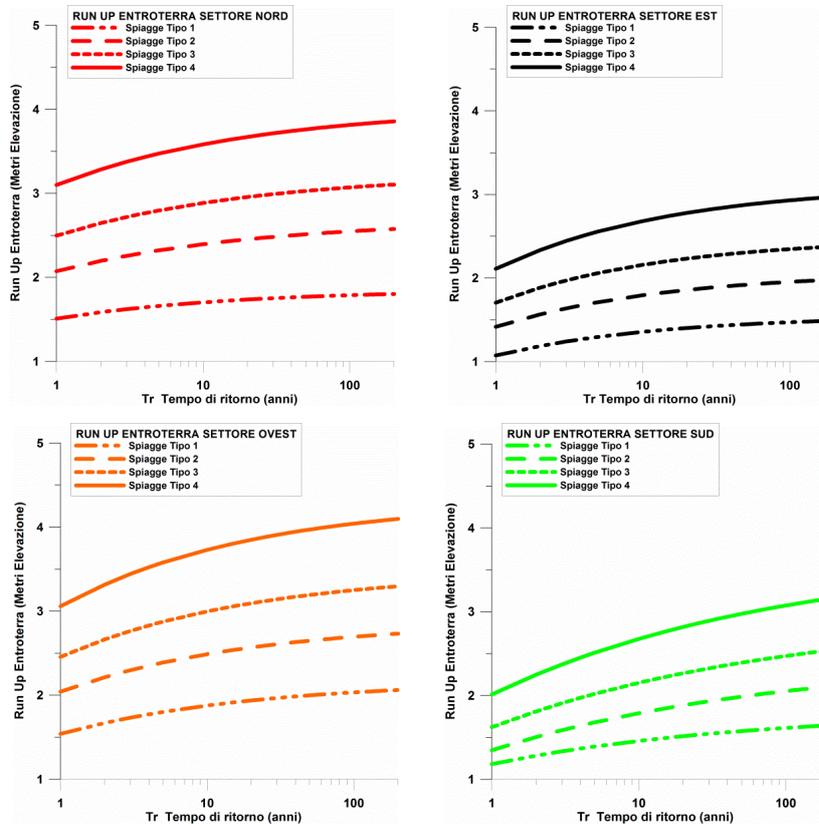


Figura 5.6 Valori estremi del run up per i 4 settori della Sardegna ed i 4 tipi di spiaggia differente usando la pendenza della spiaggia intera.

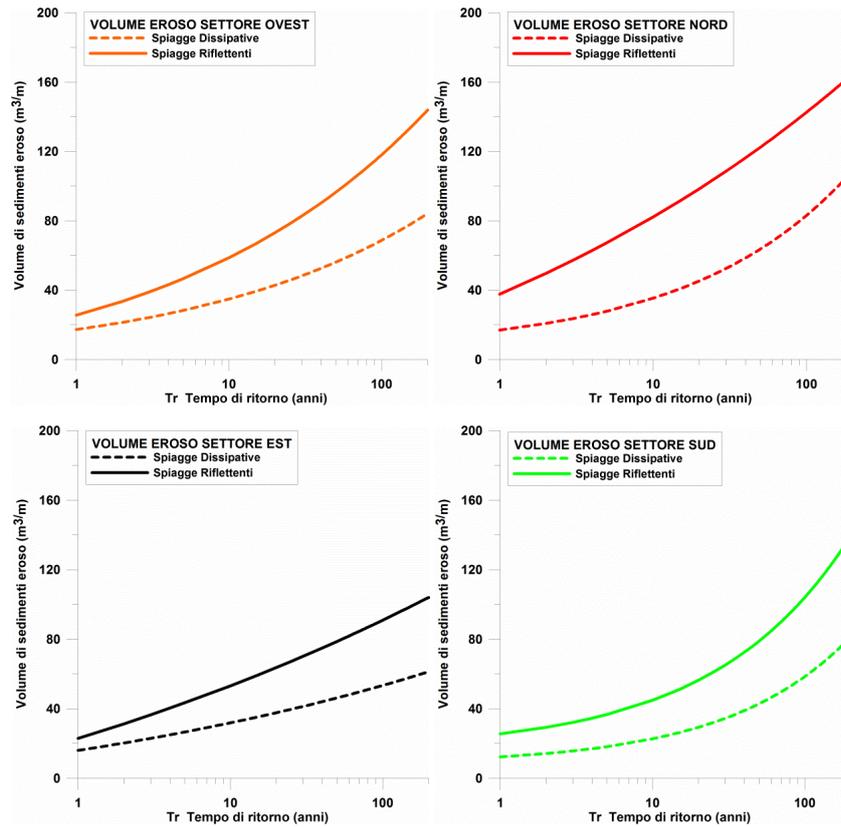


Figura 5.7 Valori estremi dei volumi erosi per i 4 settori della Sardegna e per i 2 tipi principali di spiagge (riflettenti e dissipative).

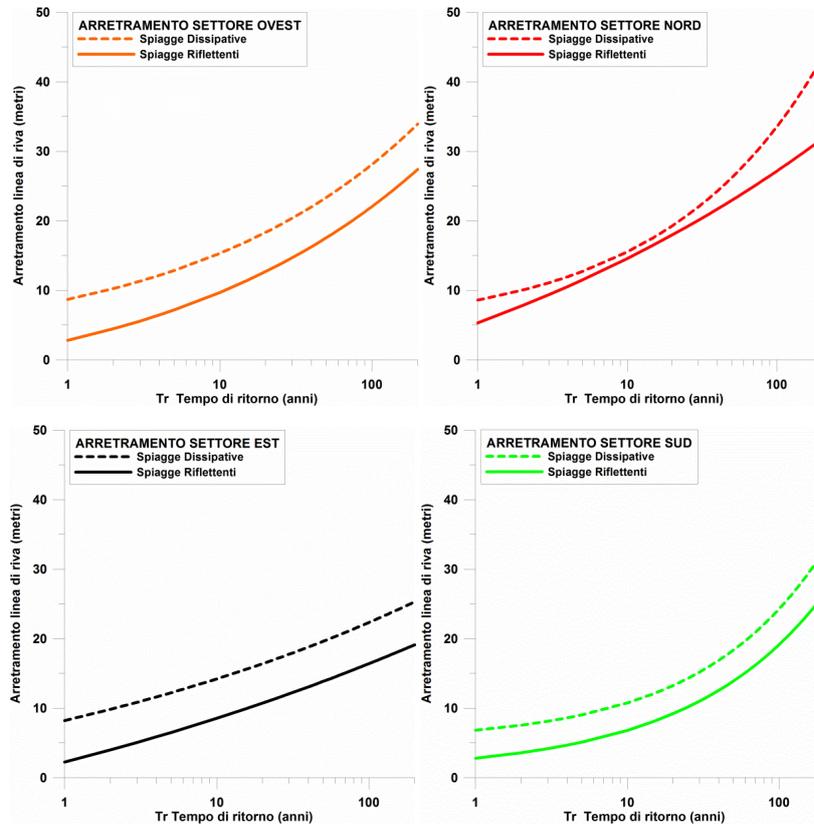


Figura 5.8 Valori estremi dell'arretramento della linea di riva per i 4 settori della Sardegna e per i 2 tipi principali di spiagge (riflettenti e dissipative).

5.3 Vulnerabilità costiera in Sardegna

Dopo aver determinato le pericolosità estreme si valuta la vulnerabilità confrontando i pericoli con la risposta della costa, definendo i limiti delle funzioni di vulnerabilità e scegliendo il periodo di ritorno dell'analisi. In questo modo e si possono ottenere i valori della vulnerabilità all'erosione e all'inondazione indotta dalle tempeste di mare per ogni spiaggia. Per farlo si sono introdotti i dati della vulnerabilità della spiaggia in una Database GIS per una migliore interpretazione dei risultati. Inoltre questa informazione può essere facilmente combinata e sovrapposta con altre informazioni territoriali come l'uso del suolo nel caso in cui si voglia realizzare una valutazione del rischio dell'entroterra costiero.

5.3.1 Vulnerabilità delle spiagge della Sardegna a erosione ed inondazione

Per meglio interpretare il comportamento della vulnerabilità si sono utilizzate due misure diverse al momento di definire la risposta della costa. Quando si definisce la variabile intermedia degli indici di vulnerabilità si considera la risposta della costa media o minima (peggiori condizioni) in questi termini:

Indicatore	Vulnerabilità media	Vulnerabilità massima
Indice erosione ($\Delta V, \Delta X$)	Ampiezza media spiaggia	Ampiezza minima spiaggia
Indice inondazione (Run up)	Altezza media Duna	Altezza minima Duna

Tabella 5.3 Diversi tipi di risposta della costa utilizzati per calcolare gli indicatori di vulnerabilità.

Quando si usano i parametri medi che caratterizzano la risposta della spiaggia si possono tralasciare nell'analisi alcuni punti critici all'interno di quelle spiagge che in generale presentano una vulnerabilità bassa o media. In questo senso abbiamo introdotto anche l'indice massimo di risposta che serve per identificare tutte le spiagge nelle quali possono sorgere problemi molto locali e puntuali dovuto a configurazioni irregolari della spiaggia. Pertanto l'uso della media del parametro servirà per valutare la vulnerabilità "rappresentativa" della spiaggia mentre l'uso del valore massimo darà indicazioni sulle condizioni peggiori che si possono riscontrare lungo la spiaggia.

Le figure 5.9 e 5.10 ci danno una visione generale di come si distribuisce spazialmente la vulnerabilità a scala regionale considerando entrambe le pericolosità stimate (media e minima)

per un periodo di ritorno di 50 anni. Si deve specificare che gli spazi vuoti rappresentano coste rocciose, spiagge di ghiaia, aree con costruzioni marittime (porti e marine) e le spiagge che non sono state considerate nell'analisi per dimensioni ($< 500\text{m}$) o per mancanza di dati (le zone di Alghero e Olbia per mancanza dei DEM). Anche se le spiagge rappresentano circa 500 km della linea costiera della Sardegna (Piano Azione Coste) d'ora in poi i risultati di Vulnerabilità espressi in termini di percentuale della linea di costa si riferiranno sempre alla lunghezza totale delle coste sedimentaria (spiagge sabbiose) considerate in questa lavoro: 246.981 Km.

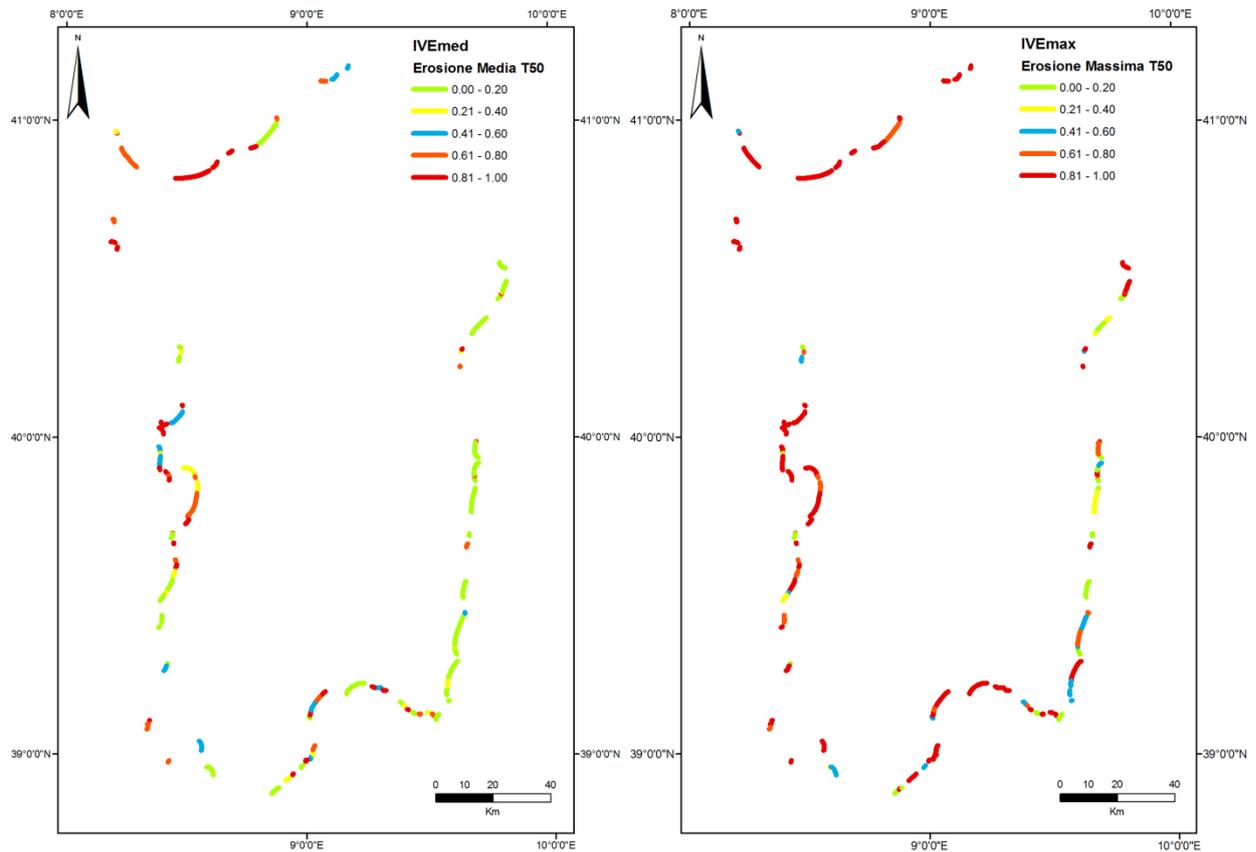


Figura 5.9 Vulnerabilità all'erosione (media e massima) indotta dalle tempeste di mare per tutte le spiagge situate all'interno dell'area di studio della Sardegna (scala regionale).

In generale si può apprezzare per entrambi i casi un'importante variabilità spaziale, specialmente per l'erosione ed in generale un aumento delle categorie alte abbastanza significativo (categorie arancione/rosso) al momento di considerare il parametro massimo rispetto a quello medio soprattutto per i settori occidentali (Nord ed Ovest).

I risultati globali appena visti possono esprimersi in termini di lunghezza di costa appartenente alle rispettive categorie di vulnerabilità. Nei grafici a torta 5.11 e 5.12 si mostra il percentuale di

Km che contraddistingue ogni categoria di vulnerabilità considerando l'indice medio e l'indice massimo di erosione (5.11) e di inondazione (5.12).

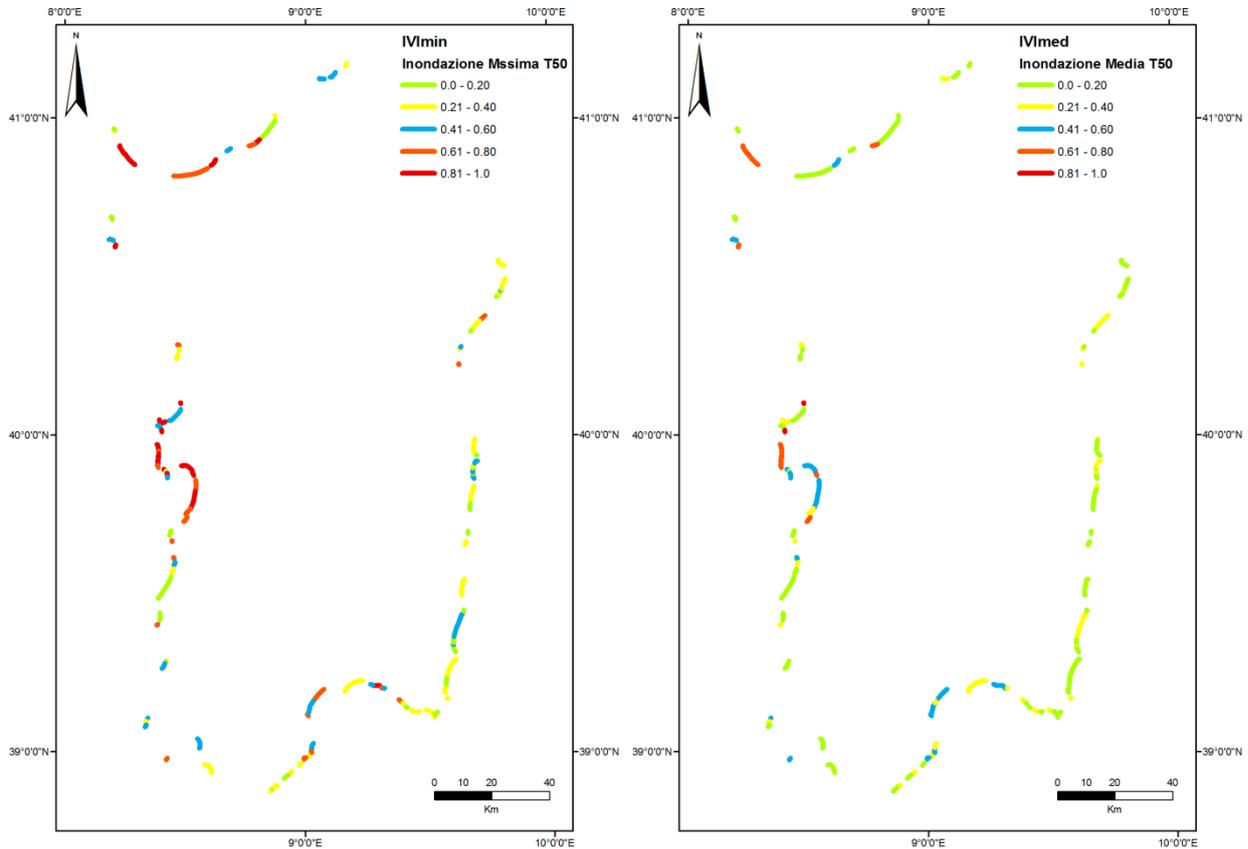


Figura 5.10 Vulnerabilità all'erosione (media e massima) indotta dalle tempeste di mare per tutte le spiagge situate all'interno dell'area di studio della Sardegna (scala regionale).

Nel primo caso (5.11) quando si utilizza l'ampiezza media i risultati indicano che il 44% delle spiagge cade nella categoria alta o molto alta mentre l'estensione costiera della categoria più bassa di vulnerabilità risulta la più importante, (36%). Quando si considera la vulnerabilità massima le percentuali di spiaggia corrispondenti alle due categorie più vulnerabili aumentano fino al 74% che si interpreta che anche se le spiagge sono in termini generali capaci di resistere all'erosione indotta, presentano punti deboli suscettibili di essere impattati significativamente.

Nel secondo caso (5.12) quando si considera la risposta media, le categorie più basse rappresentano la maggior parte della lunghezza della costa (74% bassa + molto bassa) mentre le categorie di vulnerabilità alta rappresentano solo il 10% del totale. Basandoci solo su questo risultato le spiagge sono poco vulnerabili all'inondazione, considerando invece la risposta minima le categorie alte aumentano fino al 43% dimostrando come quasi la metà delle spiagge

della Sardegna risulta avere zone critiche altamente vulnerabili a processi di inondazione marina nell'entroterra.

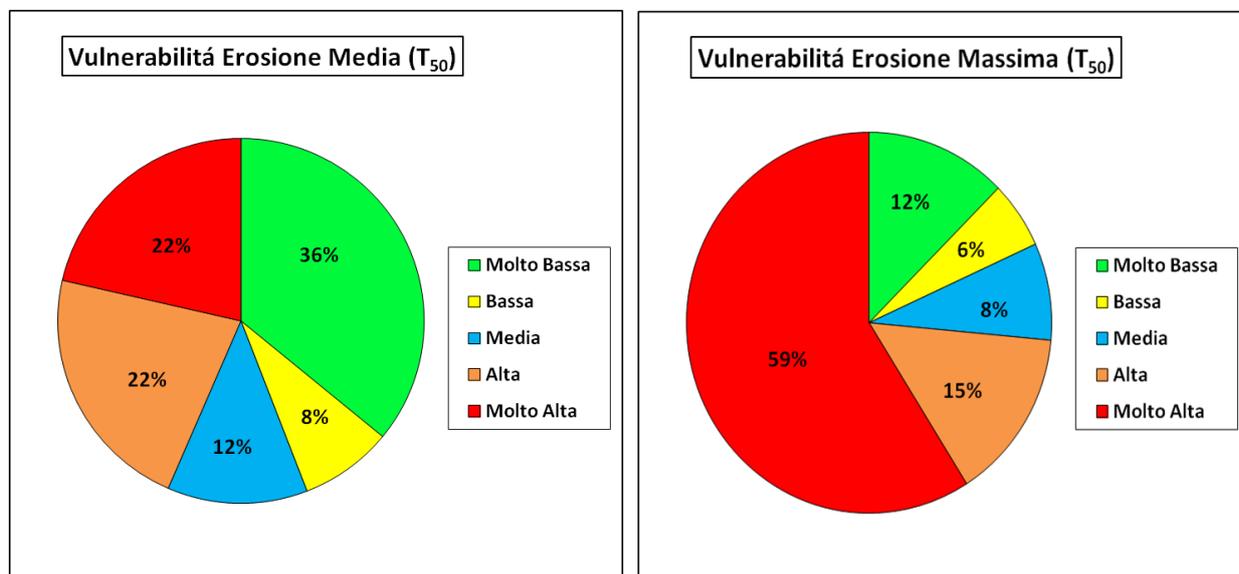


Figura 5.11 Percentuale di km di costa che corrispondono ad ogni categoria di vulnerabilità all'erosione per un periodo di ritorno di 50anni. La vulnerabilità media (sinistra) è stata calcolata considerando l'ampiezza media della spiaggia al momento di definire le variabili intermedie di vulnerabilità, mentre l'ampiezza minima della spiaggia è stata usata per la vulnerabilità massima (destra).

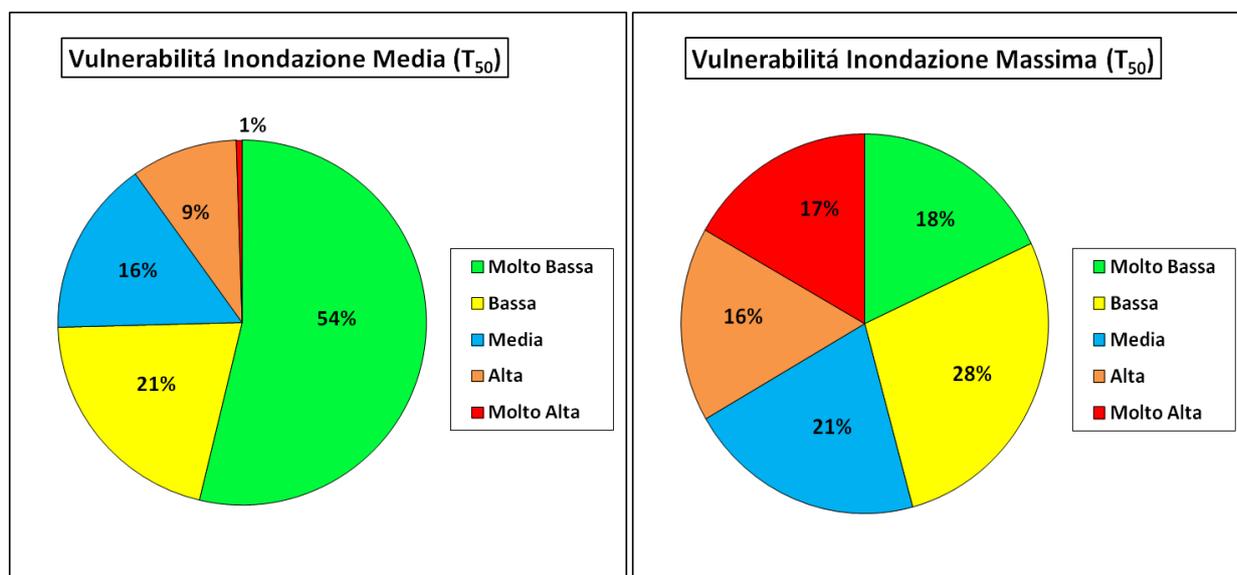


Figura 5.12 Percentuale di km di costa che corrispondono ad ogni categoria di vulnerabilità all'inondazione per un periodo di ritorno di 50 anni. La vulnerabilità media (sinistra) è stata calcolata considerando l'altezza media della cresta massima della spiaggia al momento di definire le variabili intermedie di vulnerabilità, mentre l'altezza minima della spiaggia è stata usata per la vulnerabilità massima (destra).

Per valutare il contributo del moto ondoso nelle valutazioni di vulnerabilità i risultati sono stati raggruppati in funzione dei settori ondosi (da figura 5.13 a 5.16) considerando sempre i due tipi di risposta (media e massima). Nella parte sinistra dei grafici si mostra la lunghezza della costa (Chilometri di spiagge) che appartiene ad ogni categoria di vulnerabilità mentre nel lato destro si esprimono gli stessi risultati in termini di % all'interno del settore stesso. Per quanto riguarda l'erosione media (figura 5.13) i settori con le categorie più altamente vulnerabili sono principalmente quelli occidentali (Nord ed Ovest) anche se il settore Sud presenta più del 25% della costa che cade nelle due categorie più alte di vulnerabilità. Considerando la funzione massima è evidente come le categorie peggiori di vulnerabilità aumentino notevolmente essendo quasi l'80% del totale per i settori Sud, Nord ed Ovest. Al contrario nel settore Est è presente solo un 18% di categorie alte o molto alte, probabilmente dovuto al fatto che le spiagge di questo settore presentano una larghezza di spiaggia sufficiente a far fronte all'erosione dovuta agli eventi estremi che non sono così intensi come quelli occidentali. In generale questo significa che la maggior parte della costa presenta localmente dei punti ad alta criticità in termini di vulnerabilità all'erosione indotta dalle tempeste e che questo comportamento è stato messo in luce adeguatamente utilizzando i punti più sensibili delle spiagge al momento di parametrizzare la risposta costiera.

Nel caso dell'inondazione questo comportamento risulta ancora più accentuato, infatti nel caso del valore medio possiamo notare come in generale le spiagge siano poco vulnerabili all'inondazione (figura 5.15), con le uniche categorie alte che appaiono nei settori nord ed ovest e molto alte che rappresentano meno del 15 % del totale. Se invece si considera il caso di vulnerabilità massima (figura 5.16) si nota come aumentino le categorie peggiori (rosse ed arancioni) e che vengano messe in evidenza le zone più sensibili all'inondazione dell'entroterra costiera che risultano essere più significative nei settori orientali, sud ed est rispetto ai settori occidentali che, nonostante tutto, presentano una maggiore lunghezza della categoria più estrema (molto alta).

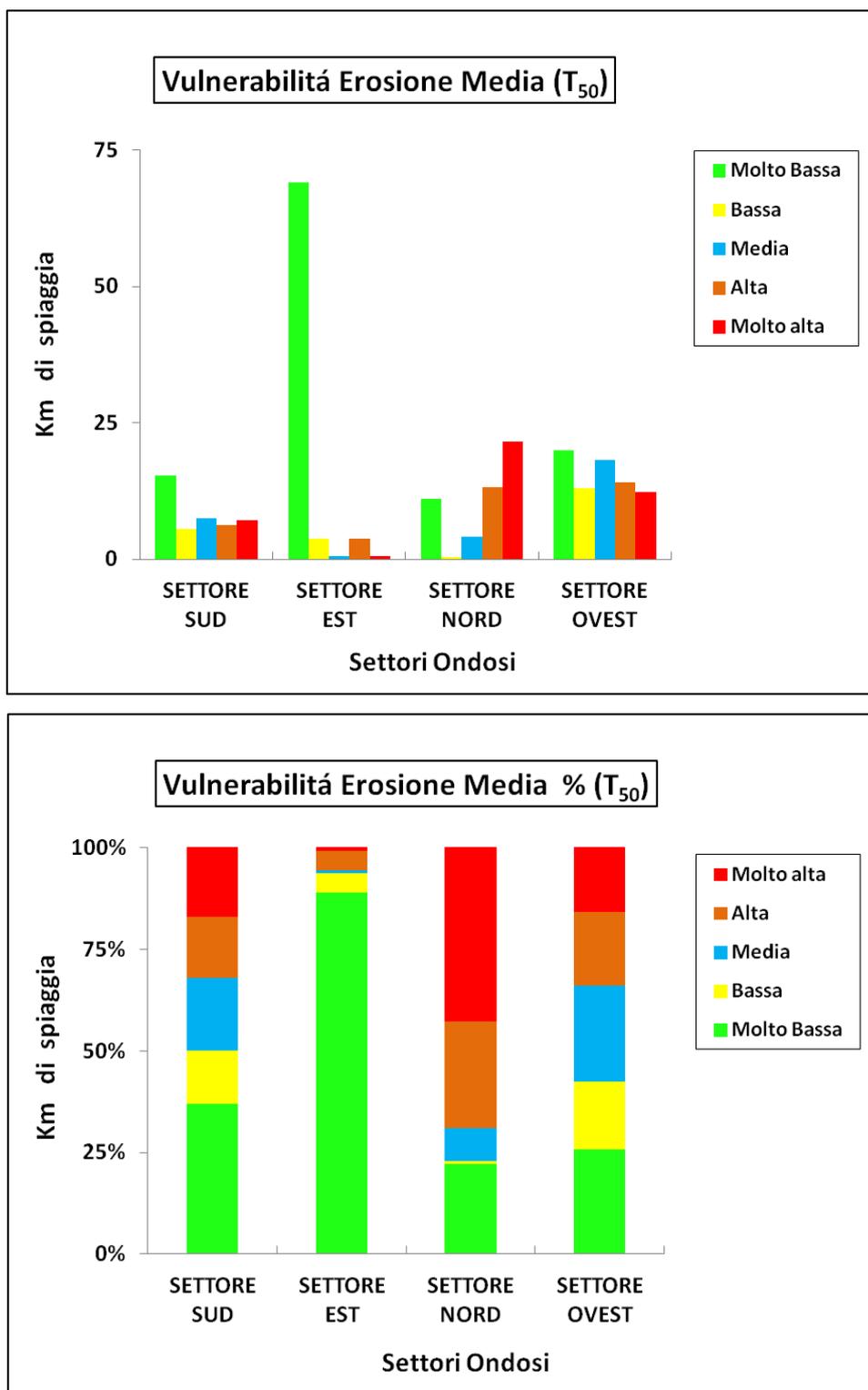


Figura 5.13 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di erosione media raggruppando le spiagge per settori; in basso i km espressi in % rispetto al settore.

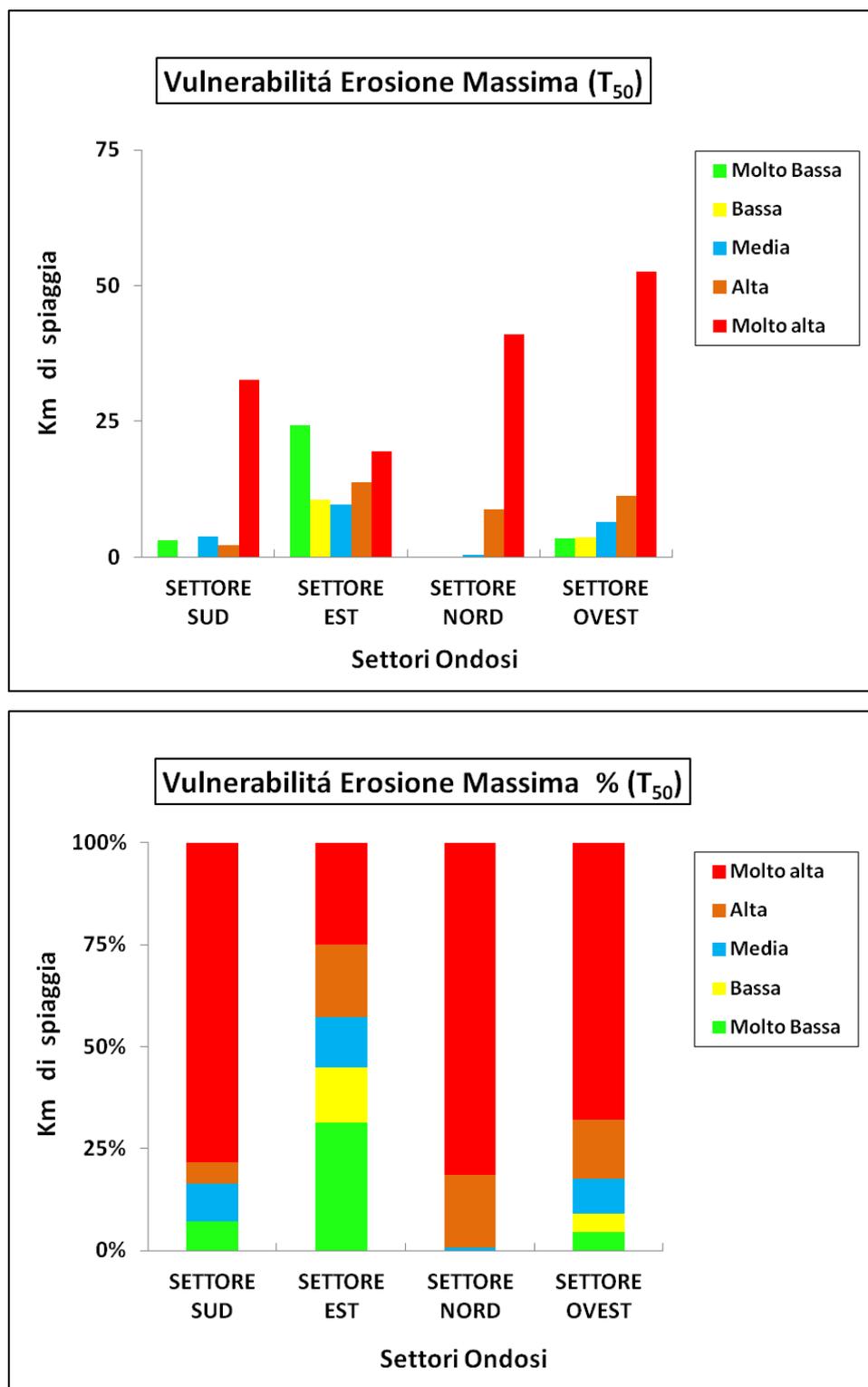


Figura 5.14 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di erosione massima raggruppando le spiagge per settori; in basso i km espressi in % rispetto al settore.

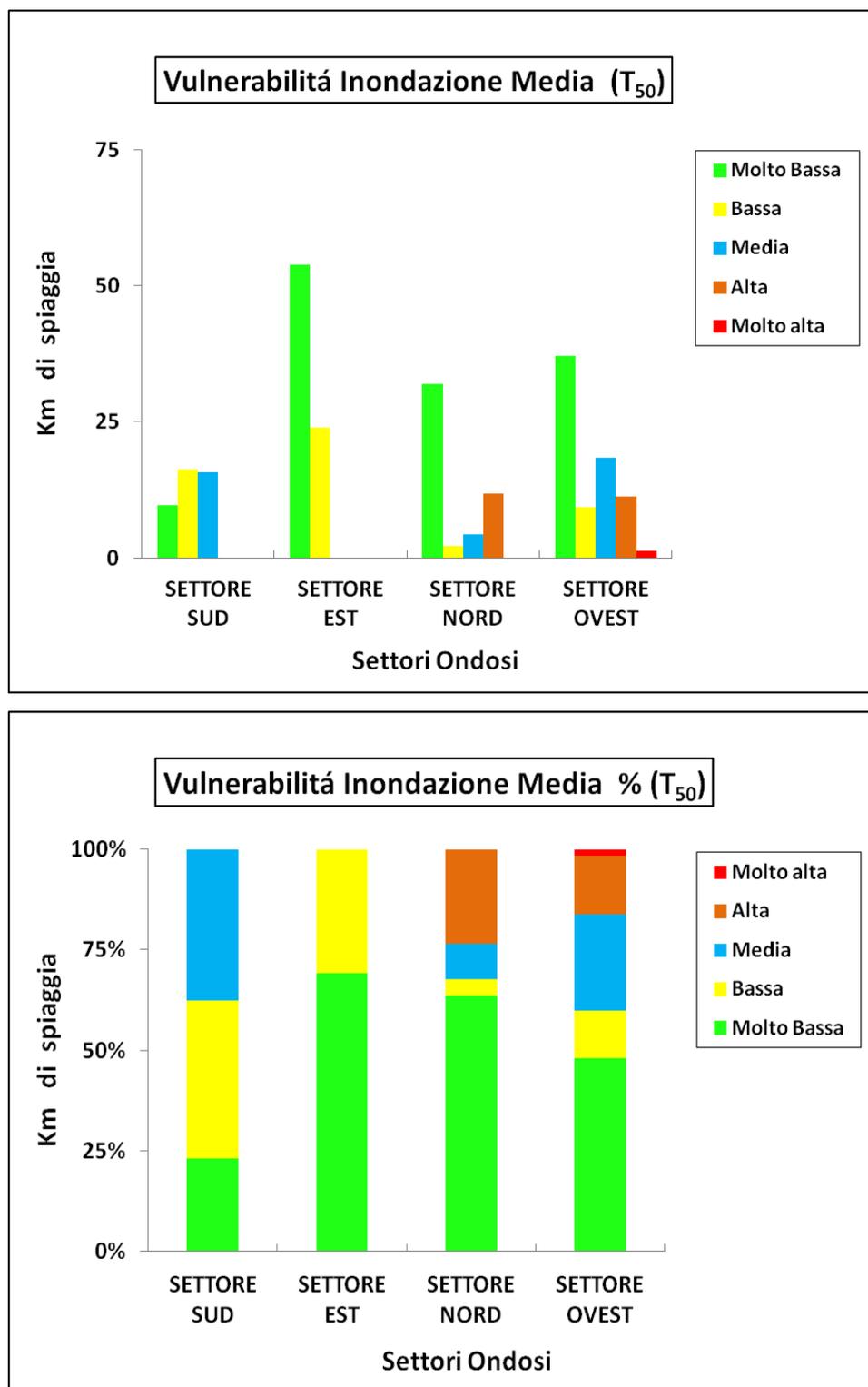


Figura 5.15 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di inondazione media raggruppando le spiagge per settori ; in basso i km espressi in % rispetto al settore.

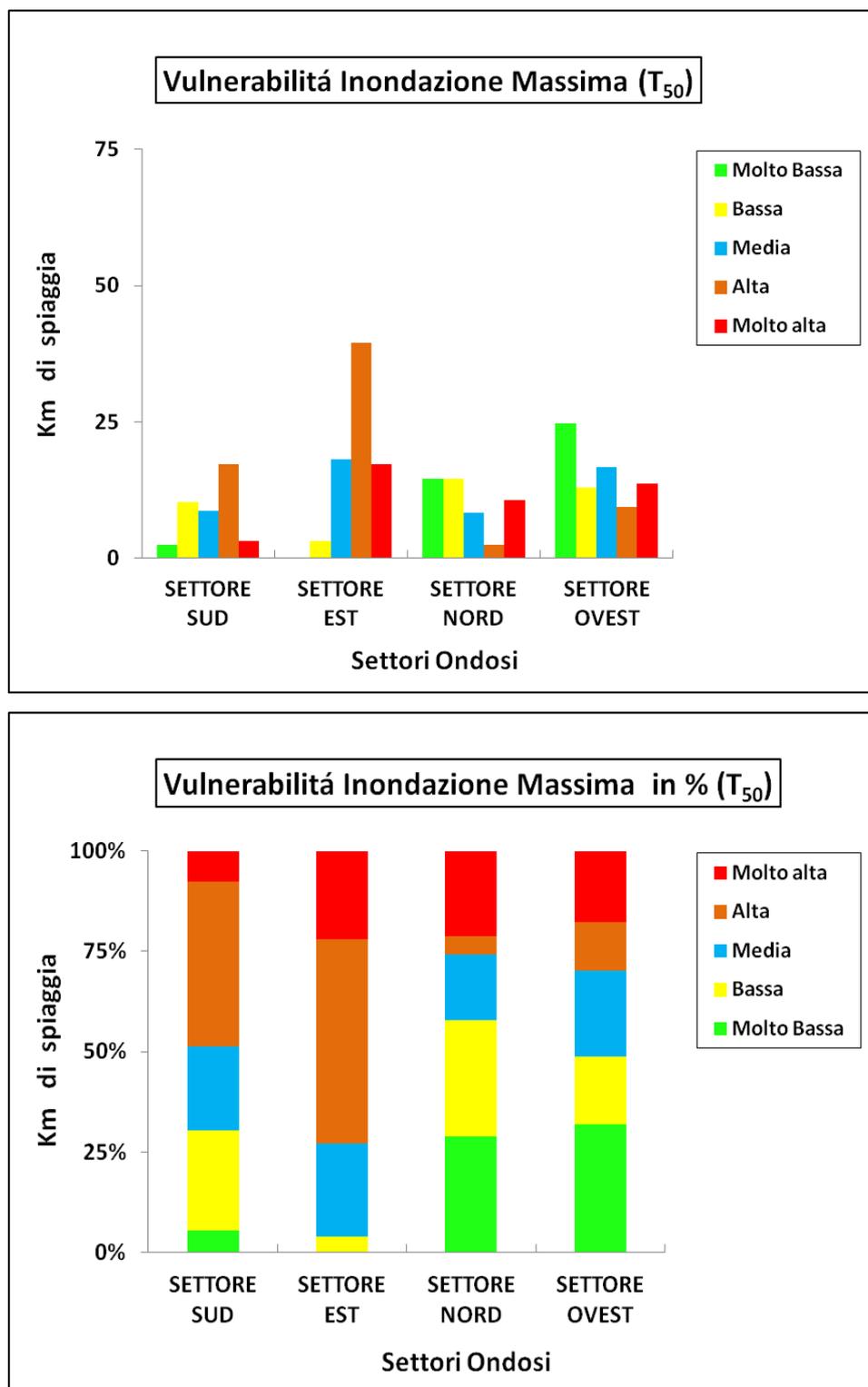


Figura 5.16 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di inondazione massima raggruppando le spiagge per settori; in basso i km espressi in % rispetto al settore.

Anche se i risultati presentati fino a questo punto sono stati ottenuti per un periodo di ritorno di 50 anni è stata effettuata anche un'analisi di vulnerabilità relazionata alla probabilità di accadimento dei processi indotti dalle tempeste (Figura 5.17, 5.18, 5.19, 5.20). Sono stati

considerati gli indici medi e massimi associati ai periodi di ritorno di 5, 10, 25, 50 e 100 anni. A prima vista si nota come la vulnerabilità aumenta in funzione del periodo di ritorno mentre la percentuale di linea di costa corrispondente alla categoria più bassa di vulnerabilità diminuisce. Il tasso di incremento è maggiore per l'erosione rispetto all'inondazione, soprattutto per quanto riguarda l'indice massimo, dove più del 75% della costa risulta altamente vulnerabile considerando un periodo di ritorno maggiore di 50 anni. Inoltre la lunghezza della costa corrispondente alle due categorie peggiori è estrema e più rilevante per l'erosione rispetto all'inondazione anche nel caso dell'indice medio.

Se consideriamo il periodo di ritorno più alto (100 anni) circa il 35% della linea di costa risulta essere altamente o molto altamente vulnerabile all'erosione mentre questa stessa categoria rappresenta circa il 10% della lunghezza della costa nel caso dell'inondazione. Infine bisogna menzionare che la vulnerabilità associata all'evento con minore periodo di ritorno (10 anni) può già essere considerata significativa visto che da come risultato tra un 15% ed un 20% della linea di costa classificata come altamente o molto altamente vulnerabile all'inondazione e all'erosione indotte rispettivamente dalle tempeste.

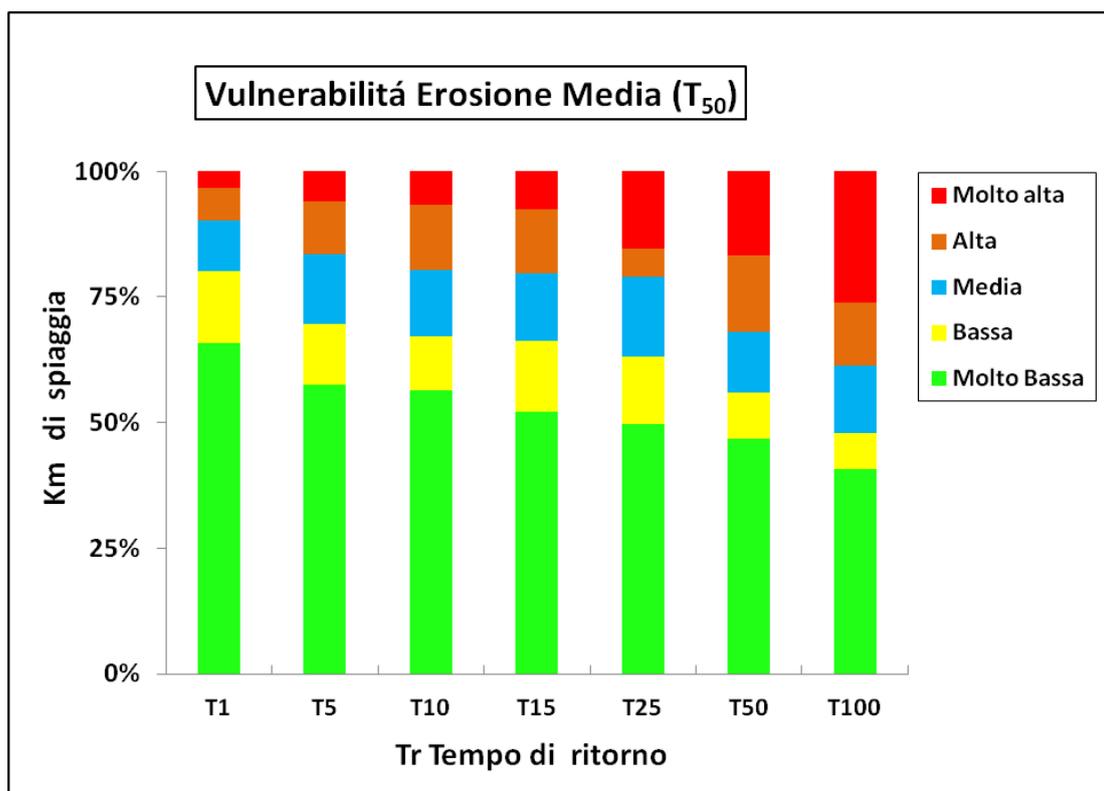
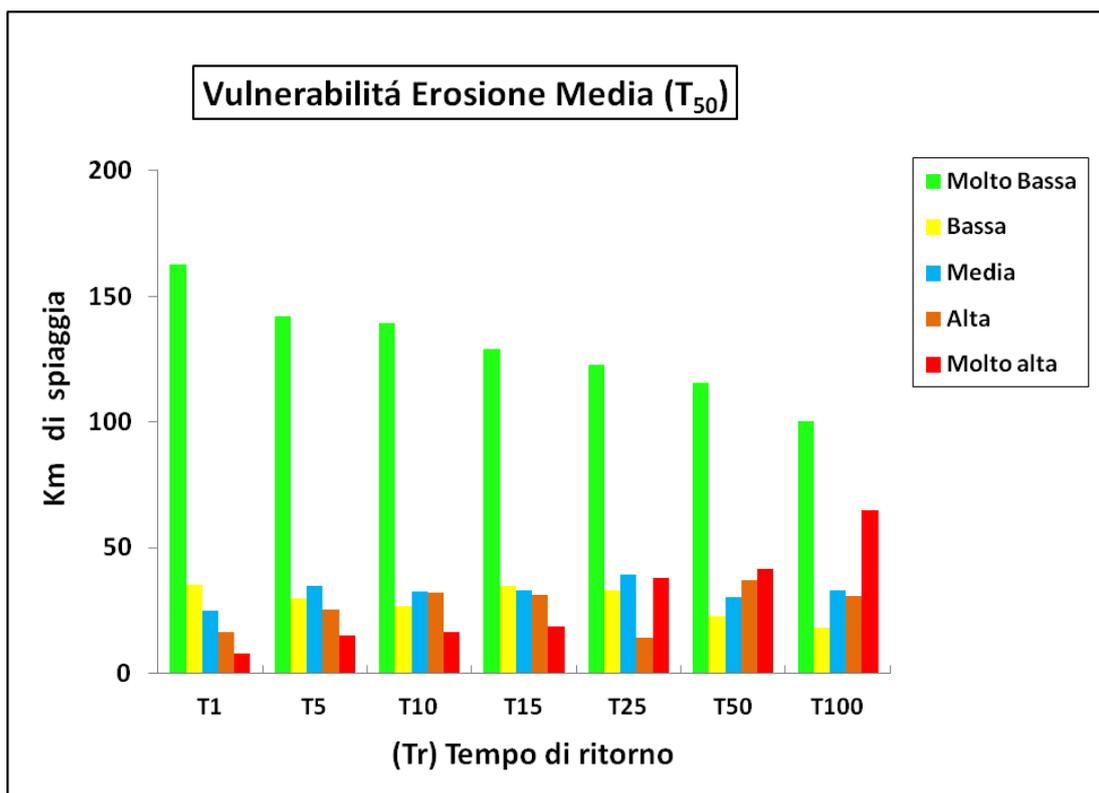


Figura 5.17 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità media considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %.

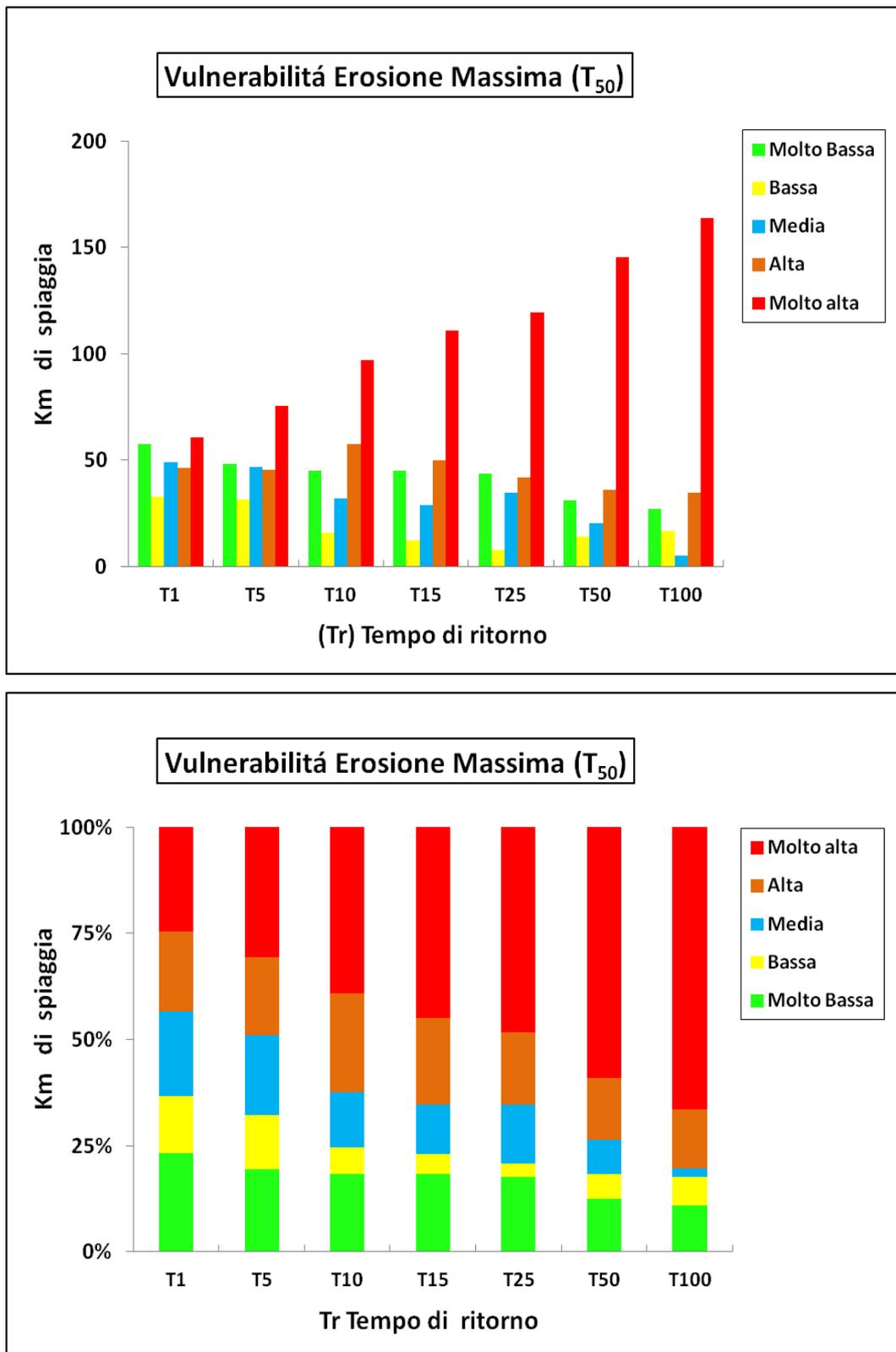


Figura 5.18 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'erosione massima considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %.

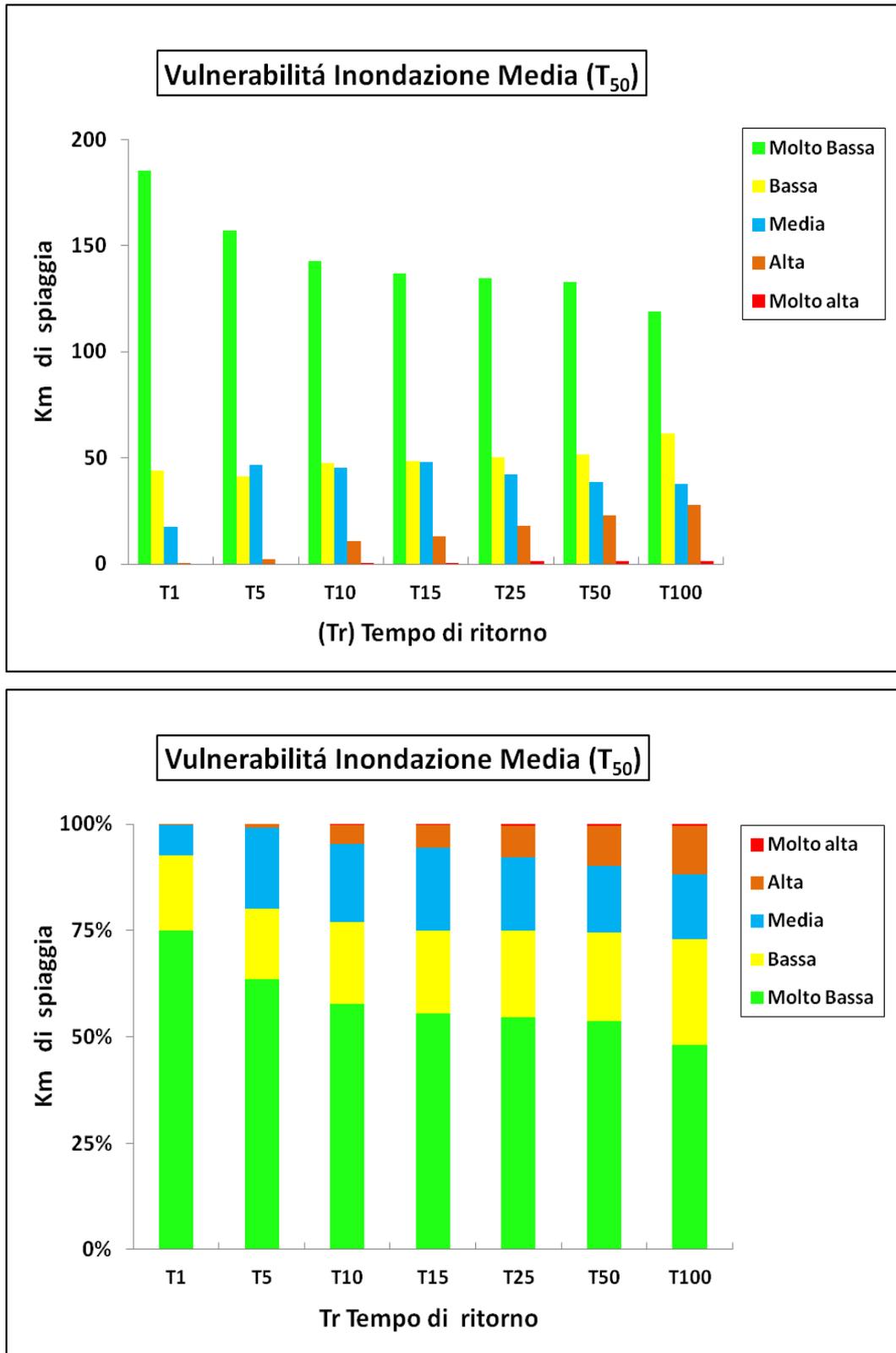


Figura 5.19 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'inondazione media considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %.

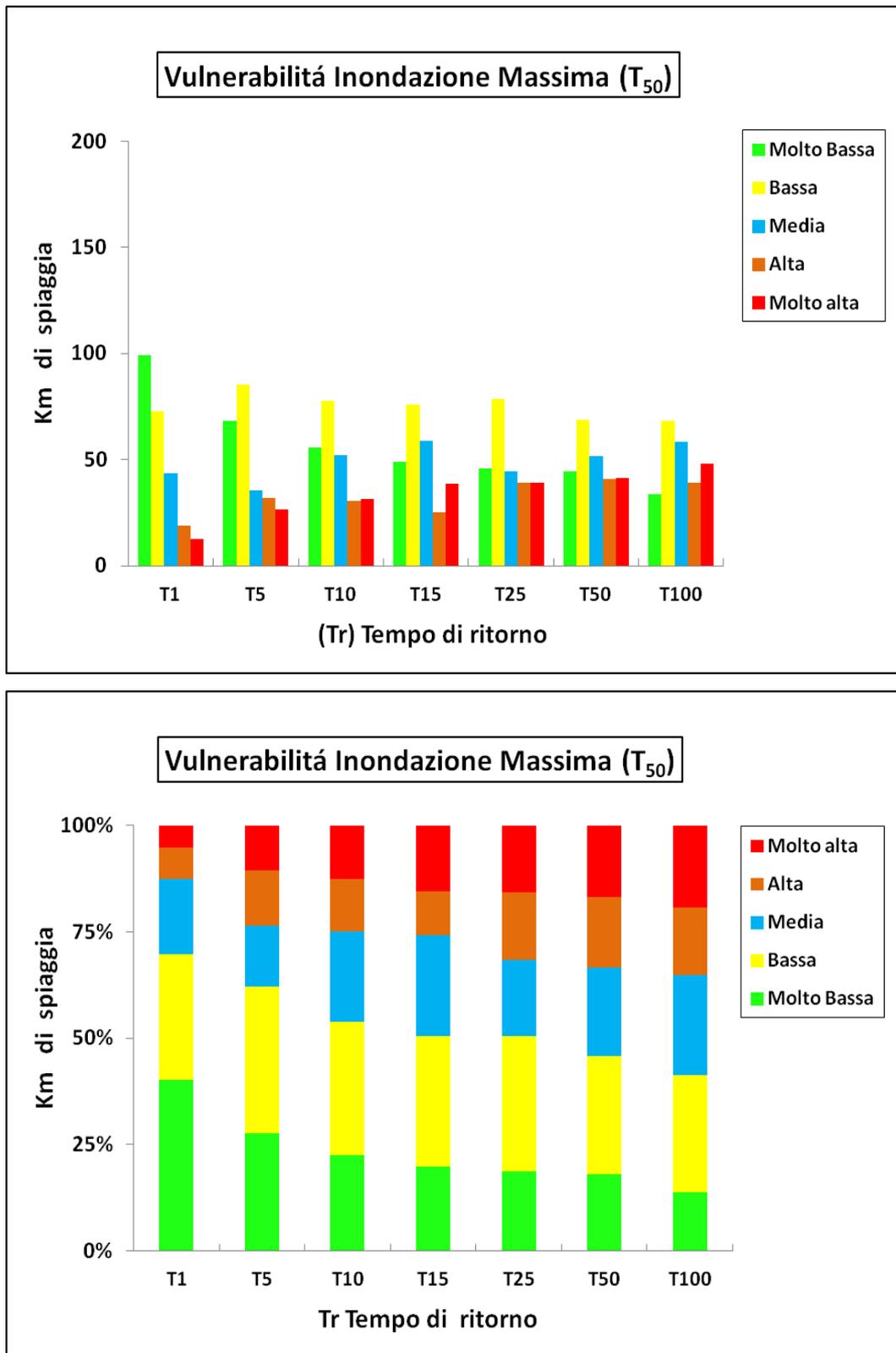


Figura 5.20 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'inondazione massima considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %.

5.3.2 Vulnerabilità delle spiagge della Sardegna a fenomeni di overtopping

Per quanto riguarda il fenomeno dell'overtopping si sono considerate due situazioni diverse: una in cui è la parte emersa della spiaggia che si inonda, dove si considera la pendenza della battigia dei primi metri di arenile per il calcolo del run up e l'altezza del piede della duna come risposta della costa. Nel secondo caso si considera l'inondazione della parte retrostante la spiaggia, considerando quest'ultima come difesa dell'entroterra, utilizzando quindi la pendenza della spiaggia emersa e l'altezza massima della cresta della duna per caratterizzarne la vulnerabilità. I risultati si mostrano nella figura 5.21, dove si può notare come la costa sia poco vulnerabile all'overtopping dell'entroterra visto che le due categorie più alte rappresentano solo il 19% della lunghezza della costa, il fenomeno di inondazione della spiaggia ha vulnerabilità più alta essendo le categorie più vulnerabili pari al 52%. Questo fatto può essere interpretato dal punto di vista della gestione come un'informazione da dare ai gestori costieri per mettere in sicurezza tutte le strutture presenti normalmente sulla spiaggia durante la stagione di calma che si vedrebbero a rischio nella stagione di tempesta (Novembre-Febbraio) dato che le spiagge sono altamente vulnerabili ad essere inondate.

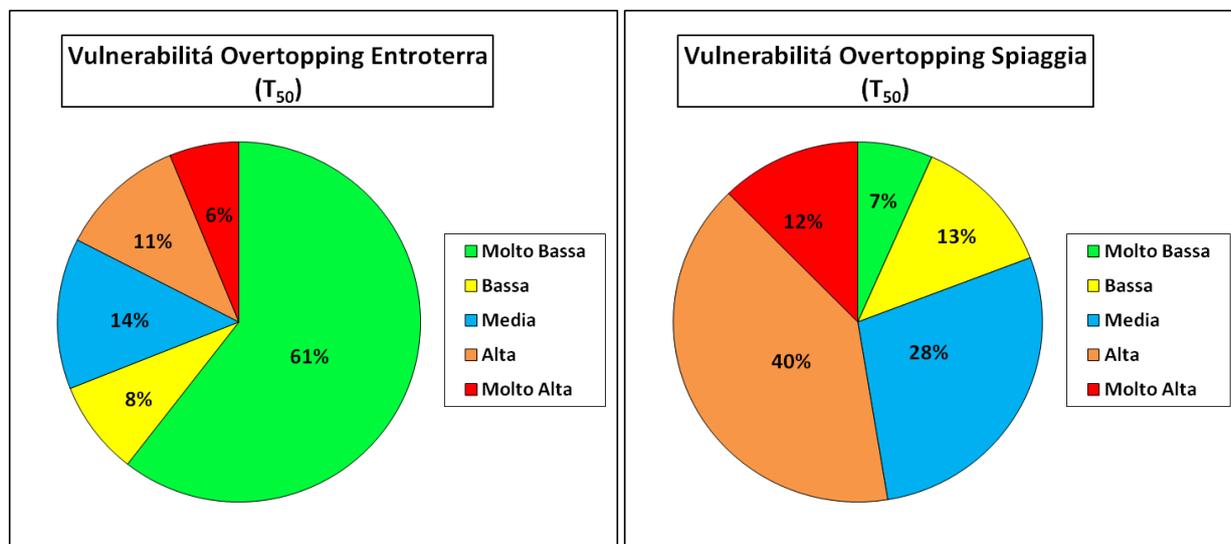


Figura 5.21 Percentuale di costa corrispondente ad ogni categoria di vulnerabilità all'overtopping.

Negli istogrammi delle figure 5.22 e 5.23 si mostrano le due vulnerabilità appena viste in funzione di diversi periodi di ritorno, come nel caso precedente di 1, 5, 10, 15, 25, 50 e 100 anni: si nota chiaramente che la vulnerabilità aumenta con la diminuzione della probabilità di accadimento e che il fenomeno sia più rilevante per la spiaggia, visto che per un periodo di ritorno di 100 anni

piu del 50% della lunghezza della costa è altamente vulnerabile mentre nel caso dell'entroterra solo il 30% risulta esserlo: Si nota inoltre poca differenza tra i valori associati ai periodo di ritorno piu alti (50 e 100 anni), mentre maggior variabilità si manifesta per periodi di ritorno minori.

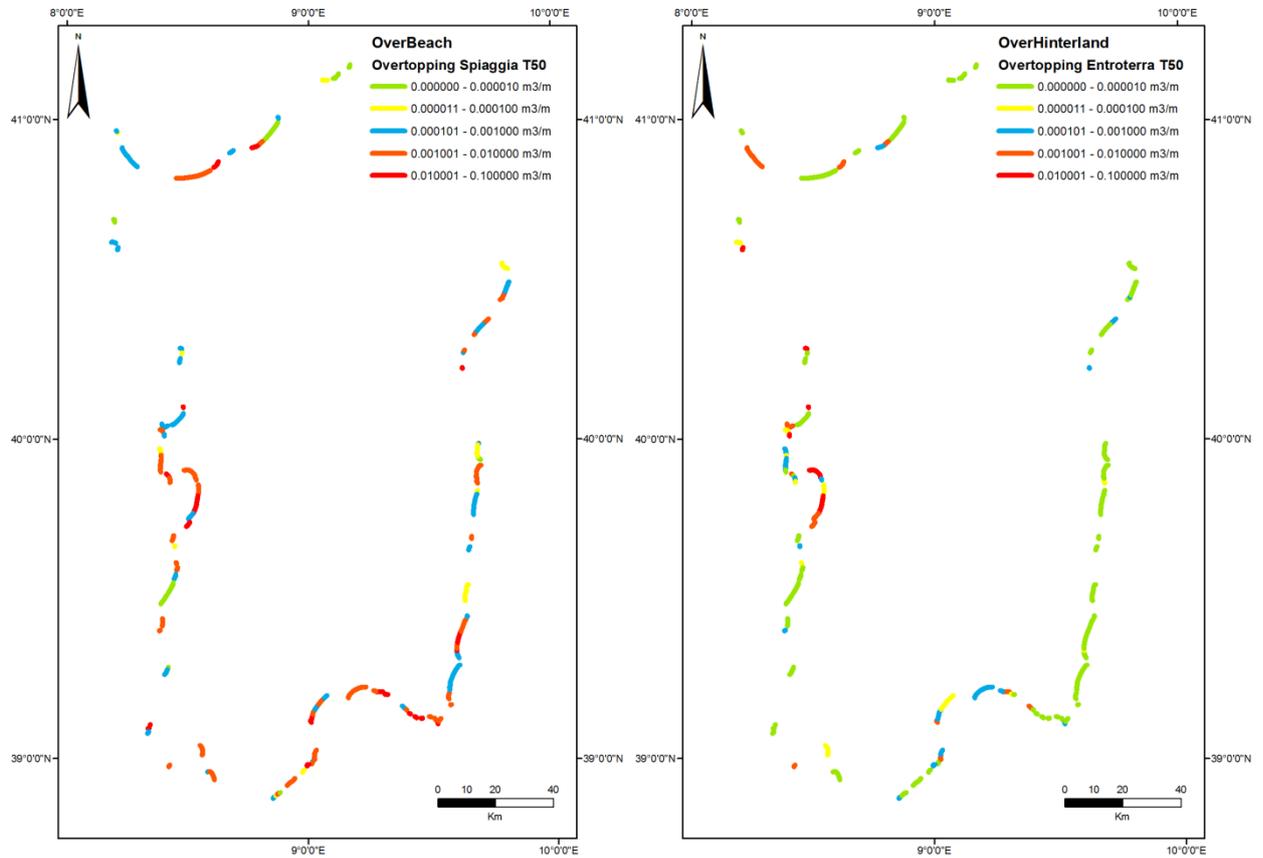


Figura 5.22 Percentuale di costa corrispondente ad ogni categoria di vulnerabilità all'overtopping della spiaggia emersa a sinistra e dell'entroterra a destra.

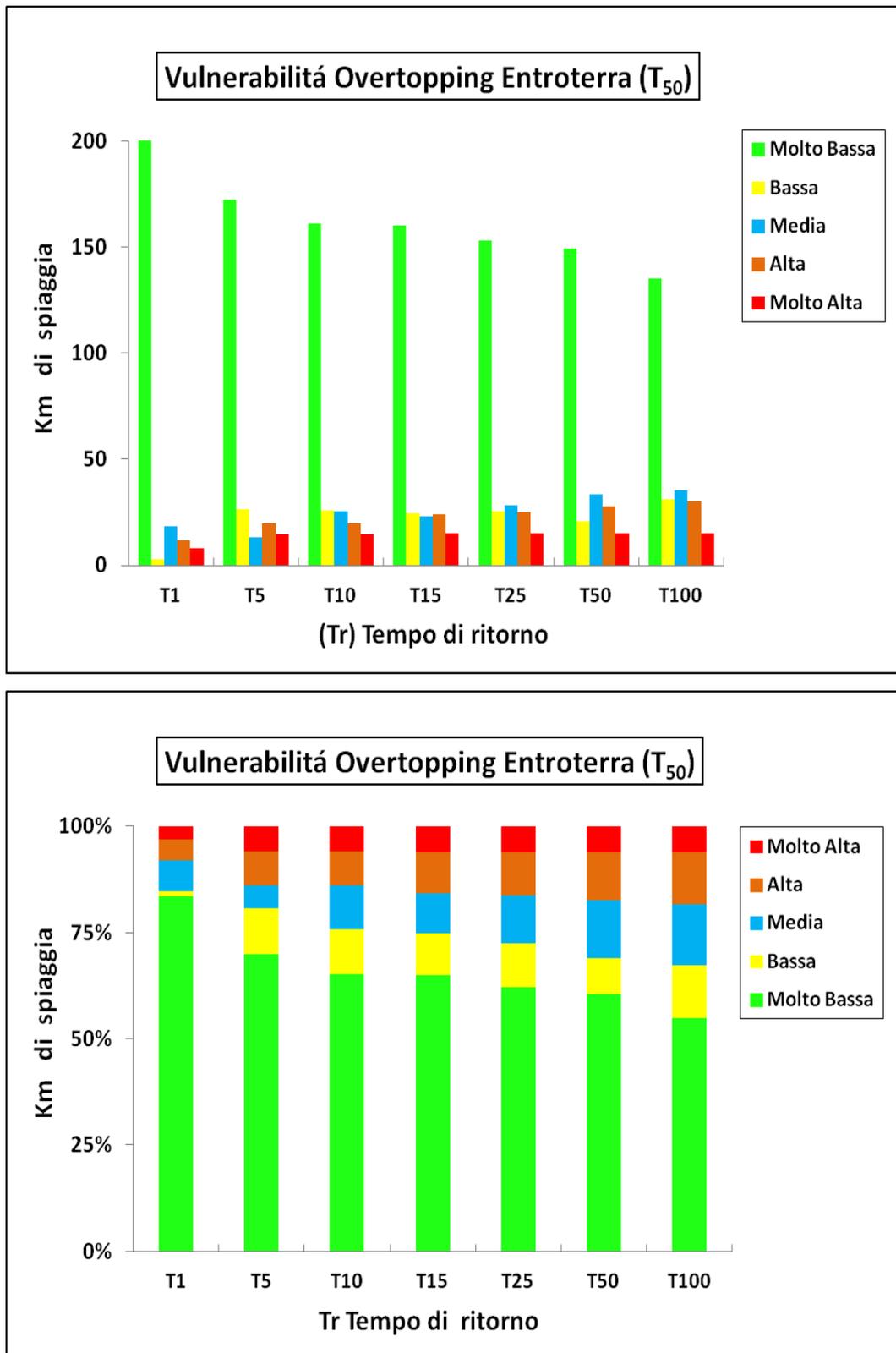


Figura 5.23 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell'indice di vulnerabilità all'overtopping dell'entroterra considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %

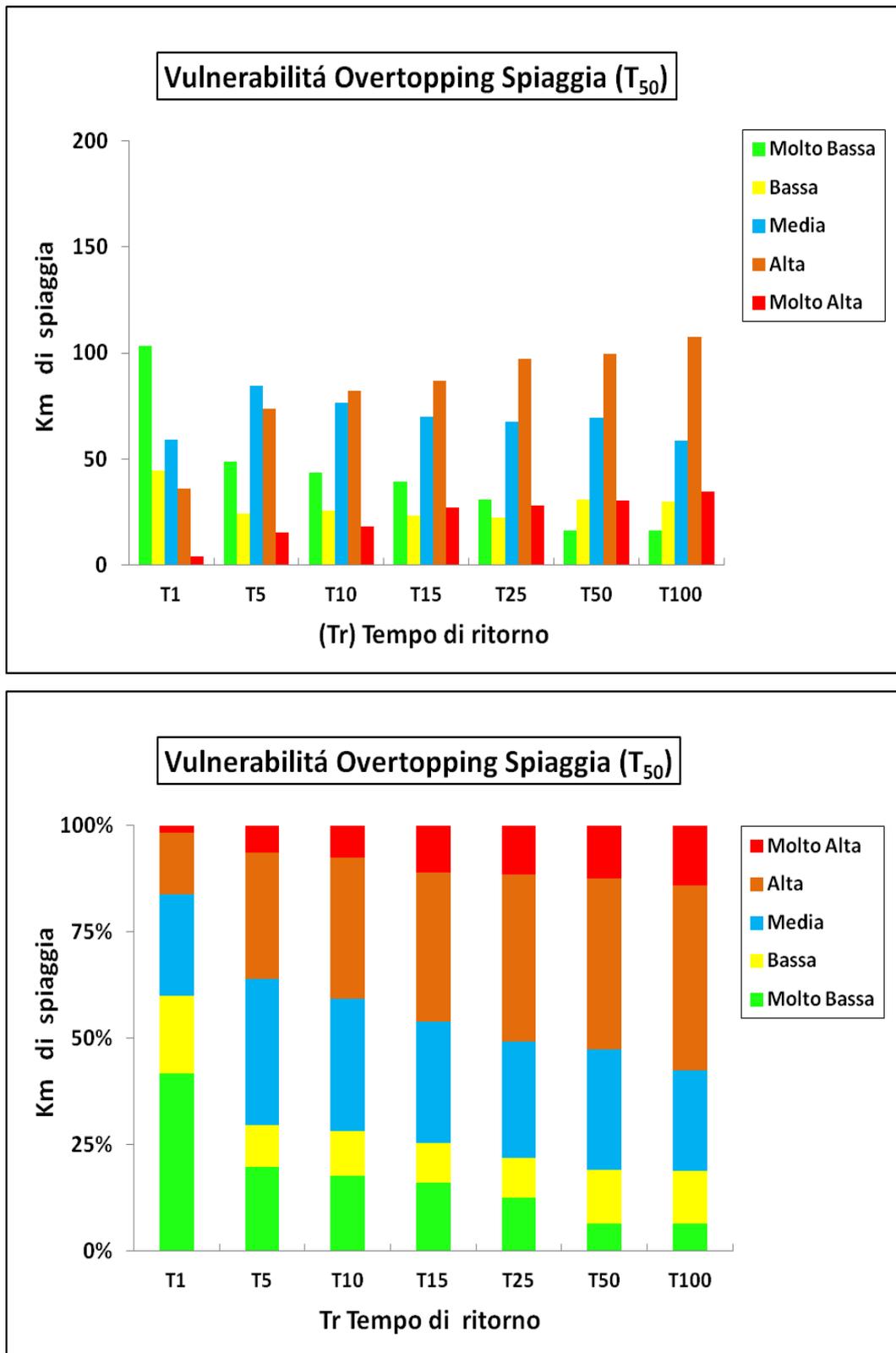


Figura 5.24 In alto km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità dell' indice di vulnerabilità all'overlapping della spiaggia considerando diversi periodi di ritorno, in basso i km espressi in %

5.3.3 Vulnerabilità a scala regionale: Province ed Unità Fisiografiche

Anche se i risultati generali alla scala della spiaggia determinano lo stato generale della costa in termini alla sua vulnerabilità all'inondazione e all'erosione, un'analisi che tenga in conto delle unità amministrative costiere esistenti permette identificare quelle che possono essere le più danneggiabili. All'interno di questo contesto i risultati di vulnerabilità sono stati così interpretati considerando 2 unità a scala regionale: le Province come unità amministrative e le Unità Fisiografiche come unità territoriali omogenee. Fornire questo tipo di informazioni ai gestori costieri che assumono decisioni può aiutarli ad organizzare le risorse disponibili per adottare strategie di adattamento e/o mitigazione in maniera effettiva.

Nella Figura 5.24 si mostra la distribuzione della lunghezza delle spiagge della Sardegna nelle rispettive province di appartenenza. Le province più rappresentate sono quelle di Cagliari (31%), Sassari/Olbia (20%) ed Oristano (19%).

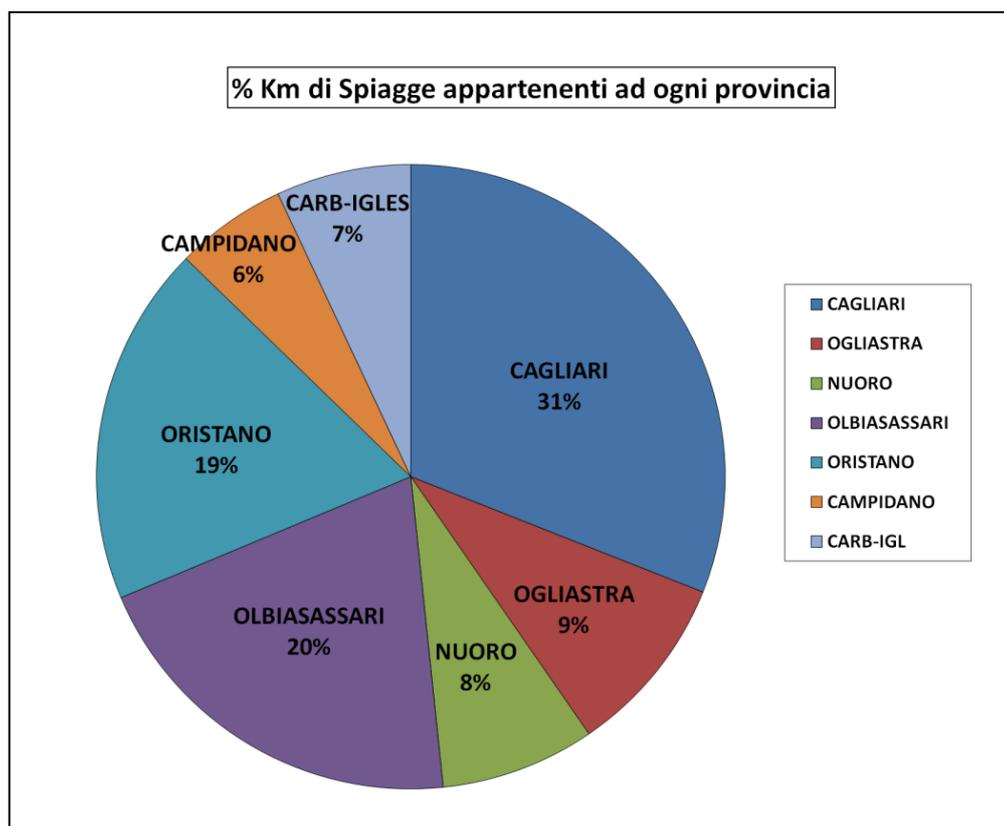


Figura 5.25 Km di spiaggia appartenenti divisi per appartenenza alla Provincia amministrativa.

Per meglio interpretare il comportamento di ogni zona, sono state calcolate le caratteristiche medie delle spiagge appartenenti ad ogni provincia in funzione dei parametri utilizzati per calcolare gli indici di vulnerabilità (Tabella 5.4). In generale le spiagge dei Settori Sud ed Est (Ca-Nu-Ogl) presentano le maggiori pendenze della battigia rispetto alle altre zone dell'Isola, anche se le province occidentali sono quelle che presentano maggiori valori di pendenza della spiaggia. I valori più alti di ampiezza corrispondono alle province di Nuoro, Campidano e Carbonia-Iglesias mentre i valori più bassi appaiono nelle province di Olbia-Sassari ed Oristano. Infine per quanto riguarda le altezze, quella del piede della duna è abbastanza simile per tutte le Province (Ca, Nu, Or le inferiori) mentre le creste della duna minori risultano essere quelle di Cagliari Oristano e Nuoro.

PROVINCIA	pbattigia	pSpiaggia	Larghezza	H piede	H cresta	Hs _{max}	Tp _{max}
CAGLIARI	0.132	0.076	50	1.42	2.93	5.35	9.79
OGLIASTRA	0.145	0.078	58	1.79	3.31	5.64	9.76
NUORO	0.145	0.082	57	1.61	3.10	5.64	9.76
OLBIA SASSARI	0.103	0.088	45	1.99	4.33	7.51	10.85
ORISTANO	0.105	0.084	43	1.71	3.30	7.89	11.28
CAMPIDANO	0.125	0.083	62	2.96	7.48	7.89	11.28
CARB-IGLESIAS	0.115	0.060	64	1.86	4.41	7.89	11.28

Tabella 5.4 Caratteristiche medie delle spiagge suddivise per Province

I risultati della vulnerabilità all'erosione alla scala di gestione della Provincia vengono mostrati nella tabella 5.4 e nei grafici 5.25 e 5.26. Anche in questo caso sono stati considerati gli indici di vulnerabilità medi e massimi per un periodo di ritorno di 50 anni, così come verrà fatto per l'indice d'inondazione.

Se consideriamo solo le due categorie più estreme di vulnerabilità media le Province con le spiagge maggiormente vulnerabili all'erosione sono quelle di Sassari-Olbia ed Oristano rispettivamente con il 69% ed il 45% della costa che cade nelle categorie alta e molto alta. Per le restanti province (Cagliari, Ogliastra, Nuoro, Oristano, Campidano e Carbonia Iglesias) i valori più estremi di vulnerabilità non superano il 20% di lunghezza della costa, mostrando un'alta presenza delle categorie minime (Bassa e Molto Bassa) che appaiono con una longitudine maggiore del 50% per tutte le province con picchi del 90% per le province di Nuoro ed Ogliastra che risultano le meno vulnerabili all'erosione.

Quando si considera l'indice di vulnerabilità massima i risultati peggiorano notevolmente, dimostrando che al considerare l'ampiezza minima del recettore le zone più sensibili all'erosione aumentano in tutte le Province. I casi peggiori visti in precedenza di Oristano e Sassari sono quasi per intero altamente vulnerabili (>90%), mentre le province di Cagliari Campidano e Carbonia-Iglesias sono quelle che peggiorano maggiormente triplicando la presenza delle due categorie più estreme.

Erosione Med	km di costa				
Provincia	Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto alta
CAGLIARI	62	11	10	8	9
OGLIASTRA	90	0	0	0	10
NUORO	84	6	0	7	3
OLBIA SASSARI	22	1	8	26	43
ORISTANO	6	22	26	23	22
CAMPIDANO	60	21	0	7	12
CARB-IGLES	50	0	35	13	2
Erosione Max	% km di costa				
Provincia	Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto alta
CAGLIARI	18	0	15	14	53
OGLIASTRA	30	31	6	21	12
NUORO	33	15	3	2	47
OLBIA SASSARI	0	0	1	18	82
ORISTANO	2	1	4	10	83
CAMPIDANO	11	18	7	21	43
CARB-IGLES	6	3	21	22	47

Tabella 5.5 Km di costa appartenenti alle categorie di vulnerabilità raggruppati per Province considerando l'indice di erosione media (in alto) e massima (in basso).

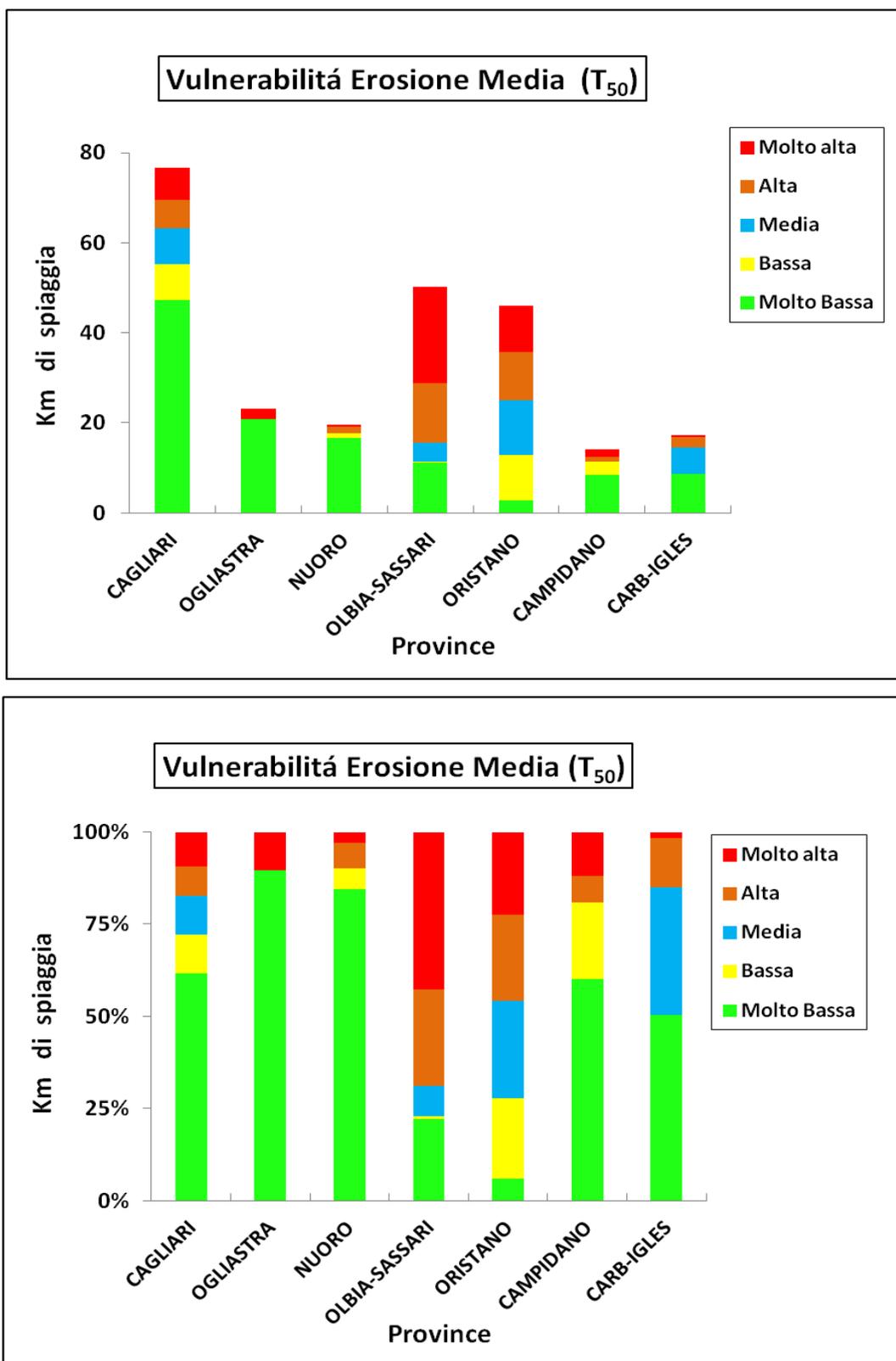


Figura 5.26 Indice di erosione media per Province; % km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità rispetto al totale delle Province.

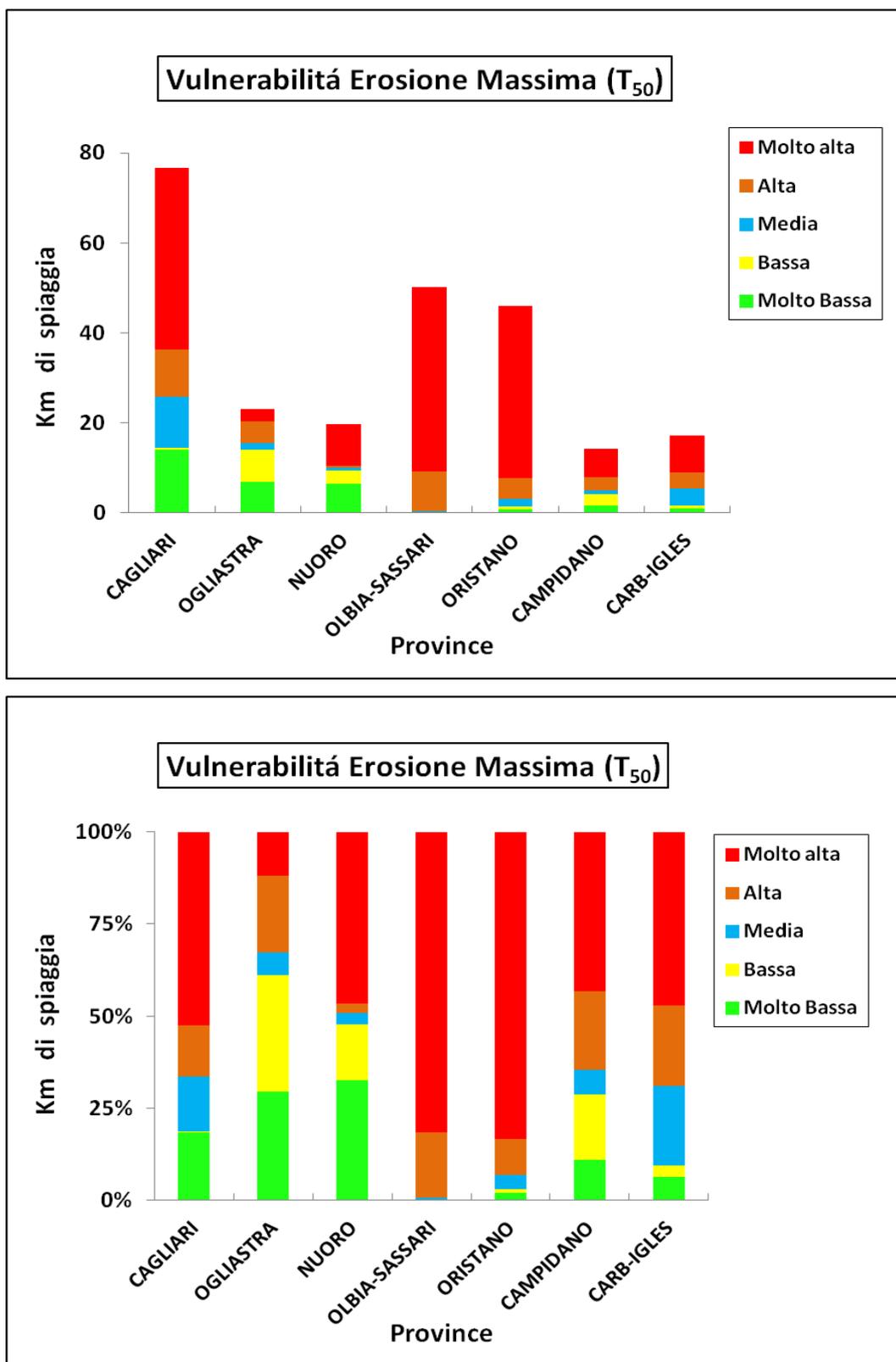


Figura 5.27 Indice di erosione massimo per Province; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità; in basso i km espressi in % rispetto alla Provincia.

Inondazione Med	% km di costa				
Provincia	Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto alta
CAGLIARI	46	34	20	0	0
OGLIASTRA	76	24	0	0	0
NUORO	56	44	0	0	0
OLBIA SASSARI	64	4	9	24	0
ORISTANO	22	14	37	24	3
CAMPIDANO	84	12	4	0	0
CARB-IGLES	88	7	6	0	0
Inondazione Max	% km di costa				
Provincia	Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto alta
CAGLIARI	16	45	23	13	3
OGLIASTRA	26	41	34	0	0
NUORO	12	67	5	16	0
OLBIA SASSARI	21	5	16	29	29
ORISTANO	0	6	18	23	54
CAMPIDANO	69	14	8	8	0
CARB-IGLES	22	28	42	7	0

Tabella 5.6 Km di costa appartenenti alle categorie di vulnerabilità raggruppati per Province considerando l'indice di inondazione media (in alto) e massima (in basso).

Rispetto all'inondazione (tabella 5.5) i risultati suggeriscono che la vulnerabilità media risulta essere bassa per tutte le province a parte Sassari ed Oristano (unico con 3% di vulnerabilità molto alta) dove le categorie alte sono il circa il 25% della costa (Figura 5.27). Quando si considera l'indice massimo (Figura 5.28) vengono messe in luce le zone più critiche alla vulnerabilità che aumenta notevolmente per Oristano e Sassari che presentano il 50% ed il 25% rispettivamente di lunghezza della costa nella categoria molto alta.

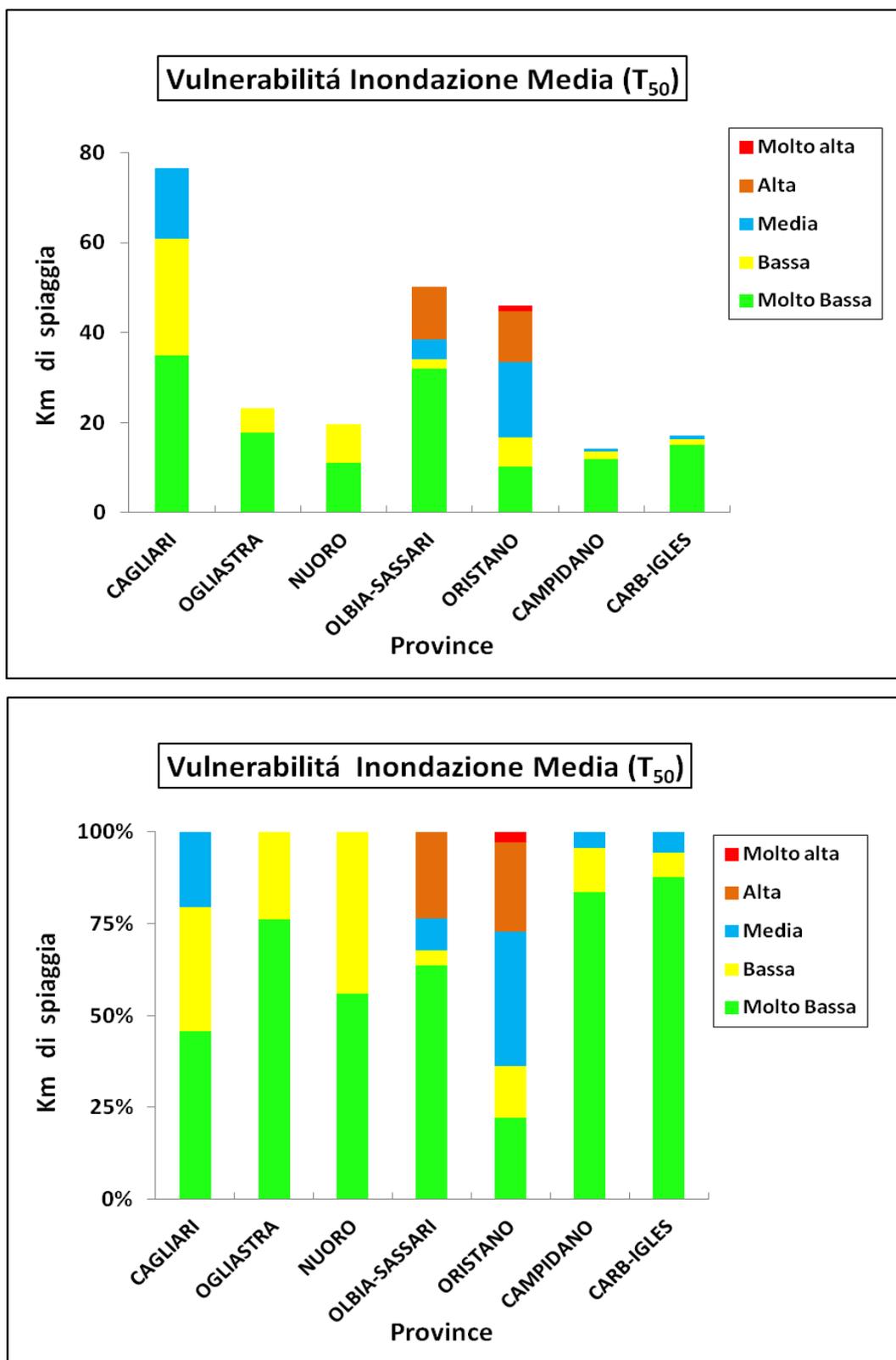


Figura 5.28 Indice di inondazione media per Province; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità; in basso i km espressi in % rispetto alla Provincia

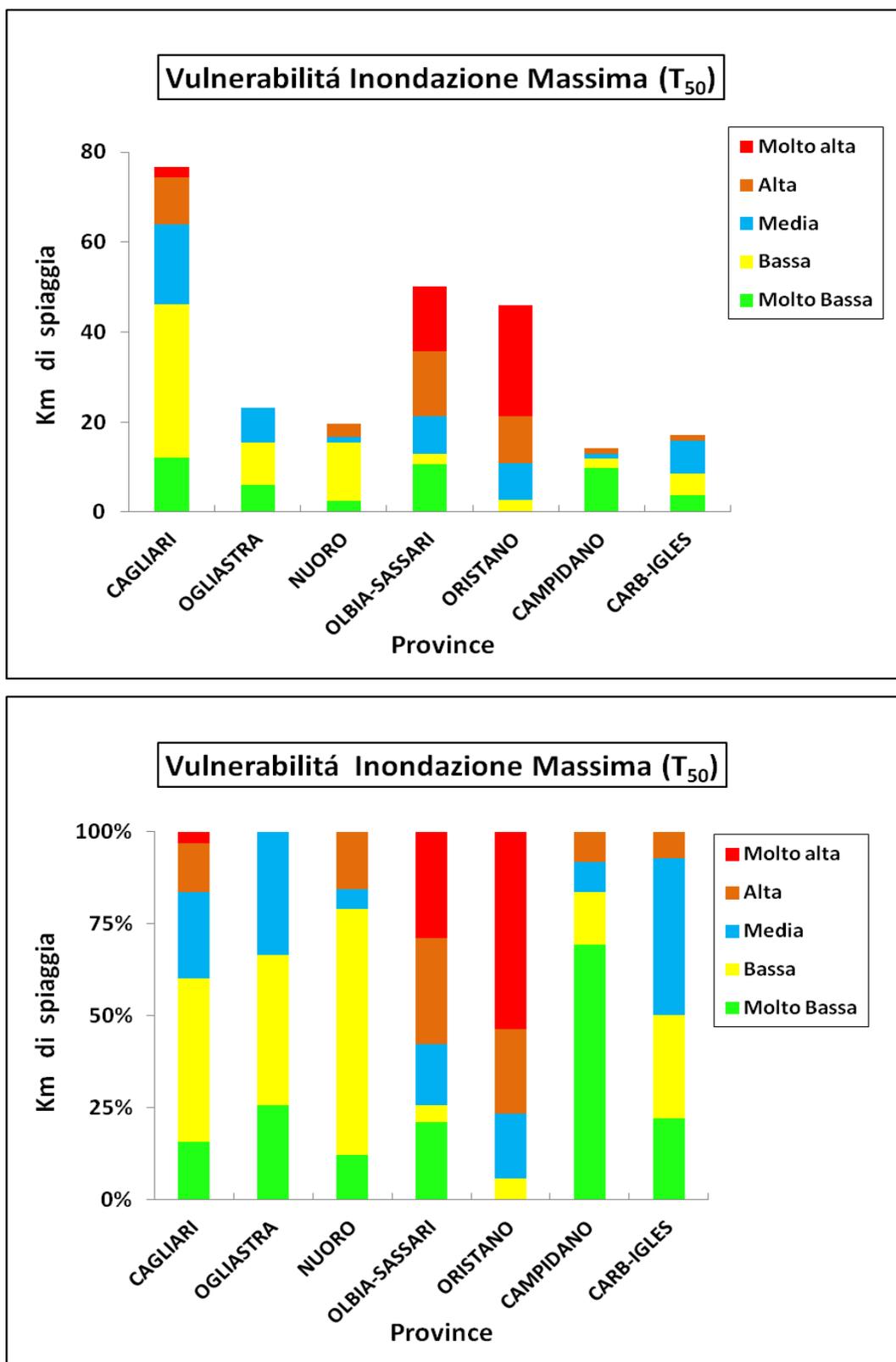


Figura 5.29 Indice di inondazione massima per Province; a in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto alla Provincia.

Un altro modo interessante di interpretare i risultati a scala regionale é quello di considerare le Unitá Fisiografiche come unità di gestione (Figura 3.4).

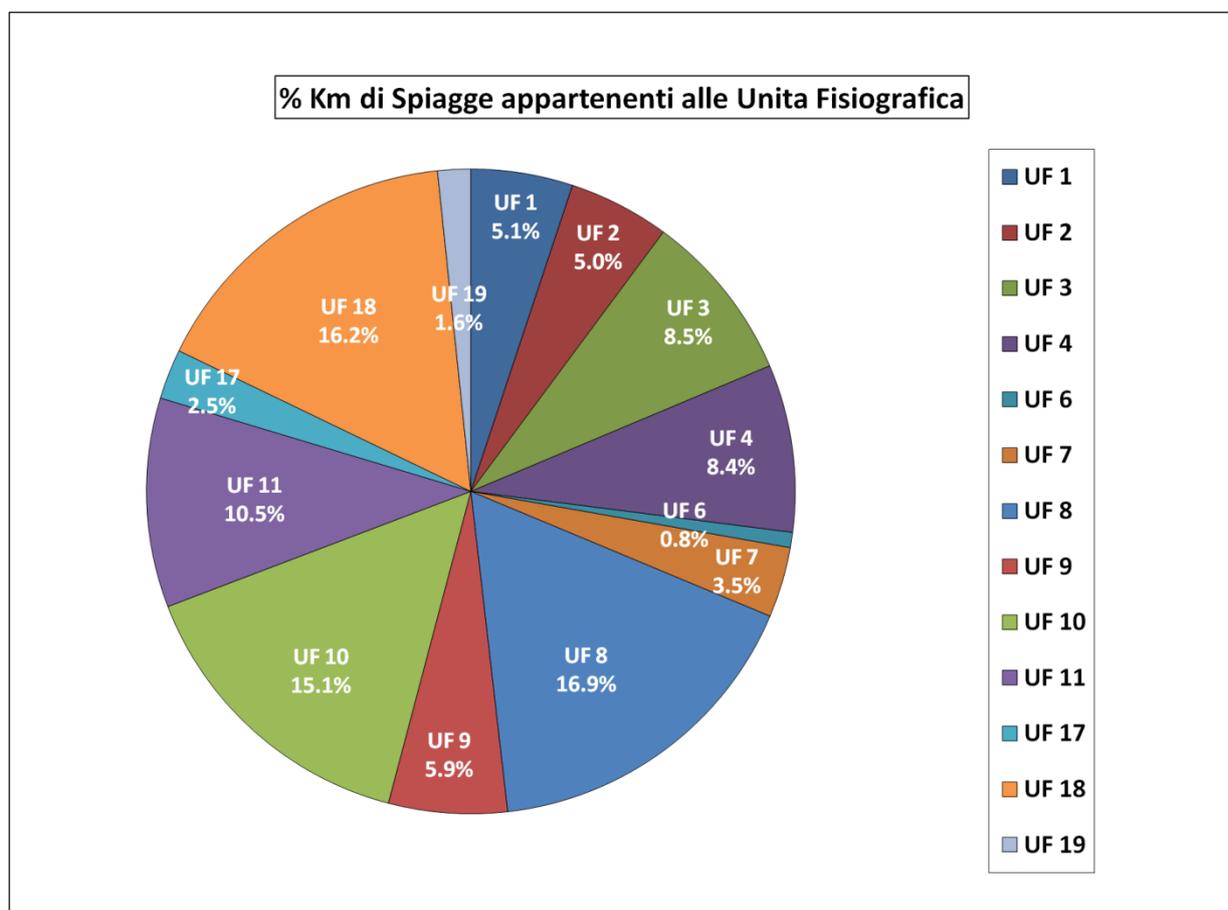


Figura 5.30 Chilometri di spiaggia appartenenti alle varie unità fisiografiche

Nella figura 5.9 si osservano i chilometri di spiaggia in % appartenenti ad ogni unità fisiografica della Sardegna. Le unità fisiografiche che presentano la maggior longitudine di spiaggia sono la UF8 (provincia di Ca) la UF 18 (Sassari), mentre le meno rappresentate sono le unità 1, 2, 6, 7, 9 e 17.

Le unità più vulnerabili all'erosione media (Figura 5.31) sono UF6 (100%), UF 19 (95%) e UF18 (80%) seguite da UF2 (48%), UF3 (52%), UF8 (30%) e UF1 (26%). Le restanti unità Fisiografiche (UF 4, 7, 9, 10, 11) presentano principalmente valori di vulnerabilità bassa con picchi molto alti nella 4 e nella 11.

Quando si considera l'indice massimo (Figura 5.32) tutte le unità risultano essere altamente vulnerabili (>80%) tranne che per le unità 9, 10 ed 11 che in tutti i modi presentano rispettivamente il 50%, 25%, e 50% della costa che cade nelle due categorie più alte.

Per quanto riguarda l'inondazione i risultati mostrano una vulnerabilità media in generale minore rispetto all'erosione (Figura 5.33). Nel caso medio infatti solo 5 unità presentano le categorie molto alte e molto alte (UF1, 2, 3, 18 e 19) con valori che non superano il 30% della lunghezza della costa. Quando si considera la risposta massima (Figura 5.34) l'intensità dell'inondazione aumenta principalmente nelle unità che già mostravano criticità, mentre nelle restanti unità la lunghezza delle categorie basse risulta la predominante ad eccezione delle unità 4, 7, 8 ed 11 dove comunque la longitudine delle categorie estreme non supera il 25% della lunghezza totale della costa di ogni unità.

Nel caso del overtopping dell'entroterra (Figura 5.35) i risultati si mostrano simili a quelli della vulnerabilità all'inondazione, con la UF3 (80%), UF1 (35%), UF18 (40%) e UF19 (40%) che presentano categorie alte mentre le restanti risultano completamente sicure al fenomeno (Figura 5.36). Quando si considera invece l'inondazione della spiaggia (Figura 5.36) i risultati dimostrano come il fenomeno sia molto più rilevante. Solo le unità 7 e 19 non sono vulnerabili a questo fenomeno mentre le altre presentano la lunghezza delle categorie più alte > del 30% con le unità UF 2, 3, 7, 8 che presentano più del 50% della costa altamente vulnerabile.

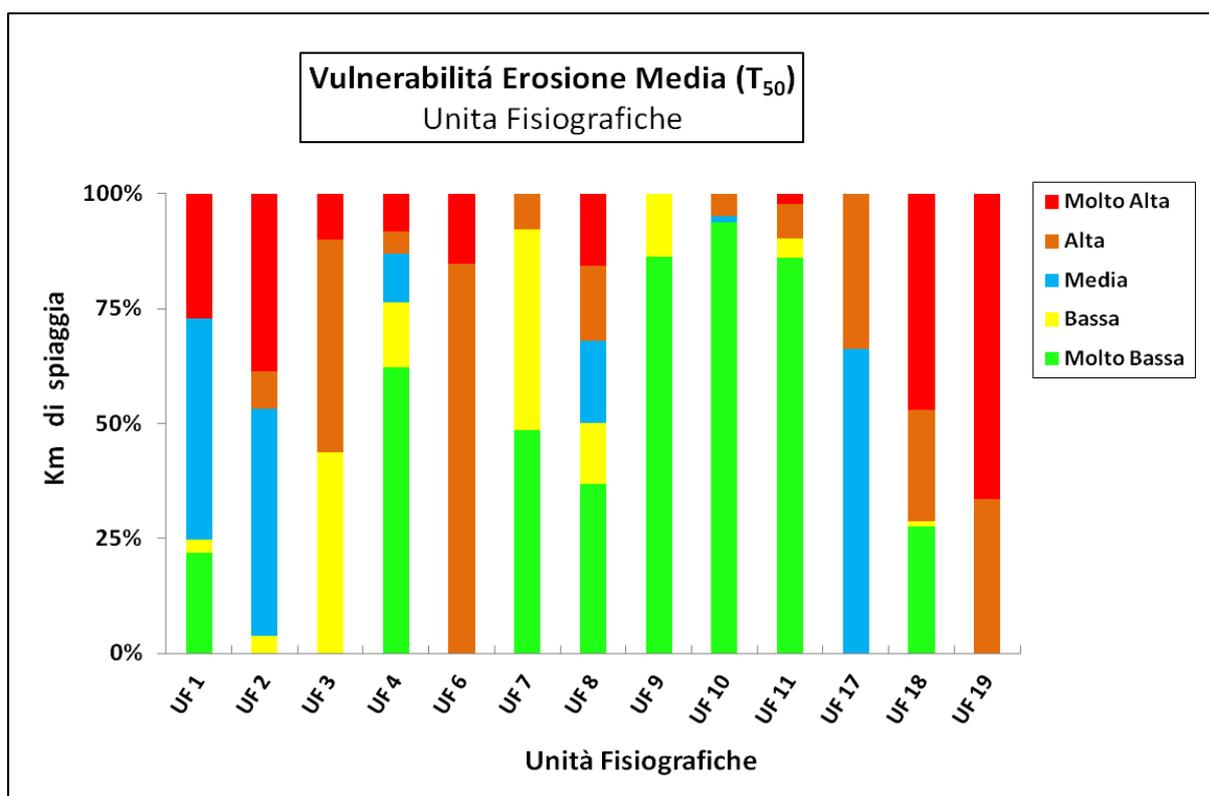
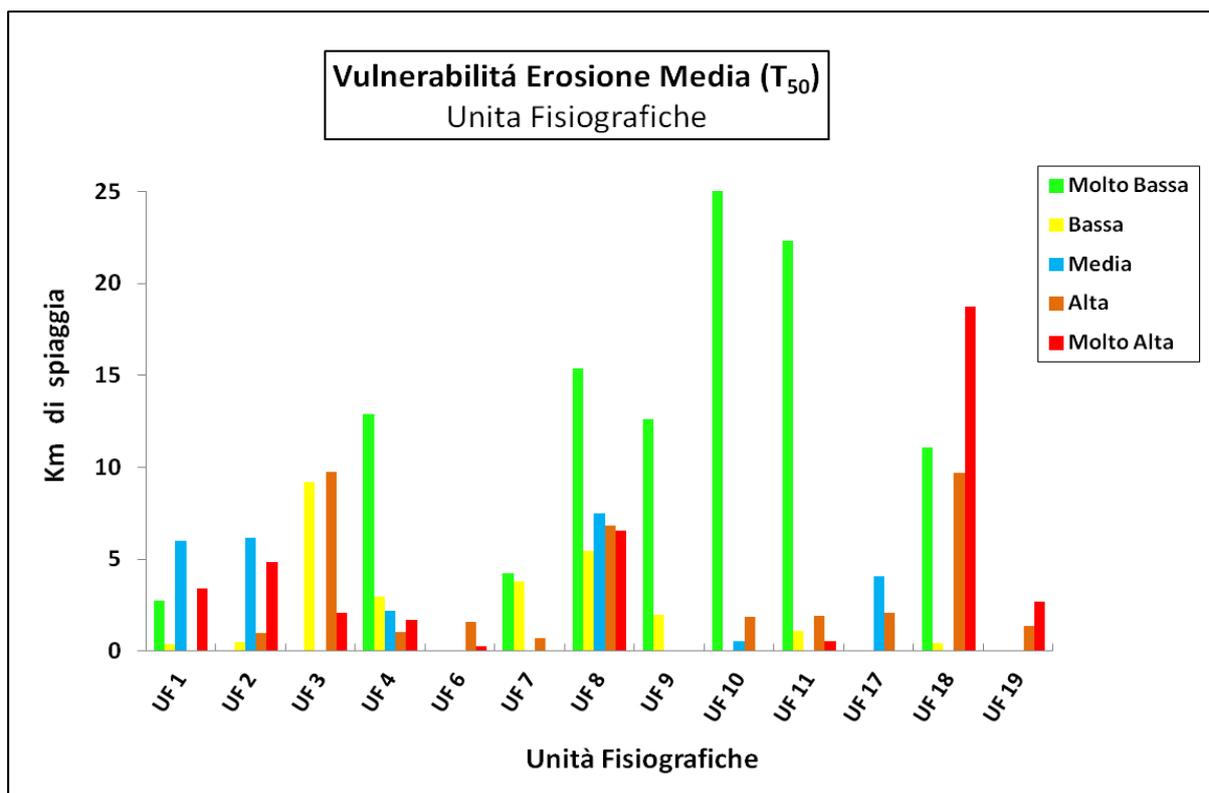


Figura 5.31 Indice di Erosione Media per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.

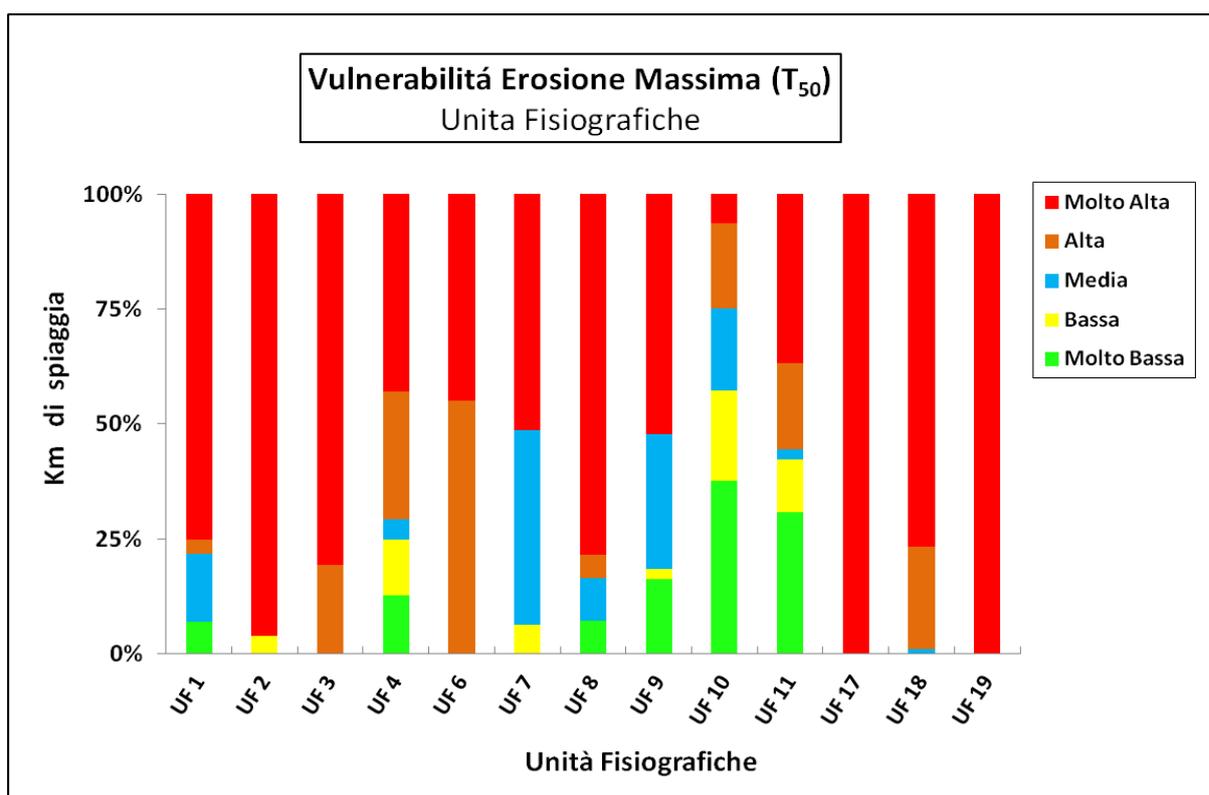
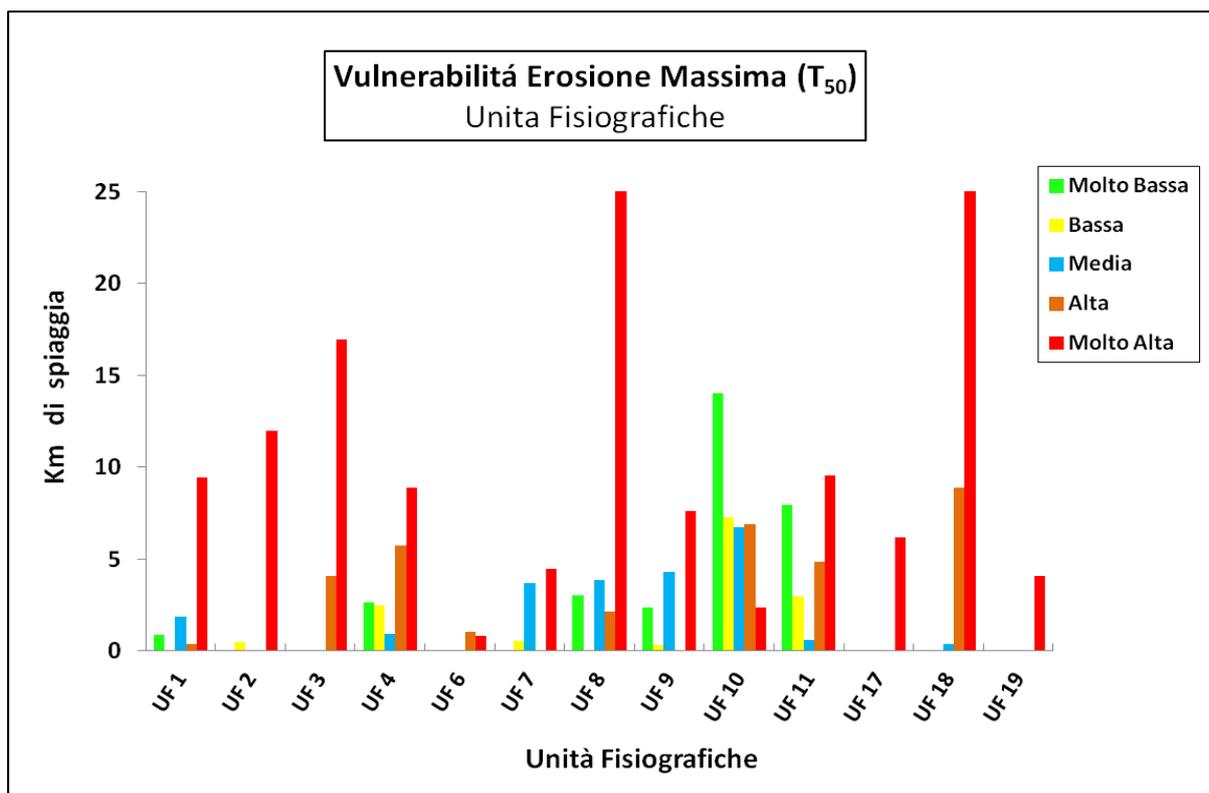


Figura 5.32 Indice di Erosione Massima per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.

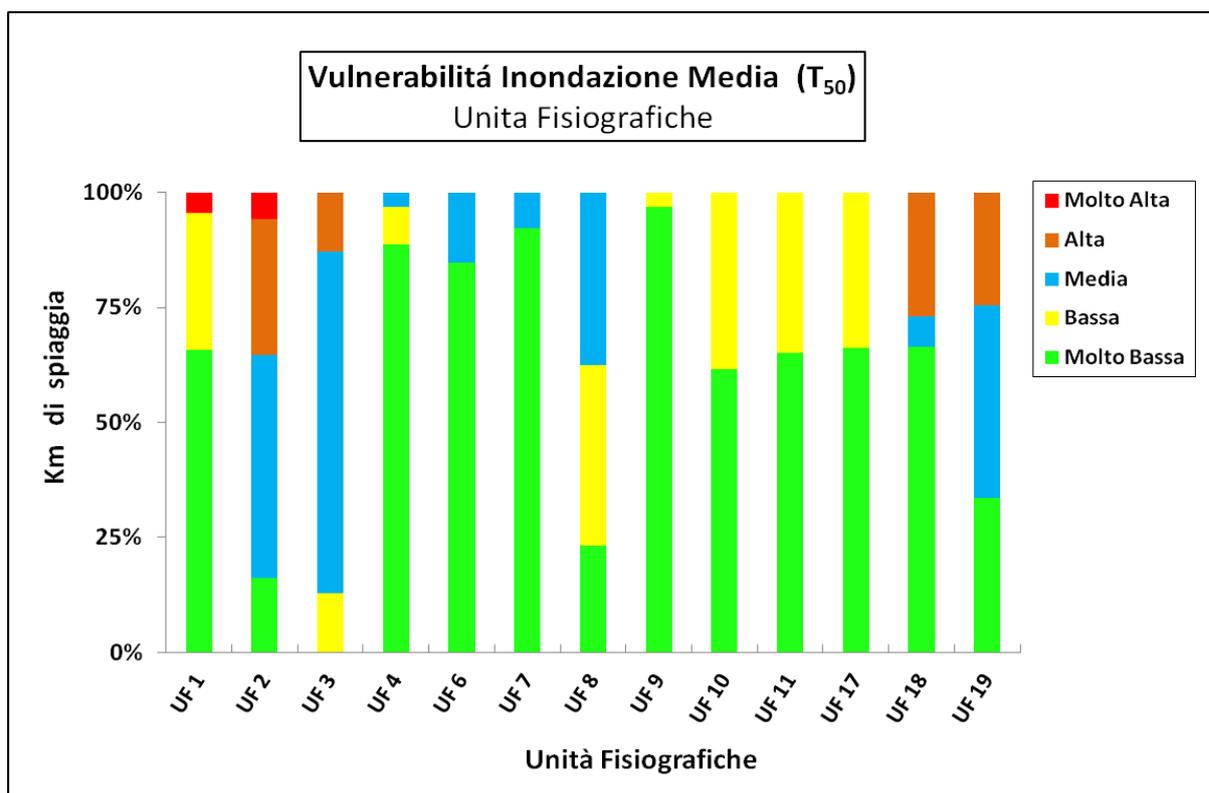
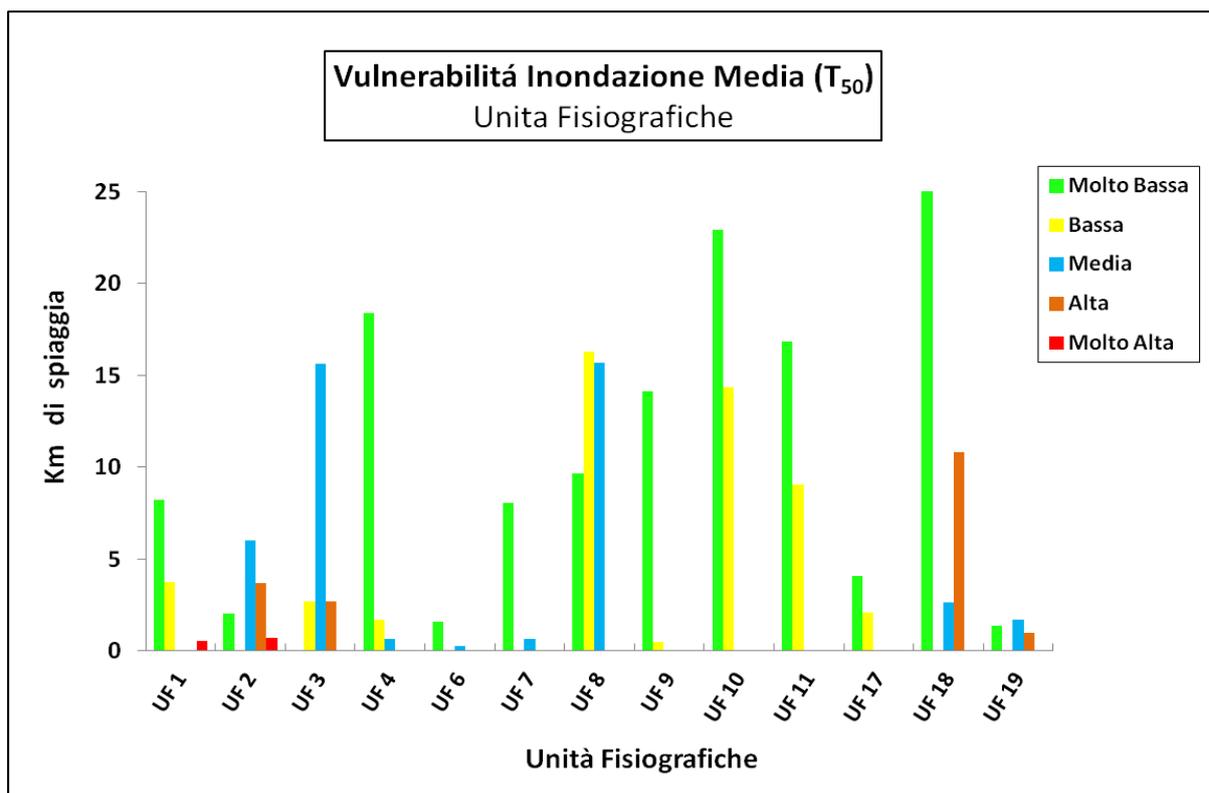


Figura 5.33 Indice di Inondazione Media per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.

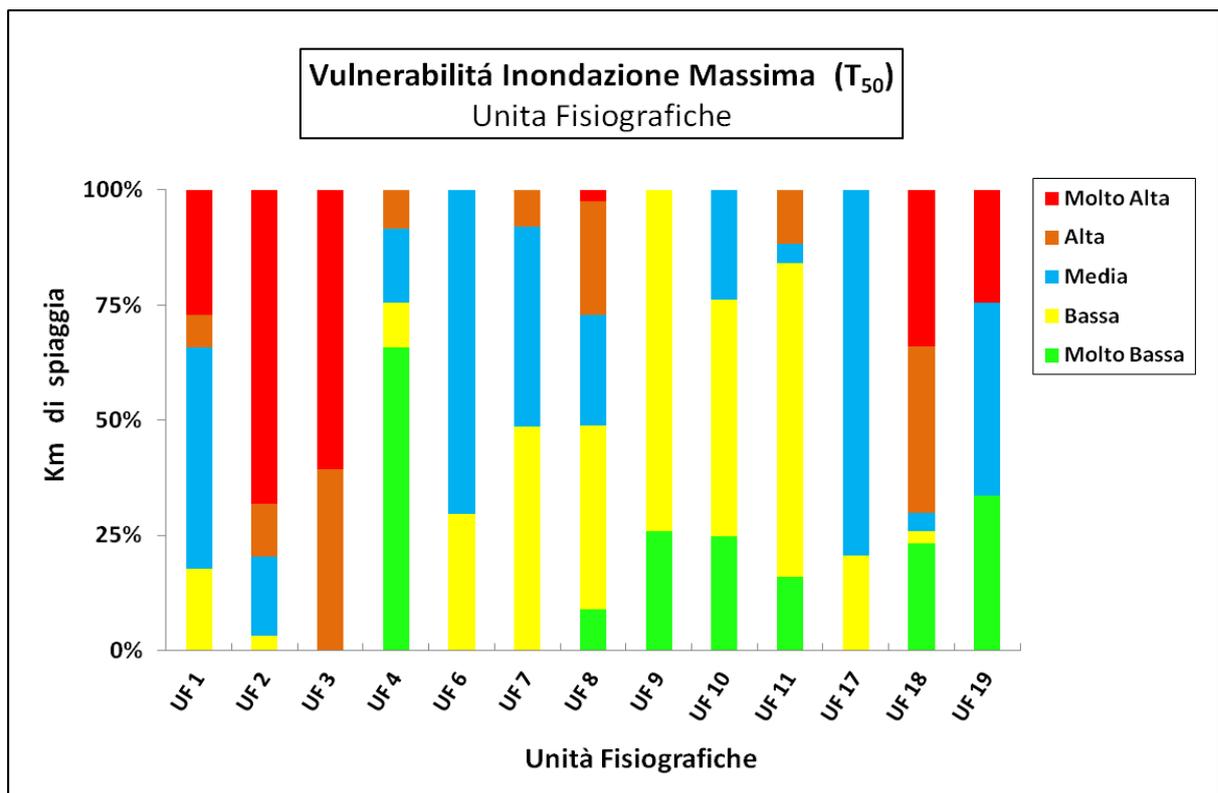
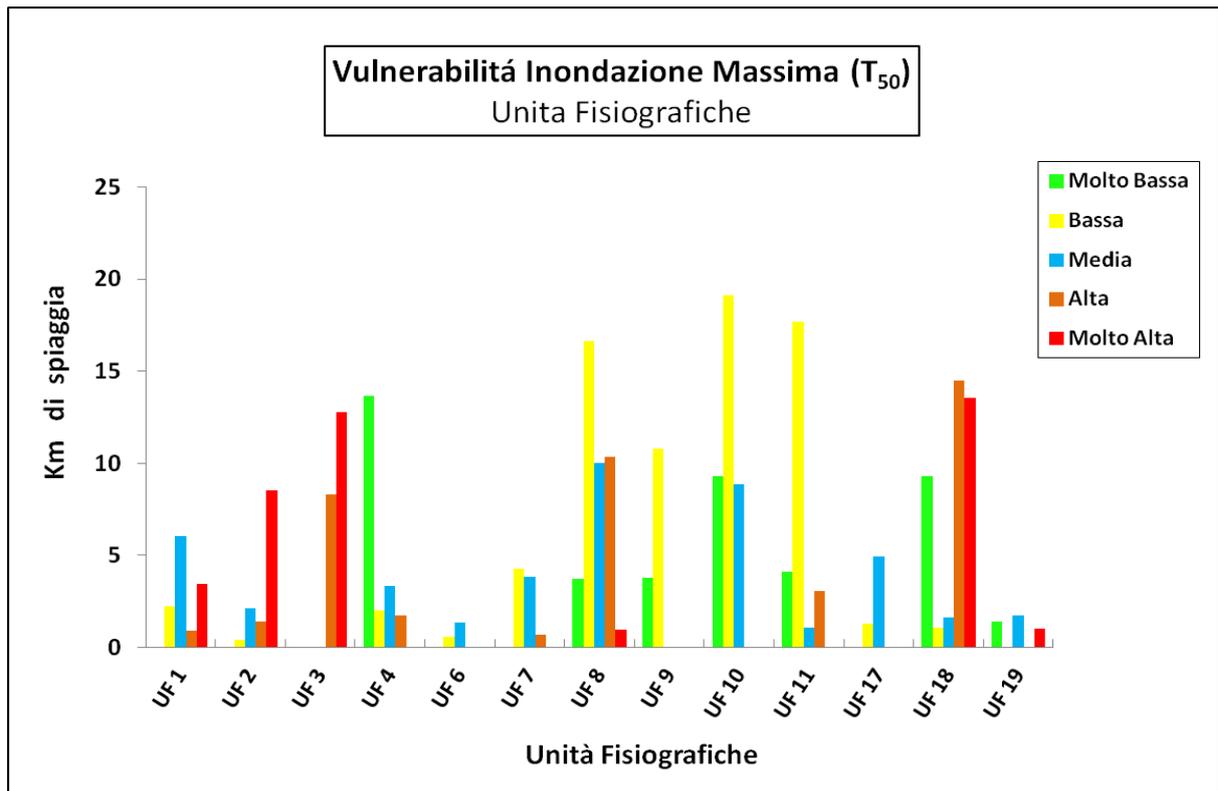


Figura 5.34 Indice di Inondazione Massima per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.

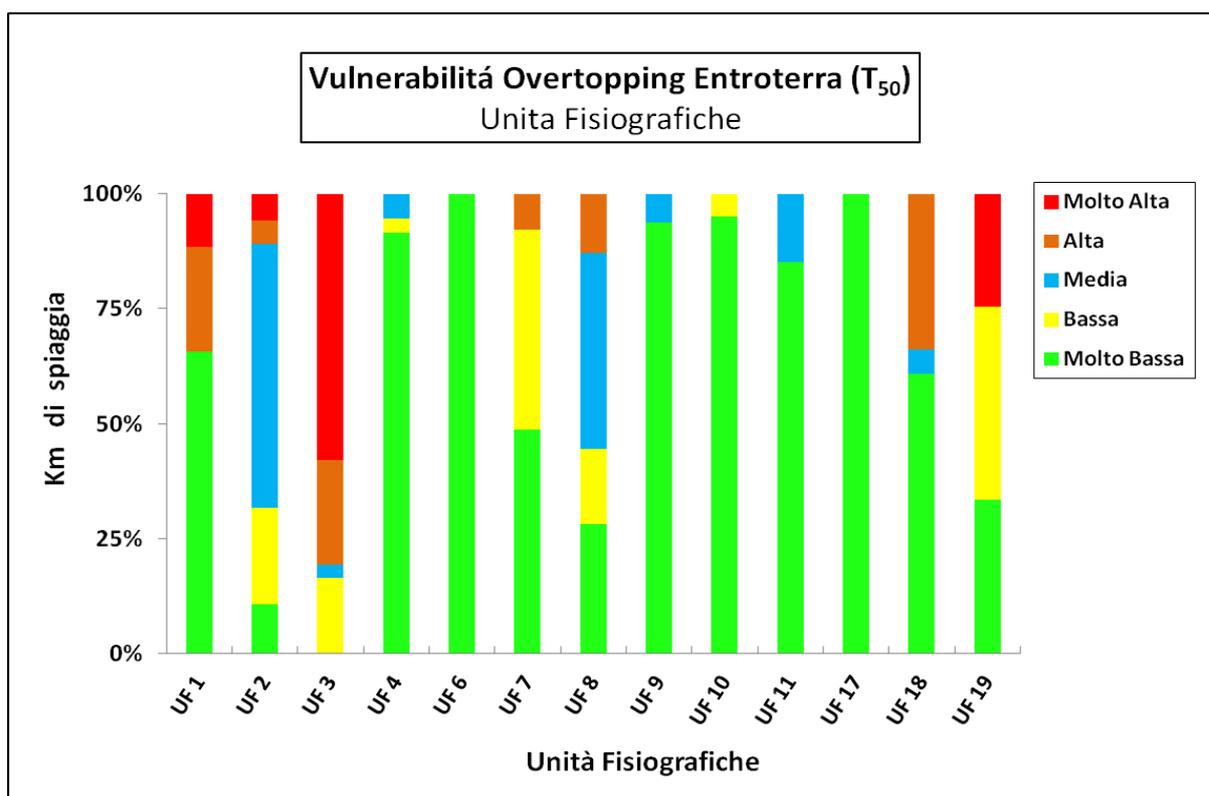
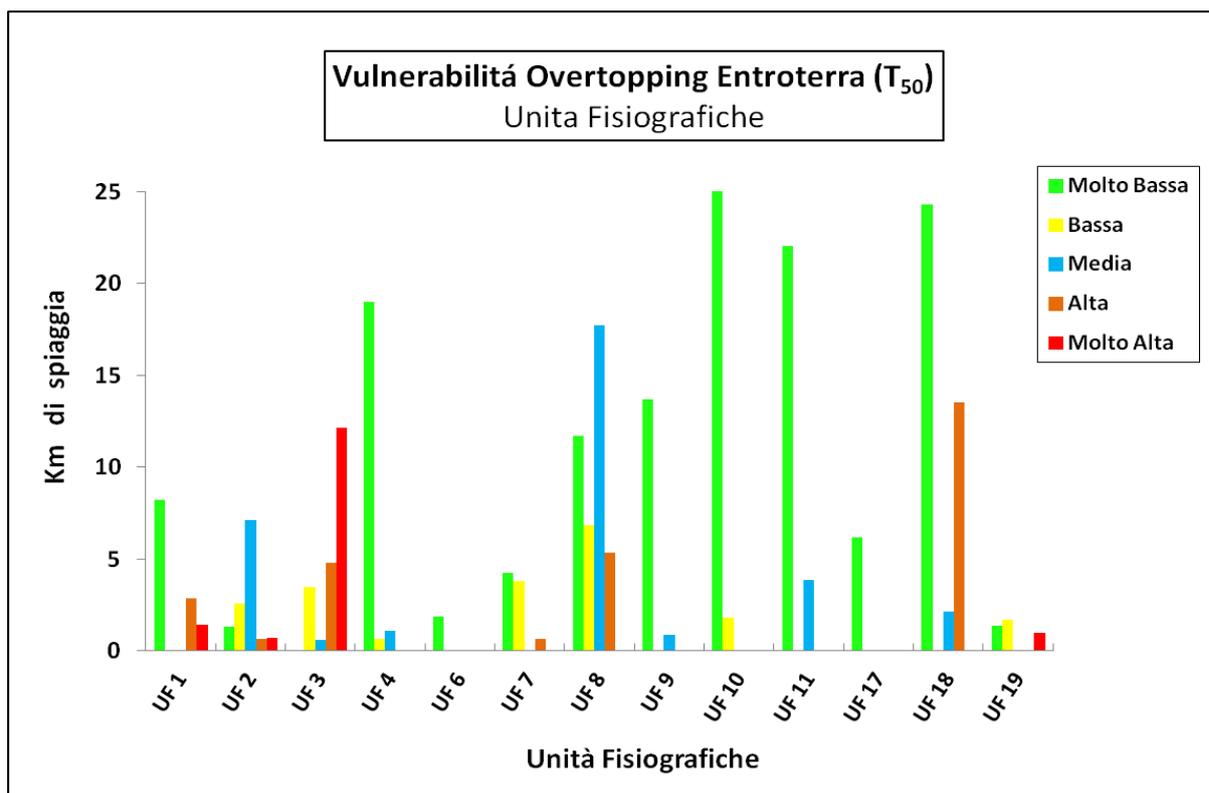


Figura 5.35 Indice di Overtopping dell'entroterra per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.

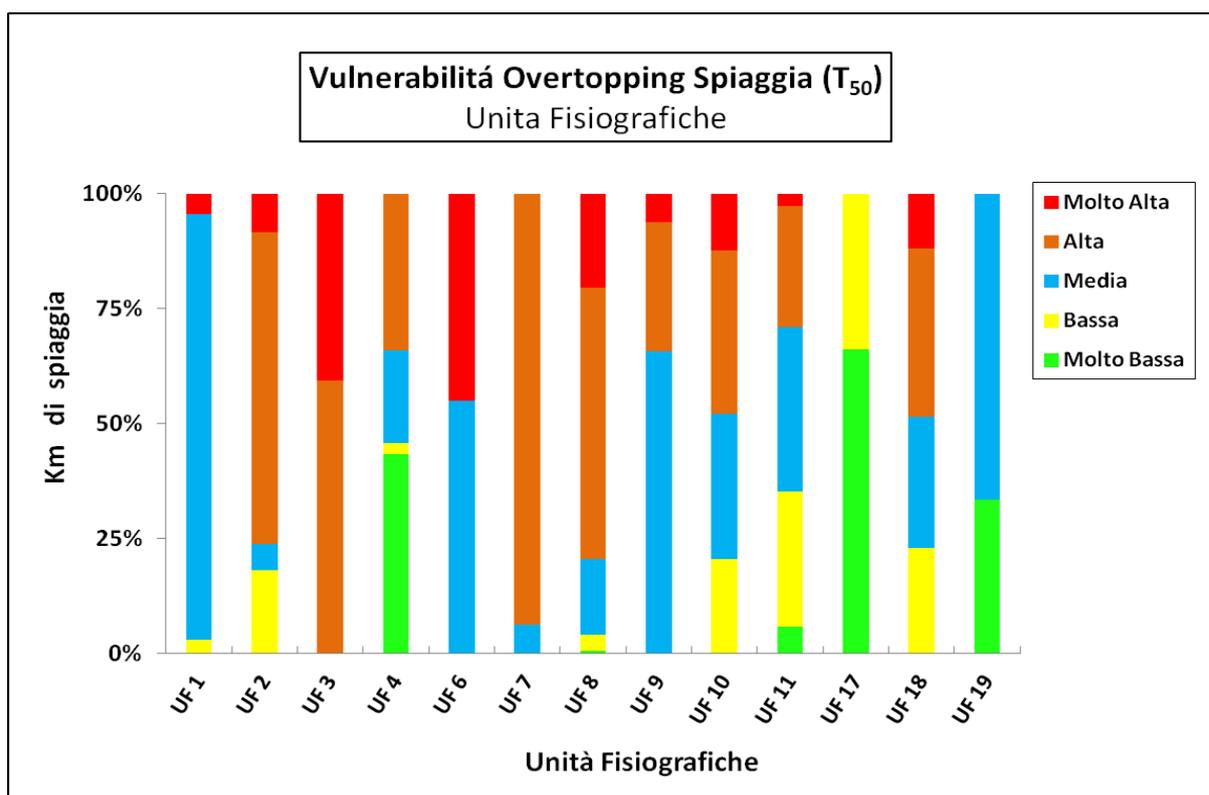
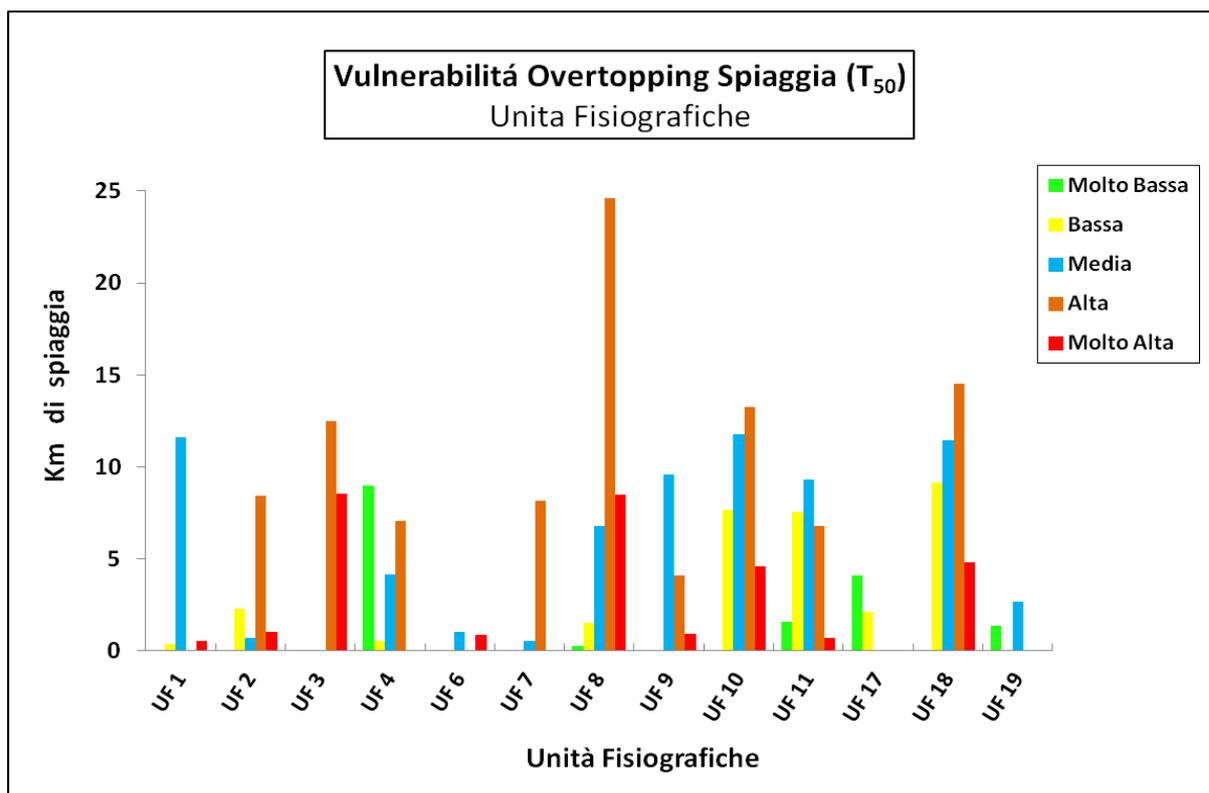


Figura 5.36 Indice di Overtopping della spiaggia per Unità Fisiografiche; in alto i km di spiaggia corrispondenti alle categorie di vulnerabilità ; in basso i km espressi in % rispetto all'unità.

5.4 Valutazione del Rischio Costiero Potenziale

Come spiegato nel paragrafo 4.5 viene effettuata una stima del potenziale rischio costiero associato ad erosione ed inondazione, considerando i tipi di habitat e di usi del suolo presenti nelle zone risultate piú vulnerabili. Pertanto si mettono in relazione i chilometri di costa delle due categorie di vulnerabilit  massima piú alte con la lunghezza dei tipi di habitat secondo la classificazione effettuata in zone naturali e zone antropiche.

EROSIONE MAX	% Vulnerabilit� Alta	% Habitat antropico	% Habitat naturale
CAGLIARI	64	71	29
OGLIASTRA	33	58	42
NUORO	49	19	81
OLBIA SASSARI	99	36	64
ORISTANO	93	35	65
CAMPIDANO	65	15	85
CARB-IGLES	69	53	47

Tabella 5.7 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'erosione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero.

Dalla tabella 5.7 e dall'istogramma della figura 5.37 si nota come le le province piú vulnerabili all'erosione siano quelle di Olbia-Sassari ed Oristano (99% e 93%) che in ogni modo presentano nell'hinterland costiero principalmente zone a carattere naturale (64% e 65%) rispetto a zone di utilizzo antropico (36%, 35%). Tali zone coincidono con alte % di zone vulnerabili nelle province di Cagliari (71% antropizzato con un 64% di categorie vulnerabili estreme) di Carbonia Iglesias (53% antropizzato e 69 % di vulnerabilit ). La Provincia del Medio Campidano presenta alta vulnerabilit  con alto % di zone naturali (85%) mentre le province meno vulnerabili sono Nuoro (49% vulnerabile contro il 19% di aree antropizzate) e l'Ogliastra dove le categorie di vulnerabilit  non superano il 33% della costa.

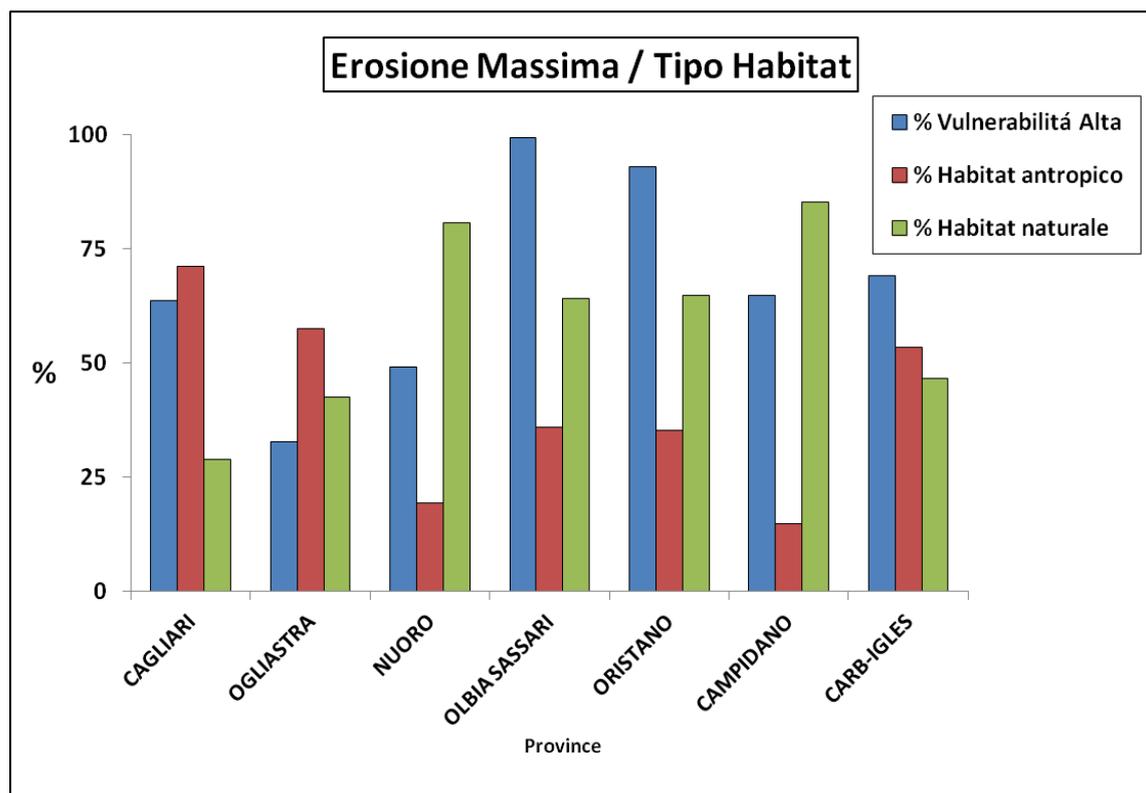


Figura 5.37 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'erosione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero.

INONDAZIONE MAX	% Vulnerabilità Alta	% Habitat antropico	% Habitat naturale
CAGLIARI	16	58	42
OGLIASTRA	0	62	38
NUORO	16	32	68
OLBIA SASSARI	58	44	56
ORISTANO	77	40	60
CAMPIDANO	8	43	57
CARB-IGLES	7	46	54

Tabella 5.8 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'inondazione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero.

Dalla tabella 5.8 e dall'istogramma della figura 5.38 si mostrano invece i risultati relativi all'indice massimo di inondazione relazionati agli usi del suolo. Come visto in precedenza le zone sensibili all'inondazione sono meno numerose di quelle sensibili all'erosione. Anche in questo caso comunque le province più vulnerabili sono quelle di Olbia-Sassari ed Oristano (58% e 77%) che come detto in precedenza sono maggiormente caratterizzate da habitat naturali. In generale per tutte le altre province il fenomeno non risulta particolarmente importante dato che solo un 16% per ogni provincia cade nelle categorie di vulnerabilità peggiori, con Cagliari e Nuoro quelle con lunghezze maggiori. Dato che Cagliari presenta maggiormente zone

antropizzate nell'entroterra, nonostante la bassa vulnerabilità riscontrata, i danni causati risulterebbero economicamente più consistenti date le caratteristiche dell'area urbana.

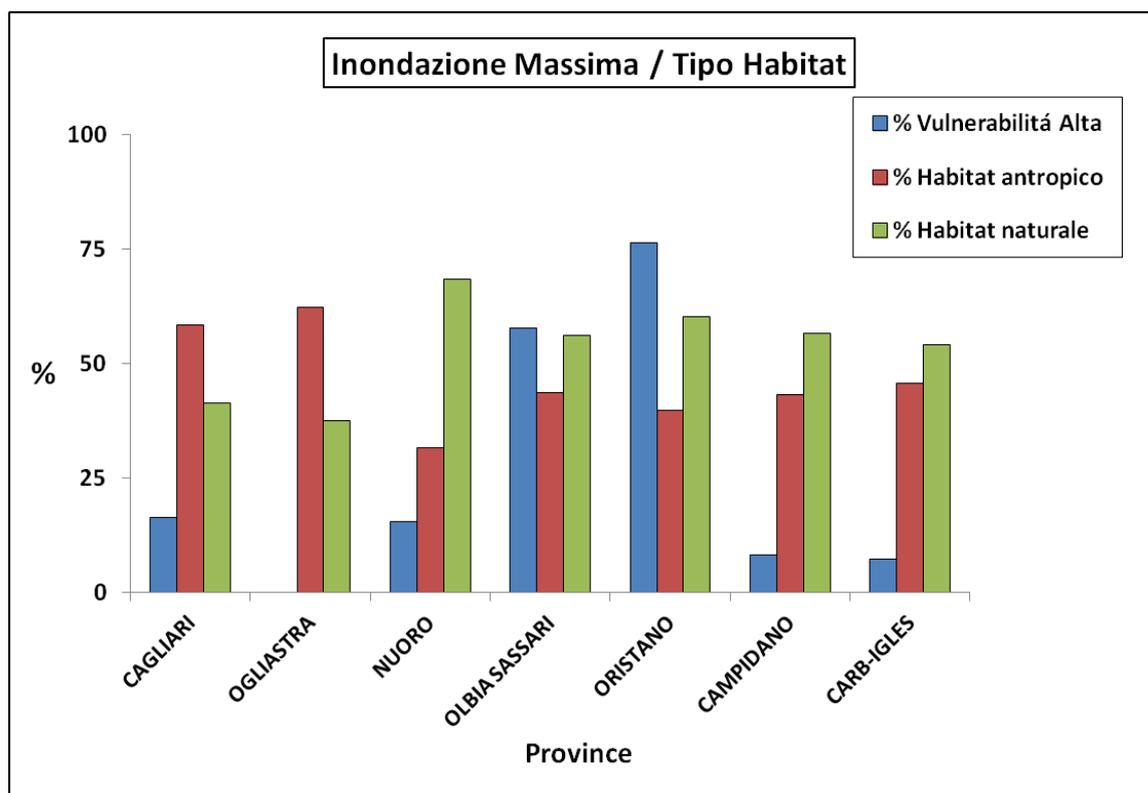


Figura 5.38 % dei chilometri di costa altamente vulnerabili all'inondazione (indice massimo) divisi per province confrontati con il % di habitat antropico e naturale presenti nell'entroterra costiero

5.5 Validazione qualitativa del metodo

Per effettuare una verifica qualitativa del metodo applicato e poter valutare quanto sia affidabile il grado di precisione dello studio, i risultati di vulnerabilità sono stati confrontati con quelli di altri lavori che hanno messo in evidenza problemi di erosione ed inondazione nelle coste della Sardegna (Figura 5.39). Per mettere in luce le zone più sensibili si sono considerati i valori degli indici di massima erosione ed inondazione. Dalla figura 5.39 si può notare che la corrispondenza tra le zone di massima vulnerabilità del nostro studio ed i punti critici è molto alta soprattutto nel caso dell'erosione, che conferma essere anche secondo altre fonti il fenomeno più rilevante. Pertanto si può affermare che il metodo da noi applicato su scala regionale riproduce in maniera verosimile e coerente l'ordine di grandezza dei processi indotti dalle tempeste di mare.

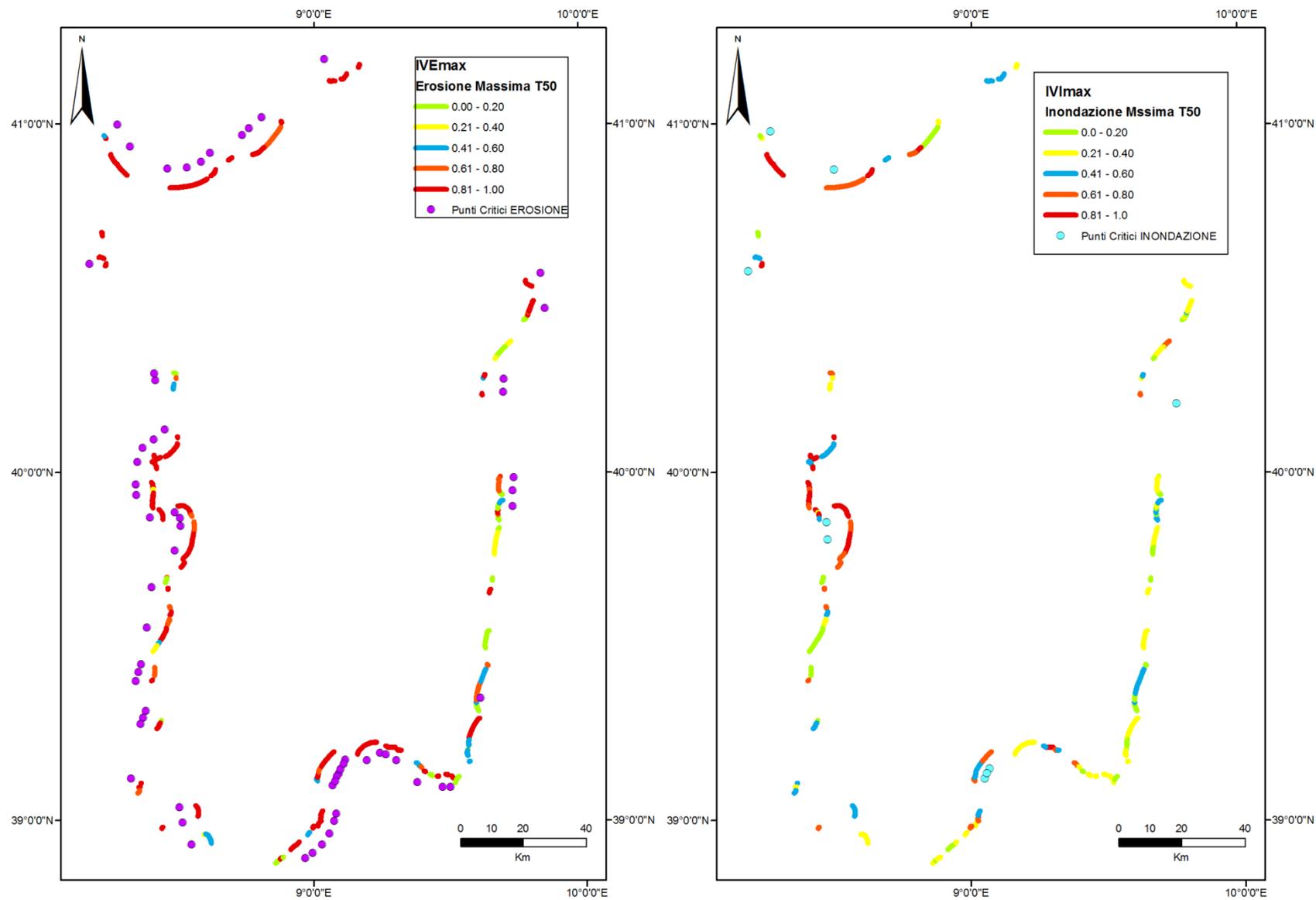


Figura 5.39 Sovrapposizione dei punti critici di erosione ed inondazione riscontrati in bibliografia con i risultati degli indici di vulnerabilità massima.

CAPITOLO 6

Discussione e Conclusioni

6.1 Discussione

In questa tesi è stata effettuata un'analisi della vulnerabilità delle coste della Sardegna all'impatto degli eventi meteo-marini estremi (tempeste di mare), considerando in maniera distinta la risposta all'inondazione e all'erosione ed adottando un'approssimazione probabilistica.

La metodologia impiegata ha permesso di differenziare la sensibilità della costa in modo indipendente per ogni processo costiero analizzato. Inoltre è stata analizzata detta vulnerabilità usando più di un parametro. In questo modo, per caratterizzare la vulnerabilità all'inondazione si è considerato sia la risposta costiera durante la tempesta (Run up verso altezza della duna) sia il fenomeno dell'overtopping valutato con il modello di Hedges and Reis (1998). I risultati sono simili tra loro solo a partire da un certo ordine di grandezza, nel senso che solo le zone più vulnerabili all'inondazione sono risultate quelle più sensibili al fenomeno dell'overtopping. Questo fatto sembra indicare che il primo metodo ci da un'idea della sensibilità della zona all'inondazione mentre l'overtopping ci da, una volta che la zona risulta potenzialmente inondabile, la misura dell'intensità del fenomeno (flusso di acqua che scorre verso terra). Pertanto, al momento di valutare l'inondazione, dovrebbero essere utilizzati entrambi i metodi, tenendo in conto che esiste una differenza di scala, nel senso che l'impatto dell'overtopping è significativo solo quando la zona risulta altamente vulnerabile al fenomeno.

Sempre per quanto riguarda il fenomeno dell'inondazione, si sono considerati due tipi di risposta della costa, in relazione alla "funzione" che svolge una spiaggia; quando funge come struttura di difesa e protezione dell'entroterra dalle onde (l'elevazione del run up si confronta con l'altezza

massima della spiaggia), i risultati dimostrano che la vulnerabilità risulta poco significativa. Vale a dire che solo pochi tratti costieri dell'isola risultano altamente vulnerabili all'inondazione marina. Diversamente è stata valutata l'inondazione della parte emersa della spiaggia che comporta il danneggiamento di tutto ciò che si trova su di essa. In questo caso il run up è stato calcolato mediante la pendenza della battigia (invece che della spiaggia intera) ed è stato rapportato con l'altezza del piede della duna. I risultati hanno mostrato che il fenomeno è molto più rilevante, dimostrando come la maggior parte delle spiagge della Sardegna sia altamente vulnerabile all'inondazione. Dal punto di vista della gestione, questo comportamento può essere interpretato come un'utile informazione da dare ai gestori per mettere in sicurezza tutte le strutture temporanee presenti normalmente sulla spiaggia durante la stagione balneare che si vedrebbero a rischio nei periodi delle tempeste (Novembre-Febbraio).

Per caratterizzare la vulnerabilità all'erosione si sono considerate le variazioni del volume di sedimenti (ΔV) e l'arretramento della linea di riva (ΔX) conseguenti all'impatto di una tempesta. In entrambi i casi si è usato sia una formula derivata dall'uso del modello *Sbeach* sia la relazione tra entrambe le variabili ottenute direttamente dalle simulazioni dello stesso modello. La formula strutturale per caratterizzare l'erosione (ΔV) è derivata confrontando i risultati ottenuti con il modello *Sbeach* con quelli stimati con il parametro ($JA \cdot dt$), mentre il valore dell'arretramento (ΔX) si è ottenuto direttamente dalle simulazioni del modello. Entrambe le equazioni strutturali sono state ottenute a partire da profili tipici della zona (trovati in bibliografia), per cui, da un punto di vista quantitativo, bisogna considerare tale analisi come una stima dell'ordine di grandezza dei processi simulati e non come una stima reale del fenomeno. La correlazione lineare per entrambe le equazioni strutturali è risultata molto buona, anche se la pendenza della retta della correlazione è abbastanza diversa nei due casi per le differenze morfologiche dei due profili tipici considerati: quello dissipativo e quello riflettente.

I risultati mostrano un comportamento apparentemente inverso, in quanto, quando si considera la variazione dei volumi di sedimento (ΔV) si nota come sia maggiore per le spiagge a comportamento riflettente rispetto a quelle a comportamento dissipativo, mentre, quando si considera l'arretramento della linea di riva (ΔX) il comportamento è inverso, con le spiagge dissipative caratterizzate da un arretramento significativamente maggiore di quelle riflettenti.

Quindi, per le stesse condizioni di moto ondoso, la massima erosione di volume di sedimenti si presenta nei profili di tipo riflettente, dovuto alla maggior pendenza della spiaggia, che implica

che il moto ondoso frange più vicino alla linea di riva implicando una minore dissipazione dell'energia. Mentre, nel caso dell'arretramento (ΔX) la massima erosione si verifica per le spiagge a comportamento dissipativo, dovuto alla minor pendenza ed una maggior ampiezza della spiaggia esposta. Infatti anche se il moto ondoso rompe più lontano dalla costa, la morfologia poco acclive del profilo permette alle onde di penetrare maggiormente verso l'interno, rendendo il sistema ampiamente esposto all'erosione. Il lavoro ha mostrato che, in generale il metodo è valido strettamente per la zona di rappresentatività dei profili considerati e per le condizioni di moto ondoso provenienti da modello numerico.

Al momento di valutare la vulnerabilità della costa si sono considerati due tipi di risposta: una media, che rappresenta il comportamento medio dell'unità analizzata, ed una massima, rappresentativa delle condizioni peggiori. Quest'ultima si è ottenuta considerando la parte più critica della spiaggia come valore rappresentativo al momento di calcolare gli indici di vulnerabilità. I risultati sono significativamente differenti, in quanto, quando si considera l'indice massimo, le categorie alte e molto alte aumentano notevolmente, soprattutto nel caso dell'erosione (da un 20% ad un 55%). I risultati ottenuti hanno mostrato che, per caratterizzare dettagliatamente la vulnerabilità, bisogna utilizzare entrambi i parametri, dato che utilizzando solo l'indice medio e considerando che il lavoro è stato fatto a scala regionale, si perderebbero tutte quelle informazioni riguardanti le zone più sensibili ai processi analizzati; zone che sono le più delicate dal punto di vista della gestione e della pianificazione costiera.

Nel caso dell'inondazione, passando dal caso medio al caso peggiore, le zone altamente vulnerabili aumentano del 18 %, dimostrando che, anche se la risposta media ci dice che il fenomeno non è molto accentuato, sono presenti molte zone critiche all'interno delle spiagge analizzate. Pertanto, come nel caso precedente, per avere una visione più precisa del comportamento del sistema, è risultato necessario l'utilizzo di entrambi i parametri.

All'analisi di vulnerabilità si è aggiunta quella della valutazione del potenziale rischio costiero, inteso in termini di valore economico/naturale che verrebbe danneggiato nel caso in cui la spiaggia non svolga la sua funzione di protezione del territorio. La provincia di Cagliari presenta circa il 70% dell'entroterra costiero antropizzato dimostrando di essere una zona molto occupata e che risulterebbe maggiormente danneggiata nel caso in cui le spiagge non svolgano la propria funzione di protezione.

Per verificare la qualità dell'analisi effettuata, le zone considerate maggiormente vulnerabili nel nostro lavoro sono state confrontate con le informazioni riguardanti problemi di erosione ed inondazione sulle coste della Sardegna trovate nella bibliografia. La corrispondenza tra le zone di massima vulnerabilità del nostro studio ed i punti critici riscontrati è molto alta soprattutto, nel caso dell'erosione, che conferma essere, anche secondo altre fonti, il fenomeno più rilevante. Pertanto si può affermare che il metodo da noi applicato su scala regionale riproduce in maniera verosimile e coerente l'ordine di grandezza dei processi indotti dalle tempeste di mare.

6.2 Conclusioni

L'applicazione del metodo permette di valutare quantitativamente e separatamente la vulnerabilità all'erosione ed all'inondazione provocate dalle tempeste di mare sulle spiagge della Sardegna. Per ottenere questo risultato le intensità delle pericolosità (run up, overtopping, volume eroso, arretramento linea di riva) associate agli eventi estremi sono state confrontate con la resilienza della spiaggia a questo tipo di fenomeni. In questo senso le pericolosità sono state definite in funzione delle variabili che definiscono il forzamento climatico e le caratteristiche geomorfologiche delle spiagge, mentre la resilienza della spiaggia è stata definita solo attraverso variabili geomorfologiche della spiaggia (ampiezza media e minima per l'erosione ed altezza media e minima della cresta della duna per l'inondazione).

Per determinare l'intensità dell'erosione indotta dalle tempeste è stato usato un modello parametrico implementato specificatamente per le coste della Sardegna. Questa parametrizzazione è stata derivata da un modello numerico che predice il trasporto di sedimenti trasversale (SBEACH model) relazionato da un predittore del profilo di erosione (JA). L'inondazione indotta dalle tempeste generalmente è causata dalla combinazione di livelli alti di acqua (marea meteorologica) e dall'azione della risalita delle onde sulla spiaggia (run up). Tuttavia l'intensità della marea meteorologica è molto inferiore rispetto alla componente dovuta all'azione del moto ondoso nell'area di studio, pertanto per caratterizzare la magnitudo dell'inondazione si è usato il valore corrispondente al run up durante il massimo picco della tempesta.

Sono state identificate 412 tempeste a partire da serie di dati di moto ondoso (1979-2012) provenienti dai 4 nodi del modello numericoo Era-Interim in modo da valutare i quattro bordi costieri dell'isola. Si sono utilizzati i dati del modello e non quelli reali di ondometri, per avere a disposizione una serie temporale sufficientemente lunga e completa per fare previsioni a lungo termine attraverso un'analisi di probabilità estrema. Ciononostante i dati relativi alle altezze d'onda H_s del nodo (41° , 10°), corrispondente al settore Nord, sono stati calibrati da Caiaffa et al (2011) con le H_s della boa ondometrica di Alghero (Rete Ondometrica Nazioanle) dimostrando che i dati del modello sottostimano quelli della boa di circa un 20%.

La scelta della soglia per definire l'altezza d'onda di un evento estremo si è basata su un'analisi statistica, utilizzando il valore di H_s corrispondente al quantile 0.99 della serie completa (1979-2012) come limite. Questo dovuto al fatto che i limiti già usati in bibliografia (2 m per Mendoza 2008, Ciavola 2007, Armaroli 2012) sono risultati troppo bassi per essere considerati significativi al momento di effettuare un'analisi degli estremi della serie ondosa. Si è scelto anche di differenziare i valori tra le due coste, assegnando il valore di 3.17 m come limite per i settori Sud ed Est e di 4.37 m per definire le tempeste dei Settori Nord ed Ovest.

Le tempeste sono state successivamente classificate in 5 classi diverse, effettuando un'analisi cluster partizionale (metodo k-medie) utilizzando il contenuto energetico come variabile caratteristica. Dato che le tempeste di ogni gruppo sono definite in base ai valori medi di H_s di picco e della durata dell'evento è stata trovata una forte relazione lineare tra queste due variabili ed il contenuto energetico di ogni classe.

Bisogna menzionare che la classificazione, già adottata in Catalogna ed Emilia Romagna, può essere applicata anche ad altre zone del Mediterraneo che presentano caratteristiche climatiche simili, solo ed esclusivamente usando dati simulati provenienti da modello numerico che nel nostro caso sottostimano quelli reali. I risultati dimostrano che le tempeste in Sardegna siano più intense rispetto a quelle misurate in Catalogna (Mendoza, 2008) e nel mar Adriatico (Ciavola 2007). La classe I presenta un'altezza media di 4.11m nel nostro caso, mentre in Catalogna e nel mar adriatico è di circa 2.50 m. Questo è dovuto probabilmente al fatto che la Sardegna, essendo un'isola nel centro del Mediterraneo risulta esposta ad un fetch molto aperto (soprattutto la costa occidentale) nel senso che è molto ampia l'area in cui si generano le onde che risultano essere quindi più energetiche e con valori di H_s e T_p molto elevati.

Avendo come obiettivo finale del lavoro valutare la vulnerabilità costiera a scala regionale, si è effettuata un'analisi probabilistica estrema in cui l'intensità della pericolosità indotta da una tempesta è stata ottenuta dalla probabilità di accadimento del processo indotto, anziché per un determinato evento di tempesta. Si valuta quindi la probabilità di accadimento dei processi di erosione ed inondazione indotti dalle tempeste anziché la probabilità di accadimento della tempesta stessa. Dopo aver valutato le pericolosità ed averne stimato la variabilità spaziale si confrontano lungo tutta la costa i valori di vulnerabilità associati alla stessa probabilità di accadimento dei processi indotti, separatamente per l'erosione e per l'inondazione, in funzione della risposta della costa.

Con lo scopo di risultare uno strumento utile per la presa di decisioni "informate" nella gestione della zona costiera, ogni metodo presentato nel lavoro dovrebbe permettere di valutare la vulnerabilità futura delle coste della Sardegna.

Questi processi costieri colpiranno principalmente la resilienza delle spiagge visto che ne modificano la morfologia e, di conseguenza, la propria abilità a resistere all'erosione e all'inondazione causate dalle tempeste. Ciononostante le condizioni dell'agente forzante potrebbero subire delle variazioni a lungo termine che, anche se non sono rilevanti per l'area di studio, potrebbero essere semplicemente incluse modificando la distribuzione probabilistica delle pericolosità. Il metodo è stato ottimizzato per la sua applicazione a grande scala riducendo la quantità di dati necessari per i calcoli effettuati. Pertanto questo è stato fatto definendo differenti settori costieri con condizioni omogenee di moto ondoso e mediante classificazione delle spiagge in diversi gruppi in accordo con i parametri principali che ne caratterizzano la risposta geomorfologica (pendenza della spiaggia sommersa e granulometria per quanto riguarda l'erosione e pendenza della spiaggia emersa nel calcolo del run up). Tuttavia, dato che la vulnerabilità è stata valutata considerando la capacità di adattamento di ogni spiaggia di fronte alle pericolosità considerate, i risultati sono stati ottenuti a scala locale. Questo tipo di analisi richiede che la vulnerabilità sia aggiornata in funzione dell'evoluzione geomorfologica delle spiagge.

I risultati ottenuti non rappresentano le condizioni reali del sistema bensì ci danno un'idea dell'ordine di grandezza dei fenomeni considerati. Pertanto l'implementazione di un piano di monitoraggio costiero per complementare il metodo è fortemente raccomandato. Inoltre una validazione locale del metodo dovrebbe essere necessaria prima della sua applicazione. Pertanto

per ottenere questa validazione bisogna creare una base dati che riporti i danni causati dagli eventi estremi e che aiuti quindi confrontare qualitativamente i risultati ottenuti con riferimenti storici.

La versatilità del metodo applicato permette non solo di aggiornare facilmente le informazioni sull'intensità dei processi e le caratteristiche delle spiagge se necessario, ma anche di applicare il metodo ad altre zone costiere, adattandolo come nel nostro caso alle caratteristiche della zona in esame.

Infine è stata creata una base dati georeferenziata che contiene informazioni sulla morfologia della spiaggia e sulla propria vulnerabilità. Come risultato la vulnerabilità può essere facilmente combinata con altre informazioni territoriali come ad esempio l'uso del suolo per identificare quegli usi e risorse costiere potenzialmente danneggiabili. Questo potrebbe supportare i gestori costieri per una maggiore conoscenza delle risorse disponibili

Il metodo proposto è stato applicato a 270 Km di costa sedimentaria di spiaggia della Sardegna. In generale si è osservata una variabilità alta nelle intensità delle pericolosità lungo la costa e anche all'interno degli stessi settori, fatto che sottolinea la grande importanza del contributo della geomorfologia della spiaggia. Inoltre siccome le caratteristiche delle spiagge determinano la capacità locale di resistere alle pericolosità indotte dalle tempeste, questo contributo risulta anche evidente nella valutazione della vulnerabilità. I risultati per un periodo di ritorno di 50 anni basati sulle condizioni correnti indicano che le coste della Sardegna sono maggiormente vulnerabili all'erosione che all'inondazione:

Le Province più vulnerabili sia all'erosione che all'inondazione sono quelle di Sassari e di Oristano seguite nell'ordine da Cagliari, Carbonia - Iglesias, Medio Campidano, Nuoro ed Ogliastra, che risulta essere la meno vulnerabile. La provincia di Cagliari è quella con maggiore longitudine di spiagge ed è quella che peggiora maggiormente quando si considera l'indice massimo invece di quello medio, soprattutto per l'erosione. Questa tendenza è confermata anche per le province di Sassari ed Oristano, che, nel caso dell'indice massimo presentano quasi la totalità delle spiagge che cadono nelle categorie più estreme di vulnerabilità. Questo è dovuto probabilmente al fatto che queste province sono ubicate nella costa Nord Occidentale, una costa aperta, molto esposta agli eventi estremi di maestrale ed inoltre che coincidono con le spiagge più strette e più basse (in media) rispetto a quelle appartenenti ad altre province.

Come sintesi conclusiva possiamo dire che le coste della Sardegna sono ampiamente più sensibili al fenomeno dell'erosione rispetto che a quello dell'inondazione marina, anche se, in alcune spiagge il fenomeno presenta punti di criticità elevata.

6.3 Sviluppi futuri

-Modello di dettaglio nelle zone più vulnerabili (LISFLOOD per l'inondazione e XBEACH per l'erosione).

-Validazione qualitativa in dettaglio, video-monitoraggio della spiaggia durante una tempesta.

-Considerare tutti i profili topografici provenienti dall'analisi tridimensionale del modello digitale del terreno al posto di un valore rappresentativo per ogni spiaggia.

-Anlisi ondometrica e Correntometrica specifiche per le singole unità Fisiografiche; considerare il fenomeno della propagazione del moto ondoso.

-Valutazione del fenomeno dell' "overwash" inteso come distanza di penetrazione dell'acqua una volta che supera una certa barriera.

-Scala temporale del cambio climatico: Calcolo di un indice di vulnerabilità di medio e lungo termine , che considera come pericolo la risalita del livello del mare (SRL:Sea Level Rise) e come recettore la geomorfologia delle spiagge seguendo il criterio già adottato.

-Possibili proposte di mitigazione ed adattamento.

BIBLIOGRAFIA

- Abuodha, P. a. O. and Woodroffee, C. D. (2010). Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from Southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation*, 14(3):189-205.
- Alcantara-Araya, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47:107-124.
- Allen, J. R. L. 1981 Beach erosion as a function of variations in the sediment budget, Sandy Hook, New Jersey, USA. *Earth Surface and Landforms* 6, 139–150.
- Alves, F. L., Coelho, C., Coelho, C. D., and Pinto, P. (2011). Modelling coastal vulnerabilities - Tool for decision support system at inter-municipality level. *Journal of Coastal Research*, SI 64:966-970.
- Anagnostopoulou, C., Tolika, K., Flocas, H., and Maheras, P. (2006). Cyclones in the Mediterranean region: present and future climate scenarios derived from a general circulation model (HadAM3P). *Advances in Geosciences*, 7:9-14.
- Anfuso, G. and Martinez Del Pozo, J. A. (2009). Assessment of coastal vulnerability through the use of GIS tools in South Sicily (Italy). *Environmental management*, 43(3):533-45.
- Arba, P., Arisci, A., de Waele, J., di Gregorio, F., Ferrara, C., Follesa, R., Pranzini, E. (2002). Environmental Impact of Artificial Nourishment of the Beaches of Cala Gonone (Central – East Sardinia). *Litoral 2002, The Changing Coast, EUROCOAST/EUCC*, 465–468.
- Armaroli, C., Ciavola, P., Masina, M. 2009a. Morphological thresholds for the definition of the vulnerability of coastal dunes in northern Italy. *Proc. AGU Conference*, 90(52), EOS Transaction.AGU, San Francisco, California.

- Armaroli, C., Ciavola, P., Masina, M., Perini, L. 2009b. Run-up computation behind emerged breakwaters for marine storm risk assessment. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 1612 – 1616.
- Armaroli, C., Grottoli, E., Harley, M.D., Ciavola, P. 2013. Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology*, 199, 22-35.
- Armaroli, C., Ciavola, P., Perini, L., Calabrese, L., Lorito, S., Valentini, A., Masina, M. 2012a. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology*, 143-144, 34-51.
- Armaroli, C., Perini, L., Calabrese, L., Luciani, P., Salerno, G., Ciavola, P. 2012b. Cartografia di rischio da mareggiata della fascia costiera della Regione Emilia-Romagna. Proc. Meeting Marino, D'Angelo S. and Fiorentino A. (Eds.), ISPRA, 25-33, Roma.
- Barbano, A., Corsini, S., Lisi, I., Bruschi, A., Gizzo, M. Del, Archina, M., & Paone, M. (2007). Caratteristiche della costa italiana: le unità fisiografiche e la profondità di chiusura. 359–368.
- Barnard, P.L., Revell, D.L., Hoover, D., Warrick, J., Brocatus, J., Draut, A.E., Dartnell, P., Elias, E., Mustain, N., Hart, P.E., and Ryan, H.F., 2009, Coastal processes study of Santa Barbara and Ventura Counties, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1029, 904 p. [<http://pubs.usgs.gov/of/2009/1029/>].
- Barnard, P. L. et al. The impact of the 2009-10 El Niño Modoki on U.S. West Coast beaches. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L13604 (2011).
- Benetazzo, A. et al (2012). Wave climate of the Adriatic Sea: a future scenario simulation *Natural Hazards Earth System. Science.*, 12, 2065–2076, 2012.
- Bolanos, R., Sanchez-Arcilla, A., and Cateura, J. (2007). Evaluation of two atmospheric models for wind wave modelling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems*, 65:336-353.
- Borgman, L. (1963). Risk criteria. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering-ASCE*, 89,(WW3):1-35.

- Boruff B. J., Emrich, C., and Cutter, S. L. (2005). Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *Journal of Coastal Research*, 21(5):932-942.
- Bosom, E. and Jimenez, J. A. (2010). Storm-induced coastal hazard assessment at regional scale: application to Catalonia (NW Mediterranean). *Advances in Geosciences*, 8:1-5.
- Bosom, E. and Jimenez, J. a. (2011). Probabilistic coastal vulnerability assessment to storms at regional scale application to Catalan beaches (NW Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(2):475-484.
- Bryant, A. 1988 Storminess and high beach changes, Stanwell Park, Australia. *Marine Geology* 79, 1943–1978.
- Brooks, N. (2003). Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. Working paper 38:1-16.
- Caiaffa, E., Lombardi, E., Monti, P., & Leuzzi, G. (2011). Valutazione del potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste italiane.
- Cavaleri, L., & Sclavo, M. (2006). The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, 53(7), 613–627.
- Caires, S., Swail, R., and Wang, X. L. (2006). Projection and analysis of extreme wave climate. *Journal of Climate*, 19:5581-5605.
- Calafat, F. M. and Jord_a, G. (2011). A Mediterranean sea level reconstruction (1950 - 2008) with error budget estimates. *Global and Planetary Change*, 79:118-133.
- Carillo, A., Bargagli, A., Caiaffa, E., Iacono, R., & Sannino, G. (2012). Stima del potenziale energetico associato al moto ondoso in regioni campione della costa italiana, Report RdS/2012/1701–30.
- Casas-Prat, M. and Sierra, J. P. (2013). Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(7):3548-3568.

-
- Cavaleri, L. and Bertotti, L. (2004). Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. *Tellus*, 56A(2):167-175.
- Cavaleri, L., & Sclavo, M. (2006). The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, 53(7), 613–627.
- CEPAL (2012). Efectos del cambio climático en la costa de America Latina y el Caribe: Vulnerabilidad y exposició. Technical report, Comisiòn Economica para Amaerica Latina y el Caribe, Santiago de Chile.
- Church, J. A. and White, N. J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33, L01602.
- Ciavola et al (2007). Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy). *Journal of Coastal Research*, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), 540 – 544. Gold Coast, Australia, ISBN).
- Ciavola, P., Armaroli, C., Perini, L., Luciani, P. 2008. Evaluation of maximum storm wave run-up and surges along the Emilia-Romagna coastline (NE Italy): A step towards a risk zonation in support of local CZM strategies. In: *Integrated Coastal Zone Management - The Global Challenge*, 505-516, Research Publishing Services, Singapore ISBN 978-981-05-8948-6.
- CIIRC (2010). Estat de la zona costanera a Catalunya. Technical report, Centre Internacional d'Investigaci_o dels Recursos Costaners, Barcelona.
- Coles, S. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, London, UK.
- Consejo de la Unión Europea. (2011). Protocolo relativo a la gestión integrada de las zonas costeras del Mediterráneo al Convenio para la Protección del Medio Marino y de la Región Costera del Mediterráneo, 111–132.

- Cooper, J. A. G. and Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43:157-171.
- Davidson-Arnott, R. G. D. (2005). Conceptual model of the effects of sea level rise on sandy coasts. *Journal of Coastal Research*, 21(6):1166-1172.
- Dean, R. (1973). Heuristic models of sand transport in the surf zone. In *Proceedings of the 1st Australian Conference on Coastal Engineering, 1973: Engineering Dynamics of the Coastal Zone*, Sydney, pp. 208-214, Sydney. Institution of Engineers.
- De Bruijn and Klijn, 2011 Risky places in the Netherlands: a first approximation for floods *Journal of Flood Risk Management*, 2 (2009), pp. 58–67.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, a. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(April), 553–597.
- Dean, R. 1973 Heuristic models of sand transport in the surf zone. *First Australian Conference on Coastal Engineering* pp. 208–214.
- De Falco G., Simeone S., Solinas G., Batzella T., Cancemi G., Cancemi M., De Muro S. 2008. Arretramento della linea di riva e rimozione delle banquette di Posidonia oceanica nella spiaggia di Paragan (Corsica meridionale). Riassunti 84° Congresso Nazionale SGI - Rendiconti online Soc.Geol. It., Vol. 3 (2008), 296-297.
- De Falco, G., Simeone, S., Baroli, M. 2008. Management of beach-cast Posidonia oceanica seagrass on the island of Sardinia (Italy, Western Mediterranean), *Journal of Coastal Research* 24 (4C), 69-75.
- De Falco, G., Baroli, M., Cucco, A., Simeone, S., 2008. Intrabasinal conditions promoting the development of a biogenic carbonate sedimentary facies associated with the seagrass Posidonia oceanica. *Continental Shelf Research*, 28, 797-812.

- De Falco G, Simeone S., De Muro S (2010). Analisi della dinamica deposizionale delle banquette di posidonia oceanica nella spiaggia di cala di trana (Palau) mediante video monitoraggio. In (De Muro and De Falco Eds) Manuale per la gestione delle spiagge. Studi, indagini ed esperienze sulle spiagge Sarde e Corse. University Press, CUEC , ISBN/ISSN: 978-88-8467-629-0.
- De Falco G, Tonielli R, Di Martino G, Innangi S, Simeone S., Parnum IM (2010). Relationships between multibeam backscatter, sediment grain size and Posidonia oceanica seagrass distribution. *Continental Shelf Research*, vol. 30; p. 1941-1950.
- De Falco G., Budillon F., Conforti A., De Muro S., Di Martino G, Innangi S, Perilli A., Tonielli R., Simeone S., 2014. Sandy beaches characterization and management of coastal erosion on western Sardinia island (Mediterranean Sea). *Journal of Coastal Research*, S.I. 70, 395-400.
- De Pippo, T., Donadio, C., Pennetta, M., Petrosino, C., Terlizzi, F., and Valente, A. (2008). Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy. *Geomorphology*, 97:451-466.
- Devoti S., Silenzi S., (2010) Il Sistema Spiaggia/ Duna della pelosa Stintino) Quaderni - Ricerca Marina 1/2010 ISPRA, Quaderni - Ricerca Marina n. 1/2010 ISBN 978-88-448-0458-9.
- Di Gregorio, F., Federici, P. R., Fierro, G., and Ginesu, S.: Atlante delle spiagge della Sardegna, Fogli (167, 168, 179, 180, 192, 199, 205, 208, 219, 216, 224, 227, 232, 234, 235, 239) R.A.S, Cagliari, 1998.
- Di Gregorio F., Atzeni A., De Muro S., Piras G., Carta del Rischio Geoambientale nelle coste della Sardegna – 2004 pubblicato unitamente a : Di Gregorio F., Federici P.R., Fierro G., Ginesu., -Atlante delle spiagge della Sardegna.
- Di Gregorio, F., Pusceddu, M., & Serreli, A. (2009). Valutazione del rischio costiero mediante tecniche GIS del litorale di Pula (Sardegna Sud-occidentale), 903–908.

-
- Di Gregorio, F. Di, Pusceddu, M., Romoli, E., Serreli, A., Carlo, T., & Ambientale, G. (2010). Valutazione del rischio d'erosione costiera nell'area archeologica di Nora (Sardegna SW), 869–874.
- Di Paola, G. D., Iglesias, J., Rodriguez, G., Benassai, G., Aucelli, P., and Pappone, G. (2011). Estimating coastal vulnerability in a meso-tidal beach by means of quantitative and semi-quantitative methodologies. *Journal of Coastal Research*, SI61:303-308.
- Divoky, D. and Mcdougal, W. G. (2006). Response-based coastal food analysis. In *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, San Diego, USA), pp. 5291-5301, San Diego, USA. ASCE.
- Doherty, K., Folley, M., Doherty, R., and Whittaker, T. (2011). Extreme value analysis of wave energy converters. In *Proceedings of the Twenty-First International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 557-564, Mawi, USA.
- Dolan, R. & Davis, R. 1992 An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. *Journal of Coastal Research* 8 (4), 840–853.
- Dominguez, L., Anfuso, G., and Gracia, F. (2005). Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain. *Environmental Geology*, 47(8):1037-1044.
- Donnelly, C., Ranasinghe, R., Larson M. 2006. Numerical Modeling of Beach Profile Change Caused by Overwash. *Coastal Dynamics 2005*, ASCE, 1-14.
- Donnelly, C.; Kraus, N., and Larson, M.2006. State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. *Journal of Coastal Research*, 22(4), 965–991. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Donnelly, C., Wamsley, T.V., Kraus, N.C., Larson, M., and Hanson, H. 2006. Morphologic classification of coastal overwash. *Proceedings 30th Coastal Engineering Conference*, ASCE, 2805-2817.

-
- Donnelly, C. and Sallenger, A. H. Jnr. 2007. Characterisation and modelling of washover fans. Proceedings Coastal Sediments '07, ASCE, 2061-2073.
- Donnelly, C. 2008. Coastal Overwash: Processes and Modelling. Ph.D. Thesis, University of Lund, 53 pp.
- Duro, J. A. and Rodriguez, D. (2011). Estimació del PIB turistic per Catalunya, marques i comarques. Technical report, Direcció General de Turisme, Generalitat de Catalunya.
- Edge, B.L., Park, Y.H., and Overton, M. 2007. Experimental study of overwash. Proceedings Coastal Sediments '07, ASCE, 2074- 2083.
- Fenoglio-Marc, L. (2002). Long-term sea level change in the Mediterranean Sea from multi-satellite altimetry and tide gauges. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27:1419-1431.
- Figlus, J., Kobayashi, N., Gralher, C., Iranzo, V. 2010. Wave overtopping and overwash of dunes. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 137(1), 26-33.
- Fournier d'Albe, E.M., 1979 Objectives of Volcanic Monitoring and Prediction. *Journal of the Geological Society of London*, 136: 321-26.
- Furlan, A., Bonotto, D. M., and Gumiere, S. J. (2011). Development of environmental and natural vulnerability maps for Brazilian coastal at Sao Sebastiao in Sao Paulo State. *Environmental Earth Sciences*, 64(3):659-669.
- Füssel, H.-M. (2007). Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17(2):155-167.
- Füssel, H.-M. and Klein, R. J. T. (2006). Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75(3):301-329.
- Gaddis, E. B., Miles, B., Morse, S., and Lewis, D. (2007). Full-cost accounting of coastal disasters in the United States: Implications for planning and preparedness. *Ecological Economics*, 63(2-3):307-318.

-
- Garcia-Mora, M. R., Gallego-Fernandez, J. B., and Garcia-Novo, F. (2000). Plant diversity as a suitable tool for coastal dune vulnerability assessment. *Journal of coastal research*, 16(4):990-995.
- Garcia-Mora, M. R., Gallego-Fernandez, J B Williams, A. T., and Garcia-Novo, F. (2001). A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 17(4):802-811.
- Garrity, N. J., Battalio, R., Hawkes, P. J., and Roupe, D.: Evaluation of the event and response approaches to estimate the 100-year coastal flood for Pacific coast sheltered waters, Proc. 30th ICCE, ASCE, 1651–1663, 2006.
- Generalitat de Catalunya (2012). Catalunya Turística en Xifres 2012. Technical report, Direcció General de Turisme. Departament d'Empresa i Ocupació.
- GIOC (2004). Impactos en la costa española por efecto del cambio climático (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria). Technical report, Oficina Española de Cambio Climático (Ministerio de Medio Ambiente).
- Godschalk, D. R., Brower, D. J., and Beatley, T. (1989). Catastrophic coastal storms, hazard mitigation and development management. Duke University Press, Durham, USA.
- Gornitz, V. (1991). Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(4):379-398.
- Gornitz, V., Daniels, R. C., White, T. W., and Birdwell, K. R. (1994). The development of a coastal risk assessment database for the U.S. southeast: Erosion and inundation from sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, SI 12:327-338.
- Gornitz, V., Beaty, T. W., and Daniels, R. C. (1997). A coastal hazards data base for the US West Coast. Technical report, Oak Ridge National Laboratory.
- Gouldby, B. and Samuels, P. (2005). Language of Risk, project definitions. FLOODSITE. Project report T32-04-01.

-
- Green, C. and McFadden, L. (2007). Coastal vulnerability as discourse about meanings and values. *Journal of Risk Research*, 10(8):1027-1045.
- Grinsted, A. Moore, J. and Jevrejeva, S. (2009). Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. *Climate Dynamics*, 34:4611-472.
- Guedes Soares, C., Weisse, R., Carretero, J. C., and Alvarez, E. (2002). A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in european waters. In *Proceedings of the 21st international Conference on O_shore Mechanics and Arctic Engineering*, pp. 669-675, Oslo, Norway.
- Gutierrez, B. T., Plant, N. G., and Thieler, E. R. (2011). A bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise. *Journal of Geophysical Research*, 116, F202009.
- Harvey, N. and Woodrofe, C. D. (2008). Australian approaches to coastal vulnerability assessment. *Sustainability Science*, 3(1):67-87.
- Hedges, T., Reis, M. 1998. Random wave overtopping of simple seawalls: a new regression model. *Water, Maritime and Energy Journal*, 1(130), 1-10.
- Hinkel, J. (2005). DIVA: an iterative method for building modular integrated models. *Advances in Geosciences*, 4:45-50.
- Hinkel, J. and Klein, R. J. (2009). Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 19(3):384-395.
- Hinkel, J. and Klein, R. J. T. (2007). Integrating knowledge for assessing coastal vulnerability to climate change. In McFadden, L., Nicholls, R. J., and Penning- Rowsell, E. C. (editors), *Managing Coastal Vulnerability: An Integrated Approach*. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review in Ecology and Systematics* 4:1-23.

- IPCC CZMS (1992). Global climate change and the rising challenge of the sea. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Response Strategies Working Group of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Hague, The Netherlands.
- IPCC, 2000. Emission scenarios, special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC (2001) Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers, WMO, p995.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge UK: Cambridge University Press.
- ISPRA. (2012) Mare e ambiente costiero . Tematiche in Primo Piano- Annuario Dei Dati Ambientali 2011, 259-322.
- Jiménez, J. A., Sanchez-Arcilla, A., and Stive, M. J. F. (1993). Discussion on prediction of storm/normal beach profiles. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 19(4):466-468.
- Jiménez, J. A., Sanchez-Arcilla, A., and Valdemoro, H. I. (1997a). Predicción de los cambios en el perfil de playa utilizando parámetros adimensionales sencillos. *Revista de Obras Publicas*, 3362:29-39.
- Jiménez, J. A., Sanchez-Arcilla, A., Valdemoro, H. I., Gracia, V., and Nieto, F. (1997b). Processes reshaping the Ebro delta. *Marine Geology*, 144(97):59-79.
- Jiménez, J. A., Ciavola, P., Balouin, Y., Armaroli, C., Bosom, E., Gervais, M., and Ferrara, U. (2009). Geomorphic coastal vulnerability to storms in microtidal fetchlimited environments: application to NW Mediterranean & N Adriatic Seas. *Journal of Coastal Research*, (56):1641-1645.

-
- Jiménez, J. A. and Madsen, O. S. (2003). A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 129(2):70-78.
- Jiménez, J. A., Sancho-Garcia, A., Bosom, E., Valdemoro, H. I., and Guillen, J. (2012). Storm-induced damages along the Catalan Coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology*, 143-144:24-33.
- Jiménez, J. A. and Valdemoro, H. I. (2013). Playas a lo largo de la costa catalana: un recurso sostenible? In XII Jornadas Espanolas de Ingenieria de Costas y Puertos, Cartagena, Spain.
- Judge, E. K., Overton, M. F., and Fisher, J. S. (2003). Vulnerability indicators for coastal dunes. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 129(6):270-278.
- Khouakhi, A., Snoussi, M., Niazi, S., and Raji, O. (2013). Vulnerability assessment of Al Hoceima bay (Moroccan Mediterranean coast): a coastal management tool to reduce potential impacts of sea-level rise and storm surges. *Journal of Coastal Research*, SI 65:968-973.
- Kelly, P.M., Adger, W.N., 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climate Change* 47, 325–352.
- Kerper, D.R., Sakumoto, L., Zyserman, J.A., Baek, S. 2006. Application of FEMA Guidelines for Coastal Flood Hazard Mapping to a site in Northern California. *Proc. 30th ICCE*, ASCE, 1812-1825.
- Klein, R. J. T., Nicholls, R. J., and Mimura, N. (1999). Coastal adaptation to climate change: Can the IPCC technical guidelines be applied? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4:239-252.
- Kobayashi, N., Tega, Y., Hancock, M.W. 1996. Wave reflection and overwash of dunes. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 122(3), 150-153.
- Lambert, S. J. 1995 The effects of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths. *Journal of Climate* 8, 1447–1452.

-
- Larson, M., & Kraus, N. C. 1989 Numerical model for simulating storm induced beach change. Technical Report U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, U.S.A.
- Lionello, P., Cogo, S., Galati, M., and Sanna, A. (2008). The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 63(2-3):152-162.
- Lionello, P., Dalan, F., and Elvini, E. (2002). Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO₂ climate scenarios. *Climate Research*, 22:147-159.
- Lionello, P. and Sanna, A. (2005). Mediterranean wave climate variability and its links with NAO and Indian Monsoon. *Climate Dynamics*, 25(6):611-623.
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., and Lopez (2009). A press database on natural risks and its application in the study of floods in Northeastern Spain. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9:2049-2061.
- Mahendra, R. S., Mohanty, P. C., Bisoyi, H., Kumar, T. S., and Nayak, S. (2011). Assessment and management of coastal multi-hazard vulnerability along the CuddaloreVillupuram, East coast of India, using geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 54(4):302-311.
- Malvarez Garcia, G., Pollard, J., and Dominguez, R. (2000). Origins, management and measurement of Stress on the coast of Southern Spain. *Coastal Management* 28:215-234.
- Marcos, M. and Tsimplis, M. N. (2008). Coastal sea level trends in Southern Europe. *Geophysical Journal International*, 175:70-82.
- Martinez, M., Intralawan, A., Vazquez, G., Perez-Maqueo, O., Sutton, P., and Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2-3):254-272.
- Martins, V. N., Pires, R., and Cabral, P. (2012). Modelling of coastal vulnerability in the stretch between the beaches of Porto de Mios and Falesia, Algarve (Portugal). *Journal of Coastal Conservation*, 16(4):503-510.

- McFadden, L. and Green, C. (2007). Defining 'vulnerability': conflicts, complexities and implications for Coastal Zone Management. *Journal of Coastal Research*, SI 50:120-124.
- McFadden, L., Nicholls, R. J., and Penning-Rowsell, E. (2007). *Managing coastal vulnerability*. Elsevier, 262 pp.
- McLean, R., Tsyban, A., Burkett, V., Codignotto, J., Forbes, D., Mimura, N., Beamish, R. & Ittekkot, V. 2001. Coastal zones and marine ecosystems. In *Climate Change 2001: Impacts, Adaptations and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. J. Mc-Carthy, O. Canziani, N. Leary, D. J. Dokken & K. S. White), pp. 343–379. Cambridge: Cambridge University Press.
- Meehl, G. A., Stoker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Watterson, I. G., Weaver, A. J., and Zhao, Z.-C. (2007). Global climate projections. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. (editors), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, pp. 747-845. Cambridge University Press, UK and New York.
- Mendoza, E. T. (2008). *Coastal vulnerability to storms in the Catalan Coast*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Mendoza, E. T. and Jiménez, J. A. (2006). Storm-induced beach erosion potential on the Catalan coast. *Journal of Coastal Research*, SI 48:81-88.
- Mendoza, E. T. and Jiménez, J. A. (2008). Vulnerability assessment to coastal storms at a regional scale. In *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Hamburg, Germany.
- Mendoza, E.T., Jiménez, J.A., 2006. Storm-Induced Beach Erosion Potential on the Catalan Coast. *Journal of Coastal Research*. SI 48, 81-88.
- Mendoza, E. T. and Jiménez, J. A. (2009). Regional geomorphic vulnerability analysis to storms for Catalan beaches. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Maritime Engineering* 162(3):127-135.

-
- Mendoza, E.T., Jiménez, J.A., Mateo, J. 2011. A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 2453- 2462.
- Meur-Ferec, C., Deboudt, P., and Morel, V. (2008). Coastal risks in France: an integrated method for evaluating vulnerability. *Journal of Coastal Research*, 24:178- 189.
- Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T., and Oku, Y. (2010). Projection of extreme wave climate change under global warming. *Hydrological Research Letters*, 4:15-19.
- Morton, R. A., Gibeaut, J. C. & Paine, J. G. 1995 Meso-scale transfer of sand during and after storms: implications for prediction of shoreline movement. *Marine Geology* **126** (1-4), 161–179.
- Morton, R.A. 2002. Factors controlling storm impacts on coastal barriers and beaches - A preliminary basis for near real-time forecasting. *Journal of Coastal Research*, 18, 486- 501.
- Morton, R.A., Sallenger, A.H.Jr. 2003. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers. *Journal of Coastal Research*, 19, 560-573.
- Munich Reinsurance Group 2004 Annual review: Natural catastrophes 2004. Geoscience Research Group, Munich, Germany
- Nicholls, R., Wong, P., Burkett, V., Codignotto, J., Hay, J., McLean, R., Ragoonaden, S., and Woodro_e, C. (2007). Coastal systems and low-lying areas . In Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., van der Linden, P., and Hanson, C. (editors), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 315-356. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Nicholls, R. J. and Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985):1517-20.
- Nicholls, R. J., Marinova, N., Lowe, J. A., Brown, S., Vellinga, P., de Gusmao, D., Hinkel, J., and Tol, R. S. J. (2011). Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4C world' in the

twenty-first century. *Philosophical transactions of the Royal Society A: Mathematical, physical and engineering sciences*, 369(369):161-181.

-Nissen, K. M., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., Renggli, D., Ulbrich, S., and Ulbrich, U. (2010). Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(7):1379-1391.

-Pandey, M. D., Gelder, P. H. A. J. M. V. & Vrijling, J. K. 2001 The estimation of extreme quantiles of wind velocity using l-moments in the peaks-over-threshold approach. *Structural safety* 23 (2), 179–192.

-Perez-Manqueo, O., Intralawan, A., and Martinez, M. (2007). Coastal disasters from the perspective of ecological economics. *Ecological Economics*, 63(2-3):273-284.

-Pernetta, J. C. and Elder, D. L. (1992). Climate, sea level rise and the coastal zone: management and planning for global changes. *Ocean & Coastal Management*, 18:113-160.

-Pethick, J. S. and Crooks, S. (2000). Development of a coastal vulnerability index: a geomorphological perspective. *Environmental Conservation*, 27(4):359-367.

-Peviani, M., Bonamano, S., & Paladini, F. (2012). Metodi di valutazione del potenziale energetico dal moto ondoso a scala regionale e locale , caso applicativo nella costa occidentale della Sardegna. Rapporto Ricerca sul Sistema Energetico RSE S.p.a. Pubblicato 12001441 (PAS 86804).

-Pinto, J. G., Ulbrich, U., Leckebusch, G., Spanghel, T., Reyers, M., and Zacharias, S. (2007). Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5 / MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics*, 29:195-210.

-Ponce de Leon, S. and Guedes Soares, C. (2008). Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean sea. *Coastal Engineering*, 55(11):920-929.

-Prinos, P. and Sanchez-Arcilla, A. (2008). Analysis of riverine and coastal extremes. The FLOODsite approach. *Journal of Hydraulic Research*, volume 46, supplement 2 (Special Issue).

- Pullen et al., 2007 EurOtop – overtopping and methods for assessing discharge *Flood Risk Management: Research and Practice* – Samuels et al. (eds) © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4.
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315(5810):368-70.
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Santos, F. D., Laihonon, P., Marinova, N., and Santini, M. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. Technical paper 1/2011, European Environment Agency. European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation, Bologna, Italy.
- Ranasinghe, R., Callaghan, D., and Stive, M. J. F. (2011). Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climatic Change*, 110(3-4):561-574.
- Rangel-Buitrago, N. and Anfuso, G. (2009). Assessment of coastal vulnerability in la guajira peninsula, Colombian Caribbean sea. *Journal of Coastal Research*, SI 56:792-796.
- Reguero, B., Menendez, M., Menendez, F., Minguez, R., and Losada, I. (2012). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65:38-55.
- Reis, M., Hu, K., Hedges, T. Mase, H. 2008. A comparison of empirical, semiempirical and numerical wave overtopping models. *Journal of Coastal Research*, 24, 250-262.
- ResMAR (2007/2013) - Regione strategico PO Marittimo 2007-2013 RES MAR Azione di Sistema A - Rete per il monitoraggio dell'erosione costiera. Regione Autonoma della Sardegna- Programma Azione Coste Progetto.
- Rodrigues, B.A., Matias, A. and Ferreira, Ó. The Ancão Peninsula Vulnerability to Overwash Processes. 4th SCACR - International Short Conference on Applied Coastal Research. Barcelona, Spain, 2009.
- Saffir, H. 1979 Design and construction requirements for hurricane resistant construction. American Society of Civil Engineers p. 20.

-
- Sahin, O. and Mohamed, S. (2013). Coastal vulnerability to sea-level rise: a spatial temporal assessment framework. *Natural Hazards*, 70(1):395-414.
- Sallenger, A. H. (2000). Storm-impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3):890-895.
- Sanchez-Arcilla, A., Jimenez, J. A., and Valdemoro, H. I. (1998). The ebro delta: Morphodynamics and vulnerability. *Journal of Coastal Research*, 14(3):754-772.
- Santos, María; del Río, Laura; Benavente, Javier. *Journal of Coastal Research*, suppl. Special Issue 1.65 (2013): 826-831.
- Sardà R., Avila, C., and Mora, J. (2005). A methodological approach to be used in integrated coastal zone management processes: the case of the Catalan Coast (Catalonia, Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62(3):427-439.
- Satta, A. (2014). An Index-based method to assess vulnerabilities and risks of Mediterranean coastal zones to multiple hazards, 281.
- Scavia, D, Field JC, Boesch DF, Buddemeier RW, Burkett V, Cayan DR, Fogarty M, Harwell MA, Howarth RW, Mason C, Reed DJ, Royer TC, Sallenger AH, Titus JG. 2002. Climate change impacts on US coastal and marine ecosystems. *Estuaries*. 25:149-164.
- Sallenger, A. H., and Titus, J. G. (2002). Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries*, 25(2):149-164.
- Schüttrumpf, H.F.R. 2001. Wellenüberlaufströmung bei See-deichen, Ph.D.-thesis, Technical University Braunschweig.
- Schuttrumpf H. and H. Oumeraci, 2005. Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at sea dikes. *Journal of Coastal Engineering*, 52 (6), 473-495.

-
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modelling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4):347-404.
- Simeone, S., Dessy, C., De Falco, G., Di Gregorio, F., Paliaga, B. 2007. Analisi Della Vulnerabilità dei litorali sabbiosi dell'area Marina Protetta (AMP) – Penisola del Sinis Isola di Mal di Ventre-. *Studi Costieri* 13 3-11.
- Simeone S., De Falco G., Como S, Olita A, De Muro S. .2008. Dinamica deposizionale delle banquettes di Posidonia oceanica nelle spiagge. Riassunti 84° Congresso Nazionale SGI - Rendiconti online Soc. Geol. It., Vol. 3 (2008), 726-727.
- Simeone., De Falco G, Olita A (2010). Effetti delle banquette di posidonia oceanica sulla morfologia della spiaggia. In (De Muro and De Falco Eds) *Manuale per la gestione delle spiagge. Studi, indagini ed esperienze sulle spiagge Sarde e Corse*. University Press, CUEC, ISBN/ISSN: 978-88-8467-629-0.
- Simeone S., Palombo AGL, Guala I (2012). Impact of frequentation on a Mediterranean embayed beach: Implication on carrying capacity. *Ocean and Coastal Management*, vol. 62; p. 9-14, ISSN:0964-5691.
- Simeone S., De Falco G (2012). Morphology and composition of beach-cast Posidonia oceanica litter on beaches with different exposures. *Geomorphology*, vol. 151; p. 224-233.
- Simeone S., De Falco G. 2013. Posidonia oceanica banquette removal: sedimentologica, geomorphological and ecological implications. *Journal of Coastal Research S.I.* 65 1045 – 1050.
- Simeone S., De Falco G., 2013. Seagrass berm deposition on a Mediterranean embayed beach. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 135, 171-181.
- Simeone S., Palombo L, De Falco G (2013). Morphodynamics of a Nontidal Embayed Beach: The Case Study of Is Arutas (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research* 26 (6A).

-
- Simeone S., De Falco G., Quattrocchi G., Cucco A., 2014. Morphological changes of aMediterranean beach over one year (San Giovanni Sinis, western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, S.I. 70, 217-222.
- Simpson, R. 1971 A proposed scale for ranking hurricanes by intensity. Minutes of the Eighth NOAA, NWS Hurricane Conference, Miami
- Small, C. and Nicholls, R. J. (2003). A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 19(3):584-599.
- Sornoza, L., Arasa, A., Maestro, A., Rees, J. G., and Hernandez-Molina, F. J. (1998). Architectural stacking patterns of the Ebro delta controlled by Holocene high-frequency eustatic fluctuations, delta-lobe switching and subsidence processes. *Sedimentary Geology*, 117(1-2):11-32.
- Stive, M. J., Ranasinghe, R., and Cowell, P. (2009). Sea level rise and coastal erosion. In Kim, Y. (editor), *Handbook of coastal and ocean engineering*, pp. 1023-1038. World Scientific.
- Stockdon, H. F., Doran, K. S., and Sallenger, A. H. (2009). Extraction of lidar-based dune-crest elevations for use in examining the vulnerability of beaches to inundation during hurricanes. *Journal of Coastal Research*, SI 53:59-65.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., and Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7):573-588.
- Stralcio, I. P., Idrogeologico, A., Pai, I., Norme, L., & Pai, I. (2006). L'adeguamento dei PUC al PAI.
- Swiss Reinsurance Company 2004 Natural catastrophes and man-made disasters in 2003: many fatalities, comparatively moderate insured losses. Zurich, Switzerland.
- Thieler, E. R. and Hammar-Klose, E. S. (1999). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise, U.S. Atlantic coast. Open-File report 99-593, U.S. Geological Survey.

-
- Thieler, E. R. and Hammar-Klose, E. S. (2000a). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise, U.S. Gulf of Mexico coast. Report 00-179, U.S. Geological Survey.
- Thieler, E. R. and Hammar-Klose, E. S. (2000b). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: U.S. Pacific coast. Report 00-178, U.S Geological Survey.
- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., and Marcomini, A. (2012). Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the North Adriatic Sea. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(7):2347-2368.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., and Bigg, G. R. (2000). Decline in Mediterranean rainfall caused by weakening of Mediterranean cyclones. *Geophysical Research Letters*, 27(18):2913-2916.
- Tsimplis, M. N. and Baker, F. (2000). Sea level drop in the Mediterranean sea: An indicator of deep water salinity and temperature changes. *Geophysical Research Letters*, 27(12):1731-1734.
- Tuan, T.Q., Verhagen, H.J., Visser, P., Stive, M.J. 2006. Wave overwash at low-crested beach barriers. *Coastal Engineering Journal*, 48(04), 371-393.
- Turner, B.L., II, Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., 2003a. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (14) (8 July), 8074–8079.
- Turner, B.L., II, Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Hovelsrud-Broda, G., Kasperson, J.X., Kasperson, R.E., Luers, A., Martello, M.L., Mathiesen, S., Naylor, R., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., Selin, H., Tyler, N., 2003b. Illustrating the coupled human–environment system for vulnerability analysis: three case studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (14) (8 July), 8080–8085.
- Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., and Pinto, J. G. (2009). Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1-2):117-131.

-
- United Nations (UN) Atlas of the Oceans (2010). Human Settlements on the Coast. URL: <http://www.oceansatlas.org> (Uses > Human Settlements on the Coast) (accessed February 5th 2014).
- Van der Meer, J. W. and Janseen, W. (1995). Wave run-up and wave overtopping at dikes. In Kobayashi, N. and Demirbilek, Z. (editors), *Wave forces on inclined and vertical wall structures*, pp. 1-27. ASCE.
- Vermeer, M. and Rahmstorf, S. (2009). Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 106(51):21527-21532.
- Vickery, P. J., Lin, J., Skerlj, P. F., Jr, L. A. T., and Huang, K. (2006a). HAZUS-MH Hurricane model methodology. I: Hurricane hazard, terrain, and wind load modelling. *Natural Hazards Review*, 7(2):82-93.
- Vickery, P. J., Skerlj, P. F., Lin, J., Jr, L. A. T., Young, M. A., and Lavelle, F. M. (2006b). HAZUS-MH Hurricane Model Methodology. II: Damage and loss estimation. *Natural Hazards Review*, 7(2):94-103.
- WAMDI Group (1988). The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18:1775-1810.
- Wang, X. L. and Swail, V. R. (2006). Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights. *Climate Dynamics*, 26(2-3):109-126.
- Wang, X. L., Swail, V. R., Zwiers, F. W., Zhang, X., and Feng, Y. (2008). Detection of external influence on trends of atmospheric storminess and Northern oceans wave heights. *Climate Dynamics*, 32(2-3):189-203.
- Wise, R. S., Smith, S. J., and Larson, M. (1996). SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 4: Cross-shore transport under random waves and model validation with SUPERTANK field data. Technical Report CERC-89-9, US Army Corp of Engineers, Vicksburg.

-Wright, L.D. and Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. Mar. Geol., 56: 93--118.

-Youssef, A. M., Pradhan, B., Gaber, A. F. D., and Buchroithner, M. F. (2009). Geomorphological hazard analysis along the Egyptian Red Sea coast between Safaga and Quseir. Natural Hazards and Earth System Science, 9:751-766.

PRINCIPALI SITI WEB CONSULTATI

-Ambiti di Paesaggio - Piano Paesaggistico Regionale - Regione Sardegna

<http://www.sardegna territorio.it>

-Dipartimento Specialistico Regionale Idrometeorologico - ARPAS: <http://www.sar.sardegna.it/>

-ISPRA Idromare APAT: <http://www.idromare.it>

-Sardegna Geoportale: <http://www.sardegna geoportale.it/>

-Sistema Informativo Regionale per l'Ambiente (SIRA): <http://www.sardegna ambiente.it/>

-European Centre for Medium Range Weather Forecast: <http://www.ecmwf.int/>

-Istituto Nazionale di Statistica : <http://www.istat.it/>

ALLEGATO 1: ELENCO SPIAGGE CATALOGATE

ID	TOPONIMO	COMUNE	PROVINCIA	SETTORE	UF	CELLA	ID CELLA
1	Su Giudeu	DOMUS DE MARIA	CAGLIARI	SUD	8	Chia	1
2	Campana	DOMUS DE MARIA	CAGLIARI	SUD	8		
3	Baia Chia	DOMUS DE MARIA	CAGLIARI	SUD	8		
4	Torre Chia	DOMUS DE MARIA	CAGLIARI	SUD	8		
5	ForteVillage	PULA	CAGLIARI	SUD	8	S.Margherita	2
6	Cala Verde	PULA	CAGLIARI	SUD	8		
7	Foxi e Sali M.Agumu	PULA	CAGLIARI	SUD	8		
8	Porto d'Agumu	PULA	CAGLIARI	SUD	8		
9	Rada S.Efisio	PULA	CAGLIARI	SUD	8	Nora	3
10	Su Gioventeddu	PULA	CAGLIARI	SUD	8		
11	Pula San Macario	PULA	CAGLIARI	SUD	8		
12	Perde Sali	SARROCH	CAGLIARI	SUD	8	Pula SM	4
13	Cala Orri	CAPOTERRA	CAGLIARI	SUD	8	PerdeSali	5
14	Torre degli Ulivi	CAPOTERRA	CAGLIARI	SUD	8	Capoterra	6
15	La Maddalena	CAPOTERRA	CAGLIARI	SUD	8		
16	Peschiera Mula	CAGLIARI	CAGLIARI	SUD	8		
17	La Playa 1	CAGLIARI	CAGLIARI	SUD	8		
18	La Playa 2	CAGLIARI	CAGLIARI	SUD	8		
19	Poetto	QUARTU SANT'ELENA	CAGLIARI	SUD	8	Poetto	7
20	S.Andrea Stella di Mare	QUARTU SANT'ELENA	CAGLIARI	SUD	8	S.Andrea	8
21	S.Andrea	QUARTU SANT'ELENA	CAGLIARI	SUD	8		
22	Capitana	QUARTU SANT'ELENA	CAGLIARI	SUD	8	Capitana	9
23	Capitana	QUARTU SANT'ELENA	CAGLIARI	SUD	8		
24	Geremeas	MARACALAGONIS	CAGLIARI	SUD	8	Geremeas	10
25	Cannesissa	MARACALAGONIS	CAGLIARI	SUD	8	Cannesissa	11
26	Gennemari	SINNAI	CAGLIARI	SUD	8	Gennemari	12
27	Solanas	SINNAI	CAGLIARI	SUD	8	Solanas	13
28	Sa Ruxi	VILLASIMIUS	CAGLIARI	SUD	8	Capo Carbonara	14
29	Vlaggio mandorli	VILLASIMIUS	CAGLIARI	SUD	8		
30	Campulongu	VILLASIMIUS	CAGLIARI	SUD	8	Villasmius ovest	15
31	Il Giunco	VILLASIMIUS	CAGLIARI	EST	9	Villasimius Est	16
32	Notteri / Simius	VILLASIMIUS	CAGLIARI	EST	9		
33	Cala Pira	CASTIADAS	CAGLIARI	EST	9	Cala Pira	17
34	Cala Sinzias	CASTIADAS	CAGLIARI	EST	9	Cala Sinzias	18
35	Cala Monte Turno	CASTIADAS	CAGLIARI	EST	9		
36	Santa Giusta Castiadas	CASTIADAS	CAGLIARI	EST	9		
37	Costa Rei	MURAVERA	CAGLIARI	EST	9	Costa Rei	19
38	Feraxi	MURAVERA	CAGLIARI	EST	10		
39	Colostrai Foce	MURAVERA	CAGLIARI	EST	10	Muravera	20
40	Hotel Colostrai	MURAVERA	CAGLIARI	EST	10		
41	Colostrai Mirto e mare	MURAVERA	CAGLIARI	EST	10		
42	Torre Salinas	VILLAPUTZU	CAGLIARI	EST	10		
43	Porto Tramatzu	VILAPUTZU	CAGLIARI	EST	10	Porto Tramatzu	21

ID	TOPONIMO	COMUNE	PROVINCIA	SETTORE	UF	CELLA	ID CELLA
44	Cala Murtas	VILLAPUTZU	CAGLIARI	EST	10	Quirra	22
45	Foxi Mordegu	TERTENIA	OGLIASTRA	EST	10	Melisenda	23
46	Cala Sa Brecca	TERTENIA	OGLIASTRA	EST	10	Cala Sa Brecca	24
47	Marina di Cardedu	CARDEDU	OGLIASTRA	EST	10	Barisardo	25
48	Camp.ultima spiaggia	BARI SARDO	OGLIASTRA	EST	10		
49	Torre Bari	BARI SARDO	OGLIASTRA	EST	10		
50	Spiaggia di Cea	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	10	Cea	26
51	Cala Ginepro	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	10	Cala Ginepro	27
52	Foxi Lioni	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	10	Foxi Lioni	28
53	Spiaggia del Lido Orri	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	10	Lido Orri	29
54	Campeggio Orri	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	10		
55	Aereoporto Tortoli	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	10		
56	Spiaggia Capannina	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	11	S.M Navarrese	30
57	Campings	TORTOLI'	OGLIASTRA	EST	11		
58	Spiaggia S.M.Navarrese	BAUNEI	OGLIASTRA	EST	11		
59	Spiaggia San Giovanni	BAUNEI	OGLIASTRA	EST	11		
60	Cala Luna	DORGALI	NUORO	EST	11	Cala Luna	31
61	Spiaggia Palmasera	DORGALI	NUORO	EST	11	Cala Gonone	32
62	Spiaggia Centrale	DORGALI	NUORO	EST	11		
63	Osalla di Orosei	OROSEI	NUORO	EST	11	Orosei	33
64	Le Gineste Orosei	OROSEI	NUORO	EST	11		
65	Marina di Orosei	OROSEI	NUORO	EST	11		
66	Cala Liberotto	OROSEI	NUORO	EST	11	Cala Liberotto	34
67	Stagno Sa Curcurica	OROSEI	NUORO	EST	11	Berchida	35
68	Stagno Sa Curcurica	OROSEI	NUORO	EST	11		
69	Stagno Bidderosa	OROSEI	NUORO	EST	11		
70	Berchida	SINISCOLA	NUORO	EST	11		
71	Capo Comino	SINISCOLA	NUORO	EST	11	Capo Comino	36
72	Reina Majore	AGLIENTU	OLBIA SASSARI	NORD	17	Reina Majore	37
73	Lu Lioni Monti Russo	AGLIENTU	OLBIA SASSARI	NORD	17	Vignola	38
74	Vignola Mare	AGLIENTU	OLBIA SASSARI	NORD	17		
75	Isola Rossa	VIGNOLA-TRINITA	OLBIA SASSARI	NORD	18	Badesi	39
76	Li Mindi / Mimos	BADESI	OLBIA SASSARI	NORD	18		
77	S.Poetro Villadoria	VALLEDORIA	OLBIA SASSARI	NORD	18		
78	La Ciaccia	CASTELSARDO	OLBIA SASSARI	NORD	18	Castelsardo	40
79	Castelsardo	CASTELSARDO	OLBIA SASSARI	NORD	18		
80	Platamona	SORSO	OLBIA SASSARI	NORD	18	Platamona	41
81	Marina di Sorso	SASSARI	OLBIA SASSARI	NORD	18		
82	Le Saline Stagno di Pilo	STINTINO	OLBIA SASSARI	NORD	18	Stagno di Pilo	42
83	Stintino RocaRuja	STINTINO	OLBIA SASSARI	NORD	18	Stintino	43
84	Stintino LaPelosa	STINTINO	OLBIA SASSARI	NORD	18		
85	Porto Ferro	SASSARI	OLBIA SASSARI	NORD	19	Porto Ferro	44
86	Spiaggia Mugoni	ALGHERO	OLBIA SASSARI	NORD	19	Porto Conte	45
87	Sp. Hotel Porto Conte	ALGHERO	OLBIA SASSARI	NORD	19		
88	Spiaggia di Bosa	BOSA	ORISTANO	OVEST	1	Bosa	46
89	Spiaggia di Turas	BOSA	ORISTANO	OVEST	1		
90	Porto Alabe	TRESNURAGHES	ORISTANO	OVEST	1	Porto Alabe	47
91	S.Caterina	CUGLIERI	ORISTANO	OVEST	1	S.Caterina	48
92	Is Arenas Archittu	SAN VERO MILIS	ORISTANO	OVEST	1	Is Arenas Archit	49
93	Cala Sa Marigosa	SAN VERO MILIS	ORISTANO	OVEST	1	Cala Marigosa	50
94	Putzu Idu	SAN VERO MILIS	ORISTANO	OVEST	2	Putzu idu	51
95	Arena Scoada	SAN VERO MILIS	ORISTANO	OVEST	2	Arena Scoada	52

ID	TOPONIMO	COMUNE	PROVINCIA	SETTORE	UF	CELLA	ID CELLA
96	Mari Ermi	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2	Sinis	53
97	Is Arutas	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2		
98	Maimoni	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2		
99	Torre Seu	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2		
100	Funtana Meiga	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2	S.Giovanni	54
101	S.Giovanni Scalini	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2		
102	S.Giovanni Torre	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2		
103	Istmo Capo S.Marco	CABRAS	ORISTANO	OVEST	2		
104	Marina di Torregrande	ORISTANO	ORISTANO	OVEST	3	Torregrande	55
105	Torregrande Foce	SANTA GIUSTA	ORISTANO	OVEST	3		
106	Marina di Arborea 1	SANTA GIUSTA	ORISTANO	OVEST	3	Arborea	56
107	Marina di Arborea 2	ARBOREA	ORISTANO	OVEST	3		
108	Marina di Arborea 3	ARBOREA	ORISTANO	OVEST	3		
109	S.Antonio Santadi	ARBOREA	ORISTANO	OVEST	3	Merceddi	57
110	Pistis	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4	Is Arenas	58
111	Is Arenas	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4		
112	Porto Palma	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4	Porto Palma	59
113	Funtanazza	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4	Funtanazza	60
114	Marina di Flumini	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4	Flumini	61
115	Portu Maga	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4	Portu Maga	62
116	Piscinas	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4	Piscinas	63
117	Scivu 1	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4		
118	Scivu 2	ARBUS	CAMPIDANO	OVEST	4		
119	Portixeddu	BUGGERRU	CARB-IGLES	OVEST	4	Buggerru	64
120	Bugerru	BUGGERRU	CARB-IGLES	OVEST	4		
121	Funtanamare	GONNESA	CARB-IGLES	OVEST	4	Funtanamare	65
122	Porto Paglia	GONNESA	CARB-IGLES	OVEST	4		
123	Spiaggia Sottotorre	CALASETTA	CARB-IGLES	OVEST	6	Calasetta	66
124	Spiaggia delle Saline	CALASETTA	CARB-IGLES	OVEST	6		
125	Spiaggia Grande	CALASETTA	CARB-IGLES	OVEST	6		
126	Porto Coqueddu	SANT'ANTIOCO	CARB-IGLES	OVEST	7	S.Antioco	67
127	Porto Botte	MASAINAS	CARB-IGLES	OVEST	7	Porto Botte	68
128	P. Pino Cmpg Sardegna	SANT'ANNA ARRESI	CARB-IGLES	OVEST	7	Porto Pino	69
129	P. Pino Dune Bianche	TEULADA	CARB-IGLES	OVEST	7		

Tabella A1-1 Spiagge catalogate in questo lavoro.

- LIMITI UNITÁ FISIOGRAFICHE

Unitá Fisiografica	Limiti morfodinamici	Km di costa
UF 1	Punta Sos Attentos - Capo Mannu	12.54
UF 2	Capo Mannu - Capo S.Marco	12.44
UF 3	Capo S.Marco -Capo Frasca	21.03
UF 4	Capo Frasca - Capo Altano	20.75
UF 6	Calasetta - Capo Sperone	1.89
UF 7	Capo Sperone - Capo Teulada	8.72
UF 8	Capo Teu - Capo Carbonara	41.66
UF 9	Capo Carbonara - Capo Ferrato	14.58
UF 10	Capo Ferrato - Capo Bellavista	37.27
UF 11	Capo Bellavista - Capo Comino	25.91
UF 17	Capo Falcone - Punta de li Francesi	6.19
UF 18	Punta de li Francesi - Stintino	39.94
UF 19	Stintino -Punta Cristallo	4.06

Tabella A1-2 Limiti delle Unitá Fisiografiche della Sardegna (Resmar, 2013).

ALLEGATO 2: INDICI DI VULNERABILITÀ MEDIA.

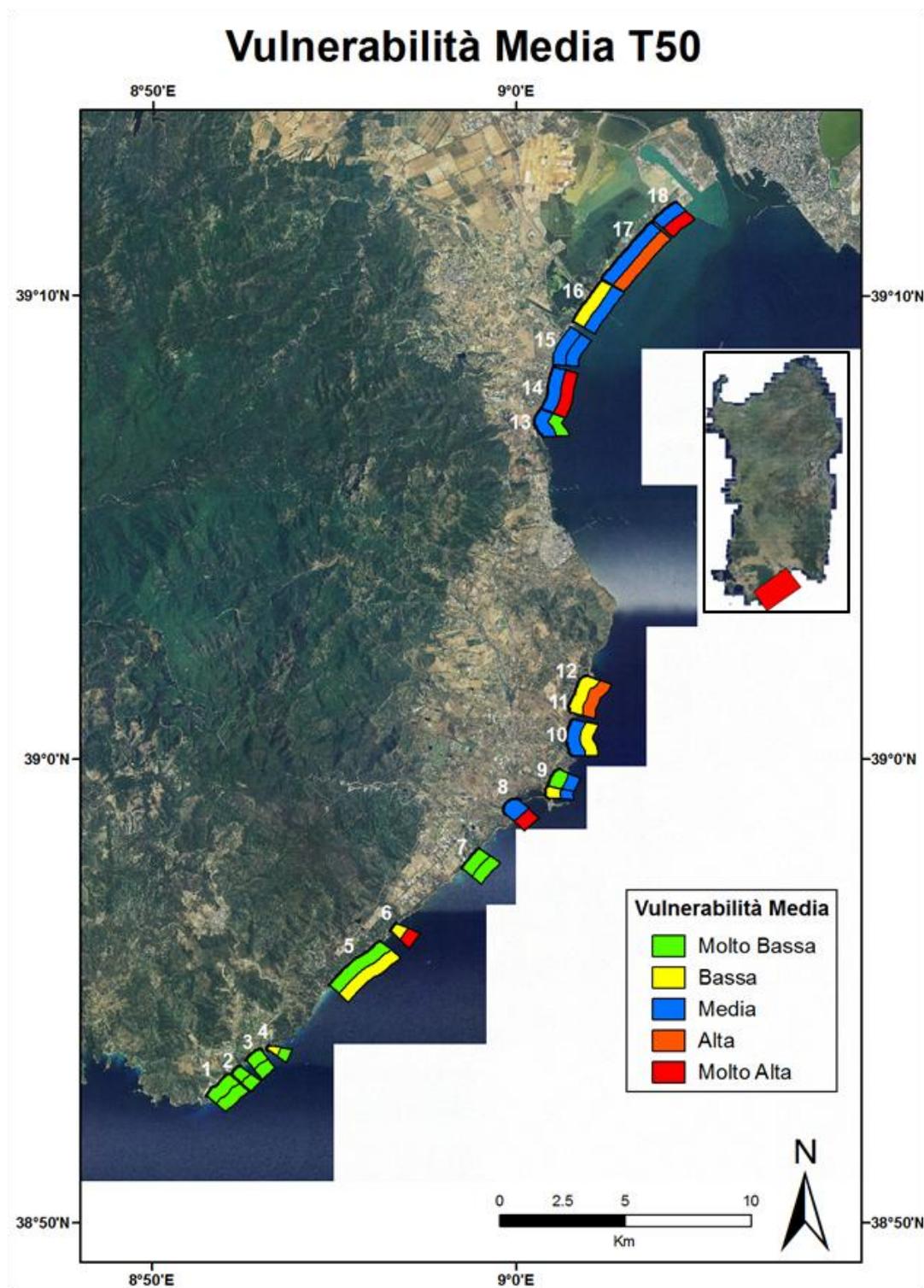


Figura A2-1 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 01- id 18).

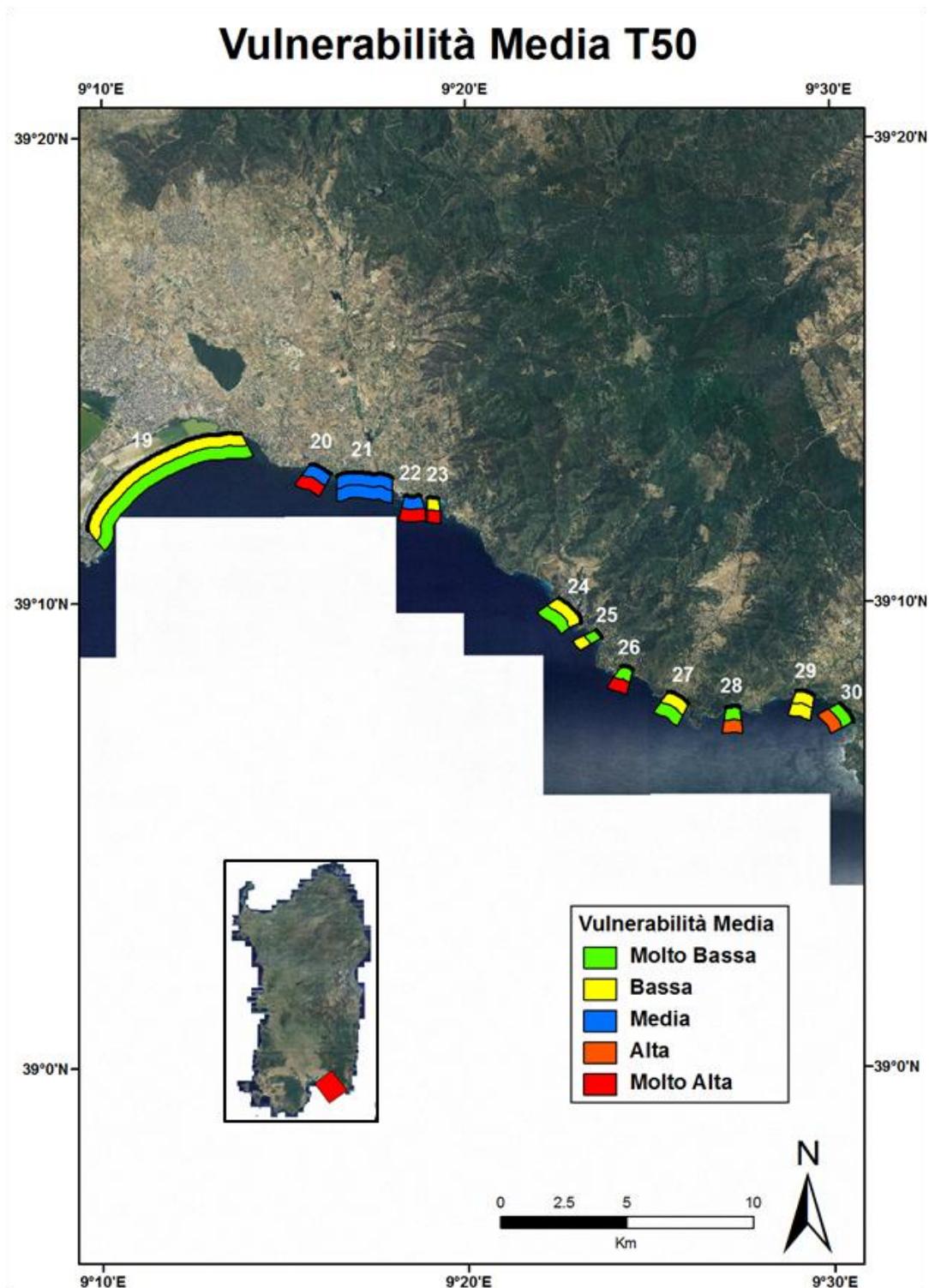


Figura A2-2 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 19- id 30).

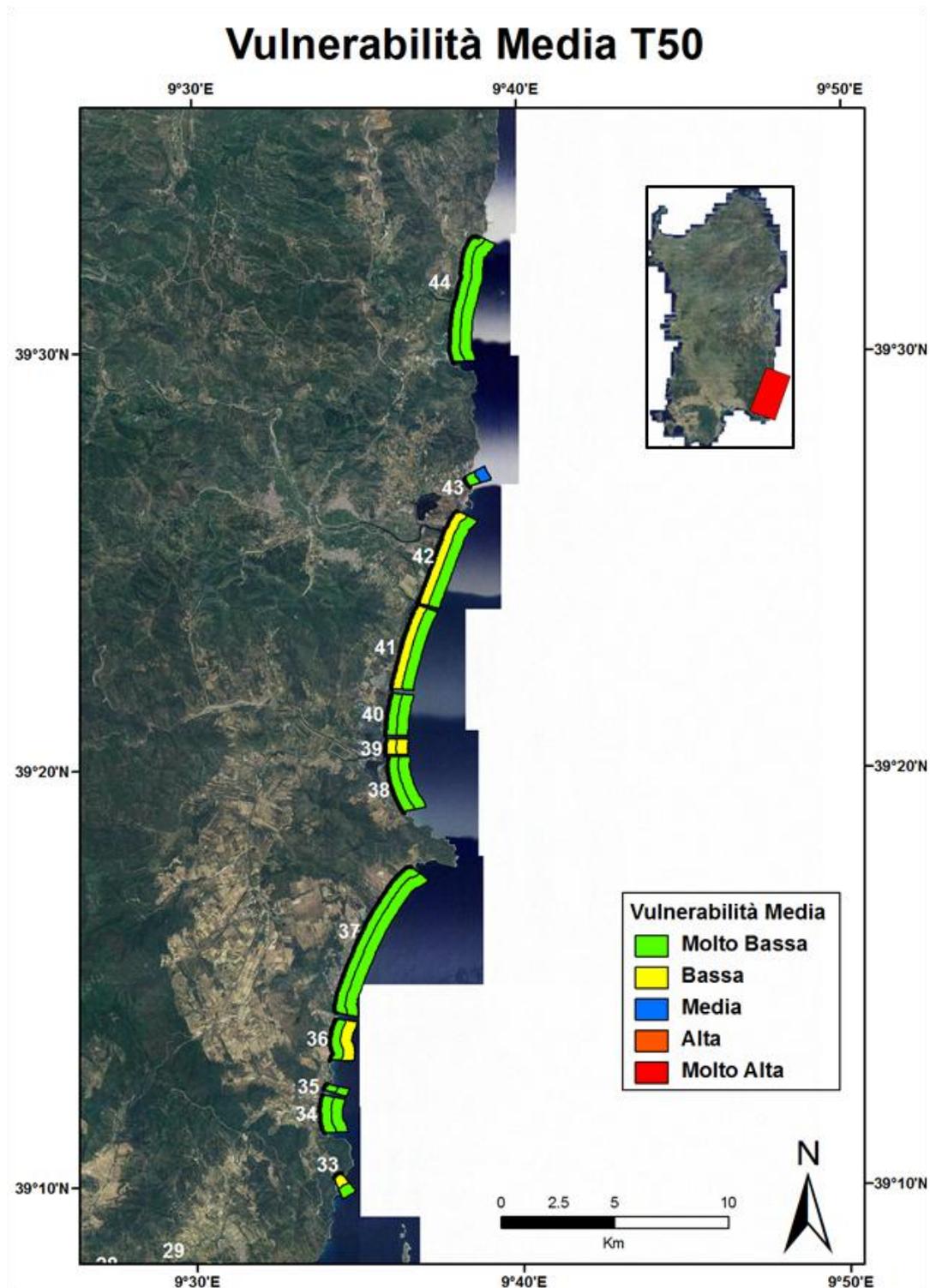


Figura A2-3 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 33- id 44).

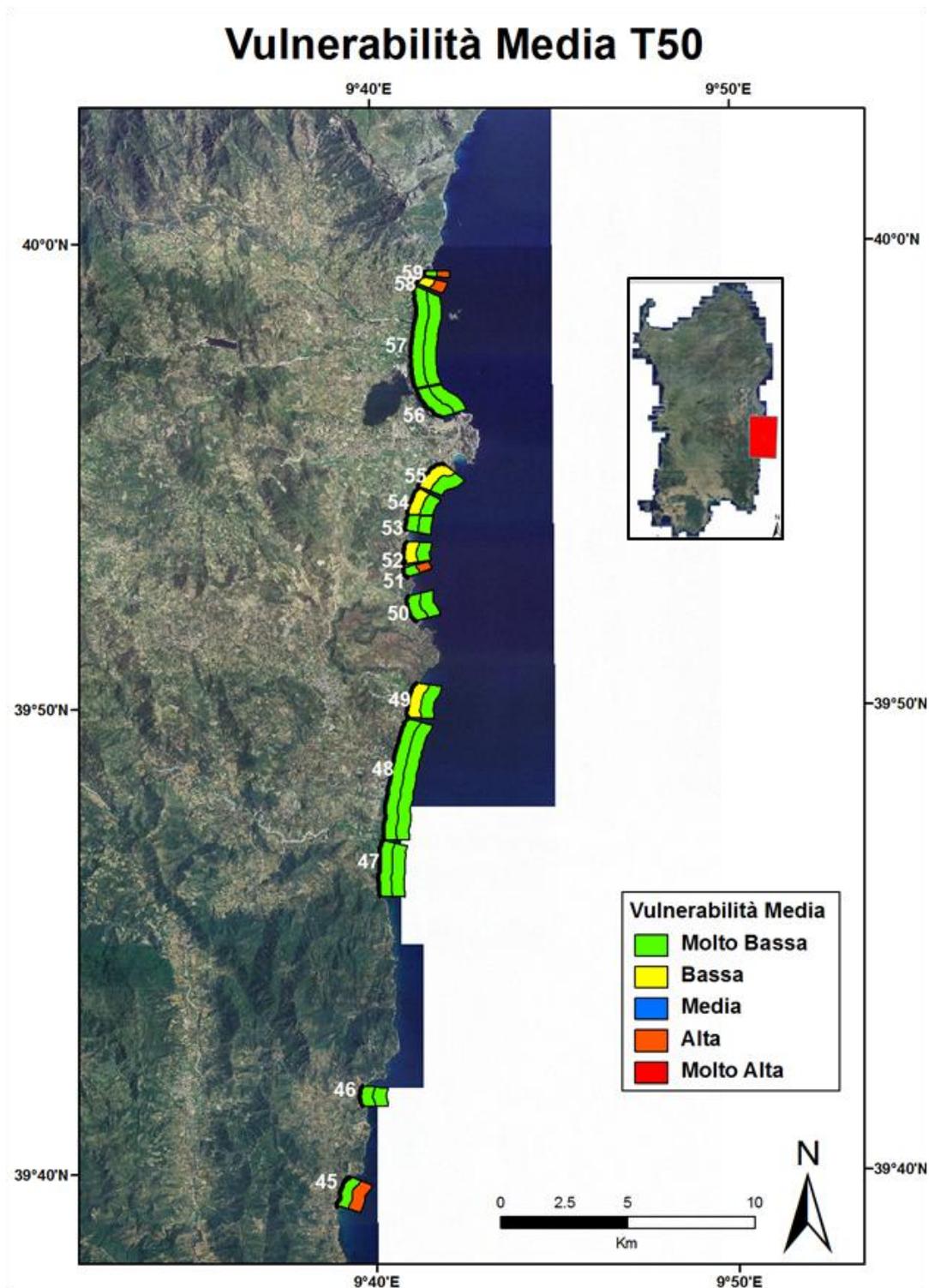


Figura A2-4 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 45- id 59).

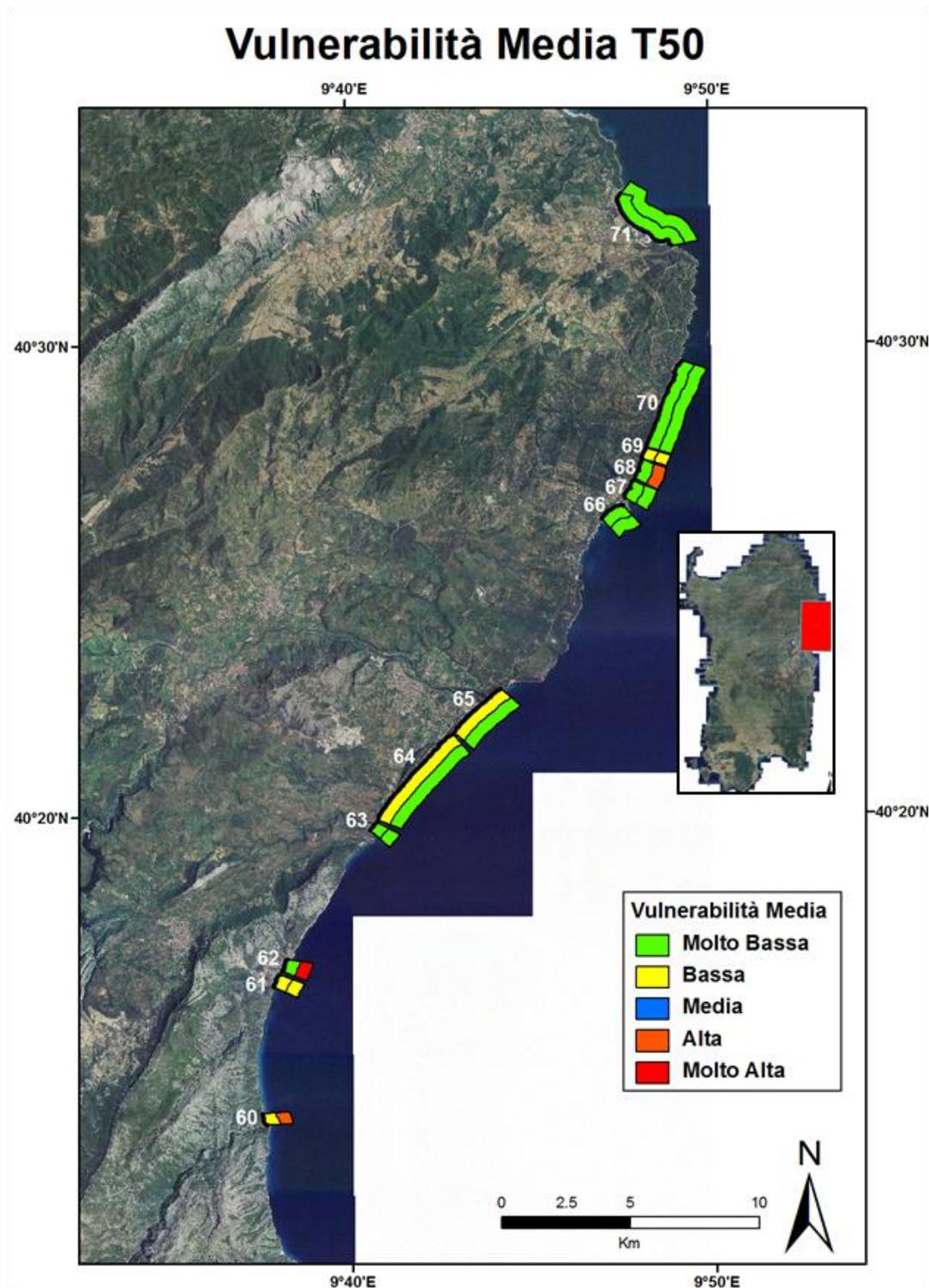


Figura A2-5 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 60- id 71).

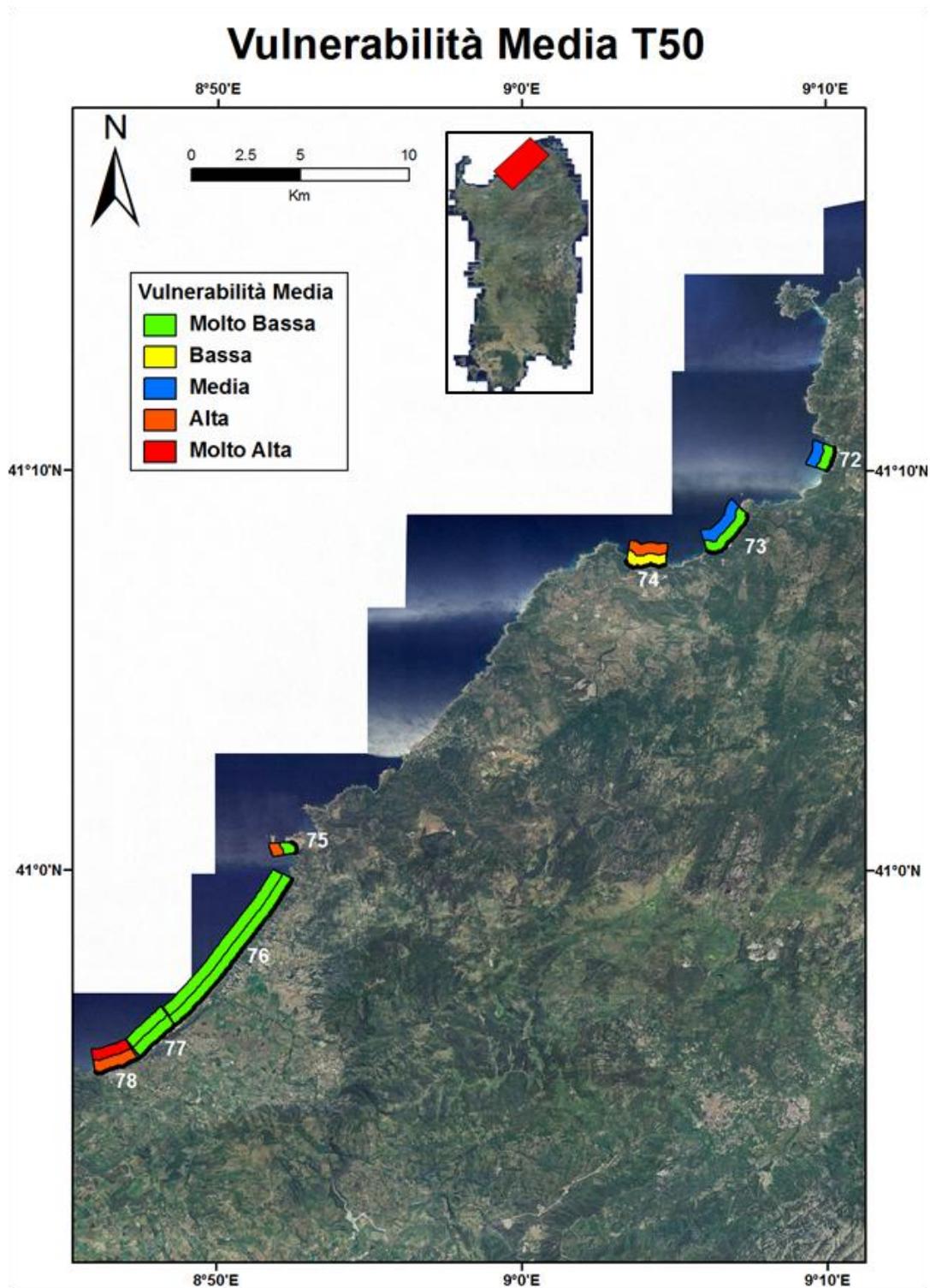


Figura A2-6 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 72- id 78).

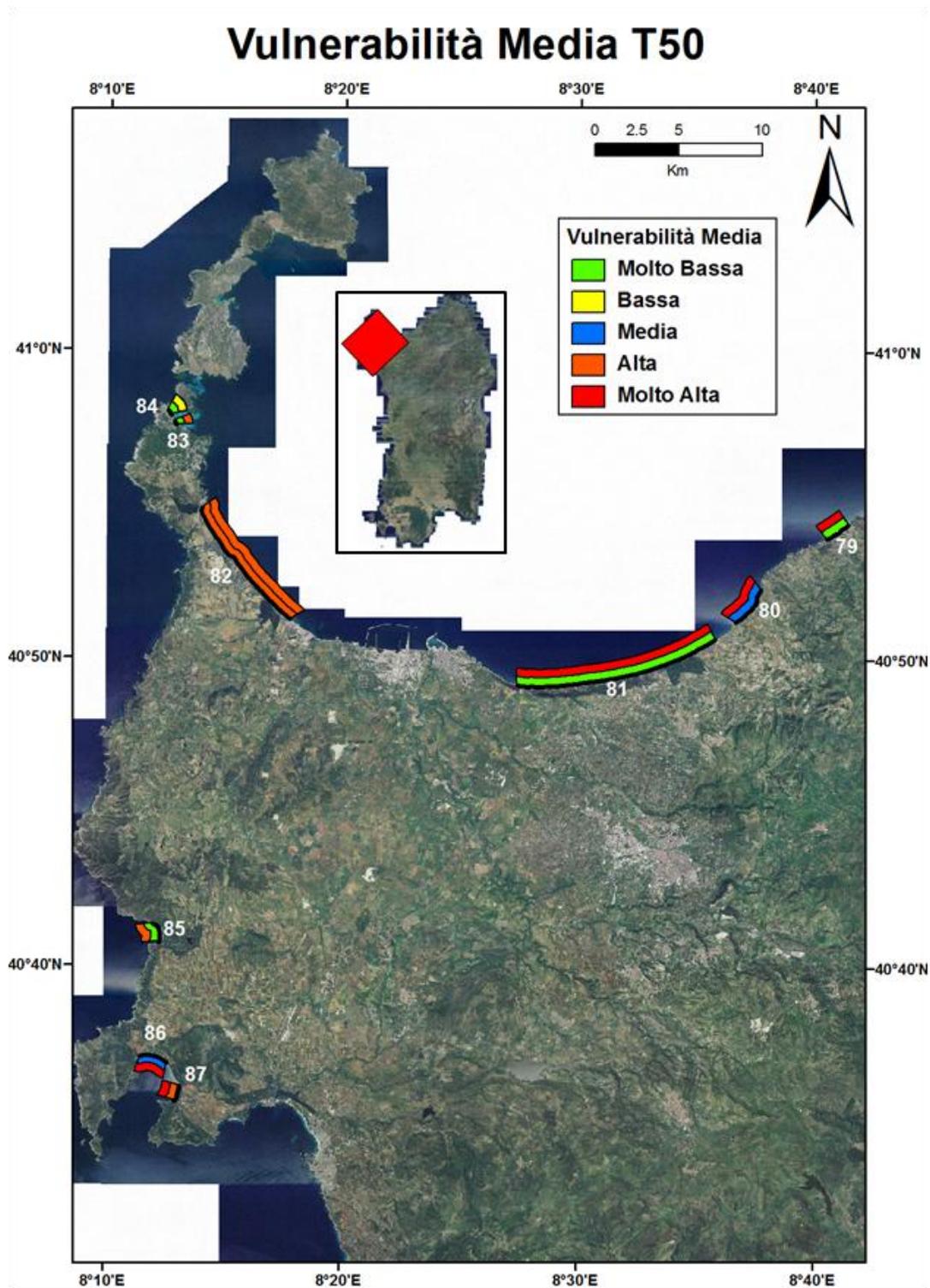


Figura A2-7 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 79- id 87).

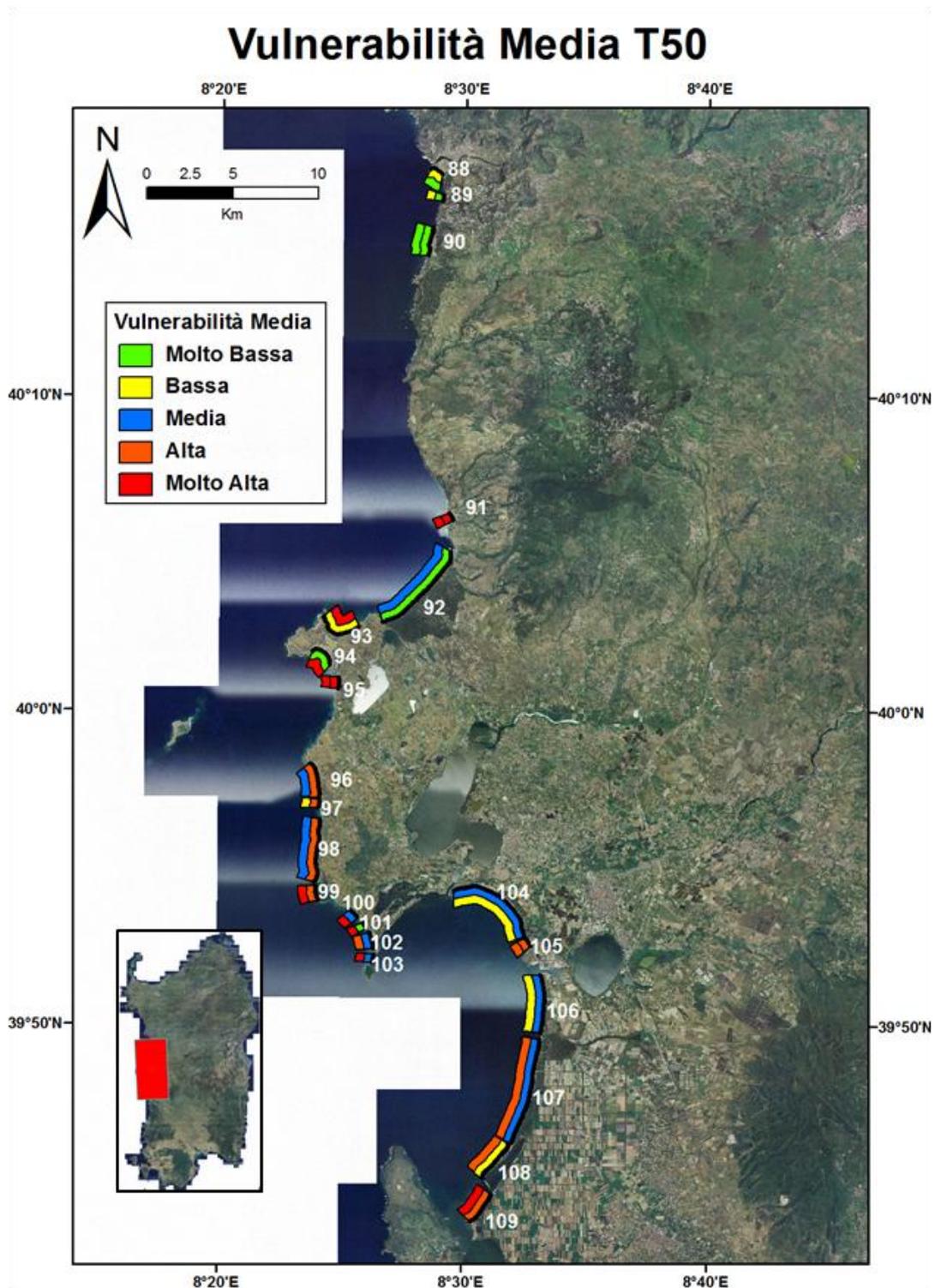


Figura A2-8 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 88- id 109).

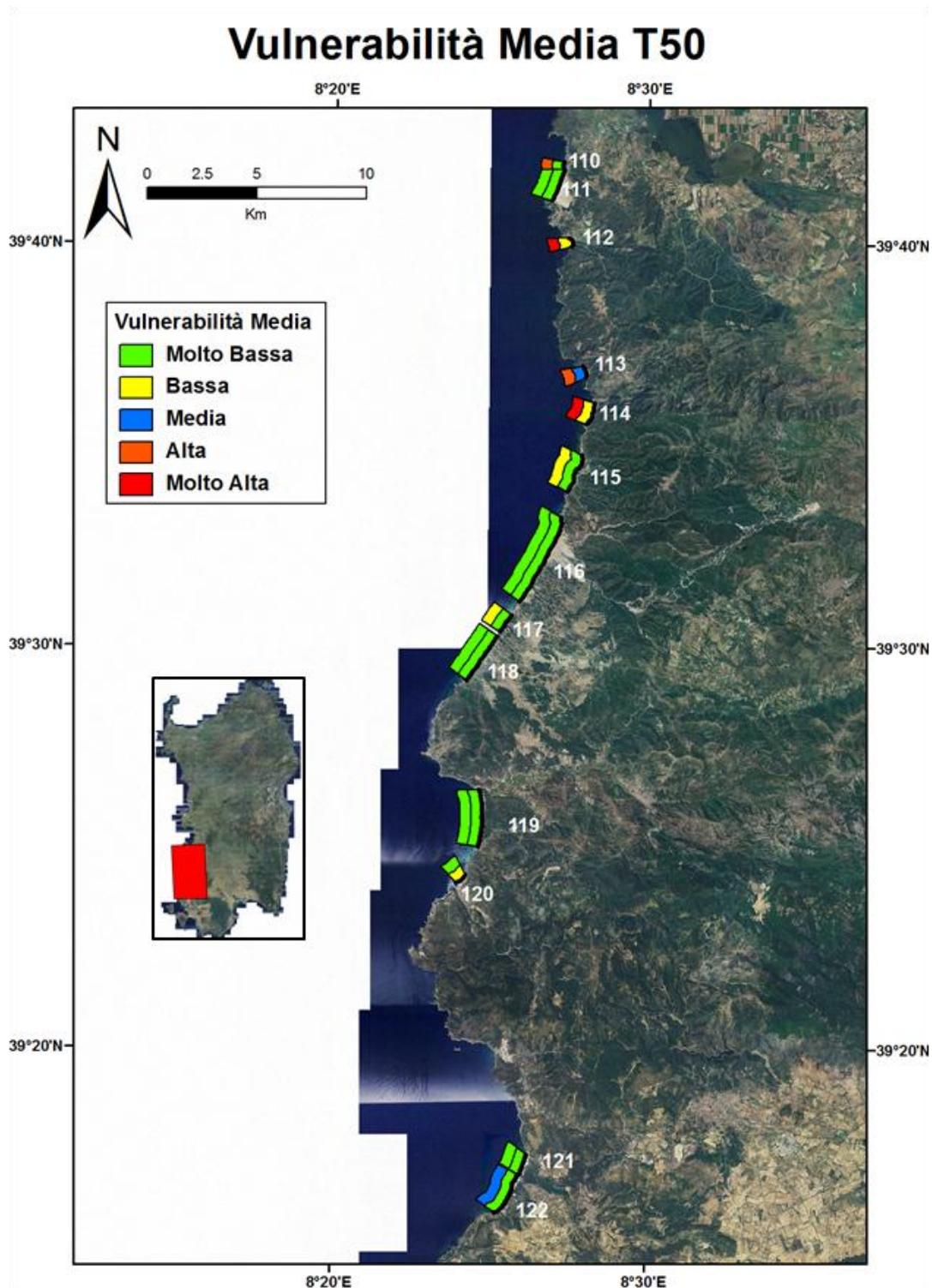


Figura A2-9 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 110- id 122).

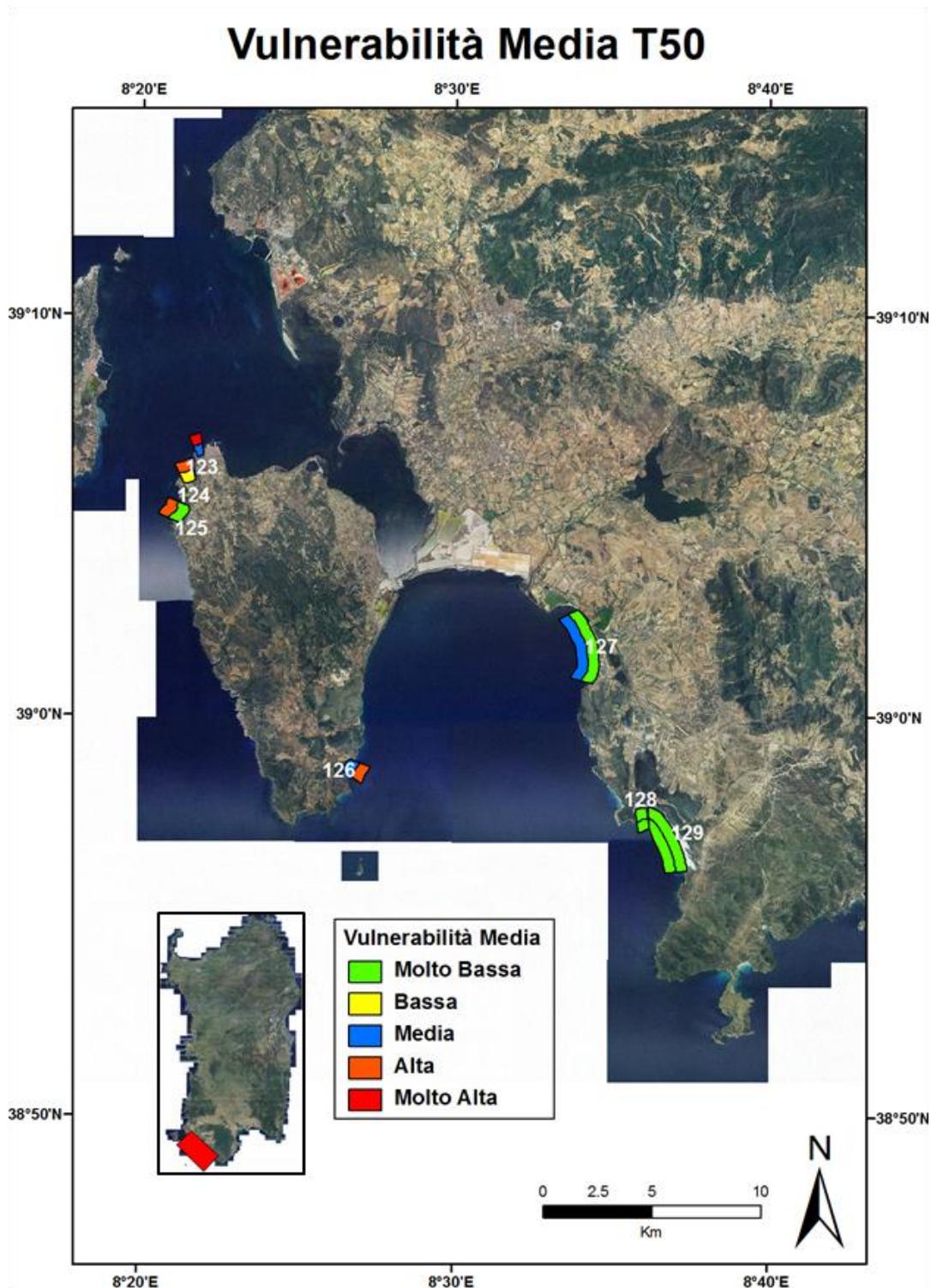


Figura A2-10 Indici di Vulnerabilità Media: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione(id 122- id 129).

ALLEGATO 3: INDICI DI VULNERABILITÀ MASSIMA

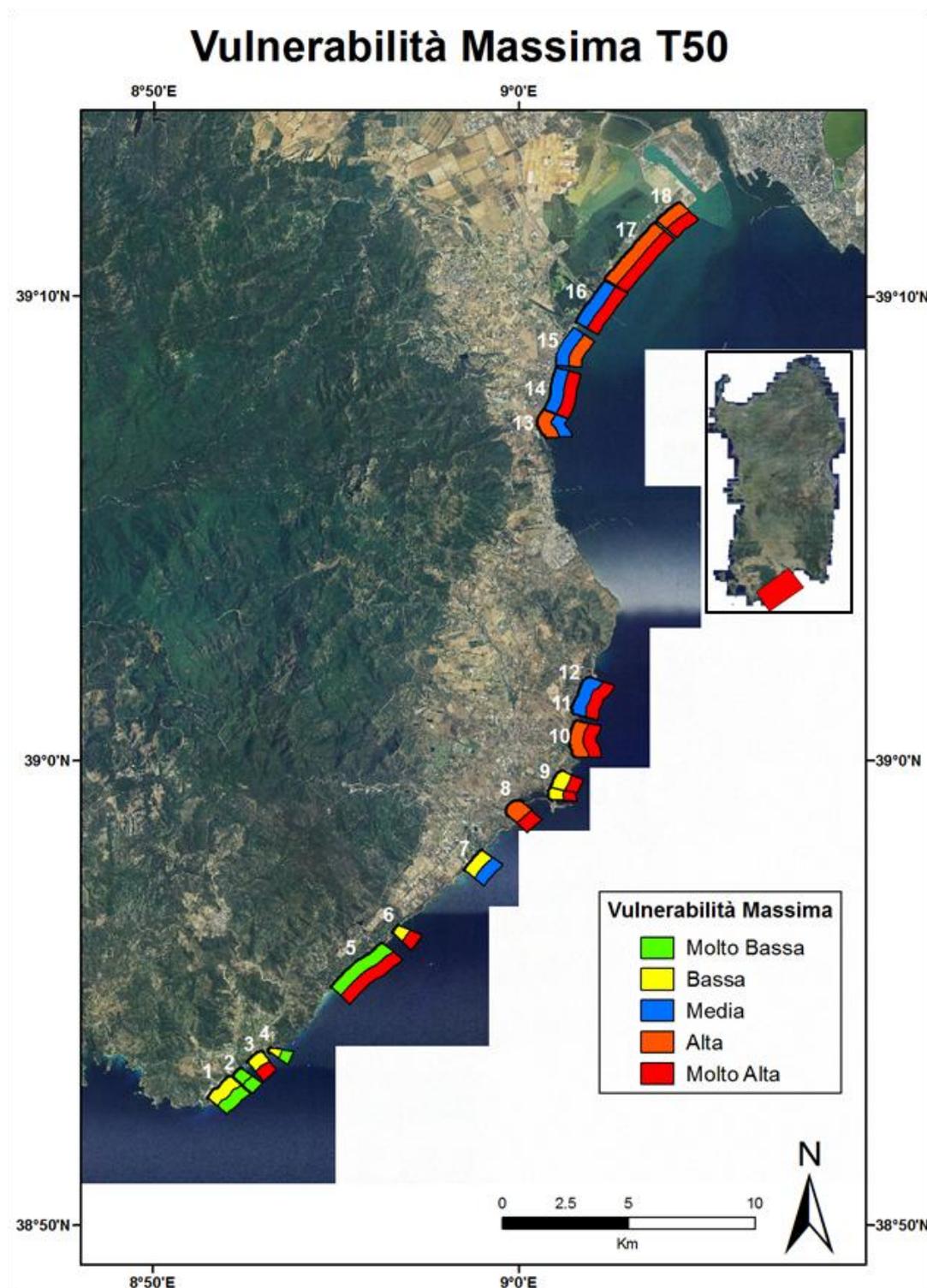


Figura A3-1 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 01- id 18).

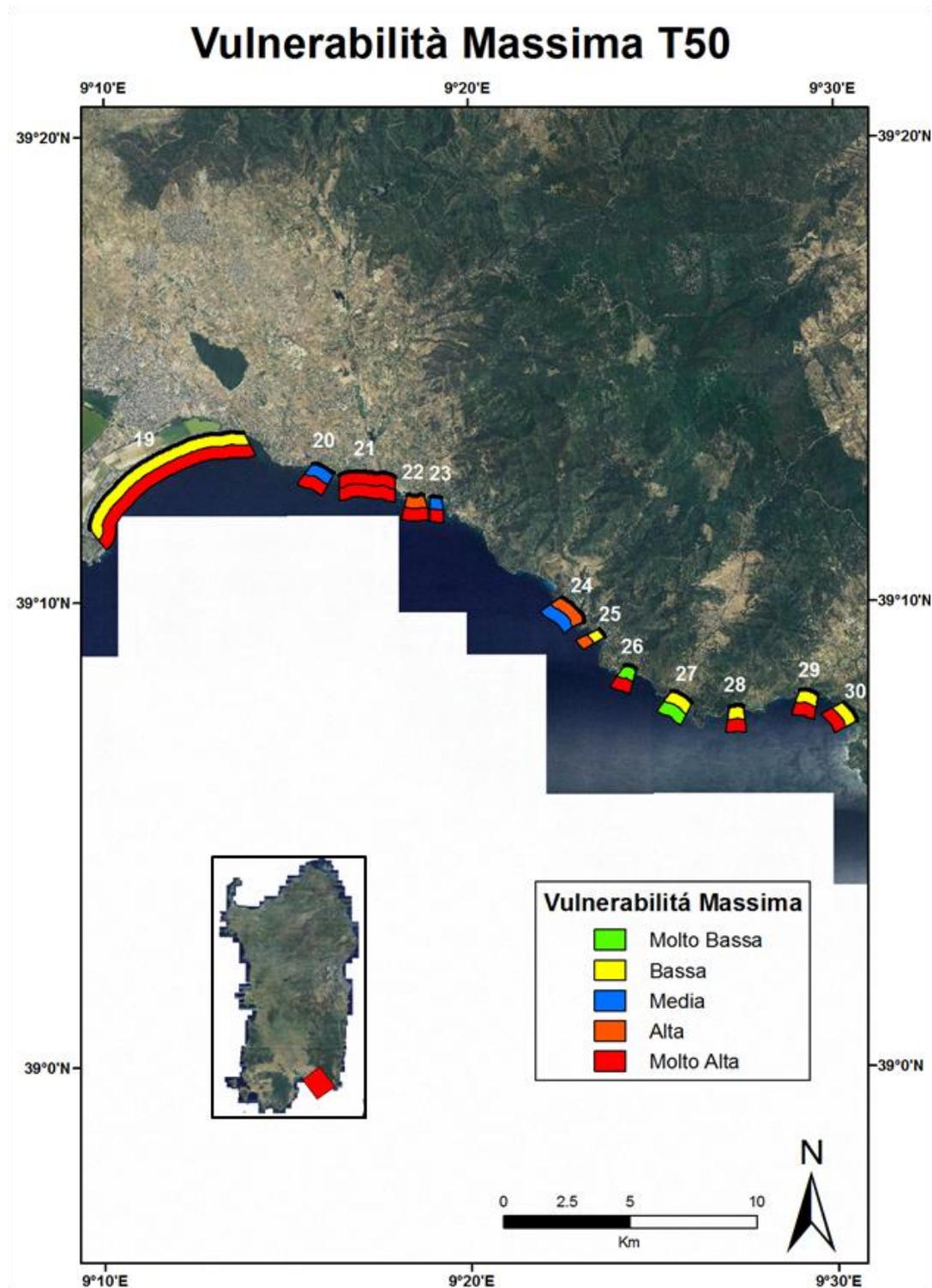


Figura A3-2 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 19- id 30).

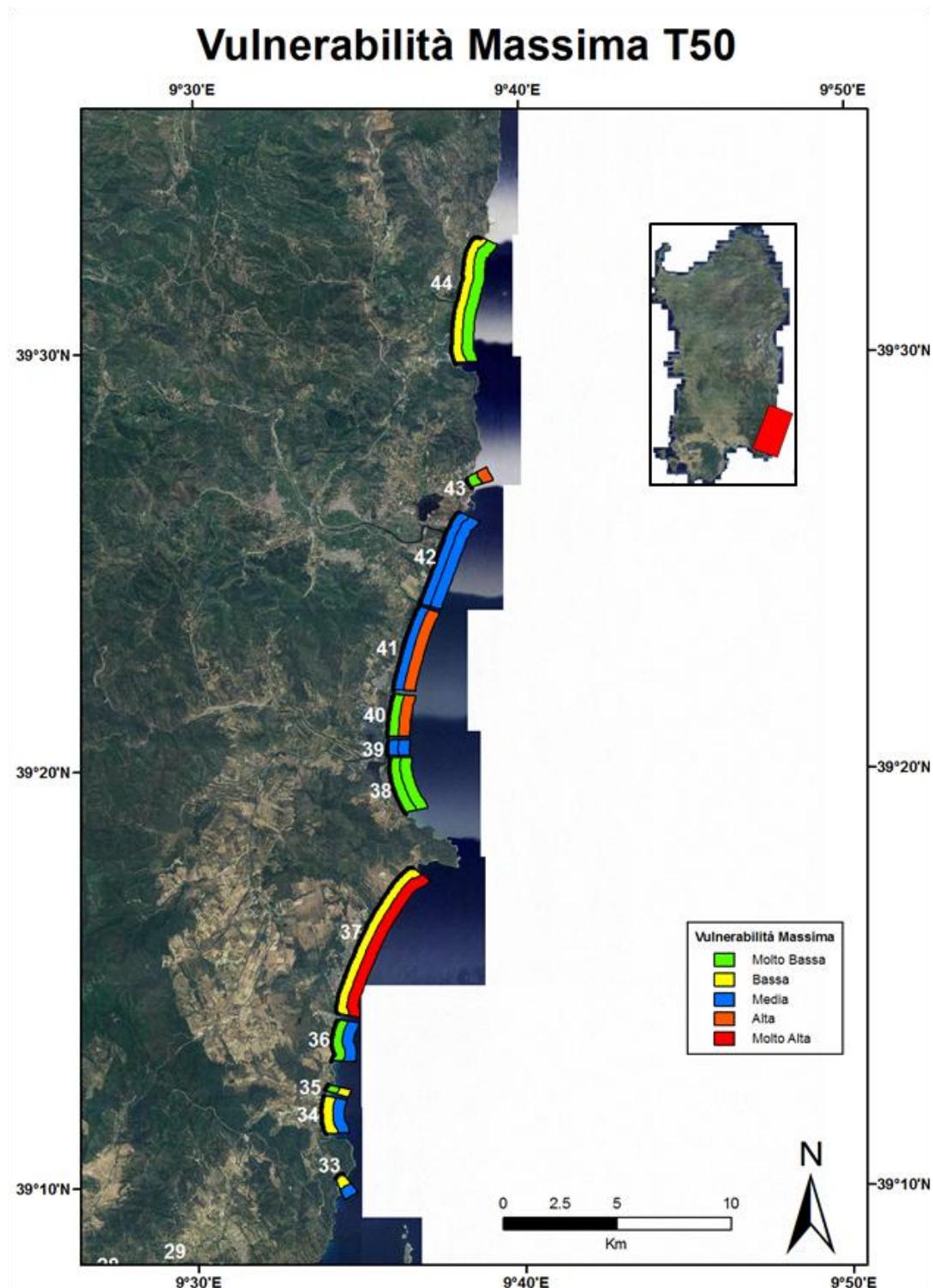


Figura A3-3 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 33- id 44).

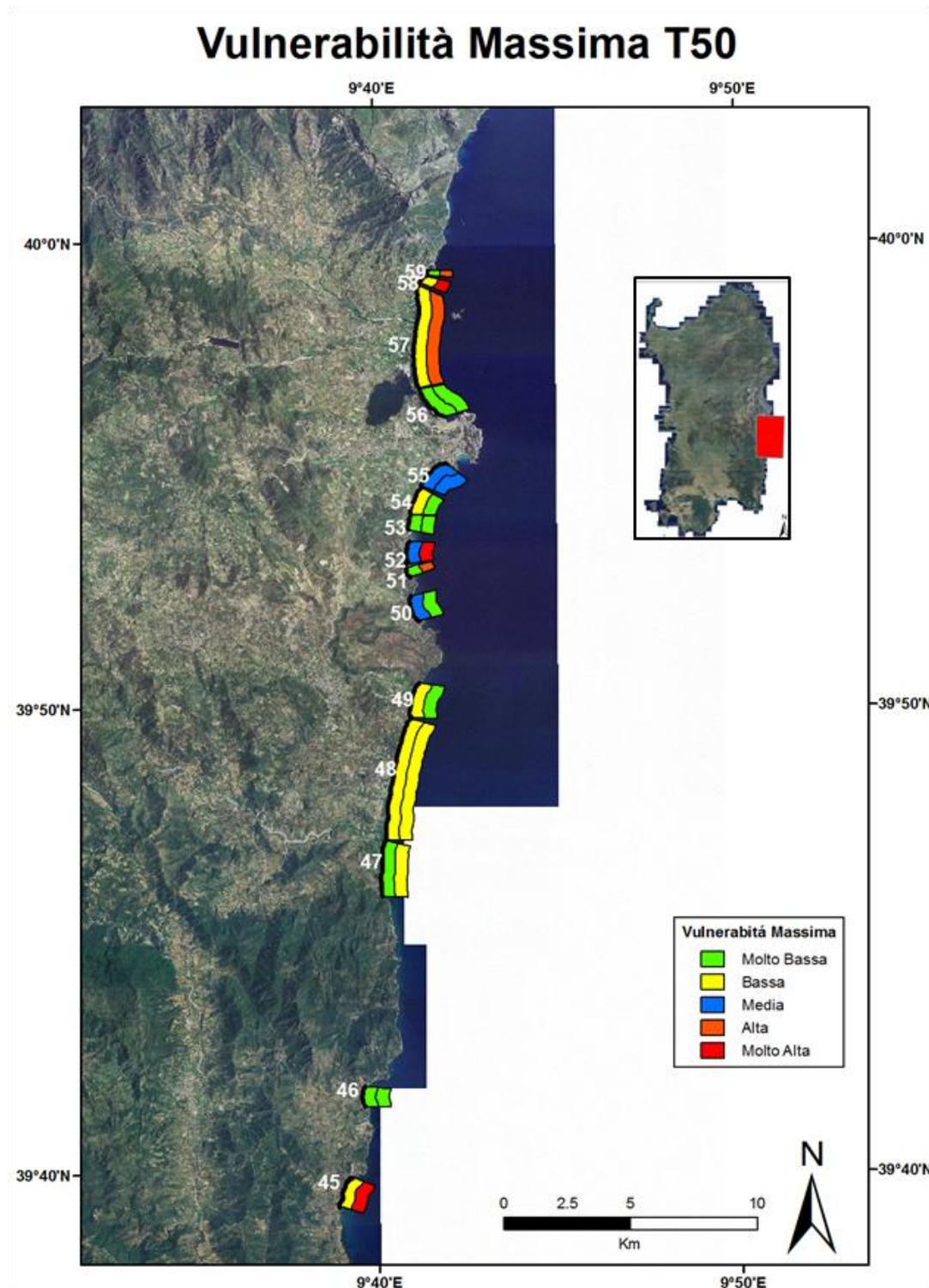


Figura A3-4 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 45- id 59).

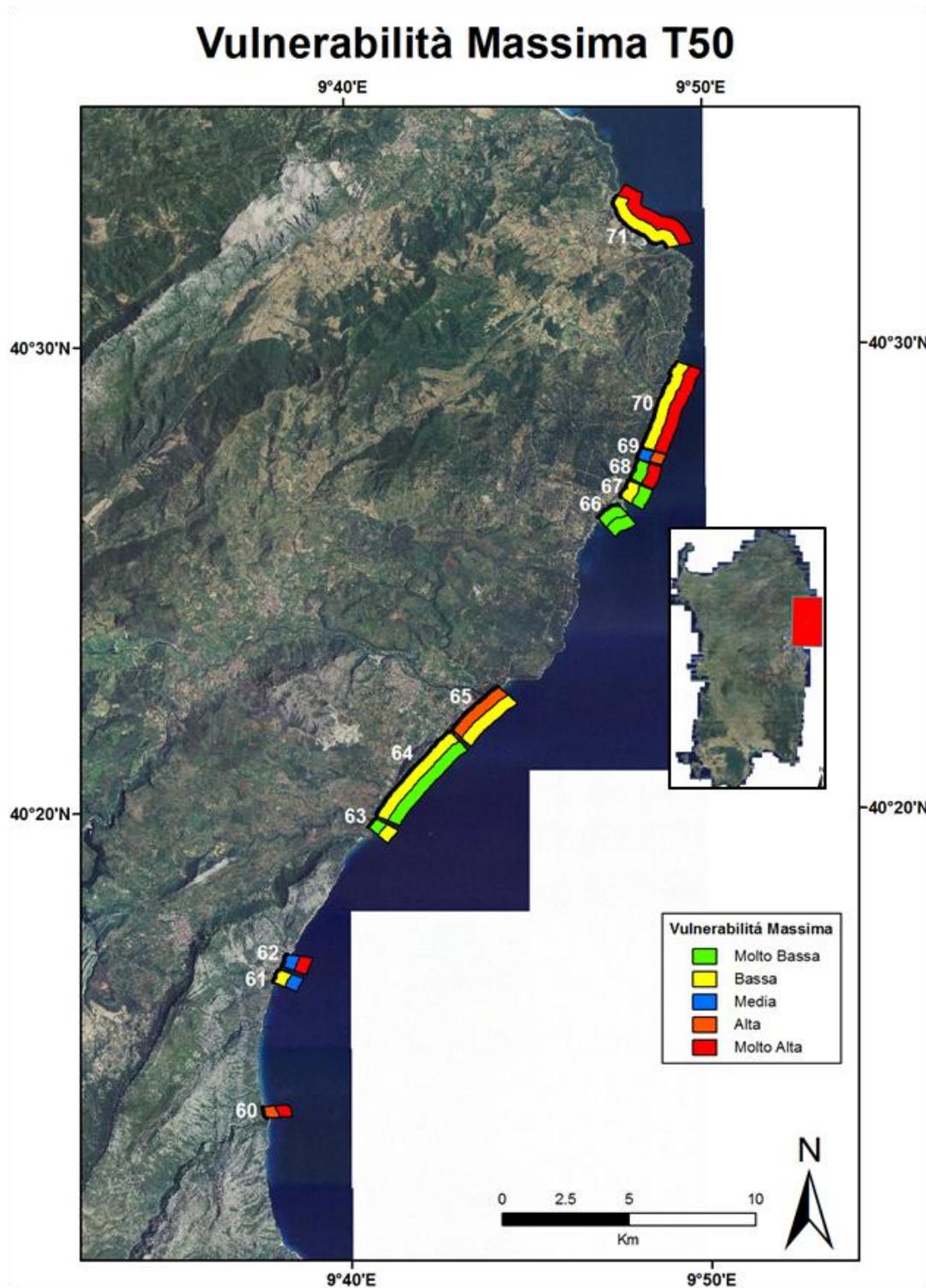


Figura A3-5 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 60- id 71).

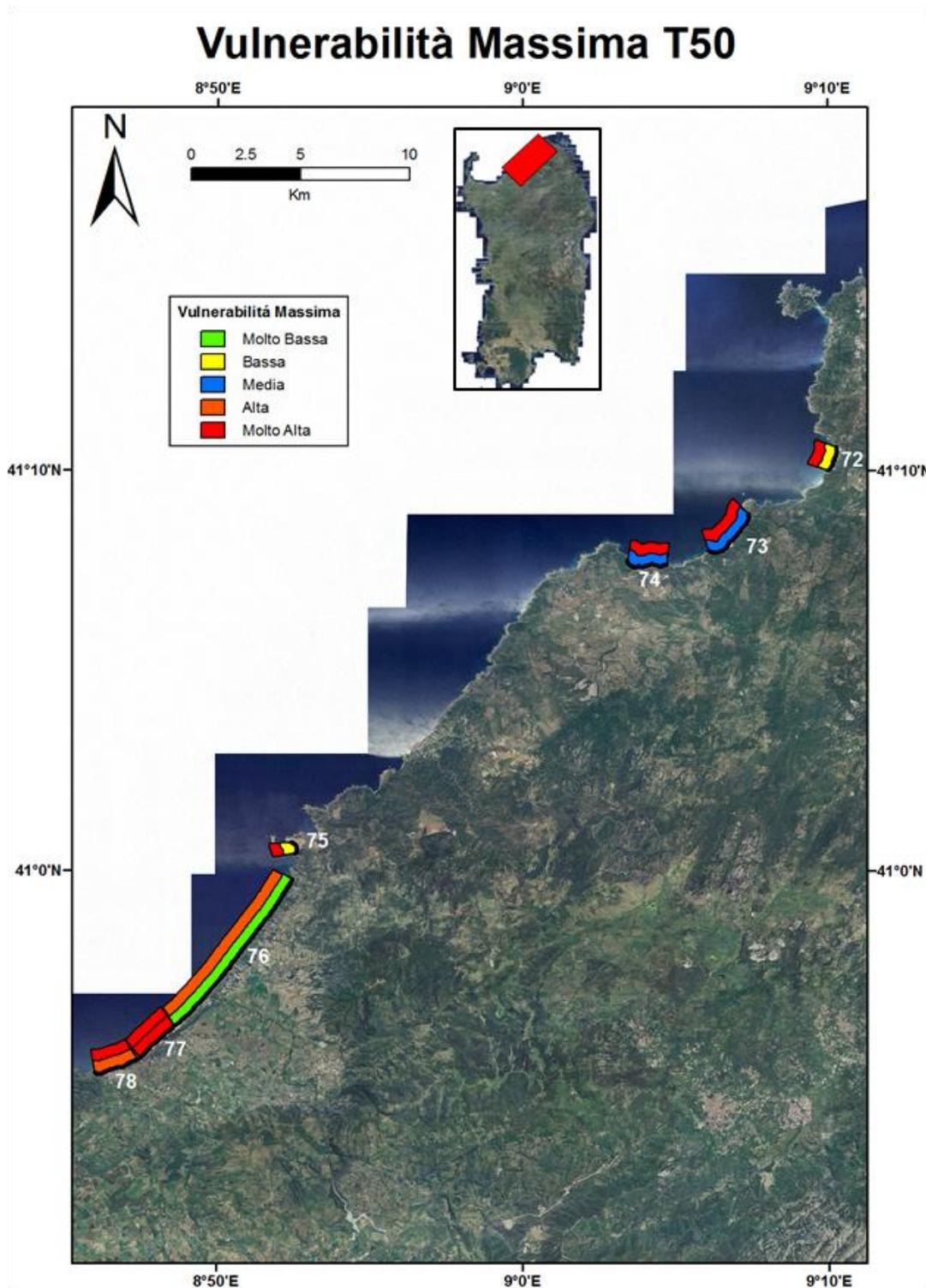


Figura A3-6 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 72- id 78).

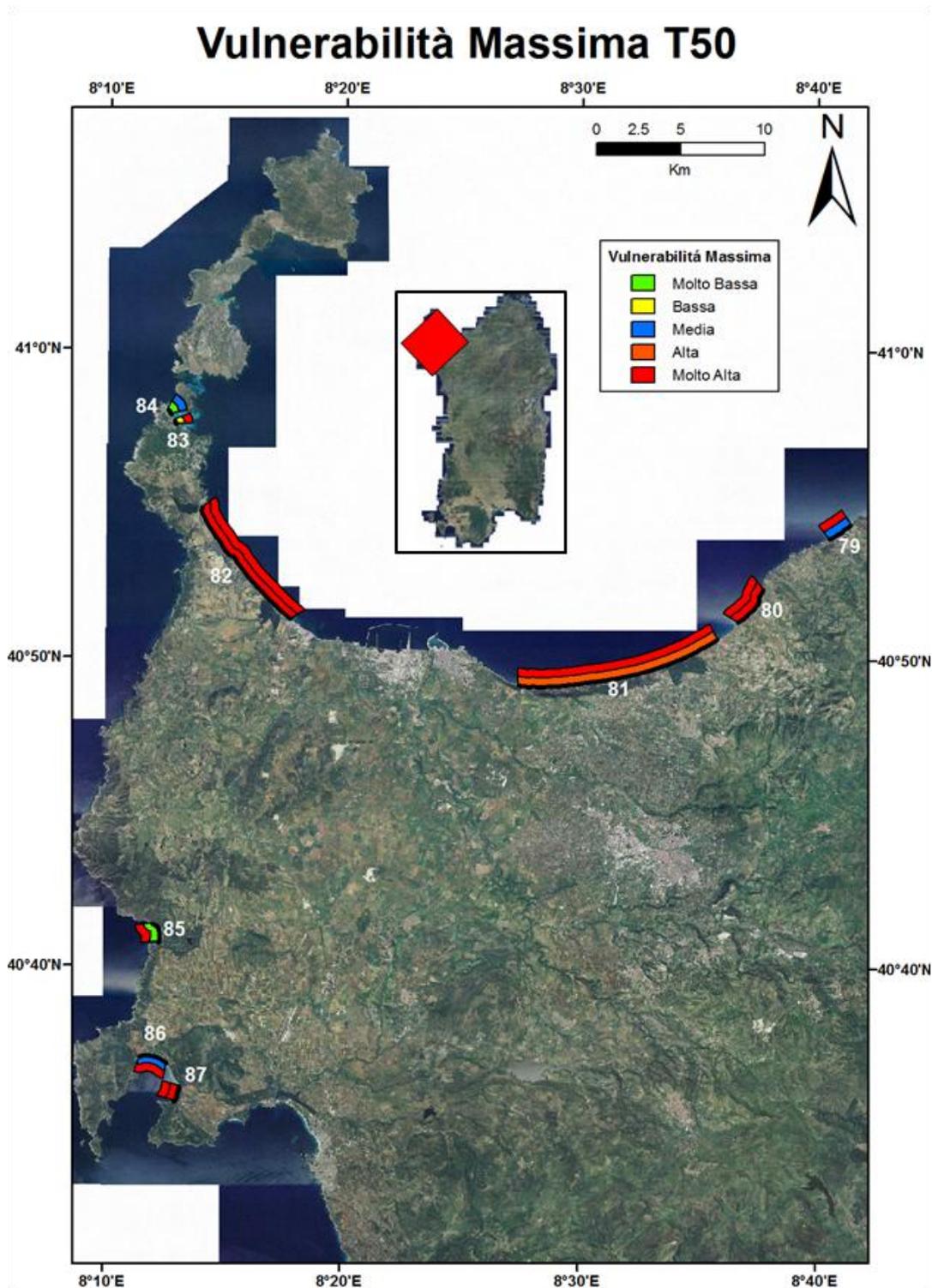


Figura A3-7 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 79- id 87).

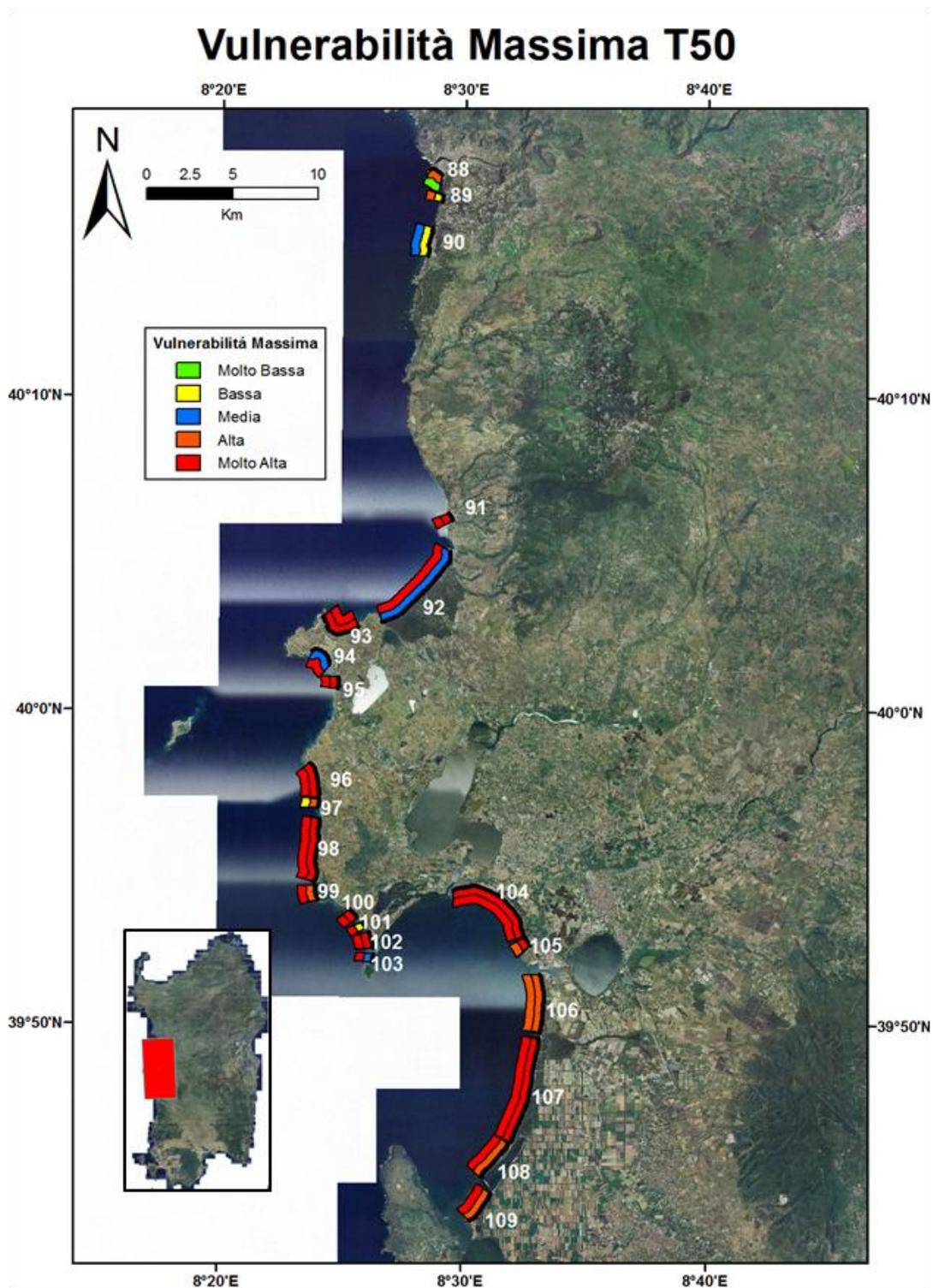


Figura A3-8 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 88- id 109).

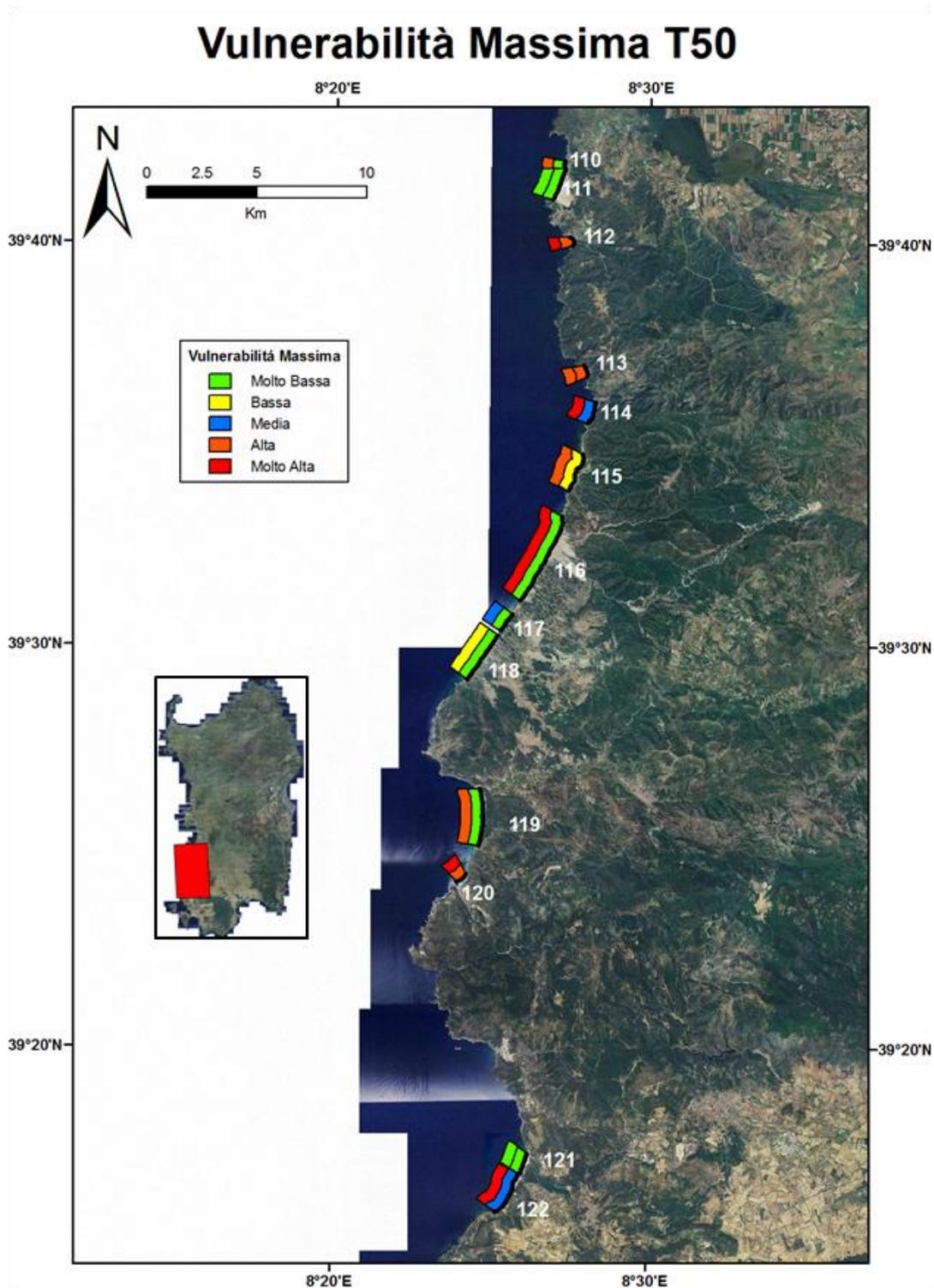


Figura A3-9 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 110- id 122).

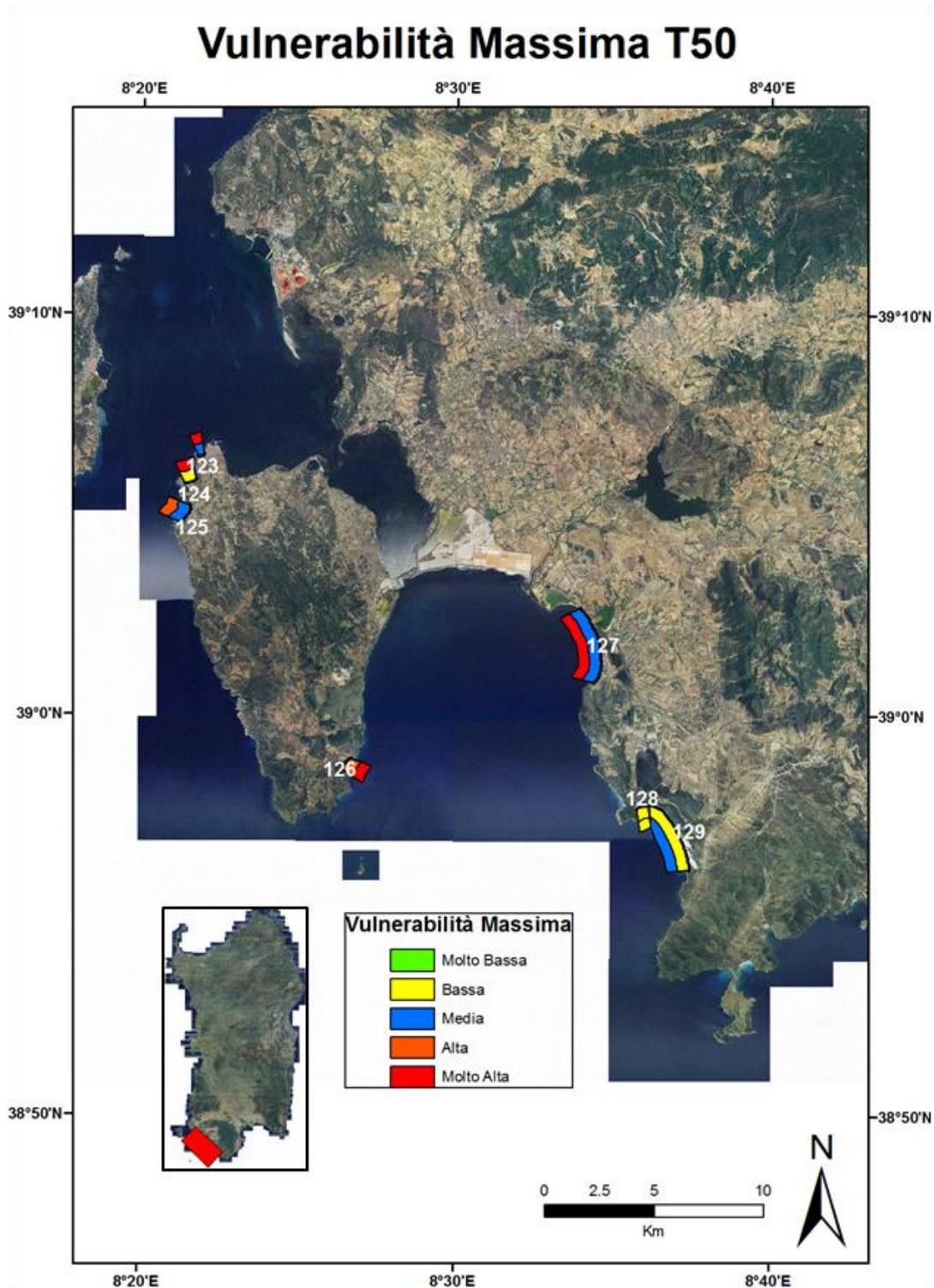


Figura A3-10 Indici di Vulnerabilità Massima: Il poligono interno rappresenta l'inondazione, mentre quello esterno l'erosione (id 122- id 129).