



**Università degli Studi
di Messina**



**Università degli Studi Mediterranea
di Reggio Calabria**

Dipartimento di Ingegneria

Corso di Dottorato di ricerca in

"INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E DELLA SICUREZZA"

XXXIV Ciclo

Curriculum "Ingegneria Idraulica, Costruzioni Idrauliche e Marittime,
Idrologia e Energia dalle acque" (ICAR/01)

**Nuova metodologia di valutazione del rischio da erosione
costiera. Caso studio: Regione Calabria**

Coordinatore:

Prof. Ing. Gaetano BOSURGI

Dottoranda:

Tutor:

Ing. Giuseppina Chiara BARILLA'

Prof. Ing. Giuseppe BARBARO

Co-Tutor:

Ing. Giandomenico FOTI

A.A. 2020/2021

*A Giovanni,
per esserci sempre.*

*Ad Alessandro,
per ricordarmi che
la vita è un miracolo.*

Indice

Sommario	1
Abstract	3
1 Introduzione	5
2 Analisi dei fattori che influenzano l'erosione costiera	11
2.1 L'ambiente costiero	11
2.2 Il fenomeno di erosione costiera	12
2.3 Analisi dei fattori che entrano in gioco nel processo di erosione costiera	14
2.3.1 Geomorfologia costiera	15
2.3.1.1 La classificazione delle coste	16
2.3.1.2 La spiaggia	18
2.3.1.3 Caratteristiche dei sedimenti	22
2.3.1.4 Rilevazione ed analisi della linea di riva	24
2.3.2 Sistemi dunali	27
2.3.3 Vegetazione	31
2.3.4 Fenomeni di subsidenza	33
2.3.5 Cambiamenti climatici ed innalzamento del livello medio del mare	39
2.3.6 Marea	41
2.3.7 Correnti	45
2.3.8 Vento	47
2.3.9 Idrodinamica del moto ondoso	48
2.3.9.1 Interazione onda-struttura	51
2.3.9.2 Trasformazioni delle onde da largo a riva	53

2.3.9.3	Mareggiate e periodo di ritorno	59
2.3.9.4	Dati di moto ondoso e studio meteomarinario	60
2.3.10	Trasporto solido litoraneo	61
2.3.11	Trasporto solido fluviale	69
2.3.12	Opere di difesa	73
2.3.13	Opere portuali	77
3	Valutazione del rischio costiero	81
3.1	Il concetto di rischio	81
3.2	Classificazione delle metodologie di valutazione del rischio	83
3.3	I metodi basati su indici	84
3.4	Problematiche relative alle metodologie di valutazione del rischio	88
3.5	Analisi delle metodologie di valutazione del rischio costiero in Italia	90
3.6	Analisi delle metodologie di valutazione del rischio costiero estere	100
3.7	Il supporto del GIS nell'analisi del rischio costiero	106
4	Nuova metodologia di valutazione del rischio costiero	111
4.1	Descrizione generale	111
4.2	Definizione dell'area di pericolosità costiera	115
4.3	Definizione degli indici di pericolosità	119
4.3.1	Indice legato all'innalzamento del livello medio del mare (SLR)	119
4.3.2	Indice legato all'escursione di marea	120
4.3.3	Indice legato alle correnti marine	120
4.3.4	Indice legato al vento	121
4.3.5	Indice legato al clima ondoso	122
4.4	Valutazione della pericolosità	126
4.5	Definizione degli indici di vulnerabilità	127
4.5.1	Indice legato alla tipologia di costa	127
4.5.2	Indice legato alla morfologia della costa emersa	128
4.5.3	Indice legato alla morfologia della costa sommersa	129
4.5.4	Indice legato al trasporto solido litoraneo e fluviale	130
4.5.5	Indice legato all'evoluzione della linea di costa	132

4.5.6	Indice legato alla subsidenza	136
4.5.7	Indice legato alla vegetazione	137
4.5.8	Indice legato ai sistemi dunali	139
4.5.9	Indice legato alle opere di difesa costiera	141
4.5.10	Indice legato alla presenza di opere portuali	143
4.5.11	Indice legato al grado di antropizzazione della linea di costa	143
4.6	Valutazione della vulnerabilità	144
4.7	Definizione degli indici di esposizione	145
4.7.1	Indice relativo alla popolazione residente nell'area di pericolosità	146
4.7.2	Indice relativo alle classi di uso del suolo	148
4.8	Valutazione dell'esposizione	150
5	Analisi del caso studio	153
5.1	Inquadramento geografico	153
5.2	Caratteristiche geomorfologiche dei litorali calabresi	157
5.3	Analisi dell'evoluzione della linea di riva	159
5.4	Analisi dei sistemi dunali e della vegetazione	165
5.5	Presenza di Posidonia Oceanica in Calabria	170
5.6	Entità della subsidenza in Calabria	171
5.6.1	Sibari	171
5.6.2	Crotone	175
5.6.3	Gioia Tauro	179
5.7	Caratteristiche dei bacini idrografici calabresi e stima del trasporto fluviale	180
5.8	Analisi delle opere di difesa costiera e portuali	185
5.9	Analisi del grado di antropizzazione della linea di costa	188
5.10	Innalzamento del livello medio del mare	189
5.11	Analisi del regime anemologico	190
5.12	Analisi dei dati di marea	192
5.13	Analisi delle correnti marine	196
5.14	Analisi dei dati meteomarini	201
5.15	Stima del trasporto solido litoraneo	210

6	Discussione dei risultati	213
6.1	Applicazione della nuova metodologia	213
6.2	Calcolo delle aree di pericolosità	213
6.3	Calcolo degli indici di pericolosità costiera	217
6.4	Calcolo degli indici di vulnerabilità costiera	222
6.5	Calcolo dell'indice di esposizione	228
6.6	Calcolo dell'indice di rischio costiero	233
6.7	Sviluppo di una piattaforma GIS	236
7	Conclusioni e sviluppi futuri	253
	Appendice	257
	Bibliografia	267
	Sitografia	303
	Ringraziamenti	305

Sommario

L'ambiente costiero rappresenta un ecosistema dinamico, la cui evoluzione risulta continuamente condizionata dall'azione di numerosi fattori di natura climatica ed antropica, che riguardano sia i litorali sia i bacini idrografici. Negli ultimi decenni, la crescente antropizzazione delle fasce costiere e gli effetti dei cambiamenti climatici, in termini sia di aumento del livello del mare sia dell'acuirsi in frequenza ed intensità di eventi meteorologici estremi, hanno determinato gravi perdite di superficie del territorio emerso. Di conseguenza, negli ultimi anni è aumentata la consapevolezza della necessità di una migliore gestione delle zone costiere e si è registrato un diffuso e crescente interesse per le metodologie di valutazione del rischio costiero. Tuttavia, il panorama nazionale ed internazionale, in tema di valutazione del rischio costiero, è caratterizzato non solo dalla presenza di differenti metodologie di calcolo a seconda della regione costiera in esame, ma soprattutto da una grande varietà e dispersione di fattori sui quali tali metodologie si basano. Allo stato attuale, infatti, risulta assente una metodologia che sia di validità generale, che possa inglobare tutti i fattori che influenzano il rischio costiero, in cui i parametri caratteristici della località siano tarati secondo una procedura standardizzata, come quella proposta in questa tesi.

La nuova metodologia di valutazione del rischio proposta è basata su indici, è di validità generale, permette di tenere conto di tutti i fattori di pericolosità e vulnerabilità che entrano in gioco nel processo di erosione costiera e può essere integrata su una piattaforma GIS di libero accesso, al fine di fornire alle amministrazioni, ai privati e ai portatori di interesse un valido supporto sia nella fase di progettazione di opere costiere che nella fase di gestione delle fasce costiere. La metodologia elaborata è stata calibrata mediante la sua applicazione in 54 località campione della regione Calabria.

Abstract

The coastal environment represents a dynamic ecosystem, whose evolution is continually conditioned by the action of numerous climatic and anthropic factors, which affect both the coasts and the hydrographic basins. In recent decades, the growing anthropization of coastal areas and the effects of climate change, in terms of both sea level rise and the increase in frequency and intensity of extreme weather events, have caused severe surface losses in the emerged coast. As a result, awareness of the need for better coastal zone management has increased in recent years and there has been a widespread and growing interest in coastal risk assessment methodologies. However, the national and international panorama, in terms of coastal risk assessment, is characterized not only by the presence of different calculation methodologies depending on the coastal region in question, but above all by a great variety and dispersion of factors on which these methodologies are based. At present, in fact, there is no methodology that is of general validity, which can incorporate all the factors that influence coastal risk, in which the characteristic parameters of the area are calibrated according to a standardized procedure, such as the one proposed in this thesis.

The new risk assessment methodology, proposed in this study, is index-based and is of general validity, and allows to take into account all the hazard and vulnerability factors that come into play in the coastal erosion process. Also, this methodology can be integrated on a free access GIS platform, in order to provide administrations, individuals and stakeholders with valid support both in the planning phase of coastal works and in the management phase of the coastal areas. The developed methodology was calibrated through its application in 54 sample locations in the Calabria region.

Capitolo 1

Introduzione

Da sempre l'uomo ha cercato di sfruttare le diverse potenzialità offerte dalle zone costiere, in quanto zone di transizione tra terraferma e mare, realizzando numerose opere di interesse navale e commerciale, ma soprattutto turistico. Infatti, negli ultimi decenni, una vera e propria invasione delle fasce litoranee ha reso sempre più attuale e ricorrente il tema del rischio costiero e della conseguente protezione e gestione della costa.

In particolare, in un territorio ad elevato sviluppo costiero come l'Italia, con ben 7500 km circa di litorale, il 30% dei quali presenta significativi fenomeni di erosione, riveste maggiore importanza una corretta gestione delle zone costiere e, pertanto, risulta fondamentale conoscere la dinamica litoranea e i fattori che la influenzano.

Negli ultimi decenni, l'importanza della fascia costiera, da un punto di vista socio-economico, oltre che ambientale, e la sua conseguente tutela a causa delle sfide imposte dal cambiamento climatico, hanno fatto crescere in ambito nazionale ed internazionale la consapevolezza della necessità di una pianificazione e gestione del territorio fondata sulla valutazione del rischio costiero. In dettaglio, negli ultimi anni è aumentata la consapevolezza della necessità di una migliore gestione delle zone costiere, che sia “sostenibile a livello ambientale, equa a livello economico, responsabile a livello sociale, sensibile a livello culturale”: questi sono i principi contenuti nella Raccomandazione del Parlamento e del Consiglio europeo del 30 maggio 2002, riguardante l'attuazione della gestione integrata delle zone costiere in Europa (2002/413/CE).

La Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC) è un processo decisionale per la gestione della costa che segue un approccio integrato, ovvero tiene in considerazione tutti gli aspetti correlati alla fascia costiera, tra cui quelli geografico e politico, ambientale, culturale, storico, urbanistico

ed economico al fine di raggiungere gli obiettivi di uno sviluppo costiero più sostenibile. In Italia, il recepimento di queste indicazioni e delle relative direttive emanate dall'Unione Europea è costituito dalle "Linee guida nazionali per la difesa della costa dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici", pubblicate nel 2017 nella loro prima versione e aggiornate nel 2018 (MATTM-Regioni, 2018).

È noto come i processi di dinamica costiera siano fortemente condizionati, oltre che dai fenomeni naturali, dagli effetti di numerosi interventi antropici (Jiongxin, 2003; Walling, 2006; Yang et al., 2015) che interessano sia i bacini idrografici (realizzazione di invasi artificiali, estrazioni in alveo, rimboschimenti, sistemazioni idraulico-forestali, subsidenza delle aree di pianura per emungimenti, ecc.) sia le zone costiere (opere portuali, opere di difesa costiera, foci armate, ecc.) (Barbaro, 2013; Barbaro et al., 2019). Di conseguenza, la combinazione del ridotto apporto di sedimenti alle foci e dell'irrigidimento dei litorali, legato allo sviluppo delle attività antropiche, determina l'innescarsi di fenomeni di erosione costiera.

Ai fenomeni erosivi, inoltre, contribuiscono gli effetti dei cambiamenti climatici che stanno affliggendo il pianeta, in termini sia di aumento del livello del mare sia dell'acuirsi in frequenza ed intensità di eventi meteorologici estremi.

Negli ultimi anni, quindi, si è registrato un diffuso e crescente interesse per le metodologie per la valutazione del rischio costiero, necessarie per gestire in modo ottimale le aree a rischio attribuendo i fondi destinati alla protezione costiera con un certo ordine di priorità (Foti & Sicilia, 2013; Barbaro, 2016). In base al valore dei beni esposti – elementi antropici o di valenza ambientale - presenti nella fascia litoranea e alla valutazione della pericolosità associata sia a fenomeni di inondabilità da mareggiata intensa che di erosione costiera, si può procedere alla determinazione di classi di rischio, perimetrare il territorio oggetto di studio ed individuare le priorità di intervento.

Anche ai fini di una corretta pianificazione e gestione del territorio, diventa sempre più evidente la necessità di una procedura che permetta di valutare il rischio di erosione costiera, che tenga conto di tutti i fattori coinvolti e degli impatti che gli effetti dei cambiamenti climatici comportano.

Il panorama nazionale ed internazionale, in tema di valutazione del rischio costiero, è caratterizzato non solo dalla presenza di differenti metodologie di calcolo a seconda della regione costiera in esame (Viavattene et al., 2017; Satta et al., 2016, 2017; Narra et al., 2017; Mucerino et al., 2019), ma soprattutto da una grande varietà e dispersione di fattori (Ramieri et al., 2011; McLaughlin & Cooper, 2010) sui quali tali metodologie si basano.

Infatti, per una corretta valutazione del rischio di erosione costiera, bisogna tener presente che l'equilibrio delle coste è fortemente influenzato dall'interazione tra diversi fattori, sia di origine naturale che antropica, quali:

- la variazione del livello del mare, in aumento per effetto dello scioglimento dei ghiacciai, a causa del riscaldamento globale;
- la subsidenza della costa, connessa a processi naturali (diagenetici, tettonici e di riequilibrio isostatico) o di origine antropica, per effetto dello sfruttamento eccessivo delle falde acquifere, dell'estrazione di idrocarburi o di bonifiche idrauliche;
- le variazioni di apporti sedimentari fluviali, legate all'alterazione dei cicli sedimentari causata da interventi antropici nei bacini idrografici, come sbarramenti fluviali, regimazioni idrauliche ed estrazioni di materiali alluvionali;
- la presenza di sistemi dunali, che permettono di contrastare in parte gli effetti dell'erosione (in quanto costituiscono un argine naturale alle acque alte, fornendo protezione per gli ambienti di retrospiaggia e un accumulo di sabbia in grado di alimentare la spiaggia) oggi minacciati dalla diffusa antropizzazione delle aree costiere;
- l'influenza di maree e correnti marine, prodotte dalle differenze di temperatura o di salinità;
- le condizioni meteo-marine, che insieme alle caratteristiche batimetriche dei fondali e a quelle morfologiche e granulometriche dei sedimenti, determinano i processi di trasporto solido litoraneo i quali avvengono nella surf-zone (fascia compresa fra la linea di riva e la zona dei frangenti);
- la presenza di opere costiere (moli, pennelli e barriere), le quali condizionano l'andamento delle correnti litoranee e del trasporto litoraneo ad esse associato, contribuendo talvolta ad accentuare l'erosione.

Di conseguenza, lo studio del problema dell'erosione costiera non può prescindere da un approccio multidisciplinare, integrato e sistemico per una conoscenza approfondita dei numerosi parametri che intervengono nella genesi del fenomeno, e, allo stato attuale, risulta assente una metodologia che sia di validità generale, che possa inglobare tutti i fattori che influenzano il rischio costiero, in cui i parametri caratteristici della località siano tarati secondo una procedura standardizzata, come quella proposta in questo studio.

Pertanto, l'obiettivo principale della ricerca presentata riguarda la determinazione di una procedura di valutazione del rischio costiero che tenga conto di tutti i fattori che lo influenzano (geomorfologia della fascia costiera, evoluzione del litorale, idrodinamica costiera, presenza di opere di difesa costiera, caratteristiche fisiche e ambientali), applicabile alle coste della Calabria, ma di validità generale, ovvero che possa essere applicata in qualunque altra regione italiana. Inoltre, la metodologia sviluppata deve essere strutturata in modo da poter essere integrata su una piattaforma GIS di libero accesso, al fine di fornire alle amministrazioni, ai privati e ai portatori di interesse un valido supporto sia nella fase di progettazione di opere costiere che nella fase di gestione delle fasce costiere.

Il lavoro presentato è stato effettuato nell'ambito di una Convenzione di Ricerca dal titolo "Studi specialistici sulla valutazione di pericolosità, vulnerabilità e rischio di erosione costiera in Calabria e relative proposte di mitigazione in aree campione", sottoscritta tra il Dipartimento DICEAM dell'Università degli Studi "Mediterranea" di Reggio Calabria e la Regione Calabria.

La tesi presentata, inclusa di introduzione e conclusioni, è stata strutturata in sette capitoli, descritti di seguito.

Nel primo capitolo viene introdotto il tema di ricerca e sono delineati gli obiettivi dello studio.

Nel secondo capitolo viene approfondito il tema dell'erosione costiera e sono analizzati nel dettaglio tutti i fattori che entrano in gioco in questo processo.

Il terzo capitolo riguarda il tema della valutazione del rischio costiero: in particolare è stata effettuata una ricerca ed analisi bibliografica delle principali metodologie di valutazione del rischio da erosione costiera presenti sia nell'ambito della letteratura scientifica che nell'ambito normativo e delle pubbliche amministrazioni, permettendo così di ottenere un quadro completo dello stato dell'arte.

Nel quarto capitolo viene definita e descritta la nuova metodologia di valutazione del rischio costiero, sviluppata per essere applicata alla regione Calabria, ma potenzialmente applicabile in una qualunque altra regione. In particolare, sono stati definiti diversi indici di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.

Il quinto capitolo tratta la descrizione del caso studio, ovvero della regione Calabria, e l'analisi di tutti i dati e di tutti i parametri presi in considerazione nella metodologia di valutazione del rischio costiero.

Nel sesto capitolo sono riportati e discussi i risultati ottenuti dall'applicazione della nuova metodologia al caso studio.

Nel settimo capitolo sono tratte le conclusioni ed individuati gli sviluppi futuri del lavoro presentato.

Infine, sono riportati in un'appendice tutti i risultati ottenuti in seguito all'analisi dei vari parametri presi in esame.

Capitolo 2

Analisi dei fattori che influenzano l'erosione costiera

In questo capitolo verrà approfondito il tema dell'erosione costiera e saranno analizzati nel dettaglio tutti i fattori che entrano in gioco in questo processo.

2.1 L'ambiente costiero

L'ambiente costiero può essere definito come la zona di transizione tra il mare e la terra ferma: esso rappresenta un ecosistema dinamico la cui evoluzione risulta continuamente condizionata dall'azione e dall'interazione di un elevato numero di fattori di natura climatica ed antropica, che ne determina le caratteristiche morfologiche, fisiche e biologiche. Di conseguenza, con il termine “dinamica costiera” s'intende l'insieme dei processi che regolano l'evoluzione dei litorali (Carter, 2013).

I processi naturali assumono nella dinamica costiera un ruolo predominante, sia a breve termine sia a lungo termine: l'azione di correnti, maree e moto ondoso, infatti, determina una continua movimentazione dei sedimenti in senso sia longitudinale che trasversale, generando nella linea di costa variazioni, anche stagionali, mediante il modellamento della spiaggia emersa e sommersa; tuttavia, gli effetti dei cambiamenti climatici, individuabili nell'innalzamento del livello medio del mare e nell'acuirsi in frequenza ed intensità di eventi estremi, possono generare delle perdite di aree costiere irreversibili a lungo termine (Komar, 2011; Bacino et al., 2019; Vousdoukas et al., 2020). Tra i processi naturali che entrano in gioco nella dinamica costiera bisogna considerare

inoltre il contributo fornito dal trasporto solido fluviale: infatti, se da un lato il mare dissipa l'energia sulla costa, dall'altro la sua azione viene contrastata dall'apporto dei materiali sedimentari fornito in corrispondenza delle foci fluviali che permette di alimentare la spiaggia naturalmente (Damiani et al., 2003; Barbaro et al., 2012; Barbaro et al., 2019).

Tuttavia, la dinamica costiera descritta può essere fortemente influenzata da interventi antropici, che riguardano sia i litorali sia i bacini idrografici (Sicilia et al., 2013): la stabilità naturale dei litorali risulta ormai da tempo minacciata, ad esempio, dall'intensa antropizzazione delle coste ai fini turistici, che, per la realizzazione di centri balneari, villaggi residenziali o porti turistici, ha comportato ovunque profonde trasformazioni della fascia costiera, determinando, in particolare, il progressivo disfacimento dei sistemi dunali costieri (Foti et al., 2021b); anche gli interventi che negli anni hanno riguardato gli alvei fluviali, quali ad esempio, quelli di riduzione dell'erodibilità dei suoli a causa di interventi di sistemazione montana (drenaggi, rimboschimenti, terrazzamenti), gli interventi di sistemazione fluviale (briglie), la realizzazione di invasi artificiali, il prelievo indiscriminato di materiali inerti dal letto dei corsi d'acqua hanno contribuito ad accelerare i fenomeni di instabilità dei litorali (Zema et al., 2014; Versaci et al., 2018; Foti G. et al., 2020a); o, ancora, le attività antropiche legate allo sfruttamento eccessivo delle falde acquifere, all'estrazione di idrocarburi e le bonifiche idrauliche, hanno indotto fenomeni di abbassamento del suolo, rendendo più vulnerabile la costa all'azione delle mareggiate.

L'insieme dei processi naturali e antropici che determinano la morfodinamica costiera rappresenta quindi il sistema di forzanti climatiche e non climatiche del fenomeno di erosione costiera.

2.2 Il fenomeno di erosione costiera

Il fenomeno dell'erosione costiera è il risultato di un processo o di una serie di processi, naturali o indotti, che alterano il ciclo dei sedimenti e modificano la morfologia dei litorali determinando una perdita di superficie del territorio emerso (Komar, 2000; Barbaro et al., 2014a). In genere, le variazioni morfologiche dei litorali sono legate allo spostamento di sedimenti in direzione longitudinale o trasversale alla costa ed al bilancio tra il trasporto litoraneo e gli apporti solidi fluviali (Perez-Arlucea et al., 2005; Barbaro et al., 2014b; Li et al., 2014). Le variazioni morfologiche devono essere valutate a diverse scale temporali in quanto un arretramento della linea di riva non

sempre è sintomo di erosione costiera ma può essere legato a singoli eventi oppure alle fluttuazioni stagionali della linea di riva (Maiti & Bhattacharya, 2009; Barbaro et al., 2017).

I fenomeni erosivi possono essere:

- a breve termine (di tipo reversibile), se sono legati al trasporto di sedimenti verso il largo, quindi in senso trasversale, e sono generalmente associati alla stagionalità delle mareggiate;
- a lungo termine, se sono legati agli squilibri nel bilancio sedimentario, originati dal trasporto solido litoraneo.

Bisogna tener presente che i fenomeni di erosione costiera non arrecano danni soltanto ai beni di natura antropica presenti sulle fasce costiere (strutture turistiche, ricettive, private, industriali, agricole, infrastrutture, ecc.) ma anche ai beni di eccezionale valore naturalistico, paesaggistico e storico-archeologico che spesso caratterizzano tali aree (Ciccarelli et al., 2017).

Per contrastare i fenomeni erosivi spesso sono state realizzate opere di difesa costiera, progettate tuttavia senza tener conto della dinamica dell'intera unità fisiografica in cui ricade l'opera, e risultando dunque, a tutti gli effetti, degli interventi tampone che non solo non risolvono il problema erosivo ma spesso lo spostano verso i litorali adiacenti. Per analizzare correttamente l'equilibrio di un litorale, infatti, è necessario studiare l'intera unità fisiografica a cui esso appartiene. Per unità fisiografica s'intende un tratto di costa che presenta un bilancio di sedimenti "chiuso", cioè non influenzato da fattori esterni all'unità stessa, la cui estensione può variare da alcune centinaia di metri a decine di chilometri. Per affrontare tale problematica risulta, dunque, necessaria e strategica una pianificazione a larga scala e, in tale ottica, particolare importanza riveste il ricorso a modelli numerici che permettono di analizzare l'impatto di ogni intervento sull'insieme delle dinamiche che caratterizzano un tratto di costa, consentendo quindi di ottimizzare le soluzioni attraverso il confronto di molteplici alternative di intervento o gestionali. In Italia, negli ultimi decenni, i litorali hanno subito notevoli variazioni geomorfologiche a causa di un incremento dei fenomeni di erosione costiera di origine prevalentemente antropica. Dai rapporti ISPRA (www.isprambiente.gov.it) risulta che circa il 30% della popolazione italiana vive nella fascia costiera e di oltre 8000 km di costa più del 9% è ormai artificiale, delimitata da opere radenti la riva (3,7%), porti (3%) e strutture parzialmente sovrainposte al litorale (2,4%); tra il 1999 e il 2007 circa 600.000 m² di arenili sono andati persi, mentre tra il 2000 e il 2007 il 37% dei litorali ha subito variazioni superiori a 10 metri. La perdita di superfici costiere e l'arretramento

della linea di riva è risultato più gravoso in corrispondenza delle foci dei fiumi e questo indica una netta riduzione dell'apporto sedimentario fluviale. Inoltre, in molte località, l'erosione dei litorali ha messo in crisi la sicurezza di abitazioni, strade e ferrovie (Figura 2.1), soprattutto nei casi di contemporaneità di eventi di alluvioni e mareggiate (Canale et al., 2021).



Figura 2.1: Danni causati da un evento contemporaneo di alluvione e mareggiata a Bruzzano (RC) tra il 31 ottobre e il 2 novembre 2015.

Come descritto, quindi, l'equilibrio dei litorali dipende dall'interazione tra molteplici fattori di origine sia naturale che antropica; di conseguenza lo studio del problema dell'erosione costiera non può prescindere da un approccio multidisciplinare, integrato e sistemico per una conoscenza approfondita dei numerosi parametri che intervengono nella genesi del fenomeno.

2.3 Analisi dei fattori che entrano in gioco nel processo di erosione costiera

Per poter analizzare il processo di erosione costiera, è necessario avere una conoscenza approfondita di tutti gli aspetti legati alla dinamica costiera. Pertanto, di seguito, verranno descritti e analizzati tutti i fattori che possono entrare in gioco nel processo di alterazione morfologica dei litorali, a partire dallo studio delle caratteristiche della morfologia costiera e dei sistemi dunali, i quali permettono di contrastare in parte gli effetti dell'erosione, in quanto forniscono protezione per gli ambienti di retrospiaggia e rappresentano un accumulo di sabbia in grado di alimentare

la spiaggia, oggi minacciati dalla diffusa antropizzazione delle aree costiere (Foti et al., 2021b); saranno inoltre analizzati i fenomeni che possono incidere sui processi erosivi a lungo termine, quali la subsidenza della costa, connessa a processi naturali (diagenetici, tettonici e di riequilibrio isostatico) o di origine antropica (per effetto dello sfruttamento eccessivo delle falde acquifere, dell'estrazione di idrocarburi o di bonifiche idrauliche), e la variazione del livello del mare, in aumento per effetto dello scioglimento dei ghiacciai, a causa del riscaldamento globale; saranno analizzati inoltre l'influenza di maree e correnti marine, prodotte dalle differenze di temperatura o di salinità, l'idrodinamica costiera, che riguarda l'interazione tra il moto ondoso e la costa, i processi di trasporto solido litoraneo e fluviale, il cui bilancio può determinare l'andamento evolutivo del litorale; infine, non per importanza, saranno descritte le varie tipologie di opere costiere di difesa, le quali condizionano l'andamento delle correnti litoranee e del trasporto litoraneo ad esse associato, contribuendo talvolta ad accentuare l'erosione.

2.3.1 Geomorfologia costiera

Per analizzare le caratteristiche geomorfologiche della costa è necessario introdurre alcune definizioni. La zona costiera è definita convenzionalmente come l'area di transizione tra la terra ferma e il mare e le cui caratteristiche geomorfologiche sono strettamente correlate ai processi idrodinamici costieri e fluviali. I limiti geografici di tale zona possono essere individuati lato mare dall'estremità della piattaforma continentale, e lato terra dalla massima quota raggiunta dalle onde, pertanto, nella zona costiera possiamo definire da terra verso mare tre aree:

- la costa, rappresentata da una zona che si può estendere dalla riva verso l'entroterra anche per alcuni chilometri fino alle zone caratterizzate da differenti caratteristiche morfologiche del terreno;
- la spiaggia, costituita da una parte emersa e una sommersa, è un deposito costiero litoraneo formato da sedimenti marini incoerenti (sabbie oppure ghiaie), attuali o recenti, esteso verso terra fino al limite raggiunto dalle onde di tempesta e verso mare fino alla profondità di chiusura, oltre la quale il movimento dei depositi sabbiosi a causa del moto ondoso può considerarsi nullo;
- la piattaforma continentale, che si estende dal limite esterno della spiaggia sommersa fino all'inizio della scarpata continentale, che individua la linea di demarcazione del continente.

2.3.1.1 La classificazione delle coste

In letteratura esistono diversi criteri di classificazione delle coste, in quanto la loro genesi dipende da molti fattori, quali il tipo di roccia, i fenomeni tettonici che si sono verificati nel tempo, l'ampiezza della marea, il cambiamento del livello del mare, la direzione predominante del moto ondoso, ecc. Fondamentalmente, tuttavia, si possono individuare due principali tipologie di classificazione: quelle di tipo descrittivo, essenzialmente basate su parametri morfologici e/o litologici, e quelle di tipo genetico, ovvero riferite ai processi che hanno generato e modellato le coste (Davis & FitzGerald, 2009).

Generalmente, la prima classificazione, nonché la più comune, è quella effettuata in base alla pendenza (De Martone, 1909): infatti, è possibile distinguere coste alte, caratterizzate da pareti molto ripide, spesso subverticali, parallele alla linea di riva (valloni, rias, falesie), e coste basse, contraddistinte da pendenze molto basse e da aree di accumulo di sedimenti per lo più trasportati dai fiumi e ridistribuiti dal mare e pertanto, dal punto di vista geologico, di età molto recente (Figura 2.2).

Il litorale italiano è caratterizzato per il 34% da coste alte e rocciose, per il 58% da coste basse e sabbiose e per il restante 8% da foci e coste banchinate (APAT, 2007).



Figura 2.2: Esempi di costa alta e rocciosa (a sinistra) e di costa bassa e sabbiosa (a destra). (Fonte: APAT, 2007).

Una seconda classificazione delle coste può essere fatta in funzione della variazione del livello relativo del mare (Gulliver, 1899): si possono distinguere, infatti, le coste in emersione e le coste

in sommersione; le prime si sviluppano per un innalzamento tettonico e/o per un abbassamento del livello marino, mentre le seconde si originano per l'innalzamento del livello del mare e/o per la subsidenza del territorio costiero.

La classificazione delle coste più comunemente usata è quella che le suddivide in coste primarie e secondarie, proposta dall'oceanografo americano Shepard (1976). Le coste primarie sono state definite come quelle che si sono evolute in ambienti non costieri, o, comunque, per la prevalenza di agenti morfogenetici diversi da quelli marini, quali ad esempio le coste in sommersione soggette a fenomeni erosivi, le coste legate a fenomeni deposizionali avvenuti in ambiente sub-aereo, le coste di origine vulcanica, le coste di origine tettonica e le coste glaciali.

Le coste secondarie, invece, sono quelle generate dall'azione morfogenetica del mare e modellate da processi erosivi e/o deposizionali operati dal moto ondoso e possono essere suddivise in:

- coste originate in seguito all'azione erosiva delle onde, generalmente derivanti da altri tipi di coste;
- coste di deposizione marina, generate dall'accumulo dei sedimenti trasportati dalle onde e dai corsi d'acqua che si presentano generalmente come cordoni litorali sabbiosi;
- coste a falesia, che si presentano spesso come scarpate prive di vegetazione caratterizzate da una forte pendenza verticale che termina direttamente sul mare e possono essere classificate in vive o morte a seconda della loro esposizione al moto ondoso; la falesia morta è generalmente protetta da una zona di accumulo di detriti dove il moto ondoso può dissipare l'energia, mentre, al contrario, la falesia viva si presenta come parete quasi verticale per cui è direttamente esposta all'azione del moto ondoso;
- coste organogene, il cui tipo prevalente è dato dalla scogliera corallina, formata dagli organismi biocostruttori.

Un'altra classificazione è stata proposta per le coste italiane da Anselmi et al. (1978), che ha individuato sei tipologie di coste diverse a partire dai dati desumibili dalle carte geologiche e topografiche.

In particolare, si distinguono:

- rilievi montuosi o collinari, che raggiungono direttamente il mare, spesso caratterizzati dalla presenza di falesie o piccolissime spiagge con sedimenti grossolani, il cui profilo sommerso riproduce quasi fedelmente quello sovrastante;
- terrazzi marini, generalmente costituiti da costa alta, in cui la parte emersa presenta una superficie tabulare, risultante dall'abrasione marina di un substrato roccioso o dalla deposizione su questo di sedimenti gradati in senso orizzontale o verticale, e il cui profilo riproduce quello della parte emersa;
- pianure litoranee strette, caratterizzate da elevazioni sul livello del mare di qualche metro, larghezze dell'ordine del centinaio di metri e delimitate verso l'interno da paleofalesie o scarpate di rilievi collinari, montuosi o di terrazzi;
- pianure di fiumara, contraddistinte da valli ampie e profonde in zona di costa alta;
- pianure alluvionali, caratterizzate da apparati deltizi, lagune o paludi costiere, il cui profilo sottomarino è molto appiattito e corrisponde abbastanza bene a quello della pianura emersa;
- pianure di dune, costituite da zone basse nelle quali l'abbondanza di sedimenti medio-fini ha permesso la costruzione di forme dunali, con ampiezze variabili da alcune centinaia di metri a qualche chilometro.

2.3.1.2 La spiaggia

La spiaggia è una zona molto dinamica la cui formazione è legata alla combinazione di fenomeni di erosione e sedimentazione, regolati da numerosi fattori suddivisibili in due gruppi: passivi (topografia dell'area, materiali presenti) e attivi (venti, moto ondoso, correnti marine, maree, apporti fluviali, attività degli organismi e attività antropiche).

Le spiagge sono in gran parte rappresentate dalle coste basse e possono essere classificate in base alla loro composizione granulare in:

- spiagge pefitiche, se sono formate da sedimenti non coesivi di grandi dimensioni, come ciottoli e ghiaia;
- spiagge psammitiche, se sono costituite da sabbie;

- spiagge pelitiche, se sono formate prevalentemente da sedimenti coesivi, come limo e argilla.

L'estensione di una spiaggia è molto variabile: se è collegata ad una costa rocciosa essa generalmente è caratterizzata da una stretta striscia di sedimenti sciolti che separa la roccia dal mare, per ampliarsi poi nelle piccole baie. Nelle zone di pianura, invece, le spiagge possono svilupparsi maggiormente con la formazione di vasti sistemi dunali.

Particolari spiagge sono le cosiddette “pocket beach”, ovvero spiagge confinate tra promontori o strutture, caratterizzate da trasporto longshore nullo, la cui vulnerabilità è quindi legata essenzialmente a processi che intervengono sulla dinamica cross-shore, come, ad esempio, l'innalzamento del livello del mare (Barillà et al., 2020a).

Analizzando il profilo trasversale mostrato in Figura 2.3, la spiaggia generalmente può essere suddivisa in tre parti:

- emersa o retrospiaggia (backshore);
- intertidale o battigia (foreshore);
- sommersa (nearshore o shoreface).

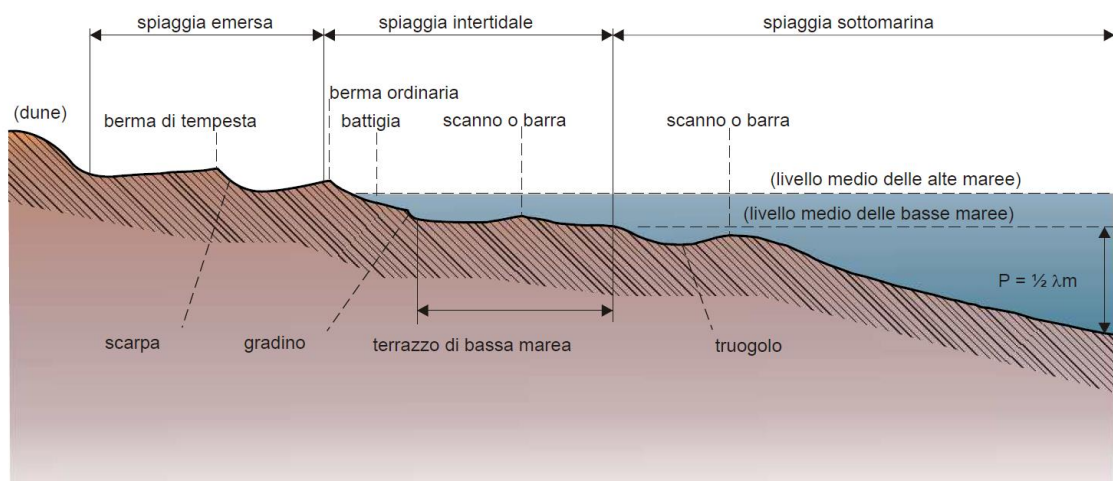


Figura 2.3: Suddivisione della spiaggia (fonte: APAT, 2007).

La spiaggia emersa (o retrospiaggia) è la parte esposta all'azione del mare solo durante le mareggiate o quando la marea è insolitamente elevata; generalmente è la zona che si trova al di sopra del massimo livello di alta marea e si estende verso terra fino al limite massimo di azione delle onde

di tempesta, mentre verso mare è separata dalla battigia dalla presenza della berma ordinaria che si forma in seguito alla deposizione di sedimenti in condizioni normali di moto ondoso (Dingler, 2005). La spiaggia emersa può essere caratterizzata, inoltre, dalla presenza di una o più berme di tempesta generate dall'azione delle mareggiate. Generalmente, il limite interno della spiaggia emersa è individuato dalla presenza di una fascia di dune di origine eolica, alimentate dalla sabbia asciutta della spiaggia emersa.

La spiaggia intertidale (o battigia) è la zona esposta alla continua oscillazione della superficie libera dell'acqua dovuta al moto ondoso e alle maree ed è quindi compresa tra il livello medio delle alte e delle basse maree; la battigia, a sua volta, è composta da due zone: una zona di surf e una zona di swash (Figura 2.4).

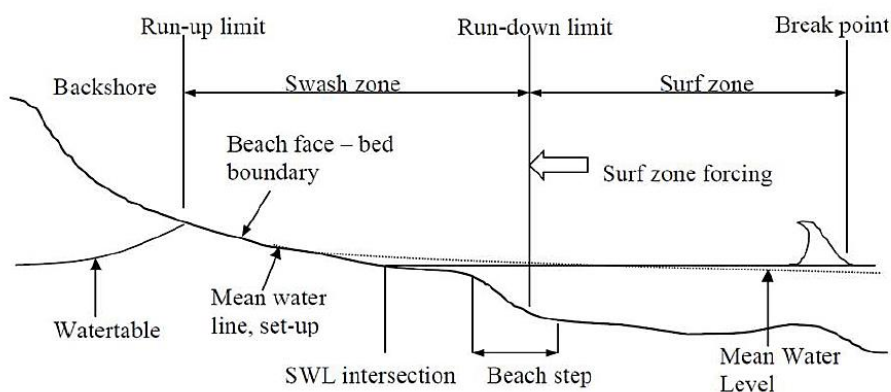


Figura 2.4: Schematizzazione della zona di battigia (Elfrink & Baldock, 2002).

La zona di surf è l'area in cui le onde che si avvicinano alla costa frangono, dissipando la maggior parte dell'energia ed è delimitata lato mare dal punto di frangimento (o breaker zone) e lato terra dal limite del run-down. La zona di swash, invece, è la regione in cui la spiaggia risulta alternativamente coperta e scoperta dall'acqua per i fenomeni rispettivamente di risalita (run-up) e ritiro (run-down) delle onde, insieme alla variazione del livello medio dell'acqua, ed è quindi individuabile dai limiti di run-up e run-down (CIRIA, 1996).

Nelle coste molto basse con ampia escursione mareale, generalmente, il profilo della zona intertidale è caratterizzato dalla presenza di una o più barre (o scanni), separati da solchi (o truogoli) allungati, paralleli alla linea di riva, che si formano a causa delle correnti locali cross-shore e long-shore. Le barre sono elementi della spiaggia molto dinamici, in quanto interagendo con le onde

cambiano la loro forma e si spostano in direzione trasversale alla linea di riva e, di conseguenza, variando le profondità locali, influenzano la propagazione delle onde e la formazione dei frangenti.

Infine, la spiaggia sommersa (nearshore) è la zona posta al di sotto del livello minimo di bassa marea, e si estende fino alla profondità limite, dopo la quale saranno verificate le condizioni di largo (offshore), in cui le onde si propagano senza risentire degli effetti del fondale: tali condizioni si verificano a profondità maggiori di valori pari a circa metà della lunghezza d'onda. Anche nella nearshore si sviluppano generalmente barre longitudinali (longshore bars), separate dalle zone più interne, e incise da canali perpendicolari alla costa percorsi dalle correnti di risucchio o di ritorno.

Inoltre, in base alla loro pendenza, le spiagge possono essere classificate in:

- Dissipative: spiagge di debole pendenza con sabbie fini ed un'ampia zona dei frangenti;
- Intermedie: spiagge caratterizzate da una pendenza moderata;
- Riflettenti: spiagge molto ripide i cui sedimenti sono costituiti da ciottoli e le onde tendono a frangersi vicino riva.

La pendenza del profilo di spiaggia dipende principalmente dall'energia del moto ondoso, in particolare la sua pendenza aumenta all'aumentare dell'altezza media delle onde. Tuttavia, la forma del profilo trasversale della spiaggia è legata anche alla dimensione dei sedimenti che la costituiscono, infatti, a parità di condizioni meteomarine, la pendenza della spiaggia aumenta all'aumentare della granulometria: quindi, mentre le spiagge sabbiose sono caratterizzate da profili a bassa pendenza (generalmente $< 5^\circ$), le spiagge costituite da sabbie grossolane o ghiaie, per effetto della loro alta permeabilità, assumono profili con forte pendenza.

Questo accade perché durante l'azione di risacca delle onde nella zona di swash, che tende a portare indietro i sedimenti, la grande permeabilità delle ghiaie o delle sabbie grossolane ne smorza gli effetti provocando un deposito dei sedimenti e quindi pendenze maggiori. Al contrario spiagge con sabbie medio fini risentendo maggiormente dell'azione della risacca, producono profili a debole pendenza. Le spiagge con profili a debole pendenza sono solitamente più stabili delle spiagge a forte pendenza.

Da un punto di vista sedimentologico, i profili di spiaggia presentano generalmente una granulometria decrescente verso il largo, in quanto il moto ondoso esercita un'azione selettiva nei confronti del materiale solido in funzione della dimensione dei singoli grani: in genere le parti-

celle più grandi (più pesanti) vengono spinte sulla spiaggia, mentre quelle più fini (più leggere) vengono rimesse in moto dalle onde e trasportate verso il largo.

2.3.1.3 Caratteristiche dei sedimenti

La maggior parte delle spiagge è costituita da sedimenti non coesivi, le cui caratteristiche principali, in riferimento al processo di trasporto e deposizione da parte del moto ondoso, delle correnti e del vento, possono ricondursi al tipo di materiale che li compone e alle loro dimensioni: infatti, la velocità di sedimentazione, che rappresenta un parametro fondamentale per descrivere il comportamento di un sedimento sotto l'azione del campo di moto di un fluido, dipende principalmente dal peso specifico e dalla dimensione della particella.

Per quanto riguarda il materiale, la frazione predominante dei sedimenti costieri è costituita generalmente da sabbia quarzosa, chimicamente inerte e molto resistente alle azioni meccaniche, tuttavia, possono essere presenti anche carbonati provenienti dalla disgregazione di strutture organogene, quali coralli e conchiglie, calcite, metalli pesanti, materia organica, limo ed argilla, che ovviamente ne condizionano il peso specifico. Nella stima del trasporto solido spesso si fa riferimento alla cosiddetta densità relativa, data dal rapporto tra la densità del sedimento e la densità del fluido in cui è immerso: per i sedimenti più comuni delle nostre spiagge, costituiti prevalentemente da quarzo, la densità del sedimento è circa 2650 kg/m^3 .

Per quanto riguarda la dimensione dei sedimenti, una spiaggia può essere composta da granelli di sabbia, ghiaia, ciottoli e sassi, variabili in un range granulometrico che copre circa cinque ordini di grandezza. La dimensione delle particelle è definita in termini di diametro (Figura 2.5).

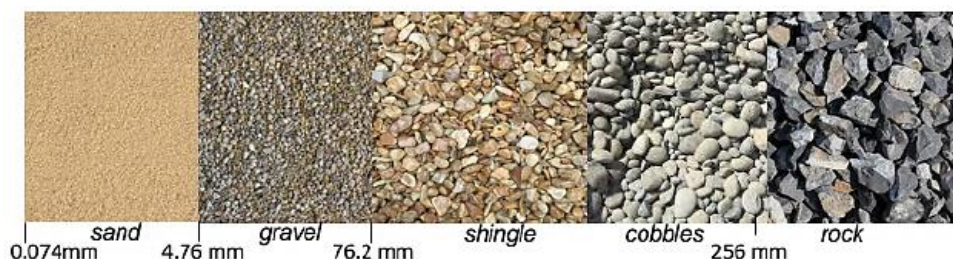


Figura 2.5: Classificazione dei sedimenti ASTM (USACE, 2003) in relazione alla dimensione dei sedimenti.

Per conoscere le dimensioni dei sedimenti di un campione di spiaggia si ricorre all'analisi granulometrica, che fornisce il rapporto tra la percentuale di campione in peso e il diametro minimo

del setaccio attraverso cui i granuli riescono a passare. Generalmente, un dato caratteristico del campione è rappresentato dal diametro mediano D_{50} , che rappresenta il diametro del setaccio attraverso il quale passa il 50% in peso del campione. Tale parametro viene assunto come indicativo della dimensione dei sedimenti nei modelli di valutazione del trasporto solido litoraneo.

Per la classificazione granulometrica dei sedimenti, il sistema più noto e più usato in geologia è quello basato sulla scala dimensionale di Udden-Wentworth (Wentworth, 1922), che utilizza come unità di misura il millimetro. La successiva evoluzione della classificazione Wentworth è rappresentata da quella di Krumbein, basata sulla valutazione del parametro ϕ , definito da Krumbein & Sloss (1963) come:

$$\phi = -\log_2 D/D_0 \quad (2.1)$$

dove D è il diametro della particella in millimetri e D_0 è un diametro di riferimento pari a 1 mm. Di conseguenza, noto ϕ il diametro della particella D può essere calcolato come:

$$D = D_0 2^{-\phi} \quad (2.2)$$

La scala di Krumbein, nota anche come scala di ϕ , risulta sicuramente più pratica perché consente di esprimere le dimensioni del sedimento superando il problema dell'approssimazione delle cifre decimali e permette di interpretare i risultati di una curva granulometrica, ottenuta con il metodo dei setacci, rappresentata come una curva gaussiana in un diagramma semi-logaritmico in cui le ordinate rappresentano le percentuali in peso e le ascisse i logaritmi del diametro D .

Oltre alla classificazione Wentworth modificata, un altro sistema generalmente adottato è la Classificazione dei Suoli Unificati (USCS) o Classificazione ASTM. Questi sistemi sono entrambi riportati nel Coastal Engineering Manual (CEM) (USACE, 2003), in cui le varie tipologie di sedimenti sono elencate in funzione delle corrispondenti dimensioni del diametro, espresse in mm e ϕ (Tabella 2.1).

Come si può notare dalla Tabella 2.1, secondo la classificazione ASTM, al diminuire del diametro le particelle di sedimento sono classificate in sassi (boulder), ciottoli (cobble), ghiaia grossolana e fine (coarse, fine gravel) e sabbia grossolana, media e fine (coarse, medium, fine sand). La classificazione Wentworth, invece, considera un maggior numero di classi granulometriche: al diminuire del diametro, le particelle di sedimento sono classificate in sassi o blocchi (boulder), ciottoli grandi e piccoli (large, small cobble), ghiaia molto grossolana, grossolana, media, fine

(very large, large, medium, small pebble) e molto fine (granule), sabbia molto grossolana, grossolana, media, fine e molto fine (very coarse, coarse, medium, fine, very fine sand), seguite poi dalle classi di limo (silt) e argilla (clay).

Tabella 2.1: Dimensioni delle particelle di sedimento, classificazione ASTM e Wentworth (USACE, 2003).

Table III-1-2 Sediment Particle Sizes				
ASTM (Unified) Classification ¹	U.S. Std. Sieve ²	Size in mm	Phi Size	Wentworth Classification ³
Boulder	12 in. (300 mm)	4096	-12.0	Boulder
		1024	-10.0	
Cobble	3 in. (75 mm)	256	-8.0	Large Cobble
		128	-7.0	
		107.64	-6.75	Small Cobble
		90.51	-6.5	
Coarse Gravel	3/4 in. (19 mm)	76.11	-6.25	Very Large Pebble
		64.00	-6.0	
		53.82	-5.75	Large Pebble
		45.26	-5.5	
		38.05	-5.25	Medium Pebble
		32.00	-5.0	
		26.91	-4.75	Small Pebble
		22.63	-4.5	
Fine Gravel	2.5	19.03	-4.25	Granule
		16.00	-4.0	
		13.45	-3.75	Very Coarse Sand
		11.31	-3.5	
Coarse Sand	4 (4.75 mm)	9.51	-3.25	Coarse Sand
		8.00	-3.0	
		6.73	-2.75	Medium Sand
		5.66	-2.5	
Medium Sand	10 (2.0 mm)	4.76	-2.25	Fine Sand
		4.00	-2.0	
		3.36	-1.75	Very Fine Sand
		2.83	-1.5	
		2.38	-1.25	Coarse Silt
		2.00	-1.0	
		1.68	-0.75	Medium Silt
		1.41	-0.5	
Fine Sand	200 (0.075 mm)	1.19	-0.25	Fine Silt
		1.00	0.0	
		0.84	0.25	Very Fine Silt
		0.71	0.5	
		0.59	0.75	Coarse Clay
		0.50	1.0	
		0.420	1.25	Medium Clay
		0.354	1.5	
		0.297	1.75	Fine Clay
		0.250	2.0	
0.210	2.25			
0.177	2.5			
0.149	2.75			
0.125	3.0			
0.105	3.25			
0.088	3.5			
0.074	3.75			
0.0625	4.0			
0.0526	4.25			
0.0442	4.5			
0.0372	4.75			
0.0312	5.0			
0.0156	6.0			
0.0078	7.0			
0.0039	8.0			
0.00195	9.0			
0.00098	10.0			
0.00049	11.0			
0.00024	12.0			
0.00012	13.0			
0.000061	14.0			

¹ ASTM Standard D 2487-92. This is the ASTM version of the Unified Soil Classification System. Both systems are similar (from ASTM (1994)).

² Note that British Standard, French, and German DIN mesh sizes and classifications are different.

³ Wentworth sizes (in inches) cited in Krumbain and Sloss (1963).

2.3.1.4 Rilevazione ed analisi della linea di riva

Convenzionalmente il limite tra terra ferma e mare è indicato dalla linea di riva, intesa come linea di contatto tra terra e acqua (Dolan et al., 1980), come regione di separazione tra parte emersa e parte sommersa, la cui posizione muta a causa dell'azione del moto ondoso, delle maree e del livello medio del mare.

L'individuazione della linea di riva è una fase fondamentale dello studio dell'evoluzione costiera, più specificatamente dell'analisi del trend evolutivo di un litorale. Tale analisi è necessaria per comprendere i processi costieri (Natesan, 2009) e di conseguenza risulta di fondamentale importanza per la protezione dell'ambiente costiero e la corretta progettazione delle infrastrutture costiere (Trinder & Liu, 2018).

Tuttavia, l'individuazione della linea di riva non è semplice come la sua definizione a causa della dinamica costiera e dell'ampia varietà di indicatori che possono essere basati sull'aspetto geomorfologico, sul livello delle maree o sulla configurazione della vegetazione (Faye, 2010). Gli indicatori chiave del litorale sono molteplici, come riportato in vari studi scientifici (Pajak & Leatherman, 2002; Leatherman, 2003; Ruggiero et al., 2003; Hess, 2003), ma possono essere suddivisi in due categorie: la prima basata su caratteristiche costiere riconoscibili visivamente e la seconda sulla base di un dato di marea. La prima categoria di indicatori è descritta in Boak & Turner (2005): tra quelli più comunemente usati, come si può notare nell'esempio in Figura 2.6, vi sono la linea di vegetazione delle dune lato mare (E), la linea della mareggiata (G), un vecchio livello dell'acqua di alta marea (H), il precedente livello di alta marea (I), la linea "wet/dry" o il livello massimo di run-up (K), il punto di uscita delle acque sotterranee (L), linea dell'acqua istantanea (M) e il punto di massima intensità del frangimento (N).



Figura 2.6: Esempio di caratteristiche dell'indicatore del litorale chiaramente visibili, Duranbah Beach, Nuovo Galles del Sud, Australia (Boak & Turner, 2005).

Per quanto riguarda la seconda categoria di indicatori, la maggior parte dei ricercatori costieri usa il livello medio di alta marea (Mean High Water – MHW), in quanto questo indicatore è visibile sul campo e può essere interpretato da immagini (Leatherman, 2003).

Qualora non vi fosse una significativa variazione del livello dell'acqua, il livello medio del mare (MSL) può essere impiegato in sostituzione al MHW. Nella valutazione della posizione del litorale è importante considerare la pendenza del profilo della costa, in quanto, a parità del livello di marea, la parte di litorale coperto dall'acqua sarà considerevolmente maggiore per un profilo a debole pendenza, rispetto ad un altro a forte pendenza (Oertel, 2005) (Figura 2.7).

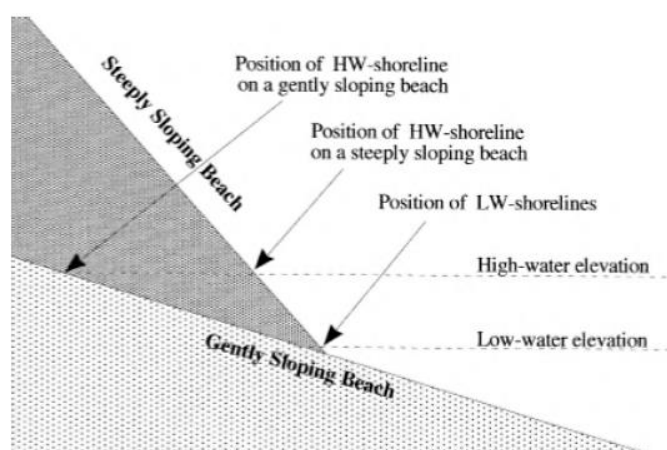


Figura 2.7: Schema della posizione del litorale in caso di costa ripida e dolcemente inclinata (Oertel, 2005).

Una metodologia recente per rilevare la linea di riva si basa sull'applicazione di tecniche di elaborazione delle immagini per estrarre gli indicatori del litorale da immagini digitali e satellitari (Manno, 2012; Toure et al., 2019; Vos et al., 2019; Spinosa et al., 2021). Inoltre, negli ultimi anni è notevolmente aumentato l'uso di tecniche di video-monitoraggio, grazie alla diffusione di telecamere ad alta risoluzione a costi relativamente bassi, ampiamente utilizzate per stimare l'evoluzione del litorale ai fini della valutazione della vulnerabilità costiera (Archetti et al., 2020).

La valutazione del trend evolutivo di un litorale viene generalmente effettuata attraverso il confronto di vari dati cartografici in corrispondenza di specifici transetti (rette ortogonali alla linea di riva), tracciati con spaziatura dipendente dall'obiettivo dello studio.

Tale analisi può essere effettuata efficacemente su QGIS, grazie ai vari strumenti di processing di cui dispone.

Inoltre, i principali risultati dell'analisi delle variazioni della linea di riva vengono forniti in termini di end point rate (EPR) e di net shoreline movement (NSM), che rappresentano rispettivamente la variazione lineare della linea di costa e la relativa velocità in un determinato intervallo temporale (Figura 2.8).



Figura 2.8: Transetti e linee di riva nella pocket beach di Scilla (RC) (Barillà et al., 2020a).

2.3.2 Sistemi dunali

La zona del retrospiaggia può essere caratterizzata dalla presenza di dune costiere, che rappresentano un habitat di importante valore ambientale e paesaggistico, tale da essere state definite “nicchie ecologiche” (Psuty, 2008). Rispetto ai fenomeni di erosione ed inondazione costiera, la presenza delle dune è fondamentale per l'incremento della resilienza dei sistemi costieri (Konings, 1990): esse, infatti, rappresentano un sistema di difesa costiera naturale, in quanto fungono sia da riserva di sabbia, in grado di rifornire le spiagge durante le mareggiate più intense, sia da barriera fisica per la protezione dei territori retrostanti, sia da idrostruttura utile per il contenimento dell'intrusione salina (Figura 2.9).



Figura 2.9: Dune costiere.

Tuttavia, la loro presenza è costantemente minacciata, oltre che dagli effetti prodotti dai cambiamenti climatici (Carter, 1991), anche dai significativi processi di antropizzazione che, a partire dalla seconda metà del secolo scorso, hanno riguardato le aree costiere, distruggendo totalmente o parzialmente numerosi sistemi dunali, alterando le condizioni di equilibrio costiero ed inducendo l'erosione di spiagge e dune (Cabrera-Vega et al., 2013; Pinna et al., 2015; Cozzolino et al., 2017): le analisi dell'evoluzione di tali sistemi mediante telerilevamento, infatti, hanno mostrato come spesso al posto di preesistenti sistemi dunali oggi si trovino aree turistico-ricettive, stabilimenti balneari, sviluppatasi in seguito alla pulizia meccanica delle spiagge, infrastrutture viarie e veri e propri centri urbani (Corbau et al., 2015; Foti et al., 2021a).

Le dune costiere sono sistemi dinamici che variano spazialmente e temporalmente sotto l'azione di fattori sia naturali che antropici (Sancho et al., 2011). Esse, infatti, rappresentano il limite superiore della spiaggia emersa e sono costituite da bassi rilievi di materiale granulare sciolto, generalmente sabbia, che si sviluppano in seguito all'accumulo eolico di sedimenti nelle aree litorali: i sistemi dunali sono generalmente lineari, paralleli alla linea di riva e possono essere sia privi sia coperti di vegetazione.

La loro evoluzione e modellazione avviene in stretta interazione con la spiaggia antistante ed è condizionata dalla presenza di barriere naturali o artificiali che possono intercettare i sedimenti in sospensione (Nordstrom et al., 1990), pertanto le loro caratteristiche morfologiche sono funzio-

ne dell'interazione tra moto ondoso, vento, sedimento e organismi vegetali (Buffa et al., 2012). Il sistema spiaggia-duna è caratterizzato da forti gradienti ambientali, in quanto dalla linea di riva verso l'interno si osservano notevoli e rapidi cambiamenti dei fattori abiotici: in particolare, l'aerosol marino e gli effetti del vento e della salsedine diminuiscono progressivamente d'intensità andando dal mare verso l'entroterra, mentre la quantità di materia organica, di umidità e di nutrienti nel suolo hanno un andamento opposto (Acosta & Ercole, 2015).

Questo fa sì che la presenza della vegetazione sulla spiaggia aumenti all'aumentare della distanza dalla linea di riva (Figura 2.10), con diverse caratteristiche floristiche, fisionomiche, strutturali ed ecologiche, tanto da definire una zonazione della vegetazione costiera (Acosta et al., 2007).

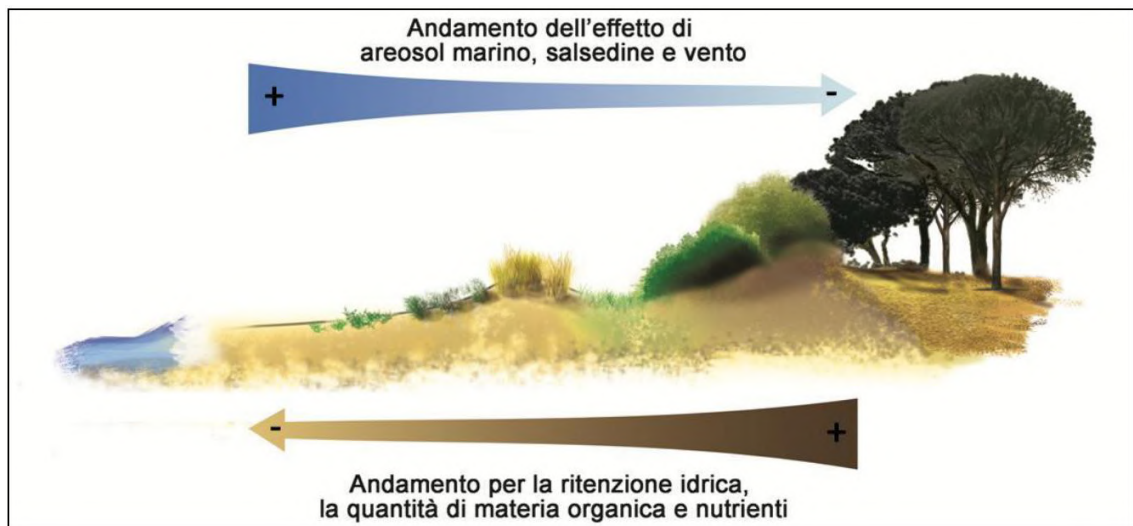


Figura 2.10: Rappresentazione grafica del gradiente mare-terra dei principali fattori ambientali delle dune costiere mediterranee (Acosta & Ercole, 2015).

Oltre all'azione dei parametri abiotici, infatti, la vegetazione psammofila, ovvero quella che cresce sulla sabbia, ha un ruolo fondamentale per l'edificazione, la stabilizzazione e l'evoluzione geomorfologica dei sistemi dunali costieri. Essa, infatti, è un importante fattore di controllo della morfologia delle dune, poiché impedisce il movimento della sabbia (Wolfe & Nickling, 1993). In particolare, in funzione della tipologia di vegetazione presente, è possibile osservare nell'analisi del profilo di un sistema spiaggia-duna la sua evoluzione (Figura 2.11): la battigia, essendo continuamente bagnata dalle onde, non presenta alcun tipo di vegetazione, a causa dell'elevata salinità e delle frequenti sommersioni (zona afitoica); nella spiaggia emersa, invece, la sabbia è asciutta e

può essere trasportata dal vento verso l'entroterra, dando luogo ad una prima vegetazione pioniera, composta esclusivamente da terofite, piante erbacee a ciclo annuale (prevalentemente *Cakile maritima*). Subito dopo, l'azione di barriera naturale contro il vento esercitata dalle graminacee, come *Elymus farctus*, permette il depositarsi dei granelli di sabbia in corrispondenza della parte basale della pianta, generando così le prime dune embrionali; la vegetazione delle dune embrionali consente ai semi di altre piante di germinare, in particolare all'*Ammophila arenaria*, che con i suoi apparati radicali stabilizza le dune, sviluppando così dei cordoni dunali mobili (duna non consolidata). La Figura 2.12 mostra le diverse specie vegetali caratterizzanti i sistemi dunali.

La presenza dei cordoni dunali contribuisce a smorzare la forza del vento, costituendo una vera e propria barriera naturale contro i venti e la salsedine provenienti dal mare e favorendo così le condizioni per lo sviluppo delle dune stabili; alle dune mobili segue, infatti, una fascia di depressione interdunale, caratterizzata dalla presenza di sedimenti più fini e da vegetazione ca-mefitica e suffruticosa (cioè lignificata alla base). Successivamente si trova il sistema delle dune stabili o dune fisse, dove la vegetazione comprende prevalentemente specie perenni, a carattere arbustivo e arboreo; nelle coste mediterranee, le dune stabili sono caratterizzate da dimensioni in altezza dell'ordine di decine di metri, in larghezza del centinaio di metri e possono svilupparsi longitudinalmente anche per chilometri, laddove sussistano le condizioni sedimentologiche, geomorfologiche e di alimentazione da parte della spiaggia antistante. L'ultima parte del sistema dunale è caratterizzata dalla presenza delle pinete costiere, che rappresentano il settore dunale più interno e stabile.

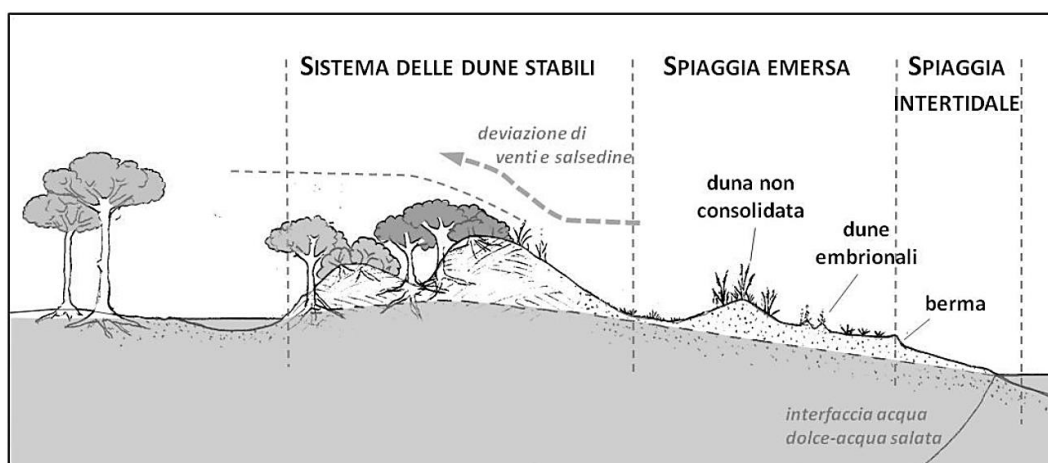


Figura 2.11: Profilo del sistema spiaggia-duna (Acosta & Ercole, 2015).



Figura 2.12: Diverse specie vegetali caratterizzanti i sistemi dunali. Da sinistra verso destra: *Cakile maritima*, *Elymus farctus*, *Ammophila arenaria*.

L'analisi dei cambiamenti morfologici delle dune costiere e del sistema spiaggia-duna è stata effettuata anche mediante esperimenti di laboratorio e l'applicazione di modelli analitici e numerici (Tomasicchio et al., 2011; D'Alessandro et al., 2012; D'Alessandro & Tomasicchio, 2016).

Pertanto, dato l'elevato valore ecologico ed ambientale dei sistemi dunali, il loro monitoraggio, anche mediante telerilevamento, a diverse scale temporali, rappresenta una fase fondamentale per lo studio e la valutazione della vulnerabilità costiera (Saye et al., 2005; Lerma et al., 2019; Pagà et al., 2019). Inoltre, recentemente, per una gestione integrata delle coste e con l'obiettivo di una rinaturalizzazione delle zone litoranee, l'ingegneria naturalistica ha proposto tecniche che mirano alla riformazione di tali strutture, come misure di difesa ecologica dall'erosione costiera (Lo et al., 2017; D'Alessandro et al., 2020; Leone et al., 2021).

2.3.3 Vegetazione

Come descritto già nel precedente paragrafo, la presenza della vegetazione sulla spiaggia spesso caratterizza i sistemi dunali e fornisce un rilevante contributo alla resilienza e resistenza del profilo della spiaggia (Mendoza, 2017), in quanto permette di dissipare l'energia del moto ondoso e, di conseguenza, di ridurre l'erosione in caso di eventi estremi (Gedan et al., 2011; Feagin et al., 2019).

Come componente integrale degli ecosistemi dunali, la vegetazione, infatti, non solo permette di accumulare i sedimenti trasportati dal vento, ma grazie alle sue radici fornisce rinforzo e stabilità strutturale alle dune, aggiungendo contenuto organico dalle radici morte ed aumentandone la densità (Gyssels et al., 2005). La rete creata dalle radici fibrose della vegetazione permette di aumentare la resistenza tangenziale del composto suolo-radice e di conseguenza riduce il movimento traslazionale delle forze erosive (Preston & Crozier, 1999; Osman et al., 2011; Sigren et al.,

2014). Inoltre, gli studi condotti su modelli fisici di dune costiere hanno mostrato che la vegetazione dunale riduce il volume di erosione delle dune indipendentemente dall'intensità delle onde, dal profilo morfologico spiaggia-duna o dalla modalità di erosione (Silva et al., 2016), mentre la resistenza delle dune all'erosione è funzione del tipo di vegetazione (Ajedegba et al., 2019). La presenza della vegetazione, dunque, rappresenta un importante sistema di mitigazione ecologica del fenomeno di erosione costiera (Feagin et al., 2015; Gracia et al., 2018).

Il contributo positivo fornito dalla vegetazione nei processi di erosione costiera non riguarda soltanto i sistemi dunali e le spiagge emerse, ma interessa anche i fondali marini. Infatti, un mezzo molto efficace e del tutto naturale per la difesa del litorale è costituito dalla tutela delle praterie di *Posidonia oceanica* (Boccalaro & Cantasano, 2012): essa è una pianta marina endemica del Mar Mediterraneo, presente in molte aree costiere italiane, e può formare vere e proprie praterie fino ai 40 m di profondità in acque limpide (Pergent et al., 1995); la *Posidonia* colonizza spiagge sabbiose e substrati rocciosi, mentre è generalmente assente in aree di elevata torbidità a causa della conseguente riduzione della penetrazione della luce, come ad esempio le foci dei fiumi per effetto della deposizione di sedimenti fini (Pasqualini et al., 1998; Di Carlo et al., 2005; De Falco et al., 2006). Diversi studi hanno mostrato che la presenza della *Posidonia* sui fondali marini determina una diminuzione della quantità di sedimenti sospesi per l'azione del moto ondoso e un conseguente aumento della ritenzione di sedimenti, riducendo quindi l'erosione della zona costiera (Gacia & Duarte, 2001): grazie all'azione frenante delle foglie, infatti, essa riduce l'impatto delle onde sul fondale ed inoltre la compenetrazione delle sue radici e dei rizomi con il fondo sabbioso impedisce il trasporto solido (Boudouresque & Jeudy de Grissac, 1983; De Falco et al., 2003).

È stato, infatti, stimato che la regressione di un solo metro di prateria può provocare la perdita di 15 - 18 metri di litorale sabbioso (Mazzella et al., 1986). Alcuni esperimenti di laboratorio hanno dimostrato anche che in acque basse la presenza di una prateria di *Posidonia* determina un significativo smorzamento delle onde, soprattutto nel caso di piante aventi lunghezza comparabile con la profondità (Cavallaro et al., 2011). Inoltre, la riduzione dell'idrodinamica in prossimità del fondo generata dalla *Posidonia* ha anche importanti implicazioni ecologiche, in quanto favorisce la presenza di varie specie animali e vegetali. Pertanto, la *Posidonia oceanica* può essere considerata, come la vegetazione presente sulla spiaggia, un fattore incrementale della resilienza di un sistema costiero contro i processi erosivi e va quindi preservata (Boudouresque et al., 2012; Vacchi et al., 2017).



Figura 2.13: A sinistra: prateria di *Posidonia oceanica* (Fonte: Bacci et al., 2014). A destra: banquettes di *Posidonia oceanica* (Fonte: www.isprambiente.gov.it).

Nelle aree a vocazione turistico-balneare generalmente la *Posidonia* è poco gradita dai bagnanti, in quanto le foglie che naturalmente cadono dalla pianta possono arrivare sulle spiagge in seguito alle mareggiate e formare accumuli anche imponenti, fino ad alcuni metri di altezza, chiamati “banquettes” (De Falco et al., 2008; Simeone et al., 2008): tale fenomeno dello spiaggiamento delle foglie di *Posidonia oceanica* (Figura 2.13) è stato spesso gestito in Italia mediante la rimozione meccanica ed il trasferimento in discarica dei depositi fogliari presenti sulla linea di costa, prima e durante la stagione balneare.

Tuttavia, questa pratica comporta anche la rimozione di grandi quantità di sabbia che rimane intrappolata nelle banquettes, determinando quindi un deficit nel bilancio sedimentario del sistema costiero ed esponendo pertanto il litorale al rischio di erosione (Cantasano, 2009). È per questo motivo che negli ultimi anni è stata condotta una campagna di sensibilizzazione da parte del Ministero dell'ambiente e dell'ISPRA, per favorire il cambiamento di opinione riguardo la presenza delle banquettes e la rivalutazione del concetto di spiaggia naturale ed ecologica (Borriello et al., 2010; Scarpato et al., 2020).

2.3.4 Fenomeni di subsidenza

Uno studio pubblicato di recente (Nicholls et al., 2021) ha evidenziato come circa il 58% della popolazione costiera a livello mondiale vive in aree soggette a subsidenza. In tali aree il livello del mare sarà fino a quattro volte maggiore rispetto a quanto stimato dall'IPCC: tale studio, infatti, prevede un aumento del livello marino relativo di 7.8 – 9.9 mm/anno per i prossimi 20 anni, molto maggiore rispetto alla media globale, che l'IPCC fissa a 2.6 mm/anno.

Negli studi costieri, quindi, questo permette di evidenziare quanto sia importante considerare, oltre all'innalzamento del livello del mare, anche un altro fattore: la subsidenza. La subsidenza è un lento abbassamento della crosta terrestre che si verifica in determinate zone ed è originata da fenomeni naturali ma può essere indotta anche a seguito di attività antropiche. La subsidenza naturale, di origine geologica, è regolata da diverse forzanti che generalmente agiscono a diverse profondità (Tosi et al., 2009), quali la componente tettonica, la deformazione del substrato profondo a causa del carico dei sedimenti sovrastanti, che a loro volta si compattano, e la consolidazione dei terreni superficiali di recente deposizione, specialmente nei sistemi costieri. La subsidenza naturale è quindi caratterizzata da movimenti lenti, generalmente inferiori a 3-5 mm/anno, che tuttavia in alcune aree di sedimentazione attiva, come ad esempio i delta e gli estuari, possono superare anche i 10 mm/anno.

Nelle zone costiere, all'abbassamento del suolo rispetto al livello medio del mare contribuisce anche l'innalzamento del livello marino, ossia l'aumento del volume dell'acqua dei mari a causa del fenomeno delle deglaciazioni o disgeli, processo che prende il nome di eustatismo o Sea Level Rise (SLR).

L'accoppiamento dei fenomeni di subsidenza ed aumento del livello del mare determina quindi l'innalzamento del livello marino relativo, noto come Relative Sea Level Rise (RSLR), che minaccia le aree costiere. Infatti, a causa dell'accentuarsi dell'innalzamento del livello medio del mare, diverse coste del mondo, interessate da subsidenza, sono a rischio non solo per l'inondazione, ma anche per l'intrusione di acqua salata negli acquiferi, che provocherebbe la contaminazione dei suoli, anche a distanza di decine di chilometri dalla costa. Di conseguenza, la subsidenza può avere rilevanti impatti sul patrimonio edilizio ed infrastrutturale, soprattutto nelle aree pianeggianti ad alta densità abitativa, oltre che nelle aree costiere (Simonini et al., 2017).

La subsidenza di origine antropica, invece, può essere indotta dall'estrazione di idrocarburi, dallo sfruttamento geotermico e degli acquiferi, dalle bonifiche idrauliche, dalla realizzazione di miniere e gallerie e dall'urbanizzazione. Ad esempio, nei paesi in via di sviluppo, l'intensivo sfruttamento degli acquiferi, a causa dell'inutilizzabilità delle acque superficiali inquinate, ha provocato un'elevata subsidenza, anche maggiore di 25 cm/anno, in diverse città costiere del mondo, definite appunto "sinking cities" (Deltares, 2015), tra cui Iran, Messico e Indonesia.

La Figura 2.14 mostra il lungomare del distretto di Pluit a Jakarta in Indonesia, situato alcuni metri sotto il livello del mare e protetto da esso per mezzo di un muro di cemento che deve essere rialzato dopo un certo periodo di tempo per contrastare una subsidenza di 10-20 cm/anno dovuta al sovrasfruttamento della falda acquifera.



Figura 2.14: Effetti della subsidenza a Jakarta (foto di Pietro Teatini scattata il 20 settembre 2019).

Per quanto riguarda i metodi di misura della subsidenza, negli ultimi decenni le classiche misure effettuate con le livellazioni geometriche sono state affiancate da quelle satellitari, GPS e dall'analisi interferometrica di immagini acquisite da piattaforme satellitari equipaggiate con sensori SAR (Synthetic Aperture Radar).

In particolare, i recenti progressi ottenuti con quest'ultima tecnica e il lancio di satelliti con caratteristiche e sensori SAR sempre più sviluppati hanno permesso di ottenere misure di subsidenza con precisione verticale millimetrica e risoluzione spaziale metrica, basate sull'analisi interferometrica di grandi set di dati (Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002; Hooper et al., 2012). Infatti, l'utilizzo dei prodotti InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) è notevolmente aumentato negli ultimi anni soprattutto per lo sviluppo di tecniche multi-interferogramma e la disponibilità di strumenti di analisi SAR gratuiti, e di conseguenza il numero di applicazioni mondiali di misurazioni satellitari per la mappatura e il monitoraggio dei rischi geografici è aumentato in modo significativo (Solari et al., 2018).

In Figura 2.15 è rappresentata un esempio di serie temporale di deformazione: per ogni punto di misura è possibile visualizzare la serie temporale di deformazione dall'inizio del periodo monitorato fino alla data dell'ultima acquisizione satellitare disponibile.

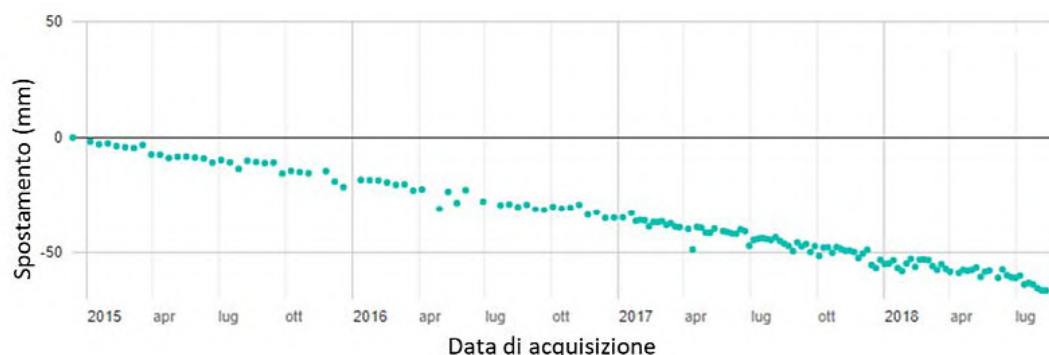


Figura 2.15: Esempio di serie temporale di deformazione (Fonte: Linee guida per l'utilizzo dei dati interferometrici del geoportale Regione Toscana – Manuale d'uso, www.regione.toscana.it).

In diversi territori italiani, purtroppo, il fenomeno della subsidenza è presente, con velocità che possono variare da alcuni mm/anno fino a diversi cm/anno, ed è originato da diverse cause, rendendo più vulnerabili soprattutto le aree costiere (Figura 2.16).

Ad esempio, nel territorio costiero dell'alto Adriatico, in particolare la laguna di Venezia e il delta del Po, la subsidenza è indotta dall'emungimento di acqua dalle falde profonde nel vicino entroterra, oltre che da processi naturali (Tosi et al., 2002; Tosi et al., 2009; Teatini et al., 2011; Tosi et al., 2013); anche in Friuli Venezia Giulia, le attività antropiche, quali sfruttamento delle acque sotterranee, bonifiche idrauliche e sviluppo di aree di nuova costruzione, si sovrappongono a meccanismi naturali per la computazione dei tassi di subsidenza (Da Lio & Tosi, 2018); nel territorio costiero dell'Emilia Romagna, invece, il fenomeno è indotto sia dall'estrazione di gas dai giacimenti profondi, sia dallo sfruttamento di falde superficiali e profonde a causa dell'aumento del fabbisogno idrico per scopi agricoli, industriali e turistici (Teatini et al., 2005; Teatini et al., 2006; Bitelli et al., 2015; Carisi et al., 2016).

Anche nel centro e sud Italia il fenomeno della subsidenza è presente ma riguarda aree più limitate: in Campania, ad esempio, riguarda la piana di Sarno a causa dello sfruttamento delle falde acquifere (Cascini et al., 2006); anche sul versante tirrenico della Calabria, nella piana di Gioia Tauro, il fenomeno è indotto dalla stessa causa (Raspini et al., 2012), mentre nella piana di Sibari è determinato principalmente da fattori naturali, oltre che antropogenici (Cianflone et al., 2015); in Sicilia Sud-Orientale, la subsidenza riguarda la piana di Augusta, ed è indotta da estrazione di acqua dal sottosuolo (Canova et al., 2012).

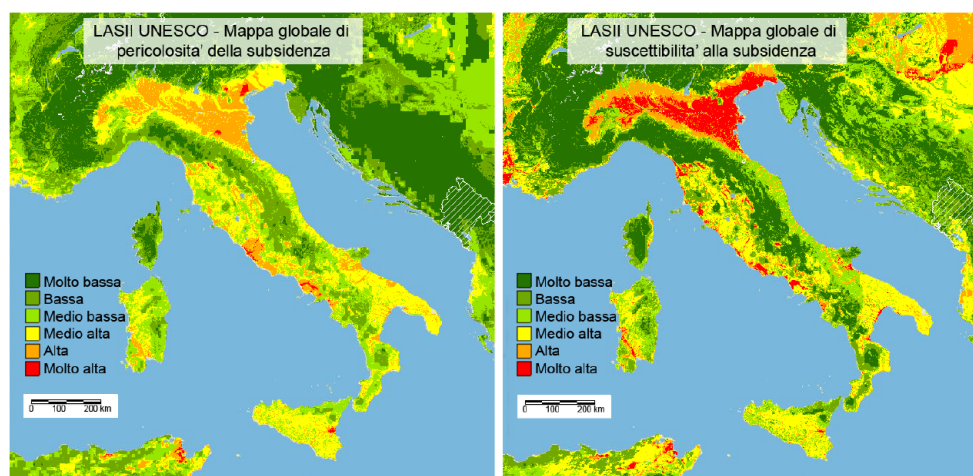


Figura 2.16: Mappa globale di pericolosità (a sinistra) e della suscettibilità (a destra) alla subsidenza focalizzata sulla penisola italiana (da Herrera-García et al., 2021).

Uno studio condotto dall'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) a partire dai dati raccolti dalla letteratura scientifica ha permesso di stimare che il fenomeno della subsidenza coinvolge circa il 13% dei comuni italiani, prevalentemente situati nelle regioni del Nord, in particolare nella Pianura Padana, mentre nell'Italia centrale e meridionale il fenomeno interessa prevalentemente le pianure costiere (Figura 2.17).

Il risultato di quest'elaborazione è relativo al 2017 ed è rappresentato da un indicatore che riporta i comuni italiani interessati da subsidenza, soffermandosi soltanto sulla sua presenza o assenza, e mira a fornire un quadro a scala nazionale del fenomeno e del suo impatto sul territorio, impatto che nel tempo è diventato sempre più allarmante a causa delle sue origini antropiche: infatti, mentre la subsidenza di origine naturale è stimata pari a qualche millimetro l'anno e pertanto le sue conseguenze sono relativamente ridotte, manifestandosi perlopiù in tempi molto lunghi, la subsidenza indotta e/o accelerata da cause antropiche (estrazione di fluidi dal sottosuolo o bonifiche) raggiunge valori da dieci a oltre cento volte maggiori e i suoi effetti si manifestano in tempi brevi determinando, in alcuni casi, la compromissione delle opere e delle attività umane interessate.

Per quanto riguarda la Calabria, secondo tale studio, sono 38 i comuni calabresi interessati da subsidenza, per una percentuale di 9.3% (Figura 2.18).



Figura 2.17: Comuni interessati da subsidenza. Fonte: Elaborazione ISPRA da dati raccolti dalla letteratura scientifica, ISPRA/ARPA/APPA, Regioni.

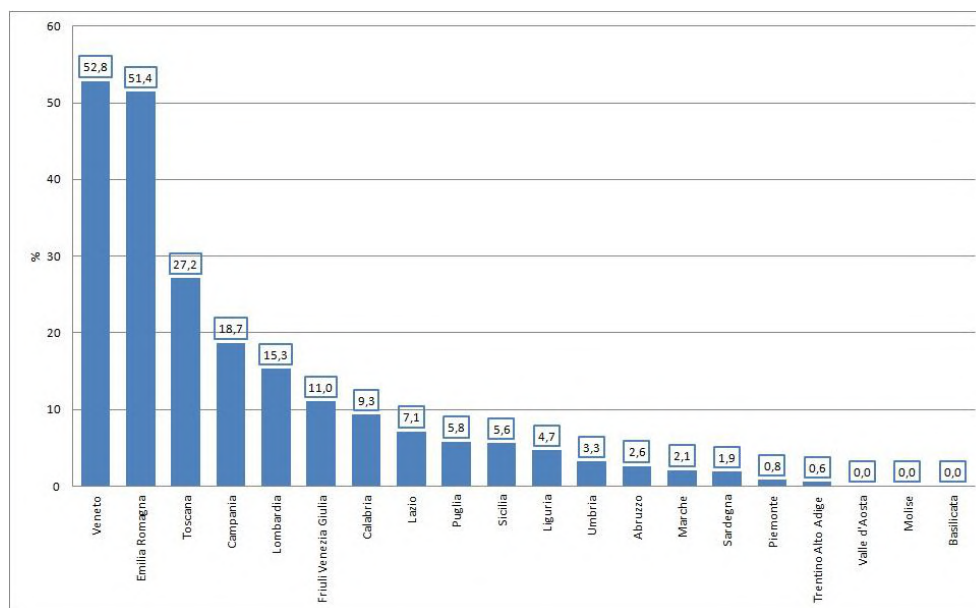


Figura 2.18: Comuni interessati da subsidenza (% sul totale regionale). Fonte: Elaborazione ISPRA da dati raccolti dalla letteratura scientifica, ISPRA/ARPA/APPA e dalle Regioni.

2.3.5 Cambiamenti climatici ed innalzamento del livello medio del mare

È inevitabile non notare come gli effetti dei cambiamenti climatici a causa del riscaldamento globale siano sempre più frequenti e disastrosi. Negli ultimi anni, infatti, la temperatura media del pianeta ha subito un incremento notevole, mai verificatosi in epoche recenti, tanto che annualmente si osservano regolarmente nuovi picchi di temperatura.

Per analizzare questa problematica e contrastarne gli effetti, alla fine del secolo scorso sono stati istituiti a livello internazionale diversi organismi, al fine di monitorare lo stato dei cambiamenti in corso e valutarne le possibili cause, fra le quali sempre più determinante risulta l'incidenza antropica. Il più accreditato fra di essi è l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Changes), un organo scientifico consultivo delle Nazioni Unite istituito nel 1988 per valutare, per mezzo di un comitato costituito da migliaia di scienziati provenienti da centinaia di paesi, la situazione attuale del clima, le prospettive future ed i problemi connessi alle eventuali conseguenze sul pianeta, prospettando opzioni e strategie per la sua mitigazione.

Nel suo sesto ed ultimo rapporto sul clima (2021) l'IPCC ha sancito che la temperatura media globale del pianeta nel decennio 2011-2020 è stata di 1.09°C superiore a quella del periodo 1850-1900, un picco rappresentante il risultato di altri preoccupanti records, come quello che riguarda le

concentrazioni atmosferiche di CO_2 , il principale gas serra, che nel 2019 sono state le più alte degli ultimi 2 milioni di anni. Le conseguenze dei cambiamenti climatici in atto sono molto impattanti per le zone costiere, in quanto consistono principalmente nell'innalzamento del livello medio del mare ed in un aumento della frequenza e dell'intensità di eventi estremi, tali da provocare severi fenomeni di erosione ed inondazione (Barbaro et al., 2021a; Barillà et al., 2021), determinando una maggiore vulnerabilità delle coste.

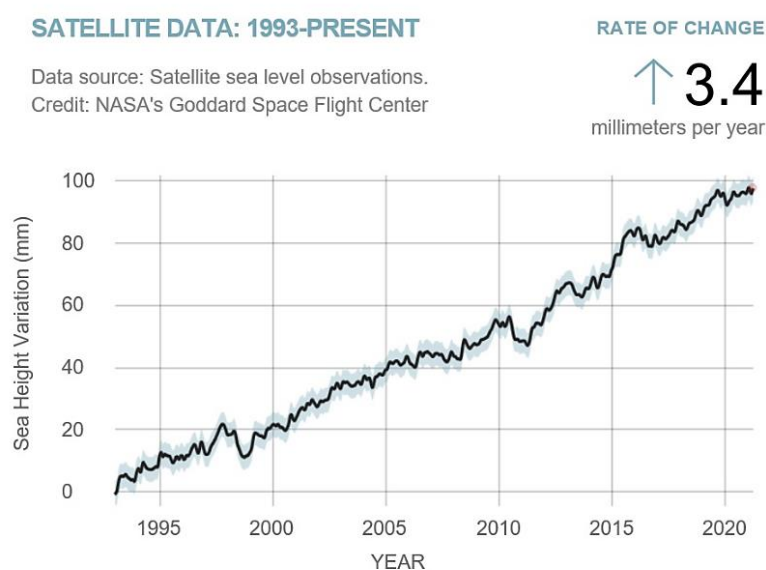


Figura 2.19: Osservazioni satellitari dell'innalzamento del livello del mare dal 1993 al 2021 (Fonte: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>).

Per quanto riguarda l'innalzamento del livello medio del mare, diversi studi sono stati condotti per stimare il trend di crescita a partire da dati strumentali (Breaker & Ruzmaikin, 2013; Tomasicchio et al., 2018) o satellitari (Nerem et al., 2018). Come mostrato in Figura 2.19, l'analisi di dati satellitari dal 1993 al 2021 ha permesso di stimare un trend di crescita del livello del mare pari a 3.4 mm/anno.

Secondo l'ultimo rapporto IPCC, il livello medio del mare globale è aumentato di 20 cm tra il 1901 e il 2018 e il tasso medio di innalzamento è stato di 1.3 mm/anno tra il 1901 e il 1971, mentre recentemente tra il 2006 e il 2018 ha raggiunto i 3.7 mm/anno. Questo aumento è senza precedenti nel corso dell'ultimo secolo e sta accelerando a causa dello scioglimento dei ghiacciai della Groenlandia e della calotta polare dell'Antartide, e dell'espansione termica dell'oceano cau-

sata dal suo riscaldamento. Di conseguenza le proiezioni future sono ancora più drammatiche: il livello medio globale del mare continuerà ad aumentare nel corso del XXI secolo e, rispetto al 1995-2014, l'aumento sarà probabilmente di 0.28-0.55 m entro il 2100 nello scenario di emissioni di GHG molto basse (SSP1-1.9) e 0.63-1.01 m nello scenario di emissioni molto elevato (SSP5-8.5). Entro il 2150 l'aumento stimato risulta di 0.37-0.86 m nello scenario molto basso (SSP1-1.9) e di 0.98-1.88 m nello scenario molto elevato (SSP5-8.5). Tuttavia, un innalzamento intorno a 2 m entro il 2100 e 5 m entro il 2150 in uno scenario di emissioni di gas serra molto alto (SSP5-8.5) non può essere escluso.

Recentemente la Nasa ha reso disponibile sul sito <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool> uno strumento di consultazione del livello del mare a scala globale per l'individuazione delle zone costiere a rischio fino al 2150 (Figura 2.20): si tratta di una mappa del livello dei mari, basata sulle proiezioni contenute nell'ultimo rapporto dell'IPCC, sui dati raccolti dai satelliti e da strumenti a Terra, oltre ad analisi e simulazioni numeriche.

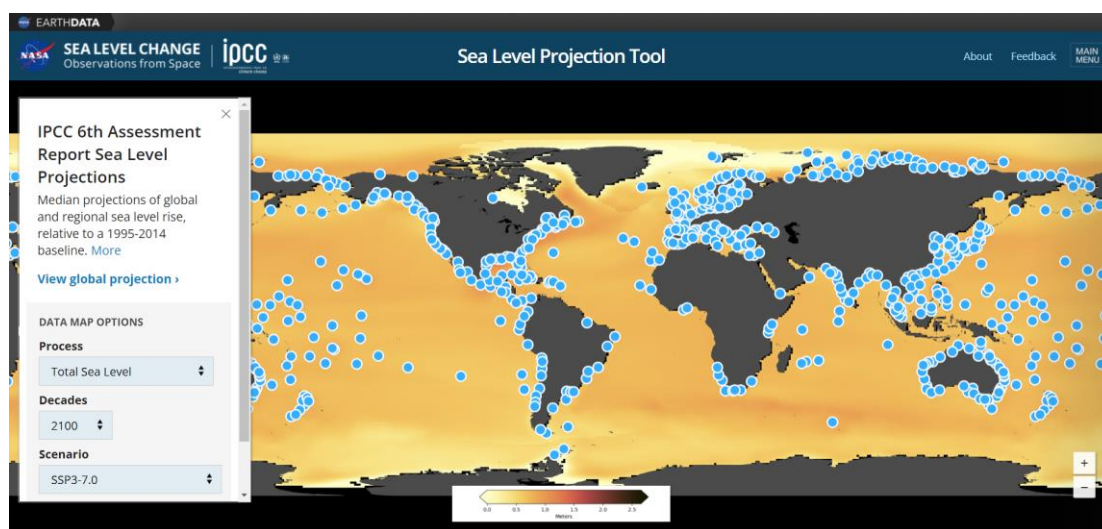


Figura 2.20: Strumento di consultazione del livello del mare sviluppato dalla Nasa sulla base delle proiezioni dell'ultimo IPCC (Fonte: <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>).

2.3.6 Marea

L'innalzamento o l'abbassamento del livello del mare per effetto delle maree determina rispettivamente l'aumento o la diminuzione dell'esposizione delle coste al moto ondoso e tale variazione ha un effetto ancor più rilevante per le spiagge a debole pendenza.

Con il termine marea si indica infatti la variazione più o meno periodica del livello del mare, accompagnata da spostamenti orizzontali della massa marina (correnti di marea), principalmente originata in parte per effetto dell'attrazione gravitazionale esercitata dalla Luna e dal Sole, e pertanto denominata "astronomica", ed in parte per effetto delle variazioni bariche e dell'azione tangenziale del vento, e quindi detta "metereologica".

La marea astronomica è causata principalmente dalle forze gravitazionali esercitate dalla Luna (70%), maggiori di quelle esercitate dal Sole (30%), in quanto più vicina alla Terra: le variazioni del livello del mare per effetto di questa componente mareale si sviluppano nell'arco di 12-24 ore e nel Mediterraneo hanno un'ampiezza di circa 10-30 cm, ad eccezione di Venezia, dove si registrano circa 60 cm. A causa, infatti, dell'inerzia della massa liquida, della forma sferoidale della Terra e della conformazione frastagliata delle coste e dei fondali, sulla Terra è possibile osservare escursioni di marea diverse a seconda della località presa in considerazione. Inoltre, il ciclo delle maree determinato dall'attrazione della Luna si ripete approssimativamente due volte al giorno, ovvero fra due successive alte e basse maree intercorrono 12 ore e 25 minuti, mentre l'intervallo di tempo fra un'alta e una bassa marea è poco più di 6 ore. Per la determinazione della marea astronomica in una località, si può ricorrere al metodo dell'analisi armonica, secondo cui la marea può essere calcolata come sovrapposizione di oscillazioni sinusoidali (componenti), ciascuna caratterizzata da una propria ampiezza e fase.

La marea metereologica, invece, rappresenta la componente mareale che altera la regolarità della marea astronomica: la sua scala temporale è funzione della durata della perturbazione, mentre l'ampiezza dipende dalla forzante; in particolare, è noto che un abbassamento barico di 1 mbar rispetto al valore normale della pressione atmosferica (1013 mbar) produce un innalzamento di circa 1 cm del livello marino e viceversa (effetto barico inverso). Inoltre, l'azione tangenziale del vento tende a spingere la massa d'acqua verso la costa, accelerandola (sovrizzo di vento). Il sovrizzo di vento (o wind set-up) è funzione, oltre che delle caratteristiche della perturbazione meteorica (velocità di traslazione del vento, dimensioni, durata, percorso sopra la massa marina, forma delle isobare), anche della forma e delle dimensioni del bacino marino, dell'estensione della piattaforma continentale e della configurazione e scabrezza dei fondali. Tale aliquota di marea metereologica può essere valutata statisticamente, a partire da osservazioni dirette effettuate in un sufficiente periodo di tempo, oppure in base a modelli di calcolo. Il contributo fornito dalla marea metereologica è paragonabile a quello della componente astronomica, tuttavia, in alcuni casi il

solo contributo dovuto al vento può superare anche il metro e provocare da solo fenomeni di inondazione, come, ad esempio, a Venezia: il Mare Adriatico, infatti, essendo un bacino lungo e stretto, chiuso nel lato superiore, è spesso sede di fenomeni di “acqua alta”, in quanto un forte vento proveniente da sud-est produce un accumulo d'acqua verso l'estremità chiusa; tale fenomeno viene favorito dalla lunga zona d'azione disponibile per il vento ("fetch") ed è ulteriormente amplificato a causa dei bassi fondali della parte settentrionale dell'Adriatico. La somma del sovralzato barico, di quello dovuto al vento, della marea astronomica e del moto ondoso è chiamata sovralzato di tempesta (“storm surge”) e rappresenta quindi il valore massimo che il livello del mare può raggiungere in concomitanza di eventi meteorologici particolarmente severi.

Per il monitoraggio del livello idrometrico in Italia esiste una rete di mareografi (RMN – Rete Mareografica Nazionale) gestita dall'ISPRA, composta da più di trenta stazioni collocate nei porti lungo tutto il perimetro della penisola e delle sue isole (<http://www.mareografico.it/>). In funzione dell'escursione di marea, è possibile definire un regime di marea utilizzato per una classificazione geografica degli ambienti costieri: gli effetti della marea, infatti, concorrono a modificare significativamente il comportamento morfodinamico di una spiaggia in modo diretto, in quanto fanno variare la posizione e l'incidenza dell'area di frangenza e generano correnti tidali nella zona sottocosta, ed in modo indiretto, in quanto causano la fluttuazione del livello di falda. In particolare, Davies (1964) ha introdotto una suddivisione del regime mareale in tre classi: microtidale se l'escursione è inferiore a 2 metri, mesotidale se è compresa tra 2 e 4 metri e macrotidale se è superiore a 4 metri.

Successivamente, una suddivisione in cinque classi è stata introdotta da Hayes (1979), come descritto nella seguente tabella (Tabella 2.2):

Tabella 2.2: Classificazione del regime di marea (Hayes, 1979).

Escursione di marea [m]	Regime di marea
< 1	Microtidale
1 ÷ 2	Mesotidale basso
2 ÷ 3.5	Mesotidale alto
3.5 ÷ 5	Macrotidale basso
> 5	Macrotidale alto

A seconda del regime di marea, si possono quindi distinguere le coste microtidali che per definizione sono a dominio del moto ondoso e caratterizzate dalle spiagge e dalle isola-barriera. Al contrario, gli ambienti costieri tipici del dominio mareale sono quelli a regime macrotidale, la cui morfologia tipica è la piana di marea (Figura 2.21); in questo tipo di spiagge, l'estensione massima dell'area intertidale si registra nelle spiagge a bassa pendenza e può superare anche i 500 metri.



Figura 2.21: Piana di marea.

La variazione della morfologia costiera in relazione all'escursione di marea è legata alla traslazione delle zone idrodinamiche, per cui in occasione dell'alta marea si registrano onde di maggiore intensità, mentre in bassa marea l'onda viene dissipata su uno spazio maggiore, riducendone l'impatto sul profilo di spiaggia più sottocosta (Figura 2.22).

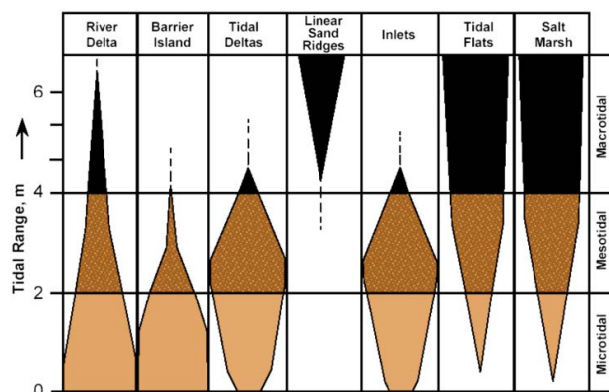


Figura 2.22: Classificazione della morfologia costiera basata su osservazioni qualitative e funzione dei differenti regimi di marea (Hayes, 1975).

Un modello più dettagliato per la determinazione degli effetti di marea sulla morfologia costiera è stato sviluppato da Masselink e Short (1993): in tale studio, la classificazione del regime mareale e di conseguenza della morfologia costiera è basata sulla definizione di un parametro funzione dell'escursione di marea media e dell'altezza modale dell'onda al frangimento, denominato "escursione di marea relativa" (RTR – Relative Tide Range); al variare di RTR il modello sviluppato permette di calcolare l'ammontare degli effetti di shoaling, frangimento e swash e quindi determinare la tipologia costiera caratteristica.

2.3.7 Correnti

Le correnti marine dipendono da molteplici cause, ed in base alla fenomenologia che le origina si possono distinguere in:

- correnti generate dal vento;
- correnti di densità;
- correnti di marea;
- correnti da moto ondoso.

Le prime tre vengono dette "correnti costiere" e si sviluppano a largo, fuori dalla zona dei frangenti, parallelamente alla costa; le ultime sono denominate "correnti litoranee" e si sviluppano nella surf zone, essendo generate dal moto ondoso (Shepard & Inman, 1950).

Per quanto riguarda le correnti generate dal vento, il meccanismo nasce dall'interazione tra le masse d'aria e le masse d'acqua: l'energia dell'aria in moto viene trasmessa alla superficie dell'acqua sotto forma di tensioni tangenziali e successivamente da questa agli strati sottostanti per effetto di mescolamento turbolento.

Il secondo tipo di correnti è generato da un fenomeno legato alle condizioni fisiche dell'acqua, ovvero alla distribuzione della densità relativa, determinata dalle condizioni di temperatura e salinità: l'acqua defluisce dall'area di bassa a quella di alta densità.

Il terzo tipo di correnti è legato alla ciclicità delle maree: le correnti di marea, infatti, si originano per effetto dell'attrazione gravitazionale della luna e del sole, in zone dove, per via della conformazione geografica, sono presenti dei canali, ad esempio tra due isole o tra un'isola ed il continente. Le maree determinano agli estremi del canale un dislivello tra due masse d'acqua, per

cui essa comincia a scorrere da un estremo all'altro e, per effetto Venturi, accelera dando origine ad una corrente che inverte il proprio verso ogni sei ore circa, quindi quattro volte al giorno.

Di conseguenza, le correnti di marea hanno grande importanza laddove il paraggio è interessato da forti escursioni di marea oppure, come nel caso dello Stretto di Messina, nelle zone caratterizzate da particolari condizioni geometriche dei fondali e delle coste, che, anche per escursioni modeste, accentuano l'effetto dell'onda di marea. Le velocità delle correnti di marea variano con continuità durante i cicli di marea e possono presentare valori opposti durante la giornata.

Nel Mediterraneo le correnti costiere assumono al massimo valori pari a 1 nodo (0.5 m/s), mentre velocità molto più elevate si registrano in corrispondenza degli stretti o dei canali per effetto delle correnti di marea (<https://www.vialattea.net/content/1305/>).

Le correnti costiere possono interagire col moto ondoso, modificandone le caratteristiche ed influenzando notevolmente i fenomeni di propagazione che intervengono da largo verso costa; di conseguenza, la loro influenza va tenuta in conto nei processi di morfodinamica costiera.

Infine, di rilevante interesse per il regime costiero sono le correnti litoranee, generate dagli spostamenti di masse d'acqua per effetto del moto ondoso che evolve sui bassi fondali; per rispettare l'equazione di continuità si determinano infatti flussi locali di compensazione degli spostamenti dovuti al moto ondoso. Tali correnti sono quelle che determinano il trasporto solido litoraneo e possono interessare sia la zona dei frangenti che la fascia esterna: in particolare, le correnti litoranee possono svilupparsi in direzione ortogonale alla linea di costa (rip-currents e correnti di ritorno) ed in direzione parallela alla costa (correnti longshore). La classica corrente longshore ha una velocità media che varia da 0.3 a 1 m/s, il cui valore aumenta man mano che ci si sposta dalla linea di riva verso la linea dei frangenti.

Le rip-currents, invece, sono delle correnti di ritorno che si generano nel punto d'incontro tra due correnti longshore di verso opposto, sviluppatasi queste ultime a causa della variazione delle altezze d'onda all'interno di un fronte d'onda e alla conseguente generazione di un innalzamento della superficie libera (wave set-up). Oltre alle rip-currents, un altro tipo di correnti cross-shore, dette anche "undertow", caratterizzano la circolazione litoranea e sono rappresentate da correnti di ritorno o di risucchio al fondo, generate per compensare il trasporto di massa verso riva dovuto al frangimento delle onde (Bagnold, 1940). La loro velocità media è circa 0.2-0.3 m/s.

2.3.8 Vento

I venti influenzano l'evoluzione del litorale sia in maniera diretta che indiretta. L'azione indiretta del vento è quella che riguarda il mare ed è legata alla formazione delle onde e di vari tipi di correnti marine. L'azione diretta del vento, invece, riguarda la spiaggia emersa ed include l'erosione, ovvero il sollevamento, il trasporto e l'accumulo di sedimenti leggeri che si manifesta visivamente attraverso la formazione di dune. L'azione erosiva e di presa in carico dei sedimenti da parte del vento è detta "deflazione".

Il trasporto eolico del sedimento avviene secondo processi di trazione, saltazione e sospensione delle particelle (Bagnold, 1941).

La sospensione interessa principalmente le particelle di piccole dimensioni, per le quali la forza peso può essere trascurata in rapporto alle fluttuazioni turbolente del vento, rivolte verso l'alto. Tale dinamica è tipica nel trasporto di materiali quali ceneri vulcaniche, loess e polveri eoliche; nella genesi delle dune costiere non costituisce il meccanismo prevalente in quanto il sedimento presente lungo i litorali sabbiosi solitamente ha dimensioni maggiori.

Nel processo di saltazione i singoli granuli vengono presi in carico dal vento e descrivono traiettorie paraboliche, le cui dimensioni sono proporzionali alla velocità del vento e alle caratteristiche delle particelle. La saltazione è la modalità di trasporto più importante per la creazione delle dune e la più comune in quanto riguarda circa l'80% dei granuli sabbiosi.

La trazione, invece, è la dinamica che riguarda i granuli di sedimento di maggiori dimensioni, il cui moto è caratterizzato dalla sola componente orizzontale (tangenziale) del vento che si manifesta quando il peso del singolo granulo bilancia la componente di sollevamento. Bagnold (1941) ha elaborato un modello per il calcolo del trasporto eolico, basato su modelli di laboratorio e su principi fisici generali. Tale modello è il più utilizzato e permette di calcolare il tasso di trasporto sedimentario (q) in funzione della velocità del vento (u_*), mediante la relazione:

$$q = C_B \frac{\rho_a}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} u_*^3 \quad (2.3)$$

dove:

- q è il tasso di trasporto, definito come la quantità in peso di sedimento che può essere trasportata da un vento di intensità u_* e si misura in g/cm*s;

- C_B è un coefficiente adimensionale empirico, legato alla distribuzione granulometrica della sabbia e variabile da 1.5 a 3.5 (per sedimenti di dune sabbiose naturali il coefficiente è normalmente pari a 1.8);
- ρ_a è la densità dell'aria e g è l'accelerazione di gravità;
- d è il diametro medio della sabbia considerata, espresso in mm;
- D è il diametro medio di riferimento dei granuli di sabbia, pari a 0.25 mm;
- u_* è la velocità di taglio, espressa in cm/s.

Per quanto riguarda la velocità del vento, bisogna precisare che non è possibile attribuire al vento una velocità determinata, poiché questa varia in funzione della quota e della rugosità. Per tale ragione la determinazione della velocità critica di erosione dei sedimenti sottoposti ad azione eolica viene definita dalla relazione di Bagnold (1941), ovvero attraverso il calcolo della “velocità di taglio critica”:

$$u_{*c} = A \cdot \sqrt{\frac{g \cdot d \cdot (\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \quad (2.4)$$

dove A è un coefficiente variabile tra 0.1 e 0.2 e ρ_s è la densità del sedimento.

Il trasporto eolico dei sedimenti sabbiosi rappresenta quindi un elemento di output per il bilancio sedimentario della spiaggia e allo stesso tempo un elemento di input per quello del sistema dunale (Psuty, 1988). Tuttavia, parte di esso può essere trasferito nel territorio retrodunale e uscire così dal sistema litoraneo, rappresentando una perdita nel bilancio sedimentario complessivo.

2.3.9 Idrodinamica del moto ondoso

Lo studio delle onde è fondamentale per la comprensione dei fenomeni che intervengono nella fascia costiera. Le onde di mare si formano in seguito al trasferimento di energia del vento che soffia sulla superficie del mare. La dimensione delle onde generate dipende dalla velocità del vento, dalla sua durata e dalla distesa di mare o oceano su cui soffia, detta fetch. Generalmente si distinguono due tipi di onde: le wind waves (onde di vento), di generazione locale e più energetiche (periodi bassi), e le swell waves (onde di mare lungo), registrate in una località diversa da quella in cui sono state generate e meno energetiche (periodi alti).

Le onde di mare si rappresentano con una funzione $\eta(t)$, che esprime la quota verticale istantanea della superficie libera dell'acqua in un punto, riferita al suo livello medio, ossia descrive il profilo dell'onda in ogni istante (Figura 2.23). Una singola onda di mare è la porzione di $\eta(t)$ compresa tra due zeri consecutivi con derivata positiva (zero-upcrossing). Ogni onda è caratterizzata da una cresta ed un cavo che sono rispettivamente il massimo relativo con ordinata più grande e il minimo relativo con ordinata più piccola della $\eta(t)$. Quindi si può definire altezza d'onda H il dislivello tra cresta e cavo. L'intervallo temporale compreso tra due zero-upcrossing è definito invece periodo dell'onda T .

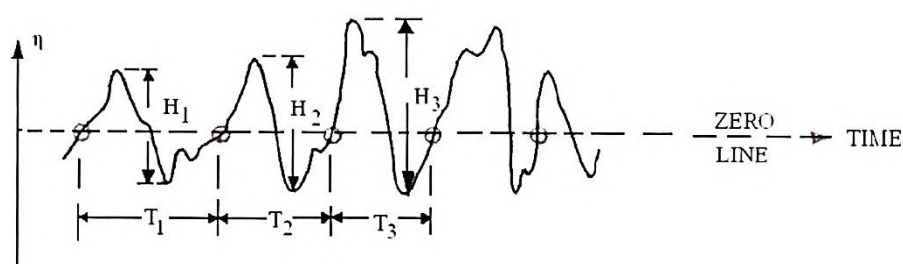


Figura 2.23: Registrazione di onde in un punto fissato in mare (Boccotti, 1997).

Immaginando di rappresentare un'onda nello spazio in un istante di tempo fissato, possiamo definire la lunghezza d'onda L come la distanza tra due zeri consecutivi con derivata positiva. Le grandezze rappresentative delle onde finora descritte sono quelle fondamentali; si possono definire, inoltre, altre grandezze derivate che sono:

- ampiezza d'onda $a = H/2$;
- frequenza angolare $\omega = 2\pi/T$;
- numero d'onda $k = 2\pi/L$;
- celerità $c = L/T$;
- ripidità $s = H/L$.

A differenza delle onde periodiche o regolari, che sono quelle generate in laboratorio e caratterizzate da altezze e periodi d'onda tutti uguali, quindi esprimibili mediante funzioni trigonometriche, le onde di mare sono onde irregolari definite da periodi ed altezze d'onda tutti diversi, come è possibile osservare in Figura 2.23. Di conseguenza, per le onde di mare non è possibile utilizzare una rappresentazione analitica di tipo deterministico, ma è necessario un approccio statistico.

Pertanto, è stato introdotto il concetto di stato di mare, definito come una successione dell'ordine delle centinaia di onde consecutive (tipicamente nel Mediterraneo si assumono $100 \div 300$ onde), tale che sia sufficientemente breve da potersi ritenere pressoché stazionaria e sufficientemente lunga da potersi ritenere ben rappresentativa della condizione del mare. La distribuzione sulle frequenze dell'energia delle onde di uno stato di mare assume una forma spettrale $E(\omega)$, descritta comunemente dalla nota espressione analitica ricavata da Hasselmann et al. (1973) e denominata "JONSWAP" (Figura 2.24).

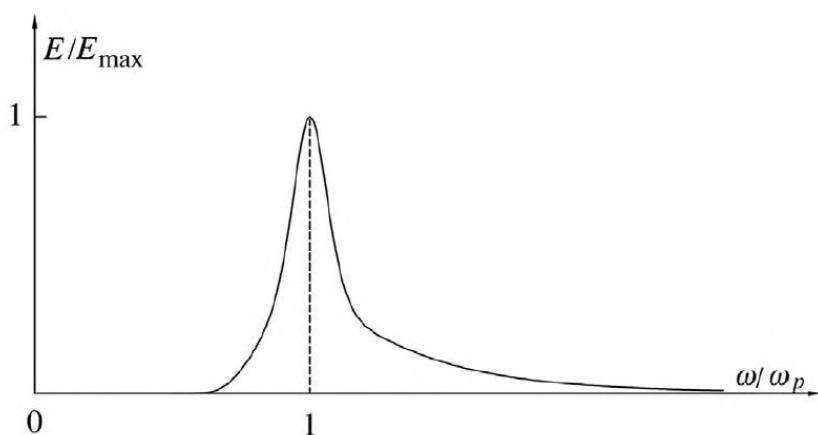


Figura 2.24: Rappresentazione dello spettro JONSWAP medio (Boccotti, 2000).

Oltre alla forma spettrale, le caratteristiche statistiche più usate per descrivere uno stato di mare sono l'altezza d'onda significativa H_s , definita come quattro volte la deviazione standard del processo $\eta(t)$, la frequenza dominante ω_p , in corrispondenza della quale si ha il picco (massimo) dello spettro, e il relativo periodo dominante T_p e il periodo medio T_m , definito in funzione dei momenti di ordine zero e due dello spettro. In particolare, in condizione di alti fondali (profondità maggiore di metà lunghezza d'onda) ed utilizzando la forma spettrale JONSWAP medio, sono state ricavate delle espressioni che permettono di legare il periodo di picco all'altezza significativa e al periodo medio, descritte di seguito:

$$T_p = 8.5\pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}} \quad (2.5)$$

$$T_m = 0.78T_p \quad (2.6)$$

Le onde di uno stato di mare sono inoltre caratterizzate da diverse direzioni di propagazione, di conseguenza la loro energia si distribuisce anche sulle direzioni, oltre che sulle frequenze. Per-

tanto, è stato definito uno spettro direzionale, ottenuto da quello di frequenza moltiplicando per una funzione di dispersione direzionale, secondo cui l'energia delle onde, per fissata frequenza, si distribuisce sulle direzioni secondo una forma a “campana” e raggiunge il suo massimo valore in corrispondenza di una direzione cosiddetta “dominante”. Tale distribuzione varia al variare della frequenza secondo un parametro n , definito da Mitsuyasu et al. (1975) (Figura 2.25).

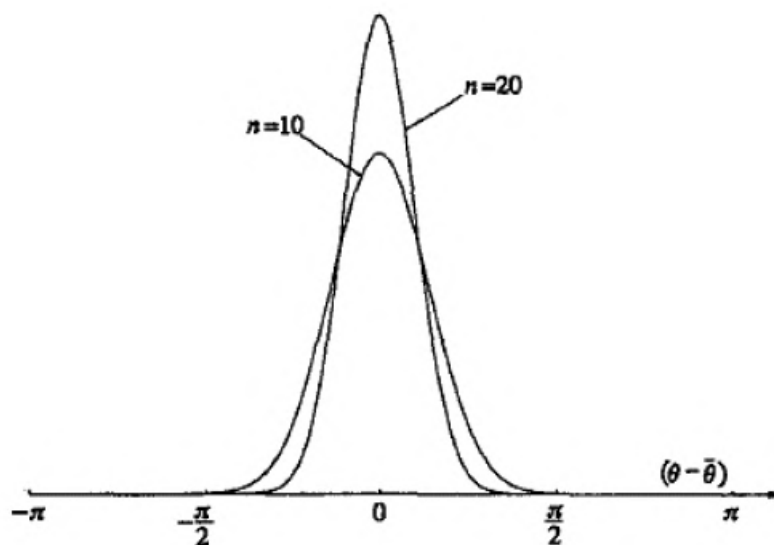


Figura 2.25: La funzione di dispersione direzionale (Boccotti, 1997).

Le onde che si propagano da largo verso riva subiscono una serie di trasformazioni che riguardano le loro caratteristiche fondamentali, a causa della variazione della profondità del fondale e dell'incontro di eventuali ostacoli. Tali fenomeni sono lo shoaling-rifrazione e il frangimento, nel primo caso, e la riflessione e la diffrazione, nel secondo, e si verificano per effetto del principio di conservazione dell'energia.

2.3.9.1 Interazione onda-struttura

L'interazione tra un treno di onde ed un ostacolo (struttura, spiaggia o promontorio) può generare il fenomeno di riflessione o di diffrazione delle onde.

In particolare, la riflessione si verifica quando un treno d'onde incontra un ostacolo: una parte dell'energia incidente sarà riflessa, una parte trasmessa a tergo ed una parte sarà dissipata sull'ostacolo stesso. Il fenomeno di riflessione, infatti, non dipende esclusivamente dalle caratteristiche dell'ostacolo (geometriche o costitutive), ma è funzione anche del tipo di condizione di moto on-

doso incidente. In particolare, la quantità di energia riflessa è funzione della ripidità dell'onda e dell'angolo di incidenza: essa aumenta al diminuire della ripidità dell'onda e dell'angolo di incidenza, inteso come l'angolo che la direzione di incidenza forma con la normale alla parete. Ad esempio, nel caso di una parete verticale impermeabile, ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda incidente, il coefficiente di riflessione assume valore unitario e si parla di riflessione totale. In questo caso, davanti alla parete si instaura un'oscillazione di ampiezza doppia rispetto all'ampiezza dell'onda incidente (Figura 2.26).

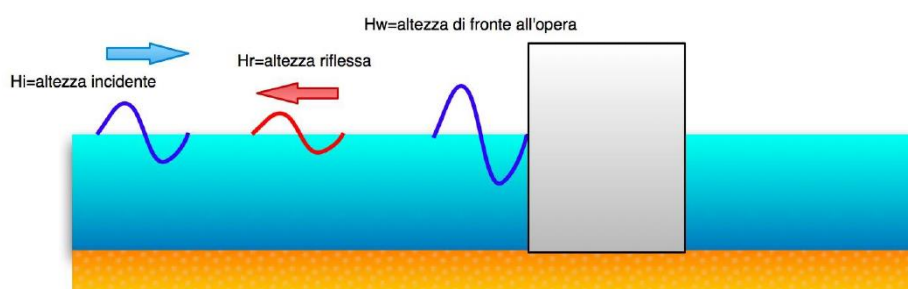


Figura 2.26: Riflessione totale.

La riflessione parziale si verifica, invece, quando l'onda incontra ostacoli come scogliere, cassoni forati, paratie non completamente chiuse verso il basso, o ancora pareti inclinate. In questo caso si ha la sovrapposizione di due onde o treni d'onda, di cui uno incidente e l'altro retrogrado, di altezza minore del primo, che determina un'onda parzialmente stazionaria (Figura 2.27).

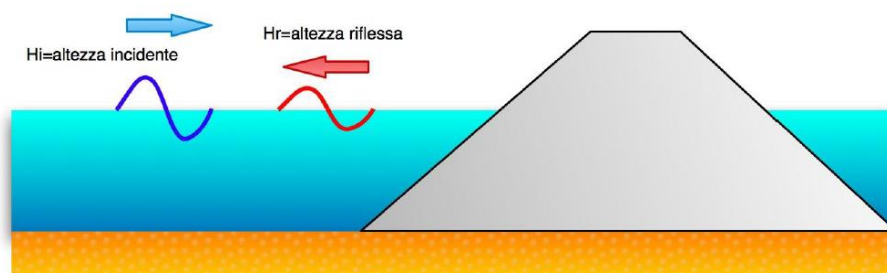


Figura 2.27: Riflessione parziale.

La diffrazione, invece, consiste nella dispersione dell'energia lungo direzioni perpendicolari alla direzione di propagazione di moto dell'onda e si verifica nell'interazione con un ostacolo, in corrispondenza di discontinuità geometriche (l'imboccatura di un porto, la presenza di barriere). In particolare, il fenomeno della diffrazione determina una modifica del fronte d'onda, che,

interagendo con l'ostacolo, diventa circolare, ovvero le onde, entrando nella zona d'ombra dell'ostacolo, creano delle geometrie circolari e diminuiscono rapidamente la loro altezza man mano che si allontanano dall'ostacolo stesso (Figura 2.28).



Figura 2.28: Diffrazione delle onde.

2.3.9.2 Trasformazioni delle onde da largo a riva

Le onde a largo (condizione di alti fondali) sono caratterizzate da una certa altezza H_0 , lunghezza L_0 e direzione α_0 (angolo che la direzione di propagazione dell'onda forma con la linea di riva) con cui si propagano senza risentire degli effetti del fondale. In particolare, la lunghezza d'onda su alti fondali è legata al periodo mediante la seguente espressione:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.7)$$

Ad una generica profondità d , la lunghezza d'onda varierà seguendo la legge di dispersione lineare:

$$L = L_0 \tanh(kd) \quad (2.8)$$

Al variare della profondità, inoltre, le onde modificheranno le loro caratteristiche di altezza (shoaling) e direzione di propagazione (rifrazione): il fenomeno di shoaling-rifrazione, infatti, determina una riduzione della celerità delle onde nella loro propagazione da largo verso riva ed una tendenza dei fronti d'onda a disporsi parallelamente alla linea di riva, ovvero la direzione di propagazione delle onde in prossimità della riva tende a diventare perpendicolare alla riva stessa. Per onde regolari, il fenomeno è descritto dalla seguente equazione:

$$H = H_0 \cdot CS \cdot CR \quad (2.9)$$

con:

$$CS = \sqrt{\frac{1}{\tanh(kd)} \frac{1}{1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}}} \quad (2.10)$$

$$CR = \sqrt[4]{\frac{1 - \cos^2(\alpha_0)}{1 - \cos^2(\alpha_0)\tanh^2(kd)}} \quad (2.11)$$

dove CS è il coefficiente di shoaling, mentre CR è il coefficiente di rifrazione. In Figura 2.29 è rappresentato il rapporto H/H_0 in funzione di d/L_0 per diversi valori di α_0 . In particolare, per $\alpha_0 = 90^\circ$, cioè per il caso in cui la direzione di propagazione a largo è perpendicolare alla linea di riva, la direzione di propagazione dell'onda si mantiene costante ($CR = 1$) e pertanto le onde subiscono solo il fenomeno di shoaling e la curva ottenuta è detta "curva di shoaling"; nel caso in cui, invece, $\alpha_0 \neq 90^\circ$, si avrà sia il fenomeno di shoaling che quello di rifrazione per cui la curva è detta di "shoaling – rifrazione".

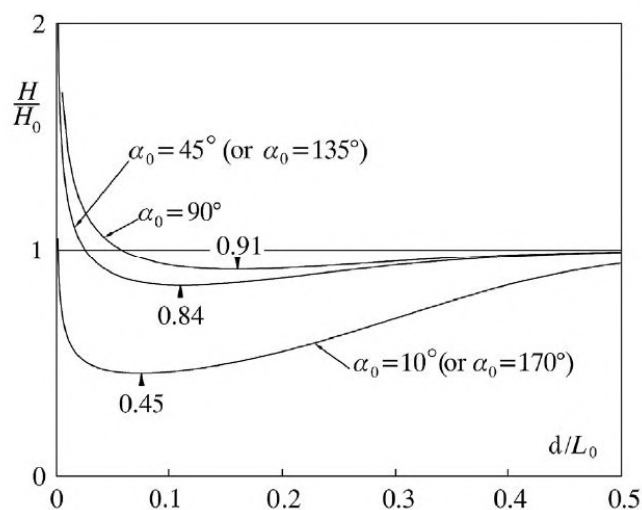


Figura 2.29: Fenomeno di shoaling-rifrazione: variazione dell'altezza d'onda con la profondità per diverse direzioni di propagazione al largo. Boccotti (2000).

Come si può notare dalla Figura 2.29, la curva tende a 1 per $d/L_0 \rightarrow \infty$ e tenderebbe a ∞ per $d/L_0 \rightarrow 0$, ma quest'ultima tendenza è un'astrazione analitica, in quanto l'altezza d'onda non andrà mai all'infinito, perché prima che questo avvenga si verificherà il fenomeno del frangimento,

per il quale l'onda perde le sue caratteristiche originarie e gran parte del contenuto energetico posseduto.

Il frangimento è un fenomeno molto complesso che si verifica in seguito al processo di trasformazione delle onde nella propagazione da largo verso riva: con la diminuzione della profondità del fondale, infatti, la celerità diminuisce, le orbite percorse dalle singole particelle passano da circolari a ellittiche sempre più schiacciate e l'onda, raggiungendo la costa, modifica la sua altezza e la sua lunghezza fino ad assumere un valore limite di ripidità che la rende instabile. Quando si raggiunge tale limite, la velocità della singola particella supera la celerità dell'onda e avviene il frangimento, il momento in cui si ha la massima dissipazione di energia, l'onda collassa e la sua altezza diminuisce bruscamente.

Esistono diversi criteri che permettono di identificare le condizioni di frangimento in funzione del valore di ripidità e della profondità del fondale (Miche, 1944; Goda, 1970; Battjes & Janssen, 1978; McCowan, 1981; Kamphuis, 1991; Goda, 2010; Tomasicchio et al., 2020). Il punto di frangimento non è facilmente stimabile o prevedibile, e per la sua determinazione esistono vari criteri empirici più o meno complessi (Madsen et al. 1997, D'Alessandro & Tomasicchio, 2008).

Inoltre, il confronto fra la ripidità dell'onda al frangimento (H_b/L_0) e la pendenza della spiaggia ($\tan(\beta_f)$) consente di prevedere il tipo di frangente che si genera (Battjes 1974), in funzione del numero di Iribarren o surf similarity parameter ξ_b , così definito:

$$\xi_b = \frac{\tan\beta_f}{\sqrt{H_b/L_0}} \quad (2.12)$$

In funzione del valore di ξ_b , è possibile classificare quattro tipi di frangimento (Figura 2.30):

- spilling ($\xi_b < 0.4$), caratteristico di spiagge a bassa pendenza con onde molto ripide che collassano in modo caotico spumeggiando via via che si avvicinano a riva e dissipando la quasi totalità della propria energia;
- plunging ($0.4 < \xi_b < 1.5$), è caratterizzato dalla dissipazione di una grande quantità di energia su una breve distanza e si verifica su spiagge a media pendenza con onde di ripidità intermedia che prima di frangere si 'piegano' su sé stesse, facendo cadere la cresta nel cavo, diventando così ideali per chi pratica il surf;
- collapsing ($1.5 < \xi_b < 2$), si verifica su spiagge a media pendenza ed è caratteristico di onde che dopo aver assunto un fronte molto inclinato collassano gradualmente procedendo

verso riva; è molto simile al plunging ma la cresta dell'onda invece di arrotolarsi su sé stessa, collassa letteralmente in avanti;

- surging ($\xi_b > 2$), caratteristico di spiagge ad elevata pendenza, si verifica in una porzione di mare relativamente ristretta con onde poco ripide che risalgono mantenendo un profilo dolce e senza frangere; la maggior parte dell'energia viene riflessa verso largo.

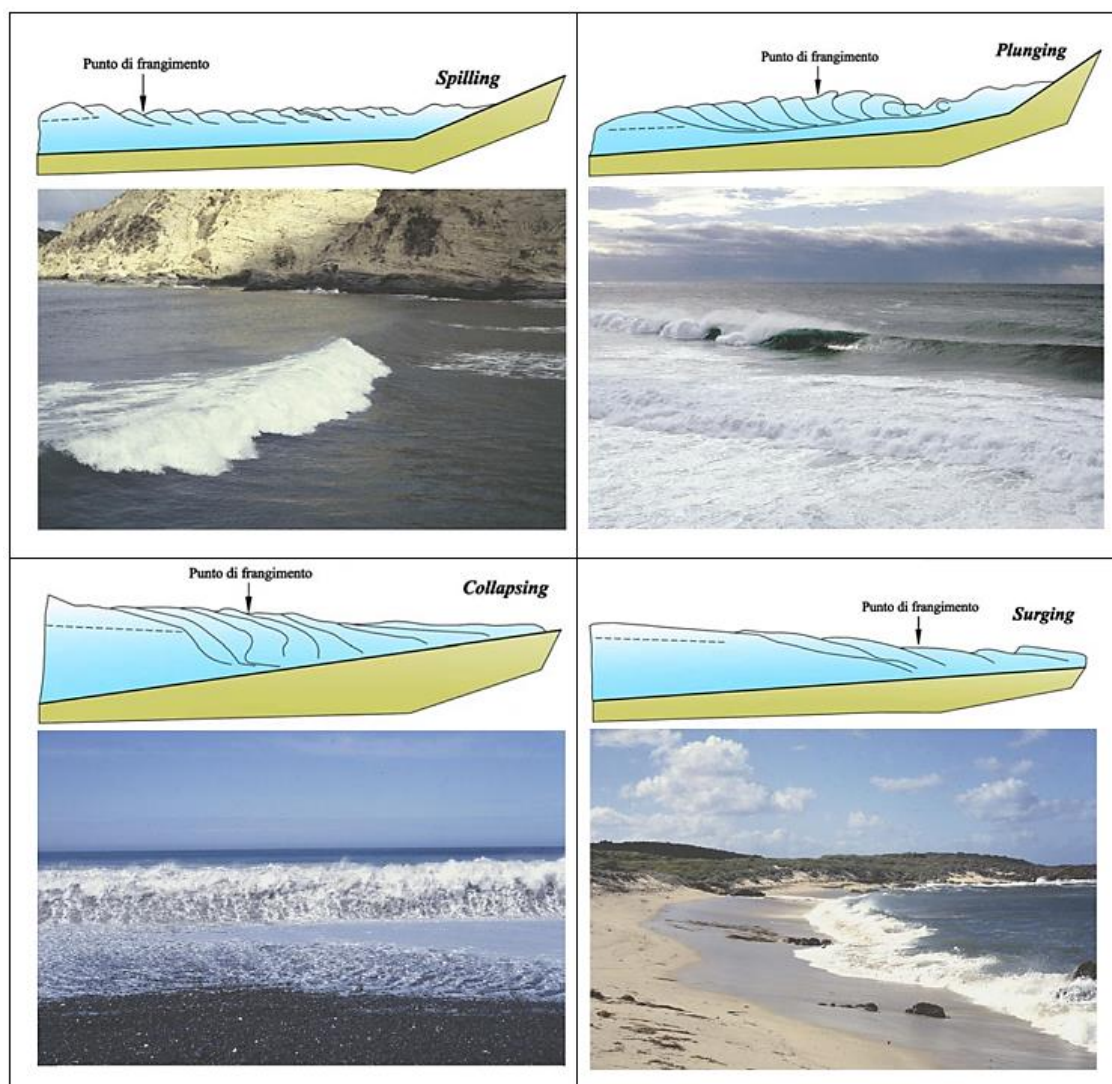


Figura 2.30: Tipologie di frangimento.

La zona compresa tra la linea dei frangenti e la linea di riva è chiamata surf-zone: è in questa zona che l'eccesso di quantità di moto legato alle onde determina delle variazioni del livello del mare (set-up e set-down) e la formazione di correnti litoranee, responsabili del trasporto solido. In

particolare, come mostrato in Figura 2.31, fuori dalla surf-zone si verifica una leggera depressione del livello medio del mare (l.m.m.) che raggiunge il suo massimo in corrispondenza del punto di frangimento e tale abbassamento massimo è chiamato set-down (Δ_b) ed è dell'ordine dei 10 cm. All'interno della surf zone, invece, si verifica un innalzamento del l.m.m., dovuto sia all'azione del vento che dell'onda. L'innalzamento dovuto esclusivamente all'azione dell'onda è chiamato wave set-up (S_w) ed è un'aliquota importante dell'altezza d'onda al frangimento, mentre quello legato all'azione del vento viene definito wind set-up (par. 2.3.6).

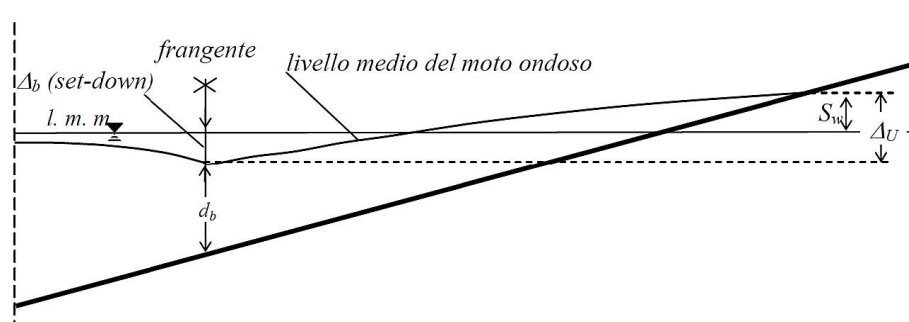


Figura 2.31: Andamento del livello medio del moto ondoso a monte (set-down) e a valle (set-up) del frangente.

Inoltre, le onde, frangendo, dissipano una consistente parte di energia ma, una parte di essa, è parzialmente convertita in energia potenziale (Hunt, 1959), pertanto avviene una traslazione in avanti della massa d'acqua che risale la spiaggia o il paramento esterno delle opere di difesa costiera e portuale (run-up): tale fenomeno rappresenta infatti l'“ultima” dissipazione dell'energia delle onde, in quanto si genera un flusso di risalita ed un conseguente flusso di ritorno (backwash). Il run-up, infatti, è la quota massima raggiunta dall'acqua rispetto al livello medio del mare ed è costituito da due componenti, come mostrato in Figura 2.32:

- set-up, variazione del livello medio del mare;
- swash, fluttazione massima rispetto al livello medio.

La corretta valutazione di run-up e set-up e la comprensione dei fattori da cui dipendono sono fondamentali per la valutazione dei rischi costieri e per la pianificazione e gestione degli eventuali interventi protettivi: infatti, il run-up è responsabile dell'erosione sia delle spiagge che delle dune

costiere (Sallenger, 2000; Ruggiero et al., 2001), mentre il set-up è uno dei fattori più importanti nella valutazione delle inondazioni costiere.

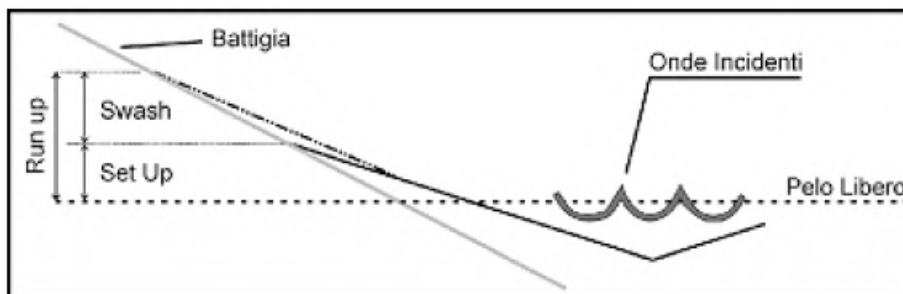


Figura 2.32: Schematizzazione di set-up e run-up.

Per quanto riguarda la stima di set-up e run-up, mentre per il primo è possibile determinare delle formulazioni analitiche mediante l'applicazione dell'equazione globale del moto, il secondo viene generalmente studiato con tecniche statistiche; spesso, infatti, le formule empiriche sviluppate indicano delle soglie di risalita che vengono superate un determinato numero di volte. La maggior parte di queste relazioni sperimentali esprimono il valore di $R_{u,2\%}$, ovvero il valore di run-up superato dal 2% delle onde che arrivano sulla costa, in funzione delle caratteristiche ondose di largo e della pendenza della spiaggia e tengono conto anche del set-up (Mase, 1989; Nielsen & Hanslow, 1991; Stockdon et al., 2006). In particolare, l'espressione proposta da Stockdon et al. (2006) risulta la più utilizzata, nonché consigliata dalla direttiva europea sulle alluvioni (Flood Directive 2007/60/EC), e si basa sulla seguente espressione:

$$R_{u2\%} = 1.1 \left\{ 0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{1}{2}[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2} \right\} \quad (2.13)$$

dove β_f rappresenta la pendenza della spiaggia intertidale (foreshore) e H_0 ed L_0 l'altezza d'onda significativa di largo e la lunghezza d'onda relativa. In particolare, nell'espressione (2.13) il primo termine tra parentesi rappresenta il contributo del set-up ed il secondo rappresenta il contributo dello swash.

Inoltre, per condizioni estremamente dissipative, caratterizzate da un valore di $\xi_0 < 0.3$, gli autori consigliano di utilizzare l'espressione:

$$R_{u2\%} = 0.043(H_0L_0)^{1/2} \quad (\xi_0 < 0.3) \quad (2.14)$$

2.3.9.3 Mareggiate e periodo di ritorno

Nell'analisi del moto ondoso sul lungo periodo, è possibile definire la mareggiata come “una successione di stati di mare durante la quale la $H_s(t)$ supera una soglia critica h_{crit} , e non scende al di sotto di tale soglia per durate di tempo superiori ad un valore Δt_{crit} prefissato” (Figura 2.33). Il valore Δt_{crit} può essere fissato di 12 ore, mentre la soglia $h_{crit} = \bar{H}_s(t)$.

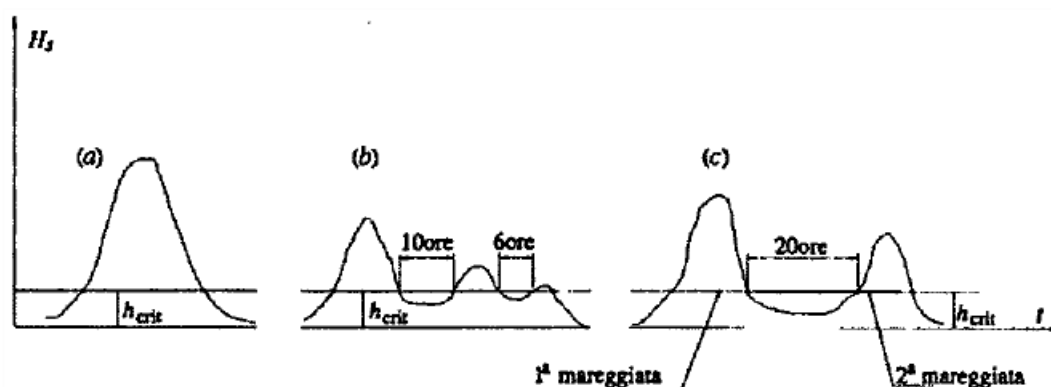


Figura 2.33: (a) Mareggiata con un singolo picco; (b) Mareggiata con due picchi; (c) Due distinte mareggiate (la H_s , tra i due picchi scende al di sotto della soglia critica per un tempo maggiore di 12 ore) (Boccotti, 1997).

A ciascuna mareggiata vera è possibile associare una mareggiata triangolare equivalente (m.t.e.) così definita:

- l'altezza a del triangolo è uguale al valor massimo dell'altezza significativa della mareggiata vera ($H_{s,max}$);
- la base b del triangolo (cioè la durata della mareggiata triangolare) è tale che l'altezza dell'onda massima attesa nel corso della mareggiata triangolare risulti uguale all'altezza dell'onda massima attesa nella mareggiata vera.

Il periodo di ritorno di un evento è l'intervallo di tempo medio tra due consecutive realizzazioni dell'evento stesso. Il periodo di ritorno omnidirezionale $R(H_s > h)$ è il periodo di ritorno di una mareggiata nella quale l'altezza significativa H_s supera un'assegnata soglia h in una fissata località e può essere determinato mediante la seguente espressione derivata da Boccotti (2000):

$$R(H_s > h) = \frac{b_{10} \left(1.11 - 0.11 \frac{h}{a_{10}}\right)}{1 + u \left(\frac{h}{w}\right)^u} \cdot \exp \left[\left(\frac{h}{w}\right)^u \right] \quad (2.15)$$

dove a_{10} e b_{10} rappresentano rispettivamente il valor medio delle altezze a e il valor medio delle basi b delle N m.t.e. più forti, verificatesi in una località durante un certo numero di anni (dove chiaramente il pedice 10 sta ad indicare che il campione è costituito da un numero di mareggiate N pari a 10 per il numero di anni di registrazione). In particolare, a_{10} e b_{10} , insieme ai parametri u e w , che descrivono una distribuzione di tipo Weibull della probabilità di superamento dell'altezza significativa, sono caratteristici del moto ondoso della località esaminata.

2.3.9.4 Dati di moto ondoso e studio meteomarino

Esistono diverse tipologie di dati relativi al moto ondoso: dati visuali, dati ondametrici, dati satellitari e dati di vento. A causa dell'interruzione delle boe della rete ondametrica nazionale (RON), che ha fornito i dati ondametrici dal 1989 al 2014, recentemente si è diffuso sempre più l'utilizzo di dati ricostruiti mediante modelli a partire dai dati atmosferici. Tale scelta è legata sia all'efficace copertura garantita sia alla scarsa copertura spaziale e temporale garantita dai dati forniti dalle boe ondametriche della RON. Un esempio di dati meteomarini ricostruiti da modello è fornito dal database del MeteOcean Group del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICC) dell'Università degli Studi di Genova (<http://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html>), che contiene dati atmosferici ed ondosi ricostruiti mediante il modello Wavewatch III, un modello con risoluzione spaziale di 10 km che utilizza i dati del database CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (<http://www3.dicca.unige.it/meteocean/model.html>).

L'analisi dei dati metomarini acquisiti permette quindi di effettuare uno studio meteomarino della località in esame, ovvero di individuare il clima del moto ondoso di largo, fondamentale per la realizzazione di possibili interventi costieri e per il dimensionamento di opere marittime. Nello studio è necessario calcolare le frequenze, le altezze significative medie, i periodi di picco ed il flusso di energia per ogni settore di largo. La conoscenza del flusso di energia è, inoltre, necessaria per individuare il settore di traversia principale, ovvero il settore da cui provengono le onde più forti: tale settore sarà quello caratterizzato dal massimo valore del flusso di energia e può essere calcolato per ogni classe di altezza significativa ΔH e per ogni settore di provenienza $\Delta\theta$ mediante l'espressione:

$$\Phi(\Delta H, \Delta\theta) = 986.5 \cdot \bar{H}_s^2(\Delta H) \cdot T_p(\Delta H, \Delta\theta) \cdot f(\Delta H, \Delta\theta) \quad (2.16)$$

2.3.10 Trasporto solido litoraneo

Il trasporto solido litoraneo è strettamente legato alla variazione del profilo della spiaggia e quindi al fenomeno di erosione costiera. Il movimento dei sedimenti è tridimensionale, tuttavia, il trasporto totale viene per comodità separato in componenti parallele e perpendicolari alla costa, portando così ad una comprensione più semplice di un ambiente molto complesso (Seymour, 2005). Il trasporto solido, infatti, è detto longitudinale (longshore), se avviene parallelamente alla linea di riva, oppure trasversale (cross-shore), se avviene nella direzione ortogonale ad essa. In particolare, il trasporto solido longshore è responsabile delle variazioni morfologiche del litorale a lungo termine (Gravens & Rosati, 1994), mentre il cross-shore è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine dovuti a condizioni di mareggiata ed è quindi rappresentativo degli effetti stagionali del profilo di spiaggia. La zona di spiaggia in cui avviene il trasporto solido litoraneo è detta “spiaggia attiva”, e si estende dalla profondità di chiusura all'altezza della berma. La determinazione della profondità di chiusura è di fondamentale importanza per lo studio della dinamica costiera e comunemente la formulazione più diffusa per la sua stima è quella proposta da Hallermeier (1983), riportata di seguito:

$$h_c = 2.28 H_{s,0-12} - 68.5 \left(\frac{H_{s,0-12}^2}{gT_{p,0-12}^2} \right) \quad (2.17)$$

dove $H_{s,0-12}$ rappresenta l'altezza d'onda significativa di largo superata non più di 12 ore l'anno e $T_{p,0-12}$ il relativo periodo di picco. Le cause che determinano il trasporto solido litoraneo sono generalmente le onde, che mobilizzano e portano in sospensione i sedimenti, e le correnti, che trasportano i sedimenti fino a notevoli distanze dal punto di distacco.

In generale, il trasporto dei sedimenti non coesivi può avvenire per slittamento, rotolamento, saltellamento e sospensione (Figura 2.34). Le prime tre modalità di trasporto implicano un continuo contatto con il fondo e quindi determinano un trasporto a carico di fondo, che avviene quando la velocità della corrente è superiore alla velocità critica per mettere in movimento i sedimenti sabbiosi (generalmente 0.2-0.4 m/s). L'ultima modalità di trasporto elencata, invece, interessa le particelle che vanno a costituire il cosiddetto carico in sospensione, e si verifica quando il valore

della velocità tangenziale di fondo è maggiore della velocità di sedimentazione (Van Rijn, 1993). Tuttavia, non è chiaro quale di questi meccanismi predomina per varie condizioni d'onda, tipi di sedimenti e posizioni del profilo (Dean & Dalrymple, 2004).

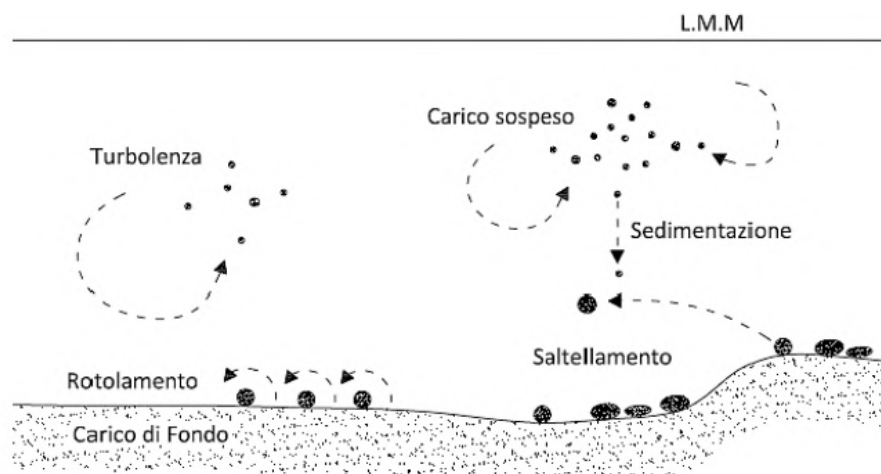


Figura 2.34: Modalità di trasporto dei sedimenti marini.

Esistono vari metodi per stimare il trasporto solido, classificabili secondo tre tipologie:

1. metodi energetici, classificabili ulteriormente in:

- approcci basati sul flusso di energia, sviluppati appositamente per il trasporto solido litoraneo (Inman & Bagnold, 1963; Komar & Inman, 1970; CERC equation, USACE, 1984; Bayram, Larson & Hanson, 2007);
- approcci di tipo “stream power”, applicabili a qualsiasi tipologia di trasporto, compreso quello fluviale (Bagnold, 1963, 1966; Bailard, 1981);

2. metodi basati sull'equilibrio delle forze (Bijker, 1971; Damgaard & Soulsby, 1996), alternativi all'approccio “stream power” (Van Wellen, Chadwick & Mason, 2000);

3. formule ricavate mediante analisi dimensionale dei principali parametri in gioco (Van Hijum & Pilarczyk, 1982; Van der Meer, 1990; Kamphuis, 1991; Schoonees & Theron, 1993).

Le principali formule utilizzate per il calcolo del trasporto longitudinale (quali Kamphuis, 1991; USACE, 1984) sono valide principalmente per spiagge sabbiose dissipative, ma hanno scarsa validità nel caso di spiagge ghiaiose o a granulometria grossolana, caratterizzate da pendenze di equilibrio maggiori delle spiagge sabbiose e, quindi, da differenti processi idrodinamici (Van Wellen,

Chadwick, & Mason, 2000). Nelle spiagge ciottolose, infatti, il trasporto longitudinale è dovuto al trasporto di fondo e non alla combinazione di trasporto di fondo ed in sospensione. Nelle spiagge ghiaiose, il trasporto longitudinale è influenzato dalla pendenza di equilibrio (tipicamente 1:8), che provoca la formazione di frangenti vicino la battigia per cui l'energia viene dissipata quasi totalmente nella swash zone. Questo avviene perché un cumulo di sedimenti grossolani possiede maggiore porosità della sabbia, causando l'infiltrazione di acqua durante la fase di run-up e la formazione di una berma in corrispondenza del massimo livello di run-up (Van Wellen, Chadwick, & Mason, 2000). Questi fenomeni portano ad una diversa modalità di dissipazione dell'energia rispetto alle spiagge sabbiose, che può parzialmente invalidare le principali formule utilizzate per la stima del trasporto longitudinale. Esistono poche formule (Van Hijum & Pilarczyk, 1982; Chadwick, 1989; Van der Meer, 1990; Van der Meer & Veldman, 1992) per valutare il trasporto longitudinale nel caso di spiagge ghiaiose, nonostante esse siano molto diffuse, soprattutto alle medie ed alte latitudini (Van Rijn, 2002) e, spesso, sono state calibrate a partire da limitati set di dati. Tomasicchio, D'Alessandro, Barbaro e Malara (2013) hanno ricavato un modello di validità generale (General Longshore Transport – GLT) per valutare il trasporto solido in presenza di moto ondoso obliquo, ricalibrando il modello originario di Lamberti & Tomasicchio (1997) e basandosi su nove database idrodinamici e di trasporto solido, ricavati a partire da esperimenti di laboratorio e misure sul campo.

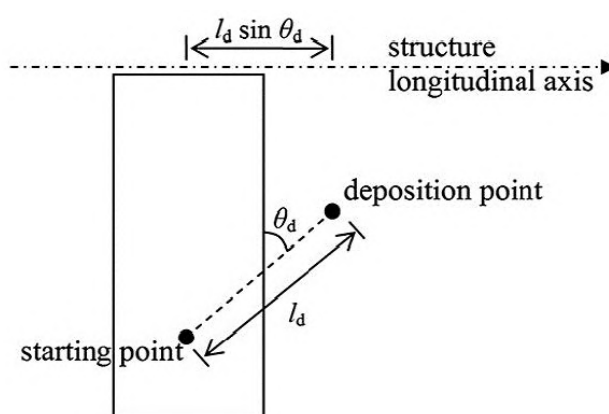


Figura 2.35: Schema di riferimento del modello GLT (Tomasicchio et al., 2013).

Tale modello combina un approccio basato sul flusso di energia con una relazione empirica/statistica tra la forza indotta dall'onda e il numero di particelle in movimento. Il modello GLT,

infatti, si basa sul presupposto che i movimenti delle particelle siano funzione del moto ondoso attraverso un indice di mobilità adeguato e seguano la stessa direzione delle onde alla profondità di frangimento (Tomasicchio et al., 1994; Lamberti & Tomasicchio, 1997). Seguendo lo schema di riferimento riportato in Figura 2.35, lo spostamento subito da una generica particella in un piccolo intervallo di tempo Δt è pari a $l_d \cdot \sin \theta_d$, dove l_d è la lunghezza dello spostamento e θ_d è la sua obliquità. Supponendo che lo spostamento abbia stessa inclinazione del moto ondoso al frangimento ($\theta_d = \theta_{k,b}$) e che un numero N_{od} di particelle rimosse da una striscia larga un diametro nominale, D_{50} , si muova sotto l'azione di 1000 onde, il numero di particelle messe in moto da una singola onda che attraversano una determinata sezione di controllo è funzione del numero di stabilità modificato N_s^{**} mediante la seguente relazione:

$$S_N = \frac{l_d}{D_{50}} \frac{N_{od}}{1000} \sin \theta_{k,b} = f(N_s^{**}) \quad (2.18)$$

dove:

$$N_s^{**} = \frac{H_k}{C_k \Delta D_{50}} \left(\frac{s_{m,0}}{s_{m,k}} \right)^{-\frac{1}{5}} (\cos \theta_0)^{\frac{2}{5}} \quad (2.19)$$

è il numero di stabilità modificato (Lamberti & Tomasicchio, 1997), con: H_k = altezza caratteristica dell'onda; $C_k = H_k/H_s$ dove H_s = altezza significativa dell'onda; Δ = densità di massa relativa = $(\rho_s - \rho)/\rho$; θ_0 = obliquità dell'onda offshore; $s_{m,0}$ = ripidità media dell'onda in condizioni offshore e $s_{m,k}$ = ripidità media dell'onda caratteristica (assunta pari a 0.03). Lamberti & Tomasicchio (1997) hanno dimostrato che H_k deve essere considerato uguale a $H_{1/50}$, ma può anche essere adottato $H_{2\%}$. Nel primo caso: $C_k = 1.55$, nel secondo caso: $C_k = 1.40$.

Per $\theta_0 = 0$ se $s_{m,0} = s_{m,k}$ il numero di stabilità modificato si riduce al numero di stabilità classico $N_s^{**} \cong N_s$, a meno del fattore C_k . Il numero di stabilità N_s è stato introdotto in letteratura per schematizzare le strutture costiere in funzione della loro capacità di ridurre ed assorbire l'energia delle onde ed è, infatti, così definito:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{50}} \quad (2.20)$$

Nel caso di attacchi d'onda ortogonali, supponendo che la variazione di energia del moto ondoso

al di fuori della surf zone sia trascurabile e che il frangimento avvenga su bassi fondali, vale la seguente relazione per il flusso di energia F :

$$F = \frac{1}{8} \rho g H_0^2 c_{g0} = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 c_{gb} \quad (2.21)$$

dove:

- $c_{g0} = \frac{1}{2} \sqrt{g/k_0}$ è la celerità di gruppo al largo, con k_0 numero d'onda al largo;
- $c_{gb} = \sqrt{g/d_b}$ è la celerità di gruppo al frangimento, con d_b profondità di frangimento;
- H_0 è l'altezza d'onda al largo e H_b è l'altezza d'onda al frangimento.

Il modello proposto è, pertanto, un modello basato su un approccio di tipo energetico. L'equazione sopra riportata implica che:

$$H_b = H_0 \left(\frac{\gamma_b}{4k_0 H_0} \right)^{\frac{1}{5}} = q H_0 s_0^{-\frac{1}{5}} \quad (2.22)$$

dove $\gamma_b = H_b/d_b$ è l'indice di frangimento, q è una costante di proporzionalità e s_0 è la ripidità dell'onda al largo. Komar & Gaughan (1972) hanno trovato il miglior accordo con i dati sul campo e di laboratorio ipotizzando $\gamma_b = 1.42$ o la costante di proporzionalità $q = 0.56$.

Ne consegue che, considerando l'altezza caratteristica dell'onda al frangimento, $H_{k,b}$, ed $s_{m,0} = s_{m,k} = 0.03$, N_s^{**} può anche essere scritto come:

$$N_s^{**} \cong \frac{0.89 H_{k,b}}{C_k \Delta D_{50}} \quad (2.23)$$

Secondo la teoria della rifrazione per profili piani e monotonicamente decrescenti, $H_{k,b}$ e $\sin \theta_{k,b}$ possono essere valutati mediante le seguenti espressioni (Lamberti & Tomasicchio, 1997; Tomasicchio et al., 1994):

$$H_{k,b} = \left(H_k^2 c_g \cos \theta \sqrt{\gamma_b/g} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.24)$$

$$\sin \theta_{k,b} = \frac{c_{k,b}}{c} \sin \theta \quad (2.25)$$

$$c_{k,b} = \sqrt{g H_{k,b} / \gamma_b} \quad (2.26)$$

dove $c_{k,b}$ è la celerità dell'onda caratteristica alla profondità di frangimento. La lunghezza dello spostamento può essere calcolata come (Lamberti & Tomasicchio, 1997):

$$l_d = \frac{1.4N_s^{**} - 1.3}{\tanh^2(kd)} D_{50} \quad (2.27)$$

N_{od} è stato determinato seguendo una procedura di calibrazione basata sul metodo dei minimi quadrati, applicato all'intero database. In particolare, per soddisfare la procedura di calibrazione, sono state considerate due diverse funzioni di approssimazione, dividendo i valori di N_{od} calcolati dai dati misurati in due sub-intervalli: il primo è riferito a bermbreakwaters e spiagge ghiaiose ($N_s^{**} \leq 23$) ed è stato interpretato mediante un polinomio approssimante del terzo ordine (Tomasicchio et al., 2007), mentre il secondo è riferito a spiagge sabbiose ($N_s^{**} > 23$) ed è stato interpretato mediante una regressione lineare in un piano bi-logaritmico.

Il coefficiente di correlazione stimato è pari a 0.89 per $N_s^{**} \leq 23$, e 0.92 per $N_s^{**} > 23$. Dopo la procedura di calibrazione, N_{od} può essere calcolato quindi mediante le seguenti espressioni:

$$N_{od} = \begin{cases} 20N_s^{**}(N_s^{**} - 2)^2 & N_s^{**} \leq 23 \\ \exp[2.72 \ln(N_s^{**}) + 1.12] & N_s^{**} > 23 \end{cases} \quad (2.28)$$

Infine, la portata di materiale solido longshore espressa in m^3/s può essere calcolata come:

$$Q_l = \frac{S_N D_{50}^3}{(1 - N) T_m} \quad (2.29)$$

dove T_m è il periodo medio delle onde e n il fattore di porosità.

Il modello GLT è stato verificato per diverse condizioni: dalle spiagge sabbiose fino a bermbreakwaters (Lamberti & Tomasicchio, 1997; Tomasicchio et al., 2013).

La Figura 2.36 mostra la relazione tra i valori di $S_N / \sin\theta_{k,b}$ calcolati e N_s^{**} (Tomasicchio et al., 2013); in funzione del valore di N_s^{**} , si possono distinguere tre regioni: la prima vale per $N_s^{**} < 6$ e si riferisce ai bermbreakwaters, la seconda è relativa alle spiagge di ciottoli e ghiaia ($6 < N_s^{**} < 23$) e la terza alle spiagge sabbiose ($N_s^{**} > 23$). I risultati consentono di confermare che il modello GLT fornisce stime affidabili del trasporto longshore per qualsiasi tipo di sedimento costiero.

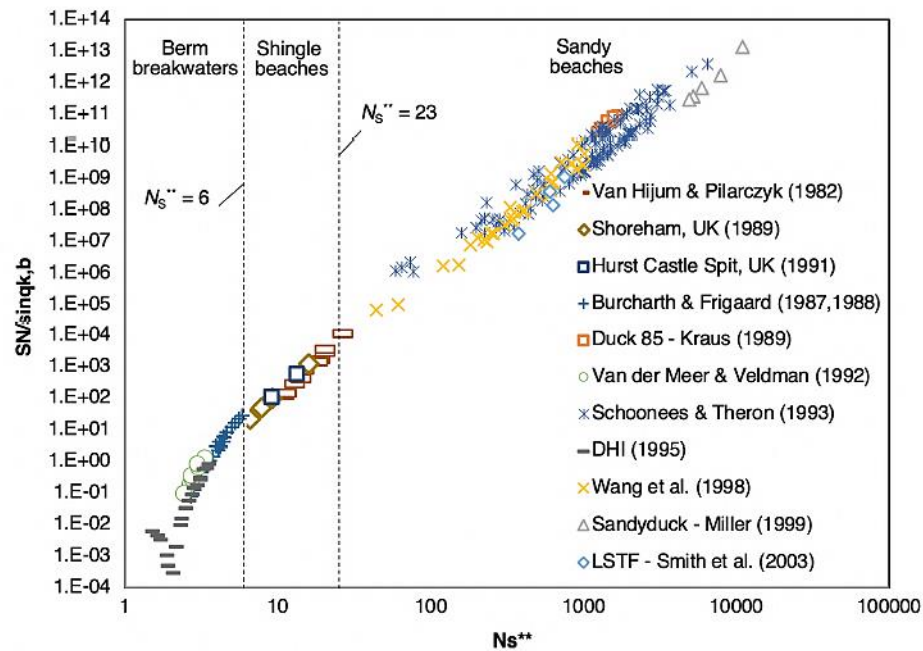


Figura 2.36: Valori di $S_N / \sin \theta_{k,b}$ calcolati rispetto a N_s^{**} (Tomasicchio et al., 2013).

Dunque, per la stima del trasporto solido longshore, gli unici modelli generali disponibili in letteratura validi per spiagge di sabbia, ghiaia e ciottoli sono rappresentati dal GLT di Tomasicchio et al. (2013) e dall'espressione di Van Rijn (2014). Tuttavia, è stato osservato che il modello GLT fornisce un migliore accordo con i dati sperimentali di campo e di laboratorio osservati rispetto alla formula di Van Rijn (2014) (Tomasicchio et al., 2015).

Recentemente un nuovo modello morfodinamico, basato su un database di esperimenti sul campo di alta qualità, è stato sviluppato per prevedere il trasporto longshore e la morfologia costiera associata su scale temporali a breve e lungo termine per diverse tipologie di spiaggia, costituite da granuli non coesivi di qualsiasi dimensione, dalla sabbia ai sassi (Tomasicchio et al., 2020).

La Figura 2.37 mostra il diagramma di flusso del modello GLT proposto per guidare l'utente in un'applicazione pratica.

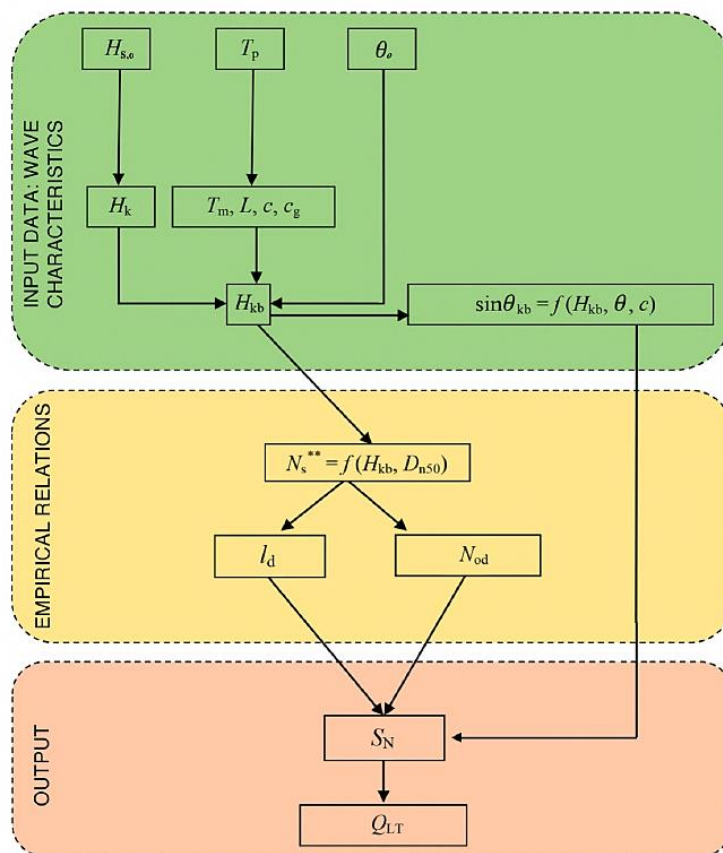


Figura 2.37: Diagramma di flusso del modello GLT (Tomasicchio et al. 2013).

Per quanto riguarda, invece, il trasporto solido trasversale, esso è strettamente legato al raggiungimento del profilo di equilibrio della spiaggia (Bruun, 1954; Dean, 1991): osservazioni sperimentali effettuate in canali di laboratorio mostrano che una spiaggia inizialmente piana, dopo la sollecitazione prolungata di un moto ondoso regolare, può assumere due forme che prendono il nome di profilo a gradoni e profilo a barra.

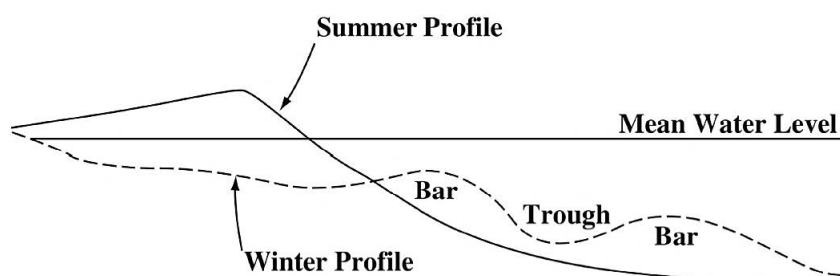


Figura 2.38: Effetti del trasporto cross-shore sui profili della spiaggia (Seymour, 2005).

Il trasporto solido cross-shore, infatti, è funzione delle condizioni di mareggiata e ad esso sono dovuti gli effetti stagionali del profilo trasversale, per cui generalmente si parla di profilo estivo (profilo a berma, ottenuto per onde poco ripide, tipiche della stagione estiva) e profilo invernale (caratterizzato dalla presenza di barre e truogoli e ottenuto per onde molto ripide, tipiche della stagione invernale) (Figura 2.38).

La quantificazione del trasporto solido trasversale è più complessa di quella del trasporto solido longitudinale, così come evidenziato dalle formulazioni analitiche e dai modelli sviluppati per la sua stima. Bailard (1981, 1982), ad esempio, ha proposto un metodo per calcolare il trasporto solido cross-shore, basato sull'approccio energetico formulato da Bagnold (1966), come funzione di una combinazione di momenti di velocità, pendenza locale del fondo e caratteristiche dei sedimenti (in particolare, coefficiente di attrito, angolo di attrito interno e velocità di sedimentazione), suddividendo inoltre il contributo in carico di fondo e carico sospeso.

Un altro modello molto complesso è quello proposto da Larson & Kraus (1995), il quale si basa sull'ipotesi fondamentale che la variazione del profilo trasversale del litorale sia correlata solamente all'azione del trasporto solido cross-shore e quindi l'effetto di una redistribuzione trasversale avvenga all'interno della medesima cella sedimentologica. Nel calcolo della variazione del profilo, il modello assume che il trasporto cross-shore sia indotto essenzialmente dal frangimento delle onde, dalla variazione del livello del mare per effetto del set-up e della marea e dalla geometria del profilo stesso.

2.3.11 Trasporto solido fluviale

La principale fonte di alimentazione di materiale sedimentario per le spiagge è costituita dagli apporti fluviali, fondamentali sia per la formazione che per l'esistenza della spiaggia stessa. Di conseguenza, l'equilibrio del sistema costiero è fortemente condizionato dalle variazioni del regime di trasporto sedimentario fluviale, le quali possono essere indotte da cause di origine sia naturale che antropica (Barbaro et al., 2019; Foti et al., 2019).

Le cause naturali di modificazione del trasporto sono individuabili nell'alternarsi di diversi regimi pluviometrici, mentre quelle antropiche sono legate principalmente ai diversi interventi di regimazione dei corsi d'acqua, al cambiamento dell'uso del suolo e al prelievo di materiale litoide dagli alvei (Zema et al., 2014; Versaci et al., 2018; Foti G. et al., 2020a).

Il quantitativo di sedimenti trasportati è influenzato dalla capacità delle correnti idriche di

trasportare materiali solidi di differente granulometria. Il letto fluviale, infatti, subisce continui cambiamenti di forma e composizione granulometrica in funzione delle continue variazioni di portata: in corrispondenza delle portate di piena vengono movimentati sedimenti lungo l'intero alveo, mentre le portate minori trasportano solo materiale sottile in una fascia ristretta attorno al thalweg; pertanto, a parità di condizioni idrodinamiche della corrente, la quantità di sedimenti trasportati varia in funzione dello stato dell'alveo.

I sedimenti provengono dall'erosione dei versanti e dall'evoluzione naturale del reticolo idrografico (per esempio dallo scavo del fondo dell'alveo e dall'erosione delle sponde) e il loro trasporto può avvenire secondo quattro distinte modalità:

- trascinalamento sul fondo (bed-load), caratteristico delle particelle grossolane che si muovono per strisciamento, rotolamento o saltellamento senza abbandonare mai il fondo dell'alveo; nel caso del saltellamento il materiale procede per salti, abbandonando temporaneamente il fondo, e ricadendo dopo aver percorso un certo tratto;
- sospensione (suspended load), caratteristico del materiale fine (argille, limi, sabbie) che si muove in seno alla corrente sostenuto dall'agitazione turbolenta;
- soluzione, deriva dalla dissoluzione chimica dei materiali rocciosi con cui l'acqua è venuta a contatto;
- fluitazione (wash-load), dovuto al galleggiamento di materiali leggeri e detriti arborei.

La distinzione tra materiale trasportato sul fondo e materiale trasportato in sospensione non è facile in quanto in prossimità del fondo vi è un continuo interscambio tra le due modalità di trasporto.

Tra i vari modelli esistenti per la valutazione della portata di materiale solido, quello di Gavrilovic (1959) è un modello empirico multiparametrico per la stima del volume di sedimenti prodotto dall'erosione idrica in un bacino e trasportato alla sezione di chiusura. Tale modello è particolarmente affidabile nei bacini caratterizzati da alte pendenze, tempi di corrivazione modesti e regime torrentizio, in cui il trasporto di sedimenti fluviali è principalmente correlato all'erosione del suolo da parte dell'acqua e si basa sulla seguente espressione:

$$G = W \cdot B \quad (2.30)$$

dove G rappresenta il volume medio annuo di materiale eroso che si raccoglie alla sezione di chiusura [$m^3/anno$], W è il volume potenziale medio annuo di materiale eroso [$m^3/anno$] e B è

un coefficiente di ritenzione, che tiene conto del processo di risedimentazione del materiale eroso all'interno del bacino e si basa su una formula empirica che correla il coefficiente di riduzione con le caratteristiche morfometriche del bacino e del reticolo idrografico.

Il termine W si può valutare mediante la seguente espressione:

$$W = T h \pi Z^{\frac{3}{2}} S \quad (2.31)$$

con:

- $T = \sqrt{\frac{t}{10} + 0.1}$ fattore di temperatura, calcolato sulla base dell'isoterma annuale media;
- t temperatura media annua del bacino [°];
- h altezza di precipitazione media annua [mm];
- S superficie del bacino [Km²];
- $Z = X \cdot Y(\phi + \sqrt{I})$ coefficiente di erosione relativa, calcolato sulla base dell'erodibilità del suolo, del tipo principale di processo erosivo, della pendenza media e della destinazione d'uso della superficie; si tratta del parametro direttamente influenzato dagli interventi antropici;
- X coefficiente che esprime l'azione protettrice della copertura vegetale e dell'intervento antropico; è tabellato in funzione della tipologia di copertura vegetale ed assume valori compresi tra 0.01 e 1 (Tabella 2.3);
- Y coefficiente di erodibilità del suolo; è tabellato in funzione delle formazioni affioranti (Tabella 2.4);
- ϕ coefficiente tabellato in funzione del tipo di erosione in atto sul territorio (Tabella 2.5);
- I pendenza media del bacino.

Il termine B si può valutare mediante la seguente espressione:

$$B = \frac{\sqrt{PH_m} (L + L_i)}{S(L + 10)} \quad (2.32)$$

dove P rappresenta il perimetro del bacino [Km], H_m il dislivello del bacino [Km], L la lunghezza dell'asta principale [Km] e L_i la lunghezza totale degli affluenti [Km].

Tabella 2.3: Valori di X tabellati in funzione della tipologia di copertura vegetale.

Tipologia di copertura vegetale	X
Terreno completamente non coltivabile	0.95
Frutteti e vigneti senza vegetazione al suolo	0.60
Pascoli, boschi degradati e boscaglie con suolo eroso	0.35
Prati, campi di trifoglio e altre colture simili	0.20
Boschi o boscaglie densi e di buona struttura	0.01

Tabella 2.4: Valori di Y tabellati in funzione della tipologia di formazioni affioranti.

Tipologia di formazione affiorante	Y
Rocce dure, resistenti all'erosione	0.45
Rocce di media resistenza all'erosione	0.80
Rocce friabili, stabilizzate (detriti, argille compatte)	1.00
Sedimenti, morene, argille e rocce poco resistenti	1.40
Sedimenti fini e terre non resistenti all'erosione	1.90

Tabella 2.5: Valori di ϕ tabellati in funzione del tipo di erosione in atto sul territorio.

Tipo ed estensione dell'erosione osservata	ϕ
Erosione bassa	0.1 – 0.2
Processi erosivi nei corsi d'acqua in atto per il 20 – 50 % dell'area	0.3 – 0.5
Erosione nei fiumi, guglie e depositi alluvionali, erosione carsica	0.6 – 0.7
50 – 80 % del bacino di drenaggio sottoposto ad erosione superficiale	0.8 – 0.9
Erosione sull'intero territorio	1.00

Zemljic (1971) ha proposto la seguente espressione per il calcolo del coefficiente di riduzione B :

$$B = \frac{\sqrt{PH_m L_n}}{S(L + 10)} \quad (2.33)$$

in cui L_n è la lunghezza totale del reticolo idrografico del bacino.

2.3.12 Opere di difesa

L'inserimento di opere di difesa nella zona costiera condiziona l'andamento delle correnti litoranee e il trasporto litoraneo ad esse associato, contribuendo talvolta ad accentuare l'erosione (D'Alessandro et al., 2011). Le opere e gli interventi di difesa costiera si possono classificare in base alla tipologia in opere di difesa attiva e passiva, in base allo scopo in opere di difesa diretta e indiretta.

Le opere di difesa passiva proteggono il litorale ma non consentono un miglioramento della condizione del litorale stesso. Sono, generalmente, interventi urgenti e provvisori ma possono diventare definitivi se la tendenza evolutiva naturale del litorale è contrastabile solo attraverso interventi particolarmente onerosi. In questa tipologia di interventi rientrano, ad esempio, i muri paraonde che resistono per gravità e hanno il vantaggio che a causa delle caratteristiche di urgenza e provvisorietà necessitano di studi poco approfonditi, paratie e diaframmi, che hanno peso trascurabile e resistono grazie alla spinta passiva del terreno, oppure le gettate di massi alla rinfusa vengono effettuate con tutti i tipi di massi disponibili in loco, anche se insufficienti per quantità e dimensioni.

Le opere di difesa attiva, invece, proteggono il litorale e consentono un miglioramento della condizione esistente. Devono essere progettati tenendo conto delle cause dei fenomeni erosivi per cui necessitano di studi approfonditi e si distinguono in opere fisse (barriere e pennelli) ed interventi morbidi (ripascimenti semplici e protetti).

Le opere di difesa diretta contrastano direttamente le mareggiate, tra di esse rientrano le opere di difesa passiva e le scogliere parallele. Le opere di difesa indiretta, invece, non si oppongono al moto ondoso ma permettono la formazione o l'accrescimento della spiaggia, tra di esse rientrano i pennelli ed i ripascimenti. Inoltre, sistemi di difesa naturali possono essere considerate anche le dune costiere, ampiamente trattate in un paragrafo precedente.

Di seguito si descrivono sinteticamente le opere di difesa sopra citate. I muri paraonde vengono, generalmente, realizzati per proteggere centri abitati o infrastrutture viarie e ferroviarie e possono essere caratterizzati da una porzione di arenile al piede oppure possono essere a diretto contatto con il mare. Comunemente, la presenza di un muro paraonde è accompagnata da quella di un taglione in calcestruzzo o di un diaframma lato mare, oppure di una platea o pali di fondazione, la cui realizzazione serve per contrastare il fenomeno del sifonamento. Alternative più economiche ai muri paraonde sono rappresentate dai rivestimenti delle scarpate, che riducono la risacca al piede, ma necessitano di spazi notevoli tra sommità e piede del rilevato.

Le scogliere radenti (o aderenti) vengono generalmente realizzate a protezione e a ridosso di strutture esistenti oppure in spiagge di ampiezza molto ridotta con costruzioni ed infrastrutture immediatamente retrostanti (Figura 2.39). La risacca al piede è meno accentuata rispetto alle opere rigide in quanto la permeabilità dell'opera, la pendenza lato mare ridotta e l'attrito della scarpata lato mare aumentano la dissipazione di energia. Le scogliere possono essere realizzate in massi naturali, miste con massi sia naturali che artificiali o a gabbionate metalliche.



Figura 2.39: Scogliera radente a ridosso di una struttura esistente (a sinistra) o di un'infrastruttura ferroviaria (a destra) (fonte: Atlante APAT).

Le barriere si realizzano nel caso in cui le mareggiate più intense siano pressoché perpendicolari alla costa. Si posizionano su fondali profondi, generalmente, circa 3 m per contenere i costi, possono essere emergenti (devono essere opportunamente segnalate) o sommerse e si possono classificare in base al rapporto tra la lunghezza del litorale protetto e la distanza dalla linea di costa. In particolare, le barriere emerse consentono alla massa d'acqua di ritornare verso il largo solo attraverso i varchi ed in minima parte di filtrare attraverso i massi costituenti la barriera; le barriere sommerse, invece, permettono che una considerevole quantità di acqua torni verso il largo attraverso lo spazio presente fra la cresta della struttura e la superficie libera.

Le barriere inducono le onde a frangere, dissipando energia lontano da riva e diminuendo così il potere erosivo che il mare esercita sul litorale. Esse, infatti, generano un avanzamento del litorale a tergo di esse in quanto il moto ondoso tracimante e quello diffratto subiscono uno smorzamento tale da depositare i sedimenti trasportati mentre provocano erosioni, generalmente di lieve entità, nei litorali limitrofi (Figura 2.40). Si realizzano, generalmente, in massi naturali per contenere costi ed impatti ambientali e paesaggistici. In particolare, l'entità dell'avanzamento aumenta al diminuire della pendenza del fondale e delle dimensioni dei sedimenti e all'aumentare

dell'intensità e nel caso di mareggiate ortogonali alla costa.



Figura 2.40: Barriere in serie a Skagen (Danimarca) (fonte: Atlante APAT).

I pennelli, invece, riducono l'asportazione trasversale dei sedimenti e si posizionano, generalmente, su bassi fondali ed ortogonali alla riva per cui sono soggetti a sollecitazioni ondose di modesta entità e si possono realizzare utilizzando massi naturali di dimensioni contenute, reperibili in prossimità del luogo di impiego. Sono consigliabili in presenza di fondali sabbiosi a debole pendenza mentre in presenza di pendenze elevate sono caratterizzati da lunghezze modeste e non risultano particolarmente efficaci. Non si realizzano, generalmente, isolati ma in serie. Sono caratterizzati da impatti paesaggistici significativi e da impatti ambientali modesti in quanto garantiscono il ricambio idrico. Nei paraggi molto esposti al moto ondoso ed in presenza di mareggiate dominanti provenienti da direzione opposta a quella del trasporto longitudinale è consigliabile realizzare pennelli maggiormente resistenti e non disporli ortogonalmente alla costa ma inclinati. Tali pennelli possono essere costituiti da un singolo tratto o da due tratti con inclinazioni diverse (il primo dei quali generalmente ortogonale alla costa).

I pennelli generano degli effetti sui litorali limitrofi e determinano la formazione di un andamento regolare della linea di riva chiamato "spiaggia a denti di sega". In particolare, determinano: avanzamento della linea di riva sopraflutto; piccolo avanzamento immediatamente a ridosso del pennello sottoflutto, a causa dell'attenuazione del moto ondoso per diffrazione in corrispondenza della testa dell'opera; erosione della spiaggia sottoflutto (Figura 2.41). Avanzamenti ed erosioni aumentano al diminuire della permeabilità.



Figura 2.41: Serie di pennelli a Capo d'Orlando (ME) (fonte: Atlante APAT).

Le difese a pettine sono costituite da opere sia perpendicolari che parallele alla costa, come i pennelli a T, e permettono anche di creare celle protette (Figura 2.42). Garantiscono una maggiore protezione del litorale rispetto alla realizzazione di sole barriere o di soli pennelli ma peggiorano sia la qualità dell'acqua nello specchio acqueo protetto, a causa dello scarso ricambio idrico, che la qualità dei sedimenti, a causa della riduzione del contatto con le onde e dello scambio con i fondali adiacenti.



Figura 2.42: Serie di pennelli a T a Paola (CS) (fonte: Atlante APAT).

I ripascimenti consistono nel versamento di sedimenti sulla spiaggia e nei fondali adiacenti e possono essere semplici o protetti mediante opere rigide. Si tratta di interventi che non agiscono sulle cause dei fenomeni erosivi per cui consentono un miglioramento solo temporaneo, prolungabile mediante versamenti periodici, la cui frequenza ed entità possono essere ridotte mediante le opere protettive. Si tratta di interventi a bassissimo impatto ambientale e paesaggistico, che non riducono il ricambio idrico e possono avere effetti benefici sui litorali limitrofi (in quanto una parte

dei sedimenti versati viene rimossa dal moto ondoso e versata su di essi). I materiali utilizzati per l'intervento di ripascimento possono essere prelevati da cave terrestri oppure da depositi sottomarini vicini al luogo di intervento. Per ridurre il quantitativo di materiale da versare è possibile realizzare uno strato di base di materiale di pezzatura maggiore di quella presente: tale soluzione conferisce maggiore stabilità ai sedimenti versati ma genera elevati impatti ambientali nel caso in cui avvenga la rimozione dello strato di materiale fine (è necessario, quindi, garantire versamenti frequenti) (Figura 2.43).



Figura 2.43: Realizzazione del ripascimento della spiaggia dei Maronti (Ischia) (fonte: Atlante APAT).

Tuttavia, le metodologie tradizionali per la progettazione delle difese costiere non tengono conto della non stazionarietà dei processi naturali e pertanto non sono efficaci rispetto agli effetti dei cambiamenti climatici, nei confronti dei quali è invece necessario un nuovo approccio, basato su una gestione integrata delle zone costiere (Foti E. et al., 2020).

2.3.13 Opere portuali

A partire dagli anni '50 del secolo scorso il territorio italiano è stato oggetto di intensi processi di antropizzazione, che hanno favorito la costruzione di nuovi porti e l'ampliamento della maggior parte di quelli esistenti, in seguito ad un aumento del traffico marittimo con diverse finalità. Tuttavia, la realizzazione di opere portuali può interferire con le dinamiche costiere alterando le condizioni naturali delle coste, anche a distanze considerevoli da esse (Foti et al., 2021c).

Pertanto, nell'ottica della valutazione del rischio costiero, la presenza di tali opere rappresenta un importante fattore da tenere in considerazione. Esistono diversi sistemi di classificazione dei porti: innanzitutto, in base alla funzione svolta, si possono distinguere porti commerciali, industriali, militari, da pesca, turistici, intermodali, ecc. Tuttavia, nell'ambito dello studio, un aspetto maggiormente interessante riguarda la disposizione rispetto alla costa delle opere portua-

li esterne (dighe o moli) e l'ubicazione del bacino portuale, che, in alcuni casi, possono alterare significativamente le dinamiche costiere, innescando e propagando fenomeni erosivi.

Dal punto di vista della collocazione del bacino portuale rispetto alla linea di costa è possibile suddividere i porti in due gruppi principali: i porti interni, costruiti lungo fiumi o all'interno di laghi o lagune, ed i porti esterni che sono situati lungo la costa con accesso diretto al mare. I porti esterni, a loro volta, possono differenziarsi in porti artificiali, costruiti completamente dall'uomo con opere che proteggono dall'esposizione al mare aperto, o porti naturali, costruiti sfruttando una particolare morfologia della costa come rade o baie che offrono una protezione naturale (Figura 2.44).



Figura 2.44: Caratteristica falce del porto naturale di Messina.

Le differenti disposizioni dei moli e delle dighe, invece, consentono di individuare alcuni schemi planimetrici maggiormente utilizzati per la realizzazione dei porti, quali, ad esempio: porto a bacino, porto isola, porto canale, porto a moli convergenti, porto con diga foranea di protezione.



Figura 2.45: Porto a bacino di Arenzano.

Un porto a bacino (Figura 2.45) è usualmente costituito da uno o due moli guardiani collegati alla costa: il molo sopraflutto si oppone alle onde dominanti, mentre quello sottoflutto serve a contrastare quelle secondarie.

La tipologia di porto a isola (Figura 2.46) è un'opera costruita a largo della costa, collegata ad essa mediante un pontile di connessione e protetta da una diga frangiflutti.

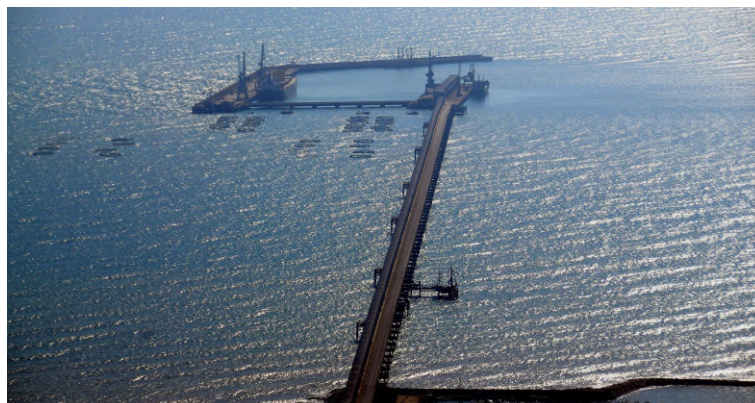


Figura 2.46: Porto a isola di Manfredonia.

Il porto canale (Figura 2.47), invece, rappresenta un'evoluzione artificiale degli scali naturali nati alla foce di un fiume o all'interno di specchi d'acqua lagunari, caratterizzati da una pendenza molto modesta senza brusche variazioni; le sponde del canale sono protette da dighe o moli perpendicolari al litorale, che delimitano l'imboccatura.



Figura 2.47: Porto a canale (Cervia).

Nel porto a moli convergenti (Figura 2.48) la particolare conformazione dei moli ha l'effetto di attenuare il moto ondoso e delimitare l'imboccatura.



Figura 2.48: Porto a moli convergenti di Gioia Tauro.

Infine, il porto con diga foranea di protezione rappresenta una variante delle tipologie precedenti, con l'aggiunta di un'ulteriore protezione all'imboccatura del porto costituita da una diga approssimativamente parallela alla costa (Figura 2.49).



Figura 2.49: Porto di Genova con diga foranea di protezione.

Capitolo 3

Valutazione del rischio costiero

In questo capitolo sarà effettuata una ricerca ed analisi bibliografica delle principali metodologie di valutazione del rischio da erosione costiera presenti sia nell'ambito della letteratura scientifica che nell'ambito normativo e delle pubbliche amministrazioni, in modo da ottenere un quadro completo dello stato dell'arte.

3.1 Il concetto di rischio

In letteratura diverse sono le definizioni e i metodi di valutazione del rischio. In generale, il rischio (R) può essere definito, rifacendosi al rapporto dell'Unesco (Varnes & Iaeg, 1984), come il prodotto delle dimensioni del danno atteso per la probabilità che l'evento accada. Poiché il danno atteso, a sua volta, può essere espresso come il prodotto della vulnerabilità dei beni a rischio per il loro valore (o esposizione), valgono equivalentemente le due espressioni riportate di seguito:

$$R = P \cdot D \quad (3.1)$$

$$R = H \cdot V \cdot E \quad (3.2)$$

dove:

- Pericolosità (P) o Hazard (H): probabilità che in una zona si verifichi un evento potenzialmente dannoso con una certa intensità entro un dato periodo di tempo (che può essere il “periodo di ritorno”); la pericolosità è quindi funzione anche della frequenza dell'evento e si tratta di un fattore intrinseco all'evento e/o al sito a cui si riferisce la quantificazione del rischio;

- Danno (D): danni socio-economici provocati dall'evento considerato nel sito in esame; è un fattore estrinseco, legato alla distribuzione e densità di beni che possono essere messi a repentaglio dall'evento stesso;
- Vulnerabilità o Vulnerability (V): attitudine di un determinato "elemento" (popolazione, edifici, infrastrutture, attività economiche, servizi sociali, risorse naturali, ecc.) a sopportare gli effetti in funzione dell'intensità dell'evento; in altre parole, la vulnerabilità esprime il grado di perdita di un dato elemento o di una serie di elementi risultante dal verificarsi di un fenomeno dannoso, espressa in una scala da 0 (nessun danno) a 1 (distruzione totale).
- Valore o Esposizione, Exposure (E): è il valore dell'elemento a rischio e può essere espresso dal numero di persone umane, dal valore di una proprietà, dalla capacità produttiva (industrie, aziende agricole, ecc.) o dal valore di una risorsa naturale (acqua, suolo, bosco, ecc.) utilizzata o utilizzabile dalla società umana, ecc.

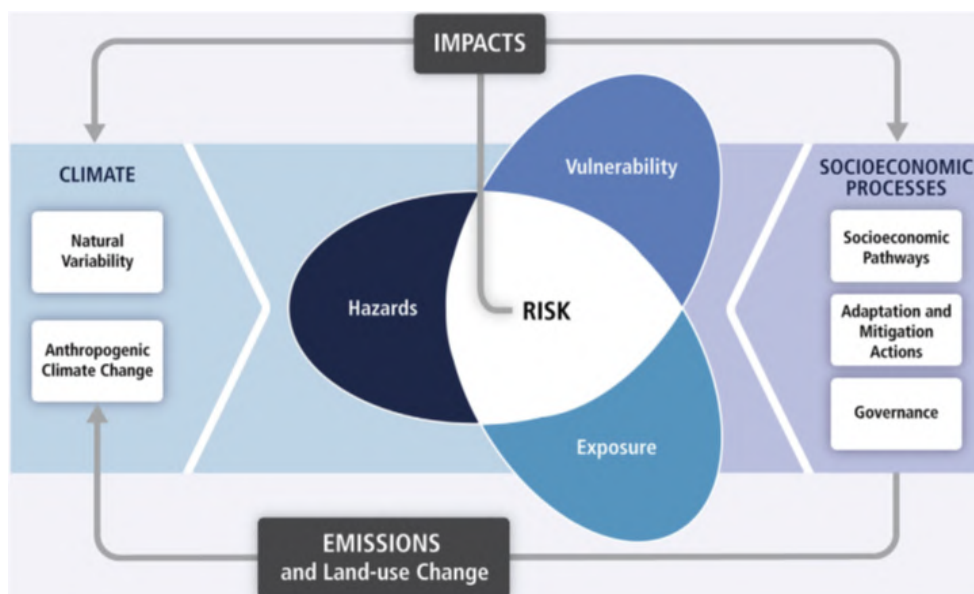


Figura 3.1: Schema dell'interazione tra pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, che danno luogo al rischio (Fonte: IPCC, 2014).

Anche secondo l'IPCC (Figura 3.1), nel Quinto rapporto di valutazione – Sintesi per i decisori politici – il rischio per gli impatti legati al clima viene definito come il risultato dell'interazione della pericolosità con la vulnerabilità e l'esposizione dei sistemi umani e naturali (IPCC, 2014).

Nello stesso rapporto, l'IPCC introduce il ruolo dei driver non climatici (cambiamento climatico antropogenico).

In letteratura scientifica, anche altri (Davidson & Lambert, 2001; Peduzzi et al., 2009) hanno proposto per la valutazione del rischio una formula moltiplicativa, basata sulla formulazione standard del rischio come prodotto (o più correttamente, convoluzione) di pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

3.2 Classificazione delle metodologie di valutazione del rischio

La definizione del rischio sopra descritta è, tuttavia, molto generale; spesso, infatti, a causa della difficoltà di valutazione del valore degli elementi esposti, per stimare il rischio costiero si fa riferimento ad altri indicatori o metodi che danno una misura della vulnerabilità costiera ed è per questo motivo che la gran parte dei metodi esistenti sono focalizzati sulla vulnerabilità piuttosto che sulla valutazione del rischio.

Generalmente, tali metodi possono appartenere a quattro categorie differenti (Ramieri et al., 2011; Satta, 2014):

- metodi basati su indici o indicatori, con possibili applicazioni GIS;
- sistemi di supporto decisionale basati su GIS;
- metodi basati su modelli di calcolo dinamici;
- strumenti di visualizzazione.

I metodi basati su indici e/o indicatori sono quelli più semplici e diffusi: si basano su una valutazione quantitativa o semi-quantitativa di diverse variabili o indicatori che vengono poi combinati tra loro, mediante un set appropriato di pesi, ottenendo come risultato finale un indice complessivo, il Coastal Vulnerability Index (CVI); rispetto agli indici, l'approccio basato su indicatori permette di descrivere il grado di vulnerabilità della costa mediante una serie di parametri legati al fenomeno dell'erosione costiera, in termini di forzanti, esposizione al rischio, ecc.

Recentemente, alcune metodologie hanno definito degli indicatori di processo, in quanto permettono di esprimere il risultato dei processi costieri, riflettendo caratteristiche sia idrodinamiche che morfologiche, come ad esempio ritiro della costa o della duna, erosione verticale e profondità ed estensione dell'inondazione (Ferreira et al., 2017).

Naturalmente, esistono diverse formulazioni del CVI originale (Gornitz et al., 1991) a seconda della scala di applicazione, del numero di variabili considerate e delle possibilità di considerare gli aspetti socioeconomici: esempi sono rappresentati dal “Composite Vulnerability Index” (Szlafsztein & Sterr, 2007) e dal “Multi-scale Coastal Vulnerability Index”, sviluppato da McLaughlin & Cooper (2010). Inoltre, tali metodi possono essere supportati da applicazioni GIS, ovvero è possibile produrre mappe che permettano di descrivere la distribuzione spaziale dell’indice CVI, oltre alla possibilità di sovrapporre tali risultati con ulteriori informazioni spaziali.

I sistemi di supporto decisionale (Decision Support Systems, DSSs) basati su GIS sono strumenti che richiedono competenze GIS specifiche e capacità tecniche avanzate: tali sistemi permettono di costruire scenari derivanti da potenziali impatti del cambiamento climatico in modo da sostenere le amministrazioni o i portatori di interesse nelle decisioni riguardanti la gestione del territorio. Esempi sono “DESYCO” (Torresan et al., 2010) e “DYTTY- DSS” (Mocenni et al., 2009).

I metodi basati su modelli di calcolo dinamici mirano a modellare le condizioni attuali e potenziali future di processi geofisici, biologici e/o socioeconomici. In particolare, tali modelli permettono di valutare la vulnerabilità dei sistemi costieri a molteplici impatti dovuti ai cambiamenti climatici, analizzando anche l’interazione tra i diversi effetti. La complessità dei modelli richiede generalmente hardware e software adeguati e competenze scientifiche avanzate. Alcuni esempi sono rappresentati dai seguenti modelli: DIVA (Hinkel & Klein, 2009), DELFT 3D, HAZUS-MH, SimClim (Warrick, 2009), ecc.

Infine, gli “strumenti di visualizzazione” sono stati aggiunti come categoria perché sono spesso applicati come strumento semplificato di valutazione della vulnerabilità. Questi strumenti sono immaginati per simulare le attuali e potenziali condizioni future degli impatti dei cambiamenti climatici. Rappresentano un’applicazione basata su GIS più semplice da usare e non richiedono software o hardware specializzati (Rozum & Carr, 2013).

3.3 I metodi basati su indici

I metodi basati su indici e quelli basati su GIS sono caratterizzati da un processo di calcolo relativamente semplice e pertanto sono di facile utilizzo, a differenza, ad esempio, di quelli basati su modelli di calcolo dinamici, che invece richiedono un certo grado di esperienza per poter essere usati correttamente (Satta et al., 2017). La definizione di un metodo basato su indici coincide con

quella di un indice, spesso identificato dal Coastal Vulnerability Index (CVI), la cui valutazione permette di individuare i tratti costieri che possono risultare più vulnerabili agli impatti ambientali (nel caso specifico rappresentati da erosione, inondazione o intrusione di acqua salata). Il limite più grande di questa formulazione è stato identificato nell'incapacità di valutazione degli aspetti socio-economici (Gornitz et al., 1993; Cooper & McLaughlin, 1998).

Nella determinazione di un metodo basato su indici, il primo passo da compiere consiste nell'individuazione delle variabili chiave che entrano in gioco nella dinamica costiera, influenzandone la sua vulnerabilità (Gornitz et al., 1991). In generale, la formulazione del CVI comprende 6 o 7 variabili. Il secondo passo metodologico riguarda, invece, la quantificazione delle variabili, generalmente basata sulla definizione di punteggi semiquantitativi secondo una scala da 1 a 5, dove 1 indica che la variabile rende poco vulnerabile il litorale, mentre a 5 corrisponde un grado alto di vulnerabilità (Gornitz, 1990; Hammer-Klose & Thieler, 2001). La terza ed ultima fase riguarda l'applicazione prettamente numerica della metodologia e quindi la scelta di una formula matematica che permetta di integrare tutte le variabili prima identificate e quantificate in un unico indice.

Ogni fase del processo di definizione della metodologia, dunque, porta con sé delle scelte oggettive, o soggettive, dettate o meno dalla disponibilità dei dati e dalla scala di applicazione del metodo, che la rendono utilizzabile in modo sempre nuovo e diverso. È questo il motivo per cui, infatti, nonostante tale metodologia sia abbastanza semplice, non esiste un approccio standardizzato, riguardante il tipo di indicatori considerati, il modo in cui sono classificati e la formula utilizzata per combinare le variabili che differiscono tra gli studi (Gornitz, 1990; Balica et al., 2012; McLaughlin et al., 2002; Ramieri et al., 2011).

Ad esempio, per quanto riguarda le formule utilizzate per la determinazione del CVI, diverse forme matematiche sono state proposte e testate (Gornitz et al., 1992; 1997) (Figura 3.2).

La quinta formulazione del CVI è stata ampiamente utilizzata in applicazioni a livello locale, regionale e sovrrregionale (Ojeda-Zújar et al., 2009; Fraile Jurado, 2011; Abuodha & Woodroffe, 2006). Lo U.S. Geological Survey (USGS), ad esempio, ha utilizzato questa formulazione per valutare la potenziale vulnerabilità della costa degli Stati Uniti su scala nazionale (Thieler & Hammar-Klose, 1999) e su una scala più dettagliata per il National Park Service degli Stati Uniti (Thieler et al., 2002).

Product mean:	$CVI_1 = \frac{(x_1 * x_2 * x_3 * x_4 * \dots * x_n)}{n}$
Modified product mean:	$CVI_2 = \frac{[x_1 * x_2 * \frac{1}{2}(x_3 + x_4) * x_5 * \frac{1}{2}(x_6 + x_7)]}{n - 2}$
Average sum of squares:	$CVI_3 = \frac{(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + \dots + x_n^2)}{n}$
Modified product mean (2):	$CVI_4 = \frac{(x_1 * x_2 * x_3 * x_4 * \dots * x_n)}{5^{(n-4)}}$
Square root of product mean:	$CVI_5 = [CVI_1]^{1/2}, \quad \text{and}$
Sum of products:	$CVI_6 = 4x_1 + 4x_2 + 2(x_3 + x_4) + 4x_5 + 2(x_6 + x_7).$
Where: n=variables present	x_1 =mean elevation
x_2 =local subsidence trend	x_3 =geology
x_4 =geomorphology	x_5 =mean shoreline displacement
x_6 =maximum wave height	x_7 =mean tidal range.

Figura 3.2: Differenti formule testate da Gornitz et al. (1992; 1997) per la definizione del CVI.

In particolare, l'USGS ha considerato sei variabili, combinate attraverso la seguente equazione 3.3:

$$CVI = \sqrt{\frac{(a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f)}{6}} \quad (3.3)$$

dove: a rappresenta la geomorfologia, b il tasso di variazione della linea di costa, c la pendenza costiera, d la velocità del livello relativo del mare, e l'altezza significativa media ed f la variazione media di marea. Bisogna osservare che tale forma matematica permette da un lato di espandere il range di valori, tuttavia, può essere molto sensibile a piccoli cambiamenti nei singoli fattori.

Un'altra tipologia di indice interessante è stata sviluppata da McLaughlin & Cooper (2010) ed è rappresentata dal cosiddetto CVI "Multi-scale": la caratteristica di tale indice, infatti, risiede proprio nella parola stessa, in quanto può essere applicato su diverse scale spaziali (nazionale, regionale e locale), supportando così l'analisi multi-scala che è importante per la pianificazione e la gestione dei territori costieri (McLaughlin et al., 2002). Il CVI multi-scala è piuttosto facile da calcolare e si basa sulla determinazione di tre sottoindici: un sottoindice caratteristico del sistema costiero (CC), che descrive la resilienza e la suscettibilità costiera all'erosione, un sottoindice rappresentativo della forzante costiera (CF), calcolato in funzione delle variabili che contribuiscono

all'erosione indotta dalle onde, e un sottoindice socioeconomico (SE), che descrive gli elementi potenzialmente a rischio. Il calcolo di ogni sottoindice è determinato sulla base di diverse variabili, la cui identificazione specifica (numero e tipologia) dipende dalla scala dell'applicazione considerata. La Figura 3.3 illustra le variabili utilizzate per determinare i tre sottoindici su scala nazionale, nell'applicazione fatta per l'Irlanda del Nord (McLaughlin et al., 2002; McLaughlin & Cooper, 2010). Utilizzando una selezione delle variabili utilizzate su scala nazionale, gli stessi autori hanno applicato l'indice CVI multi-scala anche alla scala regionale e locale.



Figura 3.3: Variabili utilizzate nell'applicazione del CVI multi-scala su scala nazionale in Irlanda del Nord (McLaughlin & Cooper, 2010).

Seguendo Gornitz (1990), le variabili identificate sono state classificate in una scala da 1 a 5 al fine di esprimere il loro contributo alla vulnerabilità del sistema costiero, intendendo sempre con 5 il valore più alto e 1 il più basso. Per quanto riguarda la forma matematica utilizzata, i sottoindici vengono calcolati come somma dei valori delle variabili relative e il numero così ottenuto viene poi normalizzato nell'intervallo 0-100. Ad esempio, nel caso dell'applicazione su scala nazionale, essendo 7 le variabili per il sottoindice CC, 4 quelle del CF e 6 quelle del SE, i tre sottoindici sono stati calcolati con le seguenti formule:

$$CC = \{[(\text{sum of } CC \text{ var.}) - 7] \div 28\} \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$CF = \{[(\text{sum of } CF \text{ var.}) - 4] \div 16\} \cdot 100 \quad (3.5)$$

$$SE = \{[(\text{sum of } SE \text{ var.}) - 6] \div 24\} \cdot 100 \quad (3.6)$$

L'indice CVI finale viene calcolato come media dei tre sottoindici:

$$CVI = \frac{(CC + CF + SE)}{3} \quad (3.7)$$

Tale metodologia, inoltre, permette di visualizzare i valori di CVI ottenuti come mappa di vulnerabilità. Sulla base del CVI multi-scala è stata in seguito sviluppata la metodologia CRI-MED (v. par. 3.6), in quanto è stato ritenuto come il metodo più idoneo alla valutazione della vulnerabilità per l'area mediterranea (Satta et al., 2017).

3.4 Problematiche relative alle metodologie di valutazione del rischio

Non esiste un metodo unico per valutare la vulnerabilità e il rischio delle coste, infatti, i metodi esistenti differiscono per complessità, per il numero di processi che includono, per le diverse variabili e le tipologie di dati considerati, nell'applicazione su varie scale (McLeod et al., 2010) e nei loro risultati.

Problemi di scala

Un aspetto molto importante che bisogna tenere in considerazione nello sviluppo di un sistema di valutazione del rischio costiero riguarda la scala di applicabilità del metodo: ad esempio, infatti, l'elaborazione di un modello applicabile ad un livello nazionale o addirittura europeo potrebbe comportare l'utilizzo di una risoluzione spaziale poco precisa, perché una scala troppo dettagliata potrebbe rendere l'attuazione del metodo troppo complessa o addirittura impossibile, a causa dell'indisponibilità dei dati per l'intero territorio, dell'eccessivo tempo di calcolo o della visualizzazione confusa dei risultati.

D'altra parte, invece, uno studio a livello locale deve tener in conto un aumento delle incertezze, a causa di mancanza di informazioni, nella stima di alcuni fenomeni, generalmente descritti a livello globale, come, ad esempio, l'aumento del livello del mare. Per questo motivo, i metodi di valutazione dovrebbero prendere in considerazione le informazioni regionali sull'innalzamento del livello del mare, sui tassi di subsidenza, ecc., piuttosto che sulle medie globali o europee.

Scale temporali

Un altro aspetto particolarmente importante nello studio dell'erosione costiera riguarda la varietà delle scale temporali da considerare per i diversi fattori che entrano in gioco: serviranno quindi

delle scale temporali lunghe per la valutazione, ad esempio, di trasporto solido, subsidenza, innalzamento del livello del mare, e delle scale temporali brevi, invece, per i processi meteo marini quali venti, onde e correnti.

Multi-hazard

L'impatto dei cambiamenti climatici sulle coste non include soltanto il fenomeno dell'erosione costiera, ragion per cui spesso i modelli di valutazione del rischio sono detti "multi-hazard", ovvero permettono di tenere in considerazione oltre alla pericolosità da erosione anche quella da inondazione. A causa dell'innalzamento del livello del mare, infatti, è necessario studiare anche frequenze e intensità delle inondazioni costiere, il cui impatto è molto rilevante per gli insediamenti urbani, industriali, per le infrastrutture ma anche per le risorse naturali presenti nelle zone costiere: conseguenza diretta di questo fenomeno, infatti, sono anche gli impatti che riguardano l'intrusione di acqua salata nei sistemi di acqua dolce, quali fiumi, laghi e acque sotterranee e gli impatti sulle zone umide.

Disponibilità dei dati

Un problema che incide sull'efficacia e la completezza dei metodi di valutazione del rischio riguarda la non disponibilità o comunque la disponibilità in quantità limitata di dati necessari per affrontare lo studio su scala locale. Tale limite, insieme alla difficoltà di attribuire spesso una valutazione quantitativa ad alcuni parametri (quali la presenza e lo stato di opere di difesa costiera, lo stato di conservazione di sistemi dunali, ecc.), comporta una grande disomogeneità nell'utilizzo dei fattori considerati per la valutazione del rischio costiero nel panorama nazionale e internazionale (Figura 3.4), come descritto nel paragrafo successivo.

FATTORI		ITALIA										ESTERO					
		ABR	BAS	CAL	CAMP	EM.RO.	MOL	PUG	SAR	SIC	VEN	POR	FRA	SCO	MAR	R.U.	CERA
PERICOLOSITA'	SLR (sea level rise)																
	Marea																
	Clima ondosio di largo																
	Trasporto solido litoraneo																
	Trasporto solido fluviale																
VULNERABILITA'	Geologia della costa																
	Evoluzione della linea di costa																
	Morfologia spiaggia emersa																
	Morfologia spiaggia sommersa																
	Sistemi dunali (larghezza, altezza media)																
	Vegetazione																
	Presenza di opere di difesa costiera																
	Presenza di opere di difesa portuale																
	Grado di impermeabilizzazione della superficie costiera																

Figura 3.4: Fattori per la valutazione del rischio costiero presi in esame dalle principali metodologie utilizzate in Italia ed all'Estero.

3.5 Analisi delle metodologie di valutazione del rischio costiero in Italia

Prima degli anni 2000 non esistevano norme internazionali e nazionali riguardanti la valutazione del rischio costiero. Tuttavia, a causa dell'incremento degli intensi fenomeni di erosione ed inondazione, che hanno colpito le coste sia a livello mondiale sia europeo, e delle previsioni di innalzamento del livello del mare, connesso ai cambiamenti climatici, il problema della difesa delle coste è diventato all'ordine del giorno degli Organismi internazionali, tanto da indurre nel 2001 il Parlamento europeo a sollecitare la Commissione Europea a sviluppare un progetto per le politiche di difesa dall'erosione costiera, denominato EUROSION, e commissionato a un consorzio guidato dall'Istituto Nazionale per la gestione delle coste e del mare del Ministero dei Trasporti, Lavori Pubblici e Gestione delle Acque dell'Olanda.

Sulla base delle indicazioni riportate in tale progetto, conclusosi nel 2004, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha definito e calcolato per le coste italiane per l'intervallo temporale 1990-2000 l'Indice di Rischio (*IR*) in funzione dell'Indice di Sensitività Costiera (*ISC*), ovvero la predisposizione delle coste ad essere sede di erosione e/o di inondazioni,

e dell'Indice di Vulnerabilità Costiera (*IVC*) che considera il relativo impatto. La relazione è la seguente:

$$IR = ISC \cdot IVC \quad (3.8)$$

Gli indici *ISC* e *IVC* sono stati calcolati come somma del valore attribuito a singoli indicatori, variabile tra 0 e 2 per ogni indicatore, definiti rispettivamente di pressione per la sensitività e di impatto per la vulnerabilità.

La metodologia proposta da EuroSION si basa, innanzitutto, sull'individuazione di un'area costiera, indicata come "Radius of Influence of Coastal Erosion (RICE)", intesa come l'area potenzialmente soggetta a fenomeni di erosione e di inondazioni costiere nei prossimi 100 anni e definita come il luogo geometrico dei punti che si trovano entro 500 m dalla linea di costa e ad una quota inferiore a 5 m sul l.m.m. (EUROSION, 2004).

Gli indicatori di pressione utilizzati per il calcolo di *ISC* sono i seguenti:

- *SLR*: velocità media di innalzamento del livello del mare;
- *HWL*: livello massimo dell'acqua, definito come somma di tre contributi (regime di marea, innalzamento del livello del mare causato dalla depressione atmosferica e wind setup causato dal soffiare del vento verso costa);
- *TEV*: trend evolutivo della linea di costa, definito come percentuale di linea di costa in erosione e/o in avanzamento;
- *GEC*: geologia della costa, definito come percentuale di costa non erodibile;
- *A_{RICE}*: altezza dell'area costiera, definita come percentuale della superficie ricadente all'interno del RICE;
- *ODC*: presenza di opere di difesa costiera, definito come percentuale di costa interessata da opere ingegneristiche, comprese quelle di difesa costiera.

Nella seguente Tabella 3.1 sono riportati sinteticamente gli indicatori dell'*ISC*, con i relativi punteggi assegnati secondo le soglie definite dal progetto EUROSION.

Tabella 3.1: Indicatori e punteggi per la definizione dell'Indice di Sensitività Costiera.

Indicatore	Descrizione	Punteggio		
		0	1	2
SLR	Velocità media di innalzamento del mare (mm/anno)	< 0	0 ÷ 4	> 4
HWL	Livello massimo dell'acqua (m)	< 1.5	1.5 ÷ 3	> 3
TEV	% di linea di costa in erosione e/o avanzamento	< 20	20 ÷ 60	> 60
GEC	% di costa non erodibile	> 70	40 ÷ 70	< 40
A_{RICE}	% di superficie ricadente all'interno del RICE	< 5	5 ÷ 10	> 10
ODC	% di costa ingegnerizzata	< 5	5 ÷ 35	> 35

L'indice di sensitività costiera è stato quindi determinato mediante la seguente formula:

$$ISC = SRL + HWL + TEV + GEC + A_{RICE} + ODC \quad (3.9)$$

Per quanto riguarda invece il calcolo di *IVC* sono stati utilizzati i seguenti indicatori di impatto:

- P_{RICE} : popolazione residente all'interno dell'area identificata come RICE;
- U_{RICE} : percentuale di area urbanizzata e/o industrializzata in RICE;
- E_{RICE} : percentuale di area ad alto potenziale ecologico in RICE;
- U_{10KM} : incremento percentuale di area urbanizzata e/o industrializzata nella fascia costiera di 10 km.

Nella seguente Tabella 3.2 sono riportati sinteticamente gli indicatori dell'*IVC*, con i relativi punteggi assegnati secondo le soglie definite dal progetto EUROSION.

Tabella 3.2: Indicatori e punteggi per la definizione dell'Indice di Vulnerabilità Costiera.

Indicatore	Descrizione	Punteggio		
		0	1	2
P_{RICE}	Popolazione residente in RICE	< 5000	5000 ÷ 20000	> 20000
U_{RICE}	% di area urbanizzata e/o industrializzata in RICE	< 10	10 ÷ 40	> 40
E_{RICE}	% di area ad alto potenziale ecologico in RICE	< 5	5 ÷ 30	> 30
U_{10km}	% di incremento di area urbanizzata nella fascia costiera di 10 km.	< 5	5 ÷ 10	< 10

L'indice di vulnerabilità costiera è stato quindi determinato mediante la seguente formula:

$$IVC = P_{RICE} + U_{RICE} + E_{RICE} + U_{10KM} \quad (3.10)$$

Infine, l'Indice di Rischio Costiero viene calcolato in forma normalizzata (IRC_N) mediante la seguente espressione:

$$IRC_N = ISC \cdot IVC \cdot \frac{100}{96} \quad (3.11)$$

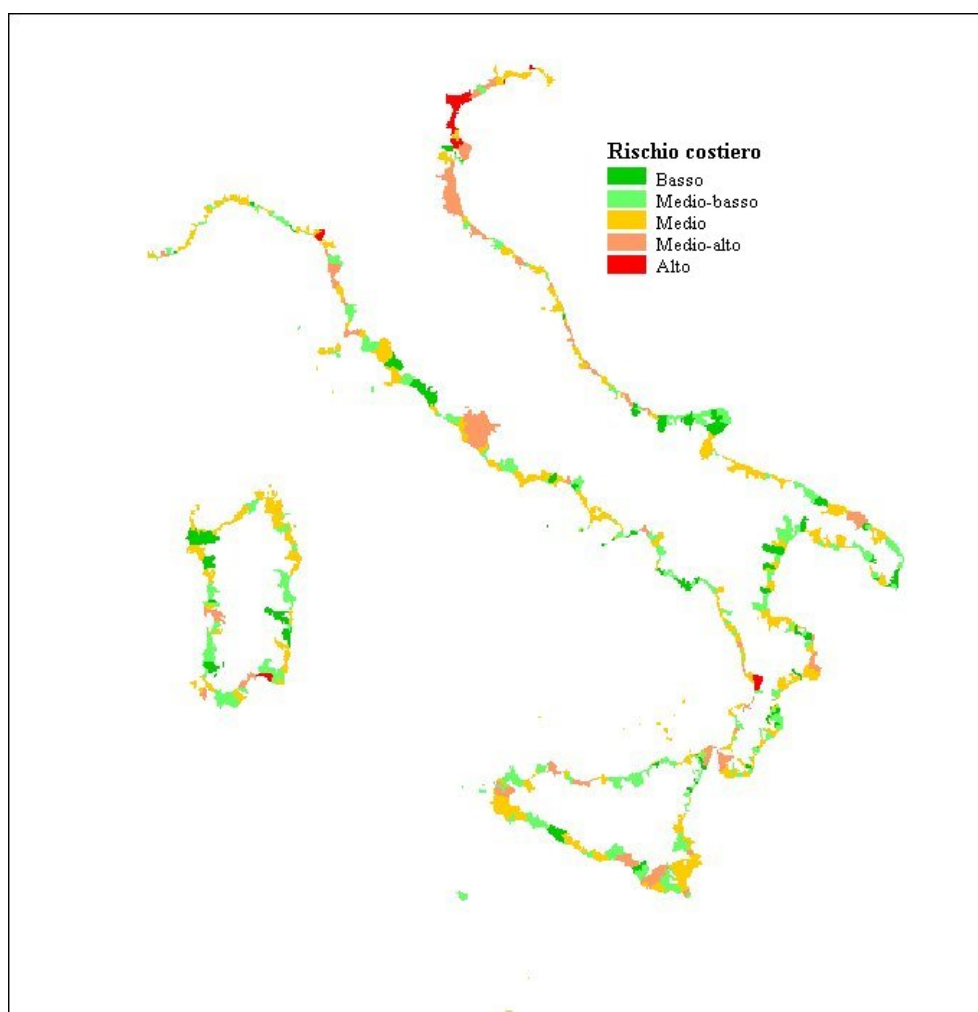


Figura 3.5: Mappa del rischio costiero in Italia (fonte: ISPRA).

L'indice di rischio costiero normalizzato rappresenta quindi la percentuale di danno costiero rispetto al valore massimo che ci si può attendere, indipendentemente dalla località di riferimento del calcolo, ed è stato articolato in cinque classi, come mostrato in Tabella 3.3. La Figura 3.5 rappresenta la mappa del rischio costiero calcolato in Italia, secondo la procedura descritta.

Tabella 3.3: Valori indice di rischio.

Definizione	Limiti di soglia
Rischio basso	< 5%
Rischio medio - basso	5 ÷ 15 %
Rischio medio	15 ÷ 30 %
Rischio medio - alto	30 ÷ 50 %
Rischio alto	> 50 %

Recentemente è stato proposto un modello di valutazione del rischio costiero basato su quello dell'EuroSION, ma modificato (Modified EuroSION Model - Mod.E.M.), per mappare il rischio costiero a scala comunale e identificare gli hot-spot costieri (Bruno et al., 2020). Dopo gli anni 2000 diverse regioni costiere italiane hanno recepito l'importanza della valutazione del rischio da erosione costiera ai fini della corretta pianificazione territoriale e dell'individuazione di efficaci strategie di mitigazione. Nel 2016, inoltre, il Ministero dell'ambiente ha siglato con le 15 regioni rivierasche un Protocollo d'Intesa, istituendo un "Tavolo Nazionale" con il compito di definire le "Linee Guida Nazionali per la difesa della costa dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici" e di formulare proposte per specifiche iniziative di approfondimento e di sviluppo di azioni a livello nazionale e internazionale, in materia di gestione sostenibile della fascia costiera. Tali Linee Guida, aggiornate poi nel 2018, mettono insieme una serie di esperienze e buone pratiche sviluppate negli ultimi decenni, riguardanti soprattutto le azioni di difesa che regolano il controllo della linea di costa, il riequilibrio del ciclo dei sedimenti, la protezione e l'adattamento delle coste in relazione al contesto fisiografico ed il grado di efficacia e durabilità delle diverse soluzioni.

Di seguito vengono adesso riportate e descritte sinteticamente le metodologie di valutazione del rischio costiero definite in ambito regionale o scientifico per diverse regioni italiane.

Abruzzo

Il modello sviluppato per la valutazione del rischio da erosione costiera in Abruzzo (progetto SICORA, finanziato dalla Regione Abruzzo e coordinato dall'Università dell'Aquila) si basa sulla valutazione di un indice di sensibilità socio-economica e ambientale (E) e di un indice di vulnerabilità morfologica della fascia costiera (PIV), per la cui stima è stato utilizzato il metodo suggerito da Arcilla et al. (2000): il PIV, secondo tale metodologia di calcolo che impiega l'analisi

“fuzzy-logic”, è funzione del valore medio di avanzamento o arretramento della linea di riva, della distanza dalla linea di riva delle infrastrutture da salvaguardare, ovvero della larghezza della spiaggia, e tiene conto, inoltre, di altri fattori che contribuiscono a caratterizzare la vulnerabilità morfologica, ma che non hanno una misurabilità continua, come la natura del sedimento della spiaggia e la presenza o meno di opere di difesa.

Basilicata

Nell’ambito del piano regionale del 2016 per la gestione delle coste della Basilicata, la metodologia proposta per la valutazione della vulnerabilità della fascia costiera all’erosione si basa sulla stima di un indice di erosione, che prende in considerazione, come indicatori di pericolosità, il tasso di erosione, l’andamento della linea di riva nel tempo, l’esposizione e l’intensità delle mareggiate e, come indicatori di vulnerabilità, la presenza di opere portuali (come quantità di materiale intercettato dai moli), la presenza di opere di difesa costiera (come lunghezza della spiaggia protetta), le caratteristiche litologiche del tratto di costa in esame, la pendenza della spiaggia sommersa, la larghezza della fascia costiera, la presenza di dune costiere e la variazione della lunghezza del cordone dunale nel tempo, il grado di impermeabilizzazione della superficie costiera e l’estensione delle aree costiere soggette a tutela da parte di strumenti pianificatori locali e/o regionali. Inoltre, secondo tale modello, alcuni indicatori sono valutati considerando differenti scenari in funzione del tempo di ritorno delle mareggiate ordinarie ed estreme (Greco et al., 2012; 2014): sono stati, quindi, selezionati 6 possibili scenari corrispondenti ai tempi di ritorno di 1, 10, 25, 30, 100 e 500 anni.

Calabria

Nell’ambito del “Master Plan degli interventi di mitigazione del rischio di erosione costiera in Calabria”, redatto nel 2013 dall’Autorità di Bacino Regionale calabrese, con la collaborazione del Dipartimento DICEAM dell’Università “Mediterranea” di Reggio Calabria, è stato definito un indice di pericolosità, funzione della dinamica del litorale e del moto ondoso (Barbaro, 2016):

$$I_H = 0.5 I_D + 0.5 I \quad (3.12)$$

dove: I_D rappresenta il tempo necessario affinché l’intera spiaggia venga erosa con velocità di erosione pari al valore massimo rilevato in condizioni di fenomeno evolutivo costante, ed è quindi stato calcolato in funzione della velocità di arretramento massima; mentre I è un indice rappre-

sentativo del moto ondoso ed è stato stimato come media con pesi uguali di quattro sotto-indici, funzione del contenuto energetico delle onde, delle variazioni di altezza significativa al variare del periodo di ritorno, della pendenza del fondale e dell'inclinazione del settore di traversia principale rispetto alla costa. In particolare, per il calcolo di I , è stata effettuata una suddivisione delle coste calabresi in 161 tratti con caratteristiche sufficientemente omogenee, dal punto di vista morfologico e di esposizione al moto ondoso, all'interno dei quali sono stati tracciati circa 5 transetti: l'indice caratteristico del moto ondoso è stato quindi calcolato, per ciascun tratto, come media pesata degli indici ottenuti per ogni transetto.

Hazard index	Hazard class
$I_H < 20$	P3 (high)
$20 < I_H < 40$	P2 (medium)
$40 < I_H < 60$	P1 (low)

Figura 3.6: Classi di pericolosità definite in funzione del valore di I_H .

Inoltre, è stato stabilito anche un indice di priorità degli interventi, funzione sia dell'estensione delle aree a rischio e delle infrastrutture ed edifici presenti in tali aree che di una serie di fattori correttivi legati alla presenza di porti ed opere di difesa, all'importanza socio-economica dell'area, all'omogeneità dell'area ed al valore dell'indice di pericolosità, classificato come descritto in Figura 3.6.

Campania

Un'altra metodologia di valutazione è quella proposta da Di Paola et al. (2014) e Benassai et al. (2015) e applicata alla Piana del Sele (Campania), la quale prevede la valutazione di un indice, il Coastal Vulnerability Assessment (CVA). Tale modello identifica sei variabili chiave, rappresentanti i processi che hanno maggior peso nella dinamica costiera, quali: il run-up dell'onda, il massimo ritiro della spiaggia, il tasso di erosione, l'innalzamento relativo del livello del mare, le maree e la stabilità di opere di protezione costiera.

Emilia-Romagna

In Emilia-Romagna (Armaroli & Duo, 2018) è stata applicata la metodologia proposta dal progetto RISC-KIT, che prende il nome di CRAF – Coastal Risk Assessment Framework – (Viavattene

et al., 2017), la quale tiene conto dell'azione del moto ondoso (storm surge, set-up, run-up), della marea, delle caratteristiche morfologiche del litorale, dell'elevazione della berma, del ritiro effettivo della linea di battigia. In particolare, nel progetto RISC-KIT sono stati sviluppati due strumenti (Ferreira et al., 2018): il quadro regionale di valutazione del rischio costiero (CRAF) e un sistema di allerta precoce per hotspot accoppiato con un sistema di supporto alle decisioni (EWS/DSS). Mentre L'EWS/DSS fornisce risultati ad alta risoluzione e può essere utilizzato come sistema di allerta per prevedere potenziali impatti o per testare l'efficacia delle misure di riduzione del rischio, il CRAF permette di stimare un indice costiero utilizzando una metodologia basata su indici, che rappresenta un approccio esistente e ben consolidato e permette di ottenere un rapido confronto dei settori costieri. La prima fase del CRAF riguarda quindi la stima di un Indice Costiero (IC) lungo una fascia costiera regionale di circa 100 km, suddivisa in settori di quasi 1 km lungo la costa. L'IC è un numero compreso tra 0 e 5 e viene calcolato per ogni settore come radice quadrata del prodotto di un indice di pericolosità ed un indice di esposizione. La pericolosità viene classificata con valori da 0 a 5 (da nessuno a molto alto), mentre l'esposizione è valutata da 1 a 5.

Molise

La metodologia adottata per il calcolo del rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana (Aucelli P. et al., 2017) si basa sulla valutazione di due indici: l'Indice di Esposizione Costiera (IEC), legato ad analisi socio-economiche, e l'Indice di Suscettibilità all'Erosione Costiera (ISE), il quale viene definito attraverso la valutazione di altri quattro sub-indici, o indicatori, che caratterizzano il litorale in base alla morfologia della spiaggia (pendenza, sedimentologia della battigia, presenze di barre sabbiose, ampiezza della spiaggia emersa), alle caratteristiche morfologiche del sistema dunale (altezza media della duna, ampiezza media della duna, continuità della successione vegetazionale presente sul sistema dunale attivo), all'evoluzione della linea di riva (trend evolutivo a breve, medio e lungo termine) e l'effetto del clima ondoso (in funzione del run-up costiero).

Puglia

In Puglia, un'applicazione dell'indice di vulnerabilità costiera (CVI), formulato da Pantusa et al. (2018), considera dieci variabili divise in tre gruppi: geologia, processo fisico e vegetazione

(Figura 3.7). In particolare, le variabili geologiche sono la geomorfologia, il tasso di erosione/accrescimento del litorale, la pendenza del litorale, la larghezza della spiaggia emersa e la larghezza delle dune; le variabili di processo fisico sono la variazione del livello del mare relativo, l'altezza significativa media dell'onda e la variazione media di marea; le variabili di vegetazione sono la larghezza della vegetazione dietro la spiaggia e la Posidonia oceanica. L'applicazione del CVI si basa sulla suddivisione di un tratto di costa in una serie di transetti, ognuno di essi caratterizzato da un'area di controllo di circa 500 metri di larghezza. Per ogni transetto, le dieci variabili, prima definite, sono state classificate in una scala da 1 a 5 in ordine di crescente vulnerabilità e il CVI è stato calcolato come radice quadrata del prodotto dei punteggi assegnati a ciascuna variabile diviso per il numero totale di variabili:

$$CVI = \sqrt{\frac{(a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f \cdot g \cdot h \cdot i \cdot l)}{10}} \quad (3.13)$$

Type Variables	Variables	Score				
		Very Low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very High 5
Geologic	Geomorphology	Rocky, cliffed coasts	Medium cliffs, indented coasts	Low cliffs, alluvial plains	Cobble beaches, estuary, lagoon	Barrier beaches, sand beaches, salt marsh, mud flats, deltas, coral reefs
	Coastal slope (%)	>12	8-12	4-8	2-4	<2
	Shoreline Erosion/accretion (m/year)	>(+ 1.5)	(+1.5)-(+0.5)	(-0.5)-(+0.5)	(-0.5)-(-1.5)	<(-1.5)
	Emerged beach width (m)	>100	50-100	25-50	10-25	<10
	Dune width (m)	>100	75-100	50-75	25-50	<25
Physical process	Relative sea-level change (mm/year)	<1.8	1.8-2.5	2.5-3.0	3.0-3.4	>3.4
	Mean significant wave height (m)	<0.3	0.3-0.6	0.6-0.9	0.9-1.2	>1.2
	Mean tide range (m)	>0.8	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	<0.2
Vegetation	Width of vegetation behind the beach (m)	>400	200-400	100-200	50-100	<50
	Posidonia oceanica (Boolean: presence/absence)	Present			Absent	

Figura 3.7: Classi di vulnerabilità per le variabili considerate in Pantusa et al. (2018).

Sardegna

Nel Piano d'Azione Costiero (PAC) della regione Sardegna è stata condotta un'analisi che ha permesso di individuare le spiagge a maggiore criticità, considerando una serie di parametri rappresentativi dei principali caratteri geometrici e geomorfologici del settore emerso e sommerso e dei caratteri insediativi del sistema, quali: estensione lineare della spiaggia, profondità media

del settore di avanspiaggia, caratteristiche granulometriche della spiaggia, presenza/assenza del sistema dunale, presenza/assenza di beach rock e/o piattaforme di abrasione, presenza/assenza di barre, presenza/assenza di stagni e zone umide, presenza/assenza di foci fluviali, presenza/assenza di aree ad alta pericolosità idraulica e/o da frana, presenza/assenza di insediamenti e infrastrutture e loro tipologia, presenza/assenza di opere di difesa costiera (rigide e morbide) e loro tipologia, presenza/assenza di emergenze naturalistiche, storico-culturali e paesaggistiche e loro identificazione. Inoltre, sono stati considerati, per il settore emerso, l'evoluzione della linea di costa, lo stato di conservazione del sistema dunale e l'interferenza degli elementi antropici e della frequentazione antropica sulle componenti di spiaggia, e, per il settore sommerso, lo stato di conservazione e l'evoluzione del limite superiore della prateria di Posidonia oceanica ed il flusso longitudinale di energia. In tale studio si è tenuto conto anche delle conoscenze pregresse, ovvero degli interventi di mitigazione o difesa costiera realizzati, programmati e finanziati, delle ordinanze di interdizione emesse dalle Direzioni Marittime o altri soggetti titolati, delle segnalazioni da parte di Enti locali e altre amministrazioni e degli studi esistenti.

Inoltre, è stata valutata la franosità potenziale delle coste rocciose che ha permesso di individuare i versanti costieri a criticità per frana in funzione di fattori, quali la pendenza, la geologia e la tipologia di copertura/uso del suolo.

In Ciccarelli et al. (2017) è stato definito un nuovo indice per le coste sabbiose toscane e sarde, sviluppato a partire dall'attuale indice di vulnerabilità delle dune (DVI), proposto da Garcia-Mora et al. (2001) relativo alle coste oceaniche: il nuovo indice di vulnerabilità delle dune mediterranee (MDVI) si basa su cinque fattori principali, che sono condizioni geomorfologiche dei sistemi dunali, influenza marina, effetto eolico, condizione della vegetazione ed effetto umano, per un totale di 51 variabili. Per ogni sito costiero, un indice di vulnerabilità totale è stato calcolato come la media non ponderata dei cinque indici di vulnerabilità parziale.

Sicilia

Nella valutazione della pericolosità per l'erosione costiera della regione siciliana (PAI 2004) sono stati presi in considerazione il numero di mareggiate che hanno colpito il tratto di costa, il tasso di ritiro e la larghezza media della costa attuale. Inoltre, nella Sicilia meridionale, la mappa della suscettibilità all'erosione costiera si è basata sull'interpretazione dei risultati e sulla combinazione dell'evoluzione del litorale a medio termine con la distribuzione delle attività di uso del suolo.

Veneto e Friuli Venezia Giulia

Nella zona costiera italiana del Mar Adriatico settentrionale (costa del Veneto e del Friuli Venezia Giulia) è stata sviluppata ed applicata una metodologia di valutazione della vulnerabilità regionale (RVA) per analizzare le informazioni spaziali della vulnerabilità costiera agli effetti previsti del cambiamento climatico globale (Torresan et al., 2012): per la valutazione del livello di erosione costiera, questa metodologia si basa sulla stima di indicatori di vulnerabilità bio-geofisica e socio-economica, come pendenza della costa, geomorfologia, presenza/assenza di dune, bilancio dei sedimenti, presenza/assenza di protezioni artificiali e copertura vegetale.

3.6 Analisi delle metodologie di valutazione del rischio costiero estere

Anche nel panorama internazionale, il tema del rischio di erosione costiera a causa degli effetti dei cambiamenti climatici è diventato sempre più dibattuto e diversi sono gli enti, pubblici e privati, le università ed i centri di ricerca che hanno voluto esprimere un loro contributo in favore di una conoscenza sempre più approfondita di tutti gli aspetti che entrano in gioco nei processi costieri. Tra questi, ad esempio, il Danish Hydraulic Institute (DHI) ha pubblicato nel 2017 le “Shoreline Management Guidelines” (Mangor et al., 2017), un manuale di base sui processi costieri e la gestione della linea di costa, che potesse risultare utile agli stakeholders, alle autorità e ai decisori politici per approfondire le conoscenze di base sul tema. Così come in Italia a livello regionale, anche all'estero diverse sono le metodologie di valutazione del rischio presenti in letteratura scientifica e descritte di seguito. In Portogallo, ad esempio, la procedura proposta da Ferreira Silva et al. (2017) si basa sulla valutazione di un indice di vulnerabilità costiera definito in funzione di variabili fisiche (marea, altezza significativa delle onde, aumento del livello dell'acqua) e geologiche (geomorfologia, pendenza della costa e tendenza evolutiva del litorale) (Figura 3.8).

Variable	Ranking of coastal vulnerability				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Geomorphology	Rocky, cliffed coast	Medium cliffs, indented coast	Low cliffs, alluvial plains	Cobble beaches, estuary, lagoon	Sand beach, dunes system
Coastal Slope (%)	>0.2	0.2–0.07	0.07–0.04	0.04–0.025	<0.025
Shoreline rate (m/yr)	>+2.0	+2.0 to +1.0	+1.0 to -1.0	-1.0 to -2.0	< -2.0
Mean tide range (m)	>6.0	6.0–4.1	4.0–2.0	1.9–1.0	<1.0
Mean significant wave height (m)	<0.55	0.55–0.85	0.85–1.05	1.05–1.25	>1.25
Relative sea level rise rate (mm/yr)	<1.8	1.8–2.5	2.5–2.95	2.95–3.16	>3.16

Figura 3.8: Variabili considerate per la determinazione del CVI (Ferreira Silva et al., 2017).

Anche il metodo utilizzato in Francia si basa sull'utilizzo di tali fattori per definire un Coastal Sensibility Index (CSI) (Mavromatidi et al., 2018), riprendendo il modello proposto per le coste canadesi. Il modello usato in Scozia (Fitton et al., 2016) considera, insieme ad altri fattori, l'esposizione della costa al moto ondoso. Nel Regno Unito (Kantamaneni et al., 2018) è stato sviluppato e applicato un nuovo Physical Coastal Vulnerability Index (PCVI): si basa su sette fattori fisici, che sono larghezza della spiaggia, larghezza delle dune, pendenza del litorale, distanza della vegetazione e di strutture presenti sul retrospiaggia, affioramento roccioso e difese marine.

Metodologie molto più strutturate sono, invece, rappresentate dal CRI-MED e dal MS-CRI, descritte di seguito, entrambe basate sulla valutazione del rischio, come combinazione di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.

CRI-MED

Il Coastal Risk Index per la valutazione del rischio nel Mediterraneo (CRI-MED) (Satta et al., 2016; 2017) è una metodologia per la valutazione del rischio e della vulnerabilità relativa all'impatto fisico e socio-economico delle principali forzanti climatiche e non climatiche, applicata originariamente in 11 località (Albania, Algeria, Bosnia-Erzegovina, Croazia, Egitto, Libia, Montenegro, Marocco, Palestina, Siria e Tunisia) e poi estesa ad altre aree del Mediterraneo (Francia, Grecia, Israele, Italia, Libano, Malta, Slovenia, Spagna e Turchia): tra i fattori che determinano gli indici di pericolosità e vulnerabilità, tuttavia, non si tiene conto della presenza di opere portuali o di protezione costiera, della presenza di dune, dei fenomeni di subsidenza del terreno, o ancora degli apporti sedimentari in presenza di foci fluviali.

In particolare, il metodo CRI-MED fornisce un indice di rischio spaziale, combinando livelli multipli di mappe relativi ai differenti aspetti di rischio. Il rischio è considerato come funzione di tre fattori: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Di conseguenza, tale metodo si basa sulla definizione di tre sotto-indici, significativi rispettivamente della pericolosità (CH), vulnerabilità (CV) ed esposizione costiera (CE), calcolati in funzione di 13 variabili. Le variabili vengono standardizzate per poter essere comparate, dando un valore su una scala che va da 1 a 5 (Figura 3.9).

Il CH include 2 variabili non legate al clima, quali l'incremento della popolazione (PGR) e la presenza di turisti (TOUR), e 3 legate al clima, che sono l'innalzamento del livello del mare (SLR), le mareggiate (SWH) e la siccità (DRO). In particolare, PGR misura il tasso di crescita della popo-

lazione nella specifica regione e rappresenta, quindi, la pressione urbana sul tratto costiero, mentre TOUR misura il numero di arrivi di turisti e quindi è un indicatore dello sfruttamento stagionale delle aree costiere. Per quanto riguarda la determinazione del SLR ci si accoda ai numerosi studi presenti in letteratura, mentre SWH rappresenta la soglia più alta per il moto ondoso, superata solo per pochi giorni in una stagione (Pino et al., 2009).

Variable	Unit	Score				
		1	2	3	4	5
Coastal hazards						
SLR	mm/y	< 1	1-1.6	1.61-2.4	2.41-3.6	3.61 - 7
SWH	cm	< 50	50-150	151-250	251-350	> 350
DRO	mm	> 36	36-12	11-12	- 13 to - 36	< -36
PGR	%	< 0.1	0.1-0.5	0.51-1	1.01-2	> 2
TOUR	%	< 0	0-1	1.01-5	5.01-10	> 10
Coastal vulnerability						
LF	/	Hard Rock shores	Soft Rock shores	River deltas, estuaries and cobble beaches	Sandy shores backed by bedrock or artificial frontage	Sandy shores and water plains
ELE	%	> 6	5-3	3-2	2-1	< 1
ROU	n	> 0.06	0.06 - 0.041	0.04-0.031	0.03-0.02	< 0.2
EDU	%	> 60	60-44	43-28	27-10	< 10
P65	%	< 3	3-8.5	8.6-15	16-20	> 20
GDP	US \$	> 31	31-25	24-17	16-9	< 9
Coastal exposure						
LC	/	Bare areas	Shrub land, grasslands, sparse vegetation	Forest and Water bodies	Agriculture	Urban areas
PDE	Pop/km ²	< 25	26-50	51-100	101-250	> 250

Figura 3.9: Variabili e punteggi applicati al CH, CV e CE per la stima dell'indice di rischio costiero CRI-MED (Satta et al., 2017).

Il CV include 6 variabili: morfologia (LF), elevazione (ELE), rugosità (ROU), livello di istruzione (EDU), popolazione sopra i 65 anni (P65) e prodotto interno lordo pro capite (GDP). La vulnerabilità può essere considerata come una funzione di suscettibilità e resilienza. LF, ELE e ROU sono le tre variabili relative alla suscettibilità, le restanti sono relative alla resilienza. LF esprime l'erosibilità relativa combinata con l'inondabilità delle diverse morfologie costiere. ELE rappresenta un rischio elevato se < 1 m. Per quanto riguarda ROU, valori elevati del parametro corrispondono a basse vulnerabilità.

Infine, l'indice CE include 2 variabili: uso del suolo (LC), che rappresenta i beni costieri a rischio e assume il valore più alto nelle aree urbane, e densità di popolazione (PDE), che integra la LC andando ad indicare se l'area è molto o poco popolata.

Il metodo CRI-MED, infine, permette di assegnare alle variabili un peso in base alla loro influenza sul rischio costiero (Figura 3.10).

	Erosion	Flooding	Weight
CH variables			
SLR	H	H	35%
SWH	L	H	25%
DRO	L	L	10%
PGR	M	L	20%
TOUR	L	L	10%
CV variables			
LF	H	H	25%
ELE	H	H	25%
ROU	M	M	15%
P65	L	M	10%
EDU	L	M	10%
GDP	M	M	15%
CE variables			
LC	H	H	70%
PDE	H	H	30%

L = Low, M = Medium, H = High.

Figura 3.10: Influenza delle variabili nel contribuire all'erosione costiera e alle inondazioni costiere e relativi pesi (Satta et al., 2017).

Per il calcolo del CRI-MED, quindi, si valutano i sub-indici normalizzati con le seguenti relazioni:

$$CH' = \frac{(\sum_{a=1}^{nCH} x_a W_a) - 1}{4} \quad (3.14)$$

$$CV' = \frac{(\sum_{b=1}^{nCH} x_b W_b) - 1}{4} \quad (3.15)$$

$$CE' = \frac{(\sum_{c=1}^{nCH} x_c W_c) - 1}{4} \quad (3.16)$$

Dove le x rappresentano i valori assunti dalle singole variabili e le W rappresentano i pesi associati alle singole variabili. Infine, il CRI-MED viene calcolato come segue:

$$CRI - MED = CH' \cdot CV' \cdot CE' \quad (3.17)$$

Multi-Scale Coastal Risk (MS-CRI)

Analogamente all'indice CRI-MED, è definito il Multi Scale Coastal Risk Index (MS-CRI) che, applicato su scala locale, prende il nome di CRI-LS: la caratteristica di CRI-LS risiede nella definizione di una metodologia per definire i limiti della zona di pericolosità costiera, intesa come area costiera in cui si manifesta il rischio.

Tale metodologia è stata applicata in Marocco (Satta et al., 2016) e permette di descrivere il rischio costiero, combinando i fattori di pericolosità (CH), vulnerabilità (CV) ed esposizione (CE) attraverso la definizione di diciannove variabili, che tengono conto dell'innalzamento del livello del mare, delle condizioni delle mareggiate, delle caratteristiche della siccità e della piovosità, della geomorfologia della costa, del contributo fluviale sedimentario, del tasso di erosione costiera, della tipologia dell'uso del suolo, nonché di fattori socio-economici (Figura 3.12). Inoltre, un peso è associato a ogni variabile e i valori risultanti sono riportati in una piattaforma GIS (Geographic Information System) che consente alle singole variabili e ai punteggi di rischio aggregati di essere codificati a colori e mappati nelle zone di pericolosità costiera, come mostrato in Figura 3.11.

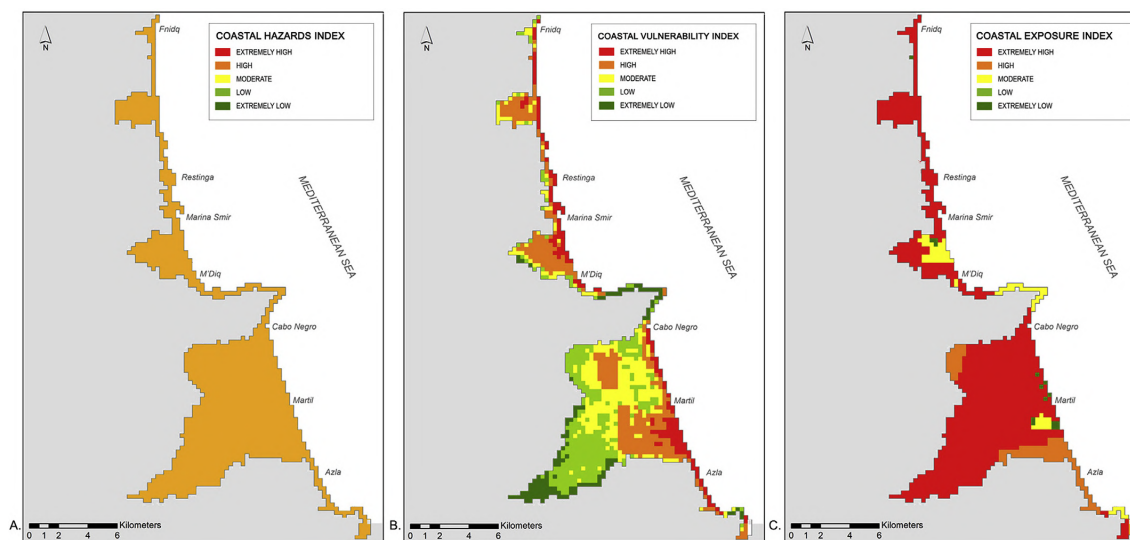


Figura 3.11: Mappe della pericolosità (A), vulnerabilità (B) ed esposizione costiera (C) (Satta et al., 2016).

Variable	Description	Score				
		1	2	3	4	5
Coastal hazards						
Sea level rise (SLR)	Level of the sea increased in one year. Satellite altimetry data provides accurate measures for a limited time range.	<1	1–1,6	1,7 - 2,4	2,5 - 3,2	n > 3,2
Storms (SWH)	Average number of detected SWH above 95 percentile/year (SWHx95p), which represents the number of events exceeding the long term (e.g. return period Tr = 100 yrs) 95 percentile of daily SWH.	<50	50–150	151–250	251–350	>350
Mean annual max daily precipitation (MDP)	Equal to the highest amount of precipitation received during the year, averaged over 30 year. Daily rainfall categories adapted from Alpert et al. (2002).	<16	16–32	33–64	65–128	>128
Droughts (DRO)	Significantly driest winters experienced by the Mediterranean regions during 1971–2010 relative to the comparison period of 1902–2010. Low values indicate a scarce sediment supply to beaches contributing to erosion.	>36	36–12	11–12	–13––36	< –36
Population growth (PGR)	Population growth (annual %) is the exponential rate of growth of midyear population from year t-1 to t.	<0,1%	0,1% - 0,5%	0,51%–1%	1,01% - 2%	>2%
Tourism arrivals (TOUR)	Number of tourists who travel to a country different from the one in which they are resident.	< 0%	0% - 1%	1,01 - 5%	5,01% - 10%	> 10%
Coastal vulnerability						
Landform (LF)	Expresses the erodibility of the coastal zone. Scores are ranked according to the relative resistance of a given landform to erosion.	Hard Rock shores	Soft Rock shores	River deltas, estuaries and cobble beaches	Sandy shores backed by bedrock or artificial frontage	Sandy shores and water plains
Coastal slope (SLO)	Related to the relative risk of the shoreline retreat. Low sloping coastal regions should retreat faster.	> 0,1	0,1 - 0,05	0,049–0,034	0,033 - 0,02	< 0,02
Land roughness (LR)	Represents the resistance to surface flow exerted by the land surface and is measured with the Manning's coefficient.	Urban areas	Forest and Water bodies	Shrub land, grasslands, Sparse vegetation	Agriculture	Bare areas
Historical Shoreline change (HSC)	Percentage of eroded coast / Sediment budget.	> 30% in accretion	30% - 10% - in accretion	9,9% – -9,9% stable	10% -30% erosion	> 30% erosion
Elevation (ELE)	Represents the surface of selected coastal unit (pixel) within a specific class of elevation Xi (e.g. 0.15m_Xi _ 0.3 m).	8 - 5,26	5,25 - 3,6	3,59 - 2,76	2,75 - 1	< 1
Distance from the shoreline (D)	Related to progression of the risk according to the inland penetration of the flooding.	> 4500	4500–2100	2099–900	899–300	< 300
River flow regulation (RFR)	Represents the impact of dams on river flow regulation in terms of sediment supply (Oziurt, 2010).	no dams	/	Dams only in the minor tributaries	/	Dams in the largest tributary
Ecosystems health (EH)	Expresses the contribution of the ecosystem as a protection against storm surges, flooding and other coastal hazards.	No detectable change	Slight signs of disturbance	Moderate distortions with loss of 50% of species	Major distortions	Severe distortions with loss of all species
Education level (EDU)	Percentage of population whose level is equal at least to the level 3 of the international standard classification of education (ISCED).	> 60	60–44	43–28	27–10	< 10
Age of population (P65)	Percentage of population that is aged 65 years or older.	< 3	3–8,5	8,6–15	16–20	> 20
Coastal protection structures (CPS)	Percentage of the coastline with CPS (groynes, seawalls, revetments, etc.)	> 50	50 - 31 -	30–21	20–5	< 5
Coastal exposure						
Land Cover (LC)	The LC map from 2010 is a global land cover map at 300m spatial resolution.	Bare areas	Shrub land, grasslands, Sparse vegetation	Forest and Water bodies	Agriculture	Urban areas
Population density (PDE)	The population density is derived by dividing the population count by the land area. It represents population per Km ² .	< 25	26–50	51–100	101–250	> 250

Figura 3.12: Variabili utilizzate e punteggi attribuiti per la determinazione dell'indice CRI-LS (Satta et al., 2016).

CERA

Interessante, in termini di un riscontro grafico dei risultati, è la possibilità di integrazione di una metodologia di valutazione del rischio costiero all'interno di un software GIS: un esempio (Narra et al., 2017) è rappresentato dal CERA (Coastal Erosion Risk Assessment), un software open source basato su una piattaforma GIS (Geographic Information System), il quale si basa sulla metodologia proposta da Coelho (2005) per la valutazione della vulnerabilità e del rischio associati

all'erosione costiera. L'applicazione è stata integrata come plug-in all'interno di QGIS (2016) ed è in grado di restituire sia un valore numerico del rischio, su una scala da I a V, che un riscontro grafico relativo alla propagazione del rischio all'interno dell'area in esame. L'interfaccia grafica del plug-in è mostrata in Figura 3.13. Tuttavia, anche in questo caso, la rapida applicazione del modello e la sua semplicità sono ricondotte alla richiesta di un set ridotto di dati, non considerando dunque diversi parametri che invece influenzano la valutazione del rischio costiero.

Vulnerability Parameters:			
		100m	5000m
Distance to Shoreline:	distancia_linha_costa	0.214	0.880
Topography:	topografia	0.214	0.033
Geology:	geologia	0.214	0.033
Geomorphology:	geomorfologia	0.071	0.011
Ground Cover:	revestimento_solo	0.071	0.011
Anthropogenic Actions:	acoes_antropogenicas	0.037	0.005
Maximum Significant Wave Height:	maxima_altura_onda_significativa	0.071	0.011
Average Erosion/Accretion Rates:	erosao_acrecao	0.037	0.005
Maximum Tidal Range:	maxima_amplitude_mare	0.071	0.011

Consequence Parameters:	
Population Density:	populacao
Economic Activity:	economia
Ecology:	ecologia
Heritage:	patrimonio

Figura 3.13: Interfaccia grafica utente del Coastal Erosion Risk Assessment (CERA) (Narra et al., 2017).

3.7 Il supporto del GIS nell'analisi del rischio costiero

La possibilità di integrare una procedura di valutazione del rischio costiero su un GIS (Geographic Information System) fornisce sicuramente un grande supporto, sia in termini di analisi dei dati di input, sia in termini di elaborazione e visualizzazione dei risultati (Barillà et al., 2020b; Foti G. et al., 2020b). Il GIS, anche detto sistema informativo geografico o sistema informativo territoriale, è un sistema computerizzato che permette di acquisire, registrare, analizzare, visualizzare, restituire,

condividere e presentare informazioni derivanti da dati geografici (geo-riferiti). La tecnologia GIS, dunque, permette di integrare in un unico ambiente le più comuni operazioni legate all'uso di database (interrogazioni e analisi statistiche) con l'analisi geografica consentita dalle cartografie numeriche, sia raster che vettoriali. I GIS permettono di analizzare un'entità geografica sia per la sua completa natura geometrica (e simbolica) sia per il suo totale contenuto informativo.

I dati geografici utilizzati su un GIS possono essere di due tipologie: vettoriali e raster. I dati vettoriali sono costituiti da elementi geometrici semplici quali punti, linee e poligoni codificati e memorizzati sulla base delle loro coordinate.

Un punto viene individuato attraverso le sue coordinate reali (x_1, y_1); una linea o un poligono attraverso la posizione dei nodi ($x_1, y_1; x_2, y_2$). A ciascun elemento è associato un record del database che contiene tutti gli attributi dell'oggetto rappresentato.

Il dato raster, invece, permette di rappresentare il mondo reale attraverso una matrice di celle, generalmente di forma quadrata o rettangolare, dette pixel. A ciascun pixel sono associate le informazioni relative a ciò che esso rappresenta sul territorio. Ovviamente la dimensione del pixel, generalmente espressa nell'unità di misura della carta (metri, chilometri), è indicativa della precisione del dato. Mentre i dati vettoriali vengono utilizzati per rappresentare dati che variano in modo discreto, i dati raster permettono di descrivere strati informativi che hanno una variabilità continua nel territorio.

Tra questi ultimi, infatti, rientrano i DTM (Digital Terrain Model), DSM (Digital Surface Model) e DEM, di grande supporto nell'analisi territoriale. In particolare, un DTM è un modello digitale del terreno che permette di rappresentare una generica superficie statistica in cui ad un numero finito di coppie (X,Y) viene attribuita un'elevazione, una Z, corrispondente. Generalmente il DEM è riferito alla topografia terrestre ma può riguardare anche altre superfici. Con DSM, invece, si intende la superficie terrestre comprensiva degli elementi antropici e vegetazionali, come descritto in Figura 3.14, mentre il DTM rappresenta esclusivamente l'andamento della superficie del suolo.

Tali modelli sono stati determinati mediante un rilievo LIDAR (Light Detection and Ranging), una tecnica di telerilevamento per l'esecuzione di rilievi topografici ad alta risoluzione.

Il rilievo viene effettuato tramite mezzo aereo sul quale è installato uno scanner composto da un trasmettitore (il componente laser), un ricevitore (costituito da un telescopio) e da un sistema di acquisizione dati. Viene registrata l'intensità del segnale riflesso e la quota del terreno, calcolata

sulla base della differenza di tempo intercorsa tra il segnale emesso e quello riflesso. Il sistema di posizionamento satellitare (GPS) e il sistema inerziale di navigazione (INS), installati a bordo, sono utilizzati per determinare la posizione e l'orientamento del mezzo aereo in ogni istante. La peculiarità del sistema è l'altissima velocità di acquisizione dei dati abbinata ad un'elevata risoluzione. Il primo impulso, denominato first return, definisce il DSM, l'ultimo impulso, invece, il DTM, ovvero il last return.

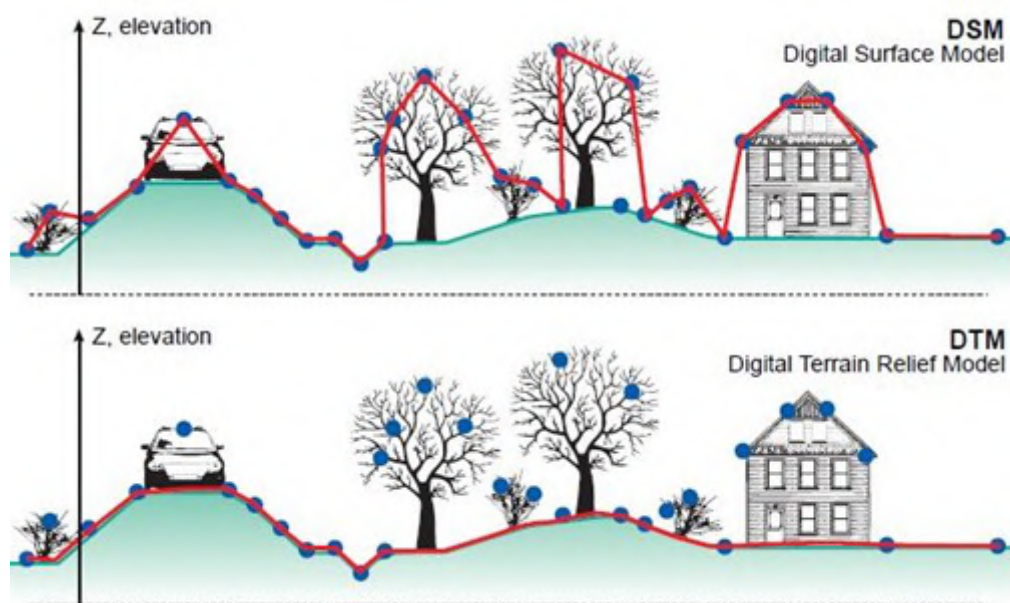


Figura 3.14: Differenza tra DSM e DTM.

Tra i vari software GIS disponibili, QGIS è il sistema open source attualmente più diffuso ed utilizzato al mondo. È stato rilasciato sotto GNU General Public License ed è un progetto ufficiale della Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Il software è disponibile per piattaforma Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e supporta numerosi formati di dati spaziali; inoltre consente di effettuare numerose elaborazioni su database spaziali offrendo diversi strumenti di analisi vettoriale, geoprocessing e gestione database.

QGIS permette di far confluire dati provenienti da diverse fonti in un unico progetto di analisi territoriale. I dati, divisi in layers, possono essere analizzati e, attraverso le funzionalità grafiche disponibili, a partire da essi viene creata l'immagine mappa, la quale può essere personalizzata dall'utente attraverso analisi tipiche del GIS quali gradazione di colori, sfumatura di colore, valore unico, ecc. La mappa può essere arricchita da icone e da etichette dipendenti dagli attributi degli

elementi cartografici. Un sistema di scripting può essere invocato per gestire operazioni ripetitive sui dati.

Infine, è possibile adattare QGIS ad esigenze specifiche dell'utente grazie all'architettura estendibile dei plug-in che possono essere sviluppati con apposite librerie e l'utilizzo del linguaggio Python.

Capitolo 4

Nuova metodologia di valutazione del rischio costiero

In questo capitolo sarà definita e descritta la nuova metodologia di valutazione del rischio costiero, sviluppata per essere applicata alla regione Calabria, ma di validità generale.

4.1 Descrizione generale

Come descritto nel terzo capitolo, il panorama nazionale ed internazionale in tema del rischio costiero è caratterizzato non solo dalla presenza di differenti metodologie di calcolo a seconda della regione costiera in esame, ma soprattutto da una grande varietà e dispersione di fattori sui quali tali metodologie si basano.

Pertanto, nel presente studio si è cercato di sviluppare una metodologia che possa essere di validità generale, che possa inglobare tutti i fattori che influenzano il rischio costiero, in cui i parametri caratteristici della località siano tarati secondo una procedura standardizzata. Tale metodologia è stata sviluppata per essere applicata principalmente in Calabria, come aggiornamento e completamento dell'indice di pericolosità definito nel "Master Plan degli interventi di mitigazione del rischio di erosione costiera in Calabria", redatto nel 2013 dall'Autorità di Bacino Regionale calabrese, con la collaborazione del Dipartimento DICEAM dell'Università "Mediterranea" di Reggio Calabria (Barbaro, 2016). Tuttavia, la formulazione della metodologia è di validità generale, ovvero è tale da poter essere applicata in qualunque regione costiera, ricalibrando opportunamente le classi di pericolosità e di vulnerabilità e il sistema di pesi da assegnare agli indici.

In seguito all'analisi dello stato dell'arte descritto nel precedente capitolo, innanzitutto si è ritenuto opportuno scegliere come tipologia di metodologia di valutazione quella basata su indici: tali metodi, infatti, sono molto semplici nella loro applicazione e nella loro eventuale visualizzazione su un sistema informativo geografico, in quanto consistono nella valutazione quantitativa di diverse variabili che, combinate poi tra loro, permettono di ottenere un indice complessivo finale.

Per la definizione dell'indice di rischio si è partiti dalla classica definizione proposta da Varnes & Iaeg (1984), secondo cui il rischio può essere espresso come il prodotto della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione, il cui significato è stato descritto nel precedente capitolo. Di conseguenza, l'indice di rischio I_R potrà essere calcolato come:

$$I_R = I_H \cdot I_V \cdot I_E \quad (4.1)$$

dove:

- I_H è l'indice di pericolosità e tiene conto di tutte quelle variabili che possono essere individuate come forzanti del pericolo costiero da valutare;
- I_V è l'indice di vulnerabilità ed è funzione delle variabili che permettono di descrivere il grado di suscettibilità del territorio al fenomeno considerato;
- I_E è l'indice di esposizione ed è definito in funzione del valore dei beni a rischio presenti in una determinata area considerata a rischio.

Tutti e tre gli indici sono stati definiti in modo tale che il loro valore risulti normalizzato e pertanto possono assumere valori compresi tra 0 e 1. Per la valutazione del rischio, ovvero dell'indice finale, si è utilizzata la classificazione proposta nell'applicazione italiana del progetto EUROSION (EUROSION, 2004; ISPRA, 2007), definita su una scala percentuale e riportata nella seguente Tabella 4.1:

Tabella 4.1: Classificazione dell'indice di rischio.

Definizione	I_R
Rischio basso	< 5%
Rischio medio - basso	5 ÷ 15 %
Rischio medio	15 ÷ 30 %
Rischio medio - alto	30 ÷ 50 %
Rischio alto	≥ 50 %

Per quanto riguarda la valutazione delle variabili di pericolosità (h_i), vulnerabilità (v_i) ed esposizione (e_i) necessarie per la definizione dei relativi indici è stata considerata una suddivisione in cinque classi, caratteristica della gran parte delle metodologie presenti in letteratura: in particolare, in funzione del grado di pericolosità, vulnerabilità o esposizione, tutti gli indici vengono classificati in una scala compresa tra 1 e 5, ad un valore numerico pari ad 1 corrisponde un grado molto basso (very low), ad un valore numerico pari a 5 un grado molto alto (very high). Le classi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione sono state efficacemente calibrate a seconda delle variabili considerate, con riferimento alle caratteristiche del territorio calabrese.

Tabella 4.2: Suddivisione in cinque classi per la valutazione delle variabili di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.

Definizione del grado di pericolosità/vulnerabilità/esposizione	Valore numerico attribuito
Molto basso (Very Low)	1
Basso (Low)	2
Medio (Moderate)	3
Alto (High)	4
Molto alto (Very High)	5

La stima dell'indice di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione è stata effettuata seguendo la forma matematica proposta nella metodologia CRI-MED (Satta et al., 2017), che consiste semplicemente nell'applicazione di una media pesata: indicando genericamente con x_i il valore numerico o punteggio attribuito alle variabili che permettono di definire un indice generico I e con W_i i relativi pesi ad esse attribuiti, l'indice I può essere calcolato come:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n x_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4.2)$$

Tuttavia, per effettuare la normalizzazione dell'indice I , in modo che risultino valori compresi tra 0 e 1, viene effettuata la normalizzazione delle variabili x_i , come descritto di seguito:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4.3)$$

Sostituendo nella (4.2) al valore della variabile generica x_i quello normalizzato x'_i (4.3) si ottiene:

$$I' = \frac{\sum_{i=1}^n x_i W_i - x_{min}(\sum_{i=1}^n W_i)}{(x_{max} - x_{min})(\sum_{i=1}^n W_i)} \quad (4.4)$$

Infine, considerando che $x_{min}=1$, $x_{max}=5$ e $\sum_{i=1}^n W_i = 1$, si ottiene l'espressione da utilizzare per il calcolo dell'indice generico normalizzato I' :

$$I' = \frac{\sum_{i=1}^n x_i W_i - 1}{4} \quad (4.5)$$

Utilizzando la formulazione (4.5), di conseguenza, gli indici di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione possono essere calcolati mediante le seguenti espressioni:

$$I_H = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} h_i W_{h,i} - 1}{4} \quad (4.6)$$

$$I_V = \frac{\sum_{i=1}^{n_v} v_i W_{v,i} - 1}{4} \quad (4.7)$$

$$I_E = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} e_i W_{e,i} - 1}{4} \quad (4.8)$$

dove n_h , n_v ed n_e rappresentano il numero delle variabili rispettivamente di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione considerate, mentre i pesi W_h , W_v e W_e vengono attribuiti ad ogni variabile in funzione del contributo che essa fornisce nella determinazione rispettivamente della pericolosità, vulnerabilità ed esposizione per la valutazione del rischio costiero considerato.

La validazione della nuova metodologia di valutazione del rischio costiero per la regione Calabria è stata effettuata mediante la sua applicazione ad oltre 50 località calabresi, individuate come località "campione", distribuite sul versante tirrenico e ionico: la scelta dei tratti di costa in cui applicare la metodologia è stata effettuata, innanzitutto, in funzione della copertura spaziale dei dati meteorologici disponibili e, secondariamente, in funzione delle diverse caratteristiche geomorfologiche, topografiche, naturali (presenza di sistemi dunali, vegetazione e foci fluviali) ed antropiche (presenza di opere di difesa costiere e portuali) che contraddistinguono i litorali calabresi. Mentre il primo aspetto influisce sulla determinazione degli indici di pericolosità, questo secondo aspetto è di fondamentale importanza per tener conto di tutti i fattori che possono entrare in gioco nel processo di erosione costiera e per l'efficace calibrazione degli indici di vulnerabilità.

La metodologia elaborata è stata quindi calibrata su scala regionale, ma può essere definita “multi-scala”, in quanto la procedura è tale da consentire che la valutazione del rischio costiero possa essere effettuata su scala locale, comunale, intercomunale, provinciale o interprovinciale, a seconda della scelta dell’area di applicazione in funzione dell’obiettivo da perseguire.

Un altro vantaggio della metodologia definita è rappresentato dalla possibilità di effettuare una valutazione “multi-rischio”, oltre che “multi-scala”, in quanto la maggior parte dei fattori che entrano in gioco nel fenomeno di erosione costiera possono anche determinare fenomeni di inondazione: pertanto, attribuendo semplicemente un sistema di pesi differente da quello utilizzato per il rischio di erosione costiera, è possibile determinare anche il rischio di inondazione costiera.

4.2 Definizione dell’area di pericolosità costiera

Ai fini dell’applicazione della metodologia, soprattutto per la quantificazione delle variabili di esposizione, ovvero dei beni esposti al rischio, è necessario definire una zona di pericolosità costiera.

Nel progetto EUROSION (2004), come anche descritto nel capitolo precedente, è stata introdotta un’area denominata RICE, intesa come l’area potenzialmente soggetta a fenomeni di erosione e di inondazioni costiere nei prossimi 100 anni e definita come il luogo geometrico dei punti che si trovano entro 500 m dalla linea di costa e ad una quota inferiore a 5 m sul l.m.m. L’articolo 8 del Protocollo GIZC definisce l’area di pericolosità costiera come “la zona costiera interessata dal verificarsi dell’effetto di pericolosità, che ha il potenziale di causare danni o la perdita di ecosistemi naturali, edifici e infrastrutture” (Satta, 2014). In letteratura scientifica non vi sono metodi che permettano di determinare una zona di pericolosità costiera, tuttavia, sono state sviluppate delle formulazioni che possono essere utili per la pianificazione costiera e che consentono di calcolare il livello massimo che l’acqua può raggiungere sul litorale, considerando condizioni estreme delle onde e del livello del mare (Satta, 2016).

Seguendo tale approccio e la prima parte della definizione del RICE, si propone la definizione dell’area di pericolosità costiera come l’area compresa tra la linea di costa oggetto di studio e la quota massima raggiunta dall’acqua, ottenuta dalla somma di run-up e set-up ondosi, determinati in funzione di un periodo di ritorno di 100 anni, e del massimo livello del mare, ottenuto tenendo conto della marea (astronomica e meteorologica) e dell’innalzamento del livello per effetto dei cambiamenti climatici previsto dall’IPCC fra 100 anni secondo lo scenario più gravoso. Tale

definizione, basata sull'individuazione di una quota, è senz'altro più efficace di un metodo basato sull'individuazione dell'ampiezza del territorio soggetto a pericolosità, in quanto quest'ultima è variabile nel tempo in funzione del trend evolutivo della linea di costa. Inoltre, la metodologia individuata per la definizione dell'area di pericolosità è cautelativa, in quanto considera la quota dell'intrusione marina che determina inondazione ed erosione, come un'onda di piena che penetra verso l'interno senza considerare l'attrito del terreno e la resistenza fornita anche dalla presenza di eventuali strutture o infrastrutture.

In particolare, per il calcolo di run-up e set-up ondosi, si propone l'utilizzo della formulazione di Stockdon et al. (2006), comunemente impiegata per gli studi costieri e suggerita per la mappatura delle inondazioni costiere (Flood Directive 2007/60/EC), in quanto tiene conto di entrambe le quote raggiunte, calcolate in funzione della pendenza massima della spiaggia del sito in esame e delle caratteristiche di uno stato di mare con periodo di ritorno di 100 anni. Si noti che la pendenza della spiaggia a cui si riferisce la formulazione di Stockdon et al. è la "foreshore beach slope", ovvero quella relativa alla battigia o spiaggia intertidale. La scelta di utilizzare la pendenza massima per la stima del run-up e del set-up per l'intero sito in esame è senz'altro cautelativa.

Per quanto riguarda l'analisi del livello di marea astronomica, la sua valutazione può essere basata sui dati forniti dalle Tavole di Marea, edite annualmente dall'Istituto Idrografico della Marina Militare, oppure sui dati del livello idrometrico registrati dai mareografi della rete RMN gestita dall'ISPRA. Il calcolo dell'escursione massima di marea meteorologica rispetto al livello medio del mare, invece, tiene conto del massimo sovrizzo barico e del massimo sovrizzo di vento che possono realizzarsi. Il massimo sovrizzo barico è facilmente determinabile in funzione della minima pressione atmosferica registrata durante un evento ciclonico: considerando, infatti, che una diminuzione barometrica di 1 mbar rispetto al valore normale di 1013 mbar induce un incremento del livello marino di 1 cm, una forte depressione ciclonica che alle nostre latitudini può far scendere il barometro fino a 970 mbar può determinare un incremento del livello del mare di 43 cm. Il calcolo del massimo sovrizzo di vento, invece, può essere effettuato approssimativamente con la seguente nota formula implicita (COLOMBO NUOVO, 2012):

$$S = \frac{K_p L_p U^2}{g(D - d - S)} \ln \left(\frac{D}{d + S} \right) \quad (4.9)$$

dove:

- K_p è un coefficiente pari a $3 \cdot 10^{-6}$;
- U è la massima velocità del vento persistente (m/s);
- L_p è l'estensione della piattaforma continentale (distanza tra d e D nella direzione del vento) (m);
- D è la profondità limite della piattaforma continentale ($\cong 200$ m);
- d è la profondità di calcolo del sovrizzo S (m).

Secondo tale formula, il sovrizzo aumenta al diminuire della profondità di calcolo, seguendo una legge esponenziale, e raggiunge quindi il suo massimo valore lungo la linea di riva ($d=0$).

Per quanto riguarda invece l'incremento del livello del mare per effetto dei cambiamenti climatici previsto dall'IPCC fra 100 anni, è possibile utilizzare la previsione elaborata dalla NASA, disponibile sul sito <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>, basata sul sesto ed ultimo rapporto dell'IPCC: considerando lo scenario più gravoso, SSP5-8.5 Low Confidence, a largo delle coste calabresi fra 100 anni è previsto un innalzamento del livello del mare di circa 1.26 metri (Figura 4.1).

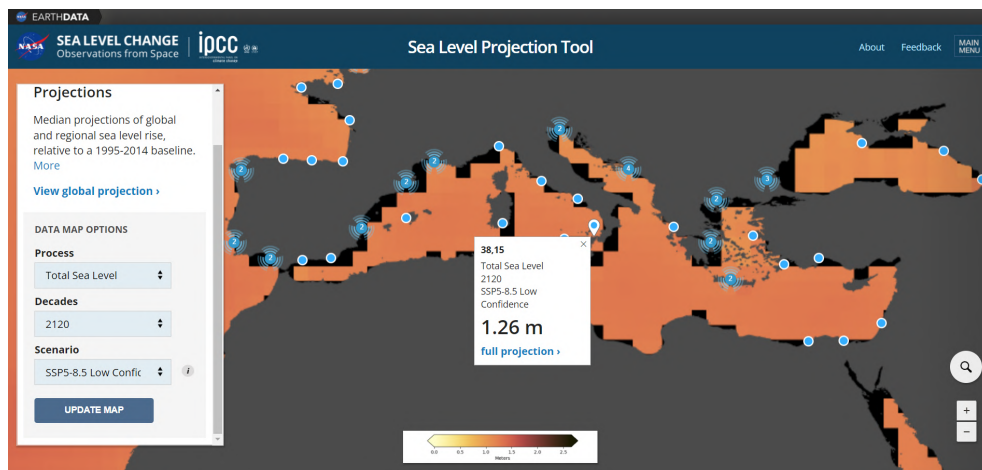


Figura 4.1: Previsione del livello del mare a largo delle coste calabresi fra 100 anni, secondo lo scenario più gravoso, elaborata dalla NASA sulla base del sesto ed ultimo rapporto dell'IPCC.

Il livello previsto tiene conto della variabilità sterodinamica del livello del mare, ovvero quella legata alle variazioni di temperatura e densità dell'acqua e che determina la circolazione oceanica,

del contributo legato ai ghiacciai e alle calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartico, della variabilità del deposito idrico terrestre, legato al prelievo e allo sfruttamento di acque sotterranee, e del contributo di subsidenza della costa.

Lo scenario più gravoso, SSP5-8.5 Low Confidence, in particolare, considera il potenziale effetto di processi di calotta glaciale a bassa probabilità e ad alto impatto che non possono essere esclusi in base al giudizio di esperti e ad un modello che include l'instabilità delle scogliere di ghiaccio marino.

La perimetrazione dell'area di pericolosità così definita, la cui metodologia di calcolo è stata ampiamente sopra delineata, può essere effettuata su QGIS: calcolata la quota massima raggiunta dall'acqua in una determinata località, come prima descritto, per determinare l'area di pericolosità basterà semplicemente individuare la quota di un file raster rappresentativo dell'elevazione del terreno, come, ad esempio, un Digital Terrain Model (DTM) o un Digital Surface Model (DSM); tramite gli strumenti di processing di QGIS, sarà possibile estrarre da tali files la curva di livello corrispondente alla quota calcolata e perimetrare quindi l'area di pericolosità che si estenderà da questa verso mare fino alla linea di costa. Un esempio di perimetrazione su QGIS dell'area di pericolosità è mostrato in Figura 4.2.



Figura 4.2: Esempio di perimetrazione dell'area di pericolosità su QGIS relativa al tratto di costa esaminato.

Dopo aver descritto la procedura di valutazione dell'area di applicazione della metodologia, saranno di seguito definiti tutti gli indici di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione su cui essa si basa.

4.3 Definizione degli indici di pericolosità

I fattori di pericolosità costiera sono in qualche modo legati a tutte quelle forzanti climatiche che forniscono, ognuna in proporzioni diverse, un contributo all'erosione costiera, quali maree, correnti, venti, moto ondoso ed aumento del livello del mare per effetto del riscaldamento globale, fenomeno strettamente attuale e non più trascurabile nel trattare un problema del genere. Tra i fattori di pericolosità, il clima ondoso ha sicuramente un peso maggiore nella determinazione dell'erosione costiera, per cui risulta fondamentale stimare i principali parametri ad esso correlati, quali il flusso di energia, l'angolo di incidenza sulla costa (sia del settore di traversia principale che di eventuali settori secondari), il run-up ed il set-up e le variazioni di altezza significativa al variare del periodo di ritorno. Di seguito, vengono riportati gli indici di pericolosità costiera definiti.

4.3.1 Indice legato all'innalzamento del livello medio del mare (SLR)

Per la determinazione dell'indice legato all'innalzamento del livello medio del mare (Sea Level Rise – SLR), molti studi presenti in letteratura, tra cui quello di Mavromatidi et al. (2018) applicato in Francia, hanno considerato la suddivisione in classi proposta da Pendleton et al. (2004), che ha condotto uno studio sulla vulnerabilità costiera legata all'innalzamento del livello medio del mare. Nel presente studio si è deciso di adottare tale classificazione, che è basata sulla velocità di innalzamento del livello medio del mare ed è descritta in Tabella 4.3:

Tabella 4.3: Indice legato alla variazione del livello medio del mare (SLR).

INDICE	CLASSI DI PERICOLOSITÀ				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
SLR [mm/anno]	< 1.8	1.8 ÷ 2.5	2.5 ÷ 3.0	3.0 ÷ 3.4	≥ 3.4

La stima del valore di SLR, espressa in mm/anno, può essere effettuata sulla base dei numerosi studi presenti in letteratura, fondati sull'analisi di dati satellitari, oppure sulle valutazioni dell'I-PCC e della NASA, come descritto nel secondo capitolo. È un parametro che viene valutato su scala globale, la cui variazione sicuramente non può essere significativa a livello regionale.

Tuttavia, si è ritenuto fondamentale tener conto di questo parametro come fattore che nel tempo può determinare un incremento di pericolosità.

4.3.2 Indice legato all'escursione di marea

L'indice che tiene conto dell'effetto della marea è stato definito in funzione dell'escursione di marea media, misurata in metri, e la sua classificazione è stata determinata considerando la classificazione in cinque classi del regime di marea proposta da Hayes (1979), descritta in Tabella 2.2. Di conseguenza, l'indice legato all'escursione di marea può essere valutato secondo la Tabella 4.4:

Tabella 4.4: Indice legato all'escursione di marea.

INDICE	CLASSI DI PERICOLOSITÀ				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Escursione di marea media [m]	< 1	1 ÷ 2	2 ÷ 3.5	3.5 ÷ 5	≥ 5

La stima dell'escursione di marea media, su cui si basa la valutazione dell'indice relativo, tiene conto ovviamente sia del contributo di marea astronomica, che di quello di marea meteorologica, e, pertanto, può essere effettuata tramite l'analisi dei dati forniti dai mareografi della RMN, gestita dall'ISPRA.

4.3.3 Indice legato alle correnti marine

Come descritto già nel secondo capitolo, le correnti marine possono favorire l'erosione costiera, soprattutto in zone, come gli stretti o i canali, la cui conformazione geografica determina un incremento della loro velocità. All'aumentare della velocità delle correnti, infatti, aumenta la pericolosità. Mentre nel Mediterraneo le correnti sono caratterizzate da velocità al massimo pari a 1 nodo, nell'area dello Stretto di Messina, per la conformazione delle coste calabresi e siciliane, assumono valori dieci volte maggiori. In particolare, da uno studio sulle correnti, è emerso che la massima velocità, espressa in nodi, si ha nel punto più stretto dello Stretto di Messina, ovvero tra Punta Pezzo e Ganzirri, a cui corrisponde un valore di circa 11 nodi (Mosetti, 1995), mentre nel Tirreno e nello Ionio variano tra 0.4 e 0.7 nodi.

Dunque, per considerare l'incidenza di tale fenomeno sulle coste calabresi sono state definite delle classi di pericolosità in funzione dei valori medi di corrente, espressa in nodi, dei mari italiani e dello Stretto di Messina, descritte in Tabella 4.5:

Tabella 4.5: Indice legato alle Correnti Marine.

INDICE	CLASSI DI PERICOLOSITÀ				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Correnti [nodi]	< 0.5	0.5 ÷ 1.5	1.5 ÷ 3	3 ÷ 5	≥ 5

La valutazione della velocità delle correnti marine, su cui si basa l'indice relativo, può essere effettuata sulla base dei dati disponibili in letteratura, nelle Tavole di Marea e nelle carte nautiche.

4.3.4 Indice legato al vento

L'indice legato al vento permette di tener conto dell'aliquota di erosione costiera, generalmente molto piccola, generata dall'azione diretta del vento sulla costa, ovvero della "deflazione". L'indice in questione, funzione della capacità di trasporto del vento, può essere definito in funzione del numero di ore in un anno, espresso in percentuale, in cui la velocità registrata supera la soglia critica per il trasporto eolico e può essere valutato mediante la Tabella 4.6:

Tabella 4.6: Indice legato al vento.

INDICE	CLASSI DI PERICOLOSITÀ				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Vento [%]	< 5	5 ÷ 15	15 ÷ 25	25 ÷ 35	≥ 35

La valutazione del trasporto eolico può essere quindi effettuata in funzione dell'analisi statistica dei dati di vento e delle caratteristiche sedimentologiche del sito in esame. Il valore su cui si basa l'indice altro non è, per definizione, che la probabilità di superamento di una soglia critica della velocità del vento. La soglia critica per il trasporto eolico u_{*c} è stata definita dalla relazione di Bagnold (1941) in funzione delle caratteristiche medie dei sedimenti della spiaggia emersa

(espressione (2.4)). I dati di vento disponibili, invece, sono generalmente registrati alla quota di 10 metri. In mancanza di profili di velocità che richiedono l'impiego di una stazione anemometrica con più quote di misura, è possibile calcolare la velocità critica di taglio u_* a partire dalle registrazioni del vento alla quota di 10 metri mediante la semplificazione proposta da Hsu (1974), di largo uso nelle applicazioni di ingegneria ambientale per il calcolo del trasporto eolico potenziale:

$$u_* = 0.037 \cdot V_{10m} \quad (4.10)$$

Pertanto, sfruttando la forma inversa dell'espressione (4.10), è possibile effettuare un confronto tra la soglia critica per il trasporto eolico e i dati di vento registrati alla quota di 10 metri e determinare il valore dell'indice sopra definito per la località in esame.

4.3.5 Indice legato al clima ondoso

Per quanto riguarda la determinazione dell'indice legato al moto ondoso, si è ritenuto opportuno suddividere la regione di applicazione in delle macro-aree in funzione della diversa esposizione delle coste al moto ondoso. Pertanto, a tal fine, la regione Calabria, che rappresenta un complesso caso studio per l'applicazione della procedura elaborata, è stata suddivisa in tre macro-aree: l'area tirrenica, l'area dello Stretto di Messina e l'area ionica, caratterizzate oltre che da differenti caratteristiche climatiche, soprattutto da differenti caratteristiche geografiche, in particolare in termini di fetch. È noto, infatti, come la generazione del moto ondoso sia funzione delle caratteristiche del vento (velocità e direzione) e della lunghezza del tratto di mare su cui esso spira senza incontrare ostacoli (fetch).

Partendo dalla definizione dell'indice rappresentativo del moto ondoso proposto da Barbaro (2016), utilizzato per la determinazione dell'indice di pericolosità nel "Master Plan degli interventi di mitigazione del rischio di erosione costiera in Calabria", nel presente studio è stata suggerita una nuova definizione dell'indice, che, rispetto al precedente, ha permesso di tenere in conto anche l'influenza dell'eventuale presenza di settori di traversia secondari del moto ondoso e dell'entità del run-up al variare del periodo di ritorno, piuttosto che della pendenza del fondale. Pertanto, l'indice legato al clima ondoso è stato determinato considerando una media ponderata, con pesi uguali, di quattro sub-indici, che possono assumere valori compresi tra 0 e 1, ed è così definito:

$$I = 0.25(I_\phi + I_{\alpha,\beta} + I_{\Delta h} + I_{Ru}) \quad (4.11)$$

dove:

1. I_ϕ è l'indice legato al flusso di energia, così definito:

$$I_\phi = \frac{\Phi}{\Phi_{max}} \quad (4.12)$$

con:

- $\Phi = \sum_{i=1}^n \phi_i$ somma degli n flussi di energia dei relativi settori attivi (o incidenti) nella località in esame;
- Φ_{max} contributo di energia massimo, ovvero valore massimo di Φ , registrato nella macro-area di riferimento.

Si ricorda che il flusso di energia può essere calcolato per ogni classe di altezza significativa ΔH e per ogni settore di provenienza $\Delta\theta$ mediante l'espressione (2.16).

2. $I_{\alpha,\beta}$ è l'indice legato ai settori di traversia principale e secondario, definito come media pesata degli indici legati singolarmente ai due settori, laddove entrambi presenti, dove il peso è dato dai flussi di energia nei rispettivi settori:

$$I_{\alpha,\beta} = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_\alpha + \Phi_\beta} I_\alpha + \frac{\Phi_\beta}{\Phi_\alpha + \Phi_\beta} I_\beta \quad (4.13)$$

con:

- Φ_α flusso di energia del moto ondoso nella direzione del settore di traversia principale nella località in esame;
- Φ_β flusso di energia del moto ondoso nella direzione del settore di traversia secondario nella località in esame;
- $I_\alpha = \Delta\alpha/(90)$ indice legato al settore di traversia principale nella località in esame, con:

$$\Delta\alpha = \begin{cases} \alpha & \text{se } \alpha \leq 90^\circ \\ 180^\circ - \alpha & \text{se } \alpha > 90^\circ \end{cases} \quad (4.14)$$

- $I_\beta = \Delta\beta/(90)$ indice legato al settore di traversia secondario nella località in esame, con:

$$\Delta\beta = \begin{cases} \beta & \text{se } \beta \leq 90^\circ \\ 180^\circ - \beta & \text{se } \beta > 90^\circ \end{cases} \quad (4.15)$$

- α, β angoli formati rispettivamente tra il settore di traversia principale e secondario e la linea di costa della località in esame.

Si ricorda che il settore di traversia principale viene individuato come il settore in cui il flusso di energia assume il valore massimo, mentre quello secondario può essere individuato in corrispondenza di un picco secondario nella rappresentazione del flusso di energia. L'indice legato al settore di traversia principale consente di considerare l'importanza del settore dal quale provengono le onde più forti: il litorale soggetto a stati di mare ortogonali alla linea di costa, subendo solo fenomeni di shoaling, infatti, è più sollecitato rispetto a stati di mare più inclinati, i quali risentono anche della rifrazione nell'interazione con il fondale. Dalla definizione del sub-indice ne segue, quindi, che man mano che il settore di traversia principale tende all'ortogonale alla costa, l'indice si avvicina ad 1, individuando così il grado di pericolosità maggiore. Quanto detto vale in modo analogo per il settore di traversia secondario, che è necessario prendere in considerazione nelle località in cui è presente, in quanto un litorale è maggiormente sollecitato in presenza di due settori di traversia e per tale motivo è stato introdotto rispetto all'originale formulazione proposta da Barbaro (2016). Inoltre, si fa presente che per far variare $\Delta\alpha$ e $\Delta\beta$ tra 0 e 90, in modo da ottenere per gli indici relativi valori compresi tra 0 (stati di mare molto inclinati) e 1 (stati di mare ortogonali alla linea di costa), è risultato necessario distinguere i due casi descritti nelle formule (4.14) e (4.15).

3. $I_{\Delta h}$ è l'indice legato alla variazione dell'altezza significativa col periodo di ritorno, così definito:

$$I_{\Delta h} = \frac{\overline{\Delta h(R)}}{\overline{\Delta h(R)}_{max}} \quad (4.16)$$

con:

- $\overline{\Delta h(R)}$ media dei $\Delta h(R)$ calcolati per i diversi periodi di ritorno, con $\Delta h(R)$ differenza tra l'altezza significativa riferita ai periodi di ritorno nella località in esame;
- $\overline{\Delta h(R)}_{max}$ valore massimo di $\overline{\Delta h(R)}$ calcolato per la macro-area di riferimento.

I valori di altezza significativa per fissato periodo di ritorno determinati con la serie di Bocchetti (2000), ricavata a partire dall'espressione (2.15), hanno permesso di calcolare le variazioni di altezza significativa $\Delta h(R)$, considerando il periodo di ritorno precedente e quello

successivo e valutarne infine il valore medio. In particolare, i periodi di ritorno utilizzati per tale calcolo sono: 1, 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni. Determinato il valore medio di $\Delta h(R)$, è stato calcolato il relativo indice che considera l'aliquota di pericolosità legata all'altezza significativa delle onde riferita al periodo di ritorno. Si ricorda che per la determinazione dell'altezza significativa delle onde di fissato periodo di ritorno, è necessario effettuare uno studio statistico dei dati meteomarini che permetta di ricavare per la località in esame i parametri caratteristici del moto ondoso u , w , a_{10} e b_{10} .

4. I_{Ru} è l'indice legato alla variazione del run-up col periodo di ritorno, così definito:

$$I_{Ru} = \frac{\overline{\Delta Ru(R)}}{\Delta Ru(R)_{max}} \quad (4.17)$$

con:

- $\overline{\Delta Ru(R)}$ media dei $\Delta Ru(R)$, con $\Delta Ru(R)$ differenza tra i valori di run-up calcolati per i diversi periodi di ritorno nella località in esame;
- $\Delta Ru(R)_{max}$ valore massimo di $\overline{\Delta Ru(R)}$ calcolato per la macro-area di riferimento.

La procedura per il calcolo del valore medio della variazione del run-up è analoga a quella descritta precedentemente per le altezze significative, utilizzando per il calcolo del valore di run-up la formulazione di Stockdon et al. (2006).

In definitiva, l'indice legato al clima ondoso può assumere valori compresi tra 0 ed 1, ripartiti equamente in 5 classi di pericolosità; pertanto, la sua valutazione, fondata sull'analisi statistica dei dati meteomarini, può essere effettuata secondo la classificazione descritta in Tabella 4.7:

Tabella 4.7: Indice legato al clima ondoso.

INDICE	CLASSI DI PERICOLOSITÀ				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Clima ondoso	< 0.2	0.2 ÷ 0.4	0.4 ÷ 0.6	0.6 ÷ 0.8	≥ 0.8

4.4 Valutazione della pericolosità

In definitiva, l'indice di pericolosità complessivo è definito in funzione di cinque indici di pericolosità:

1. un indice legato all'innalzamento del livello medio del mare (SLR);
2. un indice legato all'escursione di marea;
3. un indice legato alle correnti marine;
4. un indice legato al vento;
5. un indice legato al clima ondoso.

La percezione del rischio da parte delle parti interessate e dei decisori politici svolge un ruolo chiave nella gestione del rischio costiero (Bruno et al., 2021). Pertanto, in seguito ad un'attenta valutazione scientifica dell'incidenza dei vari indici in Calabria e ad un confronto con i decisori politici della Regione Calabria, è stato stabilito il seguente sistema di pesi da attribuire ai cinque indici di pericolosità:

Tabella 4.8: Sistema di pesi attribuiti agli indici di pericolosità.

INDICE	W_h
SLR	0.2
Escursione di marea media	0.1
Correnti	0.1
Vento	0.1
Clima ondoso	0.5

Come mostrato in Tabella 4.8, si è deciso di attribuire il peso maggiore, pari al 50% del totale, all'indice legato al clima ondoso, in quanto rappresenta la maggiore forzante climatica responsabile del fenomeno di erosione costiera. Per quanto riguarda invece l'escursione di marea media, in Calabria essa è dell'ordine dei cm (Sannino et al., 2015), pertanto l'incidenza di tale fattore sul fenomeno è di minore entità e il peso attribuitogli è pari al 10%.

Allo stesso modo, anche le correnti marine ed il vento sono forzanti che in Calabria incidono lievemente nel processo di erosione costiera, anche se una loro valutazione è stata comunque ritenuta opportuna; pertanto, agli indici relativi è stato attribuito un peso del 10%.

Infine, all'indice relativo all'innalzamento del livello del mare è stato attribuito un peso del 20%, in considerazione del fatto che l'incremento di tale valore, come descritto nelle previsioni dell'IPCC, determinerà effetti distruttivi sulle coste nel lungo periodo, in termini sia di inondazione che di erosione costiera. Una volta ottenuto il valore dell'indice di pericolosità è possibile effettuare una sua classificazione come descritto in Tabella 4.9:

Tabella 4.9: Classificazione dell'indice di pericolosità.

Definizione	I_H
Pericolosità bassa	< 20 %
Pericolosità medio - bassa	20 ÷ 40 %
Pericolosità media	40 ÷ 60 %
Pericolosità medio - alta	60 ÷ 80 %
Pericolosità alta	≥ 80 %

4.5 Definizione degli indici di vulnerabilità

I fattori di vulnerabilità costiera permettono di descrivere il grado di suscettibilità del territorio al fenomeno dell'erosione costiera. Pertanto, gli indici di vulnerabilità riguardano tutte quelle caratteristiche che possono rendere il litorale più o meno sensibile alla dinamica erosiva, come ad esempio quelle geologiche e morfologiche della costa (sia della parte emersa che della parte sommersa), il trend evolutivo della linea di costa (a breve, medio e lungo termine), il confronto tra l'entità del trasporto solido litoraneo e gli apporti fluviali, la presenza di opere di difesa costiera e portuali, la presenza di sistemi dunali e di vegetazione, i tassi di subsidenza del terreno ed il grado di impermeabilizzazione della costa.

Per la valutazione di gran parte di tali indici, sono stati utilizzati i dati satellitari e topografici disponibili su Google Earth e nelle sezioni Open Data dei Geoportali Regionale e Nazionale. Di seguito, vengono riportati gli indici di vulnerabilità costiera definiti.

4.5.1 Indice legato alla tipologia di costa

Come descritto nel secondo capitolo, le coste possono essere classificate secondo diversi criteri: quella più comune è la distinzione tra coste alte e rocciose e quelle basse e sabbiose.

Di conseguenza è facilmente intuibile come la tipologia della costa in esame possa determinare una minore o maggiore vulnerabilità all'erosione costiera, a seconda che ricada rispettivamente nel primo o nel secondo caso.

La determinazione delle classi di vulnerabilità per la tipologia di costa è stata effettuata utilizzando la classificazione proposta da Ferreira et al. (2017), in quanto risulta completa ed in linea con le tipologie di coste presenti in Calabria.

Pertanto, la valutazione dell'indice legato alla tipologia di costa può essere effettuata secondo la classificazione descritta in Tabella 4.10:

Tabella 4.10: Indice legato alla tipologia di costa.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Tipologia della costa	Coste alte e rocciose	Scogliere medie, coste frastagliate	Scogliere basse, pianure alluvionali	Spiagge sabbiose, estuari, lagune	Spiagge sabbiose, sistemi dunali

4.5.2 Indice legato alla morfologia della costa emersa

Per la determinazione dell'indice relativo alla morfologia della costa emersa sono stati considerati due sottoindici, legati ai seguenti parametri caratteristici:

- la pendenza della spiaggia (%);
- la larghezza media della spiaggia (m).

Come descritto nel secondo capitolo, le spiagge caratterizzate da debole pendenza sono costituite generalmente da sedimenti più fini, di conseguenza sono sicuramente più erodibili rispetto a quelle caratterizzate da forte pendenza. Inoltre, bisogna tener presente che, a parità di condizioni meteo-marine, una pendenza minore determina un'area inondabile più estesa e quindi una vulnerabilità maggiore.

Pertanto, la vulnerabilità relativa alla pendenza della spiaggia, espressa in percentuale, aumenta al diminuire della pendenza. La valutazione della pendenza della spiaggia può essere effettuata mediante il tracciamento di transetti con spaziatura significativa su Google Earth oppure mediante

plug-in di QGIS, come ad esempio il “Terrain Profile”, che permettono di rappresentare il profilo piano-altimetrico di transetti utilizzando come dati di input i DTM disponibili.

La larghezza media della spiaggia emersa è anch’essa un’importante caratteristica che influenza la vulnerabilità del litorale: spiagge caratterizzate da ampiezza molto piccola, infatti, sono ovviamente più vulnerabili di spiagge molto grandi. Pertanto, la vulnerabilità relativa alla larghezza media della spiaggia emersa, espressa in metri, aumenta al diminuire della larghezza.

La valutazione di tale grandezza può essere facilmente effettuata su QGIS o su Google Earth mediante le funzioni di analisi spaziale, utilizzando le immagini satellitari più recenti disponibili, prendendo in considerazione un numero di transetti significativo per l’estensione del tratto di costa studiato.

Le classi di vulnerabilità di questi due sottoindici sono state definite partendo dalla proposta di Ferreira et al. (2017) e adattandola alle coste calabresi. In particolare, la pendenza delle spiagge calabresi raggiunge anche valori del 16%, mentre la larghezza media supera i 100 metri. L’indice complessivo della morfologia della costa emersa è determinato dalla media dei due sottoindici sopra descritti, ai quali viene quindi attribuito lo stesso peso. In definitiva, la valutazione dell’indice legato alla morfologia della costa emersa può essere effettuata secondo la classificazione descritta in Tabella 4.11:

Tabella 4.11: Indici legati alla morfologia della costa emersa.

INDICE		CLASSI DI VULNERABILITÀ				
		Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Morfologia costa emersa	Pendenza costa [%]	≥ 12	$12 \div 9$	$9 \div 6$	$6 \div 3$	< 3
	Larghezza media spiaggia emersa [m]	≥ 80	$80 \div 60$	$60 \div 40$	$40 \div 20$	< 20

4.5.3 Indice legato alla morfologia della costa sommersa

Per descrivere la morfologia della costa sommersa, invece, si è tenuto conto della pendenza del fondale, espressa in percentuale. La vulnerabilità relativa è legata al fatto che un aumento di pendenza del fondale genera un incremento di run-up, di conseguenza il litorale è più vulnerabile

all'erosione. Pertanto, la vulnerabilità relativa alla pendenza del fondale aumenta all'aumentare della pendenza.

Per la valutazione della pendenza del fondale è possibile utilizzare i dati batimetrici disponibili sul portale "EMODnet-Bathymetry", sviluppato nell'ambito dell'"European Marine Observation and Data Network (EMODnet)", determinabili tramite strumenti GIS, per le regioni marittime europee, a partire dalla generazione di un modello digitale del terreno (DTM).

Anche per la classificazione della vulnerabilità relativa alla pendenza del fondale è stata considerata la proposta fatta per il Portogallo da Ferreira et al. (2017), adattandola alle coste calabresi. In Calabria, la pendenza del fondale in alcune località supera anche il 20%, soprattutto nell'area dello Stretto di Messina, caratterizzata da fondali molto ripidi. Pertanto, la valutazione dell'indice legato alla morfologia della costa sommersa, espresso in termini di pendenza del fondale, può essere effettuata secondo la classificazione descritta in Tabella 4.12:

Tabella 4.12: Indice legato alla morfologia della costa sommersa.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Morfologia costa sommersa - Pendenza del fondale [%]	< 2	2 ÷ 6	6 ÷ 10	10 ÷ 20	≥ 20

4.5.4 Indice legato al trasporto solido litoraneo e fluviale

Nella determinazione della vulnerabilità di un litorale è necessario tenere in considerazione il bilancio tra il trasporto solido litoraneo, responsabile dell'erosione costiera per effetto delle forzanti meteomarine e delle caratteristiche batimetriche dei fondali e di quelle morfologiche e granulometriche dei sedimenti, e le variazioni di apporti sedimentari fluviali, legate sia al regime delle piogge che ad interventi antropici che interessano i bacini idrografici (sbarramenti fluviali, regimazioni idrauliche, ecc.).

Nonostante il trasporto solido litoraneo e fluviale siano delle grandezze generate dalle forzanti climatiche, tuttavia, una loro stima in termini assoluti non risulterebbe efficace per la determinazione del rischio costiero; al contrario, quello che può rendere un tratto di costa più vulnerabile in tali termini è la loro combinazione: la vulnerabilità, infatti, cresce all'aumentare del trasporto

solido litoraneo e al diminuire di quello fluviale, che costituisce la principale fonte di sedimenti in grado di alimentare la spiaggia.

Pertanto, è stata proposta la seguente definizione per la determinazione di un indice che possa tenere conto del bilancio sedimentario, generato dal confronto tra il trasporto solido litoraneo e quello fluviale:

$$I = \frac{Q_r}{Q_l} \quad (4.18)$$

dove:

- Q_r rappresenta il contributo degli apporti sedimentari fluviali che insistono sul tratto di costa in esame;
- Q_l è il trasporto solido litoraneo longshore stimato nella località studiata.

La definizione di tale indice tiene conto anche della possibilità che il trasporto solido fluviale in un determinato tratto di costa possa essere nullo, condizione che determinerebbe una situazione di vulnerabilità massima (quinta classe); al contrario, una situazione in cui l'apporto sedimentario fluviale risulti maggiore o uguale del trasporto solido litoraneo ($Q_r \geq Q_l$) determinerebbe un valore dell'indice $I \geq 1$ ed una classe di vulnerabilità minima (prima classe), tenendo conto che la loro valutazione viene effettuata in condizioni medie.

Per la stima di Q_r è necessario tener presente tutti i contributi fluviali che possono determinare l'accrescimento del tratto di costa in esame, quindi, prendendo in considerazione l'intera unità fisiografica in cui ricade il litorale ed il verso del trasporto solido litoraneo. Pertanto, il termine "insistono" è da intendersi in tale accezione, non considerando soltanto i contributi che sfociano direttamente nel tratto di costa esaminato.

Per quanto riguarda la valutazione dell'entità dei trasporti è possibile ricorrere a modelli di calcolo, laddove una modellazione numerica, che fornirebbe senz'altro risultati più precisi, non è realizzabile per mancanza di dati di input (batimetriche di dettaglio, analisi granulometrica, rilievi dei corsi d'acqua, caratteristiche delle opere di regimazione presenti, ecc.). In tale studio, dato l'alto numero di località in cui effettuare la valutazione, si è deciso di percorrere la strada dei modelli di calcolo, che comunque risulta efficace, in quanto, dovendo effettuare un confronto tra le due grandezze, consente di stimare con accuratezza l'ordine di grandezza dell'entità del trasporto solido litoraneo e fluviale.

Pertanto, per la valutazione del trasporto solido litoraneo si è proposto l'utilizzo del modello di Tomasicchio et al. (2013), descritto nel secondo capitolo, che permette di stimare una portata media annua, espressa in $m^3/anno$, di materiale solido longshore. Per la stima del trasporto solido fluviale, invece, si è deciso di utilizzare il modello empirico multiparametrico di Gavrilovic (1959), analizzato nel secondo capitolo, che consente di calcolare con un grado di affidabilità alto il volume medio annuo di materiale eroso che si raccoglie alla sezione di chiusura, espresso in $m^3/anno$, in bacini caratterizzati da alte pendenze, tempi di corrivazione modesti e regime torrentizio, come quelli calabresi.

In definitiva, tenendo conto di quanto descritto sopra, la valutazione dell'indice legato al trasporto solido litoraneo e fluviale può essere effettuata secondo la classificazione descritta in Tabella 4.13:

Tabella 4.13: Indice legato al trasporto solido litoraneo e fluviale.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Trasporto solido litoraneo e fluviale	≥ 1	$1 \div 0.75$	$0.75 \div 0.5$	$0.5 \div 0.25$	< 0.25

4.5.5 Indice legato all'evoluzione della linea di costa

Indicativo dello stato di salute di un litorale è il trend evolutivo della linea di costa, la cui valutazione risulta indispensabile per la comprensione della dinamica costiera.

Tale studio è molto impegnativo e l'analisi su cui si basa viene effettuata attraverso il confronto di vari dati cartografici, di cui si ha disponibilità. Le fonti di questi dati possono essere i Geoportali regionali e nazionali e le immagini satellitari fornite da Google Earth.

Per la valutazione delle tendenze evolutive del litorale, la metodologia proposta in questo studio è descritta di seguito e può essere articolata in nove fasi:

1. Acquisizione dei dati cartografici disponibili, per esempio linee di riva storiche, ortofoto, immagini satellitari etc.;
2. Digitalizzazione manuale delle linee di riva mancanti, a partire da ortofoto ed immagini satellitari, utilizzando QGIS per le ortofoto e Google Earth Pro per le immagini satellitari;

3. Scelta e tracciamento dei transetti rappresentativi di ciascun'area utilizzando QGIS;
4. Tracciamento della baseline per ciascun transetto utilizzando QGIS;
5. Stima dell'ampiezza di spiaggia per ciascun transetto utilizzando QGIS;
6. Stima delle variazioni della linea di riva per ciascun transetto, in termini di End Point Rate (EPR) e Net Shoreline Movement (NSM);
7. Stima della distanza lungo costa tra i vari transetti, utilizzando QGIS;
8. Stima della velocità di variazione di ciascun'area;
9. Classificazione del trend evolutivo di ciascun'area utilizzando la nuova procedura basata su indici.



Figura 4.3: Diagramma di flusso della metodologia proposta.

Per quanto riguarda la seconda fase, è fondamentale la scelta di un criterio adeguato alla regione di interesse per la rilevazione della linea di riva. Ad esempio, nel caso in esame, a causa delle

diverse condizioni oceanografiche tra le diverse cartografie, si è scelto di considerare come linea di riferimento la wet/dry line (Boak & Turner, 2005) mentre gli effetti legati all'escursione di marea sulla variazione della posizione del litorale sono trascurabili, in quanto in Calabria l'escursione di marea è dell'ordine di decine di centimetri (Sannino et al., 2015).

Per quanto riguarda la terza fase, particolare attenzione va posta alla spaziatura con cui vengono tracciati i transetti: essa deve essere tale da essere significativa per il tratto di costa analizzato e andrebbe ridotta in corrispondenza della presenza di opere di difesa costiera. Inoltre, per valutare la larghezza della spiaggia per ogni transetto è necessario identificare per ognuno di essi le baselines (quarta fase), delle linee che identificano il limite superiore della spiaggia e corrispondono a lungomari, dune e strutture. La stima dell'ampiezza di spiaggia per ciascun transetto (quinta fase) può essere effettuata seguendo una procedura di calcolo automatizzata, grazie all'uso del calcolatore di campi di QGIS: in particolare, inserendo un punto all'intersezione tra ogni transetto e le varie linee di costa mediante il tool "line intersection", è possibile poi utilizzare la funzione "shortest line", che consente di calcolare la distanza minima tra un punto e una linea retta, dove la linea retta è ogni baseline.

Circa la sesta fase, la valutazione del NSM e dell'EPR per ogni transetto può essere effettuata per diversi intervalli temporali, in funzione dei dati cartografici disponibili in partenza. In tale studio è stata proposta la seguente valutazione dell'andamento evolutivo del litorale per diversi intervalli di tempo:

- una tendenza evolutiva più recente (Most Recent - MR), con riferimento alle due linee di costa più recenti disponibili;
- una tendenza evolutiva a breve termine (Short Term - ST), con riferimento alle linee di costa disponibili negli ultimi 5 anni;
- una tendenza evolutiva a medio termine (Middle Term - MT), con riferimento alle linee di costa disponibili negli ultimi 20 anni;
- una tendenza evolutiva a lungo termine (Long Term - LT), con riferimento alle linee di costa disponibili negli ultimi 30 anni;
- una tendenza evolutiva a lunghissimo termine (Very Long Term - VLT), con riferimento alle linee di costa disponibili negli ultimi 70 anni.

Per quanto riguarda la settima fase, la stima della distanza lungo costa tra i vari transetti può essere effettuata su QGIS, utilizzando gli strumenti di processing di cui è dotato (centroidi, da punti a linea, esplodi linee, ecc.).

Per la valutazione della velocità di evoluzione del litorale complessiva per un determinato tratto di costa (ottava fase), è stata proposta una metodologia rapida basata sulla stima della velocità media ponderata di evoluzione della linea di costa, dove il peso è dato dalle aree di influenza di ogni transetto:

$$\bar{v} = \sum_i v_i \cdot \frac{\Delta A_i}{\Delta A_{tot}} \quad (4.19)$$

dove:

- v_i è la velocità del transetto i-esimo;
- ΔA_i è l'area d'influenza del transetto i-esimo;
- $\Delta A_{tot} = \sum_i \Delta A_i$ è la somma delle aree di influenza.

Tale procedura di calcolo, più speditiva, è stata validata nell'ambito di uno studio effettuato in diverse località calabresi: in particolare, essa è risultata valida in seguito ad un confronto effettuato con una procedura più onerosa basata sul calcolo della differenza delle aree guadagnate o erose in un determinato intervallo di tempo, ottenendo risultati perfettamente in accordo nei casi di valutazione della linea di costa a lungo termine e comunque soddisfacenti per evoluzioni a breve e medio termine.

L'analisi descritta, infine (nona fase), permette di valutare un indice che descrive la tendenza evolutiva del litorale, combinando le varie tendenze calcolate per diversi intervalli temporali come media pesata, con peso (weight) crescente man mano che l'intervallo temporale diminuisce. La scelta di dare peso maggiore alle tendenze a breve termine, pur tenendo conto nella valutazione complessiva di quella a medio e lungo termine, è legata alla necessità di considerare l'esistenza di processi erosivi in atto e quindi all'analisi dell'attuale vulnerabilità del litorale; inoltre, bisogna tener presente che le linee di costa più recenti provengono da fonti omogenee e la loro accuratezza è senz'altro maggiore di quelle più datate e di conseguenza anche la loro valutazione è più precisa. In particolare, i pesi definiti per la valutazione dell'indice complessivo sono ricalibrati su quattro tendenze, nel caso in cui quella "più recente" coincida con quella "a breve termine" oppure su un

numero minore di classi, nel caso in cui non vi siano linee di costa disponibili per effettuare la valutazione per tutti gli intervalli temporali considerati.

La determinazione delle classi di vulnerabilità relativa all'evoluzione della linea di costa è stata effettuata sulla base di quella proposta da Barbaro (2016), per cui la velocità media di variazione della linea di costa v , espressa in m/anno, è stata classificata in funzione di una suddivisione in 5 classi:

- una significativa dell'avanzamento del litorale ($v \geq 0.5$);
- una per condizioni di stabilità ($-0.5 \leq v < 0.5$);
- una per debole erosione ($-1 \leq v < -0.5$);
- una per intensa erosione ($-2 \leq -v < -1$);
- una per forte erosione ($v < -2$).

In definitiva, la valutazione dell'indice legato all'evoluzione della linea di costa può essere effettuata seguendo la classificazione descritta in Tabella 4.14:

Tabella 4.14: Indice legato all'evoluzione della linea di costa.

INDICE		CLASSI DI VULNERABILITÀ					Weight
		Very Low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very High 5	
Evoluzione della linea di costa [m/anno]	MR	≥ 0.5	$0.5 \div -0.5$	$-0.5 \div -1.0$	$-1.0 \div -2.0$	< -2.0	0.3
	ST	≥ 0.5	$0.5 \div -0.5$	$-0.5 \div -1.0$	$-1.0 \div -2.0$	< -2.0	0.25
	MT	≥ 0.5	$0.5 \div -0.5$	$-0.5 \div -1.0$	$-1.0 \div -2.0$	< -2.0	0.2
	LT	≥ 0.5	$0.5 \div -0.5$	$-0.5 \div -1.0$	$-1.0 \div -2.0$	< -2.0	0.15
	VLT	≥ 0.5	$0.5 \div -0.5$	$-0.5 \div -1.0$	$-1.0 \div -2.0$	< -2.0	0.1

4.5.6 Indice legato alla subsidenza

Un fenomeno che spesso riguarda le aree costiere rendendole più vulnerabili all'azione delle mareggiate e dell'innalzamento del livello marino è la subsidenza del terreno, frequentemente originata per effetto di cause antropiche. Pertanto, una sua valutazione risulta fondamentale per la

determinazione della vulnerabilità complessiva di un litorale. Tuttavia, la stima del tasso di subsidenza in una località richiede un elaborato processo di analisi interferometrica di grandi set di dati. In tale studio, la calibrazione delle classi di vulnerabilità relative al tasso di subsidenza medio, espresso in mm/anno, è stata effettuata sulla base degli studi presenti in letteratura che hanno riguardato le località calabresi affette da subsidenza.

In definitiva, tenendo conto che la vulnerabilità aumenta all'aumentare della velocità di abbassamento del terreno, la valutazione dell'indice legato alla subsidenza può essere effettuata seguendo la classificazione descritta in Tabella 4.15:

Tabella 4.15: Indice legato alla subsidenza.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Tasso di subsidenza medio [mm/anno]	≥ -1	$-1 \div -4$	$-4 \div -7$	$-7 \div -10$	< -10

4.5.7 Indice legato alla vegetazione

Come descritto ampiamente nel secondo capitolo, la presenza della vegetazione sulla spiaggia e sui fondali marini fornisce un importante contributo alla resilienza del litorale, in quanto permette di dissipare l'energia del moto ondoso, riducendo così l'erosione in caso di eventi estremi. Pertanto, la sua valutazione è fondamentale nella determinazione della vulnerabilità complessiva di un litorale.

L'indice legato alla vegetazione è stato quindi definito in funzione di tre sottoindici:

1. il primo sottoindice è significativo della larghezza media della vegetazione, intesa come ampiezza in senso trasversale alla linea di costa, misurata in metri e corretta mediante un coefficiente che permette di tenere in conto il grado di infittimento;
2. il secondo è funzione della percentuale di linea di costa ricoperta dalla presenza di vegetazione, espressa in percentuale;
3. il terzo tiene conto della presenza/assenza della Posidonia Oceanica sui fondali marini antistanti la località esaminata, che viene valutata quindi come una variabile booleana.

La determinazione delle classi di vulnerabilità relative ai tre sottoindici è stata effettuata sulla base degli studi effettuati da Sekovski et al. (2020) e Pantusa et al. (2018), adattando i range di variabilità per i valori che tali sottoindici assumono in Calabria.

Per quanto riguarda la valutazione della larghezza della vegetazione e della percentuale di linea di costa protetta da vegetazione, è possibile utilizzare le immagini satellitari più recenti e gli strumenti di analisi spaziale disponibili su Google Earth o QGIS. In particolare, la larghezza della vegetazione media per una località può essere stimata come valore medio di quella corretta valutata per un certo numero di transetti, tracciati con spaziatura tale da essere significativa per il litorale in esame.

La correzione dell'ampiezza di vegetazione per ogni transetto è stata effettuata riducendo il suo valore mediante un fattore correttivo, descritto in Tabella 4.16, a seconda del grado di infittimento della vegetazione.

La vulnerabilità del litorale ovviamente è maggiore al diminuire del valore dei primi due sottoindici, ovvero al diminuire della larghezza della vegetazione media e della percentuale della linea di costa protetta da vegetazione.

Tabella 4.16: Fattore correttivo che tiene conto del grado di infittimento della vegetazione.

Grado di infittimento della vegetazione	Molto basso	Basso	Medio	Alto	Molto alto
Punteggio	0.2	0.4	0.6	0.8	1

La presenza/assenza della Posidonia Oceanica, invece, può essere stimata sulla base delle informazioni fornite dal progetto Mediterranean Sensitive Habitats (MEDISEH) che ha coinvolto diversi istituti scientifici, tra cui HCMR-IMBRIW, HCMR-IO, IEO (Spagna), CoNISMa (Italia), CIBM (Italia), CNR (Italia), COISPA (Italia) e MCFS (Malta). Tale progetto ha raccolto informazioni sui dati storici e attuali relativi alla localizzazione e allo stato delle praterie di fanerogame, coralligeno e maerl in tutto il bacino del Mediterraneo, sviluppando modelli di distribuzione degli habitat a diverse scale spaziali, diffusi attraverso un Sistema Informativo Territoriale (GIS). Tra tutte le informazioni contenute nel database di tale progetto, infatti, diversi shapefiles contenenti le informazioni spaziali della Posidonia Oceanica nel Mediterraneo sono stati utilizzati per la valutazione della vulnerabilità relativa alla sua presenza o assenza.

In particolare, la vulnerabilità del litorale risulterà maggiore in assenza di Posidonia, nulla in sua presenza. Pertanto, in caso di assenza di Posidonia, verrà attribuito al sottoindice corrispondente il punteggio massimo di vulnerabilità, pari a 5, in caso di sua presenza, un punteggio nullo (nessuna vulnerabilità).

L'indice complessivo legato alla vegetazione potrà essere determinato come media pesata dei tre sottoindici, attribuendo, in particolare, un peso maggiore (pari al 40%) a ciascuno dei due sottoindici legati alla vegetazione presente sulla spiaggia ed un peso minore (pari al 20%) per il terzo sottoindice legato alla Posidonia Oceanica.

In definitiva, la valutazione dei tre sottoindici legati alla vegetazione può essere effettuata seguendo la classificazione descritta in Tabella 4.17:

Tabella 4.17: Indice legato alla vegetazione.

INDICE		CLASSI DI VULNERABILITÀ					Weight
		Very low	Low	Moderate	High	Very high	
		1	2	3	4	5	
Vegetazione	Larghezza vegetazione media [m]	≥ 100	75 ÷ 100	50 ÷ 75	25 ÷ 50	< 25	0.4
	Percentuale linea di costa protetta da vegetazione [%]	≥ 80	80 ÷ 60	60 ÷ 40	40 ÷ 20	< 20	0.4
	Posidonia oceanica	Presenza (0) / assenza (5)					0.2

4.5.8 Indice legato ai sistemi dunali

Anche la presenza dei sistemi dunali, come la vegetazione, rappresenta un elemento in grado di aumentare la resilienza di un litorale, in quanto costituiscono un sistema di difesa costiero naturale, e, pertanto, la loro valutazione è essenziale per la determinazione della vulnerabilità complessiva.

L'indice legato ai sistemi dunali è stato definito in funzione di tre sottoindici:

1. il primo sottoindice tiene conto dell'elevazione media della duna rispetto al l.m.m., misurata in metri;
2. il secondo sottoindice è funzione della larghezza media della duna, intesa come ampiezza in senso trasversale alla linea di costa e misurata in metri;

3. il terzo sottoindice permette di descrivere la percentuale della linea di costa della località esaminata protetta da sistemi dunali, espresso in percentuale.

La determinazione delle classi di vulnerabilità relative ai tre sottoindici è stata effettuata sulla base degli studi effettuati da Sekovski et al. (2020) e Pantusa et al. (2018), adattando i range di variabilità per i valori che tali sottoindici assumono in Calabria. Ovviamente al diminuire del valore dei tre sottoindici, diminuisce la resilienza del litorale e di conseguenza aumenta la sua vulnerabilità.

L'identificazione della presenza dei sistemi dunali può essere effettuata mediante la fotointerpretazione delle immagini satellitari più recenti e per la valutazione dei tre sottoindici sopra definiti è possibile utilizzare gli strumenti di analisi spaziale disponibili su Google Earth o QGIS, e, per uno studio più preciso, il suo plug-in "Terrain profile" e i DTM disponibili.

L'indice complessivo legato ai sistemi dunali che viene proposto potrà essere determinato come media pesata dei tre sottoindici, attribuendo, in particolare, un peso maggiore (pari al 40%) alla percentuale della linea di costa ricoperta dalla presenza di sistemi dunali ed un peso leggermente minore (pari al 30%) per i primi due sottoindici, identificativi delle caratteristiche morfometriche delle dune.

In definitiva, la valutazione dei tre sottoindici legati alla vegetazione può essere effettuata seguendo la classificazione descritta in Tabella 4.18:

Tabella 4.18: Indice legato ai sistemi dunali.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ					Weight	
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5		
Sistemi dunali	Altezza duna [m]	≥ 6	4 ÷ 6	2 ÷ 4	1 ÷ 2	< 1	0.3
	Larghezza duna [m]	≥ 100	75 ÷ 100	50 ÷ 75	25 ÷ 50	< 25	0.3
	Percentuale linea di costa protetta da dune [%]	≥ 80	80 ÷ 60	60 ÷ 40	40 ÷ 20	< 20	0.4

4.5.9 Indice legato alle opere di difesa costiera

Per la determinazione della vulnerabilità di un litorale è fondamentale anche la valutazione della presenza di opere di difesa costiera (pennelli, barriere emerse, barriere sommerse, ecc.), le quali condizionano l'andamento delle correnti litoranee e del trasporto solido ad esse associato, contribuendo talvolta ad accentuare l'erosione.

L'incidenza delle opere di difesa costiera sulla vulnerabilità del litorale all'erosione può essere valutata mediante la definizione di un indice in funzione della percentuale di linea di costa protetta, corretta mediante un fattore correttivo legato allo stato di conservazione delle opere α :

$$I = \frac{\text{linea di costa protetta}}{\text{linea di costa tot}} \cdot \alpha \quad (4.20)$$

Il fattore correttivo α è stato introdotto nella definizione dell'indice per tenere conto del grado di conservazione delle opere presenti nel tratto in esame, in quanto una barriera danneggiata certamente non assolverà lo stesso grado di protezione di una barriera appena realizzata. I valori che può assumere tale coefficiente in funzione dello stato di conservazione delle opere sono descritti in Tabella 4.19:

Tabella 4.19: Fattore correttivo che tiene conto dello stato di conservazione delle opere di difesa.

Stato di conservazione	Completamente disfatta	Pessimo	Insufficiente	Sufficiente	Buono	Ottimo
Fattore correttivo	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1

La valutazione dell'entità della linea di costa protetta, in mancanza di informazioni dettagliate sulle opere in questione, può essere effettuata mediante l'analisi delle immagini satellitari più recenti, utilizzando gli strumenti di analisi spaziale di Google Earth. In particolare, per la determinazione della linea di costa protetta, che è funzione della tipologia di opera, si propone la seguente linea metodologica:

- Se l'opera in questione è una barriera emersa, la linea di costa protetta corrispondente sarà considerata pari alla lunghezza della barriera stessa.
- Se si tratta di una barriera sommersa, la linea di costa protetta sarà identificata dalla lunghezza della barriera, ridotta mediante l'utilizzo di un coefficiente pari al coefficiente di

trasmissione dell'opera, che può essere valutato con la formula di Van der Meer (1988):

$$K_t = -0.3 \frac{R_c}{H_s} + 0.46 \quad (4.21)$$

dove R_c rappresenta la sommergenza dell'opera e H_s l'altezza significativa; in mancanza di informazioni dettagliate sulla sommergenza, si può considerare un valore cautelativo per R_c pari a 1 m, mentre come H_s può essere considerata quella valutata per la località in esame corrispondente ad un periodo di ritorno di 50 anni, in quanto tale periodo di ritorno è confrontabile con quello generalmente utilizzato da normativa per la progettazione delle opere di difesa.

- Se l'opera in questione è un pennello, la linea di costa protetta corrispondente sarà valutata in funzione della sua lunghezza e dell'angolo di attacco del moto ondoso.
- Infine, se si tratta di un pennello a T, ovvero di una combinazione di barriera e pennello, la linea di costa protetta sarà calcolata come somma dell'aliquota relativa alla barriera e di quella relativa al pennello.

È chiaro che la presenza delle opere riguarda dei litorali già soggetti ad erosione costiera, pertanto, in tali località, la vulnerabilità è tanto maggiore quanto minore è la percentuale della linea di costa protetta dalle opere. Nel caso di un litorale non protetto da opere di difesa costiera, il punteggio che andrà assegnato a tale indice sarà pari a zero (nessuna vulnerabilità). In tal caso, infatti, potrebbe trattarsi di un litorale che non ha problemi erosivi rilevanti al punto da ricorrere ad opere di difesa.

In definitiva, la valutazione dell'indice relativo alla presenza delle opere di difesa costiera, espresso in percentuale, può essere effettuata seguendo la classificazione descritta in Tabella 4.20:

Tabella 4.20: Indice legato alle opere di difesa costiera.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Presenza di opere di difesa costiera [%]	≥ 80	80 ÷ 60	60 ÷ 40	40 ÷ 20	< 20

4.5.10 Indice legato alla presenza di opere portuali

Anche la presenza di opere portuali può determinare un'alterazione delle condizioni naturali delle coste, innescando e propagando fenomeni erosivi. Pertanto, si è ritenuto necessario considerare il contributo di vulnerabilità che la presenza di tali opere può determinare, proponendo un indice che possa tenere conto dell'estensione massima del porto in direzione trasversale rispetto alla linea di costa (A): infatti, maggiore è la dimensione di un bacino portuale esterno, minore sarà la capacità di trasporto solido litoraneo dell'area e di conseguenza maggiore sarà la vulnerabilità.

Ovviamente, se la località esaminata non è caratterizzata dalla presenza di un bacino portuale che può determinare un'alterazione della dinamica litoranea in quell'area, all'indice dovrà essere assegnato un punteggio pari a zero (nessuna vulnerabilità).

Per determinare le classi di vulnerabilità, il valore di A, relativo ad una località in cui la presenza di un'opera portuale può determinare un incremento di vulnerabilità all'erosione costiera, è stato normalizzato rispetto al valore massimo registrato in regione Calabria. Pertanto, per la valutazione dell'indice relativo alla presenza di opere portuali, può essere utilizzata la classificazione descritta in Tabella 4.21:

Tabella 4.21: Indice legato alla presenza di opere portuali.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Presenza di opere portuali	< 0.2	0.2 ÷ 0.4	0.4 ÷ 0.6	0.6 ÷ 0.8	≥ 0.8

4.5.11 Indice legato al grado di antropizzazione della linea di costa

Analogamente a come è stato definito l'indice legato alla presenza di opere di difesa costiera, è stato possibile definire un indice legato alla porzione di litorale antropizzato, ovvero cementificato e quindi non erodibile, espresso in percentuale, laddove la linea di costa non è identificata dall'interfaccia spiaggia-mare, ma dalla presenza di una struttura o infrastruttura, spesso protetta da opere radenti. Maggiore sarà il grado di antropizzazione della linea di costa, ovvero la percentuale di costa non erodibile, e minore sarà la vulnerabilità all'erosione costiera del litorale in tali termini.

Pertanto, per la valutazione dell'indice legato al grado di antropizzazione della linea di costa, può essere utilizzata la classificazione descritta in Tabella 4.22:

Tabella 4.22: Indice legato al grado di antropizzazione della linea di costa.

INDICE	CLASSI DI VULNERABILITÀ				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Grado di antropizzazione della linea di costa [%]	≥ 80	80 ÷ 60	60 ÷ 40	40 ÷ 20	< 20

4.6 Valutazione della vulnerabilità

In definitiva, l'indice di vulnerabilità complessivo è definito in funzione di undici indici di vulnerabilità:

1. un indice legato alla tipologia di costa;
2. un indice legato alla morfologia della costa emersa;
3. un indice legato alla morfologia della costa sommersa;
4. un indice legato al trasporto solido litoraneo e fluviale;
5. un indice legato all'evoluzione della linea di costa;
6. un indice legato alla subsidenza;
7. un indice legato alla vegetazione;
8. un indice legato ai sistemi dunali;
9. un indice legato alle opere di difesa costiera;
10. un indice legato alla presenza di opere portuali;
11. un indice legato al grado di antropizzazione della linea di costa.

In seguito ad un'attenta valutazione scientifica dell'incidenza dei vari fattori di vulnerabilità in Calabria e ad un confronto con i decisori politici della Regione Calabria, si è stabilito di attribuire

a tutti gli indici di vulnerabilità lo stesso peso, in quanto già nella definizione delle classi di vulnerabilità si è tenuto conto della maggiore o minore rilevanza che tali indici possono avere al variare della località. Pertanto, come mostrato in Tabella 4.23, tutti gli indici di vulnerabilità avranno un peso pari a 1/11:

Tabella 4.23: Sistema di pesi attribuiti agli indici di vulnerabilità.

INDICE	W_v
Tipologia della costa	1/11
Morfologia costa emersa	1/11
Morfologia costa sommersa	1/11
Trasporto solido litoraneo e fluviale	1/11
Evoluzione della linea di costa	1/11
Subsidenza	1/11
Vegetazione	1/11
Sistemi dunali	1/11
Opere di difesa costiera	1/11
Opere portuali	1/11
Grado di antropizzazione della linea di costa	1/11

Una volta ottenuto il valore dell'indice di vulnerabilità è possibile effettuare una sua classificazione come descritto in Tabella 4.24:

Tabella 4.24: Classificazione dell'indice di vulnerabilità.

Definizione	I_v
Vulnerabilità bassa	< 20 %
Vulnerabilità medio - bassa	20 ÷ 40 %
Vulnerabilità media	40 ÷ 60 %
Vulnerabilità medio - alta	60 ÷ 80 %
Vulnerabilità alta	≥ 80 %

4.7 Definizione degli indici di esposizione

Per quanto riguarda la valutazione degli elementi esposti al rischio, si è tenuto conto principalmente di due indici: uno relativo alla popolazione residente nell'area di pericolosità ed uno definito in funzione delle classi di uso del suolo. Tale scelta è stata effettuata in considerazione del fatto

che per una stima socio-economica dettagliata del valore degli elementi esposti sono necessarie competenze specifiche, che esulano dal settore di ricerca su cui invece il presente lavoro si è concentrato.

Tuttavia, si vuole sottolineare come la stima dei due indici considerati, a partire da riferimenti legislativi e normativi, permette di effettuare una buona differenziazione e rappresentazione del valore socio-economico degli elementi esposti che ricadono nell'area soggetta a pericolosità da erosione costiera.

4.7.1 Indice relativo alla popolazione residente nell'area di pericolosità

L'indice relativo alla popolazione è stato valutato analogamente a come è stato definito il fattore PRICE nel progetto EUROSION (EUROSION, 2004; ISPRA, 2007): utilizzando come fonti i dati ISTAT e gli shapefiles relativi alle tipologie di usi del suolo calabrese, codificati secondo la Corine Land Cover (CLC) del 2018, la popolazione comunale residente nell'area di pericolosità P_{Ap} è stata stimata in base alla seguente relazione:

$$P_{Ap} = D_u \cdot A_{u,p} + D_a \cdot A_{a,p} + D_n \cdot A_{n,p} \quad (4.22)$$

dove:

- $A_{u,p}$ è l'area urbanizzata comunale contenuta nell'area di pericolosità A_p ;
- $A_{a,p}$ è l'area agricola comunale contenuta nell'area di pericolosità A_p ;
- $A_{n,p}$ è l'area naturale comunale contenuta nell'area di pericolosità A_p ;
- $D_u = 0.748 \cdot Pop/A_u$ è la densità abitativa delle aree urbanizzate comunali A_u ;
- $D_a = 0.217 \cdot Pop/A_a$ è la densità abitativa delle aree agricole comunali A_a ;
- $D_n = 0.035 \cdot Pop/A_n$ è la densità abitativa delle aree naturali comunali A_n ;
- Pop è la popolazione comunale.

Per quanto riguarda la valutazione della popolazione comunale, il suo valore è stato fornito tramite interrogazioni dell'ISTAT (www.dati-censimentipermanenti.istat.it) ed è riferito al dato più recente disponibile, ovvero alla popolazione residente nei comuni calabresi censita nell'anno 2020. In Figura 4.4 si riporta un estratto del dataset scaricabile dal sito sopra menzionato.

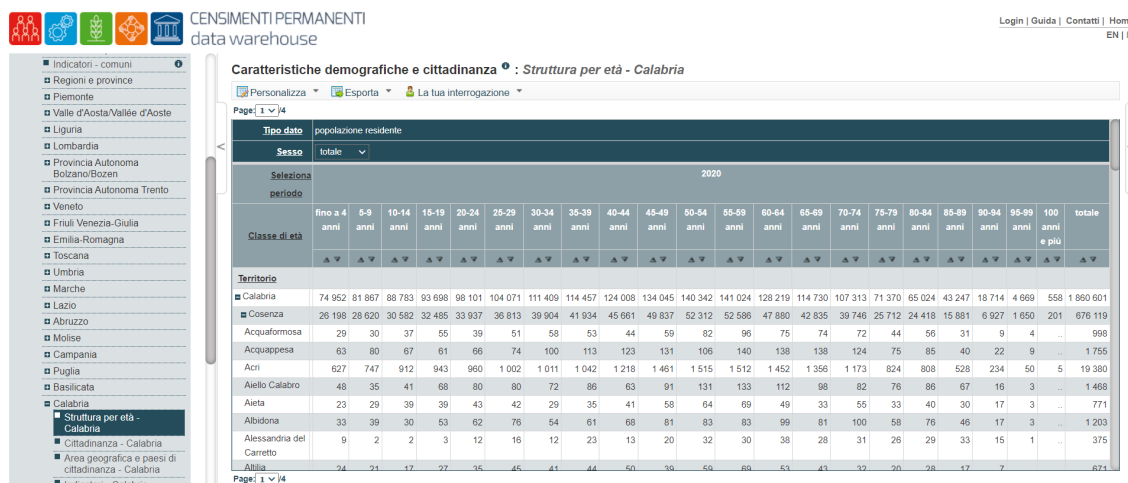


Figura 4.4: Estratto dell’interrogazione effettuata sul sito ISTAT per la valutazione della popolazione comunale.

La valutazione delle aree urbanizzate, agricole e naturali ricadenti nel comune e nell’area di pericolosità, invece, può essere effettuata su QGIS a partire dalle classi di uso del suolo codificate da Corine Land Cover (CLC) del 2018.

Pertanto, per la valutazione dell’indice relativo alla popolazione residente nell’area di pericolosità può essere utilizzata la classificazione descritta nella seguente tabella, elaborata in conformità alle indicazioni del progetto EUROSION (EUROSION, 2004; ISPRA, 2007):

Tabella 4.25: Classificazione dell’indice legato alla popolazione residente nell’area di pericolosità.

INDICE	CLASSI DI ESPOSIZIONE				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
	1	2	3	4	5
Popolazione residente nell’area di pericolosità [n° abitanti]	< 1000	1000 ÷ 5000	5000 ÷ 10000	10000 ÷ 20000	≥ 20000

Come mostrato in Tabella 4.25, ovviamente all’aumentare della popolazione aumenta l’indice di esposizione.

4.7.2 Indice relativo alle classi di uso del suolo

L'indice relativo alle classi di uso del suolo è stato sviluppato sulla base delle normative vigenti in tema di rischio e degli shapefiles codificati secondo la Corine Land Cover (CLC) del 2018, oltre che dei dati cartografici disponibili nella sezione Open Data del Geoportale Regionale Calabrese.

A partire dalla individuazione degli elementi esposti per ogni classe di danno potenziale, descritta negli “Indirizzi operativi per l’attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione ed alla gestione dei rischi da alluvioni con riferimento alla predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni”, è stato sviluppato un sistema di classificazione del valore degli elementi esposti in funzione delle classi di uso del suolo, descritto di seguito:

Tabella 4.26: Classificazione del valore degli elementi esposti in funzione delle classi di uso del suolo.

INDICE	CLASSI DI ESPOSIZIONE				
	Very low 1	Low 2	Moderate 3	High 4	Very high 5
Categorie di classi di uso del suolo ed elementi esposti	Zone umide interne e marittime, Acque continentali e marittime, Rocce nude, falesie e affioramenti rocciosi.	Zone boscate, Aree a pascolo naturale e praterie, Aree a vegetazione rada, Aree a vegetazione arborea e arbustiva in evoluzione, Aree a vegetazione sclerofilla, Spiagge dune e sabbie.	Seminativi, Colture permanenti (Vigneti, Oliveti, Frutteti, ecc.), Zone agricole eterogenee.	Aree estrattive, Discariche, Cimiteri e Geositi.	Zone urbanizzate di tipo residenziale, Zone industriali, commerciali ed infrastrutturali, Cantieri, Aree verdi urbane, Aree ricreative e sportive, Monumenti storici e/o siti archeologici, Oasi e riserve Parchi Nazionali e Regionali, SIC, SIN, SIR.

Come mostrato in Tabella 4.26, ovviamente il valore dell'elemento esposto aumenta all'aumentare dell'importanza della categoria di uso del suolo, ovvero all'aumentare del danno potenziale, legato alla perdita di vite umane, a ingenti danni ai beni economici, storici, naturali e culturali di rilevante

interesse, a disastri ecologico-ambientali, alla distruzione di servizi pubblici essenziali e di attività produttive.

Per la valutazione dell'indice, tuttavia, insieme alla classificazione descritta in Tabella 4.26, bisogna tener presente che gli shapefiles relativi alle classi di uso del suolo possono essere di tipo areale (poligoni), lineare (linee), puntuali (punti). Pertanto, l'indice relativo alle classi di uso del suolo verrà calcolato in funzione di tre sottoindici, uno per ogni tipologia di shapefile, definiti di seguito:

$$E_A = \frac{\sum_{e=1}^5 e \cdot A_{pe}}{A_p} \quad (4.23)$$

$$E_L = \frac{\sum_{e=1}^5 e \cdot L_{pe}}{L_{tot,p}} \quad (4.24)$$

$$E_P = \frac{\sum_{e=1}^5 e \cdot n^\circ P_{pe}}{n^\circ P_{tot,p}} \quad (4.25)$$

dove:

- e rappresenta il valore da attribuire ad ogni shapefile in funzione della classificazione descritta in Tabella 4.26 e può assumere valori compresi tra 1 e 5;
- A_{pe} rappresenta l'area degli shapefiles di tipo areale di valore e corrispondente, ricadenti all'interno dell'area di pericolosità;
- A_p è l'area di pericolosità;
- L_{pe} rappresenta la lunghezza degli shapefiles di tipo lineare di valore e corrispondente, ricadenti all'interno dell'area di pericolosità;
- $L_{tot,p} = \sum_{e=1}^5 L_{pe}$ è la lunghezza totale degli shapefiles di tipo lineare ricadenti all'interno dell'area di pericolosità;
- $n^\circ P_{pe}$ rappresenta il numero di shapefiles di tipo puntuale di valore e corrispondente, ricadenti all'interno dell'area di pericolosità;
- $n^\circ P_{tot,p} = \sum_{e=1}^5 n^\circ P_{pe}$ è il numero totale degli shapefiles di tipo puntuale ricadenti all'interno dell'area di pericolosità.

In definitiva, il valore dell'indice relativo alle classi di uso del suolo E_C sarà calcolato come media dei tre sottoindici:

$$E_C = \frac{E_A + E_L + E_P}{3} \quad (4.26)$$

4.8 Valutazione dell'esposizione

In conclusione, l'indice di esposizione complessivo è definito in funzione di due indici di esposizione:

1. un indice relativo alla popolazione residente nell'area di pericolosità;
2. un indice relativo alle classi di uso del suolo.

In seguito ad un'attenta valutazione e ad un confronto con i decisori politici della Regione Calabria, si è stabilito di attribuire un peso maggiore all'indice relativo alle classi d'uso del territorio, in quanto racchiude in sé un numero elevato di elementi esposti insieme al loro valore. Pertanto, come mostrato in Tabella 4.27, è stato attribuito un peso del 20% all'indice relativo alla popolazione residente nell'area di pericolosità ed un peso dell'80% all'indice relativo alle classi di uso del suolo.

Tabella 4.27: Sistema di pesi attribuiti agli indici di vulnerabilità.

INDICE	W_e
Popolazione residente nell'area di pericolosità	0.2
Classi di uso del suolo	0.8

Una volta ottenuto il valore dell'indice di esposizione è possibile effettuare una sua classificazione come descritto in Tabella 4.28:

Tabella 4.28: Classificazione dell'indice di esposizione.

Definizione	I_E
Esposizione bassa	$< 20 \%$
Esposizione medio - bassa	$20 \div 40 \%$
Esposizione media	$40 \div 60 \%$
Esposizione medio - alta	$60 \div 80 \%$
Esposizione alta	$\geq 80 \%$

Capitolo 5

Analisi del caso studio

In questo capitolo sarà descritto il caso studio, ovvero la regione Calabria, e sarà effettuata l'analisi di tutti i dati e di tutti i parametri presi in considerazione nella metodologia di valutazione del rischio costiero.

5.1 Inquadramento geografico

La Calabria è la regione più meridionale della penisola italiana (Figura 5.1), ha una superficie di 15079 km² ed una popolazione di poco superiore ai due milioni di abitanti. Il capoluogo di Regione è Catanzaro ed è suddivisa in 5 provincie (Catanzaro, Cosenza, Crotona, Reggio Calabria e Vibo Valentia) e 409 comuni (116 dei quali con sviluppo costiero). Confina a nord con la Basilicata ed è bagnata dal mar Tirreno ad ovest e dal mar Ionio a est. La parte nord-est ricade nel golfo di Taranto, a sud-ovest è separata dalla Sicilia dallo Stretto di Messina, con distanza minima di 3.2 km tra Capo Peloro (Sicilia) e Punta Pezzo (Calabria). L'esposizione a mari diversi comporta una notevole variabilità di condizioni meteomarine tra le diverse parti della Calabria, con ripercussioni sulla dinamica costiera.

La maggior parte del territorio è collinare (49,2%) e montuoso (41,8%) mentre solo il 9% è pianeggiante. I rilievi montuosi più importanti sono il Pollino, al confine con la Basilicata, che presenta le vette più elevate della Calabria (Serra Dolcedorme, 2267 m e Pollino, 2248 m), la Catena Costiera, che si sviluppa parallelamente al litorale tirrenico della provincia di Cosenza, la Sila, a cavallo tra le provincie di Catanzaro, Cosenza e Crotona, le Serre, che si sviluppano nella provincia di Vibo Valentia, e l'Aspromonte, nella parte meridionale della provincia di Reggio

Calabria. La pianura più estesa è quella di Sibari mentre hanno estensione rilevante anche quelle di Lamezia Terme (o Sant'Eufemia) e di Gioia Tauro.



Figura 5.1: Area oggetto di studio.

Dal punto di vista idrografico, la maggior parte dei corsi d'acqua calabresi (denominati anche "fiumare") presenta regime idrologico torrentizio, con alternanza di lunghi periodi di secca e di piene, spesso improvvise e violente (Sabato & Tropeano, 2004; Sorriso-Valvo & Terranova, 2006; Terranova et al., 2009). Tali corsi d'acqua, a causa della conformazione stretta e lunga della Calabria, hanno spesso lunghezze modeste, pendenze elevate e modesti tempi di corrivazione, tutti fattori che ne incrementano la pericolosità. Inoltre, la combinazione di questi fattori, unita alla presenza di sedimentologia grossolana, comporta un elevato trasporto solido le cui variazioni si ripercuotono sulla dinamica costiera e, quindi, sulle tendenze evolutive dei litorali adiacenti le foci fluviali (Barbaro et al., 2019; Foti et al., 2019). Sono presenti, inoltre, numerosi laghi artificiali, soprattutto nella Sila, quali l'Ampollino, l'Arvo, il Cecita, l'Angitola ed il Passante.

Riguardo le coste, si osserva un'alternanza di spiagge, prevalentemente sabbiose e ciottolose, e di coste alte. La pressione antropica è elevata, con presenza di numerose attività turistiche e di stabilimenti balneari che rendono la fascia costiera di fondamentale importanza nell'economia regionale.

In funzione della diversa esposizione delle coste al moto ondoso, è possibile suddividere l'esteso litorale calabrese in tre macro-aree: tirrenica (da Tortora a Scilla), ionica (da Rocca Imperiale a Motta San Giovanni) e dello Stretto di Messina (comprendente Reggio di Calabria e Villa San

Giovanni). L'area ionica si estende per oltre 400 km, quella tirrenica per oltre 250 km e l'area dello Stretto di Messina per oltre 40 km. La maggior parte dei litorali del settore tirrenico risulta esposta a moto ondoso agente su fetch di notevole estensione, superiore a 500 km ed addirittura superiore a 1500 km lungo la direzione che transita tra la Sicilia e la Sardegna fino a raggiungere le coste spagnole e nordafricane. Anche una percentuale rilevante di litorali del settore ionico risulta esposta a moto ondoso agente su fetch di notevole estensione, superiore a 500 km, con valori massimi di oltre 1000 km lungo le direzioni meridionali che raggiungono le coste nordafricane. L'area dello Stretto di Messina è caratterizzata da un'elevata specificità del territorio: la vicinanza della Sicilia e la presenza dell'estremità meridionale della Calabria comporta fetch modesti lungo la maggior parte delle direzioni (in molti casi dell'ordine delle decine di chilometri) per cui il clima ondoso medio annuo è di modesta entità, con la quasi totalità degli stati di mare di altezza significativa media dell'ordine delle decine di centimetri e con valori eccezionali di poco superiori al metro.

Ai fini del presente studio, l'analisi condotta sulle caratteristiche del territorio, descritta in questo capitolo, ha riguardato delle aree campione, la cui scelta è stata effettuata in funzione delle aree di influenza coperte dalla disponibilità di dati meteomarini e delle diverse caratteristiche dei litorali (v. par. 5.14). Pertanto, di seguito sono riportate in Tabella 5.1 le 54 località scelte come "campione", di cui 32 sono localizzate sul versante ionico, 3 nell'area dello Stretto di Messina e 19 sul versante tirrenico. Per ogni località ionica e tirrenica esaminata è stato associato un codice numerico di quattro cifre, relativo alla fonte dei dati meteomarini.

Tabella 5.1: Località costiere calabresi esaminate, ordinate in senso orario.

Codice	Località esaminata	Codice	Località esaminata
4530	Montegiordano Marina	8685	Brancaleone Marina
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	8864	Palizzi Marina
4848	Trebisacce	8863	Bova Marina
5011	Villapiana Lido	8862	Melito di Porto Salvo
5173	Rossano	8683	Lazzaro
5333	Marina di Calopezzati	-	Pellaro
5496	Cariati	-	Gallico
5497	Crucoli Torretta	-	Porticello
5832	Cirò Marina	7988	Favazzina
6004	Torre Melissa	7806	Palmi
6177	Crotone – Zigari	7622	San Ferdinando
6352	Crotone	7442	Santa Maria di Ricadi
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	7261	Capo Vaticano
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	7078	Tropea
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	6896	Vibo Marina
6898	Cropani	6711	Gizzeria Lido
6897	Catanzaro Lido	6527	Falerna Marina
7080	Soverato	6350	Amantea
7262	San Sostene Marina	6175	Belmonte Marina
7443	Badolato	6002	San Lucido
7624	Monasterace Marina	5830	Marina di Fuscaldo
7807	Riace Marina	5659	Cetraro Marina
7990	Marina di Caulonia	5493	Sanginetto Lido
7989	Roccella Ionica	5331	Marina di Belvedere
8168	Locri	5172	Marina di Santa Maria del Cedro
8344	Bovalino	5009	Scalea
8514	Ferruzzano Marina	4846	Tortora Marina

5.2 Caratteristiche geomorfologiche dei litorali calabresi

Il litorale calabrese si estende per circa 736 km. Si tratta di un territorio estremamente complesso dal punto di vista orografico, con alternanza di spiagge e coste alte (concentrate prevalentemente nei promontori di Capo Vaticano, Monte Sant'Elia e Capo Rizzuto), e fortemente antropizzato (in particolare nei capoluoghi di provincia di Crotona, Reggio Calabria e Vibo Valentia e nella fascia tirrenica della provincia di Cosenza). Sono presenti 5 golfi (Corigliano, interno al Golfo di Taranto, Squillace, Gioia Tauro, Sant'Eufemia, Policastro, comprendente anche litorali di Basilicata e Campania) e 2 isole (Dino, adiacente al litorale di Praia a Mare, e Cirella, adiacente alla frazione Cirella del comune di Diamante).

Il settore tirrenico è caratterizzato da una percentuale rilevante di costa alta, concentrata, principalmente, nelle provincie di Vibo Valentia e Reggio Calabria (in entrambi i casi rappresenta il 40% dell'intero sviluppo costiero), e da sistemi montuosi ubicati quasi a ridosso del mare, con pochissime pianure costiere. Dal punto di vista antropico, il 50% delle coste basse risulta antropizzato: si tratta di un valore elevato, dovuto alla presenza di costa alta e rilievi montuosi prossimi alla costa, che hanno comportato la realizzazione di numerosi centri abitati a ridosso della spiaggia, con distruzione della maggior parte delle dune costiere.

Il settore ionico, invece, è caratterizzato da una bassa percentuale di costa alta (circa il 10%, la maggior parte in provincia di Crotona), e da pianure alluvionali che hanno permesso la realizzazione di centri abitati a tergo della spiaggia per cui appena il 30% delle coste basse risulta antropizzato.

L'area dello Stretto di Messina è invece un territorio fortemente antropizzato, anche in questo caso a causa della conformazione del territorio, caratterizzato da rilievi montuosi prossimi alla costa.

L'analisi sedimentologica delle spiagge calabresi è stata effettuata sulla base dei dati raccolti nei rapporti OKEANOS (Regione Calabria, 2003) in termini di D_{n50} : sul lato ionico, le spiagge emerse sono caratterizzate prevalentemente da ciottoli, ghiaie e sabbie grossolane, mentre la parte sommersa è più variabile con tratti caratterizzati da sedimenti grossolani e altri con dimensioni medie decrescenti all'aumentare della profondità, con valori minimi pari a 0.1 mm; nell'area dello Stretto di Messina, le spiagge sono costituite da sabbia molto grossolana e ciottoli, mentre i fondali sono caratterizzati da sabbie fini con dimensioni comprese tra 0.13 e 0.18 mm; le spiagge tirreni-

che, invece, sono contraddistinte da sedimenti ghiaiosi e grossolani nella parte emersa, e sabbiosi medi e fini all'aumentare della profondità nella parte sommersa, raggiungendo valori minimi pari a 0.05 mm nel medio Tirreno.

L'analisi batimetrica dei fondali è stata effettuata su QGIS a partire dai dati disponibili sul portale "EMODnet-Bathymetry", sviluppato nell'ambito dell'"European Marine Observation and Data Network (EMODnet)". La pendenza media per ogni località è stata stimata mediante il tracciamento di transetti, ottenendo valori medi per l'area ionica e tirrenica di circa il 2-3%, con unica eccezione la località di Rossano, in cui si registra un valore pari al 10%; l'area dello Stretto di Messina, invece, è caratterizzata da pendenze medie molto maggiori, superiori anche al 20%. I risultati ottenuti sono in accordo con quelli presenti negli studi di OKEANOS (Regione Calabria, 2003).

L'analisi morfologica della spiaggia emersa, invece, è stata condotta mediante l'utilizzo delle funzioni di analisi spaziale di QGIS e Google Earth a partire dalle immagini satellitari più recenti disponibili: i risultati ottenuti nei tratti di costa analizzati hanno mostrato valori di larghezza media della spiaggia variabili tra un minimo di 13 m e un massimo di poco superiore ai 100 metri e valori medi di pendenza della spiaggia emersa variabili tra il 2% e il 17%. In particolare, le spiagge ricadenti in zone di pianura sono spesso caratterizzate da grandi ampiezze e pendenze lievi; al contrario, le spiagge che contraddistinguono le pianure litoranee strette sono generalmente più piccole e ripide. In Appendice, la Tabella IV-1 riporta i valori delle caratteristiche morfologiche dei litorali esaminati. In Figura 5.2 sono riportate due spiagge calabresi: Bova Marina, situata sul litorale ionico, e Palmi, situata sul litorale tirrenico e delimitata a sud da un tratto di costa alta.



Figura 5.2: Spiagge di Bova Marina (a sinistra) e di Palmi (a destra).

5.3 Analisi dell'evoluzione della linea di riva

Lo studio dell'evoluzione del litorale calabrese al fine di determinare degli indici significativi del trend evolutivo della linea di costa è stato effettuato attraverso il confronto di vari dati cartografici. In particolare, sono state prese in considerazione:

- le linee di riva storiche del 1954, 1998, 2000 e 2008, acquisite dalla sezione Open Data del Geoportale Calabrese (<http://geoportale.regione.calabria.it/opendata>);
- le ortofoto del 1989, 1996, 2006 e 2012, acquisite dalla sezione Open Data del Geoportale Nazionale sotto forma di layer WMS (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/>);
- le immagini satellitari dal 2015 ad oggi, acquisite da Google Earth.

L'analisi condotta è stata effettuata seguendo la metodologia descritta nel precedente capitolo. Innanzitutto, dopo la prima fase di acquisizione dei dati, la seconda fase ha riguardato la digitalizzazione manuale delle linee di riva mancanti per ogni litorale preso in considerazione nello studio, utilizzando QGIS per ogni ortofoto, con una scala di 1:1000 o inferiore, ed utilizzando gli strumenti di analisi spaziale di Google Earth Pro per ogni immagine satellitare, ad un'altitudine di 200 m corrispondente ad una scala inferiore a 1:1000. Pertanto, eventuali errori di digitalizzazione sono dell'ordine del metro.

L'accuratezza considerata è in accordo con gli obiettivi dello studio, che riguardano la valutazione delle tendenze di erosione ed avanzamento, e non la loro quantificazione precisa. Inoltre, in Calabria l'escursione di marea è dell'ordine di decine di centimetri (Sannino et al., 2015), pertanto è possibile trascurare gli effetti relativi alla variazione della posizione del litorale e considerare valida la scelta di utilizzare come linea di riferimento la wet/dry line (Boak & Turner, 2005).

Nelle fasi successive, tutte sviluppate su QGIS, sono stati tracciati oltre 700 transetti rappresentativi di ciascuna area di studio. Per la scelta dei punti in cui tracciare i transetti è stato seguito il seguente criterio: è stata generalmente considerata una distanza media dell'ordine di cento metri, riducendola in presenza di strutture costiere. Inoltre, per ogni transetto sono state determinate la baseline e la larghezza della spiaggia. Come baseline sono stati considerati i limiti superiori della spiaggia, generalmente ubicati in corrispondenza di lungomari, dune e strutture. Per stimare la larghezza della spiaggia, è stato dapprima inserito un punto all'intersezione tra ogni transetto e

le varie linee di riva utilizzando lo strumento vettoriale “Line Intersections”. Quindi, per stimare la larghezza di ciascun transetto è stata utilizzata la funzione “Shortest Line” che consente di calcolare la distanza minima tra un punto ed una linea retta, considerando ciascuna baseline come linea retta.

Le distanze tra i transetti sono state calcolate generando delle linee ortogonali ad essi tramite l'utilizzo degli strumenti vettoriali “centroidi”, “da punti a linea” ed “esplosi linee”, e sono state calcolate mediante il calcolatore di campi di QGIS.

Successivamente, sono stati stimati i valori di NSM ed EPR per ogni transetto per i diversi intervalli temporali stabiliti e, applicando l'equazione (4.19), è stato possibile determinare la velocità media pesata per ciascun litorale considerato. Pertanto, per ogni area campione è stata valutata la tendenza evolutiva più recente, a breve termine, a medio termine, a lungo termine e a lunghissimo termine, classificandola come descritto nel precedente capitolo e come mostrato sinteticamente in Tabella 5.2, in funzione del valore di velocità media pesata ottenuta ed espressa in m/anno.

Tabella 5.2: Classificazione della tendenza evolutiva del litorale in funzione del valore di velocità in m/anno.

Classificazione della tendenza evolutiva del litorale	
$v \geq 0.5$	Avanzamento
$-0.5 \leq v < 0.5$	Stabilità
$-1 \leq v < -0.5$	Debole erosione
$-2 \leq v < -1$	Intensa erosione
$v < -2$	Forte erosione

Le Tabelle 5.3, 5.4 e 5.5 mostrano un riepilogo delle tendenze evolutive delle varie aree campione, stimate secondo la classificazione sopra descritta. In dettaglio, le Tabelle 5.3 e 5.4 mostrano le tendenze evolutive di ciascun'area campione mentre la Tabella 5.5 riporta il numero di aree campione ricadenti in una determinata classe per ogni intervallo temporale.

Tabella 5.3: Tendenze evolutive di ciascun'area campione. Lo schema di colori è riportato in Tabella 5.2 (continua).

Area campione	Velocità di variazione della linea di riva, v [m/anno]				
	Più recente	Breve termine	Medio termine	Lungo termine	Lunghissimo termine
Monte Giordano	-0.22	0.21	0.60	0.16	-0.16
Marina di Roseto Capo Spulico	0.19	1.93	0.24	0.10	0.12
Trebisacce	0.07	0.07	-0.35	-0.03	0.14
Villapiana Lido	2.21	2.21	0.53	0.37	0.46
Rossano	-0.26	0.16	0.12	-0.10	-0.12
Marina di Calopezzati	-3.19	-0.69	-0.67	-0.55	-0.42
Cariati	0.84	-1.10	-0.39	-0.61	-0.29
Crucoli (Torretta)	-2.11	1.04	-0.96	-0.88	0.12
Cirò Marina	-0.36	-0.08	-1.16	-0.77	-0.38
Torre Melissa	0.16	0.80	0.26	0.01	0.11
Crotone - Zigari	2.18	-3.58	-1.19	-1.44	-1.29
Crotone	0.54	-0.06	-0.66	0.03	-0.23
Isola Capo Rizzuto (Marinella)	0.25	-0.26	-0.46	-0.17	0.05
Isola Capo Rizzuto (Centro)	-0.90	2.07	-0.61	-0.14	-0.05
Isola Capo Rizzuto (Le Castella)	-0.04	0.46	-0.49	-0.51	-0.25
Cropani - sena	-1.18	2.50	-0.25	0.21	-0.10
Catanzaro Lido	2.34	0.79	0.07	-0.08	-0.38
Soverato	0.97	2.02	0.13	-0.06	-0.24
San Sostene Marina	0.35	-0.65	-0.68	-0.88	-0.57
Badolato	0.16	1.72	1.04	-0.02	0.63
Monasterace Marina	-1.61	1.19	-0.10	-0.34	-0.77
Riace Marina	0.34	1.40	0.06	0.05	0.20
Marina di Caulonia	-5.70	-0.57	-1.04	-1.84	-1.65
Roccella Ionica	1.96	1.48	-0.56	-0.15	-0.06
Locri	-1.04	-0.95	-0.56	-0.26	-0.21
Bovalino	-0.72	-0.16	-0.60	-0.20	-0.33
Ferruzzano Marina	-1.15	-0.37	0.17	0.09	0.00
Brancaleone Marina	-2.09	-0.81	-0.19	-0.17	-0.18
Palizzi Marina	-1.37	0.81	0.26	0.26	-0.31
Bova Marina	-1.84	-0.38	-1.23	-0.87	-0.27
Melito di Porto Salvo	-1.03	-0.61	-2.14	-0.96	-0.82
Lazzaro	-0.03	-0.15	-1.15	-0.66	-0.26

Tabella 5.4: Tendenze evolutive di ciascun'area campione. Lo schema di colori è riportato in Tabella 5.2.

Area campione	Velocità di variazione della linea di riva, v [m/anno]				
	Più recente	Breve termine	Medio termine	Lungo termine	Lunghissimo termine
Pellaro	0.67	0.30	0.00	-0.15	0.02
Gallico	-0.22	-0.30	-0.25	0.10	-0.36
Porticello	-0.13	0.16	-0.92	-0.12	-0.08
Favazzina	0.21	0.51	-0.25	-0.59	-0.14
Palmi	-0.38	1.33	-0.01	-0.27	-0.96
San Ferdinando	-3.06	-0.66	-0.05	0.00	-0.66
Santa Maria di Ricadi	1.41	0.08	-0.58	-0.21	-0.14
Capo Vaticano - Turiano	0.90	-1.84	0.12	0.01	-0.48
Tropea	2.79	0.72	0.92	0.82	0.07
Vibo Marina	2.05	0.48	0.69	0.32	-1.82
Gizzeria Lido	-1.63	-5.49	-1.05	0.60	0.38
Falerna Marina	12.10	8.88	-2.98	-2.37	-0.61
Amantea	-0.84	-0.84	-0.74	-0.68	-0.79
Belmonte Marina	-2.81	-2.81	-0.28	0.48	-0.30
San Lucido	0.20	0.20	-0.15	-0.16	-0.19
Marina di Fuscaldo	1.21	0.51	-2.06	-1.56	-0.60
Cetraro Marina	3.59	0.87	-0.42	0.04	-0.79
Sanginetto Lido	1.30	0.33	-0.77	-0.32	-1.24
Marina di Belvedere	1.73	0.67	-0.23	-0.84	-0.32
Marina di Santa Maria del Cedro	2.68	1.32	0.06	-0.23	-0.42
Scalea	2.02	1.74	0.26	0.11	0.29
Tortora Marina	4.17	0.00	-0.09	-0.69	-0.74

Tabella 5.5: Riepilogo delle tendenze evolutive di tutte le aree campione: è rappresentato il numero di aree campione ricadenti in una determinata classe per ogni intervallo temporale. Lo schema di colori è riportato in Tabella 5.2.

Classe / Intervallo temporale	Più recente	Breve termine	Medio termine	Lungo termine	Lunghissimo termine
Avanzamento	20	22	5	2	1
Stabilità	17	19	28	35	39
Debole erosione	3	8	12	13	10
Intensa erosione	8	2	6	3	4
Forte erosione	6	3	3	1	0

Considerando il trend evolutivo più recente, la località che mostra il maggior tasso di erosione (ricadente in classe di forte erosione) è quella di Marina di Caulonia con un valore di circa 6 m/anno, seguita da Calopezzati, San Ferdinando e Belmonte Marina, con circa 3 m/anno, precedute poi da Marina di Calopezzati e Brancaleone Marina, con valori di poco superiori a 2 m/anno. Considerando i trend a breve termine, si osservano i maggior tassi di erosione per le località di Gizzeria Lido, con un valore di 5.5 m/anno, seguita da Crotone – Zigari con 3.6 m/anno e Belmonte Marina, in cui il trend a breve termine coincide con quello più recente.

Invece, considerando i trend di lungo e lunghissimo termine, la maggior parte delle località è caratterizzata da condizioni di stabilità ed i trend erosivi maggiori si registrano soltanto per le località di Crotone – Zigari, Marina di Caulonia, Vibo Marina, Marina di Fuscaldo, Sanginetto Lido e Falerna Marina, per cui si è ottenuto il valore massimo pari a circa 2.4 m/anno.

Per quanto riguarda la velocità di avanzamento, i valori osservati nel medio, lungo e lunghissimo termine sono generalmente bassi, infatti, nessun'area supera il valore di 1 m/anno, ad eccezione di Badolato. Mentre, nei trend più recente e a breve termine, le velocità di avanzamento sono caratterizzate da valori abbastanza variabili da un minimo di 0.51 m/anno ad un massimo di 12 m/anno.

Le Figure 5.3, 5.4 e 5.5 mostrano alcune aree campione. In dettaglio, la Figura 5.3 mostra Rossano, una delle cinque aree sempre stabili con una velocità di variazione variabile tra -0.26 m/anno e 0.16 m/anno. La stabilità di quest'area è legata alla sua posizione all'interno del Golfo di Taranto che la protegge naturalmente dalle mareggiate provenienti dal Mar Ionio.



Figura 5.3: Dettaglio dell'area studio di Rossano. Legenda: rosso = transetti, blu = baseline, altri colori = linee di riva.

La Figura 5.4 mostra invece Cetraro, un'area del Mar Tirreno fortemente antropizzata, in cui sono stati realizzati un porto e diverse opere di difesa costiera.



Figura 5.4: Area studio di Cetraro. Legenda: rosso = transetti.

Infine, la Figura 5.5 mostra Badolato, un'area del Mar Ionio le cui dinamiche costiere sono state significativamente alterate dalla costruzione di un porto in un tratto costiero rettilineo ad alto trasporto litoraneo, come mostrato anche in ricerche precedenti (Miduri et al., 2017). Infatti, l'analisi delle variazioni della linea di riva mostra un avanzamento rilevante a sud del porto, con notevole erosione a nord del porto e con periodiche ostruzioni dell'imboccatura portuale. I valori di avanzamento e di erosione osservati lungo i vari transetti sono però dello stesso ordine di grandezza, per cui il litorale risulta sensibilmente stabile.

In Appendice, nella Tabella IV-2, sono stati riportati i valori di velocità di variazione della linea di riva complessiva, ottenuta combinando, come descritto nel quarto capitolo, le varie tendenze calcolate per diversi intervalli temporali.



Figura 5.5: Dettaglio dell'area studio di Badolato. Legenda: rosso = transetti, blu = linea di riva del 1954, altri colori = linee di riva. Rispetto alle altre figure non è stata inserita l'immagine satellitare di sfondo per mettere in risalto le variazioni delle linee di riva.

5.4 Analisi dei sistemi dunali e della vegetazione

L'analisi dei sistemi dunali e della vegetazione è stata effettuata mediante gli strumenti di analisi spaziale di QGIS e Google Earth a partire dalle immagini satellitari più recenti e dai DTM disponibili. La valutazione dei parametri definiti (altezza e larghezza medie delle dune e larghezza media

corretta della vegetazione) è stata effettuata mediante il tracciamento di un numero di transetti significativo rispetto al litorale in esame.

Per quanto riguarda l'indice di vegetazione, seguendo la metodologia descritta nel quarto capitolo, i risultati ottenuti hanno mostrato tra le località esaminate valori massimi di larghezza media (corretta per tenere conto del grado di infittimento della vegetazione) pari a 86 m, ottenuti a Badolato, e valori massimi per la percentuale di linea di costa protetta da vegetazione pari all'80%, per la località di Isola di Capo Rizzuto. È importante sottolineare che tali valori sono fortemente influenzati dall'estensione del tratto di costa esaminato e soprattutto che i due sottoindici vanno valutati complessivamente: ad esempio, nonostante ad Isola di Capo Rizzuto vi sia la percentuale maggiore di presenza di vegetazione, tuttavia, la sua entità è molto piccola.

Per quanto riguarda l'indice dei sistemi dunali, seguendo la metodologia descritta nel precedente capitolo, i risultati ottenuti hanno mostrato tra le località esaminate valori massimi di altezza media rispetto al l.m.m. pari a circa 7 m, riscontrati a Monasterace, e di larghezza media pari a circa 94 m, riscontrati a Badolato, mentre la percentuale di linea di costa protetta da sistemi dunali ha raggiunto il valore massimo pari all'80% nella località di San Ferdinando. In Appendice, la Tabella IV-1 riporta, per ciascuno dei litorali esaminati, i valori assunti dalle grandezze caratteristiche considerate per i sistemi dunali e la vegetazione. Dall'analisi dei risultati è possibile notare come la presenza di vegetazione è spesso associata alla presenza di sistemi dunali, in quanto le dune sono generalmente vegetate. Nelle Figure 5.6 e 5.7 le immagini satellitari mostrano i sistemi dunali presenti a Badolato e San Ferdinando.



Figura 5.6: Sistemi dunali localizzati nel tratto di costa esaminato, individuato dalla linea rossa, nella località di Badolato.



Figura 5.7: Dettaglio di un tratto di costa esaminato, individuato dalla linea rossa, nella località di San Ferdinando, caratterizzato dalla presenza di sistemi dunali.

In Figura 5.8, invece, sono rappresentati in dettaglio i sistemi dunali di Monasterace, su cui sorge il sito archeologico di Kaulon, oggetto di numerosi studi ed interventi di protezione (Barbaro et al., 2021b): come è possibile notare dall'immagine satellitare, infatti, al piede della duna sono presenti dei massi di protezione, posti per proteggere il sito, interessato da processi erosivi e danneggiato da due mareggiate durante l'inverno 2013-2014.



Figura 5.8: Dettaglio di un tratto di costa esaminato, individuato dalla linea rossa, nella località di Monasterace, caratterizzato dalla presenza di sistemi dunali su cui sorge il sito archeologico di Kaulon.

L'importanza dei sistemi dunali nel contrasto all'erosione costiera è testimoniata da diversi studi, tuttavia, la loro presenza è costantemente minacciata dalla forte pressione antropica che ha riguardato le aree costiere fin dagli anni '50. In Foti et al. (2021b), ad esempio, lo studio effettuato ha evidenziato una forte correlazione tra la distruzione dei sistemi dunali calabresi e l'innesco di processi di erosione costiera, testimoniata soprattutto dal risultato che in tutti i comuni dove i sistemi dunali sono rimasti intatti rispetto agli anni '50 non sono presenti ritiri di battigia, anzi il litorale risulta avanzato, mentre in tutti i comuni dove i sistemi dunali sono stati totalmente distrutti rispetto agli anni '50 si è riscontrato un arretramento della linea di costa. Nel dettaglio, l'analisi ha mostrato che queste pressioni antropiche hanno determinato riduzioni notevoli dei sistemi dunali calabresi, che, dai 120 km² degli anni '50, oggi hanno un'estensione di appena 25 km².

Nelle località in cui i sistemi dunali sono stati totalmente distrutti, al loro posto sono stati costruiti interi centri abitati o piccole frazioni e in alcuni casi dei porti. Nell'ambito di tale studio, inoltre, è stato evidenziato come le località in cui sono stati registrati gravi fenomeni erosivi si trovano sul lato tirrenico della costa calabrese, in correlazione al maggiore processo di antropizzazione, con conseguente distruzione dei sistemi dunali, che ha riguardato quest'area rispetto a quella ionica, probabilmente a causa della morfologia del territorio: la breve distanza tra i rilievi e la costa, infatti, potrebbe aver facilitato l'antropizzazione delle poche aree costiere pianeggianti, spesso distruggendo i sistemi dunali esistenti come nel caso di Tortora (Figura 5.9). Negli anni '50, infatti, il comune di Tortora era situato solo in collina e sulla costa esisteva un esteso sistema dunale di oltre 650000 m², con poche costruzioni sporadiche. Attualmente, al posto del sistema dunale, si trova la cittadina di Tortora Marina, con un lungomare e diversi edifici costruiti a poca distanza dal litorale e si registra un'erosione massima di circa 100 m rispetto al 1954.

Sulla costa ionica, invece, essendoci una distanza maggiore tra la costa ed i rilievi, diversi centri abitati sono sorti a ridosso delle dune esistenti, come nel caso di Villapiana (Figura 5.10): in questa località il sistema dunale ha una lunghezza di circa 5 km ed una superficie di oltre 700000 m². Il centro abitato fu edificato quasi interamente nella seconda metà del secolo scorso, a ridosso del sistema dunale, riducendolo solo in parte, per una fascia di poche centinaia di metri dove vennero edificati alcuni edifici. La spiaggia attualmente ha una larghezza compresa tra 50 m e 100 m ed è in avanzamento rispetto al 1954, con un massimo dell'ordine di 50 m.



Figura 5.9: Dettaglio di Tortora Marina. L'area in giallo raffigura i sistemi dunali presenti negli anni '50, mentre la linea rossa rappresenta la linea di costa del 1954 (Foti et al., 2021b).



Figura 5.10: Dettaglio di Villapiana. L'area in giallo raffigura i sistemi dunali presenti negli anni '50, mentre la linea rossa rappresenta la linea di costa del 1954 (Foti et al., 2021b).

5.5 Presenza di Posidonia Oceanica in Calabria

In Calabria sono state rilevate circa 30 praterie di Posidonia Oceanica, 13 situate sulla costa tirrenica e 17 sulla costa ionica (Rende et al., 2008). In tali aree, la presenza della fanerogama marina del Mediterraneo attribuisce loro caratteristiche di grande pregio ed alta valenza ecologica: infatti, la presenza di Posidonia è indice della qualità dell'ambiente marino.

La maggiore presenza delle praterie rilevate sulla costa ionica rispetto alla tirrenica è legata ad una minore urbanizzazione ed un maggior livello di naturalità che caratterizza il litorale ionico rispetto al tirrenico, invece contraddistinto dalla presenza di numerosi insediamenti abitativi. L'analisi del dataset del progetto MEDISEH evidenzia la presenza di Posidonia Oceanica concentrata soprattutto nell'area dell'alto Ionio, nella zona marina protetta di Isola Capo Rizzuto (Figura 5.11), nell'area tirrenica denominata "Costa degli Dei" e nell'area dell'alto Tirreno.

In Appendice, la Tabella IV-1 riporta la presenza o l'assenza della Posidonia Oceanica in ogni località esaminata.



Figura 5.11: Dettaglio della presenza di Posidonia Oceanica nell'area marina protetta di Capo Rizzuto, la cui distribuzione è rappresentata come shapefile areale (Fonte: database MEDISEH).

5.6 Entità della subsidenza in Calabria

Come si può notare dalla figura 2.17 (ISPRA), il fenomeno della subsidenza è presente anche in Calabria ed interessa soprattutto le aree costiere dell'alto Ionio.

Tuttavia, in letteratura, sono presenti anche degli studi che riguardano altre zone del territorio calabrese. Infatti, fenomeni di subsidenza di origine tettonica con tassi di 1.23 mm/anno in 20 mila anni sono stati stimati per il promontorio di Capo Vaticano, sul versante tirrenico della Calabria (Pepe et al., 2014). Anche nel comune di Belvedere di Spinello, nell'entroterra crotonese, fenomeni di subsidenza sono stati rilevati in seguito all'estrazione di sale per idrosoluzione con il metodo dei "pozzi multipli", in seguito sostituiti da "pozzi singoli" (Gisotti, 1991), avvenuta dal 1970 al 2009 circa.

A partire dall'analisi INSAR di dati satellitari raccolti dal 2003 al 2010 sono state ricavate le serie temporali di spostamento e la mappa della velocità media al suolo della Valle del Crati. In particolare, sono stati osservati tassi di subsidenza fino a 7 mm/anno nel settore centrale della valle, che sono stati correlati alla tettonica e alla compattazione del recente riempimento sedimentario della valle con contributo localmente dovuto alla diffusa e veloce urbanizzazione (Cianflone et al., 2013).

Lo studio della subsidenza in Calabria in questa tesi, tuttavia, è stato condotto per interessi che riguardano principalmente i territori costieri; di conseguenza, di seguito, verranno riportati i principali studi scientifici esistenti in letteratura per le località di Sibari e Crotona, sul versante ionico, e di Gioia Tauro, sul versante tirrenico.

5.6.1 Sibari

Per quanto riguarda la piana di Sibari, il fenomeno della subsidenza è particolarmente studiato in letteratura, perché essa rappresenta un'anomalia nell'ambito di un sollevamento generalizzato di tutta l'area nord calabrese (Sorriso Valvo, 1993). La subsidenza, infatti, è particolarmente testimoniata dall'area archeologica di Sibari, per la presenza di tre antiche città sovrapposte e sepolte dai depositi alluvionali costituenti la piana omonima: Sybaris (720-510 a.C.), Thurium (444-285 a.C.) e Copia (193 a.C.), attualmente ad una profondità che varia da 7 a 3.5 metri al di sotto del piano campagna (Rainey & Lericci, 1967).

Il cedimento dell'area archeologica è dovuto ad una combinazione di tre processi principali: l'attività neotettonica, le variazioni glacioeustatiche del mare e la compressione primaria dei sedimenti (Cotecchia et al., 1994; Pagliarulo et al., 1995). In seguito all'esecuzione di carotaggi ed indagini geotecniche (Coop & Cotecchia, 1997), il tasso totale di subsidenza per l'area archeologica ricavato è di circa 5.4 mm/anno per livelli di terreno che si trovano circa a 120 metri dal piano campagna e diminuisce verso gli strati più superficiali, raggiungendo un valore di 1.6 mm/anno (Pagliarulo, 2006).

Tuttavia, dagli anni '50, sono stati registrati circa 20 cm di subsidenza attribuiti a cause di natura antropica e ai conseguenti processi di consolidazione (Cherubini et al., 2000; Cafaro et al., 2013). Nella piana di Sibari, infatti, sono attivi processi di emungimento idrico a scopo irriguo di varia natura, che interessano sia le falde superficiali sia quelle profonde, attraverso un gran numero di pozzi, ed è plausibile che negli ultimi decenni lo sfruttamento idrico sia stato di maggiore entità rispetto al passato, causando l'incremento del tasso di subsidenza rilevato recentemente. Infatti, per l'area archeologica di Parco del Cavallo è stato stimato un tasso medio di 2.4 mm/anno (maggiore di quello pari a 1.6 mm/anno, stimato alla fine dell'800). Inoltre, nello specifico per il sito archeologico, oltre agli effetti indotti dallo sfruttamento idrico, va aggiunto il contributo generato dall'emungimento indotto dal sistema di wellpoints che fu realizzato negli anni '40 con lo scopo di evitare la sommersione degli scavi archeologici abbassando localmente la superficie della falda superiore.

Tuttavia, come mostrano i risultati di analisi satellitari PSInSAR condotte dal Politecnico di Milano, in collaborazione con il suo spin off TRE (Tele-Rilevamento Europa srl) nell'ambito di un progetto POR Calabria 2000-2006 nella piana di Sibari, i tassi di subsidenza maggiori si registrano nell'area costiera corrispondente alla foce del fiume Crati e alla zona turistica dei "Laghi di Sibari", situata a circa 2.5 km dal sito archeologico: in tale zona, infatti, sfruttando lo sbocco a mare del collettore Stombi come imboccatura portuale, intorno agli anni '70, è stato realizzato un sistema di darsene e canali, innestato in un canale principale parallelo alla linea di costa, con finalità prettamente turistiche e caratterizzato dalla presenza di diverse tipologie edilizie ad uso abitativo. In questo caso, tuttavia, non si tratta propriamente di un fenomeno di subsidenza, ma di ordinari cedimenti che interessano le fondazioni degli edifici, indotti da carichi esterni, ovvero sia da quelli derivanti dal peso del materiale di colmata con cui furono realizzate le darsene sia da quelli generati dalla realizzazione degli edifici.

Il campo di movimenti osservati tra il 2003 e il 2009 mostra quindi valori negativi ed il suo andamento rispecchia l'assetto di pianura e zone collinari, con quote negative nelle aree di pianura alluvionale, nulle o positive nelle aree collinari. In particolare, i risultati ottenuti mostrano tassi medi di subsidenza che variano tra i 3 e gli 8 mm/anno, con gradiente di aumento in direzione della costa (Giannico et al., 2009) e valori massimi di circa 10 mm/anno, registrati nella zona dei Laghi di Sibari (Figura 5.12).

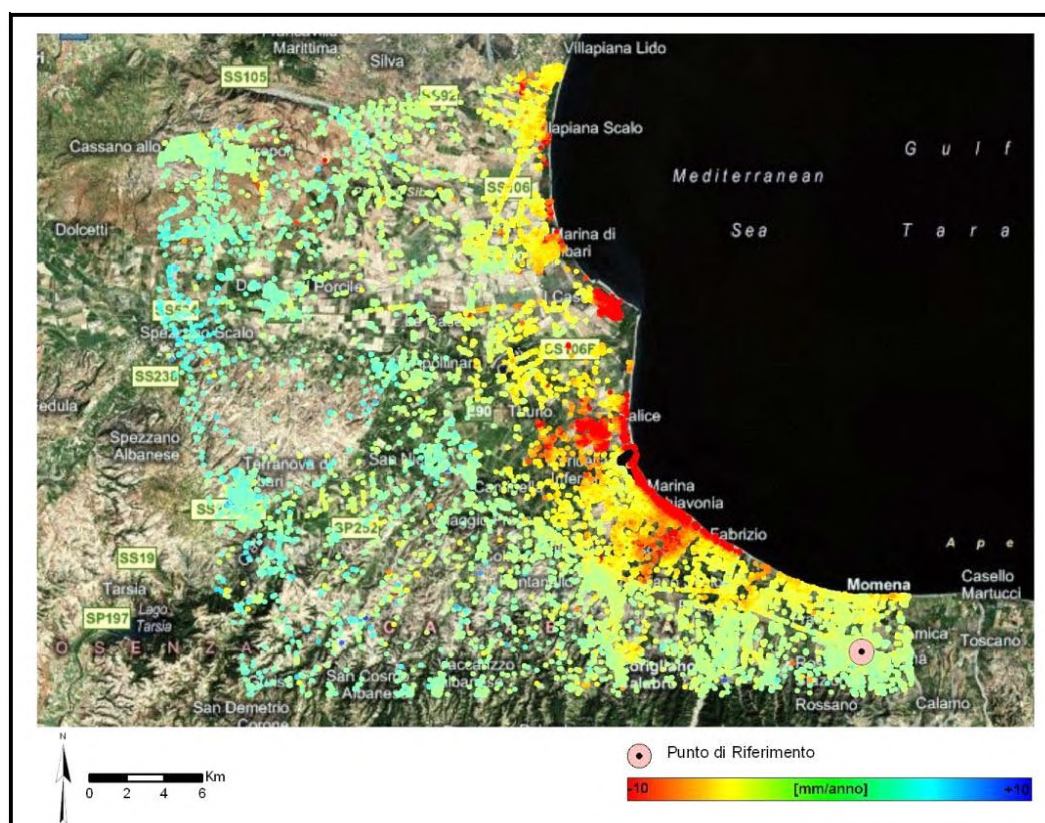


Figura 5.12: Subsidenza attuale della Piana di Sibari. (Giannico et al., 2009 - Copyright: Tele-Rilevamento Europa 2009).

Uno studio più recente (Cianflone et al., 2015) mostra i risultati ottenuti con analisi InSAR dei dati acquisiti dai satelliti Envisat e COSMO-SkyMed, dal 2003 al 2013, nell'area della piana di Sibari (Figura 5.13). Il campo di deformazione del suolo è dominato da una subsidenza diffusa nelle aree costiere da Villapiana Lido a Marina di Schiavonea con velocità fino a circa 20 mm/anno, generata da più meccanismi a causa della complessità geodinamica e geologica dell'area in esame. Tale analisi, inoltre, permette di evidenziare che le attività antropogeniche possono

essere considerate come un fattore incrementale della subsidenza in quanto sono stati osservati tassi maggiori nelle aree più antropizzate, dove la compattazione del suolo è amplificata dal carico indotto dall'ambiente urbano.

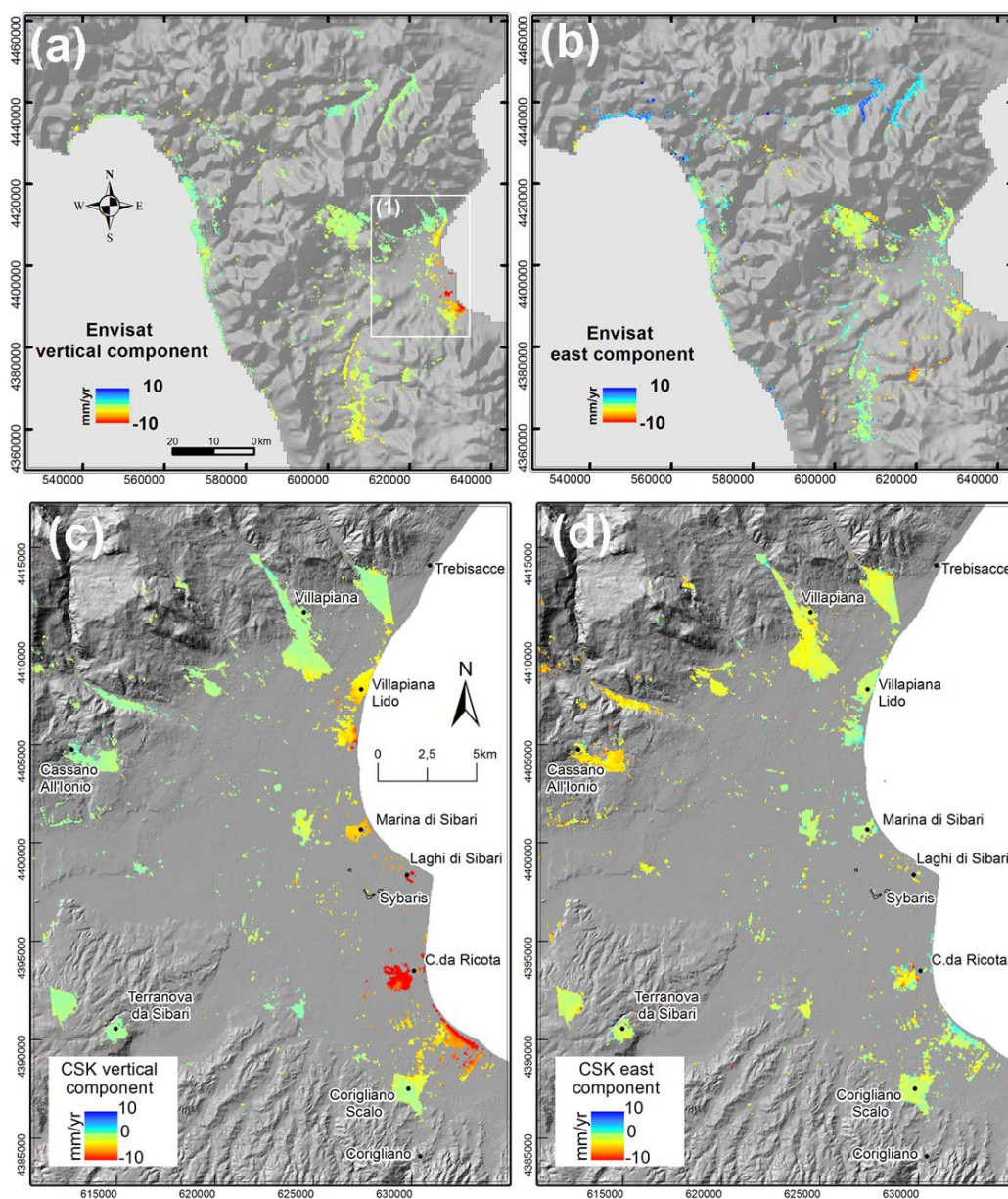


Figura 5.13: Componenti della velocità di deformazione media calcolate dai dati satellitari Envisat e COSMO-SkyMed. (a,c) Componente di velocità verticale; i valori positivi indicano sollevamento e i valori negativi subsidenza. (b,d) Componente est; i valori positivi indicano lo spostamento verso est ed i valori negativi indicano lo spostamento verso ovest. L'area coperta dai dati COSMO-SkyMed è rappresentata dal riquadro (1) in (a).

5.6.2 Crotone

Anche per quanto riguarda l'area di Crotone, la subsidenza è diffusa in tutto il territorio, come dimostrato dai cedimenti avvenuti nell'area archeologica di Capo Colonna, e questo fin dagli anni '90 ha destato non poche preoccupazioni per la presenza di piattaforme installate al largo delle coste crotonesi per l'estrazione di idrocarburi. Infatti, è da molto tempo che i cittadini, accorgendosi di danni ai manufatti civili dell'area, hanno lanciato l'allarme e diverse indagini sono state condotte.

Un utile documento che ha raccolto diverse fonti in merito alla questione della subsidenza nel territorio crotonese è stato quello redatto nel 2015 dalla dottoressa Rosella Cerra in collaborazione col dottor geologo Giuseppe Ferraro per conto di R.A.S.P.A – Rete delle Associazioni della Sibartide e del Pollino per l'Autotutela – (<https://va.minambiente.it>) con oggetto: “Osservazioni alle integrazioni e controdeduzioni depositate il 18 luglio 2015, relative alla documentazione depositata in data 30/10/2014 nell'ambito della procedura di valutazione di impatto ambientale relativa alle istanze di permesso di ricerca in mare denominate “d89F.R.-GM” e “d90F.R.-GM” proposte dalla Global Med”.

In tale documento, la dott.ssa Cerra riporta alcuni estratti del “Quadro Conoscitivo della Redazione del piano di gestione dei Siti Natura 2000, nella provincia di Crotone, di cui al D.M. 03.04.2000, individuati ai sensi delle direttive 92/43/CEE e 79/409/CEE”, redatto nel 2007 da TEMI Srl – Ingegneria per la sostenibilità, in cui si legge: “la Commissione di Studio per la Subsidenza di Crotone, nominata dal tribunale ha fornito dati medi di sprofondamento della costa di valore variabile da 15 a 12 mm/annui il che porta a 36 cm di sprofondamento nei 30 anni di attività (Guerricchio, 1993)”. A tal proposito, una relazione di Lena et al. (2003) racconta che i giacimenti furono scoperti negli anni '70 ed entrarono in produzione, uno nel 1975 e gli altri due nel 1980. Dopo diversi allarmi da parte della popolazione, il pretore di Crotone nominò una commissione di professionisti e dal 1993 al 1998 vennero eseguite misure delle quote ottenute mediante GPS che dettero risultati ritenuti dalla Commissione e dall'ENI abbastanza confortanti.

Secondo la “Commissione per lo studio della subsidenza nella fascia costiera di Crotone”, infatti, l'abbassamento della costa sarebbe stato dovuto a cause tettoniche o più esattamente alla “tettonica gravitativa dell'area”, quindi di origine esclusivamente naturale. Tuttavia, le misure ottenute riportavano per il periodo 1995-1999 un'accentuazione del trend (di subsidenza) di entità compresa fra 12 e 25 mm/anno (cioè fra 4.8 e 10 cm in 4 anni). In particolare, tra il 1993 e il

1998, fu ricavato un tasso di subsidenza medio pari a 9 mm/anno fra Steccato e Crotona, con un massimo a Capo Colonna di 12 mm/anno. Addirittura, valori maggiori furono riscontrati fra Cirò e Rossano (pari a 14 mm/anno) e fra Rossano e Torre Cerchiara (pari a 17 mm/anno).

Gli autori della relazione, inoltre, riconoscono che sicuramente una parte dei tassi di subsidenza siano attribuibili a cause naturali, ma allo stesso tempo non possono non confermare che la costa è in abbassamento anche per cause antropiche (emungimento di acqua per l'agricoltura e il turismo, estrazione di idrocarburi da parte dell'ENI), senza tuttavia riuscire a quantificarne i vari contributi.

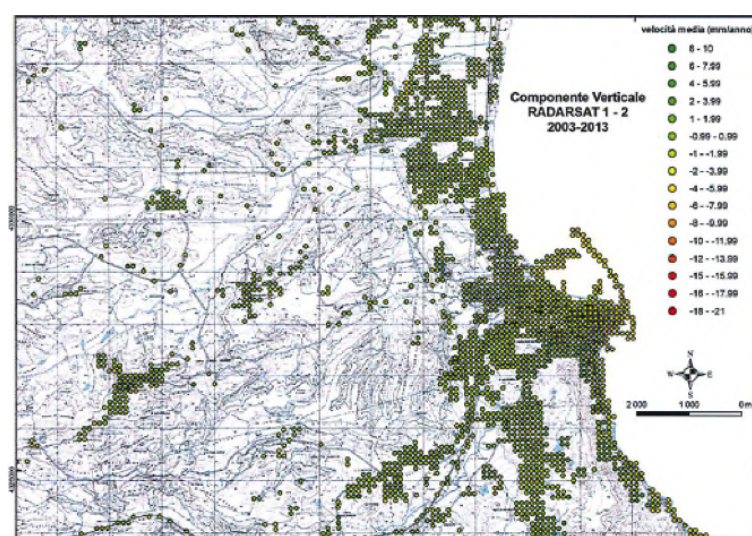
In un articolo online del 2016 (<https://wesud.it/crotone-sprofonda-e-capocolonna-va-via-ce-lo-fa-sapere-eni-di-vincenzo-garrubba/>), invece, vengono riportati i risultati ufficiali del monitoraggio "GEODINAMICO E SUBSIDENZA DEL BACINO CROTONESE DAL 2003 AL 2013" prodotti dal Dipartimento di Biologia dell'Università della Calabria su incarico di "ENI": a partire da misure altimetriche integrate (CGPS, SAR e livellazioni) è emerso che i dati SAR analizzati (sia RADARSAT, relativi al periodo 2003-2013, che Terrasar-X, relativi al periodo aprile 2008-giugno 2010) mostrano una generale stabilità dell'area crotonese con spostamenti verticali e orizzontali caratterizzati da velocità di pochi mm/anno; un'eccezione, tuttavia, è rappresentata dal promontorio di Capo Colonna, dove sorge il tempio di Hera Lacinia, in cui si osserva una subsidenza diffusa, con una velocità media di circa 10 mm/anno con valori massimi al centro del promontorio stesso, con velocità che raggiungono circa i 15 mm/anno (dati RADARSAT) e i 18 mm/anno (dati Terrasar-X). L'abbassamento del livello del suolo è confermato anche per il porto di Crotona, dove la velocità massima raggiunge i 9 mm/anno (Figura 5.14).

Più recentemente, anche in letteratura scientifica, è stato spesso trattato il tema della subsidenza nel territorio crotonese, collegato anche alla salvaguardia dei beni archeologici presenti nell'area, ed è stato studiato a partire dall'analisi di diversi dataset satellitari.

In Cigna et al. (2016), sfruttando una serie temporale di radar ad apertura sintetica (SAR) satellitare senza precedenti, tra cui stack di dati ERS-1/2, ENVISAT, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed e Sentinel-1A acquisiti tra il 1992 e il 2016, si è osservato come negli ultimi 25 anni il terreno nel sito archeologico di Capo Colonna si è abbassato ininterrottamente, con i più alti tassi di deformazione registrati nel periodo 2011-2014.

Sempre in corrispondenza del sito archeologico, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati SAR effettuata in Confuorto et al. (2016), grazie alla disponibilità di immagini TerraSAR-X,

acquisite nell'arco temporale 2008-2010, ha mostrato il protrarsi di una ben nota tendenza al cedimento, connessa a diverse cause naturali (ambientazione litostratigrafica, attività sismica, variazioni eustatiche del livello del mare) e antropiche, quest'ultime rappresentate dalle attività di estrazione del gas localizzate on-shore e off-shore. Inoltre, sono stati ricavati gli spostamenti verticali avvenuti in due anni di monitoraggio, con un valore medio di 30 mm, corrispondenti quindi ad un tasso di 15 mm/anno (Figura 5.15).



Valori di velocità verticali (mm/anno) nell'area di Crotona registrati dai satelliti RADARSAT 1 e 2 nel periodo 2003-2013;

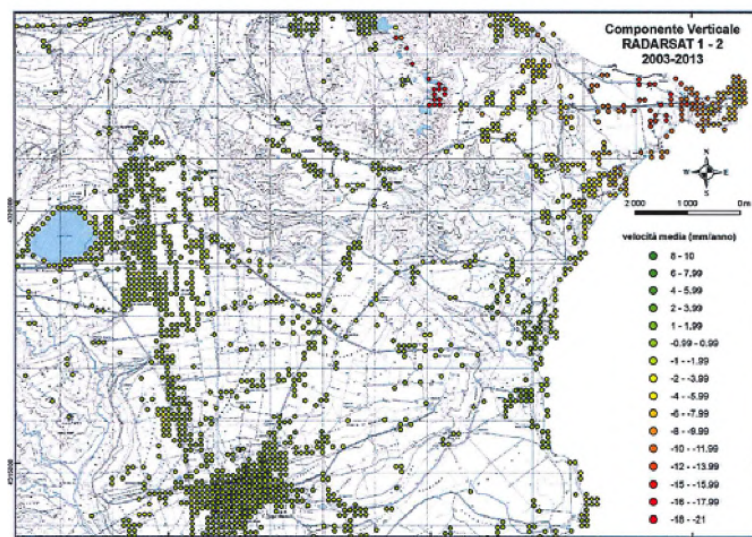


Figura 5.14: Valori di velocità verticali (mm/anno) nell'area di Crotona, registrati dai satelliti RADARSAT 1 e 2 nel periodo 2003-2013 (fonte: <https://wesud.it/crotona-sprofonda-e-capocolonna-via-ce-lo-fa-sapere-eni-di-vincenzo-garrubba/>).

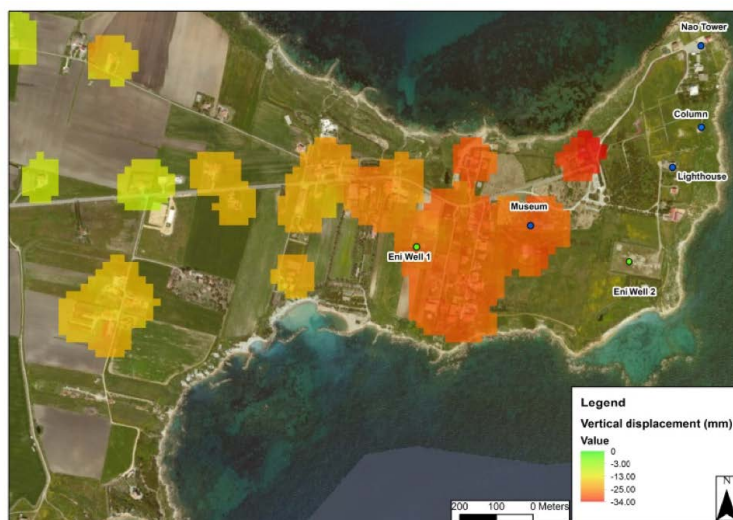


Figura 5.15: Mappa degli spostamenti verticali totali avvenuti nell'area di Capo Colonna tra aprile 2008 e giugno 2010. I punti verdi rappresentano i pozzi ENI per l'estrazione del gas; i punti blu sono per gli edifici principali situati nel promontorio (Confuorto et al., 2016).

Ancora in Cigna & Tapete (2021), l'elaborazione di immagini SAR acquisite nel 2014-2020 in corrispondenza del promontorio di Capo Colonna ha permesso di determinare tassi di subsidenza del suolo fino a -2.3 cm/anno (Figura 5.16).

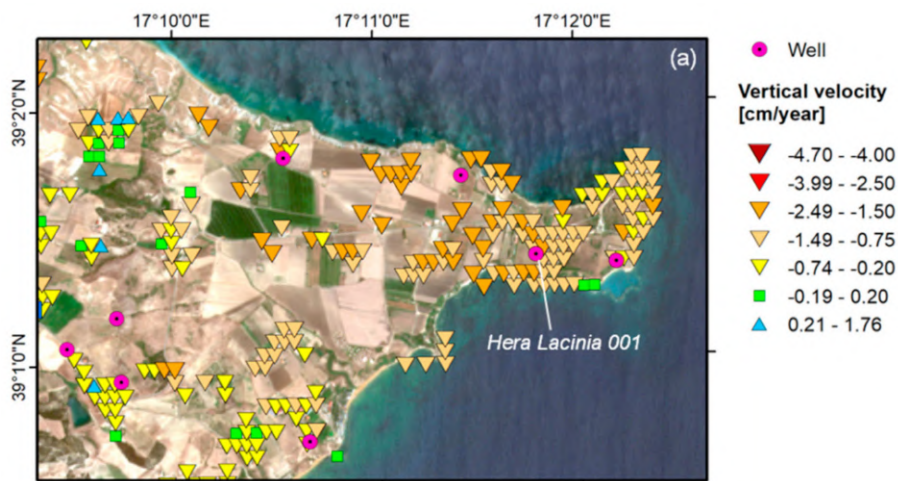


Figura 5.16: Campo di velocità verticali osservati nel promontorio di Capo Colonna, dove i tassi hanno raggiunto il valore di -2.3 cm/anno (Cigna & Tapete, 2021).

5.6.3 Gioia Tauro

Un'analisi del fenomeno della subsidenza nella piana di Gioia Tauro è riportata nello studio di Raspini et al. (2012). Sfruttando l'analisi multi-temporale PSInSAR (Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) di dati satellitari, gli autori hanno ricavato le mappe della velocità di deformazione del suolo e le relative serie di spostamento che rivelano tassi di subsidenza fino a 10-15 mm/anno per il periodo 1992-2006. L'origine di tali tassi di subsidenza e del loro andamento nello spazio e nel tempo viene individuata nell'eccessivo sfruttamento idrico delle acque sotterranee principalmente per scopi agricoli, ma anche industriali e domestici: la piana di Gioia Tauro è infatti uno dei più grandi bacini agricoli del Sud Italia, per l'ampio ricorso a pratiche colturali intensive, in particolare di ulivi e agrumi; inoltre, è caratterizzata da un'elevata densità abitativa e dalla presenza di una variegata gamma di industrie.

I risultati ottenuti nello studio hanno mostrato i tassi di subsidenza maggiori nella parte centrale del bacino, in corrispondenza del centro abitato di Rizziconi, e nella parte settentrionale, in corrispondenza della cittadina di Rosarno, mentre nelle aree costiere i tassi di subsidenza variano da pochi mm/anno a decine di mm/anno, raggiungendo tassi di subsidenza anche superiori a 10 mm/anno subito a nord del porto di Gioia Tauro, in prossimità della foce del Mesima (Figura 5.17).

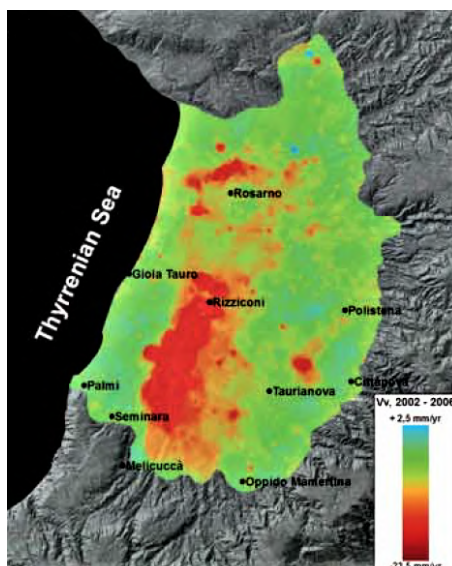


Figura 5.17: Campo di velocità verticali nella piana di Gioia Tauro nel periodo 2002 – 2006, ricavati a partire dai dati satellitari ENVISAT (Raspini et al., 2012).

5.7 Caratteristiche dei bacini idrografici calabresi e stima del trasporto fluviale

La configurazione orografica notevolmente articolata della Calabria, la breve distanza che intercorre fra i principali sistemi montuosi ed il mare ed il rilevante sviluppo costiero danno luogo a numerosi corsi d'acqua caratterizzati da bacini imbriferi generalmente molto modesti, di medio-basso ordine gerarchico con breve corso in pianura e con forti pendenze longitudinali. Lo spartiacque principale corre da nord a sud seguendo le cime della dorsale montuosa della Sila e dell'Aspromonte delimitando un versante tirrenico, arealmente meno esteso, ed uno ionico molto più ampio.

Sotto il profilo geomorfologico, la rete idrografica calabrese insiste su un territorio caratterizzato da un diffuso ed elevato grado di dissesto, inoltre la stessa posizione geografica della regione favorisce un regime irregolare della piovosità, di conseguenza si alternano periodi di siccità a periodi di precipitazioni atmosferiche brevi ed intense, che determinano al suolo un ruscellamento elevato e veloce, con piene improvvise e violente dei corsi d'acqua, caratterizzate da forti trasporti solidi e da un'intensa erosione superficiale.

L'analisi condotta in tale studio ha preso in esame gran parte dei bacini idrografici del territorio calabrese, in particolare sono stati considerati tutti i bacini con superficie superiore ai 4 km² e a questi sono stati aggiunti alcuni bacini di minore estensione ma particolarmente significativi.

In totale, quindi, l'analisi ha riguardato 262 bacini, di cui 158 ricadenti nel versante ionico, 13 nell'area dello Stretto di Messina e i restanti 91 nel versante tirrenico.

Per la stima del trasporto solido fluviale in termini di volume medio di suolo distaccato per erosione superficiale è stato utilizzato il modello di Gavrilovic (1959), descritto nel secondo capitolo. Tale modello si basa su un'equazione analitica che permette di determinare il volume medio annuo di materiale solido in funzione delle caratteristiche morfometriche del bacino idrografico (quali l'area, il perimetro, la pendenza media, l'altezza media, la lunghezza dell'asta principale, la lunghezza totale degli affluenti), delle precipitazioni e temperature medie annue e di alcuni coefficienti relativi alla protezione del suolo (in funzione del tipo di copertura vegetale), all'erodibilità (in funzione del tipo di roccia), e al tipo di erosione del bacino.

Pertanto, l'analisi condotta è stata articolata nelle seguenti fasi, tutte effettuate su QGIS:

1. Identificazione e caratterizzazione morfometrica dei bacini;
2. Analisi per ogni bacino delle serie temporali di precipitazioni e temperature per stimare le precipitazioni e le temperature medie annue;
3. Analisi per ogni bacino degli usi del suolo necessari per stimare i coefficienti di protezione del suolo, erodibilità ed erosione per ogni bacino;
4. Stima della quantità media di sedimenti distaccati per ogni bacino;
5. Stima del coefficiente di ritenzione per ogni bacino;
6. Stima del volume medio annuo di materiale eroso per ogni bacino.

Per quanto riguarda la prima fase, l'identificazione dei bacini idrografici e la loro caratterizzazione morfometrica è stata effettuata a partire dal DEM a maglia quadrata di 5 m disponibile nella sezione OpenData del Geoportale Calabria (<http://geoportale.regione.calabria.it/>). In particolare, per ogni bacino sono stati calcolati l'area, il perimetro, la lunghezza dell'asta principale, la lunghezza totale degli affluenti, le altezze massime e medie, la pendenza media, l'ordine di Horton, l'indice di Gravelius e il tempo di corrivazione. La stima dell'ultimo parametro è stata effettuata utilizzando le formule di Giandotti (1934), Kirpich (1940) e NRCS (1997).

Per quanto riguarda la seconda fase, i valori medi annui delle precipitazioni e delle temperature di ciascun bacino sono stati stimati a partire dalle serie temporali registrate di pioggia e temperatura disponibili nella sezione Dati Storici del Centro Funzionale Multirischio Calabria (<http://www.cfd.calabria.it/>). Preliminarmente sono stati individuati per ogni bacino i pluviometri e i termometri con serie storiche statisticamente significative. Per ogni strumento sono stati analizzati il periodo di registrazione, il numero di anni a disposizione, la quota altimetrica, il peso, stimato su QGIS utilizzando il metodo dei poligoni di Thiessen (ASCE, 1996; Fiedler, 2003) e la media annuale delle precipitazioni e della temperatura. I valori medi annui delle precipitazioni e delle temperature di ciascun bacino sono stati calcolati come media ponderata dei valori registrati da ogni strumento di misura.

Per la terza fase sono stati utilizzati i dati di uso del suolo forniti dal progetto Corine Land Cover di IV livello del 2018 e liberamente disponibili sul sito web dell'ente governativo "Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA)" (<https://www.isprambiente.it/>).

gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/copertura-del-suolo/corine-land-cover). Ad ogni categoria di uso del suolo del Corine Land Cover è stato associato un valore di ciascuno dei coefficienti di protezione del suolo, erodibilità ed erosione. Per ogni bacino i valori medi di tali coefficienti sono stati calcolati come media ponderata dei valori dei coefficienti di ciascuna categoria di uso del suolo, considerando come peso l'area di ogni categoria di utilizzo del suolo.

Per quanto riguarda le ultime tre fasi, le stime della quantità media di sedimenti distaccati, del coefficiente di ritenzione e infine del volume medio annuo di materiale eroso sono state effettuate semplicemente utilizzando le equazioni definite dal modello di Gavrilovic per ogni bacino. In particolare, il coefficiente di ritenzione è stato calcolato utilizzando l'espressione di Zemljic (1971).

L'analisi morfometrica dei bacini idrografici calabresi ha evidenziato che, per estensione, i bacini più importanti sono il Crati con una superficie di circa 2500 km², seguito dal Neto con circa 1100 km², dal Mesima con circa 800 km² e dal Lao con 600 km². Invece, per quanto riguarda la quantità di materiale eroso mediamente in un anno, i bacini che forniscono i contributi maggiori sono il Lao con un valore di 132229 m³/anno, seguito dal Neto con un valore di 107877 m³/anno e dall'Allaro con un valore di 102671 m³/anno.

Le Tabelle 5.6 e 5.7 mostrano rispettivamente i cinquanta bacini calabresi più estesi e quelli per cui è stato ottenuto il maggior valore di volume medio annuo di materiale eroso, espresso in m³/anno.

Tabella 5.6: Denominazione ed estensione in km² dei cinquanta bacini calabresi più grandi.

Denominazione bacino idrografico	S [km²]	Denominazione bacino idrografico	S [km²]
Fiume Crati	2448	Torrente Alessi	99
Fiume Neto	1073	Fiumara Stilaro	95
Fiume Mesima	815	Fiumara Careri	92
Fiume Lao	600	Fiumara Saraceno	88
Fiume Amato	444	Torrente Coserie	86
Fiume Tacina	427	Torrente Soverato	84
Fiume Petrace	422	Fiumara Budello	84
Fiume Savuto	412	Fiumara Melito	80
Fiume Corace	294	Fosso del Passovecchio	79
Torrente Trionto	289	Torrente Bagni	75
Fiume Angitola	190	Torrente Uria	73
Fiume Nicà	175	Torrente San Mauro	72
Fiume Ancinale	173	Fiumara Catona	68
Torrente Raganello	165	Torrente Condojanni	67
Fiume Torbido (RC)	161	Fiumara Assi	66
Torrente Lipuda	160	Torrente Colognati	66
Fiumara Amendolea	150	Fiume Abatemarco	65
Fiumara Bonamico	136	Vallone Vorga	64
Fiumara Allaro	130	Torrente Coriglianeto	63
Fiume Crocchio	130	Fiumara Gallico	60
Fiume Simeri	130	Fiume Oliva	59
Fiume Alli	128	Torrente Turrina	58
Torrente Ferro	120	Torrente Malfrancato	57
Fiumara La Verde	117	Torrente Caldana	57
Fiume Esaro	111	Fiumara Novito	56

Tabella 5.7: Denominazione e volume medio annuo di materiale eroso, espresso in m³/anno, dei cinquanta bacini calabresi che forniscono un apporto solido fluviale maggiore.

Denominazione bacino idrografico	G [m³/anno]	Denominazione bacino idrografico	G [m³/anno]
Fiume Lao	132229	Fiume Angitola	29893
Fiume Neto	107877	Fiumara Sfalassà	29055
Fiumara Allaro	102671	Fiumara Portigliola	28891
Fiume Torbido RC	88674	Fiumara Stilaro	27202
Fiume Savuto	83681	Torrente Raganello	26889
Fiume Petrace	80774	Fiume Nicà	26836
Fiumara Bonamico	75361	Fiumara Precariti	26432
Fiume Mesima	75053	Fiume Abatemarco	24393
Fiume Tacina	69373	Fiumara Calopinace	24307
Fiume Ancinale	65879	Fiume Crati	23361
Fiume Amato	62990	Torrente Soverato	23159
Fiume Corace	61560	Torrente Ferro	22369
Fiumara La Verde	58189	Fiume Simeri	21999
Torrente Trionto	58078	Fiumara Novito	21744
Fiumara Careri	50949	Torrente Lipuda	21418
Torrente Condojanni	50941	Fiumara Gerace	21363
Fiumara Amendolea	45683	Fiumara Saraceno	21354
Fiumara Alaca	44247	Torrente Coriglianeto	20888
Fiume Crocchio	39889	Fiumara Amusa	19956
Fiumara Catona	39474	Torrente Corvino	19033
Fiumara Gallico	38501	Fiumara Sant'Agata	18819
Fiumara Melito	34226	Torrente Vaccuta	18810
Fiume Alli	34121	Fiumara Bruzzano	18202
Fiumara Favazzina	32506	Torrente Maddalena	16519
Torrente Alessi	31579	Torrente Coserie	16283

5.8 Analisi delle opere di difesa costiera e portuali

Per l'analisi delle opere di difesa costiera e portuali sono state utilizzate le immagini satellitari più recenti disponibili e gli strumenti di analisi spaziale di Google Earth, che hanno permesso di determinare le caratteristiche geometriche e lo stato di conservazione delle opere e le estensioni massime dei porti rispetto alla linea di costa.

Per quanto riguarda l'analisi dei sistemi portuali, sono stati valutati tutti i porti presenti in Calabria, rappresentati in Figura 5.18.



Figura 5.18: I sistemi portuali calabresi. Legenda: i triangolini gialli rappresentano i porti calabresi, accompagnati dal nome della località in cui si trovano; i tratti in rosso raffigurano i litorali esaminati in questo studio.

La valutazione dell'estensione massima dei porti *A*, definita nel capitolo precedente, è stata valutata per tutti e 24 i sistemi portuali calabresi rispetto alla linea di costa del 1954, anno nel quale gran parte dei bacini portuali odierni ancora non esisteva. Il valore massimo di estensione è stato

riscontrato per il porto nuovo di Crotona, pari a 1122 m. Pertanto, i valori ottenuti per gli altri sistemi portuali sono stati normalizzati rispetto a tale valore per ottenere l'indice relativo alla presenza dei porti. I porti maggiori che interagiscono con la dinamica litoranea nelle località esaminate sono quelli di Cetraro Marina, con un valore di A pari a 489 m, Cariati, con un valore di A pari a 457 m e Roccella Ionica, con un'estensione pari a 415 m. I valori di A considerati per i porti ricadenti nelle località esaminate sono riportati in Appendice, in Tabella IV-2.

Per quanto riguarda le opere di difesa costiera, sono stati individuati dei sistemi di pennelli nelle località di Montegiordano Marina, Marina di Roseto Capo Spulico, Cariati, Roccella Ionica, Lazzaro, Pellaro, e Tropea; le località di Cirò Marina, Torre Melissa, Crotona, Brancaleone Marina, Palizzi Marina, Bova Marina, Gallico, Santa Maria di Ricadi, Falerna Marina, Amantea e Marina di Belvedere sono protette da una serie di barriere emerse o soffolte; invece, sistemi misti di barriere emerse o soffolte e pennelli o di pennelli a T sono presenti nelle località di Crucoli Torretta, Porticello, Favazzina, Capo Vaticano, Vibo Marina, Belmonte Marina, San Lucido, Marina di Fuscaldo, Cetraro Marina e Sanginetto Lido; infine, nel tratto di costa considerato a Isola di Capo Rizzuto – Marinella è stata rilevata la presenza di un solo pennello.

La valutazione della linea di costa protetta è stata effettuata seguendo la linea metodologica descritta nel precedente capitolo ed i risultati ottenuti, per le località in cui sono presenti le opere di protezione, sono mostrati nella Tabella 5.8.

Come mostra la Tabella 5.8, delle 54 località esaminate 29 risultano protette con sistemi di difesa costiera con una percentuale di linea di costa protetta variabile tra un minimo di 2.47% a Belmonte Marina ed un massimo di quasi il 48% a San Lucido.

Tabella 5.8: Risultati ottenuti dall'analisi sulle opere di difesa costiera nelle località esaminate.

Codice	Località esaminata	Linea di costa protetta da opere di difesa [m]	α	Percentuale di linea di costa protetta [%]
4530	Montegiordano Marina	179	0.4	6.54
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	1032	0.4	21.63
5496	Cariati	370	0.8	7.65
5497	Crucoli Torretta	664	0.2	7.32
5832	Cirò Marina	500	0.4	9.68
6004	Torre Melissa	1347	0.6	39.74
6352	Crotone	970	1.0	35.53
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	212	0.6	44.57
7989	Roccella Ionica	128	0.4	2.67
8685	Brancaleone Marina	201	1.0	11.61
8864	Palizzi Marina	195	1.0	22.23
8863	Bova Marina	222	1.0	6.56
8683	Lazzaro	2545	0.4	28.32
8343	Pellaro	226	0.6	9.99
8343	Gallico	780	1.0	45.96
7988	Porticello	900	0.6	38.55
7988	Favazzina	569	0.6	32.87
7442	Santa Maria di Ricadi	429	1.0	44.57
7261	Capo Vaticano	254	0.2	6.53
7078	Tropea	97	1.0	12.55
6896	Vibo Marina	1114	0.4	11.98
6527	Falerna Marina	185	0.8	10.68
6350	Amantea	640	0.8	17.90
6175	Belmonte Marina	122	0.4	2.47
6002	San Lucido	1919	0.8	47.61
5830	Marina di Fuscaldo	344	0.6	5.40
5659	Cetraro Marina	1621	0.6	23.67
5493	Sanginetto Lido	1176	0.8	33.14
5331	Marina di Belvedere	2324	0.4	24.17

5.9 Analisi del grado di antropizzazione della linea di costa

Anche per l'analisi del grado di antropizzazione della linea di costa sono state utilizzate le immagini satellitari più recenti disponibili e gli strumenti di analisi spaziale di Google Earth. La valutazione ha riguardato porzioni di litorale non più identificabili dalla linea di spiaggia, ma dalla presenza di una struttura o infrastruttura, spesso protetta da opere radenti. L'analisi effettuata ha evidenziato come in tutte le località la percentuale di linea di costa non erodibile è inferiore al 20%, ad eccezione delle località di Sanginetto Lido e Marina di Belvedere in cui raggiunge un valore rispettivamente di 29.6% e 21%. In Appendice, la Tabella IV-2 riporta, per ciascuno dei litorali esaminati, la percentuale di linea di costa antropizzata o non erodibile.

Nelle Figure 5.19, 5.20 e 5.21 sono presentati i casi più significativi di tratti di costa in cui il grado di antropizzazione è non nullo.



Figura 5.19: Dettaglio di Sanginetto Lido: la linea di costa è individuata dalle scogliere radenti che proteggono le abitazioni, la spiaggia non esiste più (Fonte: Google Earth).



Figura 5.20: Dettaglio di Marina di Belvedere: la linea di costa è individuata dalle scogliere radenti che proteggono la linea ferroviaria (Fonte: Google Earth).



Figura 5.21: Dettaglio di Porticello: la linea di costa è individuata dalle scogliere radenti che proteggono le case a tergo delle barriere (Fonte: Google Earth).

5.10 Innalzamento del livello medio del mare

Per quanto riguarda la valutazione dell'innalzamento del livello medio del mare per effetto dei cambiamenti climatici sono stati considerati gli studi effettuati a partire dall'analisi dei dati satellitari. In particolare, uno studio effettuato dalla NASA (Figura 2.19), ha stimato un trend di crescita del livello del mare pari a 3.4 mm/anno. Tale valore è stato considerato per il caso studio in esame.

5.11 Analisi del regime anemologico

Per la valutazione dei dati di vento sono stati considerati i dati forniti dal MeteOcean Group del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova (<http://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html>), relativi all'intervallo temporale 1979-2018, di cui si parlerà più dettagliatamente nel paragrafo relativo al moto ondoso. Per le 54 località esaminate sono stati analizzati i dati di vento di 52 punti della griglia di calcolo del modello usato dal MeteOcean group, così ripartiti: 32 per l'area ionica, 1 per l'area dello Stretto di Messina e 19 per la tirrenica. I punti relativi alla ionica e alla tirrenica sono i medesimi utilizzati per i dati meteomarini, mentre quello ricadente nello Stretto di Messina è stato utilizzato soltanto per i dati di vento ed il motivo di tale scelta è descritto nel paragrafo 5.14.

I dati di vento sono stati forniti dal database del MeteOcean group in termini di componenti Ovest-Est e Sud-Nord della velocità del vento registrata alla quota di 10 m sul l.m.m in m/s. Tali dati sono stati quindi elaborati per determinare la velocità e la direzione rispetto al Nord della risultante, tenendo presente che la direzione del vento, per convenzione, è sempre la direzione di provenienza. Successivamente, considerando settori di provenienza del vento di 10° e classi di velocità di 1 m/s, sono state valutate le frequenze di apparizione per individuare la direzione del vento prevalente e la relativa velocità massima. Tale calcolo è risultato necessario per la determinazione del massimo sovrizzo di vento, mediante l'equazione (4.9), per ogni località esaminata.

Infine, a partire dal conteggio dei dati appartenenti alle varie classi di velocità, è stato possibile determinare la probabilità di superamento di una fissata soglia e quindi il numero di ore in un anno in cui la velocità del vento supera la soglia critica per il trasporto eolico dei sedimenti, valutata secondo la procedura di calcolo descritta nel precedente capitolo.

Nelle Tabelle 5.9 e 5.10 sono riportati i risultati ottenuti per ogni località esaminata a partire dall'analisi dei dati di vento, in particolare: la direzione e la velocità massima del vento prevalente, espressa in m/s, la velocità critica alla quota di 10 metri, espressa in m/s, necessaria perché ci sia trasporto eolico di sedimenti e la probabilità di superamento, espressa in percentuale, che coincide con il valore dell'indice calcolato per il trasporto eolico. Inoltre, accanto alla località esaminata, è riportato il codice del punto della griglia del MeteOcean che ha fornito i dati di partenza dell'analisi effettuata.

Tabella 5.9: Risultati ottenuti per ogni località esaminata a partire dall'analisi dei dati di vento (continua).

Codice	Località esaminata	Dir	V_{max} [m/s]	$u_{*,10m}$ [m/s]	$P(V > u_{*,10m})$ [%]
4530	Montegiordano Marina	SE	22	40	0.0
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	NE	26	40	0.0
4848	Trebisacce	NE	25	44	0.0
5011	Villapiana Lido	NE	22	44	0.0
5173	Rossano	NE	23	33	0.0
5333	Marina di Calopezzati	E	25	25	0.0
5496	Cariati	E	28	30	0.0
5497	Crucoli Torretta	SE	28	32	0.0
5832	Cirò Marina	S	24	25	0.0
6004	Torre Melissa	S	24	27	0.0
6177	Crotone – Zigari	S	24	16	0.5
6352	Crotone	S	24	15	0.8
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	S	24	27	0.0
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	S	25	27	0.0
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	S	26	33	0.0
6898	Cropani	E	26	33	0.0
6897	Catanzaro Lido	E	27	33	0.0
7080	Soverato	E	28	33	0.0
7262	San Sostene Marina	E	28	33	0.0
7443	Badolato	SE	27	33	0.0
7624	Monasterace Marina	SE	27	33	0.0
7807	Riace Marina	SW	26	21	0.0
7990	Marina di Caulonia	SW	27	21	0.0
7989	Roccella Ionica	SE	28	21	0.0
8168	Locri	SE	28	15	0.8
8344	Bovalino	SE	25	15	0.6
8514	Ferruzzano Marina	SE	26	10	6.0
8685	Brancaleone Marina	SW	28	10	6.9
8864	Palizzi Marina	SW	28	29	0.0
8863	Bova Marina	SE	25	29	0.0
8862	Melito di Porto Salvo	S	26	23	0.0
8683	Lazzaro	S	23	33	0.0

Tabella 5.10: Risultati ottenuti per ogni località esaminata a partire dall'analisi dei dati di vento.

Codice	Località esaminata	Dir	V_{max} [m/s]	$u_{*,10m}$ [m/s]	$P(V > u_{*,10m})$ [%]
8343	Pellaro	NW	21	33	0.0
8343	Gallico	S	22	33	0.0
7988	Porticello	N	27	33	0.0
7988	Favazzina	N	27	84	0.0
7806	Palmi	N	26	25	0.0
7622	San Ferdinando	N	23	15	0.7
7442	Santa Maria di Ricadi	NW	20	15	0.4
7261	Capo Vaticano	NW	20	15	0.7
7078	Tropea	NW	21	15	0.6
6896	Vibo Marina	W	21	40	0.0
6711	Gizzeria Lido	W	25	40	0.0
6527	Falerna Marina	W	24	40	0.0
6350	Amantea	NW	23	40	0.0
6175	Belmonte Marina	NW	23	40	0.0
6002	San Lucido	SW	29	40	0.0
5830	Marina di Fuscaldo	SW	29	25	0.0
5659	Cetraro Marina	W	30	25	0.0
5493	Sanginetto Lido	W	29	25	0.0
5331	Marina di Belvedere	W	28	25	0.0
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	W	26	33	0.0
5009	Scalea	W	26	33	0.0
4846	Tortora Marina	W	28	33	0.0

5.12 Analisi dei dati di marea

Per la valutazione dell'escursione media di marea sono stati utilizzati i set di dati di livello idrometrico registrati dai mareografi della RMN, gestita dall'ISPRA. Tale scelta permette di tenere conto di tutti i contributi mareali (marea astronomica e metereologica). In Calabria, tuttavia, sono presenti soltanto due stazioni mareografiche, una sita a Reggio Calabria ed una sita a Crotona. Per tale motivo si è fatto ricorso alle stazioni mareografiche delle regioni vicine per avere una maggior copertura regionale: in particolare sono state considerate le stazioni di Catania, Taranto e Palinuro.

Le Figure 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26 rappresentano i dati di livello idrometrico registrati tra

il 2010 e il 2021 nelle stazioni mareografiche considerate.

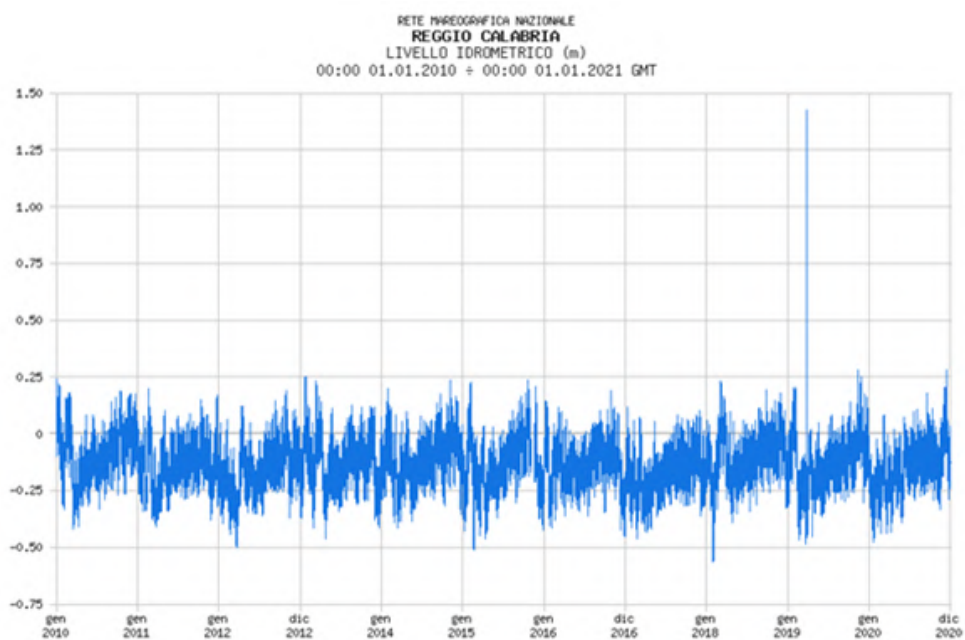


Figura 5.22: Livello idrometrico registrato tra il 2010 e il 2021 nella stazione RMN di Reggio Calabria.

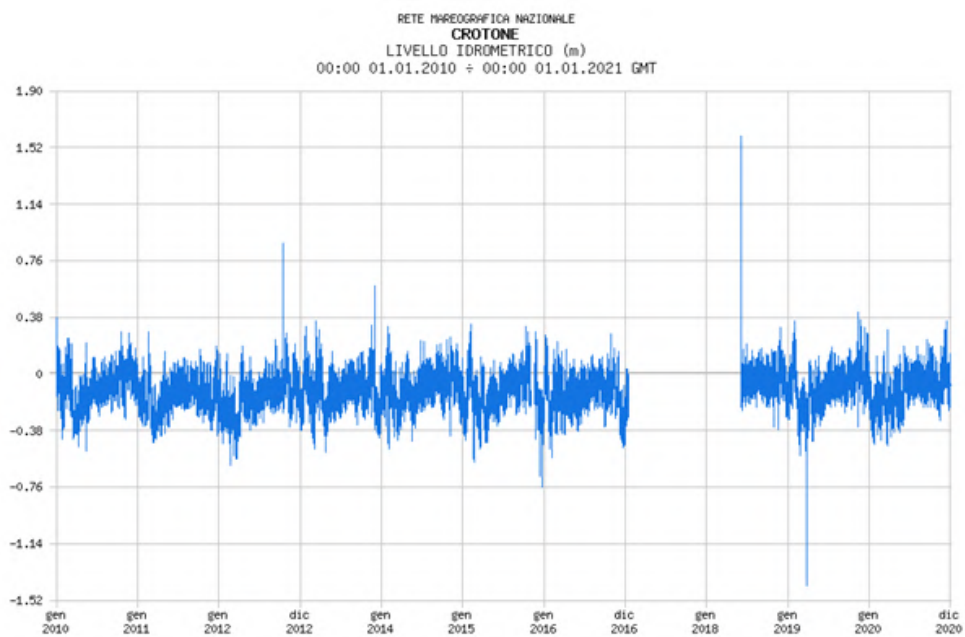


Figura 5.23: Livello idrometrico registrato tra il 2010 e il 2021 nella stazione RMN di Crotona.

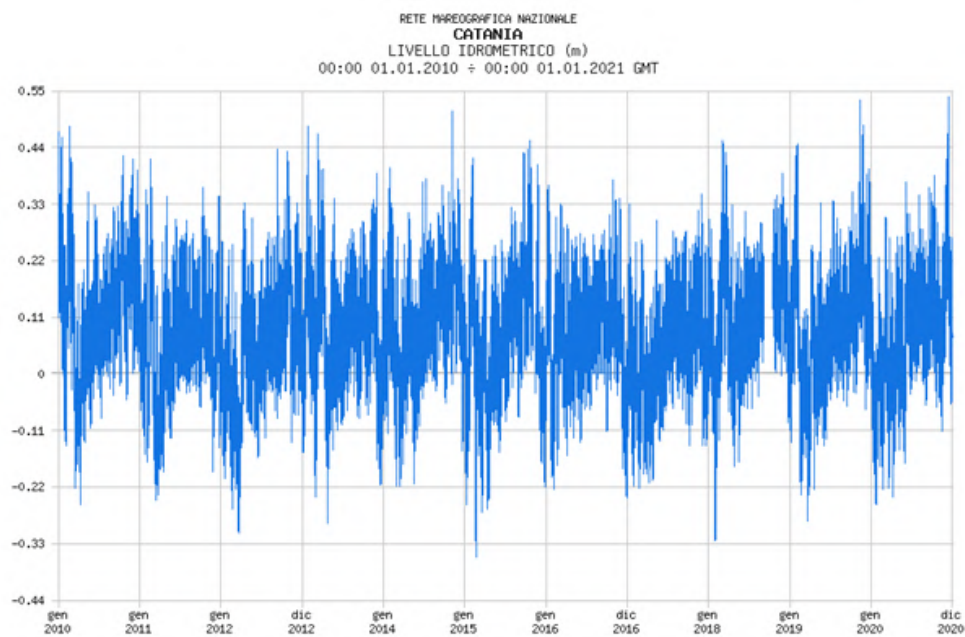


Figura 5.24: Livello idrometrico registrato tra il 2010 e il 2021 nella stazione RMN di Catania.

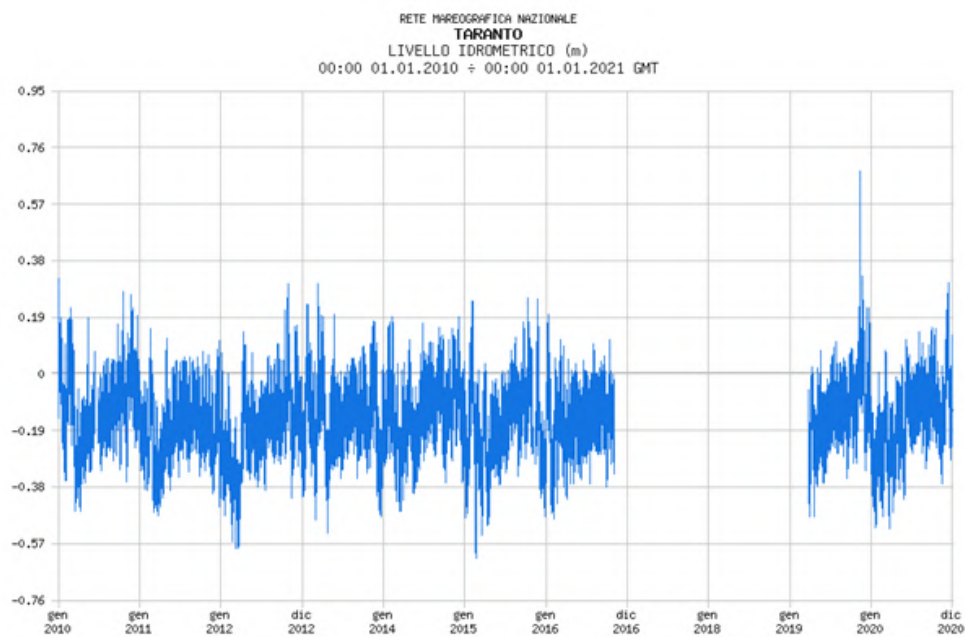


Figura 5.25: Livello idrometrico registrato tra il 2010 e il 2021 nella stazione RMN di Taranto.

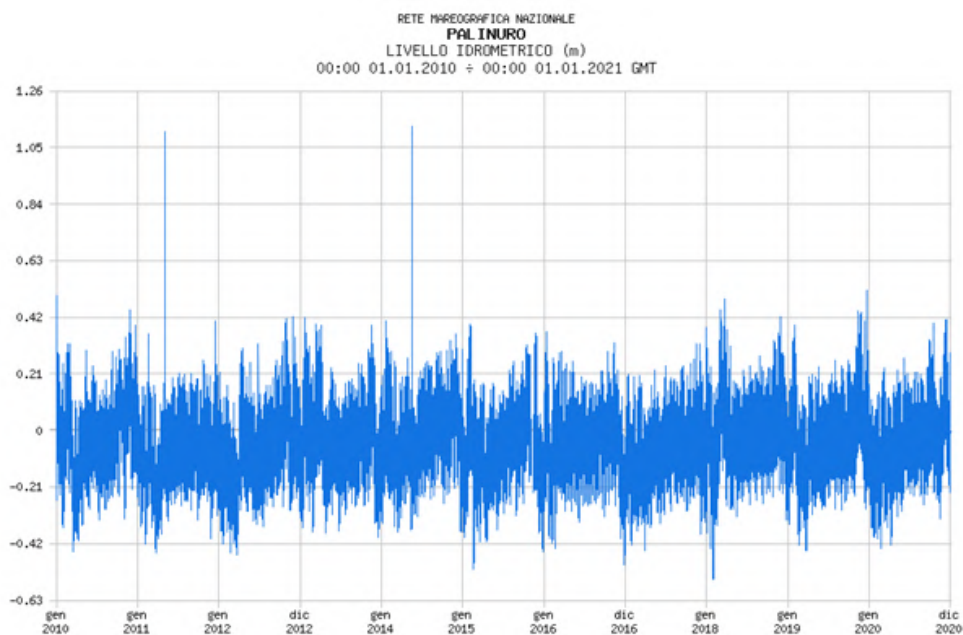


Figura 5.26: Livello idrometrico registrato tra il 2010 e il 2021 nella stazione RMN di Palinuro.

Per ogni stazione, i dati sono stati preliminarmente depurati dei valori estremi e successivamente analizzati annualmente e complessivamente, ottenendo i risultati in termini di livello massimo e minimo assoluto, escursione massima ed escursione media, espressi in m, riportati nella Tabella 5.11.

Tabella 5.11: Risultati ottenuti dall'analisi dei dati del livello idrometrico registrato nelle diverse stazioni mareografiche considerate.

Stazione RMN	Livello max [m]	Livello min [m]	Escursione max [m]	Escursione media [m]
Reggio Calabria	0.37	-0.56	0.93	0.69
Crotone	0.87	-0.76	1.63	0.90
Catania	0.53	-0.35	0.88	0.72
Taranto	0.9	-0.61	1.51	0.87
Palinuro	0.52	-0.55	1.07	0.88

Il valore di escursione media è stato valutato considerando i valori medi dei livelli minimi e massimi registrati annualmente. Il valore di escursione media ottenuto a Taranto è stato ritenuto valido per le località dell'alto Ionio, ricadenti nel golfo di Taranto; il valore ottenuto a Crotone è stato considerato per gran parte dell'area ionica calabrese; quello ottenuto a Catania è stato considerato

valido per le località del basso Ionio, fino allo Stretto di Messina, dove è stato utilizzato il valore ottenuto a Reggio Calabria; in tutto il litorale tirrenico, infine, è stato ritenuto valido il valore ottenuto a Palinuro. In Appendice, la Tabella III riporta, per ciascuno dei litorali esaminati, il valore di escursione media considerato.

5.13 Analisi delle correnti marine

In Calabria le correnti marine sono caratterizzate da valori di velocità tipici del Mediterraneo: in particolare, nel Tirreno e nello Ionio variano tra 0.4 e 0.7 nodi. Un'eccezione, tuttavia, è costituita dall'area dello Stretto di Messina, un sito estremamente significativo per le correnti marine, al punto tale da essere oggetto di studi per lo sfruttamento dell'energia da correnti.

L'area dello Stretto di Messina, infatti, nonostante abbia piccole dimensioni, essendo caratterizzato da larghezza pari a circa 3 km nel punto più stretto e lunghezza pari a circa 30 km, è sede di correnti marine notevolmente articolate ed intense (Mosetti, 1988; Tomasino, 1995).

Le prime osservazioni di campo sullo Stretto di Messina furono condotte negli anni '30 dal prof. Vercelli, fisico e direttore dell'Istituto Geofisico di Trieste, per un periodo piuttosto lungo e su un numero considerevole di stazioni, sia fisse sia in movimento. Successivamente, nel 1980, al fine di valutare la possibilità di uno sfruttamento delle correnti dello Stretto per la produzione di energia, è stata condotta dall'OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) di Trieste una campagna di misure su lungo periodo per conto dell'ENEL, con il posizionamento in 9 punti dello Stretto, nell'area di minore ampiezza compresa tra le congiungenti Ganzirri-Punta Pezzo e Capo Peloro-Scilla, di una serie di catene correntometriche con 3 moderni correntometri ciascuna, per un totale di 27 strumenti di misura operativi in situ per un periodo di 4-6 mesi. Dalle misure effettuate nelle campagne suddette, emerge chiaramente che le correnti di marea sono responsabili del 70% della dinamica totale nello Stretto.

La marea nell'area dello Stretto è di tipo semidiurno, per cui si hanno due alte maree e due basse maree simili di intensità. Per questo motivo le correnti di marea nello Stretto si invertono ritmicamente ogni sei ore e dodici minuti circa, in media. L'ampiezza e la velocità delle correnti di marea varia col ritmo di 14 giorni passando dai massimi ai minimi valori. In particolare, le maree ioniche e quelle tirreniche sono caratterizzate da ampiezze confrontabili, mentre le rispettive fasi risultano più o meno in opposizione. Questo avviene per ciascuna costituente mareale, ma si verifica in modo più significativo per le componenti semidiurne. L'opposizione di fase delle

componenti di marea origina un'intensificazione degli effetti, dal momento che ad una condizione di massimo livello nel Tirreno corrisponde quella di minimo livello nello Jonio, e viceversa. In particolare, la sola componente semidiurna origina correnti di intensità dell'ordine dei 2 m/s, mentre la corrente diurna è pari a circa 1/4 di quella semidiurna. Quando la corrente è diretta verso Nord è detta "montante", se è diretta verso Sud "scendente". La velocità massima della corrente (sia montante che scendente) varia in media da 2.4 nodi (circa 1.25 m/s) alle quadrature a 4.2 nodi (circa 2.1 m/s) alle sigizie.

Al termine delle correnti montanti e discendenti, per un periodo di tempo inferiore ad un'ora, la corrente diventa praticamente nulla e si orienta in senso trasversale all'asse dello stretto, dove si formano curiose fasce in cui l'acqua sembra ribollire, dette "taglio". Infatti, analizzando l'andamento planimetrico qualitativo delle correnti alla quota di navigazione, si osserva che le correnti sono abbastanza canalizzate nello Stretto, ossia hanno una componente assiale più sviluppata di quella trasversale, ma quest'ultima non è mai nulla.

Considerando altri effetti di natura meteorologica ed oceanografica, la corrente totale può raggiungere anche i 5 m/s (Mosetti, 1988).

Infatti, un ulteriore contributo alla circolazione è costituito dalle correnti di drift, ovvero correnti di deriva indotte dal vento, la cui intensità si può stimare pari al 2-3% della velocità del vento che spira sul mare. Dall'analisi del regime dei venti, si deduce che tali correnti possono avere intensità al più pari a 0.4 m/s e sono dirette prevalentemente verso sud.

Le correnti di deriva sono verosimilmente controbilanciate dalle cosiddette correnti di ingorgo, le quali investono quasi uniformemente tutto il canale, sovvertendo ogni altro movimento. Tali correnti sono caratterizzate tuttavia da rapido svolgimento temporale e sono occasionali (frequenza di accadimento pari a circa due volte al mese), sebbene abbiano intensità elevate, pari a circa 1 m/s (Mosetti, 1995). In Tabella 5.12 sono riportati i valori di velocità delle correnti nello Stretto di Messina, stimate da Mosetti (1995).

Significativa nello Stretto è anche la corrente di gradiente, generata dalla differenza di densità che caratterizza i mari Tirreno e Jonio. Alla stessa quota, la densità dipende da salinità e temperatura. Per quanto riguarda la temperatura, i valori medi del Tirreno sono leggermente superiori a quelli dello Jonio e tale differenza è limitata agli strati più superficiali. La salinità, invece, è maggiore nello Jonio piuttosto che nel Tirreno, di conseguenza i livelli dello Jonio e del Tirreno risultano differenti, originando un gradiente di pressione che innesca la cosiddetta corrente di gra-

diente. In particolare, tale corrente è il risultato netto di due flussi opposti: l'acqua più leggera del Tirreno scorre in superficie verso Sud con una velocità di 0.10 m/s, mentre sul fondo l'acqua più pesante dello Jonio si muove verso Nord con velocità di 0.13 m/s, fino a quando in corrispondenza della congiungente Punta Pezzo – Ganzirri si ha una forte riduzione della profondità per la presenza di una sella sottomarina (qui la profondità media è di - 80 m), che viene superata dalla corrente quasi per tracimazione (anche con velocità di 0.5 m/s), per poi scendere verso le profondità del Mar Tirreno. Il bilancio dei due flussi porta ad un movimento netto di acqua da Nord verso Sud, con velocità costante di intensità massima pari ad un nodo (0.5 m/s).

Tabella 5.12: Velocità delle correnti nello Stretto di Messina (Mosetti, 1995).

Velocità delle correnti nello Stretto di Messina	cm/s	km/h	nodi
Corrente totale di marea	300	10.80	5.83
Massima corrente di deriva	80	2.88	1.55
Corrente di densità permanente	30	1.08	0.58
Eventuali ingorghi	100	3.60	1.94
Turbolenza	50	1.80	0.97
Totale	560	20.16	10.88

A causa delle caratteristiche morfologiche dello Stretto, la velocità della corrente varia da punto a punto, in particolare è tanto più forte quanto minore è l'area della sezione attraversata e, riferendosi ad ogni singola sezione, la corrente è più forte verso il centro. Di conseguenza, nel sito di Punta Pezzo, così come a Ganzirri, la presenza della sella sottomarina combinata con il restringimento della sezione dello Stretto (è il punto più stretto con larghezza pari a 3 km), determina una corrente molto forte la quale, procedendo verso il Tirreno, caratterizzato da un aumento progressivo della profondità, subisce uno smorzamento graduale, mentre verso lo Jonio lo smorzamento è più forte e rapido, in quanto i fondali diventano velocemente molto profondi man mano che ci si allontana dallo Stretto. Nelle Figure 5.27 e 5.28 sono rappresentati gli andamenti delle correnti montanti e scendenti nello Stretto di Messina.

Poiché il versante ionico è caratterizzato da una riduzione continua e regolare della sezione d'acqua, la corrente montante mantiene per tutto il percorso, anche oltre la sella, un andamento assiale, turbato, soltanto in prossimità delle coste, da controcorrenti. Al contrario, a causa della particolare morfologia dell'imboccatura tirrenica, la corrente scendente attraversa lo Stretto con

un percorso tortuoso: la massa d'acqua tirrenica si getta contro la costa Calabra in corrispondenza di Torre Cavallo, che la riflette specularmente verso Paradiso, mentre una parte della stessa segue la costa calabra fino a Villa San Giovanni per poi ritirarsi su Punta Pezzo creando così una controcorrente che rimarrà in zona fino a mescolarsi con la montante in salita. Le controcorrenti lungo le coste dello stretto che si verificano in fase di corrente montante sono dette "bastardi", mentre quelle che iniziano due ore dopo la formazione della corrente scendente sono dette "refoli". In particolare, le controcorrenti dovute alla scendente sono di minore intensità di quelle che si verificano per la montante.

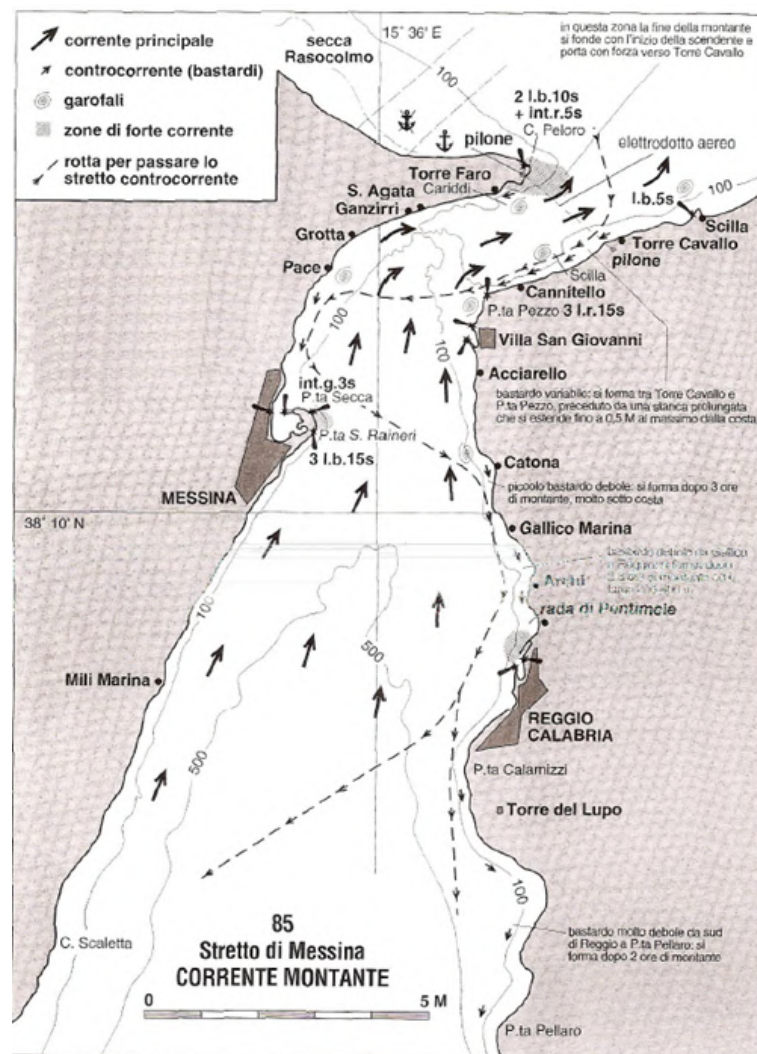


Figura 5.27: Andamento della corrente montante nello Stretto di Messina.

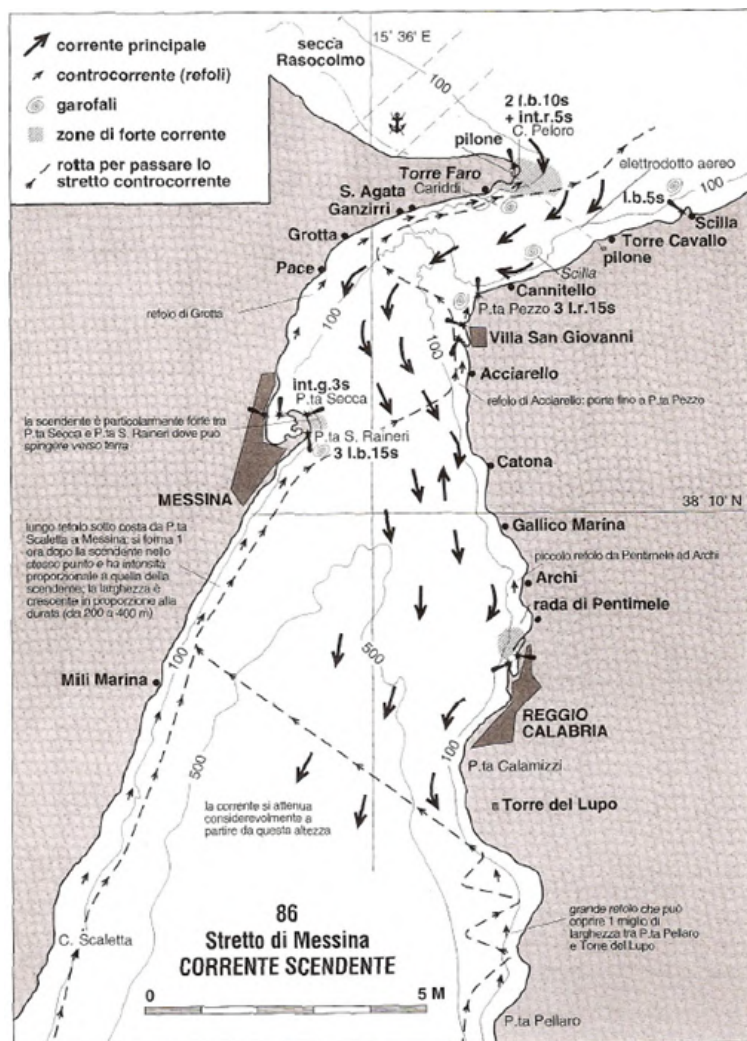


Figura 5.28: Andamento della corrente scendente nello Stretto di Messina.

Inoltre, lo scorrere a breve distanza di acque che si muovono in direzione opposta o con velocità diverse provoca la formazione di mulinelli anche ampi detti “garofali”: ciò avviene in particolare in punti in cui la corrente principale incontra forti dislivelli del fondale. I principali garofali dovuti alla corrente montante si formano dinanzi a Scilla sulla costa calabra e Cariddi su quella siciliana. Il vortice principale dovuto alla scendente si forma davanti a Punta S. Raineri. Infine, un fenomeno che origina forti correnti nello Stretto è quello della turbolenza, che si traduce in rapidissime variazioni di velocità in modulo e direzione, provocate da svariate cause quali, ad esempio, le onde interne o la morfologia dello Stretto. In particolare, nella zona tra la sella e lo sbocco nel Tirreno si osservano variazioni di velocità di ± 0.5 m/s. Nella turbolenza può ritenersi incluso anche l’effetto del moto ondoso.

Nel 2013 ENEA ha condotto una campagna di misure in prossimità di Punta Pezzo (Figura 5.29) ai fini della stima della produzione di energia (Report RdS/2013/087), evidenziando come ad una profondità di circa 10 m la velocità massima registrata è dell'ordine di 2.5 m/s.

In Appendice, la Tabella III riporta i valori di velocità delle correnti marine per ogni località esaminata.



Figura 5.29: Localizzazione del correntometro utilizzato da ENEA nel 2013 per la misura del profilo di corrente marina nello Stretto di Messina.

5.14 Analisi dei dati meteomarini

Per la valutazione del clima ondoso a largo delle coste calabresi, come già anticipato nel precedente capitolo, si è ritenuto opportuno suddividere la Regione Calabria in tre macro-aree in funzione della diversa esposizione delle coste al moto ondoso: l'area tirrenica, l'area dello Stretto di Messina e l'area ionica, caratterizzate oltre che da differenti caratteristiche climatiche, soprattutto da differenti caratteristiche geografiche, in particolare in termini di fetch.

La valutazione del clima ondoso è stata effettuata a partire dai dati meteomarini (H_s , T_p , T_m , direzione) acquisiti dal database del MeteOcean Group del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova (<http://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html>), relativi all'intervallo temporale 1979-2018.

Il database del MeteOcean contiene dati atmosferici ed ondosi ricostruiti mediante il modello Wavewatch III, un modello con risoluzione spaziale di 10 km che utilizza i dati del database CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (<http://www3.dicca.unige.it/meteocean/model.html>). La scelta di utilizzare dati ricostruiti da modello è legata sia all'efficace copertura garantita, grazie alla risoluzione spaziale di 10 km, sia alla scarsa copertura garantita dai dati forniti dalle boe ondometriche. Infatti, lungo le coste calabresi sono presenti solamente due boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) (<http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/>), quelle di Crotona e di Cetraro, alle quali vanno aggiunte la boa RON di Catania, molto vicina alle coste meridionali calabresi, e le boe della Rete Ondametrica Regionale Calabrese (ROR) di Tropea, Capo Spartivento, Roccella Jonica e Corigliano Calabro. Pertanto, sono disponibili solo sette boe a fronte degli oltre cinquanta punti disponibili nel database MeteOcean. Inoltre, le boe della RON hanno una serie temporale meno estesa di quella del MeteOcean e non sono più attive dal 2014 mentre le boe della ROR hanno acquisito dati solo per pochi anni nella prima metà della prima decade del 2000.

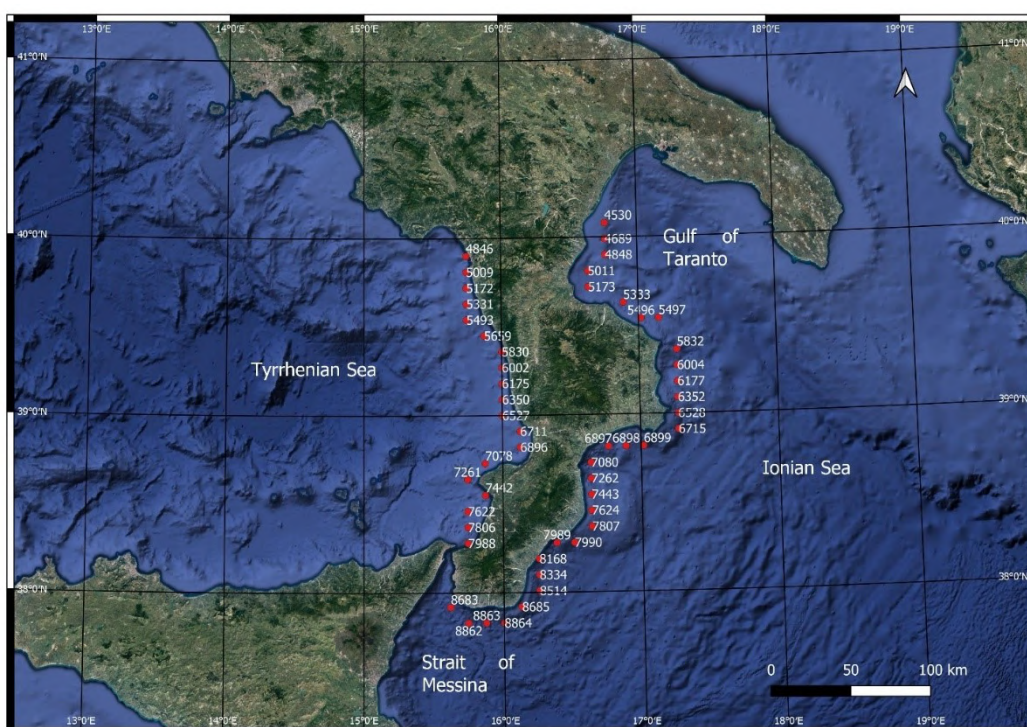


Figura 5.30: Rappresentazione della copertura dei dati meteomarini forniti dal MeteOcean Group al largo delle coste calabresi.

In Figura 5.30 sono rappresentati i punti, individuati mediante un codice numerico a quattro cifre, in corrispondenza dei quali sono stati elaborati i dati meteomarini forniti dal MeteOcean Group al largo delle coste calabresi. L'efficace copertura della rete del MeteOcean per le coste calabresi è evidenziata anche nelle Tabelle 5.13 e 5.14, le quali mostrano il riepilogo dei punti del database MeteOcean utilizzati, indicando per ciascuno di essi codice ed area di influenza, segnalando in particolare i comuni presenti all'interno di ciascun'area.

In dettaglio, sono stati acquisiti i dati meteomarini di 51 punti della rete del MeteOcean, distribuiti in numero pari a 32 per l'area ionica e 19 per la tirrenica.

Per quanto riguarda l'area dello Stretto di Messina, non è stato possibile utilizzare i dati del MeteOcean, in quanto l'analisi dei dati del punto ricadente nello Stretto (non mostrato in Figura 5.30 e nelle Tabelle 5.13 e 5.14, in quanto non utilizzato) ha messo in evidenza delle incongruenze caratterizzanti il sito in esame: si è notato, infatti, come il modello utilizzato per ottenere i dati meteomarini restituisce dei risultati irrealistici, con stati di mare caratterizzati da altezze significative superiori ai cinque metri, incongruenti con le dimensioni di un piccolo bacino quale è quello dello Stretto di Messina.

Il problema è legato al fatto che lo Stretto è caratterizzato da fetch di dimensioni molto piccole rispetto a quelle della griglia di calcolo del modello: lo Stretto, infatti, con la sua caratteristica forma ad imbuto, raggiunge nella sua parte più stretta un'ampiezza di 3 km, mentre la griglia di calcolo del MeteOcean ha una risoluzione di circa 10 km (Figura 5.31).

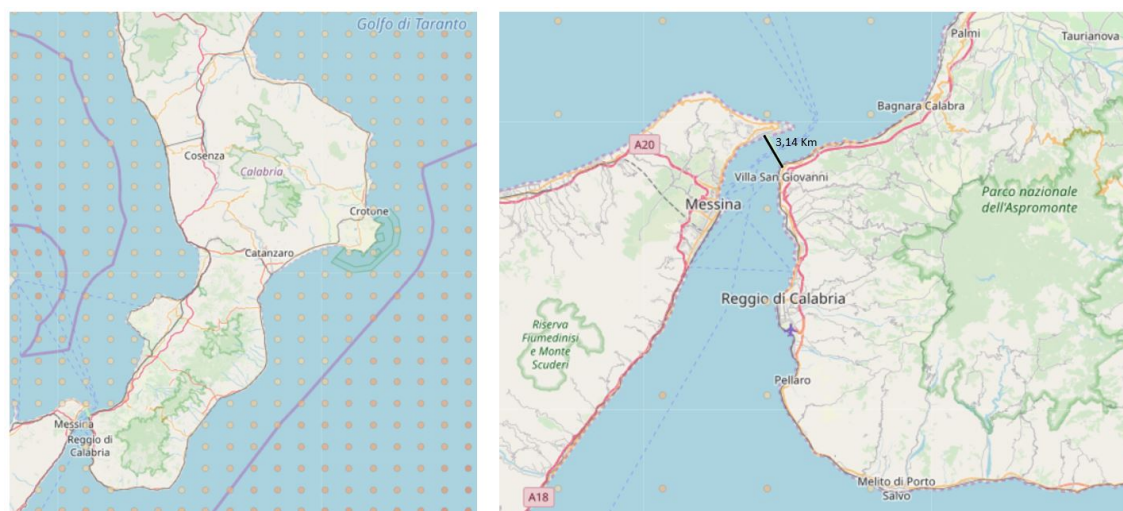


Figura 5.31: Griglia di calcolo utilizzata dal MeteOcean al largo delle coste calabresi (a sinistra) e dettaglio dello Stretto di Messina (a destra).

La Figura 5.32 mostra un confronto effettuato tra i dati del MeteOcean e i dati forniti dall'ABRC-MaCRO, un software sviluppato dalla società HR Wallingford Ltd, che permette di ottenere, in ambiente GIS, serie temporali di dati meteomarini a partire dalle informazioni della banca dati del Met Office, a partire da dati di velocità e direzione del vento.

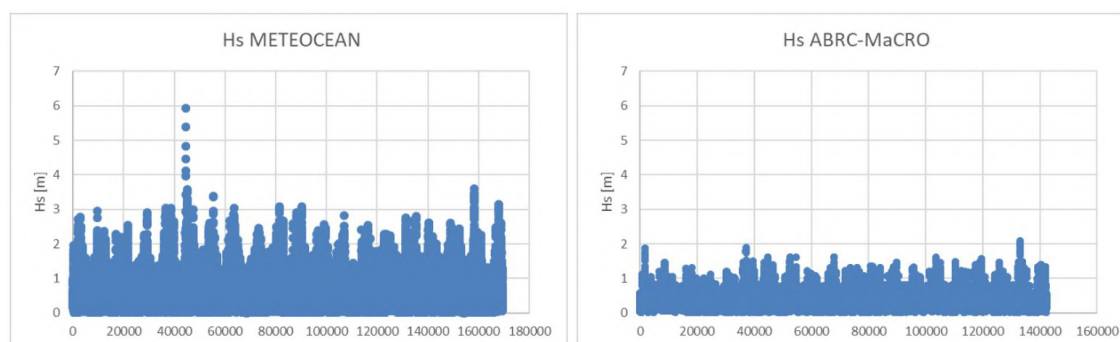


Figura 5.32: Comparazione dei dati elaborati dal MeteOcean (a sinistra) e dal software ABRC-MaCRO (a destra) a largo di Reggio Calabria, all'interno dello Stretto di Messina.

Pertanto, per l'area dello Stretto di Messina, sono stati utilizzati i dati elaborati dall'ABRC-MaCRO relativi all'intervallo temporale 1986-2006. All'interno di tale area, sono state scelte le località di Pellaro e Gallico, appartenenti al comune di Reggio Calabria, e la località di Porticello, ricadente nel comune di Villa San Giovanni all'estremità dello Stretto di Messina.

Per ogni area di influenza relativa a ciascun punto del MeteOcean è stata scelta una località, in particolare un tratto di costa di lunghezza variabile tra 300 e 4300 m, in cui applicare la metodologia di valutazione del rischio costiero definita nell'ambito di tale studio. In totale, quindi, sono state individuate 54 aree campione così ripartite: 32 litorali ionici, 3 nello Stretto di Messina e 19 litorali tirrenici. L'elenco delle aree campione o delle località esaminate in tale studio è stato riportato in Tabella 5.1: in particolare, come si può notare dalla tabella, a quelle ioniche e tirreniche è stato associato il codice numerico del punto MeteOcean relativo.

Tabella 5.13: Codici dei punti del database MeteOcean esaminati e comuni presenti all'interno dell'area di influenza di ciascun punto, ordinati in senso orario (continua).

Cod. punto MeteOcean	Comuni presenti all'interno dell'area di influenza
4530	Rocca Imperiale, Montegiordano
4689	Roseto Capo Spulico
4848	Amendolara, Albidona, Trebisacce
5011	Villapiana, Cassano allo Ionio
5173	Corigliano-Rossano fino alla foce del Fiume Trionto
5333	Rossano (dalla foce del fiume Trionto verso Est), Crosia, Calopezzati, Pietrapaola, Mandatoriccio
5496	Scala Coeli, Cariati
5497	Crucoli, Cirò, Cirò Marina (fino a Punta Alice)
5832	Cirò Marina (da punta Alice fino al confine con Melissa)
6004	Melissa, Strongoli, Crotone (fino alla foce del fiume Neto)
6177	Crotone (dalla foce del fiume Neto fino al porto)
6352	Crotone (dal porto fino a Capo Colonna)
6528	Crotone (da Capo Colonna verso Sud), Isola Capo Rizzuto (fino a Capo Cimiti)
6715	Isola Capo Rizzuto (da Capo Cimiti a Capo Rizzuto)
6899	Isola Capo Rizzuto (da Capo Rizzuto a Le Castella)
6898	Isola Capo Rizzuto (da Le Castella verso ovest), Cutro, Belcastro, Botricello, Cropani, Sellia Marina (fino a torrente Uria)
6897	Sellia Marina (da torrente Uria verso Sud-Ovest), Simeri Crichi, Catanzaro, Borgia, Squillace, Staletti (fino a Punta di Staletti)
7080	Staletti (da Punta di Staletti verso Sud), Montauro, Montepaone, Soverato (fino alla Punta)
7262	Soverato (dalla Punta verso Sud), Satriano, Davoli, San Sostene, Sant'Andrea Apostolo dello Ionio
7443	Isca sullo Ionio, Badolato, Santa Caterina dello Ionio
7624	Guardavalle, Monasterace
7807	Stilo, Camini, Riace, Stignano
7990	Caulonia
7989	Roccella Ionica, Marina di Gioiosa Ionica, Grotteria, Siderno
8168	Locri, Portigliola, Sant'Ilario dello Ionio, Ardore
8344	Bovalino, Casignana, Bianco, Africo
8514	Ferruzzano, Bruzzano Zeffirio
8685	Brancaleone
8864	Palizzi
8863	Bova Marina, Condofuri, San Lorenzo
8862	Melito di Porto Salvo, Montebello Ionico
8683	Motta San Giovanni, Reggio Calabria (fino a Punta Pellaro)

Tabella 5.14: Codici dei punti del database MeteOcean esaminati e comuni presenti all'interno dell'area di influenza di ciascun punto, ordinati in senso orario.

Cod. punto MeteOcean	Comuni presenti all'interno dell'area di influenza
7988	Scilla, Bagnara Calabria
7806	Seminara, Palmi
7622	Gioia Tauro, San Ferdinando, Rosarno
7442	Nicotera, Joppolo, Ricadi (fino a Capo Vaticano)
7261	Ricadi (da Capo Vaticano verso Nord)
7078	Tropea, Parghelia, Zambrone
6896	Briatico, Vibo Marina, Pizzo, Curinga
6711	Lamezia Terme, Gizzeria
6527	Falerna, Nocera Terinese
6350	Amantea
6175	Belmonte Calabro, Longobardi, Fiumefreddo Bruzio
6002	Falconara Albanese, San Lucido, Paola (fino a foce torrente San Domenico)
5830	Paola (da foce torrente San Domenico verso Nord), Fuscaldo, Guardia Piemontese
5659	Acquappesa, Cetraro
5493	Bonifati, Sangineto, Belvedere Marittimo (fino alla foce del torrente di Mare)
5331	Belvedere Marittimo (dalla foce del torrente di Mare verso Nord), Diamante (fino al porto)
5172	Diamante (dal porto verso Nord), Grisolia, Santa Maria del Cedro
5009	Scalea
4846	San Nicola Arcella, Praia a Mare, Tortora

Per ciascun'area campione i dati acquisiti sono stati ordinati e classificati in settori di ampiezza pari a 10° ciascuno ed in classi di altezza significativa di ampiezza pari a 0.5 m ciascuna. A partire da tali dati sono stati stimati per ogni settore le frequenze, le altezze significative medie, i valori medi di periodo di picco e periodo medio, il flusso di energia, i settori di traversia principale e secondario, i parametri della probabilità di superamento omnidirezionale u e w , i parametri a_{10} e b_{10} , le altezze significative di fissato tempo di ritorno e le soglie di run-up di fissato tempo di ritorno.

In particolare, per la valutazione dei parametri a_{10} e b_{10} , che insieme a u e w descrivono il moto ondoso del paraggio in esame, è stato implementato un codice di calcolo Matlab molto complesso, che può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

1. Acquisizione della serie storica di stati di mare;
2. Individuazione della soglia critica di altezza significativa, necessaria per l'individuazione delle mareggiate;
3. Interpolazione di buchi temporali di dati;
4. Individuazione delle mareggiate in funzione della soglia critica di altezza significativa e degli intervalli temporali, come descritto nel par. 2.3.9.3;
5. Individuazione delle caratteristiche di altezza massima e durata delle mareggiate individuate;
6. Selezione delle N mareggiate più forti (per il valore di N si veda par. 2.3.9.3);
7. Sostituzione delle N mareggiate vere con delle mareggiate triangolari equivalenti e calcolo dei parametri di altezza a e base b mediante una procedura iterativa (Boccotti, 1997);
8. Calcolo dei valori medi delle altezze e delle basi, quindi di a_{10} e b_{10} .

Il numero di dati disponibili per le aree di studio tirreniche e ioniche è compreso tra 330000 e 350000, con valori maggiori nel Tirreno rispetto allo Ionio (sempre superiori a 350000 ad eccezione di Favazzina e San Ferdinando). Tali valori sono molto elevati e sono tali da rappresentare dei campioni statisticamente significativi. Per quanto riguarda l'area dello Stretto di Messina, il numero di dati disponibili è minore, essendo il periodo di registrazione più breve, ed è compreso tra i 108000 e i 140000.

I risultati ottenuti descritti di seguito non tengono conto dei valori ottenuti nell'area dello stretto di Messina, in quanto il set di dati meteomarini utilizzati è differente e le caratteristiche geomorfologiche delle coste calabresi e siciliane la rendono un sito molto peculiare dal punto di vista del clima ondosso, come evidenziato prima.

Riguardo le altezze significative massime registrate in ciascun'area, i valori massimi sono stati registrati a Falerna Marina, con un valore di 9.82 m. Anche in questo caso i valori maggiori si osservano sul Tirreno (sempre superiori a 8 m ad eccezione di Favazzina, Santa Maria di Ricadi e Tortora) rispetto allo Ionio (sempre inferiori a 8 m).

Anche per quanto riguarda i valori medi di periodo di picco e periodo medio i valori maggiori si osservano sul Tirreno nel tratto compreso tra Tropea e Tortora (sempre superiori rispettivamente a 5.5 s e 4.5 s).

Riguardo il flusso di energia, valori elevati (superiori a 7000 N/s) si osservano lungo tutto il litorale crotonese, a causa dell'esposizione diretta alle mareggiate provenienti da Scirocco e Grecale, lungo direzioni caratterizzate da fetch dell'ordine delle centinaia e migliaia di chilometri. Altri valori elevati (superiori a 7000 N/s) si osservano nel Tirreno, da Falerna Marina a Marina di Santa Maria del Cedro (ad eccezione di Marina di Fuscaldo) insieme a Capo Vaticano. I settori di traversia principale nello Jonio sono quasi sempre relativi a direzioni provenienti da Sud-Est, con valori compresi tra 100° e 140° (ad eccezione di Cariati, pari a 0° , Isola Capo Rizzuto Centro, pari a 10° , entrambi relativi a direzioni provenienti dai quadranti settentrionali, e Lazzaro, pari a 160° ma sempre proveniente da Sud-Est).

Invece i settori di traversia principale nel Tirreno sono relativi a direzioni provenienti da Ovest, che ruotano dai 310° di Favazzina (Nord-Ovest) ai 250° di Tortora Marina. Una rilevante differenza tra Jonio e Tirreno riguarda l'assenza di settori di traversia secondaria lungo tutto il Tirreno. Il criterio adottato per definire i settori di traversia secondaria è il seguente: settori caratterizzati da un flusso di energia crescente rispetto al settore adiacente e non contigui ai settori di traversia principale. Pertanto, le località tirreniche sono caratterizzate da un contenuto energetico concentrato lungo poche direzioni, tutte contigue tra loro. Invece, la quasi totalità delle località ioniche (ad eccezione di Montegiordano Marina e Marina di Roseto di Capo Spulico) è caratterizzata da un ampio ventaglio di direzioni da cui può arrivare moto ondoso di rilevante entità, con presenza di numerosi settori di traversia secondari.

Riguardo i parametri caratteristici di ciascuna località, i parametri u e w assumono valore massimo pari rispettivamente a 1.15 e 0.9 a Isola Capo Rizzuto Centro. In particolare, i valori maggiori di u si osservano nello Jonio rispetto al Tirreno, mentre le variazioni spaziali di w sono molto simili a quelle del flusso di energia, con i valori maggiori lungo tutto il litorale crotonese. Il parametro a_{10} varia tra 2.22 m a Rossano e 3.96 m a Falerna Marina, con valore medio pari a 3.37 m. Il parametro b_{10} varia tra 58.5 ore a Rossano e 89.5 ore a Roccella Ionica, con valore medio pari a 78.3 ore. Entrambi i parametri mostrano una notevole variabilità spaziale senza però differenze evidenti tra Jonio e Tirreno.

In conclusione, l'analisi congiunta di tutti i parametri sopra descritti mostra che il clima ondoso a largo delle coste calabresi è fortemente variabile spazialmente, soprattutto lungo i litorali ionici.

In generale, il litorale tirrenico mostra caratteristiche più omogenee, con alcuni valori inferiori rispetto al resto della macroarea solamente a Favazzina e Tortora Marina. Tali punti però sono più vicini alla costa rispetto agli altri punti tirrenici. Inoltre, la macroarea tirrenica è soggetta ad un moto ondoso di maggiore entità ma concentrato intorno a poche direzioni mentre la macroarea ionica è generalmente caratterizzata da un ampio ventaglio di direzioni da cui può arrivare moto ondoso di rilevante entità, con presenza di numerosi settori di traversia secondari e terziari e con diverse località caratterizzate da contenuto energetico totale pari o superiore a quello tirrenico. Si tratta di una condizione che contribuisce ad incrementare la pericolosità dei litorali ionici.

Questa pericolosità è accentuata dal fatto che i valori del parametro u sono generalmente superiori rispetto a quelli dei litorali tirrenici. Tale parametro dipende dal rapporto tra le altezze significative di differente livello di probabilità: località con u maggiori mostrano incrementi maggiore delle altezze significative al crescere del tempo di ritorno rispetto a località caratterizzate da u minori. Anche questa condizione, pertanto, incrementa la pericolosità. Inoltre, anche i valori del parametro w (denominato anche fattore scala) non presentano variazioni rilevanti tra le due macroaree, con i valori maggiori lungo tutto il litorale crotonese. Al contrario, all'interno della macroarea ionica ci sono variazioni rilevanti: infatti, il contenuto energetico minore si osserva all'interno del Golfo di Taranto, da Montegiordano Marina fino a Cariati, in cui la morfologia del territorio riduce l'esposizione alle mareggiate provenienti da Scirocco (Sud-Est) e Grecale (Nord-Est), soprattutto nel tratto di Rossano in cui si osservano i valori minimi di quasi tutte le grandezze esaminate. Invece, il contenuto energetico maggiore si osserva lungo tutto il litorale crotonese, a causa dell'esposizione diretta alle mareggiate provenienti da Scirocco e Grecale agenti lungo direzioni caratterizzate da fetch dell'ordine delle centinaia e migliaia di chilometri.

I risultati ottenuti per le variabili considerate nei sottoindici di moto ondoso sono riportati in Appendice, in Tabella I. In particolare, sono riportati, per ogni località esaminata, i valori di Φ in N/s , che rappresenta la somma dei flussi di energia dei settori attivi nella località in esame, α e β , che rappresentano gli angoli che rispettivamente il settore di traversia principale ed il settore di traversia secondario formano con la linea di costa della località esaminata, le altezze significative $h(R)$ in m e i valori di run-up $Ru(R)$ in m, valutati per i periodi di ritorno $R = 1, 10, 20, 50, 100, 200$ e 500 anni.

Le altezze significative sono state calcolate con la serie di Boccotti (2000), definita a partire dall'espressione (2.15), mentre i valori di run-up sono stati valutati con l'espressione di Stockdon et al. (2006) (2.13 - 2.14), in funzione dello stato di mare di fissato periodo di ritorno e della pendenza media della località. Si ricorda che le altezze significative di fissato periodo di ritorno sono dipendenti esclusivamente dai parametri caratteristici del moto ondoso nella località, mentre i valori di run-up sono fortemente influenzati dalla pendenza del fondale, in misura maggiore rispetto all'influenza del moto ondoso. Infatti, i valori maggiori si osservano nei litorali a pendenza elevata, che sono quelli relativi allo Stretto di Messina.

5.15 Stima del trasporto solido litoraneo

Infine, la valutazione del trasporto solido litoraneo è stata effettuata a partire dai dati meteomarini e sedimentologici delle località esaminate mediante il modello di Tomasicchio et al. (2013). In particolare, è stato implementato un codice matlab che ha permesso di calcolare il contributo di trasporto solido associato ad ogni stato di mare e valutarne infine un valore totale medio annuo; il codice può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

1. Acquisizione dei dati meteomarini (H_s , T_m , T_p , Dir) e dei dati relativi al D_{n50} ed all'inclinazione della costa rispetto al Nord;
2. Filtraggio dei dati provenienti dai settori attivi;
3. Calcolo delle caratteristiche ondose al frangimento e della profondità di frangimento;
4. Calcolo di tutti i parametri che entrano in gioco nel modello;
5. Calcolo della portata di materiale solido media annua.

Tutte le formule implementate sono descritte nel secondo capitolo. I risultati ottenuti, sia in termini di modulo che di segno, sono risultati fondamentali per la comprensione della dinamica costiera. In particolare, infatti, il segno ottenuto ha permesso di indicare la direzione del trasporto, mentre il suo valore l'entità della movimentazione di sedimenti longshore. I valori di trasporto longitudinale ottenuti variano tra un minimo di 2815 m³/anno, risultato a Villapiana Lido, ed un massimo di 241000 m³/anno, valutato a Cirò Marina. Nella Tabella 5.15 si riportano i risultati di trasporto solido litoraneo Q_1 in m³/anno ottenuti per le 54 località esaminate.

Tabella 5.15: Valori di trasporto solido litoraneo ottenuti per le località esaminate.

Codice	Località esaminata	Q_t [m³/anno]	Codice	Località esaminata	Q_t [m³/anno]
4530	Montegiordano Marina	-83684	8685	Brancaleone Marina	13805
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	-126364	8864	Palizzi Marina	113070
4848	Trebisacce	-7149	8863	Bova Marina	162883
5011	Villapiana Lido	2815	8862	Melito di Porto Salvo	119118
5173	Rossano	-20156	8683	Lazzaro	31601
5333	Marina di Calopezzati	-32339	-	Pellaro	3536
5496	Cariati	51973	-	Gallico	18868
5497	Crucoli Torretta	-14669	-	Porticello	-38472
5832	Cirò Marina	-241006	7988	Favazzina	17434
6004	Torre Melissa	-188050	7806	Palmi	-88089
6177	Crotone – Zigari	-208761	7622	San Ferdinando	-97776
6352	Crotone	-229772	7442	Santa Maria di Ricadi	-138352
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	-119120	7261	Capo Vaticano	184080
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	-16041	7078	Tropea	129503
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	75405	6896	Vibo Marina	145340
6898	Cropani	94274	6711	Gizzeria Lido	-138629
6897	Catanzaro Lido	43097	6527	Falerna Marina	-233512
7080	Soverato	-109268	6350	Amantea	-167584
7262	San Sostene Marina	-104028	6175	Belmonte Marina	-98187
7443	Badolato	-101695	6002	San Lucido	-130218
7624	Monasterace Marina	-61416	5830	Marina di Fuscaldo	-189534
7807	Riace Marina	24369	5659	Cetraro Marina	-210355
7990	Marina di Caulonia	69202	5493	Sanginetto Lido	-184800
7989	Roccella Ionica	213372	5331	Marina di Belvedere	-164781
8168	Locri	-50871	5172	Marina di Santa Maria del Cedro	-59264
8344	Bovalino	112397	5009	Scalea	73966
8514	Ferruzzano Marina	-58353	4846	Tortora Marina	-116104

Capitolo 6

Discussione dei risultati

In questo capitolo saranno riportati e discussi i risultati ottenuti dall'applicazione della nuova metodologia al caso studio.

6.1 Applicazione della nuova metodologia

La nuova metodologia per la valutazione del rischio da erosione costiera in Calabria è stata applicata a 54 località campione, descritte ed analizzate sotto ogni punto di vista preso in esame nel precedente capitolo. La scelta di tali località è risultata fondamentale per un'efficace validazione della metodologia, in quanto ognuna di esse è stata scelta, sì in funzione della copertura spaziale dei dati meteomarini disponibili, ma soprattutto in funzione delle diverse caratteristiche geomorfologiche, topografiche, naturali ed antropiche che contraddistinguono i litorali calabresi.

È importante ribadire come tale metodologia sia stata sviluppata a livello regionale e sia stata applicata su scala locale, ma la sua struttura è tale da poter essere applicata a diverse scale: infatti, è possibile valutare gli indici definiti dalla scala di un transetto ad una scala comunale, provinciale, di unità fisiografica, ecc., in funzione dell'obiettivo dello studio. I risultati riportati di seguito, quindi, sono relativi alle 54 località campione analizzate, individuate in Tabella 5.1.

6.2 Calcolo delle aree di pericolosità

La stima delle aree di pericolosità costiera è stata effettuata seguendo la procedura descritta nel quarto capitolo. Le Tabelle 6.1 e 6.2 mostrano i risultati ottenuti per ciascuna delle località esaminate in termini di livello totale, espresso in m, e area di pericolosità, espressa in m².

Tabella 6.1: Valutazione delle aree di pericolosità delle località esaminate (continua).

Cod.	Località esaminata	Livello totale [m]	Area di pericolosità [m²]
4530	Montegiordano Marina	3.50	80602
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	3.49	102052
4848	Trebisacce	3.42	89762
5011	Villapiana Lido	3.15	223214
5173	Rossano	5.12	1253224
5333	Marina di Calopezzati	3.22	207187
5496	Cariati	3.33	543977
5497	Crucoli Torretta	3.52	97827
5832	Cirò Marina	3.61	114744
6004	Torre Melissa	3.62	69086
6177	Crotone – Zigari	3.66	516007
6352	Crotone	3.61	95438
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	3.63	6368
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	3.65	13044
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	3.58	47291
6898	Cropani	3.45	165703
6897	Catanzaro Lido	3.48	68784
7080	Soverato	3.48	48505
7262	San Sostene Marina	3.46	338563
7443	Badolato	3.61	1149689
7624	Monasterace Marina	3.57	83401
7807	Riace Marina	3.68	86573
7990	Marina di Caulonia	3.58	395152
7989	Roccella Ionica	3.42	60761
8168	Locri	3.39	54751
8344	Bovalino	3.50	95024
8514	Ferruzzano Marina	3.58	51846
8685	Brancaleone Marina	3.63	79771
8864	Palizzi Marina	3.47	46492
8863	Bova Marina	3.43	114819
8862	Melito di Porto Salvo	3.34	75645
8683	Lazzaro	7.82	338372

Tabella 6.2: Valutazione delle aree di pericolosità delle località esaminate.

Cod.	Località esaminata	Livello totale [m]	Area di pericolosità [m²]
8343	Pellaro	5.38	153821
8343	Gallico	5.65	370205
7988	Porticello	3.97	39926
7988	Favazzina	3.50	40912
7806	Palmi	3.79	220792
7622	San Ferdinando	3.77	1369231
7442	Santa Maria di Ricadi	3.55	27587
7261	Capo Vaticano	4.00	50842
7078	Tropea	3.97	37220
6896	Vibo Marina	3.86	1427259
6711	Gizzeria Lido	3.87	463985
6527	Falerna Marina	4.12	177988
6350	Amantea	4.00	157770
6175	Belmonte Marina	3.96	90592
6002	San Lucido	3.94	106728
5830	Marina di Fuscaldo	3.78	109731
5659	Cetraro Marina	4.02	376972
5493	Sanginetto Lido	3.97	110643
5331	Marina di Belvedere	4.05	124238
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	3.88	961781
5009	Scalea	3.81	234270
4846	Tortora Marina	3.62	70017

Per quanto riguarda i valori di livello totale, essi sono stati ottenuti sommando i contributi di massimo sovrizzo di vento (variabile tra 0.01 e 0.17 m), di massimo sovrizzo barico che per la Calabria è stato stimato pari a 0.43 m, del livello massimo di marea astronomica, valutato a partire dai dati forniti dalle Tavole di Marea (variabile tra 0.06 e 0.25 m), del run-up e set-up ondosi, calcolati con la formulazione di Stockdon et al. (2006) in funzione della pendenza massima della spiaggia del sito in esame e del periodo di ritorno di 100 anni, e dell'incremento del livello del mare per effetto dei cambiamenti climatici previsto dall'IPCC fra 100 anni, considerando lo scenario più gravoso SSP5-8.5 Low Confidence, stimato per la Calabria pari a circa 1.26 m.

In particolare, i valori di run-up ottenuti variano tra un minimo di 1.25 m a Villapiana Lido ed un massimo di 6.02 m a Lazzaro, chiaramente influenzato dalla forte pendenza dei fondali, prossimi allo Stretto di Messina.

I livelli massimi di marea astronomica sono stati ottenuti dall'analisi dei dati forniti dalle Tavole di Marea 2021 per i porti principali di Gioia Tauro e Taranto, e per i porti secondari di Reggio Calabria, Villa San Giovanni, Catania e Tropea, per i quali è stato utilizzato il metodo del rapporto.

La valutazione delle aree di pericolosità è stata effettuata su QGIS: sono stati utilizzati i DTM a maglia quadrata di 5 m disponibili nella sezione OpenData del Geoportale Calabria (<http://geoportale.regione.calabria.it/>). Grazie agli strumenti di processing di QGIS, innanzitutto, sono state estratte le curve di livello relative alle quote di livello massimo stimate per ogni località; successivamente sono state delimitate le aree, inserendo due transetti all'estremità del tratto di costa esaminato, sono stati generati dei poligoni ed infine, grazie al calcolatore di campi, sono state calcolate le aree, rappresentate graficamente dai poligoni. L'area di pericolosità di maggiore estensione è stata rilevata per la località di Vibo Marina, con un valore di 1.43 km² (Figura 6.1); quella di minore estensione, pari a 6368 m², è stata riscontrata nella località di Isola di Capo Rizzuto – Marinella (Figura 6.2).



Figura 6.1: Area di pericolosità rilevata a Vibo Marina.



Figura 6.2: Area di pericolosità rilevata a Isola di Capo Rizzuto – Marinella.

6.3 Calcolo degli indici di pericolosità costiera

La valutazione dei cinque indici di pericolosità costiera è stata effettuata seguendo la procedura descritta nel quarto capitolo. Le Tabelle 6.3 e 6.4 mostrano per ciascuna delle località esaminate i risultati ottenuti per ogni indice di pericolosità, con punteggio variabile tra 1 e 5. In Appendice, la Tabella II contiene i valori di indici di moto ondoso e la Tabella III i valori dei cinque indici di pericolosità calcolati per ogni località esaminata.

I risultati riportati nelle Tabelle 6.3 e 6.4 mostrano come l'indice relativo all'innalzamento del livello del mare per effetto dei cambiamenti climatici (SLR) determini un grado di pericolosità molto alto (quinta classe) in tutte le località esaminate; la stima di tale parametro, infatti, è effettuata su scala globale, per cui la sua variazione sicuramente non può essere significativa a livello regionale. Per quanto riguarda l'indice legato all'escursione media di marea, tutte le località, seppur caratterizzate da escursioni variabili, ricadono tutte in prima classe, con valore di escursione media inferiore al metro (regime microtidale), d'accordo con Sannino et al. (2015). L'indice relativo alle correnti marine assume punteggi variabili tra 1 e 4, raggiungendo il massimo in corrispondenza della località di Porticello, situata nella parte terminale dello Stretto di Messina. Per quanto riguarda l'indice legato al vento, tutte le località esaminate ricadono in prima classe, ad eccezione di Ferruzzano e Brancaleone, caratterizzate da una percentuale di ore l'anno in cui vi è trasporto eolico di sedimenti compresa tra il 5% ed il 15%. Infine, per quanto riguarda l'indice di

clima ondoso, tutte le località esaminate sono caratterizzate da grado di pericolosità variabile da moderato (terza classe) a molto alto (quinta classe); in particolare, il punteggio massimo si rileva nelle località dello Stretto di Messina e del Tirreno.

Tabella 6.3: Valutazione dei cinque indici di pericolosità per ciascuna località esaminata (continua).

Cod.	Località esaminata	SLR	Marea	Correnti	Vento	Clima ondoso
4530	Montegiordano Marina	5	1	1	1	3
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	5	1	1	1	3
4848	Trebisacce	5	1	1	1	3
5011	Villapiana Lido	5	1	1	1	3
5173	Rossano	5	1	1	1	3
5333	Marina di Calopezzati	5	1	1	1	3
5496	Cariati	5	1	1	1	3
5497	Crucoli Torretta	5	1	1	1	3
5832	Cirò Marina	5	1	1	1	4
6004	Torre Melissa	5	1	1	1	4
6177	Crotone – Zigari	5	1	1	1	4
6352	Crotone	5	1	1	1	3
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	5	1	1	1	4
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	5	1	1	1	4
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	5	1	2	1	3
6898	Cropani	5	1	2	1	4
6897	Catanzaro Lido	5	1	2	1	4
7080	Soverato	5	1	2	1	3
7262	San Sostene Marina	5	1	2	1	3
7443	Badolato	5	1	2	1	4
7624	Monasterace Marina	5	1	2	1	4
7807	Riace Marina	5	1	2	1	4
7990	Marina di Caulonia	5	1	2	1	4
7989	Roccella Ionica	5	1	2	1	4
8168	Locri	5	1	2	1	4
8344	Bovalino	5	1	2	1	4
8514	Ferruzzano Marina	5	1	2	2	4

Tabella 6.4: Valutazione dei cinque indici di pericolosità per ciascuna località esaminata.

Cod.	Località esaminata	SLR	Marea	Correnti	Vento	Clima ondososo
8685	Brancaleone Marina	5	1	2	2	4
8864	Palizzi Marina	5	1	2	1	3
8863	Bova Marina	5	1	2	1	3
8862	Melito di Porto Salvo	5	1	2	1	3
8683	Lazzaro	5	1	2	1	3
8343	Pellaro	5	1	2	1	3
8343	Gallico	5	1	3	1	3
7988	Porticello	5	1	4	1	5
7988	Favazzina	5	1	2	1	4
7806	Palmi	5	1	2	1	5
7622	San Ferdinando	5	1	2	1	4
7442	Santa Maria di Ricadi	5	1	2	1	4
7261	Capo Vaticano	5	1	2	1	5
7078	Tropea	5	1	2	1	5
6896	Vibo Marina	5	1	2	1	4
6711	Gizzeria Lido	5	1	2	1	4
6527	Falerna Marina	5	1	2	1	5
6350	Amantea	5	1	2	1	5
6175	Belmonte Marina	5	1	2	1	5
6002	San Lucido	5	1	2	1	5
5830	Marina di Fuscaldo	5	1	2	1	5
5659	Cetraro Marina	5	1	2	1	5
5493	Sanginetto Lido	5	1	2	1	5
5331	Marina di Belvedere	5	1	2	1	5
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	5	1	2	1	5
5009	Scalea	5	1	2	1	5
4846	Tortora Marina	5	1	2	1	4

Le Tabelle 6.5 e 6.6, invece, riportano il valore di indice di pericolosità complessivo normalizzato, ottenuto per ogni località esaminata, applicando l'espressione (4.6) e tenendo conto dei pesi attribuiti, stabiliti in Tabella 4.8, e la relativa classificazione della pericolosità. I risultati ottenuti mostrano un grado di pericolosità medio-alto in tutte le località tirreniche e variabile, tra medio e

medio-alto, nelle località ioniche e nell'area dello Stretto di Messina.

Tabella 6.5: Indice di pericolosità calcolato per ciascuna località esaminata e grado di pericolosità relativo, evidenziato con una scala di colori (continua).

Cod.	Località esaminata	I_H	Grado di pericolosità
4530	Montegiordano Marina	0.45	Medio
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	0.45	Medio
4848	Trebisacce	0.45	Medio
5011	Villapiana Lido	0.45	Medio
5173	Rossano	0.45	Medio
5333	Marina di Calopezzati	0.45	Medio
5496	Cariati	0.45	Medio
5497	Crucoli Torretta	0.45	Medio
5832	Cirò Marina	0.58	Medio
6004	Torre Melissa	0.58	Medio
6177	Crotone – Zigari	0.58	Medio
6352	Crotone	0.45	Medio
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	0.58	Medio
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	0.58	Medio
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	0.48	Medio
6898	Cropani	0.60	Medio-alto
6897	Catanzaro Lido	0.60	Medio-alto
7080	Soverato	0.48	Medio
7262	San Sostene Marina	0.48	Medio
7443	Badolato	0.60	Medio-alto
7624	Monasterace Marina	0.60	Medio-alto
7807	Riace Marina	0.60	Medio-alto
7990	Marina di Caulonia	0.60	Medio-alto
7989	Roccella Ionica	0.60	Medio-alto
8168	Locri	0.60	Medio-alto
8344	Bovalino	0.60	Medio-alto
8514	Ferruzzano Marina	0.63	Medio-alto

Tabella 6.6: Indice di pericolosità calcolato per ciascuna località esaminata e grado di pericolosità relativo, evidenziato con una scala di colori.

Cod.	Località esaminata	I_H	Grado di pericolosità
8685	Brancaleone Marina	0.63	Medio-alto
8864	Palizzi Marina	0.48	Medio
8863	Bova Marina	0.48	Medio
8862	Melito di Porto Salvo	0.48	Medio
8683	Lazzaro	0.48	Medio
8343	Pellaro	0.48	Medio
8343	Gallico	0.50	Medio
7988	Porticello	0.78	Medio-alto
7988	Favazzina	0.60	Medio-alto
7806	Palmi	0.73	Medio-alto
7622	San Ferdinando	0.60	Medio-alto
7442	Santa Maria di Ricadi	0.60	Medio-alto
7261	Capo Vaticano	0.73	Medio-alto
7078	Tropea	0.73	Medio-alto
6896	Vibo Marina	0.60	Medio-alto
6711	Gizzeria Lido	0.60	Medio-alto
6527	Falerna Marina	0.73	Medio-alto
6350	Amantea	0.73	Medio-alto
6175	Belmonte Marina	0.73	Medio-alto
6002	San Lucido	0.73	Medio-alto
5830	Marina di Fuscaldo	0.73	Medio-alto
5659	Cetraro Marina	0.73	Medio-alto
5493	Sanginetto Lido	0.73	Medio-alto
5331	Marina di Belvedere	0.73	Medio-alto
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	0.73	Medio-alto
5009	Scalea	0.73	Medio-alto
4846	Tortora Marina	0.60	Medio-alto

6.4 Calcolo degli indici di vulnerabilità costiera

La stima degli indici di vulnerabilità costiera è stata effettuata seguendo la procedura descritta nel quarto capitolo. Le Tabelle 6.7 e 6.8 mostrano per ciascuna delle località esaminate i risultati ottenuti per ogni indice di vulnerabilità, con punteggio variabile tra 0 e 5; si ricorda, infatti, che per gli indici relativi alle opere di protezione costiera (OPC) e portuali (OP) è stato attribuito punteggio pari a zero nelle località in cui tali opere sono risultate assenti. In Appendice, le Tabelle IV-1 e IV-2 mostrano i valori delle grandezze indicative della vulnerabilità valutate per ogni litorale esaminato.

Osservando i risultati riportati nelle Tabelle 6.7 e 6.8, si può notare che, per quanto riguarda l'indice legato alla tipologia della costa (TC), tutte le località esaminate ricadono in quinta classe di vulnerabilità, in quanto sono tutte spiagge sabbiose.

I valori ottenuti per l'indice della morfologia della costa emersa (MCE) variano tra 2.5 e 5, valore massimo stimato nella località di Calopezzati.

Per quanto riguarda, invece, l'indice relativo alla morfologia della costa sommersa (MCS), ovvero alla pendenza del fondale, quasi tutte le località ricadono in prima o seconda classe di vulnerabilità, ad eccezione di Rossano, nello Ionio, e delle località dell'area dello Stretto di Messina.

L'indice relativo all'evoluzione della linea di costa (ELC) varia tra tutte le classi di vulnerabilità: in particolare, 13 località ricadono in prima classe (avanzamento), 28 località in seconda classe (stabilità), 6 località in terza classe (erosione debole), 6 località in quarta classe (erosione intensa) ed una località in quinta classe (erosione grave).

L'indice relativo al trasporto solido (TS), litoraneo e fluviale, permette di stimare un bilancio tra la quantità di sedimenti apportati alle foci fluviali e quelli portati via dalle correnti longshore. Pertanto, dopo aver individuato l'unità fisiografica relativa ad ogni tratto di costa analizzato e la direzione del trasporto solido longshore, sono stati stimati i contributi degli apporti sedimentari fluviali che insistono sul litorale in esame, come descritto nel quarto capitolo. I risultati ottenuti per tale indice spaziano in tutte le classi di vulnerabilità, registrando i valori massimi in diverse località ioniche e tirreniche.

Gli indici relativi ai sistemi dunali (SD) e alla vegetazione (V) assumono valori variabili rispettivamente tra 1.9 e 5 e tra 2.4 e 5; si tenga presente che il punteggio massimo corrisponde a casi in

cui tali sistemi naturali di protezione (dune e vegetazione) non sono presenti e, di conseguenza, la vulnerabilità risulta massima.

L'indice relativo alla subsidenza (S) assume valori variabili tra 1 e 4; i valori maggiori, in particolare, si riscontrano per le località vicine alla piana di Sibari (Villapiana Lido e Rossano) e per quelle situate nella piana di Gioia Tauro (Palmi e San Ferdinando).

Per quanto riguarda gli indici legati alle opere di difesa costiera (OPC) e a quelle portuali (OP) i valori ottenuti ricadono nelle classi di vulnerabilità rispettivamente medio-alte per le prime e medio-basse per le seconde, laddove le opere sono presenti.

Infine, per quanto riguarda l'indice relativo al grado di antropizzazione della linea di costa (GAC), tutte le località ricadono in classe di vulnerabilità massima, ad eccezione di Marina di Belvedere e Sanginetto Lido che ricadono in quarta classe.

Le Tabelle 6.9 e 6.10, invece, riportano il valore di indice di vulnerabilità complessivo normalizzato, ottenuto per ogni località esaminata, applicando l'espressione (4.7) e tenendo conto dei pesi attribuiti, stabiliti in Tabella 4.23, e la relativa classificazione della vulnerabilità. I risultati ottenuti mostrano un grado di vulnerabilità medio per la maggior parte delle località esaminate, medio-basso per 4 località ioniche e 2 tirreniche e medio-alto per 5 località ioniche, 3 tirreniche e 2 situate nello Stretto di Messina.

Tabella 6.7: Valutazione degli undici indici di vulnerabilità per ciascuna località esaminata (continua).

Cod.	Località esaminata	TC	MCE	MCS	ELC	TS	SD	V	S	OPC	OP	GAC
4530	Montegiordano Marina	5	3.0	1	2	5	4.0	3.6	2	5	0	5
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	5	3.0	1	1	5	3.8	4.0	2	4	0	5
4848	Trebisacce	5	4.0	2	2	1	4.4	5.0	2	0	0	5
5011	Villapiana Lido	5	2.5	1	1	1	4.1	4.0	3	0	0	5
5173	Rossano	5	3.5	3	2	1	3.3	3.8	3	0	0	5
5333	Marina di Calopezzati	5	5.0	1	4	5	4.1	3.6	2	0	0	5
5496	Cariati	5	4.0	1	2	5	4.7	3.2	2	5	3	5
5497	Crucoli Torretta	5	4.0	1	3	1	4.1	3.2	2	5	0	5
5832	Cirò Marina	5	3.0	2	3	5	4.1	5.0	2	5	1	5
6004	Torre Melissa	5	3.5	1	2	4	4.4	4.6	2	4	0	5
6177	Crotone – Zigari	5	4.5	1	3	5	4.4	4.6	2	0	0	5
6352	Crotone	5	4.0	1	2	5	4.1	4.0	2	4	2	5
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	5	3.5	1	2	5	5.0	4.0	2	3	0	5
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	5	4.0	1	2	5	4.1	2.4	2	0	0	5
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	5	3.5	1	2	5	3.4	3.6	2	0	0	5
6898	Cropani	5	3.5	1	2	1	3.2	3.8	2	0	0	5
6897	Catanzaro Lido	5	3.5	1	1	2	5.0	5.0	2	0	2	5
7080	Soverato	5	3.0	2	1	3	4.1	5.0	1	0	0	5
7262	San Sostene Marina	5	3.5	1	2	3	4.0	4.6	1	0	0	5
7443	Badolato	5	2.5	2	1	4	2.3	2.6	1	0	1	5
7624	Monasterace Marina	5	2.5	1	2	5	3.2	4.6	1	0	0	5
7807	Riace Marina	5	3.0	1	2	2	3.2	3.8	1	0	0	5
7990	Marina di Caulonia	5	3.5	1	5	1	3.7	4.2	1	0	0	5
7989	Roccella Ionica	5	3.5	1	1	5	3.3	4.2	1	5	2	5
8168	Locri	5	4.0	1	3	3	4.4	5.0	1	0	0	5
8344	Bovalino	5	4.0	1	2	3	3.7	4.2	1	0	0	5
8514	Ferruzzano Marina	5	4.0	1	2	5	3.8	4.6	1	0	0	5

Tabella 6.8: Valutazione degli undici indici di vulnerabilità per ciascuna località esaminata.

Cod.	Località esaminata	TC	MCE	MCS	ELC	TS	SD	V	S	OPC	OP	GAC
8685	Brancaleone Marina	5	3.5	1	3	1	4.0	3.6	1	5	0	5
8864	Palizzi Marina	5	4.0	1	2	4	3.6	4.2	1	4	0	5
8863	Bova Marina	5	4.0	1	4	4	4.1	5.0	1	5	0	5
8862	Melito di Porto Salvo	5	3.0	2	4	4	4.1	5.0	1	0	0	5
8683	Lazzaro	5	2.5	5	2	5	5.0	5.0	1	4	2	5
8343	Pellaro	5	4.0	5	2	3	5.0	4.6	1	5	0	5
8343	Gallico	5	3.5	4	2	4	4.1	4.0	1	3	0	5
7988	Porticello	5	4.5	2	2	4	5.0	5.0	1	4	0	5
7988	Favazzina	5	3.5	2	2	5	5.0	4.0	1	4	0	5
7806	Palmi	5	3.5	2	2	4	2.6	3.6	3	0	2	5
7622	San Ferdinando	5	3.5	2	4	2	1.9	3.0	4	0	2	5
7442	Santa Maria di Ricadi	5	3.0	2	2	5	5.0	4.0	1	3	0	5
7261	Capo Vaticano	5	3.0	1	2	5	5.0	4.0	1	5	0	5
7078	Tropea	5	3.0	1	1	5	5.0	4.0	1	5	2	5
6896	Vibo Marina	5	3.0	1	1	5	4.0	3.6	1	5	0	5
6711	Gizzeria Lido	5	2.5	1	4	5	3.3	3.8	1	0	0	5
6527	Falerna Marina	5	3.0	1	1	4	4.1	5.0	1	5	0	5
6350	Amantea	5	3.0	1	3	5	5.0	5.0	1	5	1	5
6175	Belmonte Marina	5	3.0	2	4	4	5.0	5.0	1	5	0	5
6002	San Lucido	5	2.5	1	2	5	5.0	5.0	1	3	1	5
5830	Marina di Fuscaldo	5	4.0	1	2	5	4.1	5.0	1	5	0	5
5659	Cetraro Marina	5	3.5	1	1	5	5.0	5.0	1	4	3	5
5493	Sanginetto Lido	5	4.0	1	2	5	5.0	5.0	1	4	1	4
5331	Marina di Belvedere	5	3.5	1	2	5	3.8	4.0	1	4	0	4
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	5	2.5	1	1	1	5.0	5.0	1	0	0	5
5009	Scalea	5	3.0	1	1	2	5.0	5.0	1	0	0	5
4846	Tortora Marina	5	3.5	2	1	3	5.0	5.0	1	0	0	5

Tabella 6.9: Indice di vulnerabilità calcolato per ciascuna località esaminata e grado di vulnerabilità relativo, evidenziato con una scala di colori (continua).

Cod.	Località esaminata	I_V	Grado di vulnerabilità
4530	Montegiordano Marina	0.56	Medio
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	0.52	Medio
4848	Trebisacce	0.44	Medio
5011	Villapiana Lido	0.35	Medio-basso
5173	Rossano	0.42	Medio
5333	Marina di Calopezzati	0.54	Medio
5496	Cariati	0.66	Medio-alto
5497	Crucoli Torretta	0.51	Medio
5832	Cirò Marina	0.66	Medio-alto
6004	Torre Melissa	0.56	Medio
6177	Crotone – Zigari	0.53	Medio
6352	Crotone	0.62	Medio-alto
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	0.56	Medio
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	0.44	Medio
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	0.44	Medio
6898	Cropani	0.35	Medio-basso
6897	Catanzaro Lido	0.47	Medio
7080	Soverato	0.41	Medio
7262	San Sostene Marina	0.41	Medio
7443	Badolato	0.35	Medio-basso
7624	Monasterace Marina	0.42	Medio
7807	Riace Marina	0.34	Medio-basso
7990	Marina di Caulonia	0.42	Medio
7989	Roccella Ionica	0.57	Medio
8168	Locri	0.46	Medio
8344	Bovalino	0.41	Medio
8514	Ferruzzano Marina	0.46	Medio

Tabella 6.10: Indice di vulnerabilità calcolato per ciascuna località esaminata e grado di vulnerabilità relativo, evidenziato con una scala di colori.

Cod.	Località esaminata	I_V	Grado di vulnerabilità
8685	Brancaleone Marina	0.48	Medio
8864	Palizzi Marina	0.52	Medio
8863	Bova Marina	0.62	Medio-alto
8862	Melito di Porto Salvo	0.50	Medio
8683	Lazzaro	0.69	Medio-alto
8343	Pellaro	0.65	Medio-alto
8343	Gallico	0.56	Medio
7988	Porticello	0.60	Medio-alto
7988	Favazzina	0.58	Medio
7806	Palmi	0.49	Medio
7622	San Ferdinando	0.49	Medio
7442	Santa Maria di Ricadi	0.55	Medio
7261	Capo Vaticano	0.57	Medio
7078	Tropea	0.59	Medio
6896	Vibo Marina	0.51	Medio
6711	Gizzeria Lido	0.45	Medio
6527	Falerna Marina	0.53	Medio
6350	Amantea	0.64	Medio-alto
6175	Belmonte Marina	0.64	Medio-alto
6002	San Lucido	0.56	Medio
5830	Marina di Fuscaldo	0.59	Medio
5659	Cetraro Marina	0.63	Medio-alto
5493	Sanginetto Lido	0.59	Medio
5331	Marina di Belvedere	0.51	Medio
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	0.35	Medio-basso
5009	Scalea	0.39	Medio-basso
4846	Tortora Marina	0.44	Medio

6.5 Calcolo dell'indice di esposizione

La valutazione degli indici di esposizione è stata effettuata seguendo la procedura descritta nel quarto capitolo. Le Tabelle 6.11 e 6.12 mostrano per ciascuna delle località esaminate i risultati ottenuti per i due indici di esposizione considerati, con punteggio variabile tra 1 e 5.

In particolare, si nota che, per quanto riguarda la popolazione residente nell'area di pericolosità, A_p , quasi tutte le località esaminate ricadono in prima classe di esposizione; fanno eccezione soltanto le località di Rossano, Gallico e Vibo Marina.

L'indice legato alle classi di uso del suolo, invece, spazia su tutte e cinque le classi di esposizione, assumendo valore massimo nelle località di Caulonia Marina, Lazzaro, Pellaro, Gallico, Gizzeria Lido, Falerna Marina e Cetraro Marina.

Le Tabelle 6.13 e 6.14 riportano il valore di indice di esposizione complessivo normalizzato, ottenuto per ogni località esaminata, applicando l'espressione (4.8) e tenendo conto dei pesi attribuiti, stabiliti in Tabella 4.27, e la relativa classificazione dell'esposizione. I risultati ottenuti mostrano un grado di esposizione molto variabile a seconda della località: in particolare, si rilevano 3 località con grado di esposizione basso, situate tutte sul versante ionico, e 7 località con grado di esposizione alto, situate in gran parte sul versante tirrenico.

Tabella 6.11: Valutazione dei due indici di esposizione per ciascuna località esaminata (continua).

Cod.	Località esaminata	Pop. residente in A_p	Classi di uso del suolo
4530	Montegiordano Marina	1	3
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	1	3
4848	Trebisacce	1	3
5011	Villapiana Lido	1	3
5173	Rossano	2	4
5333	Marina di Calopezzati	1	3
5496	Cariati	1	3
5497	Crucoli Torretta	1	4
5832	Cirò Marina	1	3
6004	Torre Melissa	1	2
6177	Crotone – Zigari	1	4
6352	Crotone	1	4
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	1	1
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	1	1
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	1	2
6898	Cropani	1	3
6897	Catanzaro Lido	1	2
7080	Soverato	1	2
7262	San Sostene Marina	1	4
7443	Badolato	1	3
7624	Monasterace Marina	1	2
7807	Riace Marina	1	2
7990	Marina di Caulonia	1	5
7989	Roccella Ionica	1	2
8168	Locri	1	1
8344	Bovalino	1	2
8514	Ferruzzano Marina	1	3

Tabella 6.12: Valutazione dei due indici di esposizione per ciascuna località esaminata.

Cod.	Località esaminata	Pop. residente in A_p	Classi di uso del suolo
8685	Brancaleone Marina	1	3
8864	Palizzi Marina	1	3
8863	Bova Marina	1	3
8862	Melito di Porto Salvo	1	2
8683	Lazzaro	1	5
8343	Pellaro	1	5
8343	Gallico	2	5
7988	Porticello	1	2
7988	Favazzina	1	2
7806	Palmi	1	3
7622	San Ferdinando	1	4
7442	Santa Maria di Ricadi	1	3
7261	Capo Vaticano	1	3
7078	Tropea	1	2
6896	Vibo Marina	2	3
6711	Gizzeria Lido	1	5
6527	Falerna Marina	1	5
6350	Amantea	1	2
6175	Belmonte Marina	1	2
6002	San Lucido	1	2
5830	Marina di Fuscaldo	1	2
5659	Cetraro Marina	1	5
5493	Sanginetto Lido	1	3
5331	Marina di Belvedere	1	4
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	1	4
5009	Scalea	1	4
4846	Tortora Marina	1	2

Tabella 6.13: Indice di esposizione calcolato per ciascuna località esaminata e grado di esposizione relativo, evidenziato con una scala di colori (continua).

Cod.	Località esaminata	I_E	Grado di esposizione
4530	Montegiordano Marina	0.40	Medio
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	0.40	Medio
4848	Trebisacce	0.40	Medio
5011	Villapiana Lido	0.40	Medio
5173	Rossano	0.65	Medio-alto
5333	Marina di Calopezzati	0.40	Medio
5496	Cariati	0.40	Medio
5497	Crucoli Torretta	0.60	Medio-alto
5832	Cirò Marina	0.40	Medio
6004	Torre Melissa	0.20	Medio-basso
6177	Crotone – Zigari	0.60	Medio-alto
6352	Crotone	0.60	Medio-alto
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	0.00	Basso
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	0.00	Basso
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	0.20	Medio-basso
6898	Cropani	0.40	Medio
6897	Catanzaro Lido	0.20	Medio-basso
7080	Soverato	0.20	Medio-basso
7262	San Sostene Marina	0.60	Medio-alto
7443	Badolato	0.40	Medio
7624	Monasterace Marina	0.20	Medio-basso
7807	Riace Marina	0.20	Medio-basso
7990	Marina di Caulonia	0.80	Alto
7989	Roccella Ionica	0.20	Medio-basso
8168	Locri	0.00	Basso
8344	Bovalino	0.20	Medio-basso
8514	Ferruzzano Marina	0.40	Medio

Tabella 6.14: Indice di esposizione calcolato per ciascuna località esaminata e grado di esposizione relativo, evidenziato con una scala di colori.

Cod.	Località esaminata	I_E	Grado di esposizione
8685	Brancaleone Marina	0.40	Medio
8864	Palizzi Marina	0.40	Medio
8863	Bova Marina	0.40	Medio
8862	Melito di Porto Salvo	0.20	Medio-basso
8683	Lazzaro	0.80	Alto
8343	Pellaro	0.80	Alto
8343	Gallico	0.85	Alto
7988	Porticello	0.20	Medio-basso
7988	Favazzina	0.20	Medio-basso
7806	Palmi	0.40	Medio
7622	San Ferdinando	0.60	Medio-alto
7442	Santa Maria di Ricadi	0.40	Medio
7261	Capo Vaticano	0.40	Medio
7078	Tropea	0.20	Medio-basso
6896	Vibo Marina	0.45	Medio
6711	Gizzeria Lido	0.80	Alto
6527	Falerna Marina	0.80	Alto
6350	Amantea	0.20	Medio-basso
6175	Belmonte Marina	0.20	Medio-basso
6002	San Lucido	0.20	Medio-basso
5830	Marina di Fuscaldo	0.20	Medio-basso
5659	Cetraro Marina	0.80	Alto
5493	Sanginetto Lido	0.40	Medio
5331	Marina di Belvedere	0.60	Medio-alto
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	0.60	Medio-alto
5009	Scalea	0.60	Medio-alto
4846	Tortora Marina	0.20	Medio-basso

6.6 Calcolo dell'indice di rischio costiero

Infine, la stima dell'indice di rischio costiero è stata effettuata applicando l'espressione (4.1). Le Tabelle 6.15 e 6.16 mostrano per ciascuna delle località esaminate il valore di indice di rischio ottenuto e la relativa classificazione. I risultati ottenuti mostrano un grado di rischio basso per 9 località, situate tutte sul litorale ionico calabrese, un grado di rischio medio-basso per 29 località, di cui 18 sono situate sulla ionica, 10 sulla tirrenica e una nello Stretto, un grado di rischio medio per 14 località ed un grado di rischio medio-alto per 2 località, localizzate sul Tirreno, in un'area molto antropizzata, che sono Falerna Marina e Cetraro Marina.

La Figura 6.3 mostra i risultati ottenuti in termini di rischio costiero per il caso studio considerato, in particolare per le 54 località campione esaminate, con una scala di colori più accentuata rispetto a quella usata per le tabelle, per renderla più leggibile.



Figura 6.3: Località a cui è stata applicata la nuova metodologia proposta, evidenziate con un colore indicativo del grado di rischio calcolato.

Tabella 6.15: Indice di rischio calcolato per ciascuna località esaminata e grado di rischio relativo, evidenziato con una scala di colori (continua).

Cod.	Località esaminata	I_R	Grado di rischio
4530	Montegiordano Marina	0.10	Medio-basso
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	0.09	Medio-basso
4848	Trebisacce	0.08	Medio-basso
5011	Villapiana Lido	0.06	Medio-basso
5173	Rossano	0.12	Medio-basso
5333	Marina di Calopezzati	0.10	Medio-basso
5496	Cariati	0.12	Medio-basso
5497	Crucoli Torretta	0.14	Medio-basso
5832	Cirò Marina	0.15	Medio
6004	Torre Melissa	0.06	Medio-basso
6177	Crotone – Zigari	0.18	Medio
6352	Crotone	0.17	Medio
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	0.00	Basso
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	0.00	Basso
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	0.04	Basso
6898	Cropani	0.08	Medio-basso
6897	Catanzaro Lido	0.06	Medio-basso
7080	Soverato	0.04	Basso
7262	San Sostene Marina	0.12	Medio-basso
7443	Badolato	0.08	Medio-basso
7624	Monasterace Marina	0.05	Basso
7807	Riace Marina	0.04	Basso
7990	Marina di Caulonia	0.20	Medio
7989	Roccella Ionica	0.07	Medio-basso
8168	Locri	0.00	Basso
8344	Bovalino	0.05	Basso
8514	Ferruzzano Marina	0.12	Medio-basso

Tabella 6.16: Indice di rischio calcolato per ciascuna località esaminata e grado di rischio relativo, evidenziato con una scala di colori.

Cod.	Località esaminata	I_R	Grado di rischio
8685	Brancaleone Marina	0.12	Medio-basso
8864	Palizzi Marina	0.10	Medio-basso
8863	Bova Marina	0.12	Medio-basso
8862	Melito di Porto Salvo	0.05	Basso
8683	Lazzaro	0.26	Medio
8343	Pellaro	0.25	Medio
8343	Gallico	0.24	Medio
7988	Porticello	0.09	Medio-basso
7988	Favazzina	0.07	Medio-basso
7806	Palmi	0.14	Medio-basso
7622	San Ferdinando	0.18	Medio
7442	Santa Maria di Ricadi	0.13	Medio-basso
7261	Capo Vaticano	0.16	Medio
7078	Tropea	0.09	Medio-basso
6896	Vibo Marina	0.14	Medio-basso
6711	Gizzeria Lido	0.21	Medio
6527	Falerna Marina	0.30	Medio-alto
6350	Amantea	0.09	Medio-basso
6175	Belmonte Marina	0.09	Medio-basso
6002	San Lucido	0.08	Medio-basso
5830	Marina di Fuscaldo	0.09	Medio-basso
5659	Cetraro Marina	0.36	Medio-alto
5493	Sanginetto Lido	0.17	Medio
5331	Marina di Belvedere	0.22	Medio
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	0.15	Medio
5009	Scalea	0.17	Medio
4846	Tortora Marina	0.05	Medio-basso

6.7 Sviluppo di una piattaforma GIS

Uno dei vantaggi della nuova metodologia riguarda la facilità di implementazione in ambiente GIS. La piattaforma descritta nel presente paragrafo rappresenta la base per lo sviluppo di una sua versione successiva di libero accesso, che dia la possibilità ad un qualunque utente di utilizzare la procedura elaborata, inserendo le condizioni geomorfologiche, meteomarine e quelle relative a tutti i fattori considerati. Nel programma finale, di libero accesso, tutti i parametri devono essere georeferenziati e gestiti sotto forma di dati di tipo raster, in modo tale che la piattaforma sia in grado di mostrare il raster dei singoli parametri ed il raster finale, dato dalla combinazione dei differenti parametri, per ottenere la mappatura della pericolosità, della vulnerabilità, dell'esposizione e infine del rischio costiero.

In dettaglio, la piattaforma sviluppata nell'ambito di tale studio è stata implementata su QGIS versione 3.10.7 'A Coruna'. La scelta di questo software è motivata dal fatto che è open source ed ha ampia diffusione.

La piattaforma è organizzata nelle seguenti aree tematiche:

- Cartografia di input;
- MasterPlan 2013;
- Linee di riva del Geoportale della Calabria;
- Linee di riva del Geoportale dell'Italia;
- Linee di riva di Google Earth;
- Stazioni pluviometriche;
- Bacini idrografici;
- Usi del suolo;
- Ortofoto del Geoportale dell'Italia;
- Immagini satellitari.

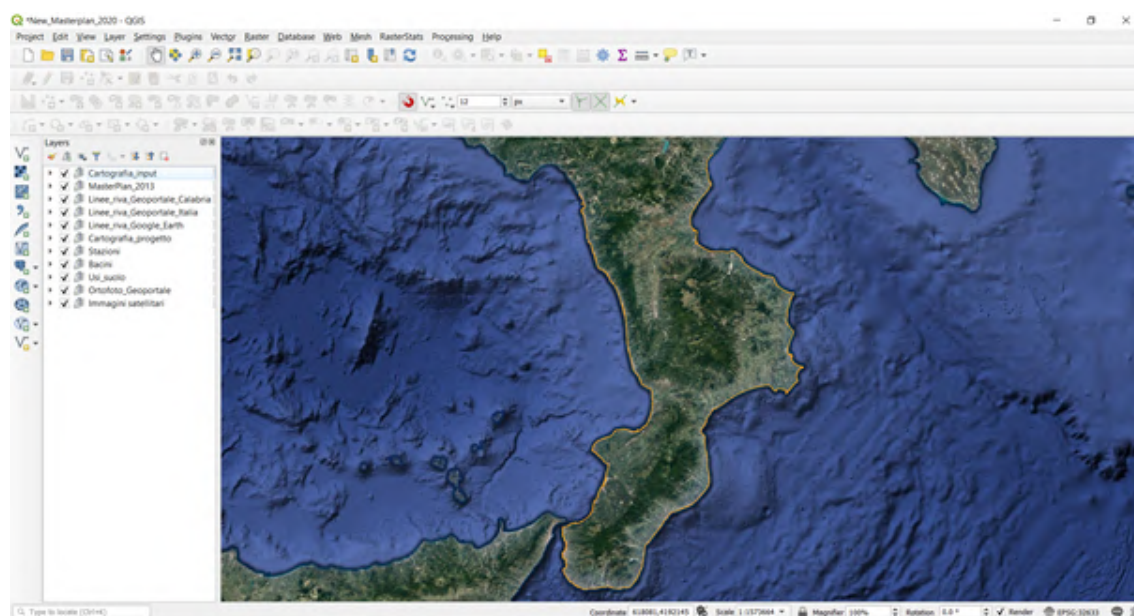


Figura 6.4: Layout della piattaforma GIS sviluppata nell'ambito dello studio.

Di seguito la descrizione degli elementi presenti in ciascuna area tematica.

Cartografia di input

La prima area tematica include diversi elementi acquisiti dalla sezione Open Data del Geoportale della Calabria (<http://geoportale.regione.calabria.it/opendata>) e dal Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>).

- Limiti amministrativi (comuni, comuni costieri, centri urbani, centri urbani del 1954, regioni);
- Geomorfologia (unità fisiografiche, toponomastica costiera; batimetria, pendenza del fondale, bacini idrografici, reticolo idrografico, carte geologica e litologica, paesaggi sabbiosi);
- Tratti costieri dello studio di OKEANOS (2003);
- Transetti individuati nel precedente MasterPlan;
- Porti;
- Punti in cui sono stati acquisiti i dati meteomarini dalla banca dati del MeteOcean.

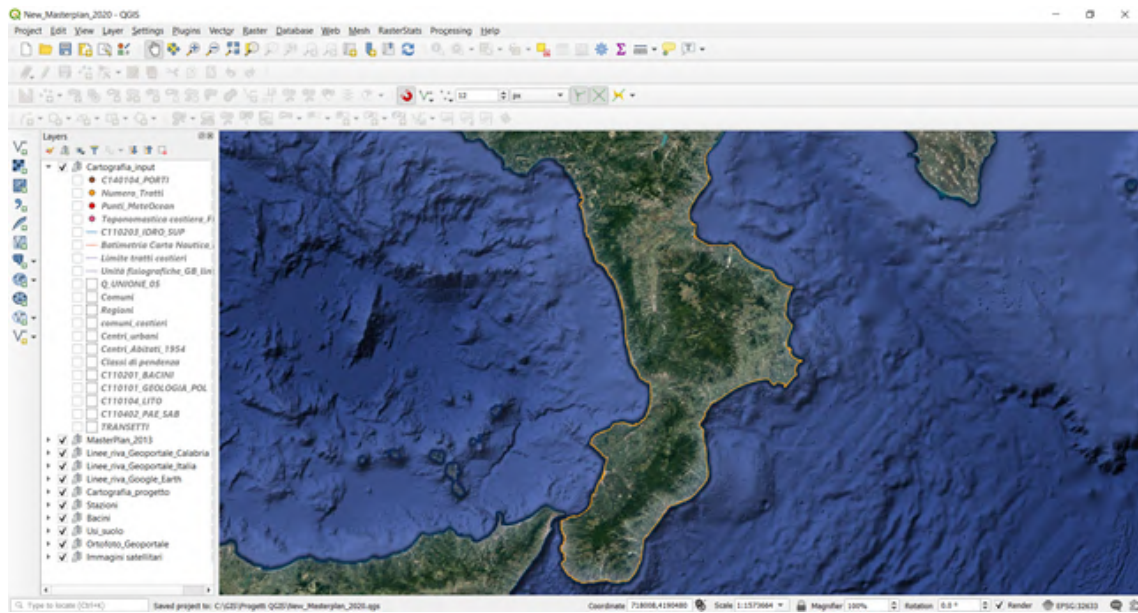


Figura 6.5: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”.

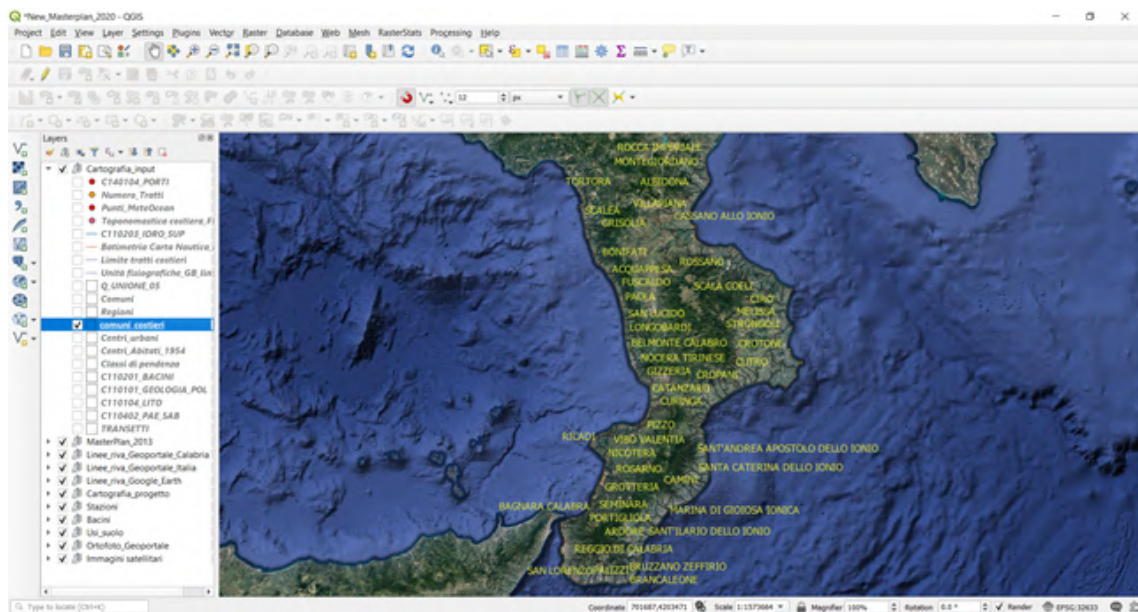


Figura 6.6: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer dei comuni costieri calabresi.

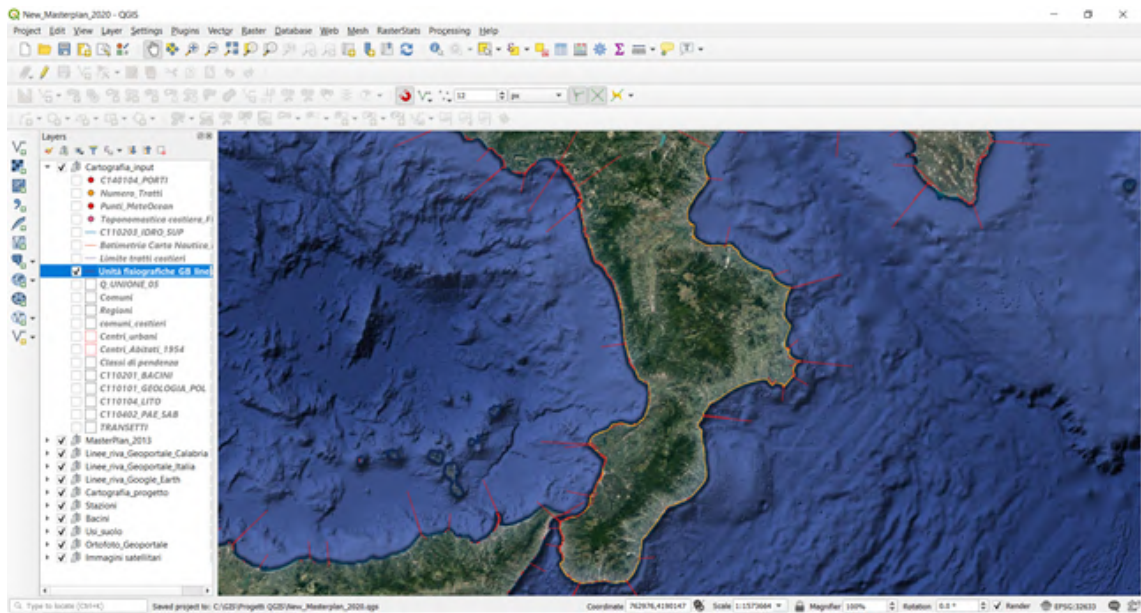


Figura 6.7: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer delle unità fisiografiche.

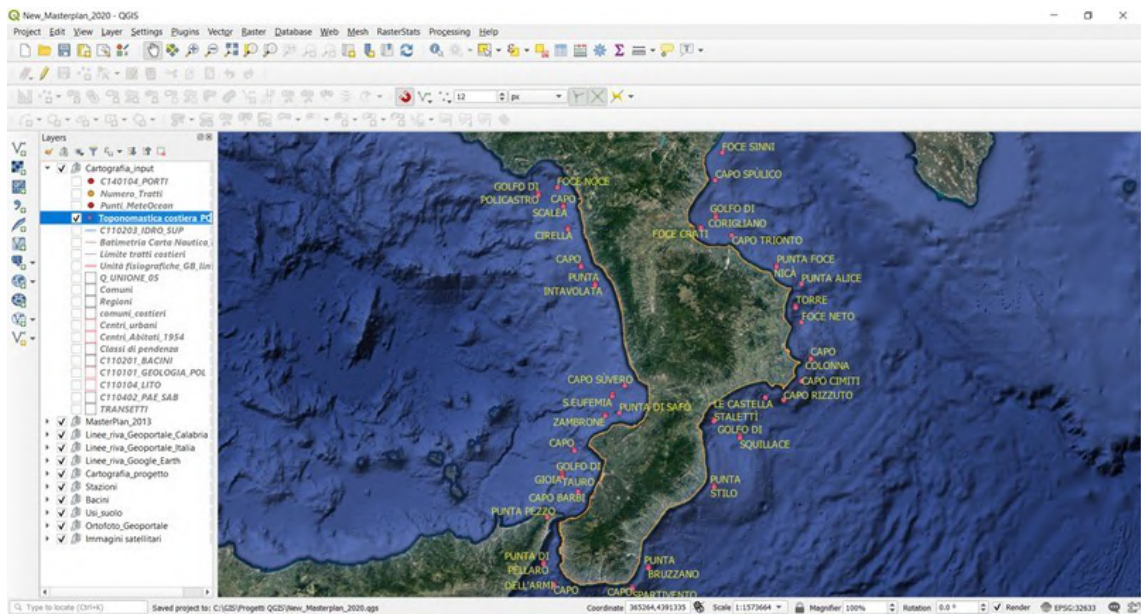


Figura 6.8: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer della toponomastica costiera.

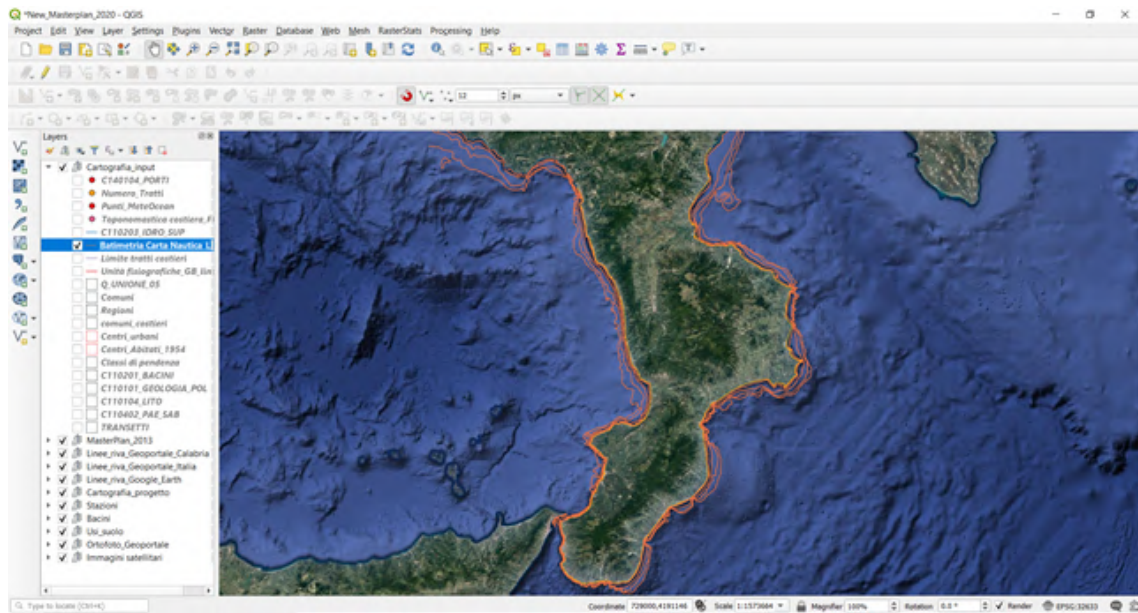


Figura 6.9: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer della batimetria estratta dalle carte nautiche.

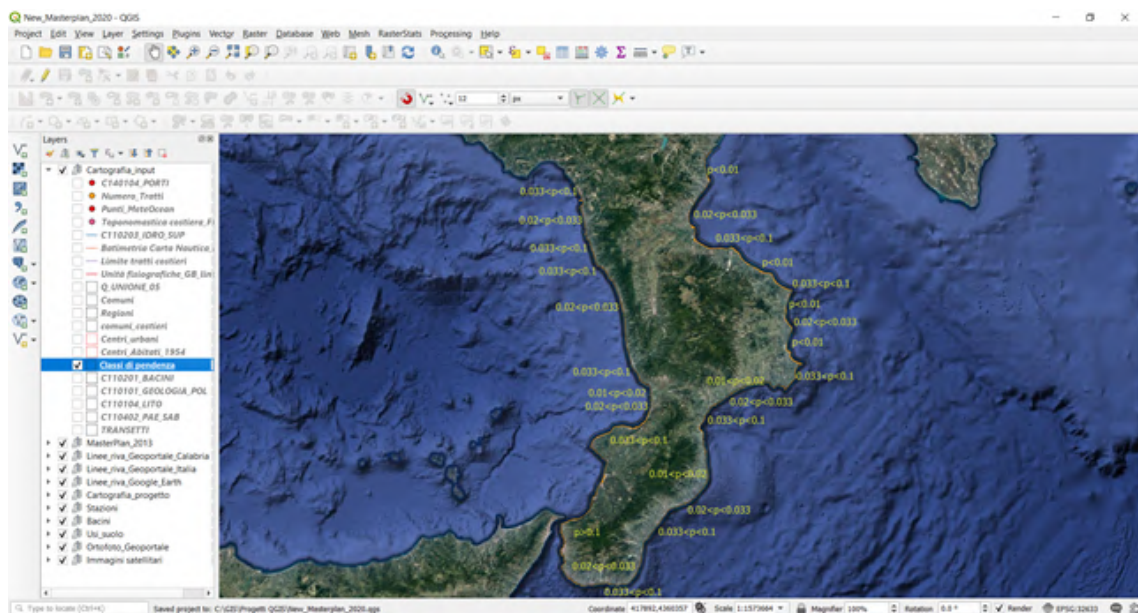


Figura 6.10: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer delle classi di pendenza del fondale.

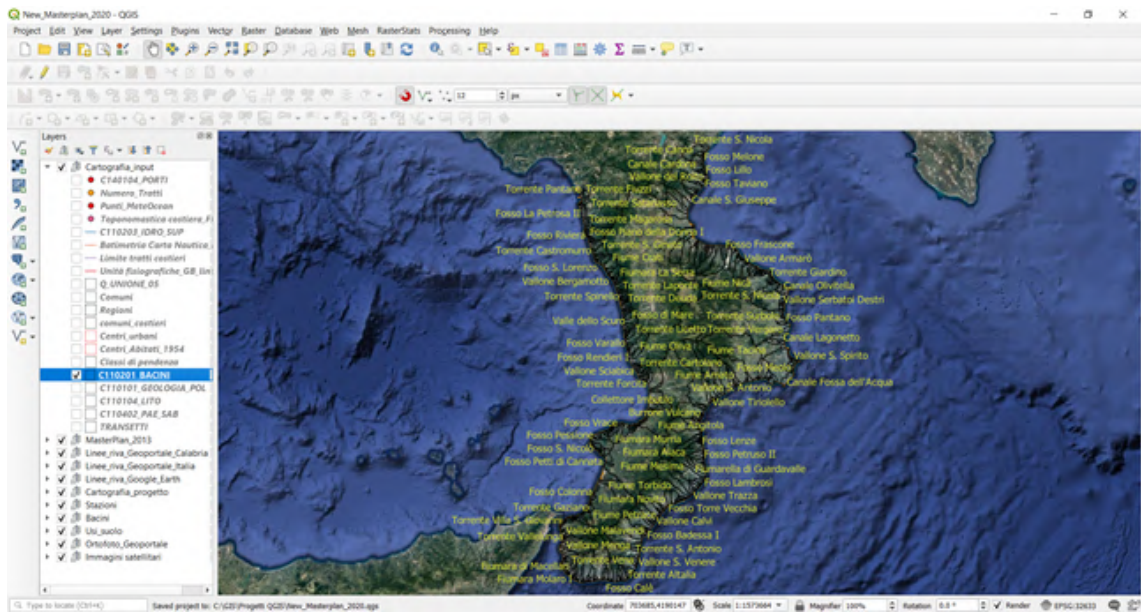


Figura 6.11: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer dei bacini idrografici.

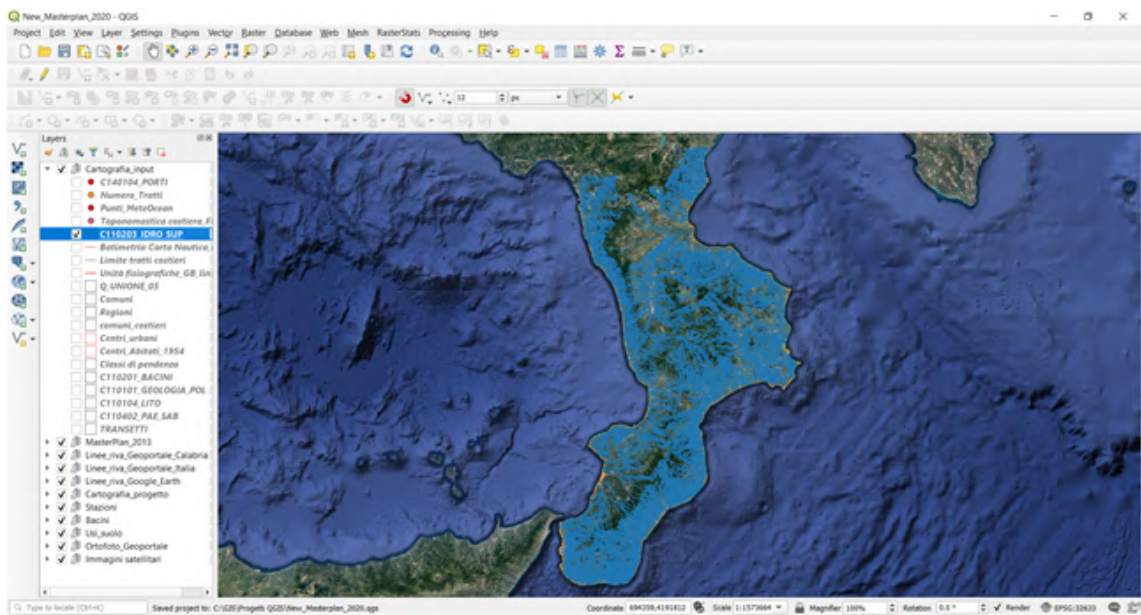


Figura 6.12: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer del reticolo idrografico.

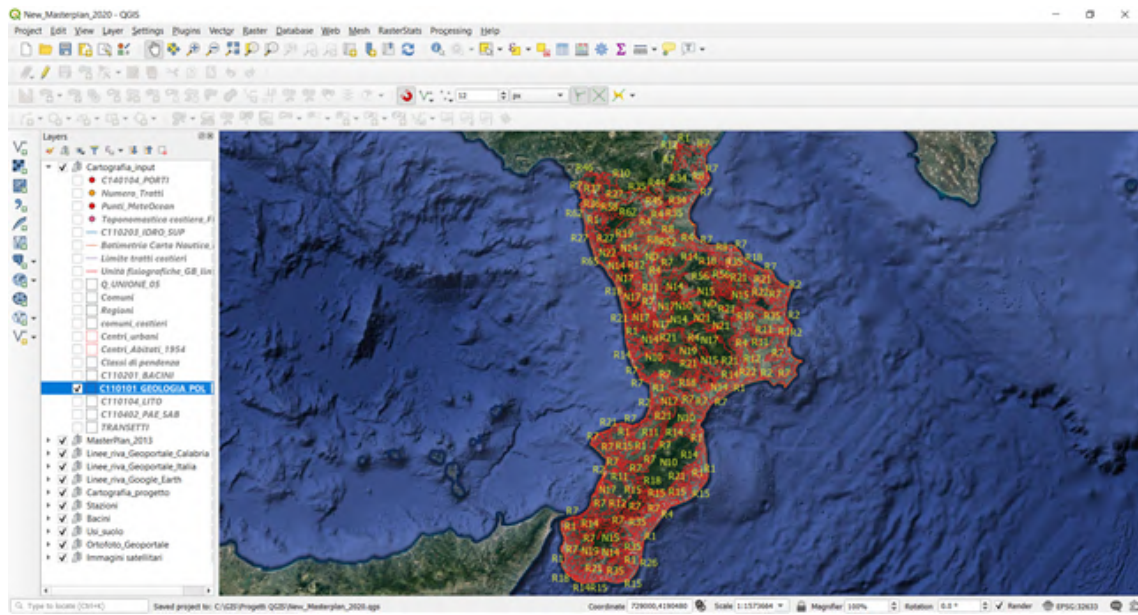


Figura 6.13: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer della carta geologica.

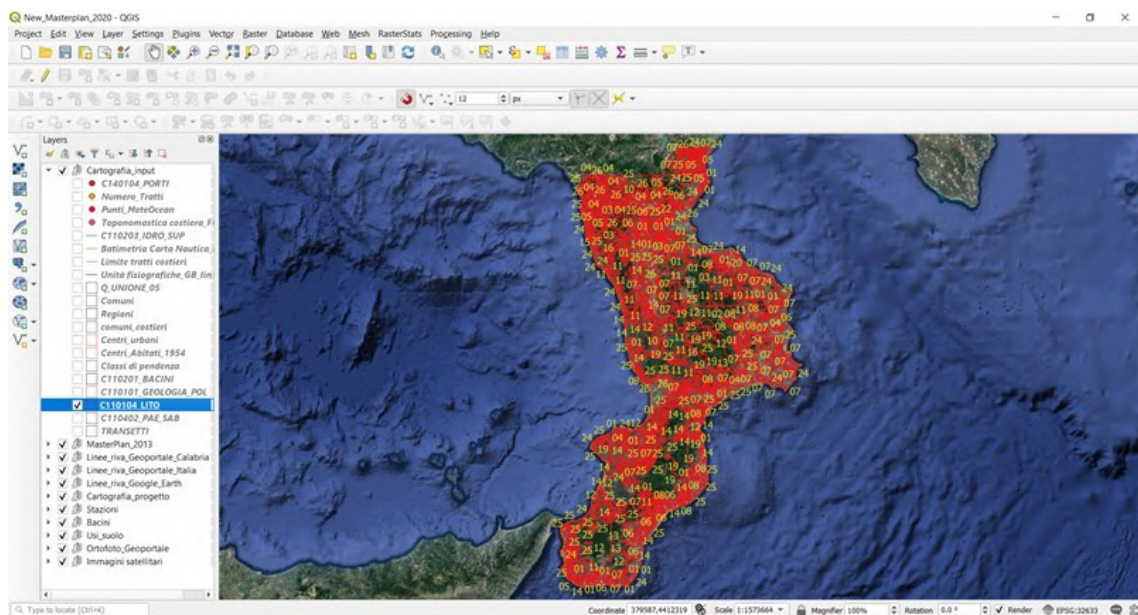


Figura 6.14: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer della carta litologica.

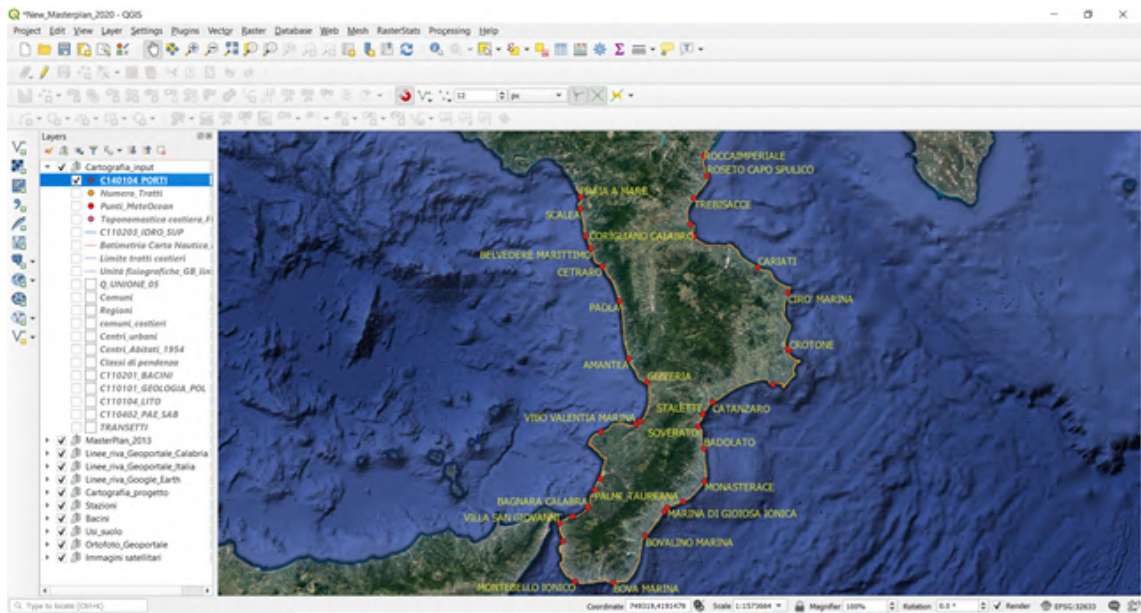


Figura 6.15: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer dei porti calabresi.

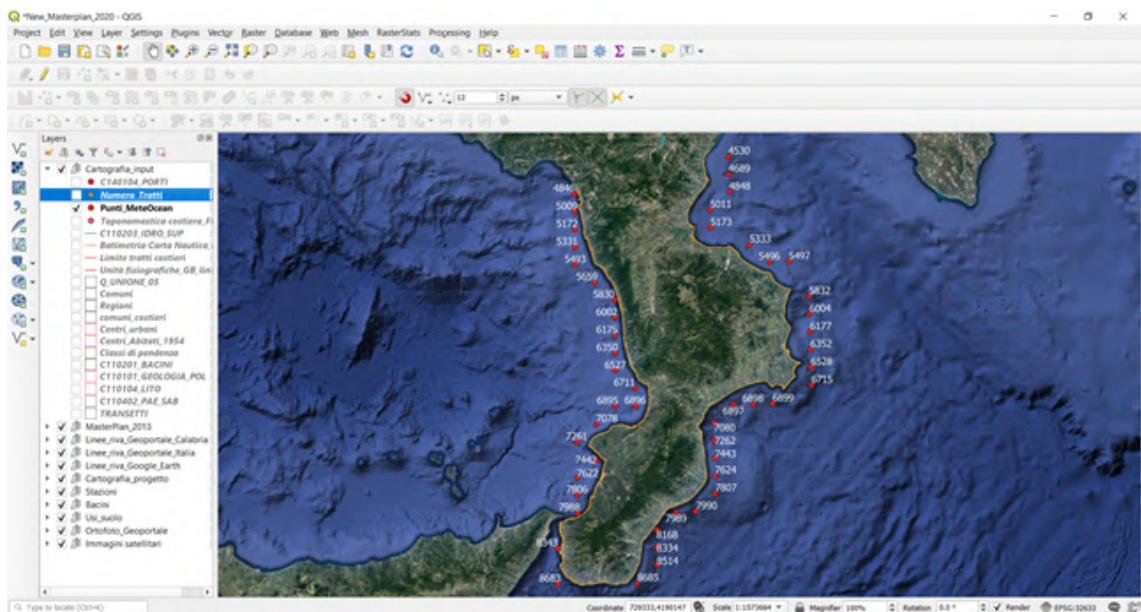


Figura 6.16: Piattaforma GIS: area tematica “Cartografia input”, layer dei punti della banca dati del MeteOcean.

Master Plan 2013

In questa sezione sono stati inseriti tutti gli strati informativi definiti durante la stesura del precedente Master Plan e relativi a:

- Tipologia di costa (spiaggia, costa bassa rocciosa, falesia, linea di costa antropica, pennelli, barriere, porti, retrospiaggia naturale ed antropico);
- Tipologia di spiaggia (stretta, media, ampia);
- Aree erose ed in ripascimento;
- Velocità di avanzamento/erosione;
- Aree con pericolosità e rischio;
- Indice di priorità e del moto ondoso;
- Interventi presenti e previsti.

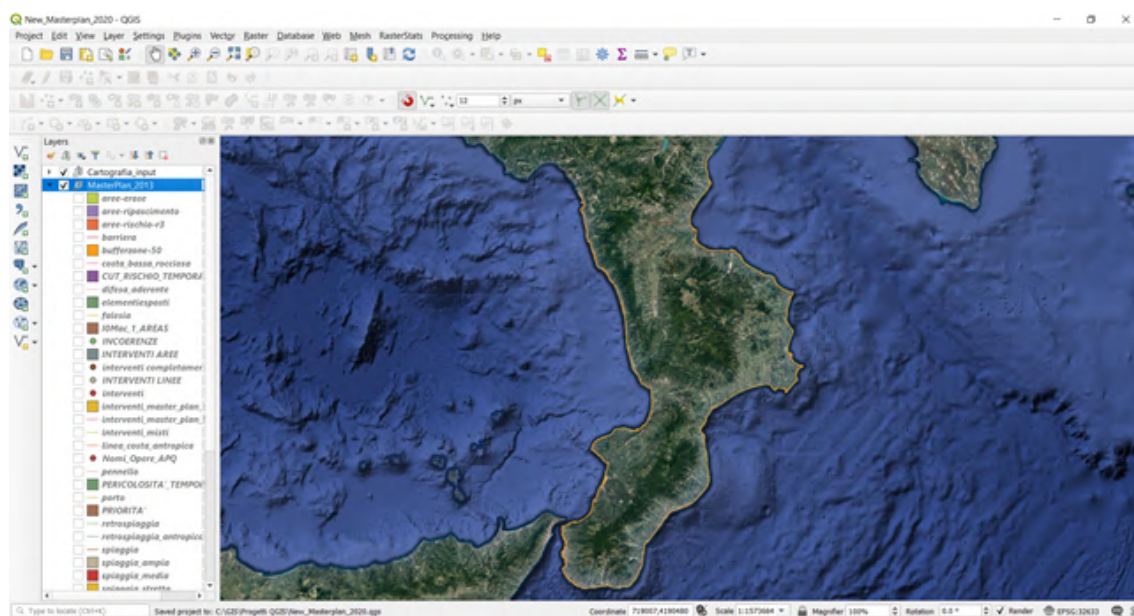


Figura 6.17: Piattaforma GIS: area tematica “MasterPlan 2013”.

Linee di riva del Geoportale della Calabria

In quest’area tematica sono presenti gli shapefile delle linee di riva acquisiti dalla sezione Open Data del Geoportale della Calabria (<http://geoportale.regione.calabria.it/opendata>) e relativi a:

- Linea di riva del 1954;
- Linea di riva del 1998;

- Linea di riva del 2000;
- Linea di riva del 2008.

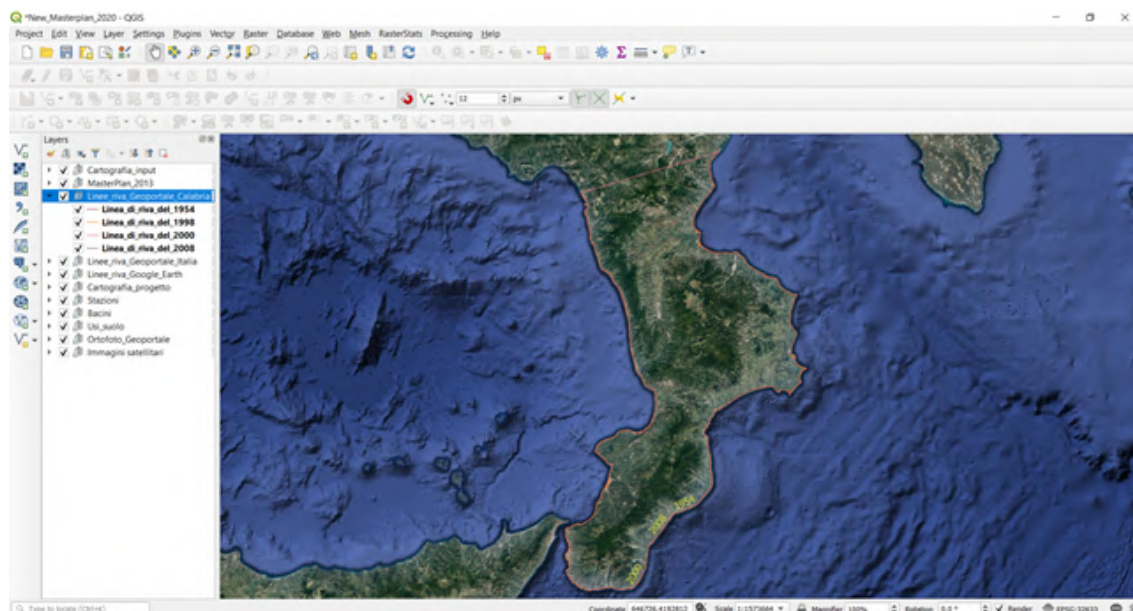


Figura 6.18: Piattaforma GIS: area tematica “Linee di riva del Geoportale della Calabria”.

Linee di riva del Geoportale dell’Italia

In quest’area tematica sono presenti gli shapefile delle linee di riva tracciate sulla base delle ortofoto presenti nel Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>) e relative a:

- Linea di riva del 1989;
- Linea di riva del 1996;
- Linea di riva del 2006;
- Linea di riva del 2012.

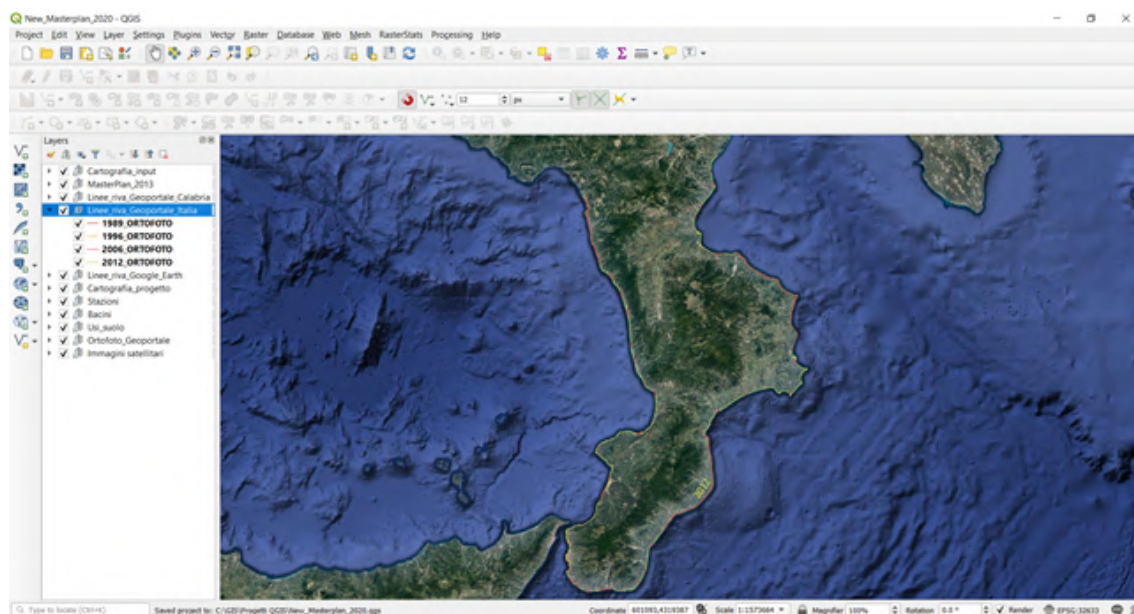


Figura 6.19: Piattaforma GIS: area tematica “Linee di riva del Geoportale dell’Italia”.

Linee di riva di Google Earth

In quest’area tematica sono presenti gli shapefile delle linee di riva tracciate sulla base delle immagini storiche disponibili su Google Earth e relative a:

- Linea di riva del 2013;
- Linea di riva del 2014;
- Linea di riva del 2015;
- Linea di riva del 2016;
- Linea di riva del 2017;
- Linea di riva del 2018;
- Linea di riva del 2019;
- Linea di riva del 2020;

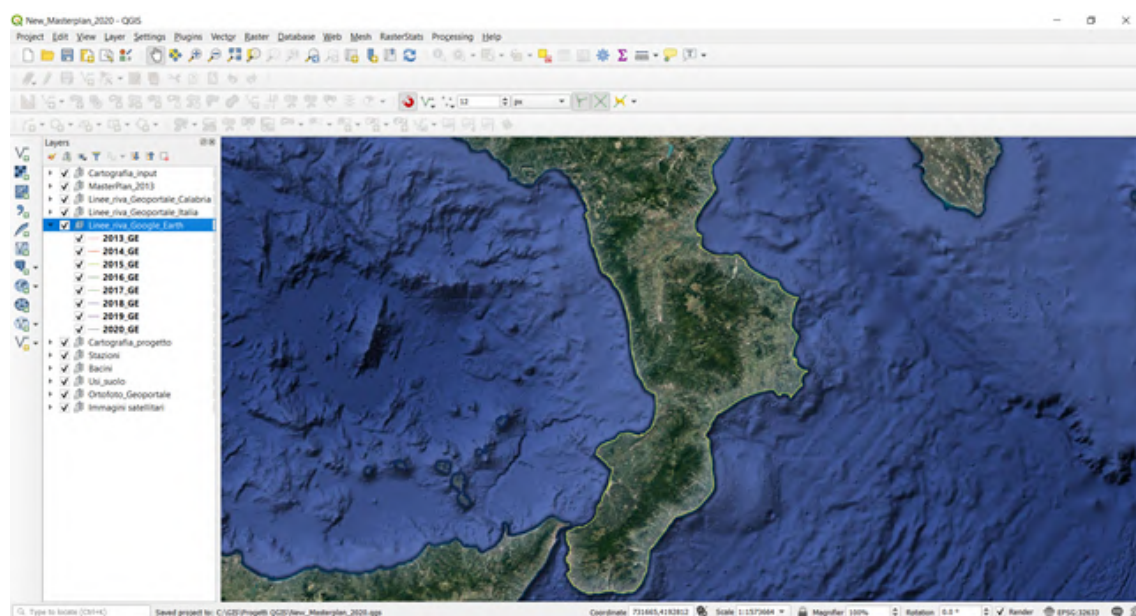


Figura 6.20: Piattaforma GIS: area tematica “Linee di riva di Google Earth”.

Stazioni di misura

In quest’area tematica sono presenti gli shapefile delle stazioni termo-pluviometriche presenti in Calabria, di quelle attualmente attive e delle relative aree d’influenza stimate mediante il metodo dei poligoni di Thiessen:

- Stazioni presenti in Calabria;
- Stazioni pluviometriche presenti in Calabria;
- Stazioni termometriche presenti in Calabria;
- Stazioni pluviometriche attive;
- Stazioni termometriche attive;
- Area d’influenza delle stazioni pluviometriche attive;
- Area d’influenza delle stazioni termometriche attive.

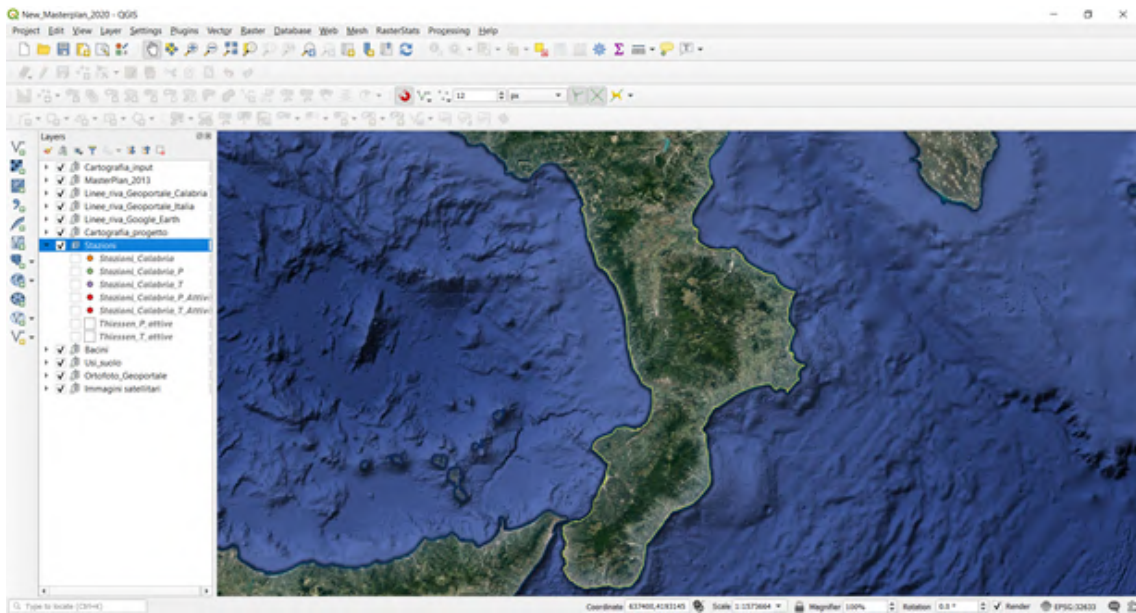


Figura 6.21: Piattaforma GIS: area tematica “Stazioni”.

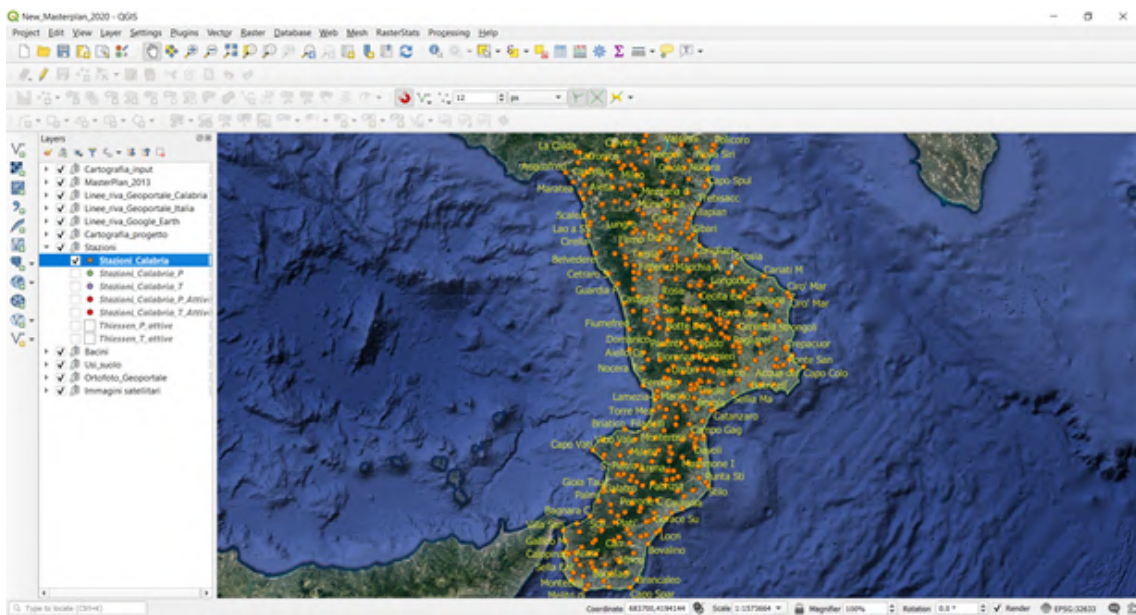


Figura 6.22: Piattaforma GIS: area tematica “Stazioni”, layer delle stazioni termo-pluviometriche calabresi.

Bacini

In quest'area tematica sono presenti gli shapefile relativi ai tematismi elaborati per ciascun bacino e relativi a:

- Bacino idrografico;
- Reticolo idrografico;
- Area d'influenza delle stazioni pluviometriche attive;
- Area d'influenza delle stazioni termometriche attive;
- Carta geologica;
- Carta litologica;
- Usi del suolo.

La Figura 6.23 sottostante mostra, a titolo di esempio, i tematismi elaborati per la fiumara Allaro.

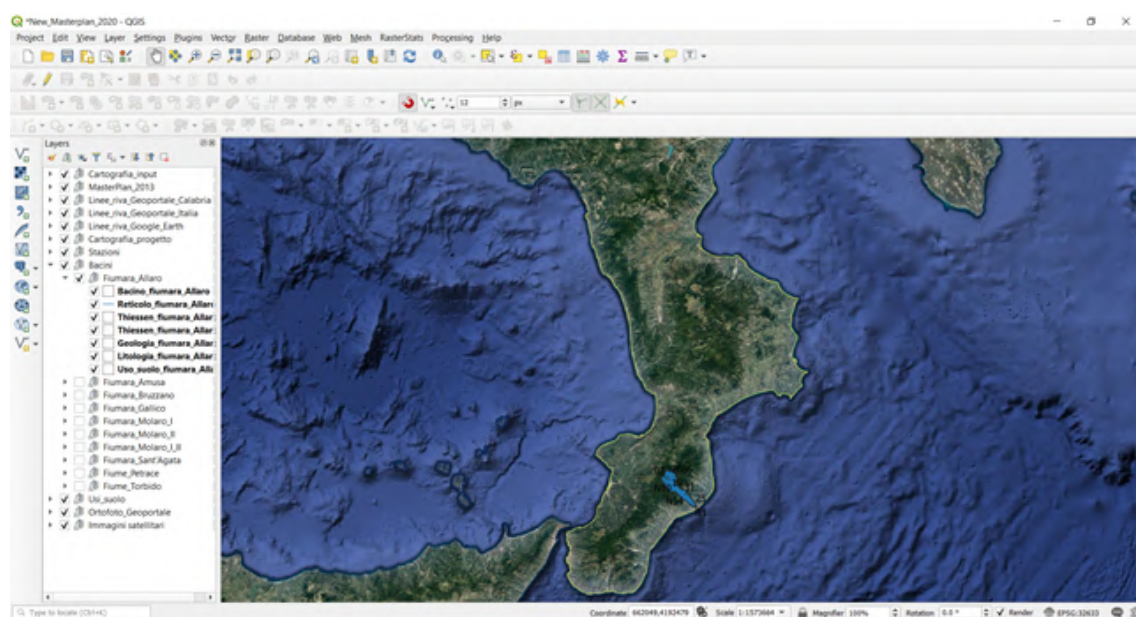


Figura 6.23: Piattaforma GIS: area tematica “Bacini”, layer dei tematismi elaborati per la fiumara Allaro.

Usi suolo

In quest'area tematica sono presenti gli shapefile relativi alle tipologie di usi del suolo calabrese, codificati secondo la Corine Land Cover (CLC) e acquisiti dall'apposita sezione dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale ISPRA (<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/copertura-del-suolo/corine-land-cover>) e relativi a:

- CLC di IV livello del 2000;
- CLC di IV livello del 2018.

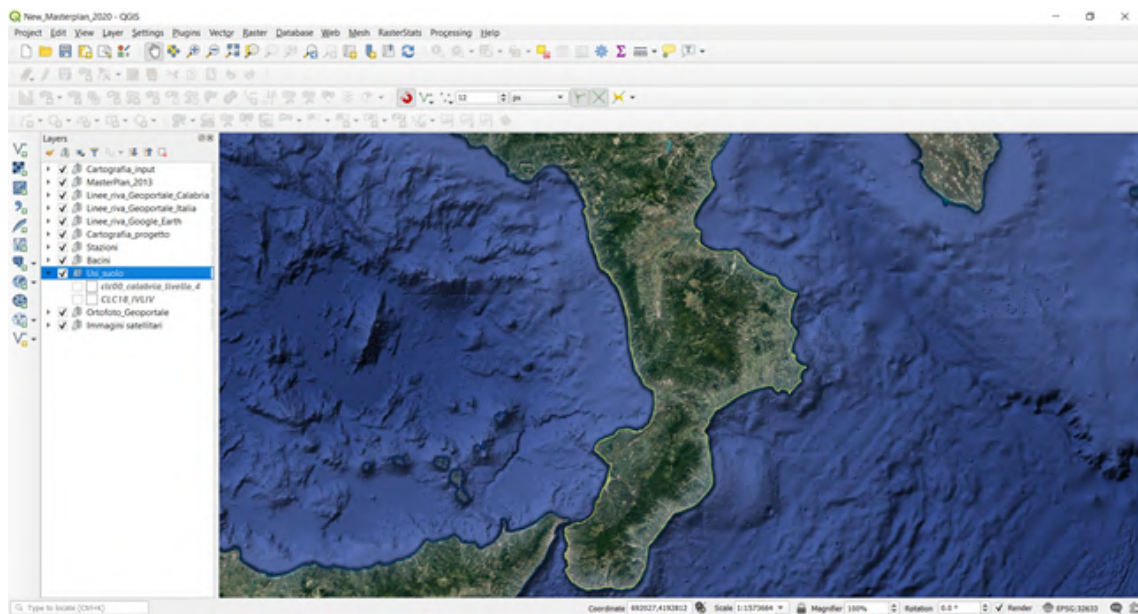


Figura 6.24: Piattaforma GIS: area tematica “Usi suolo”.

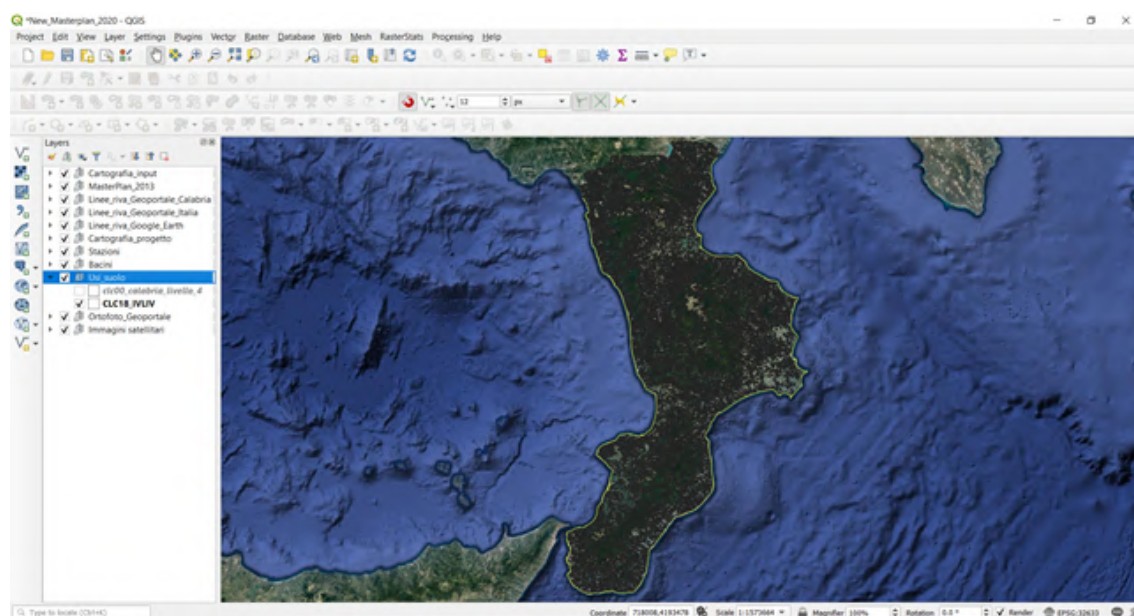


Figura 6.25: Piattaforma GIS: area tematica “Usi suolo”, layer della CLC di IV livello del 2018.

Ortofoto del Geoportale dell’Italia

In quest’area tematica sono presenti le ortofoto presenti nel Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>), visualizzate utilizzando i servizi WMS e relative a:

- Ortofoto del 1989;
- Ortofoto del 1996;
- Ortofoto del 2006;
- Ortofoto del 2012;
- Date di acquisizione delle ortofoto del 1989;
- Date di acquisizione delle ortofoto del 1996;
- Date di acquisizione delle ortofoto del 2006;
- Date di acquisizione delle ortofoto del 2012.

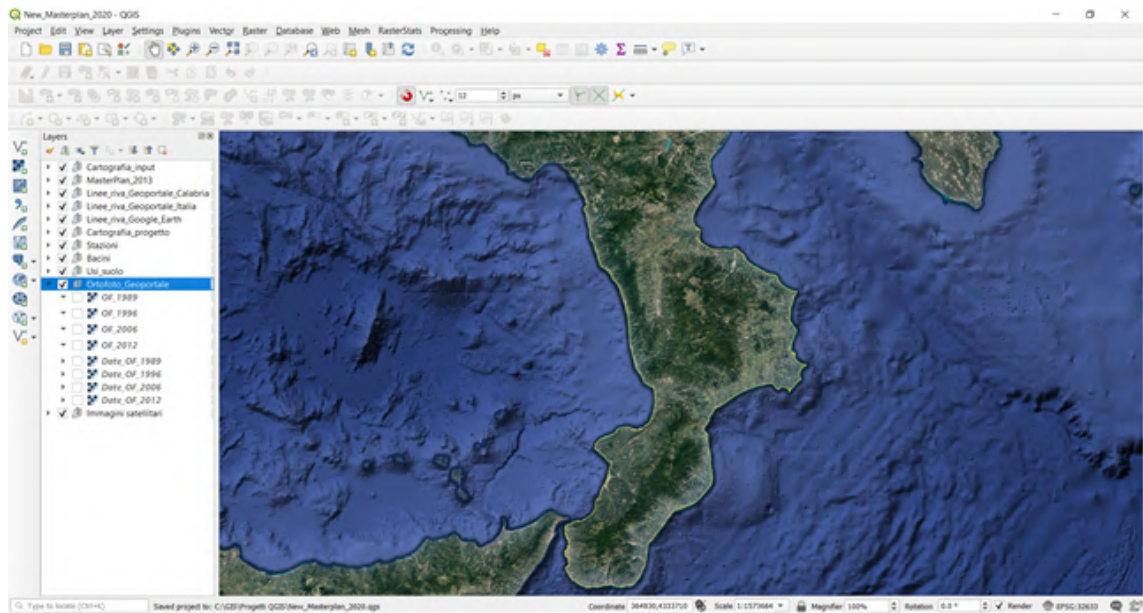


Figura 6.26: Piattaforma GIS: area tematica “Ortofoto Geoportale Italia”.

Immagini satellitari

In quest’area tematica sono presenti le immagini satellitari di Google Earth, acquisite mediante il plugin “QuickMapServices” ed utilizzate come sfondo dell’intera piattaforma GIS.

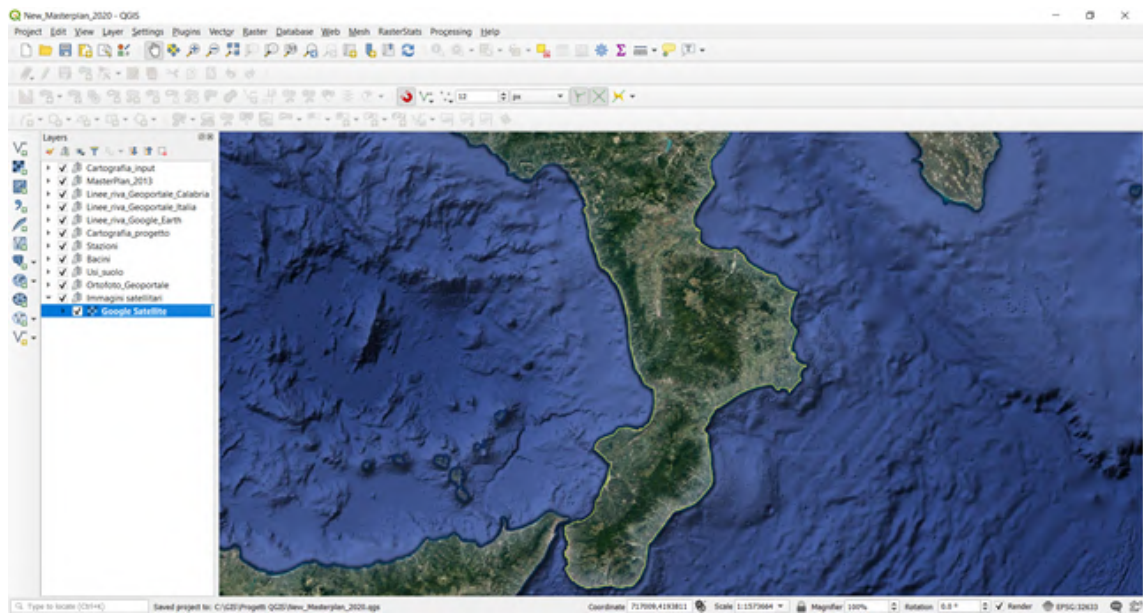


Figura 6.27: Piattaforma GIS: area tematica “Immagini satellitari”.

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro presentato ha riguardato la definizione di una nuova metodologia per la valutazione del rischio da erosione costiera, applicata in 54 località campione della regione Calabria, di cui 32 localizzate sul versante ionico, 3 nell'area dello Stretto di Messina e 19 sul versante tirrenico.

In seguito alla ricerca ed analisi bibliografica delle principali metodologie di valutazione del rischio da erosione costiera, presenti sia nell'ambito della letteratura scientifica che nell'ambito normativo e delle pubbliche amministrazioni, è stata individuata come tipologia metodologica quella basata su indici, per la sua semplicità di applicazione e visualizzazione su GIS.

Partendo dalla classica definizione del rischio, come prodotto di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, la metodologia elaborata ha definito i relativi indici: un indice di pericolosità, che tiene conto di tutte le variabili che possono essere individuate come forzanti del processo di erosione costiera; un indice di vulnerabilità, funzione di tutti i fattori che permettono di descrivere il grado di suscettibilità del territorio al fenomeno considerato; e un indice di esposizione, definito in funzione del valore dei beni a rischio. Tutte le variabili di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione considerate per la definizione dei relativi indici sono state valutate mediante una classificazione in cinque classi, a cui è stato attribuito un valore numerico variabile in una scala compresa tra 1 e 5. I valori degli indici di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione ottenuti sono stati poi normalizzati, in modo da assumere valori compresi tra 0 e 1.

Ciascuna delle classi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione è stata efficacemente calibrata a seconda delle variabili considerate, con riferimento alle caratteristiche del territorio calabrese: in particolare, ad una classe corrispondente ad un grado molto basso è stato attribuito il punteggio 1, a quelle corrispondenti ad un grado molto alto è stato attribuito un punteggio pari a 5.

La metodologia elaborata può essere articolata in cinque fasi principali:

1. Definizione dell'area di pericolosità costiera;
2. Determinazione degli indici di pericolosità costiera e valutazione dell'indice complessivo;
3. Determinazione degli indici di vulnerabilità costiera e valutazione dell'indice complessivo;
4. Determinazione degli indici di esposizione costiera e valutazione dell'indice complessivo;
5. Valutazione dell'indice di rischio costiero.

In particolare, per quanto riguarda l'area di pericolosità, si è tenuto conto del run-up e set-up ondosi, determinati in funzione di un periodo di ritorno di 100 anni, e del massimo livello del mare, ottenuto considerando la marea (astronomica e metereologica) e l'innalzamento del livello per effetto dei cambiamenti climatici previsto dall'IPCC fra 100 anni secondo lo scenario più gravoso.

La pericolosità costiera è stata definita in funzione di cinque indici, relativi all'innalzamento del livello medio del mare per effetto dei cambiamenti climatici, all'escursione media di marea, alle correnti marine, al vento e al clima ondoso; il loro contributo è stato considerato attribuendo un peso diverso a seconda dell'entità della loro incidenza nel processo di erosione costiera, stabilito in seguito ad un'attenta valutazione scientifica e ad un confronto con i decisori politici della Regione Calabria.

La vulnerabilità costiera è stata valutata in funzione di undici indici, che hanno permesso di tenere conto della tipologia della costa, delle sue caratteristiche morfologiche, relative sia alla parte emersa che a quella sommersa, del suo trend evolutivo, del trasporto solido litoraneo e fluviale, della subsidenza del terreno, della presenza e delle caratteristiche di vegetazione e sistemi dunali, della presenza di opere di difesa costiere e portuali e del grado di antropizzazione della linea di riva.

L'esposizione costiera è stata definita in funzione di due indici, uno relativo alla popolazione residente nell'area di pericolosità ed uno relativo alle classi di uso del suolo; il loro contributo è stato considerato attribuendo un peso diverso, stabilito in seguito ad un'attenta valutazione e ad un confronto con i decisori politici della Regione Calabria.

Infine, la valutazione dell'indice del rischio costiero per le 54 località calabresi esaminate ha evidenziato un grado di rischio basso per il 16% delle località, un grado di rischio medio-basso

per il 54% delle località, un grado di rischio medio per il 26% delle località ed un grado di rischio medio-alto per il 4% delle località. Inoltre, i risultati ottenuti hanno evidenziato come il rischio maggiore da erosione costiera è stato riscontrato nelle località situate sul versante tirrenico della Calabria, coerentemente con l'aumento del grado di antropizzazione che le ha contraddistinte negli ultimi cinquant'anni.

Pertanto, la procedura elaborata ha permesso di tenere conto di tutti i fattori che influenzano il rischio costiero e gli obiettivi prefissati all'inizio del lavoro possono ritenersi raggiunti.

La metodologia elaborata è stata quindi calibrata su scala regionale, ma può essere definita “multi-scala”, in quanto la procedura definita è tale da consentire che la valutazione del rischio costiero possa essere effettuata a scala locale, comunale, intercomunale, provinciale o interprovinciale, a seconda della scelta dell'area di applicazione in funzione dell'obiettivo da perseguire. Inoltre, la sua definizione è di validità generale, per cui ricalibrando opportunamente le classi di pericolosità e di vulnerabilità ed il sistema di pesi da assegnare agli indici, è potenzialmente applicabile in qualunque altra regione.

La metodologia sviluppata può essere definita anche “multi-rischio”, oltre che “multi-scala”, in quanto la maggior parte dei fattori che entrano in gioco nel fenomeno di erosione costiera possono anche determinare fenomeni di inondazione: pertanto, attribuendo semplicemente un sistema di pesi differente da quello utilizzato per il rischio di erosione costiera, è possibile determinare anche il rischio di inondazione costiera.

Un altro vantaggio della nuova metodologia sviluppata riguarda la facilità di implementazione in ambiente GIS. Nell'ambito dello studio effettuato è stata, infatti, sviluppata una piattaforma, implementata su QGIS, che servirà come base per l'implementazione di una successiva piattaforma di libero accesso, che dia la possibilità ad un qualunque utente di utilizzare la procedura elaborata, inserendo le condizioni geomorfologiche, meteomarine e quelle relative a tutti i fattori considerati e ottenendo la mappatura della pericolosità, della vulnerabilità, dell'esposizione e infine del rischio costiero.

Pertanto, gli sviluppi futuri del lavoro presentato prevedono senz'altro l'implementazione su QGIS di un plug-in che permetta ad un qualunque utente di inserire i dati di input della procedura elaborata ed ottenere in output i valori degli indici con le relative mappe. Il plug-in sarà soltanto il primo passo per lo sviluppo di una piattaforma GIS FOSS4G (Free Open Source System for Geospatial) di libero accesso, la quale, grazie ad un'interfaccia WebGIS front-end client, dia all'utente

la possibilità di inserire tutti i dati di input e di impostare i pesi in modo opportuno in base alle caratteristiche della località in esame o allo scopo dello studio. Tutti i parametri verranno georeferenziati e gestiti sotto forma di dati di tipo raster. La piattaforma sarà, quindi, in grado di mostrare il raster dei singoli parametri ed il raster finale dato dalla somma dei differenti parametri, in modo da ottenere le mappe di pericolosità, vulnerabilità, esposizione e rischio. Tale attività necessiterà del supporto di risorse dotate di competenze tecniche specifiche.

Inoltre, potrà essere definito un differente sistema di pesi, valido per la regione Calabria, per la valutazione del rischio da inondazione costiera, in modo tale da ottenere una metodologia multi-rischio. Infine, la stima di alcuni fattori, come ad esempio il trasporto solido litoraneo e fluviale, potrà essere determinato mediante l'ausilio di modelli numerici, al fine di ottenere risultati più precisi ed aumentare l'accuratezza dei risultati su scala locale.

In conclusione, grazie alla possibilità di accedere alla piattaforma GIS, lo studio effettuato risulta di interesse per gli stakeholders e le pubbliche amministrazioni per l'individuazione su base scientifica di un ordine di priorità degli interventi di difesa costiera e, di conseguenza, per una gestione e pianificazione efficace del territorio.

Appendice

Tabella I: Grandezze relative al moto ondoso stimate per ogni località esaminata.

Cod.	Località esaminata	Φ [N/s]	α [°]	β [°]	h (1) [m]	h (10) [m]	h (20) [m]	h (50) [m]	h (100) [m]	h (200) [m]	h (500) [m]	Ru (1) [m]	Ru (10) [m]	Ru (20) [m]	Ru (50) [m]	Ru (100) [m]	Ru (200) [m]	Ru (500) [m]
4530	Montegiordano Marina	2894	145		3.7	5.2	5.6	6.2	6.7	7.1	7.7	0.8	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	2542	172		3.7	5.2	5.6	6.2	6.6	7.1	7.6	0.9	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
4848	Trebisacce	2599	100		3.7	5.0	5.4	5.9	6.2	6.6	7.1	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
5011	Villapiana Lido	1769	93		3.2	4.3	4.7	5.1	5.4	5.8	6.2	0.7	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4
5173	Rossano	656	117		2.8	3.7	4.0	4.4	4.7	5.0	5.4	1.4	1.8	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6
5333	Marina di Calopezzati	2481	140	20	3.5	4.7	5.1	5.5	5.9	6.2	6.7	0.8	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.5
5496	Cariati	2286	68	178	3.6	4.8	5.2	5.7	6.0	6.4	6.9	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
5497	Crucoli Torretta	4278	162	22	4.1	5.5	5.9	6.5	6.9	7.3	7.8	0.9	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
5832	Cirò Marina	4955	120		4.5	6.1	6.5	7.1	7.6	8.0	8.6	1.0	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
6004	Torre Melissa	5297	135		4.5	6.1	6.5	7.1	7.5	8.0	8.6	1.0	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
6177	Crotone – Zigari	5568	128		4.5	6.1	6.6	7.2	7.6	8.1	8.7	1.0	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
6352	Crotone	6212	152	12	4.6	6.2	6.6	7.2	7.7	8.1	8.7	1.0	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	5726	118	168	4.6	6.2	6.6	7.2	7.6	8.1	8.6	1.0	1.4	1.5	1.6	1.8	1.8	2.0
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	6262	87	147	4.8	6.3	6.8	7.4	7.8	8.2	8.8	1.1	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	4799	2	132	4.4	6.0	6.4	7.0	7.5	7.9	8.5	1.0	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
6898	Cropani	5032	52		4.2	5.6	6.1	6.6	7.1	7.5	8.0	1.0	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
6897	Catanzaro Lido	4431	78		3.9	5.5	5.9	6.5	6.9	7.4	8.0	0.9	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
7080	Soverato	2795	164		3.9	5.5	6.0	6.6	7.1	7.6	8.2	0.9	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9
7262	San Sostene Marina	4119	133	53	4.0	5.5	6.0	6.6	7.1	7.5	8.1	0.9	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9
7443	Badolato	4832	135	55	4.2	5.8	6.3	7.0	7.5	7.9	8.6	1.0	1.3	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
7624	Monasterace Marina	5536	110	30	4.2	5.8	6.3	6.9	7.4	7.8	8.4	1.0	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9
7807	Riace Marina	6805	88	8	4.5	6.3	6.8	7.4	7.9	8.4	9.0	1.0	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.1
7990	Marina di Caulonia	6123	76	1	4.3	5.8	6.3	6.9	7.3	7.8	8.3	1.0	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9
7989	Roccella Ionica	4792	62		3.9	5.3	5.8	6.3	6.7	7.2	7.7	0.9	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8
8168	Locri	4586	82		3.9	5.3	5.7	6.3	6.7	7.1	7.7	0.9	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8
8344	Bovalino	5417	86	16	4.1	5.7	6.2	6.8	7.2	7.7	8.3	0.9	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9
8514	Ferruzzano Marina	6139	95	35	4.3	5.9	6.4	7.0	7.4	7.9	8.5	1.0	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
8685	Brancaleone Marina	5692	87	27	4.2	5.8	6.3	7.0	7.4	7.9	8.5	1.0	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	2.0
8864	Palizzi Marina	4929	24		4.3	5.8	6.2	6.8	7.2	7.6	8.2	1.0	1.3	1.4	1.6	1.6	1.7	1.9

Cod.	Località esaminata	Φ	α	β	$h(1)$	$h(10)$	$h(20)$	$h(50)$	$h(100)$	$h(200)$	$h(500)$	$Ru(1)$	$Ru(10)$	$Ru(20)$	$Ru(50)$	$Ru(100)$	$Ru(200)$	$Ru(500)$
		[N/s]	[°]	[°]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
8863	Bova Marina	5152	38		4.2	5.7	6.1	6.7	7.1	7.5	8.0	1.0	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
8862	Melito di Porto Salvo	4426	31		4.0	5.4	5.8	6.3	6.7	7.1	7.6	0.9	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
8683	Lazzaro	2117	12		3.6	5.0	5.3	5.8	6.2	6.6	7.1	3.2	4.4	4.7	5.2	5.5	5.9	6.3
-	Pellaro	275	1	101	1.3	1.7	1.8	2.0	2.1	2.2	2.3	1.7	2.2	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0
-	Gallico	539	49		1.5	2.1	2.3	2.6	2.7	2.9	3.1	1.3	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4	2.6
-	Porticello	1995	98		2.6	3.9	4.3	4.8	5.2	5.6	6.1	0.6	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
7988	Favazzina	2655	77		3.6	5.3	5.8	6.4	7.0	7.5	8.1	0.8	1.2	1.3	1.5	1.6	1.7	1.9
7806	Palmi	4757	99		4.4	6.2	6.8	7.5	8.1	8.6	9.3	1.0	1.4	1.6	1.7	1.8	2.0	2.1
7622	San Ferdinando	4863	105		4.4	6.2	6.7	7.4	7.9	8.4	9.1	1.0	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.1
7442	Santa Maria di Ricadi	3814	125		3.9	5.5	6.0	6.7	7.2	7.7	8.3	0.9	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9
7261	Capo Vaticano	6729	77		4.9	6.9	7.5	8.3	8.9	9.5	10.3	1.1	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2	2.4
7078	Tropea	6412	51		4.7	6.8	7.4	8.2	8.8	9.4	10.2	1.1	1.5	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3
6896	Vibo Marina	4972	58		4.2	6.2	6.8	7.6	8.1	8.7	9.5	1.0	1.4	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2
6711	Gizzeria Lido	4821	119		4.2	6.1	6.6	7.4	7.9	8.5	9.2	1.0	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.1
6527	Falerna Marina	7284	136		5.0	7.1	7.7	8.6	9.2	9.8	10.6	1.1	1.6	1.8	2.0	2.1	2.2	2.4
6350	Amantea	7008	105		4.8	6.8	7.4	8.2	8.8	9.4	10.2	1.1	1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3
6175	Belmonte Marina	6892	93		4.7	6.7	7.3	8.1	8.6	9.2	10.0	1.1	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3
6002	San Lucido	6620	100		4.6	6.6	7.1	7.9	8.5	9.0	9.8	1.1	1.5	1.6	1.8	1.9	2.1	2.2
5830	Marina di Fuscaldo	5745	99		4.3	6.0	6.6	7.2	7.8	8.3	8.9	1.0	1.4	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0
5659	Cetraro Marina	7664	112		4.9	6.9	7.5	8.2	8.8	9.3	10.1	1.1	1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3
5493	Sanginetto Lido	7470	91		4.9	6.8	7.3	8.0	8.5	9.1	9.8	1.1	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.2
5331	Marina di Belvedere	7803	93		4.9	6.9	7.5	8.2	8.8	9.4	10.1	1.1	1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	6938	93		4.7	6.5	7.1	7.8	8.3	8.9	9.6	1.1	1.5	1.6	1.8	1.9	2.0	2.2
5009	Scalea	6266	90		4.5	6.3	6.8	7.5	8.0	8.5	9.2	1.0	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1
4846	Tortora Marina	4956	102		4.1	5.7	6.2	6.8	7.2	7.7	8.3	0.9	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9

Tabella II: Indici di moto ondoso valutati per ogni località esaminata.

Cod.	Località esaminata	I_{ϕ}	$I_{\alpha,\beta}$	$I_{\Delta h}$	I_{Ru}	Cod.	Località esaminata	I_{ϕ}	$I_{\alpha,\beta}$	$I_{\Delta h}$	I_{Ru}
4530	Montegiordano Marina	0.43	0.39	0.90	0.30	8685	Brancaleone Marina	0.84	0.74	0.96	0.32
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	0.37	0.09	0.87	0.29	8864	Palizzi Marina	0.72	0.27	0.87	0.29
4848	Trebisacce	0.38	0.89	0.75	0.25	8863	Bova Marina	0.76	0.42	0.86	0.29
5011	Villapiana Lido	0.26	0.97	0.67	0.23	8862	Melito di Porto Salvo	0.65	0.34	0.80	0.27
5173	Rossano	0.10	0.70	0.58	0.42	8683	Lazzaro	0.31	0.13	0.77	1.00
5333	Marina di Calopezzati	0.36	0.35	0.72	0.24	-	Pellaro	0.14	0.42	0.29	1.00
5496	Cariati	0.34	0.43	0.73	0.25	-	Gallico	0.27	0.54	0.45	0.99
5497	Crucoli Torretta	0.63	0.22	0.82	0.27	-	Porticello	1.00	0.91	1.00	0.60
5832	Cirò Marina	0.73	0.67	0.91	0.31	7988	Favazzina	0.34	0.86	0.80	0.80
6004	Torre Melissa	0.78	0.50	0.91	0.30	7806	Palmi	0.61	0.90	0.87	0.87
6177	Crotone – Zigari	0.82	0.58	0.92	0.31	7622	San Ferdinando	0.62	0.83	0.84	0.84
6352	Crotone	0.91	0.22	0.92	0.31	7442	Santa Maria di Ricadi	0.49	0.61	0.78	0.78
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	0.84	0.49	0.91	0.31	7261	Capo Vaticano	0.86	0.86	0.95	0.95
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	0.92	0.71	0.90	0.30	7078	Tropea	0.82	0.57	0.96	0.96
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	0.71	0.19	0.90	0.30	6896	Vibo Marina	0.64	0.64	0.93	0.93
6898	Cropani	0.74	0.58	0.86	0.29	6711	Gizzeria Lido	0.62	0.68	0.89	0.89
6897	Catanzaro Lido	0.65	0.87	0.90	0.30	6527	Falerna Marina	0.93	0.49	1.00	1.00
7080	Soverato	0.41	0.18	0.96	0.32	6350	Amantea	0.90	0.83	0.94	0.94
7262	San Sostene Marina	0.61	0.54	0.93	0.31	6175	Belmonte Marina	0.88	0.97	0.92	0.92
7443	Badolato	0.71	0.54	0.98	0.33	6002	San Lucido	0.85	0.89	0.91	0.91
7624	Monasterace Marina	0.81	0.59	0.94	0.32	5830	Marina di Fuscaldo	0.74	0.90	0.82	0.82
7807	Riace Marina	1.00	0.56	1.00	0.34	5659	Cetraro Marina	0.98	0.76	0.91	0.91
7990	Marina di Caulonia	0.90	0.57	0.90	0.30	5493	Sanginetto Lido	0.96	0.99	0.86	0.86
7989	Roccella Ionica	0.70	0.69	0.85	0.29	5331	Marina di Belvedere	1.00	0.97	0.92	0.92
8168	Locri	0.67	0.91	0.85	0.29	5172	Marina di Santa Maria del Cedro	0.89	0.97	0.86	0.86
8344	Bovalino	0.80	0.64	0.92	0.31	5009	Scalea	0.80	1.00	0.83	0.83
8514	Ferruzzano Marina	0.90	0.68	0.92	0.31	4846	Tortora Marina	0.64	0.87	0.74	0.74

Tabella III: Valori degli indici di pericolosità calcolati per ogni località esaminata.

Cod.	Località esaminata	SLR	Marea	Correnti	Vento	Clima	Cod.	Località esaminata	SLR	Marea	Correnti	Vento	Clima
		[mm/anno]	[m]	[nodi]	[%]	ondoso			[mm/anno]	[m]	[nodi]	[%]	ondoso
4530	Montegiordano Marina	3.4	0.87	0.4	0.00	0.51	8685	Brancaleone Marina	3.4	0.90	0.7	6.90	0.72
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	3.4	0.87	0.4	0.00	0.41	8864	Palizzi Marina	3.4	0.72	0.7	0.00	0.54
4848	Trebisacce	3.4	0.87	0.4	0.00	0.57	8863	Bova Marina	3.4	0.72	0.7	0.00	0.58
5011	Villapiana Lido	3.4	0.87	0.4	0.00	0.53	8862	Melito di Porto Salvo	3.4	0.72	0.7	0.01	0.52
5173	Rossano	3.4	0.87	0.4	0.00	0.45	8683	Lazzaro	3.4	0.72	0.7	0.00	0.55
5333	Marina di Calopezzati	3.4	0.87	0.4	0.00	0.42	-	Pellaro	3.4	0.69	1	0.00	0.46
5496	Cariati	3.4	0.87	0.4	0.00	0.44	-	Gallico	3.4	0.69	2	0.00	0.56
5497	Crucoli Torretta	3.4	0.87	0.4	0.00	0.48	-	Porticello	3.4	0.69	4	0.00	0.88
5832	Cirò Marina	3.4	0.90	0.4	0.00	0.65	7988	Favazzina	3.4	0.88	0.7	0.00	0.70
6004	Torre Melissa	3.4	0.90	0.4	0.00	0.62	7806	Palmi	3.4	0.88	0.7	0.00	0.81
6177	Crotone – Zigari	3.4	0.90	0.4	0.53	0.66	7622	San Ferdinando	3.4	0.88	0.7	0.68	0.78
6352	Crotone	3.4	0.90	0.4	0.75	0.59	7442	Santa Maria di Ricadi	3.4	0.88	0.7	0.36	0.67
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	3.4	0.90	0.4	0.00	0.64	7261	Capo Vaticano	3.4	0.88	0.7	0.66	0.90
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	3.4	0.90	0.4	0.00	0.71	7078	Tropea	3.4	0.88	0.7	0.58	0.82
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	3.4	0.90	0.7	0.00	0.53	6896	Vibo Marina	3.4	0.88	0.7	0.00	0.79
6898	Cropani	3.4	0.90	0.7	0.00	0.62	6711	Gizzeria Lido	3.4	0.88	0.7	0.00	0.77
6897	Catanzaro Lido	3.4	0.90	0.7	0.00	0.68	6527	Falerna Marina	3.4	0.88	0.7	0.00	0.86
7080	Soverato	3.4	0.90	0.7	0.00	0.47	6350	Amantea	3.4	0.88	0.7	0.00	0.90
7262	San Sostene Marina	3.4	0.90	0.7	0.00	0.60	6175	Belmonte Marina	3.4	0.88	0.7	0.00	0.92
7443	Badolato	3.4	0.90	0.7	0.00	0.64	6002	San Lucido	3.4	0.88	0.7	0.00	0.89
7624	Monasterace Marina	3.4	0.90	0.7	0.00	0.67	5830	Marina di Fuscaldo	3.4	0.88	0.7	0.00	0.82
7807	Riace Marina	3.4	0.90	0.7	0.02	0.72	5659	Cetraro Marina	3.4	0.88	0.7	0.01	0.89
7990	Marina di Caulonia	3.4	0.90	0.7	0.02	0.67	5493	Sanginetto Lido	3.4	0.88	0.7	0.00	0.92
7989	Roccella Ionica	3.4	0.90	0.7	0.02	0.63	5331	Marina di Belvedere	3.4	0.88	0.7	0.00	0.95
8168	Locri	3.4	0.90	0.7	0.81	0.68	5172	Marina di Santa Maria del Cedro	3.4	0.88	0.7	0.00	0.90
8344	Bovalino	3.4	0.90	0.7	0.55	0.67	5009	Scalea	3.4	0.88	0.7	0.00	0.86
8514	Ferruzzano Marina	3.4	0.90	0.7	5.99	0.70	4846	Tortora Marina	3.4	0.88	0.7	0.00	0.74

Tabella IV-1: Grandezze indicative della vulnerabilità valutate per ogni litorale esaminato.

Cod.	Località esaminata	Larghezza media spiaggia [m]	Pendenza spiaggia [%]	Pendenza fondale [%]	Larghezza media dune [m]	Altezza media dune [m]	Percentuale linea di costa protetta da dune [%]	Larghezza media vegetazione (corretta) [m]	Percentuale linea di costa protetta da vegetazione [%]	Posidonia oceanica
4530	Montegiordano Marina	29.4	9.8	0.9	15	4	23	7	31	Presenza
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	36.4	9.7	1.1	8	6	7	5	8	Presenza
4848	Trebisacce	26.3	5.1	2.5	7	2	11	3	20	Assenza
5011	Villapiana Lido	96.6	4.8	1.6	18	4	12	18	12	Presenza
5173	Rossano	67.7	2.4	10.0	31	3	46	11	66	Assenza
5333	Marina di Calopezzati	15.2	2.7	1.1	27	2	15	10	35	Presenza
5496	Cariati	34.8	4.7	1.1	20	1	19	12	48	Presenza
5497	Crucoli Torretta	34.1	3.4	1.0	26	2	18	7	48	Presenza
5832	Cirò Marina	44.1	6.7	2.5	16	4	1	11	17	Assenza
6004	Torre Melissa	32.6	6.4	0.9	13	4	9	6	37	Assenza
6177	Crotone – Zigari	24.8	1.8	0.6	20	3	18	7	21	Assenza
6352	Crotone	37.8	4.1	1.5	15	5	13	11	11	Presenza
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	16.2	9.8	1.7	0	0	0	0	0	Presenza
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	22.4	5.9	1.1	10	6	12	5	80	Presenza
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	16.8	9.2	0.9	45	5	39	23	39	Presenza
6898	Cropani	44.0	5.4	1.0	21	3	73	22	73	Assenza
6897	Catanzaro Lido	34.6	8.8	1.6	0	0	0	0	0	Assenza
7080	Soverato	32.5	11.0	2.2	16	5	12	8	12	Assenza
7262	San Sostene Marina	59.8	4.4	1.8	20	3	26	14	26	Assenza
7443	Badolato	102.7	3.7	2.3	94	3	64	86	64	Assenza
7624	Monasterace Marina	36.5	13.0	1.4	51	7	16	26	4	Assenza
7807	Riace Marina	42.5	6.8	1.1	22	3	77	23	77	Assenza
7990	Marina di Caulonia	43.1	3.6	1.7	44	4	25	29	29	Assenza
7989	Roccella Ionica	38.6	8.7	1.0	17	4	45	10	45	Assenza
8168	Locri	38.1	4.3	1.4	18	4	7	12	7	Assenza
8344	Bovalino	35.8	5.4	1.3	30	4	33	25	33	Assenza
8514	Ferruzzano Marina	33.3	5.7	1.1	27	5	15	42	15	Assenza

Cod.	Località esaminata	Larghezza media spiaggia [m]	Pendenza spiaggia [%]	Pendenza fondale [%]	Larghezza media dune [m]	Altezza media dune [m]	Percentuale linea di costa protetta da dune [%]	Larghezza media vegetazione (corretta) [m]	Percentuale linea di costa protetta da vegetazione [%]	Posidonia oceanica
8685	Brancaleone Marina	24.5	6.7	1.1	13	3	34	8	34	Presenza
8864	Palizzi Marina	32.9	4.4	1.4	11	3	46	7	52	Assenza
8863	Bova Marina	26.8	5.5	1.9	13	4	13	7	13	Assenza
8862	Melito di Porto Salvo	31.3	10.6	2.9	10	5	6	7	6	Assenza
8683	Lazzaro	22.7	13.9	20.0	0	0	0	0	0	Assenza
-	Pellaro	12.7	6.4	24.6	0	0	0	10	23	Assenza
-	Gallico	27.6	6.2	18.5	29	3	7	17	6	Presenza
-	Porticello	17.8	5.8	4.7	0	0	0	7	6	Assenza
7988	Favazzina	25.9	8.2	2.4	0	0	0	7	10	Presenza
7806	Palmi	58.5	3.8	2.8	35	4	74	22	39	Presenza
7622	San Ferdinando	77.8	2.9	3.7	57	4	80	35	80	Assenza
7442	Santa Maria di Ricadi	14.3	16.5	2.2	0	0	0	0	0	Presenza
7261	Capo Vaticano	30.3	10.9	2.0	0	0	0	14	15	Presenza
7078	Tropea	46.4	8.8	1.7	0	0	0	0	0	Presenza
6896	Vibo Marina	43.6	8.3	1.9	27	2	25	17	36	Presenza
6711	Gizzeria Lido	88.0	3.6	0.8	37	4	45	37	46	Assenza
6527	Falerna Marina	46.7	6.1	1.3	18	4	8	13	7	Assenza
6350	Amantea	52.6	7.0	1.5	0	0	0	20	5	Assenza
6175	Belmonte Marina	45.0	7.0	2.6	0	0	0	0	0	Assenza
6002	San Lucido	49.7	11.5	1.4	0	0	0	0	0	Assenza
5830	Marina di Fuscaldo	29.9	5.8	1.6	25	4	3	24	3	Assenza
5659	Cetraro Marina	45.9	5.0	1.4	0	0	0	6	9	Assenza
5493	Sanginetto Lido	32.2	4.5	1.3	0	0	0	0	0	Assenza
5331	Marina di Belvedere	28.7	6.7	1.5	26	4	6	17	8	Presenza
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	100.7	3.3	1.8	0	0	0	7	11	Assenza
5009	Scalea	73.6	3.5	1.4	0	0	0	0	0	Assenza
4846	Tortora Marina	45.7	3.9	2.7	0	0	0	0	0	Assenza

Tabella IV-2: Grandezze indicative della vulnerabilità valutate per ogni litorale esaminato.

Cod.	Località esaminata	Subsidenza [mm/anno]	Velocità di variazione della linea di costa [m/anno]	Trasporto solido litoraneo [m ³ /anno]	Apporti solidi fluviali [m ³ /anno]	Percentuale di linea di costa protetta [%]	A [m]	Grado di antropizzazione della linea di costa [%]
4530	Montegiordano Marina	-3	0.12	-83684	4565	6.54	-	0.0
4689	Marina di Roseto Capo Spulico	-3	0.61	-126364	11860	21.63	-	0.0
4848	Trebisacce	-3	-0.07	-7149	10677	-	-	0.0
5011	Villapiana Lido	-5	1.16	2815	21224	-	-	0.0
5173	Rossano	-5	-0.04	-20156	64459	-	-	0.0
5333	Marina di Calopezzati	-3	-1.39	-32339	6511	-	-	5.7
5496	Cariati	-3	-0.22	51973	798	7.65	457	3.6
5497	Crucoli Torretta	-3	-0.69	-14669	27971	7.32	-	7.1
5832	Cirò Marina	-3	-0.51	-241006	21706	9.68	172	0.0
6004	Torre Melissa	-3	0.31	-188050	56425	39.74	-	1.4
6177	Crotone – Zigari	-3	-0.83	-208761	14453	-	-	0.0
6352	Crotone	-3	0.00	-229772	0	35.53	297	2.4
6528	Isola Capo Rizzuto – Marinella	-3	-0.10	-119120	472	44.57	-	0.0
6715	Isola Capo Rizzuto – Centro	-3	0.10	-16041	0	-	-	0.0
6899	Isola Capo Rizzuto – Le Castella	-3	-0.10	75405	0	-	-	0.0
6898	Cropani	-3	0.24	94274	119897	-	-	0.0
6897	Catanzaro Lido	-3	0.86	43097	32620	-	299	0.0
7080	Soverato	-1	0.79	-109268	65879	-	-	0.0
7262	San Sostene Marina	-1	-0.38	-104028	59009	-	-	0.0
7443	Badolato	-1	0.75	-101695	46513	-	167	0.0
7624	Monasterace Marina	-1	-0.33	-61416	13601	-	-	0.0
7807	Riace Marina	-1	0.49	24369	20980	-	-	0.0
7990	Marina di Caulonia	-1	-2.50	69202	149862	-	-	0.0
7989	Roccella Ionica	-1	0.82	213372	7711	2.67	415	0.0
8168	Locri	-1	-0.72	-50871	37194.5	-	-	0.0
8344	Bovalino	-1	-0.44	112397	71078.5	-	-	0.0
8514	Ferruzzano Marina	-1	-0.39	-58353	11379	-	-	0.0
8685	Brancaleone Marina	-1	-0.91	13805	14908	11.61	-	0.0

Cod.	Località esaminata	Subsidenza [mm/anno]	Velocità di variazione della linea di costa [m/anno]	Trasporto solido litoraneo [m³/anno]	Apporti solidi fluviali [m³/anno]	Percentuale di linea di costa protetta [%]	A [m]	Grado di antropizzazione della linea di costa [%]
8864	Palizzi Marina	-1	-0.15	113070	30943	22.23	-	0.0
8863	Bova Marina	-1	-1.05	162883	65401	6.56	-	0.0
8862	Melito di Porto Salvo	-1	-1.11	119118	35573	-	-	0.0
8683	Lazzaro	-1	-0.40	31601	5597	28.32	298	16.2
-	Pellaro	-1	0.26	3536	1885	9.99	-	0.0
-	Gallico	-1	-0.21	18868	5535	45.96	-	0.0
-	Porticello	-1	-0.21	-38472	10499	38.55	-	13.9
7988	Favazzina	-1	0.04	17434	0	32.87	-	3.6
7806	Palmi	-5	0.08	-88089	40387	-	249	0.0
7622	San Ferdinando	-10	-1.16	-97776	75053	-	284	0.0
7442	Santa Maria di Ricadi	-1	0.28	-138352	0	44.57	-	0.0
7261	Capo Vaticano	-1	-0.21	184080	6255	6.53	-	5.7
7078	Tropea	-1	1.33	129503	2902	12.55	318	0.0
6896	Vibo Marina	-1	0.74	145340	16420	11.98	-	4.3
6711	Gizzeria Lido	-1	-1.94	-138629	7054	-	-	0.0
6527	Falerna Marina	-1	4.84	-233512	87080	10.68	-	0.0
6350	Amantea	-1	-0.77	-167584	18045	17.90	221	15.3
6175	Belmonte Marina	-1	-1.14	-98187	43486	2.47	-	0.0
6002	San Lucido	-1	-0.02	-130218	19019	47.61	114	13.3
5830	Marina di Fuscaldo	-1	-0.22	-189534	42323	5.40	-	10.1
5659	Cetraro Marina	-1	1.14	-210355	15261	23.67	489	9.8
5493	Sanginetto Lido	-1	0.15	-184800	18274	33.14	60	29.6
5331	Marina di Belvedere	-1	0.48	-164781	1604	24.17	-	21.0
5172	Marina di Santa Maria del Cedro	-1	1.07	-59264	91023	-	-	0.0
5009	Scalea	-1	1.14	73966	66226	-	-	0.0
4846	Tortora Marina	-1	1.05	-116104	60000	-	-	9.7

Bibliografia

- Abuodha, P. A., & Woodroffe, C. D. (2006). Assessing vulnerability of coasts to climate change: A review of approaches and their application to the Australian coast.
- Acosta, A., Ercole, S., Stanisci, A., Pillar, V. D. P., & Blasi, C. (2007). Coastal vegetation zonation and dune morphology in some Mediterranean ecosystems. *Journal of Coastal Research*, 23(6), 1518-1524.
- Acosta, A.T.R. & Ercole S. (2015). Gli habitat delle coste sabbiose italiane: ecologia e problematiche di conservazione. ISPRA, Serie Rapporti, 215/2015.
- Ajedegba, J. O., Choi, J. W., & Jones, K. D. (2019). Analytical modeling of coastal dune erosion at South Padre Island: A consideration of the effects of vegetation roots and shear strength. *Ecological Engineering*, 127, 187-194.
- Anselmi, B., Brondi A., Falchi G., Ferretti O. (1978). Lineamenti granulometrici e mineralogici generali dei sedimenti fluviali e costieri del territorio italiano. *Mem.Soc.Geol.It.* 19, 307 - 314.
- APAT (2007). Atlante delle opere di sistemazione costiera. Manuali e Linee guida 44/2007. ISBN 88-448-0237-6.
- Archetti, R., Gaeta, M. G., Addona, F., Damiani, L., Saponieri, A., Molfetta, M. G., & Bruno, M. F. (2020). Assessment of coastal vulnerability based on the use of integrated low-cost monitoring approach and beach modelling: Two Italian study cases. *Coastal Engineering Proceedings*, (36v), 13-13.

- Arcilla, A., Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I. (2000). "Assessing vulnerability on low-lying coastal areas". Proceeding of SURVAS Expert Workshop on European Vulnerability and Adaptation to impacts of Accelerated Sea-Level Rise (ASLR), Hamburg, Germany, 19th-21st June 2000.
- Armaroli, C., & Duo, E. (2018). Validation of the coastal storm risk assessment framework along the Emilia-Romagna coast. *Coastal Engineering*, 134, 159-167.
- ASCE (1996). *Hydrology Handbook*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice n. 28, <https://doi.org/10.1061/9780784401385>.
- Aucelli, P. P. C., Di Paola, G., Rizzo, A., & Roskopf, C. M. (2017). Rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana.
- Bacci, T., La Porta, B., Maggi, C., Nonnis, O., Paganelli, D., Sante Rende, F., ... & Polifrone, M. (2014). Conservazione e gestione della naturalità negli ecosistemi marino-costieri. Il trapianto delle praterie di Posidonia oceanica. Manuali e linee guida, 106. ISPRA, Roma. ISBN 978-88-448-0642-2
- Bacino, G. L., Dragani, W. C., & Codignotto, J. O. (2019). Changes in wave climate and its impact on the coastal erosion in Samborombón Bay, Río de la Plata estuary, Argentina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 71-80.
- Bagnold, R. A. (1940). Beach formation by waves: some model experiments in a wave tank. (includes photographs). *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 15(1), 27-52.
- Bagnold, R. A. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*: New York. William Morrow & Company.
- Bagnold, R. A. (1963). An approach of marine sedimentation. In: *The Sea*. Vol. 3. M. N. Hill, Interscience, New York, pp. 507-528.

- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. US government printing office.
- Bailard, J. A. (1981). An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C11), 10938-10954.
- Bailard, J. A. (1982). Modeling on-offshore sediment transport in the surfzone. In *Coastal Engineering 1982* (pp. 1419-1438).
- Balica, S. F., Wright, N. G., & Van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural hazards*, 64(1), 73-105.
- Barbaro, G. (2013). Saline Joniche: a predicted disaster. *Disaster Advances* 6: 1-3.
- Barbaro, G. (2016). Master Plan of solutions to mitigate the risk of coastal erosion in Calabria (Italy), a case study. *Ocean & coastal management*, 132, 24-35.
- Barbaro, G., Bombino, G., Foti, G., Barillà, G.C., Mauro, G., Puntorieri, P., Mandalari, M. (2021a). Coastal flooding: case studies in Calabria (Italy). *Proceeding of the X AIT International Conference – Italian Society of Remote Sensing, Cagliari, 13-15 settembre 2021* (evento virtuale).
- Barbaro, G., Bombino, G., Foti, G., Borrello, M.M., Puntorieri, P. (2019). Shoreline evolution near river mouth: Case study of Petrace River (Calabria, Italy). *Regional Studies in Marine Science*, 29.
- Barbaro, G., Fiamma, V., Barrile, V., Foti, G., Ielo, G. (2017). Analysis of the shoreline changes of Reggio Calabria (Italy). *International Journal of Civil Engineering and Technology* 8(10): 1777-1791.

- Barbaro, G., Foti, G., Barillà, G.C. & Frega, F. (2021b). Beaches and dunes erosion: causes and interventions. Case study: Kaulon archaeological site. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), 14.
- Barbaro, G., Foti, G., Mandaglio, G., Mandaglio, M., Sicilia, C. L. (2012). Estimate of sediment transport capacity in the basin of the Fiumara Annunziata (RC). *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 21(1): 696-697.
- Barbaro, G., Foti, G., Sicilia, C.L. (2014a). Coastal erosion in the South of Italy. *Disaster Advances* 7: 37-42.
- Barbaro, G., Foti, G., Sicilia, C.L., Malara, G. (2014b). A formula for the calculation of the longshore sediment transport including spectral effects. *Journal of Coastal Research* 30: 961-966.
- Barillà, G. C., Barbaro, G., Foti, G., Mancuso, P., Fiamma, V., Malesinska, A., ... & Mandalari, M. (2021). Coastal erosion hazard and vulnerability: case study of Porticello, South Calabria, Italy. *Sustainable Water Resources Management XI: Effective Approaches for River Basins and Urban Catchments*, 250, 181.
- Barillà, G. C., Foti, G., Barbaro, G., & Puntorieri, P. (2020a). Shoreline changes of a pocket beach: a remote sensing application. In *Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020)* (Vol. 11524, p. 1152425). International Society for Optics and Photonics.
- Barillà, G.C., Foti, G., Barbaro, G., Currò, F. (2020b). Coastal flood hazard: a quick mapping methodology. Case study: Gioia Tauro (Italy). *Proceedings of 4th International Symposium New Metropolitan Perspectives (ISTH2020)*, Reggio Calabria, 26-28 maggio, 2020.
- Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In *Coastal engineering 1978* (pp. 569-587).

- Battjes, J.A. (1974). Surf similarity. Proceedings of the 14th International Coastal Engineering Conference, vol. 1. American Society of Civil Engineers, pp. 466-480.
- Bayram, A., Larson, M., & Hanson, H. (2007). A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*, 54(9), 700-710.
- Benassai, G., Di Paola, G., & Aucelli, P. P. C. (2015). Coastal risk assessment of a micro-tidal littoral plain in response to sea level rise. *Ocean & Coastal Management*, 104, 22-35.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11), 2375-2383.
- Bijker, E. W. (1971). Longshore transport computations. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 97(4), 687-701.
- Bitelli, G., Bonsignore, F., Pellegrino, I., & Vittuari, L. (2015). Evolution of the techniques for subsidence monitoring at regional scale: the case of Emilia-Romagna region (Italy). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 315-321.
- Boak, E.H., Turner, I.L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research* 21(4): 688-703.
- Boccalaro, F., & Cantasano, N. (2012). *Posidonia oceanica per la difesa delle coste sabbiose. Ovvero come difendere il litorale con l'aiuto delle fanerogame marine. Geologia ambientale*, 20(3), 8-17.
- Boccotti, P. (1997). *Idraulica marittima*. UTET, Torino.
- Boccotti, P. (2000). *Wave mechanics for ocean engineering*. Elsevier.

- Borriello, P., De Angelis, R., Pallottini, E., & Saccomandi, F. (2010). Formazione e gestione delle banquettes di *Posidonia oceanica* sugli arenili. Istituto Superiore per la Protezione Ambientale (ISPRA), Manuali e linee guida, 55, 138.
- Boudouresque, C.F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., Tunesi, L. (2012). Protection and Conservation of *Posidonia Oceanica* Meadows, RaMoGe and RAC/SPA: Tunis, Tunisia, 2012.
- Boudouresque, C., Jeudy de Grissac, A. (1983). L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée: Les interactions entre le plant et le sédiment. *J. de Recherche Océanographique*, 8, 99–122.
- Breaker, L. C., & Ruzmaikin, A. (2013). Estimating rates of acceleration based on the 157-year record of sea level from San Francisco, California, USA. *Journal of Coastal Research*, 29(1), 43-51.
- Bruno, M. F., Motta Zanin, G., Barbanente, A., & Damiani, L. (2021). Understanding the Cognitive Components of Coastal Risk Assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 780.
- Bruno, M. F., Saponieri, A., Molfetta, M. G., & Damiani, L. (2020). The DPSIR approach for coastal risk assessment under climate change at regional scale: The case of apulian coast (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(7), 531.
- Bruun, P. (1954). Coast erosion and the development of beach profiles. Technical Memorandum No. 44, Beach Erosion Board, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Buffa, G., Fantinato, E., & Pizzo, L. (2012). Effects of disturbance on sandy coastal ecosystems of N-Adriatic coasts (Italy). *Biodiversity enrichment in a diverse world*, 13, 339-372.

- Cabrera-Vega, L. L., Cruz-Avero, N., Hernández-Calvento, L., Hernández-Cordero, A. I., & Fernández-Cabrera, E. (2013). Morphological changes in dunes as an indicator of anthropogenic interferences in arid dune fields. *Journal of Coastal Research*, (65 (10065)), 1271-1276.
- Cafaro, F., Cotecchia, F., Lenti, V. (2013). Interpretation and modelling of the subsidence at the archaeological site of Sybaris (Southern Italy). In *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*; Bilotta, E., Flora, A., Lirer, S., Viggiani, C., Eds.; Taylor & Francis Group: London, England, 2013; pp. 199–206.
- Canale, C., Barbaro, G., Foti, G., Petrucci, O., Besio, G., & Barillà, G. C. (2021). Bruzzano river mouth damage due to meteorological events. *International Journal of River Basin Management*, 1-17.
- Canova, F., Tolomei, C., Salvi, S., Toscani, G., & Seno, S. (2012). Land subsidence along the Ionian coast of SE Sicily (Italy), detection and analysis via Small Baseline Subset (SBAS) multitemporal differential SAR interferometry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(3), 273-286.
- Cantasano, N. (2009). La gestione di *Posidonia oceanica* spiaggiata in Italia. *Biologi italiani*, 39(3), 65-70.
- Carisi, F., Domeneghetti, A., & Castellarin, A. (2016). Effects of anthropogenic land-subsidence on inundation dynamics: the case study of Ravenna, Italy. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373, 161-166.
- Carter, R. (1991). Near-future sea level impacts on coastal dune landscapes. *Landscape Ecology*, 6(1), 29-39.
- Carter, R. W. G. (2013). *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines*. Elsevier.

- Cascini, L., Ferlisi, S., Fornaro, G., Lanari, R., Peduto, D., & Zeni, G. (2006). Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi-temporal DInSAR technique. *International Journal of Remote Sensing*, 27(8), 1709-1716.
- Cavallaro, L., Re, C. L., Paratore, G., Viviano, A., & Foti, E. (2011). Response of *Posidonia oceanica* to wave motion in shallow-waters-preliminary experimental results. *Coastal Engineering Proceedings*, (32), 49-49.
- Chadwick, A. J., (1989). Field measurements and numerical model verification of coastal shingle transport. BHRA, The Fluid Engineering Centre, UK, pp. 381–402. Chapter 27.
- Cherubini, C., Cotecchia, V., Pagliarulo, R. (2000). Subsidence in the Sybaris Plain (Italy). In *Proceedings of the 6th International Symposium on Land Subsidence, Ravenna, Italy, 24–29 September 2000*.
- Cianflone, G., Tolomei, C., Brunori, C. A., & Dominici, R. (2015). InSAR time series analysis of natural and anthropogenic coastal plain subsidence: The case of Sibari (Southern Italy). *Remote Sensing*, 7(12), 16004-16023.
- Cianflone, G., Tolomei, C., Brunori, C. A., & Dominici, R. (2015). Preliminary study of the surface ground displacements in the Crati Valley (Calabria) by means of InSAR data. *Rend. Online Soc. Geol. It.*
- Ciccarelli, D., Pinna, M. S., Alquini, F., Cogoni, D., Ruocco, M., Bacchetta, G., Sarti G. & Fenu, G. (2017). Development of a coastal dune vulnerability index for Mediterranean ecosystems: A useful tool for coastal managers?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 187, 84-95.
- Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Sentinel-1 BigData Processing with P-SBAS InSAR in the Geohazards Exploitation Platform: An Experiment on Coastal Land Subsidence and Landslides in Italy. *Remote Sensing*, 13(5), 885.

- Cigna, F., Confuorto, P., Novellino, A., Tapete, D., Di Martire, D., Ramondini, M., ... & Sowter, A. (2016). 25 years of satellite InSAR monitoring of ground instability and coastal geohazards in the archaeological site of Capo Colonna, Italy. In *SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XVI* (Vol. 10003, p. 100030Q). International Society for Optics and Photonics.
- CIRIA (1996). Beach management manual. CIRIA Report 153.
- Coelho, C., (2005). Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Universidade de Aveiro.
- COLOMBO NUOVO (2012). *Manuale dell'Ingegnere Civile*. 85ª edizione. Hoepli. ISBN: 9788820345839.
- Confuorto, P., Plank, S., Novellino, A., Tessitore, S., & Ramondini, M. (2016). Implementation of DInSAR methods for the monitoring of heritage sites: Hera Lacinia in Crotona (Southern Italy). *Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana*, 41, 231-234.
- Coop. M.R., Cotecchia F. (1997) "The geotechnical settlements of the archaeological site of Sibari". *Geotech. Eng. for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, Viggiani (ed.), Balkema, 89- 100.
- Cooper, J. A. G., & McLaughlin, S. (1998). Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *Journal of Coastal Research*, 512-524.
- Corbau, C., Simeoni, U., Melchiorre, M., Rodella, I., & Utizi, K. (2015). Regional variability of coastal dunes observed along the Emilia-Romagna littoral, Italy. *Aeolian Research*, 18, 169-183.

- Cotecchia, V., Cherubini, C., Pagliarulo, R. (1994). Geotechnical characteristics of outcropping deposits in Sibari plain. In Proceedings of the XIII International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, 5–10 January 1994.
- Cozzolino, D., Greggio, N., Antonellini, M., & Giambastiani, B. M. S. (2017). Natural and anthropogenic factors affecting freshwater lenses in coastal dunes of the Adriatic coast. *Journal of Hydrology*, 551, 804-818.
- D'Alessandro, F., Tomasicchio, G. R., Frega, F., & Carbone, M. (2011). Design and management aspects of a coastal protection system. A case history in the South of Italy. *Journal of Coastal Research*, 492-495.
- D'Alessandro, F., Tomasicchio, G. R., Musci, F., & Ricca, A. (2012). Dune erosion physical, analytical and numerical modelling. In Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering, Santander, Spain (pp. 1-6).
- D'Alessandro, F., Tomasicchio, G.R., Francone, A., Leone, E., Frega, F., Chiaia, G., Saponieri, A., Damiani, L. (2020). Coastal sand dune restoration with an eco-friendly technique. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23(4), 417-426.
- D'Alessandro, F., & Tomasicchio, G. R. (2008). The BCI criterion for the initiation of breaking process in Boussinesq-type equations wave models. *Coastal Engineering*, 55(12), 1174-1184.
- D'Alessandro, F., & Tomasicchio, G. R. (2016). Wave–dune interaction and beach resilience in large-scale physical model tests. *Coastal Engineering*, 116, 15-25.
- Da Lio, C., & Tosi, L. (2018). Land subsidence in the Friuli Venezia Giulia coastal plain, Italy: 1992–2010 results from SAR-based interferometry. *Science of the Total Environment*, 633, 752-764.

- Damgaard, J. S., & Soulsby, R. L. (1996). Analytical longshore bed-load sediment transport formula. In Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng., Orlando, ASCE (pp. 3614-3627).
- Damiani, L., Petrillo, A. F., & Ranieri, G. (2003). The erosion along the Apulian coast near the Ofanto river. *WIT Transactions on The Built Environment*, 70, 407-418.
- Davidson, R. A., & Lambert, K. B. (2001). Comparing the hurricane disaster risk of US coastal counties. *Natural Hazards Review*, 2(3), 132-142.
- Davies, J. L. (1964). A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für geomorphologie*, 127-142.
- Davis Jr, R. A., & FitzGerald, D. M. (2009). *Beaches and coasts*. John Wiley & Sons.
- De Falco, G., Baroli, M., Murru, E., Piergallini, G., & Cancemi, G. (2006). Sediment analysis evidences two different depositional phenomena influencing seagrass distribution in the Gulf of Oristano (Sardinia, Western Mediterranean). *Journal of coastal research*, 22(5), 1043-1050.
- De Falco, G., Molinaroli, E., Baroli, M., & Bellaciccob, S. (2003). Grain size and compositional trends of sediments from *Posidonia oceanica* meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(2), 299-309.
- 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 (10024)), 69-75.
- De Martone, E. (1909). *Traité de Géographie Physique*. Colin, Parigi, pp. 1057.
- Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of coastal research*, 53-84.

- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2004). *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge University Press.
- Deltares (2015). *Sinking cities. An integrated approach towards solutions*. <https://www.deltares.nl/app/uploads/2015/09/Sinking-cities.pdf>.
- Di Carlo, G., Badalamenti, F., Jensen, A. C., Koch, E. W., & Riggio, S. (2005). Colonisation process of vegetative fragments of *Posidonia oceanica* (L.) Delile on rubble mounds. *Marine Biology*, 147(6), 1261-1270.
- Di Paola, G., Aucelli, P. P. C., Benassai, G., & Rodríguez, G. (2014). Coastal vulnerability to wave storms of Sele littoral plain (southern Italy). *Natural hazards*, 71(3), 1795-1819.
- Dingler, J. R. (2005). Beach processes. *Encyclopedia of Coastal Science*, 161-168.
- Dolan, R., Hayden, B. P., May, P., May, S. (1980). The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and beach*, 48(4), 22-29.
- Elfrink, B., Baldock, T. (2002). Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. *Coastal Engineering* 45: 149-167
- EUROSION, Salman, A., Lombardo, S., & Doody, P. (2004). *Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability*. EuroSION project reports (<http://www.euroSION.org/reports-online/part3.pdf>).
- Faye, I. (2010). *Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest): Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes (Doctoral dissertation)*.

- Feagin, R. A., Figlus, J., Zinnert, J. C., Sigren, J., Martínez, M. L., Silva, R., ... & Carter, G. (2015). Going with the flow or against the grain? The promise of vegetation for protecting beaches, dunes, and barrier islands from erosion. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(4), 203-210.
- Feagin, R. A., Furman, M., Salgado, K., Martinez, M. L., Innocenti, R. A., Eubanks, K., ... & Silva, R. (2019). The role of beach and sand dune vegetation in mediating wave run up erosion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 97-106.
- Ferreira O., Plomaritis T.A., Costas S. (2017). Process-based indicators to assess storm induced coastal hazard. *Earth-Science Reviews*, 173, 159-167.
- Ferreira Silva S., Martinho M., Capitao R., Reis T., Conceicao J.F., Ferreira J.C. (2017). An index-based method for coastal-flood risk assessment in low-lying areas (Costa de Caparica, Portugal). *Ocean & Coastal Management*, 144, 90-104.
- Ferreira, O., Viavattene, C., Jiménez, J. A., Bolle, A., Das Neves, L., Plomaritis, T. A., ... & Van Dongeren, A. R. (2018). Storm-induced risk assessment: Evaluation of two tools at the regional and hotspot scale. *Coastal Engineering*, 134, 241-253.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.
- Fiedler, F. R. (2003). Simple, practical method for determining station weights using Thiessen polygons and isohyetal maps. *Journal of Hydrologic engineering*, 8(4), 219-221.
- Fitton, J.M., Hansom J.D., Rennie A.F. (2016). A national coastal erosion susceptibility model for Scotland. *Ocean & Coastal Management*, 132, 80-89.
- Foti, E., Musumeci, R. E., & Stagnitti, M. (2020). Coastal defence techniques and climate change: a review. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 31(1), 123-138.

- Foti, G. & Sicilia, C.L. (2013). Analysis, evaluation and innovative methodologies to prevent coastal erosion. In Proceedings 3rd International Conference on Physical Coastal Processes, Management and Engineering, Gran Canaria (Spain).
- Foti, G., Barbaro G., Barillà G.C., Mancuso P., Puntorieri P., Mandalari M. (2021a). Analysis of the correlation between coastal erosion and anthropogenic pressure using remote sensing. Case study: Calabria (Italy). Proceeding of the X AIT International Conference – Italian Society of Remote Sensing, Cagliari, 13-15 settembre 2021 (evento virtuale).
- Foti, G., Barbaro, G., Barillà, G.C. & Frega, F. (2021b). Effects of anthropogenic pressures on dune systems. Case study: Calabria (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), 10.
- Foti, G., Barbaro, G., Barillà, G.C., Mancuso, P., Puntorieri, P., Piria, R. (2021c). Analysis of the erosive processes triggered by the construction of ports using remote sensing. Case study: Calabria (Italy). Proceeding of the X AIT International Conference – Italian Society of Remote Sensing, Cagliari, 13-15 settembre 2021 (evento virtuale).
- Foti, G., Barbaro, G., Bombino, G., Fiamma, V., Puntorieri, P., Minniti, F., & Pezzimenti, C. (2019). Shoreline changes near river mouth: case study of Sant'Agata River (Reggio Calabria, Italy). *European Journal of Remote Sensing*, 52(sup4), 102-112.
- Foti, G., Barbaro, G., Manti, A., Foti, P., La Torre, A., Geria, P. F., Puntorieri, P., Tramontana, N. (2020a). A methodology to evaluate the effects of river sediment withdrawal: The case study of the Amendolea River in southern Italy. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23(4), 465-473.
- Foti, G., Barillà, G. C., Barbaro, G., & Puntorieri, P. (2020b). Remote sensing and GIS to support coastal erosion risk analysis in Calabria, Italy. Proceedings of 12th International Conference on Risk Analysis and Hazard Mitigation, 23-25 giugno, 2020.

- Fraile Jurado P. (2011). The CVI. Potentials applications beyond Andalucía and related data needs. Presentation at the EEA Expert Meeting “Methods and tools for assessing coastal vulnerability to climate change at the European scale”, 8-9 June 2011, Copenhagen, Denmark.
- Gacia, E., & Duarte, C. M. (2001). Sediment retention by a Mediterranean *Posidonia oceanica* meadow: the balance between deposition and resuspension. *Estuarine, coastal and shelf science*, 52(4), 505-514.
- García-Mora, M. R., Gallego-Fernández, J. B., Williams, A. T., & García-Novo, F. (2001). A coastal dune vulnerability classification. A case study of the SW Iberian Peninsula. *Journal of coastal research*, 17(4).
- Gavrilovic, S. (1959). Méthode de la classification des bassins torrentiels et équations nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du débit solide. *Vadopriveda*, Belgrado.
- Gedan, K. B., Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B., & Silliman, B. R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic change*, 106(1), 7-29.
- Giandotti, M. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. (1934). *Memorie e studi idrografici*; Servizio Idrografico Italiano (in Italian).
- Giannico C., Rocca F. e Ferretti A. (2009) – Copyright: Tele-Rilevamento Europa 2009.
- Gisotti, G. (1991). A Case of Induced Subsidence for Extraction of Salt by Hydrosolution. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Land Subsidence*, Houston, TX, USA (pp. 12-17).
- Goda, Y. (1970). A synthesis of breaker indices. In *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers* (Vol. 1970, No. 180, pp. 39-49). Japan Society of Civil Engineers.

- Goda, Y. (2010). Reanalysis of regular and random breaking wave statistics. *Coastal Engineering Journal*, 52(1), 71-106.
- Gornitz, V. M., Beaty, T. W., & Daniels, R. C. (1997). A Coastal Hazards Data Base for the US West Coast (1997) (NDP-043C) (No. ORNL/CDIAC-81; NDP-043C). Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC); Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- Gornitz V.M., Daniels R.C., White T.W. & Birdwell K.R. (1993). The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. U.S. Government Report, Oak Ridge National Laboratory Tennessee. DE-AC05-84OR21400.
- Gornitz, V. (1990). Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise. *Journal of Coastal research*, 201-237.
- Gornitz, V. (1991). Global coastal hazards from future sea level rise. *Global and Planetary Change*, 3(4), 379-398.
- Gornitz, V. M., White, T. W., & Daniels, R. C. (1992). A coastal hazards data base for the US East Coast (No. ORNL/CDIAC-45; NDP-043A). Oak Ridge National Lab., TN (United States). Carbon Dioxide Information Analysis Center.
- Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J. A., & Williams, A. T. (2018). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & coastal management*, 156, 277-289.
- Gravens, M. B., & Rosati, J. D. (1994). Numerical model study of breakwaters at Grand Isle, Louisiana. US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Greco M., & Martino G. (2012). Valutazione della criticità costiera della fascia ionica lucana. *L'Acqua*, vol. 3, pp 55-65.

- Greco, M., & Martino, G. (2014). Assessment of maritime erosion index for Ionian-Lucanian coast. In *Engineering Geology for Society and Territory–Volume 4* (pp. 41-44). Springer, Cham.
- Guerricchio Alessandro (1993): Lineamenti geologici e problemi di subsidenza del bacino crotonese. In G. Lena (a cura di): “Problemi geoambientali nella costa tra Capo Colonna e Isola Capo Rizzuto”, Le Castella, Aprile 2001, Area Marina “Capo Rizzuto, 2003, pp. 39-59.
- Gulliver, F.P. (1899). Shoreline topography. In *Proc. Am. Academy of arts and sciences*, Vol. 34, pp. 151-258.
- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical geography*, 29(2), 189-217.
- Hallermeier, R. J. (1983). Sand Transport Limits in Coastal Structure Design, *Proceedings, Coastal Structures '83*, American Society of Civil Engineers, pp. 703-716.
- Hammar-Klose, E. S., & Thieler, E. R. (2001). Coastal vulnerability to sea-level rise: a preliminary database for the US Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts (No. 68). US Geological Survey.
- Hasselmann, K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson D.E., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.A., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meerburg A., Muller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W., and Walden H. (1973). Measurements of Wind Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project. (JONSWAP) *Deutsches Hydrographische Zeitschrift*, Vol 08 (12) PP.1-95.
- Hayes, M. O. (1975). Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. In *Geology and Engineering* (pp. 3-22). Academic Press.

- Hayes, M. O. (1979). Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Leatherman SP (ed) Barrier Islands. Academic Press, New York, 1, 27.
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., ... & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34-36.
- Hess, K. W. (2003). Tidal datums and tide coordination. *Journal of Coastal Research*, 33-43.
- Hinkel, J., & 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.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.
- Hsu, S. (1974). Computing eolian sand transport from routine weather data. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(14), 94.
- Hunt Jr, I. A. (1959). Design of seawalls and breakwaters. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 85(3), 123-152.
- Inman, D. L., Bagnold, R. A. (1963). Beach and nearshore processes Part II: Littoral processes, in *The Sea: Ideas and Observations*, 3, M.N. Hill (ed.), Interscience, New York, 529-553.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC, Summary for policymakers, in: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea L.L. White (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, pp. 1–32.

ISPRA (2007). *Mappatura del rischio costiero*.

ISPRA. Calcaterra, S., & Gambino, P. *DPSIR: Impatto, Stato Tipologia indicatore: Descrittivo (tipo A). Comuni interessati da subsidenza*. www.annuario.isprambiente.it.

Jiongxin X. (2003). Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China. *Environmental Management* 31(3): 0328-0341.

Kamphuis, J. W. (1991). Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 117(6), 624-640.

Kamphuis, J.W. (1991). *Wave Transformation*. *Coastal engineering*, Vol 15, pp 173-184.

Kantamaneni, K., Phillips, M., Thomas, T., & Jenkins, R. (2018). Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index. *Ocean & coastal management*, 158, 164-175.

Kirpich, Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362

Komar P.D. (2000). Coastal erosion—underlying factors and human impacts. *Shore & Beach* 68(1): 3-16.

- Komar, P. D. (2011). Coastal erosion processes and impacts: the consequences of earth's changing climate and human modifications of the environment. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Academic Press, 285-308.
- Komar, P. D., Gaughan, M. K. (1972). Airy wave theory and breaker height prediction. *Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, Vancouver, pp. 405-418.
- Komar, P. D., Inman, D. L. (1970). Longshore sand transport on beaches, *Journal of Geophysical Research*, 75(30), 5514-5527.
- Konings, P. (1990). Eolian sand transport at the Belgian coast: morphodynamic implications and use in coastal management. In *Littoral 1990. Symposium international*. 1er (pp. 120-124).
- Krumbein, W. C., Sloss, L. L. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation*, Ch. 4, Properties of Sedimentary Rocks, W. H. Freeman & Company, pp 93-149.
- Lamberti, A., & Tomasicchio, G. R. (1997). Stone mobility and longshore transport at reshaping breakwaters. *Coastal Engineering*, 29(3-4), 263-289.
- Larson, M., & Kraus, N. C. (1995). Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales. *Marine geology*, 126(1-4), 111-127.
- Leatherman, S. P. (2003). Shoreline change mapping and management along the US East Coast. *Journal of Coastal Research*, 5-13.
- Lena G., Guzzi R., Scerbo E., Medaglia S., Cellini E. (2003). Subsidenza, erosione, condizioni chino-biologiche ed attività estrattiva metanifera nell'area della A.M.P., Area Marina Protetta – SIGEA, relazione inedita.

- Leone, E., Kobayashi, N., Francone, A., Bartolo, S. D., Strafella, D., D'Alessandro, F., & Tomasicchio, G. R. (2021). Use of Nanosilica for Increasing Dune Erosion Resistance during a Sea Storm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 620.
- Lerma, A. N., Ayache, B., Ulvoas, B., Paris, F., Bernon, N., Bulteau, T., & Mallet, C. (2019). Pluriannual beach-dune evolutions at regional scale: Erosion and recovery sequences analysis along the aquitaine coast based on airborne LiDAR data. *Continental Shelf Research*, 189, 103974.
- Li X., Zhou Y., Zhang L., Kuang R. (2014). Shoreline change of Chongming Dongtan and response to river sediment load: a remote sensing assessment. *Journal of Hydrology* 511: 432-442.
- Lo V. B., Bouma, T. J., Van Belzen, J., Van Colen, C., & Airoidi, L. (2017). Interactive effects of vegetation and sediment properties on erosion of salt marshes in the Northern Adriatic Sea. *Marine Environmental Research*, 131, 32-42.
- Madsen, P. A., Sørensen, O. R., & Schäffer, H. A. (1997). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves. *Coastal Engineering*, 32(4), 255-287.
- Maiti S., Bhattacharya A.K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology* 257(1-4): 11-23.
- Mangor, K., Drønen, N. K., Kærgaard, K. H., & Kristensen, S. E. (2017). Shoreline management guidelines. Published by DHI.
- Manno, G. (2012). Localizzazione della linea di riva, in spiagge sabbiose stabili, considerando le fluttuazioni da onde e maree (Tesi di dottorato).

- Mase, H. (1989). Random wave runup height on gentle slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(5), 649-661.
- Masselink, G., & Short, A. D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of coastal research*, 785-800.
- MATTM-Regioni (2018). *Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici. Versione 2018 - Documento elaborato dal Tavolo Nazionale sull'Erosione Costiera MATTM-Regioni con il coordinamento tecnico di ISPRA*, 305 pp.
- Mavromatidi A., Briche E., Claeys C. (2018). Mapping and analyzing socio-environmental vulnerability to coastal hazards induced by climate change: an application to coastal Mediterranean cities in France. *Cities*, 72, 189-200.
- Mazzella L., Scipione M.B., Gambi M.C., Fresi E., Buia M.C., Russo G.F., De Maio R., Lorenti M., Rando A. (1986). *Le praterie sommerse del Mediterraneo*. Ed. Laboratorio di ecologia del benthos della Stazione Zoologica "Anton Dohrn" di Napoli, Ischia: 59 pp.
- McCowan, J. (1891). On the Solitary Wave. *Phil. Mag. Series 5*, 32, pp 45-58.
- McLaughlin, S., & Cooper, J. A. G. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers?. *Environmental Hazards*, 9(3), 233-248.
- McLaughlin, S., McKenna, J., & Cooper, J. A. G. (2002). Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of coastal research*, (36 (10036)), 487-497.
- McLeod, E., Poulter, B., Hinkel, J., Reyes, E., & Salm, R. (2010). Sea-level rise impact models and environmental conservation: A review of models and their applications. *Ocean & Coastal Management*, 53(9), 507-517.

- Mendoza, E., Odériz, I., Martínez, M. L., & Silva, R. (2017). Measurements and modelling of small scale processes of vegetation preventing dune erosion. *Journal of Coastal Research*, (77 (10077)), 19-27.
- Miche, R. (1944). Mouvements Ondulatoires des Mers en Profondeur Constante et Decroisante. *Ann. Des Ponts et Chaussees*, pp. 25-78, 131-164, 270-292, 369-406.
- Miduri, M., Foti, G., Puntorieri, P. (2017). Impact generated by Marina of Badolato on adjacent coasts. *Proceedings of the 13th International Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management & Conservation (MEDCOAST), Mellieha (Malta), 31 October – 4 November 2017*, 2, pp. 935-945.
- Mitsuyasu, H., Tasai, F., Suhara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., Rikiishi, K. (1975). Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. Phys. Oceanogr.* 5 (10), 750-760.
- Mocenni, C., Casini, M., Paoletti, S., Giordani, G., Viaroli, P., & Comenges, J. M. Z. (2009). A Decision Support System for the management of the Sacca di Goro (Italy). In *Decision support systems for risk-based management of contaminated sites* (pp. 1-24). Springer, Boston, MA.
- Mosetti F. (1988). Some News on the Currents in the Straits of Messina. *Boll. Oceanol. Teor. Appl.*, 6(3): 119-201.
- Mucerino, L., Albarella, M., Carpi, L., Besio, G., Benedetti, A., Corradi, N., ... & Ferrari, M. (2019). Coastal exposure assessment on Bonassola bay. *Ocean & coastal management*, 167, 20-31.
- Narra P., Coelho C., Sancho F., Palalane J. (2017). CERA: an open-source tool for coastal erosion risk assessment. *Ocean & Coastal Management*, 142, 1-14.

- Natesan, U. (2009). Shoreline Dynamics of Dhanushkodi, Rameswaram Using Gis. In *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering* (pp. 1294-1298). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., & Mitchum, G. T. (2018). Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the national academy of sciences*, 115(9), 2022-2025.
- Nicholls, R. J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A. T., Meyssignac, B., ... & Fang, J. (2021). A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, 11(4), 338-342.
- Nielsen, P., & Hanslow, D. J. (1991). Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 1139-1152.
- Nordstrom, K. F., Psuty, N., & Carter, B. (1990). *Coastal dunes: form and process*. Wiley.
- NRCS, Natural Resources Conservation Service. (1997). *Pondsplanning, design construction. Agriculture handbook*. United States Department of Agriculture (USDA).
- Oertel, G. F. (2005). Coasts, coastlines, shores, and shorelines. *Encyclopedia of Coastal Science*, 323-327.
- Ojeda, J., Álvarez, J. I., Martín, D., & Fraile, P. (2009). El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (9), 83-100.
- Osman, N., Abdullah, M. N., & Ali, F. H. (2011). Soil-root shear strength properties of some slope plants. *Sains Malaysiana*, 40(10), 1065-1073.

- Pagán, J. I., Bañón, L., López, I., Bañón, C., & Aragonés, L. (2019). Monitoring the dune-beach system of Guardamar del Segura (Spain) using UAV, SfM and GIS techniques. *Science of the total environment*, 687, 1034-1045.
- Pagliarulo, R., (2006). Coastal changes and the environmental evolution of the archaeological site of Sybaris (Southern Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 29, 51-59.
- Pagliarulo, R., Cotecchia, F., Coop, M.R., Cherubini, C. (1995). Studio litostratigrafico e geotecnico della Piana di Sibari con riferimento all'evoluzione morfologica e ambientale del sito archeologico. *Geol. Appl. Idrogeol.* 1995, 30, 375–391.
- Pajak, M. J., Leatherman, S. (2002). The high-water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, 329-337.
- Pantusa, D., D'Alessandro F., Riefolo L., Principato F., Tomasicchio G. (2018). Application of a coastal vulnerability index. A case study along the Apulian Coastline, Italy. *Water* 10(9): 1218.
- Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Clabaut, P., & Pergent, G. (1998). Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side scan sonar: Application off the island of Corsica (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(3), 359-367.
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., & Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. *Natural hazards and earth system sciences*, 9(4), 1149-1159.
- Pepe, F., Bertotti, G., Ferranti, L., Sacchi, M., Collura, A. M., Passaro, S., & Sulli, A. (2014). Pattern and rate of post-20 ka vertical tectonic motion around the Capo Vaticano Promontory (W Calabria, Italy) based on offshore geomorphological indicators. *Quaternary International*, 332, 85-98.

- Perez-Arlucea M., Mendez G., Clemente F., Nombela M., Rubio B., Filgueira M. (2005). Hydrology, sediment yield, erosion and sedimentation rates in the estuarine environment of the Ria de Vigo, Galicia, Spain. *Journal of Marine Systems*, 54: 209-226.
- Pergent, G., Pergent-Martini, C., Boudouresque, C.F. (1995). Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée: État des connaissances. *Mesogée*, 54, 3–27.
- Pinna, M. S., Cogoni, D., Fenu, G., & Bacchetta, G. (2015). The conservation status and anthropogenic impacts assessments of Mediterranean coastal dunes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 167, 25-31.
- Pino, C., Lionello, P., & Galati, M. B. (2009, April). Extreme sea storm in the Mediterranean Sea. Trends during the 2nd half of the 20th century. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 5306).
- Preston, N. J., & Crozier, M. J. (1999). Resistance to shallow landslide failure through root derived cohesion in east coast hill country soils, North Island, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 24(8), 665-675.
- Psuty, N. P. (1988). Sediment budget and dune/beach interaction. *Journal of Coastal Research*, (3), 1-4.
- Psuty, N. P. (2008). The coastal foredune: a morphological basis for regional coastal dune development. In *Coastal Dunes* (pp. 11-27). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Rainey, F.G., Lerici, C.M. (1967). *The Search for Sybaris 1960–1965*, Lerici Editori: Rome, Italy.

- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Santos, F. D., Gomes, A., Hilden, M., ... & Santini, M. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ETC CCA Technical Paper, 1 (2011), 1-93.
- Raspini, F., Cigna, F., & Moretti, S. (2012). Multi-temporal mapping of land subsidence at basin scale exploiting Persistent Scatterer Interferometry: case study of Gioia Tauro plain (Italy). *Journal of Maps*, 8(4), 514-524.
- Regione Calabria – Lotto 5 - Autorità di Bacino Regionale. POR Calabria 2000-2006. Attività di monitoraggio di siti in frana e di aree soggette a fenomeni di subsidenza. Relazione finale.
- Regione Calabria, A. D. B. (2003). Indagine conoscitiva dello stato delle coste calabresi, predisposizione di una banca dati dell'evoluzione del litorale e individuazione delle aree a rischio e delle tipologie di intervento studi su aree campione e previsione delle relative opere di difesa. ATI: TECHNITAL SpA, IDROTEC Srl, CONSORZIO OKEANOS-Settembre.
- Regione Sardegna (2013). Programma azione coste Sardegna. Relazione generale.
- Regione Sicilia (2004). Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico. Relazione Generale.
- Rende, F., Scalzo, A., Cellini, E., Minutolo, L., Burgassi, M., & Cinelli, F. (2008). Analisi del sistema informativo per la posidonia ed altre fanerogame in Calabria e Campania (SINPOFACC) finalizzato alla individuazione dello stato di salute delle fanerogame marine presenti lungo le coste calabre. Secondo simposio internazionale "Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura". Napoli, 4-6 giugno 2008.
- Report RdS/2013/087. Coiro, D. P., Lioniello, F., Troise, G. Misura del profilo di corrente marina nello stretto di Messina ai fini della stima della produzione di energia. Settembre 2013.
- Rozum, J. S., & Carr, S. D. (2013). Tools for coastal climate adaptation planning: a guide for selecting tools to assist with ecosystem-based climate planning. Arlington, VA: NatureServe.

- Ruggiero, P., Kaminsky, G. M., Gelfenbaum, G. (2003). Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high-energy coastline: implications for shoreline change analyses. *Journal of Coastal Research*, 57-82.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J., & Beach, R. A. (2001). Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of coastal research*, 407-419.
- Sabato, L., & Tropeano, M. (2004). Fiumara: a kind of high hazard river. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(10), 707-715.
- Sallenger Jr, A. H. (2000). Storm impact scale for barrier islands. *Journal of coastal research*, 890-895.
- Sancho, F., Abreu, T., D'Alessandro, F., Tomasicchio, G. R., & Silva, P. A. (2011). Surf hydrodynamics in front of collapsing coastal dunes. *Journal of Coastal Research*, 144-148.
- Sannino, G., Carillo, A., Pisacane, G., Naranjo, C. (2015). On the relevance of tidal forcing in modeling the Mediterranean thermohaline circulation. *Progress in Oceanography* 134, 304–329.
- Satta A., Puddu M., Venturini S., Giupponi C. (2017). Assessment of coastal risks to climate change related impacts at regional scale: the case of Mediterranean region. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 284-296.
- Satta A., Snoussi M., Puddu M., Flayou L., Hoult R. (2016). An index-based method to assess risks of climate-related hazards in coastal zones: the case of Tetouan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 175, 93-105.

- Satta, A. (2014). An index-based method to assess vulnerabilities and risks of Mediterranean coastal zones to multiple hazards. Doctoral dissertation submitted in October 2014 to the Department of Economics Ca' Foscari University of Venice, Italy.
- Saye, S. E., Van der Wal, D., Pye, K., & Blott, S. J. (2005). Beach–dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. *Geomorphology*, 72(1-4), 128-155.
- Scarpato, A., Borrello, P., Chiesa, S., Devoti, S., Magaletti, E., Manfra, L., ... & Mazzarelli, G. (2020). La Spiaggia Ecologica: gestione sostenibile della banquette di *Posidonia oceanica* sugli arenili del Lazio.
- Schoonees, J. S., & Theron, A. K. (1993). Review of the field-data base for longshore sediment transport. *Coastal Engineering*, 19(1-2), 1-25.
- Sekovski, I., Del Río, L., & Armaroli, C. (2020). Development of a coastal vulnerability index using analytical hierarchy process and application to Ravenna province (Italy). *Ocean & Coastal Management*, 183, 104982.
- Seymour, R. J. (2005). Cross-shore sediment transport. *Encyclopedia of Coastal Science*, 352-353.
- Shepard, F. P., & Inman, D. L. (1950). Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 31(2), 196-212.
- Shepard, F.P. (1976). Coastal classification and changing coastlines. In *Geoscience and Man*, Vol. 14, pp. 53-56.
- Sicilia, C.L., Foti G., Campolo A. (2013) Protection and management of the Annunziata river mouth area (Italy). *Journal of Air, Soil and Water Research* 6: 107-113.

- Sigren, J. M., Figlus, J., & Armitage, A. R. (2014). Coastal sand dunes and dune vegetation: restoration, erosion, and storm protection. *Shore & Beach*, 82(4), 5-12.
- Silva, R., Martínez, M. L., Odériz, I., Mendoza, E., & Feagin, R. A. (2016). Response of vegetated dune–beach systems to storm conditions. *Coastal Engineering*, 109, 53-62.
- Simeone, S., De Falco, G., Como, S., Olita, A., & Demuro, S. (2008). Dinamica deposizionale delle banquettes di *Posidonia oceanica* nelle spiagge.
- Simonini, P., Ceccato, F., & Tosi, L. (2017). Effetti della subsidenza sul patrimonio edilizio e infrastrutturale. In *Proceedings of the XXVI National Conference of Geotechnics*, Roma, Italy (pp. 20-22).
- Solari, L., Del Soldato, M., Bianchini, S., Ciampalini, A., Ezquerro, P., Montalti, R., ... & Moretti, S. (2018). From ERS 1/2 to Sentinel-1: subsidence monitoring in Italy in the last two decades. *Frontiers in Earth Science*, 6, 149.
- Sorriso-Valvo M. (1993) – The Geomorphology of Calabria. A sketch. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 16, 75-80.
- Sorriso-Valvo, M., & Terranova, O. (2006). The Calabrian fiumara streams. *Zeitschrift für Geomorphologie, Land Degradation, Supplement*, 143, 109-125.
- Spinosa, A., Ziemba, A., Saponieri, A., Damiani, L., & El Serafy, G. (2021). Remote sensing based automatic detection of shoreline position: A case study in apulia region. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 575.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7), 573-588.

- Szlafsztein, C., & Sterr, H. (2007). A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *Journal of Coastal Conservation*, 11(1), 53-66.
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., & Gonella, M. (2006). Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resources Research*, 42(1).
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Bertoni, W., & Gonella, M. (2005). A century of land subsidence in Ravenna, Italy. *Environmental Geology*, 47(6), 831-846.
- Teatini, P., Tosi, L., & Strozzi, T. (2011). Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B8).
- Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R., & Iaquinia, P. (2009). Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: an application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology*, 112(3-4), 228-245.
- Thieler E.R. & Hammar-Klose E. (1999). National assessment of coastal vulnerability to sea level rise. Preliminary results for U.S. Atlantic Coast. Open-file report 99-593. U.S. Geological Survey: Washington, DC, USA.
- Thieler E.R., Williams S.J. & Beavers R. (2002). Vulnerability of U.S. National Parks to sea-level rise and coastal change. U.S. Geological Survey fact sheet FS 095-02. [U.S. Geological Survey, Reston, VA], 2 pp.
- Tomasicchio G. R., Lamberti A., Guiducci F. (1994). Stone movement on a reshaped profile. Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Kobe, 1625-1640.

- Tomasicchio G.R., D'Alessandro F., Barbaro G., Musci E., De Giosa T.M. (2015). Longshore transport at shingle beaches: an independent verification of the general model. *Coastal Engineering* 104: 69-75.
- Tomasicchio, G. R., Archetti, R., D'Alessandro, F., Sloth, P. (2007). Long-shore transport at berm breakwaters and gravel beaches. *Proceedings of the International Conference Coastal Structures '07, Venice, World Scientific, Singapore*, pp. 65–76.
- Tomasicchio, G. R., D'Alessandro, F., & Barbaro, G. (2011). Composite modelling for large-scale experiments on wave–dune interaction. *Journal of Hydraulic Research*, 49(sup1), 15-19.
- Tomasicchio, G. R., D'Alessandro, F., Barbaro, G., & Malara, G. (2013). General longshore transport model. *Coastal Engineering*, 71, 28-36.
- Tomasicchio, G. R., Francone, A., Simmonds, D. J., D'Alessandro, F., & Frega, F. (2020). Prediction of Shoreline Evolution. Reliability of a General Model for the Mixed Beach Case. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 361.
- Tomasicchio, G. R., Lusito, L., D'Alessandro, F., Frega, F., Francone, A., & De Bartolo, S. (2018). A direct scaling analysis for the sea level rise. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(12), 3397-3408.
- Tomasicchio, G. R., Mahmoudi Kurdistani, S., D'Alessandro, F., & Hassanabadi, L. (2020). Simple wave breaking depth index formula for regular waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 146(1), 06019001.
- Tomasino M. (1995). The Exploitation of Energy in the Straits of Messina. In: *The Straits of Messina Ecosystem* (Guglielmo L., Manganaro A., De Domenico E., eds.). 49-60.

- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., & 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 Sciences*, 12(7), 2347-2368.
- Torresan, S., Zabeo, A., Rizzi, J., Critto, A., Pizzol, L., Giove, S., & Marcomini, A. (2010). Risk assessment and decision support tools for the integrated evaluation of climate change impacts on coastal zones.
- Tosi, L., Carbognin, L., Teatini, P., Strozzi, T., & Wegmüller, U. (2002). Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations. *Geophysical Research Letters*, 29(12), 3-1.
- Tosi, L., Teatini, P., & Strozzi, T. (2013). Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Scientific reports*, 3(1), 1-9.
- Tosi, L., Teatini, P., Carbognin, L., & Brancolini, G. (2009). Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy. *Tectonophysics*, 1(474), 271-284.
- Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., Maiga, A. S. (2019). Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 75.
- Trinder, J., Liu, Q. (2018). Sub-Pixel Technique for Time Series Analysis of Shoreline Changes Based on Multispectral Satellite Imagery. In *Advanced Remote Sensing Technology for Coastal Environment, Disasters, and Infrastructure*. IntechOpen.
- USACE (1984). Shore protection manual, SPM, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, US Corps of Engineers, DC, USA.
- USACE (2003). Coastal Engineering Manual, CEM. Chapter III-1-2, Classification of Sediment by Size. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

- Vacchi, M., De Falco, G., Simeone, S., Montefalcone, M., Morri, C., Ferrari, M., & Bianchi, C. N. (2017). Biogeomorphology of the Mediterranean *Posidonia oceanica* seagrass meadows. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 42-54.
- Van der Meer, J. W. (1990). Static and dynamic stability of loose material. *Coastal Protection*, Balkema, pp. 157–195.
- Van der Meer, J. W., Veldman, J. J. (1992). Singular points at berm breakwaters: scale effect, rear, round head and longshore transport. *Coastal Engineering* 17 (3–4), 153–171.
- Van Hijum, E., Pilarczyk, K. W., (1982). Equilibrium profile and longshore transport of coarse material under regular and irregular wave attack. Delft Hydraulics Laboratory, Netherlands. Publication no 274.
- Van Rijn, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas (Vol. 1006, pp. 11-3). Amsterdam: Aqua publications.
- Van Rijn, L. C. (2002). Longshore sand transport. Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering, pp. 2439–2451. Cardiff.
- Van Rijn, L. C. (2014). A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. *Coastal Engineering*, 90, 23-39.
- Van Wellen, E., Chadwick, A. J., Mason, T. (2000). A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches. *Coastal Engineering* 40 (3), 243–275.
- Varnes D.J. & IAEG Commission on Landslides (1984). Landslides Hazard Zonation – a review of principles and practice. UNESCO, Paris, 63 pp.

- Versaci, R., Minniti, F., Foti, G., Canale, C., & Barillà, G. C. (2018). River anthropization: Case studies in Reggio Calabria, Italy. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 217, 903-912.
- Viavattene, C., Jiménez, J. A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., & McCall, R. (2017). Finding coastal hotspots of risk at the regional scale: the Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering*.
- Vos K., Harley M. D., Splinter K. D., Simmons J. A., Turner I. L. (2019). Sub-annual to multi decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*. 150, 160–174.
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature climate change*, 10(3), 260-263.
- Walling D.E. (2006). Human impact on land–ocean sediment transfer by the world’s rivers. *Geomorphology* 79(3-4): 192-216.
- Warrick, R. A. (2009). Using SimCLIM for modelling the impacts of climate extremes in a changing climate: a preliminary case study of household water harvesting in Southeast Queensland. 18th World IMACS. In MODSIM Congress, Cairns, Australia (pp. 2583-2589).
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.
- Wolfe, S. A., & Nickling, W. G. (1993). The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progress in physical geography*, 17(1), 50-68.

Yang Z., Wang T., Voisin N., Copping A. (2015). Estuarine response to river flow and sea-level rise under future climate change and human development. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 156: 19-30.

Zema, D. A., Bombino, G., Boix-Fayos, C., Tamburino, V., Zimbone, S. M., & Fortugno, D. (2014). Evaluation and modeling of scouring and sedimentation around check dams in a Mediterranean torrent in Calabria, Italy. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(4), 316-329.

Zemljic, M. (1971). Calcul du débit solide – Evaluation de la végétation comme un des facteurs antiérosif. International Symposium Interpraevent, Villaco.

Sitografia

1. www.isprambiente.gov.it
2. <https://www.regione.toscana.it/documents/10180/14985922/Linee+guida+per+l%E2%80%99utilizzo+dei+dati+interferometrici+del+geoportale.pdf/d5b091a7-a5b1-41e9-97c3-270a52b0c7ce>
3. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>
4. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>
5. <http://www.mareografico.it/>
6. <https://www.vialattea.net/content/1305/>
7. <http://www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html>
8. <http://www3.dicca.unige.it/meteocean/model.html>
9. www.dati-censimentipermanenti.istat.it
10. <http://geoportale.regione.calabria.it/opendata>
11. <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/>
12. <https://va.minambiente.it>
13. <https://wesud.it/crotone-sprofonda-e-capocolonna-va-via-cielo-fa-sapere-eni-di-vincenzo-garrubba/>
14. <http://dati.isprambiente.it/dataset/ron-rete-ondametrica-nazionale/>

15. <http://geoportale.regione.calabria.it/>
16. <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>
17. <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/copertura-del-suolo/corine-land-cover>

Ringraziamenti

Al termine di questo percorso desidero ringraziare innanzitutto il mio tutor, prof. Giuseppe Barbaro, per essere stato sempre per me un grande esempio in tutti questi anni di università e per la stima dimostratami, in particolare, in questi tre anni di dottorato.

Ringrazio di cuore anche l'ing. Giandomenico Foti, co-tutor e guida dell'attività di ricerca svolta, per i preziosi consigli e suggerimenti sia durante le fasi del lavoro sia durante la stesura della tesi.

Vorrei ringraziare inoltre il prof. Giovanni Besio, dell'Università di Genova, per aver fornito i dati meteorologici a largo delle coste calabresi, il geologo prof. Giuseppe Mandaglio per gli utili documenti sulla subsidenza in Calabria, l'ing. Pierluigi Mancuso, della Regione Calabria, per le preziose informazioni e consigli suggeritomi durante le varie fasi del lavoro, e l'ing. Vito Nardi, per il supporto nella programmazione dei codici Matlab.

Un ringraziamento va anche a Giando, stavolta come collega, a Pierfabrizio, Francesca e Katia, per i bei momenti trascorsi insieme durante questi tre anni un po' particolari.

Ringrazio Alessia per avermi aiutato con la copertina della tesi e tutti gli amici che in questi anni universitari mi sono stati vicini per ricordarmi principalmente che ogni cosa che accade è segno di una Presenza buona che sempre mi ha accompagnato e mi accompagna.

Un sentito ringraziamento va alla mia famiglia, che ha sempre creduto in me, sostenendomi anche nei momenti in cui pensavo di non farcela. Grazie in particolare a Costanza, per avermi aiutato nella stesura della tesi.

Ringrazio Giovanni, mio amico, compagno ormai da diversi anni, oggi mio marito e futuro padre di mio figlio, per il grande aiuto e i preziosi consigli nella redazione della tesi, ma soprattutto per esserci sempre stato, per avermi sempre supportato e sopportato; grazie, perché in questi tre anni, pieni di difficoltà, l'amore, la pazienza e la tenerezza del tuo sguardo nei miei confronti mi hanno sempre testimoniato il Bene di Chi ci ha messo insieme fin dall'inizio.