

RAPPORTI TECNICI

DEL SERVIZIO GEOLOGICO SISMICO E DEI SUOLI

2019



INDICATORI DI
SUSCETTIBILITA'
COSTIERA AI
FENOMENI DI
EROSIONE E
INONDAZIONE
MARINA

A cura di:

Luisa Perini – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia-Romagna

Paolo Luciani – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia-Romagna

Lorenzo Calabrese – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia-Romagna

Si ringraziano:

I Servizi di Area dell'Agencia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile e Arpa Emilia-Romagna che hanno fornito dati utilizzati nelle elaborazioni di alcuni parametri discussi nel volume.

In copertina:

foto: Archivio Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli

Immagine coordinata e grafica:

Simonetta Scappini – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia-Romagna

Il presente documento è rilasciato secondo i termini della licenza Creative Commons 4.0 Attribution (Attribuzione). I contenuti (salvo marchi, segni distintivi o altro diversamente specificato) possono essere riprodotti, distribuiti, comunicati, esposti, rappresentati e modificati rispettando la seguente condizione: citazione della fonte ("Regione Emilia-Romagna") e il titolo del documento.

Una sintesi della licenza si trova alla pagina <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.it>
Per eventuali aggregazioni o rielaborazioni dei contenuti finalizzate alla realizzazione di prodotti diversi dall'originale, pur permanendo l'obbligo di citazione della fonte, si declina ogni responsabilità.



Direzione Generale cura del territorio e dell'ambiente

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli

Viale della Fiera 8, 40127 Bologna

telefono: 051 5274798

fax: 051 5274208

e-mail: segrgeol@regione.emilia-romagna.it

PEC: segrgeol@postacert.regione.emilia-romagna.it

Sito web:

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cosa-fa-la-regione-2>

INDICE

1. INTRODUZIONE	4
2. DEFINIZIONI	5
3. CLASSIFICAZIONE DELLA SUSCETTIBILITA' DELLA COSTA AI FENOMENI DI EROSIONE E INONDAZIONE - INDICATORI DI SUSCETTIBILITA' [SI]	6
3.1. Suscettibilità della costa all'erosione [SI _e]	6
3.2. Suscettibilità della costa all'inondazione marina [SI _i]	10
3.3. Suscettibilità combinata ai fenomeni di erosione e inondazione [SI _{tot}]	13
3.4. Suscettibilità al fenomeno dell'erosione costiera in condizione di costa non protetta [SNP _e]	14

ALLEGATO

DESCRIZIONE DELLE VARIABILI ELABORATE

A.1. VARIABILI MORFOLOGICHE	17
A1.1. Ampiezza spiaggia emersa [A]	17
A1.2. Quota media spiaggia emersa [Q _m]	18
A1.3. Quota di chiusura della spiaggia emersa [Q _c]	20
A1.4. Pendenza della spiaggia sommersa	22
A1.5. Dosso costiero	24
A1.6. La duna	26
A1.7. Depositi di washover (o ventaglio di rotta)	28
A.2. VARIABILI EVOLUTIVE	30
A2.1. Dinamica Linea di Riva a breve termine (2012-2014) [LR]	30
A2.2. Tassi di evoluzione Linea di Riva nel lungo periodo (1943-2014) [T _{LR}]	30
A2.3. Dinamica Fondali 2006-2012 [DF]	32
A2.4. Tassi di subsidenza 2011-2016 [SU]	33
A3. INDICATORE DI PRESSIONE ANTROPICA [PA]	34
A4. INDICATORI DI PROTEZIONE DELLA COSTA	35
A4.1. Classificazione delle opere rigide di contrasto ai fenomeni di erosione e loro efficacia	35
A4.2. Classificazione delle opere rigide di contrasto ai fenomeni di inondazione e loro efficacia	37
A4.3. Classificazione degli interventi di ripascimento	39
BIBLIOGRAFIA	41



1. INTRODUZIONE

Lo scopo del presente lavoro è quello di fornire agli uffici regionali che si occupano di Difesa Costiera e agli amministratori locali alcune informazioni chiave che permettano di inquadrare meglio i punti critici della costa Emiliano-Romagnola, i fattori di vulnerabilità e lo stato del sistema di difesa. Esso costituisce un manuale tecnico per la lettura delle mappe che saranno caricate sulla piattaforma cartografica online denominata in_Risk, parte del Sistema Informativo del Mare e della Costa regionale.

Va sottolineato che il lavoro non è alternativo ma integra le informazioni che vengono prodotte dalla regione attraverso ARPAAe nell'ambito del monitoraggio costiero quinquennale, ed infatti, con Arpae si è deciso che alcuni degli indicatori qui descritti contribuiranno al prossimo aggiornamento della Relazione Stato-Ambiente.

Da più di un decennio, a livello internazionale, le valutazioni sulla vulnerabilità costiera alle mareggiate o ai cambiamenti climatici vengono affrontate attraverso l'uso di indicatori multi-parametrici. Esistono, infatti, metodologie elaborate dai più autorevoli Servizi Geologici e dall'Agenzia Ambientale Europea, a cui il SGSS si è ispirato già nelle prime sperimentazioni del 2008 (Calabrese et al. 2008). Nel periodo 2017-2018, si è deciso di produrre una mappatura alla scala regionale.

A fronte di ciò è stata rinnovata una approfondita revisione bibliografica dei lavori più significativi e più recenti sull'argomento e si è deciso di procedere ad una elaborazione di mappe della Suscettibilità della Costa ai fenomeni di Erosione e di Inondazione Marina.

Il lavoro implica l'elaborazione di numerose variabili che riguardano:

- Lo stato morfologico e di protezione della costa
- Le dinamiche evolutive
- L'antropizzazione della costa

L'intenzione è quella di procedere, successivamente, anche all'analisi della 'suscettibilità futura' ai fenomeni di erosione e inondazione, legata all'atteso innalzamento del livello del mare. È, tuttavia, molto difficile simulare con un buon grado di affidabilità i futuri scenari di mareggiata, di sollevamento locale del livello del mare e di evoluzione della costa, come già evidenziato nel lavoro dedicato all'analisi del potenziale incremento delle aree allagabili al 2100, per effetto di subsidenza e innalzamento del livello del mare (Perini et al. 2017).

Il presente lavoro può costituire, inoltre, un importante contributo al Quadro Conoscitivo che dovrà essere elaborato per il futuro 'Piano integrato per la difesa e l'adattamento della zona costiera ai cambiamenti climatici', previsto dalla Strategia regionale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici (delibera n. 187 del 2018 del 20 Dicembre 2018).

2.DEFINIZIONI

È utile, prima di addentrarsi nella descrizione dei parametri e delle mappe, fornire alcuni riferimenti sui termini generalmente adottati in questo contesto.

Non esiste, infatti, una nomenclatura omogenea, e neppure è disponibile una metodologia 'standard' di analisi. Negli anni sono stati sviluppati svariati studi scientifici ai quali si è fatto riferimento che, per lo più, discendono dal lavoro di Gornitz et al. 1994, il quale ha messo a punto la prima formula per il calcolo dell'indice di Vulnerabilità costiera all'erosione e all'inondazione.

$$CVI = \sqrt{\frac{a*b*c*d*e*f}{6}}$$

a = geomorfologia

b = evoluzione linee di riva

c = pendenze

d = tassi innalzamento s.l.r.

e = altezza significativa dell'onda

f = escursione - marea media

Sono stati presi in considerazione numerosi altri lavori di riferimento tra cui: Hammer-klose et Thieler 2001; Thieler et al.2002; Ozyurt 2007 e 2008; Benassi et al.2009; Fontolan et al. 2005 e 2011; Calabrese et al.2010; Ramieri et al.2011; Bisiccia et al.2016; Aucelli et al.2017.

Nella maggior parte dei lavori citati viene utilizzato il concetto di Vulnerabilità, che rappresenta uno dei 3 parametri di calcolo del Rischio, la cui formula di riferimento è:

$$H \times V \times E \quad (\text{cfr. Varnes e IAEG, 1984})$$

H = *Hazard*, Pericolosità: probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato periodo di tempo e in una data area;

V = *Vulnerability*, Vulnerabilità: grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio, risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità;

E = *Elements at risk*, Elementi a rischio; Esposizione: popolazione, proprietà e attività economiche a rischio in una data area.

Il concetto di 'Vulnerabilità', tuttavia, non è univocamente definito per cui è opportuno chiarire cosa si intende in questo contesto. Il concetto di Vulnerabilità utilizzato, esprime il raccordo che lega l'intensità del fenomeno alle sue possibili conseguenze e si concentra sulla determinazione della posizione e dell'esposizione ai rischi naturali nell'ambiente fisico (Cutter,1996). Essa è quindi in gran parte legata a fattori fisici, economici, ambientali e sociali ed è fortemente influenzata dalla dipendenza di una società da infrastrutture come strade, servizi pubblici, aeroporti, ferrovie e strutture di risposta alle emergenze (Cutter et al., 2000). La Vulnerabilità è quindi caratterizzata da due componenti: la suscettibilità del sistema fisico (o vulnerabilità fisica) del territorio a reagire ad un determinato fenomeno e una vulnerabilità sociale, ovvero il possibile grado di perdita derivante dall'intensità dell'evento.

Nell'ambito del presente lavoro si è deciso quindi di analizzare solo le variabili fisiche della vulnerabilità, ovvero la 'Suscettibilità' del sistema costiero ai fenomeni di erosione costiera e inondazione marina in occasione di eventi di mareggiata. Essa è infatti funzione delle caratteristiche fisiche intrinseche del territorio e non tiene conti di aspetti economici e sociali.

3. CLASSIFICAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ DELLA COSTA AI FENOMENI DI EROSIONE E INONDAZIONE - INDICATORI DI SUSCETTIBILITÀ [SI]

La costa dell'Emilia-Romagna è affetta da due principali criticità collegate agli eventi di mareggiata:

- L'erosione dei litorali dovuta a dinamiche naturali e antropiche su cui spiccano: l'intensità degli eventi di mareggiata, la riduzione del trasporto solido da parte dei fiumi, l'abbattimento delle dune costiere (naturale serbatoio di sedimenti); l'effetto barriera prodotto dalla presenza di opere costiere e di difesa che intercettano parte del trasporto long-shore; la subsidenza;
- L'inondazione marina: legata ad eventi meteomarinari intensi ed associati a fenomeni di 'surge' (acqua alta); le quote molto basse della piana costiera; la discontinuità o assenza della prima barriera naturale costituita dalla duna costiera.

Il lavoro proposto mira ad elaborare indicatori per la gestione di tali rischi sulla base di un approccio multi-criteriale, analogamente alle metodologie utilizzate nei lavori di Fontolan et al. 2005 e 2011 e in Calabrese et al. 2010. La nuova procedura, di seguito illustrata, utilizza però anche parametri diversi e introduce l'analisi integrata dei due fenomeni.

La suscettibilità attuale della costa all'erosione (**SI_e**), puntualmente descritta nella sezione 3.1, e la suscettibilità attuale all'inondazione (**SI_i**), descritta nella sezione 3.2, sono state classificate in 5 categorie: dove il valore 1 rappresenta la suscettibilità molto bassa e il valore 5 la suscettibilità molto elevata.

Il calcolo della suscettibilità totale integrata è ottenuto, infine, attraverso la somma dei due indicatori (**SI_{tot} = SI_e + SI_i**), ed è classificato anch'esso in un 'range' da 1 a 5.

Infine, è stata elaborata una cartografia 'pessimistica', la '**Suscettibilità reale Non Protetta**' (**SNP**), che sostanzialmente simula la condizione della suscettibilità della fascia costiera ai 2 fenomeni, nel caso in cui venissero meno tutti gli interventi di difesa, o gli stessi raggiungessero un grado di inefficienza totale. Per fare questo si è prodotta una classificazione delle opere rigide e degli interventi morbidi, che tiene conto della tipologia dell'opera (e/o intervento) e della loro efficienza.

SNP_e = SI_e - Opere

SNP_i = SI_i - Opere

3.1. Suscettibilità della costa all'erosione [SI_e]

Il primo fattore esaminato – la Suscettibilità della costa al fenomeno dell'erosione (**SI_e**) – è stato calcolato analizzando e incrociando attraverso un'analisi spaziale pesata, tre tipologie di indicatori della costa: morfologici, evolutivi e di pressione antropica. Essi costituiscono, a loro volta, indicatori di sintesi di una serie di variabili elaborate sulla base dei dati più recenti disponibili, Foto aeree 2014, rilievi altimetrici e batimetrici 2012, dati di subsidenza 2011-2016 e uso del suolo 2008.

1. **Variabili Morfologiche:** Ampiezza della spiaggia emersa libera dalle infrastrutture permanenti (2014); quota media della spiaggia emersa (2012); pendenza della spiaggia sommersa (2012);

2. Variabili Evolutive: Evoluzione della Linea di Riva sul lungo periodo (circa 70 anni), che identificano i punti caratterizzati da criticità cronica; Evoluzione della Linea di Riva sul breve periodo (3 anni); Abbassamento dei fondali (2006-2012); Subsidenza recente (2011-2016);

3. Variabili di pressione antropica; espresso attraverso la percentuale di antropizzazione della costa.

Una descrizione dettagliata delle singole ‘variabili’, è fornita nell’Allegato al presente rapporto.

Ciò che è importante sottolineare è che ciascuna variabile è stata classificata in una scala da 1 a 4 (o da 1 a 5), dove la classe 1 rappresenta la situazione di minor criticità e la classe 4 o 5 la criticità maggiore. Questo tipo di rappresentazione permette di evidenziare in modo chiaro la variabilità nei diversi tratti costa.

Nel calcolo dell’indicatore di suscettibilità all’erosione (**SI_e**), si è applicato un peso in percentuale diverso ad ogni gruppo di variabili secondo la formula:

$$SI_e = \text{Variabili Morfologiche (50\%)} + \text{Variabili Evolutive (40\%)} + \text{Pressione Antropica (10\%)}$$

I valori attribuiti alle singole variabili, nel calcolo della categoria di appartenenza, sono:

VARIABILI MORFOLOGICHE 50%		VARIABILI EVOLUTIVE 40%		PRESSIONE ANTROPICA 10%	
Ampiezza spiaggia libera	40%	Tassi di evoluzione delle linee di riva storiche	40%	Antropizzazione della costa	100%
Quota media Spiaggia	40%	evoluzione recente	30%		
Pendenza spiaggia sommersa	20%	Dinamica spiaggia sommersa	20%		
		Tassi subsidenza	10%		

Tabella 1
peso attribuito a ciascuno dei parametri analizzati nel caso di ‘Variabili morfologiche e Variabili evolutive’ e di ‘Pressione Antropica’.

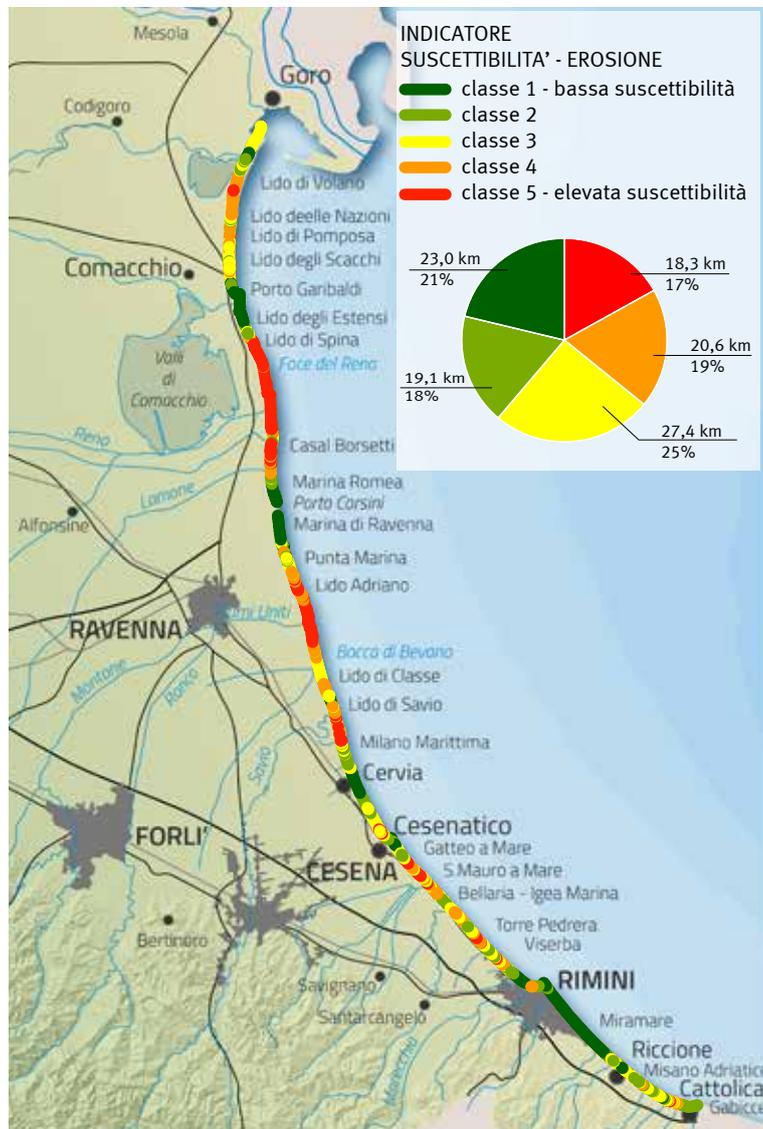
Il livello informativo finale è stato a sua volta rappresentato in 5 classi di suscettibilità all’erosione (Fig. 1).

Come si evince dalla figura e dal grafico associato, il 36% della costa regionale presenta una elevata suscettibilità all’erosione della costa (classi 5 + 4). Tali zone sono particolarmente diffuse nel Ravennate, dove risultano ricadere nelle due classi oltre il 50% delle spiagge. Nel Ferrarese e nella provincia di Forlì-Cesena queste categorie rappresentano circa il 36% della costa, mentre la situazione più incoraggiante è nella provincia di Rimini dove solo il 12.6% delle spiagge è in situazione critica.

Va sottolineato, tuttavia, che per comprendere appieno questi risultati, è importante analizzare a fondo alcune delle singole variabili e, in particolare, quelle più rilevanti ai fini della classificazione.

Per quanto attiene alle variabili morfologiche, le due sicuramente più significative sono l’ampiezza della spiaggia libera dalle infrastrutture permanenti (**A**) e la quota media (**Qm**), descritte in Allegato. L’analisi combinata delle due può già fornire il quadro dei tratti più critici della costa regionale.

Figura 1
Indicatore di 'susceptibilità all'erosione' della costa (SL_e).



La lunghezza totale dei litorali con $A < 50$ m è di circa 42 km, ovvero il 40 % della costa.

I settori più fragili, tuttavia, sono quelli in cui $A < 50$ m e $Q_m < 1$ m e corrispondono a circa 7.8 km dei 108.4 km analizzati tra Volano a Cattolica, ovvero circa il 7% del totale.

Tali punti sono distribuiti in tutte le 4 province (Tab. 3), in alcuni casi si trovano in corrispondenza di zone naturali caratterizzate da un retrospiaggia con zone umide o cordoni litorali, mentre localmente sono a ridosso di centri abitati e infrastrutture. Queste sono evidentemente le situazioni più critiche.

Va sottolineato che alcuni di questi settori, come Misano, Igea Marina sud, Bellaria nord e Lido Adriano, sono stati oggetto di ripascimento nell'ambito del 'Progettone 3', e attualmente presentano un'ampiezza di spiaggia meno critica rispetto alla mappatura qui illustrata.

Per quanto riguarda i parametri evolutivi il dato più significativo è quello della dinamica della linea di riva sul lungo periodo, che identifica i punti di erosione cronica della spiaggia. La dinamica sul breve periodo è, infatti, maggiormente influenzata dal costante intervento antropico legato ai lavori di manutenzione della spiaggia.

Come si evince dalla mappa di Figura 2, le zone critiche sono concentrate nei settori centro nord della costa, e sono legate al processo di rettificazione della linea di riva già identificato nei lavori passati (Calabrese et al. 2010).

Tabella 2
classi di SL_e 'susceptibilità all'erosione' per provincia.

classe	FERRARA		RAVENNA		FORLI'-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità
1	4,9	22	7,4	17	0,5	6	10,2	31
2	2,4	11	6,9	15	1,2	13	8,7	27
3	7,1	31	6,8	15	3,9	45	9,6	29
4	6,8	30	9,2	21	1,7	19	3,0	9
5	1,3	6	14,4	32	1,5	17	1,1	4

Ampiezza spiaggia < 50 m e Q media < 1 m				
	FERRARA	RAVENNA	FORLÌ'-CESENA	RIMINI
lunghezza [km]	2,25	3,34	0,51	1,72
% costa provinciale	10,0	7,5	5,9	5,3
tratti urbani più critici	brevi tratti a Lido delle Nazioni	alcuni tratti di: Lido di Savio, Lido di Dante, Lido Adriano	alcuni tratti di: San Mauro a Mare, Valverde, Cesenatico nord zona ex colonie	brevi tratti a Misano Adriatico zona colonie, Viserbella (la Turchia), Igea Marina sud e alcuni tratti del centro, Bellaria nord

Tabella 3
lunghezza dei tratti critici per Ampiezza spiaggia e Quota media, suddivisi per provincia e Località urbanizzate dove insistono i tratti di spiaggia più critici.

Figura 2
Classi di vulnerabilità legate ai tassi di variazione della linea di riva periodo 1943-2014.

Sono particolarmente le foci fluviali ad aver subito la perdita di territorio più importante negli ultimi 70 anni, tendenza che riflette quella storica rilevabile dai primi decenni del '900.

Foce Fiumi Uniti registra un arretramento fino a 300 m, i valori di massimo arretramento della linea di riva sono però a foce Reno e corrispondono a circa 700 m. Questo è anche il settore della costa regionale con i valori attuali di perdita più elevati, fino a -20 m/anno. L'altra zona che ha subito un forte arretramento è quella antistante il lago delle Nazioni (a nord di Comacchio), che negli anni antecedenti la costruzione dell'argine radente in massi, completato nel 1998, è arretrata di oltre 200 m.

Tuttavia, se si osserva il bilancio complessivo delle superfici di spiaggia perse o guadagnate, si nota che nei 70 anni considerati sono stati persi 551 ettari di spiaggia, a fronte di un accrescimento di circa 521 ettari, questi ultimi, per lo più distribuiti nelle spiagge sottoflutto alle opere marittime. Ciò corrisponde ad una perdita netta di 30 ettari, ovvero 0.4 ettari/anno (4000 m²/a).

I dettagli sui valori delle singole province dimostrano che Ravenna è la provincia che ha perso la superficie maggiore di territorio, in larga parte a Foce Reno e in parte nel tratto di costa tra Lido di Dante e lido Adriano.

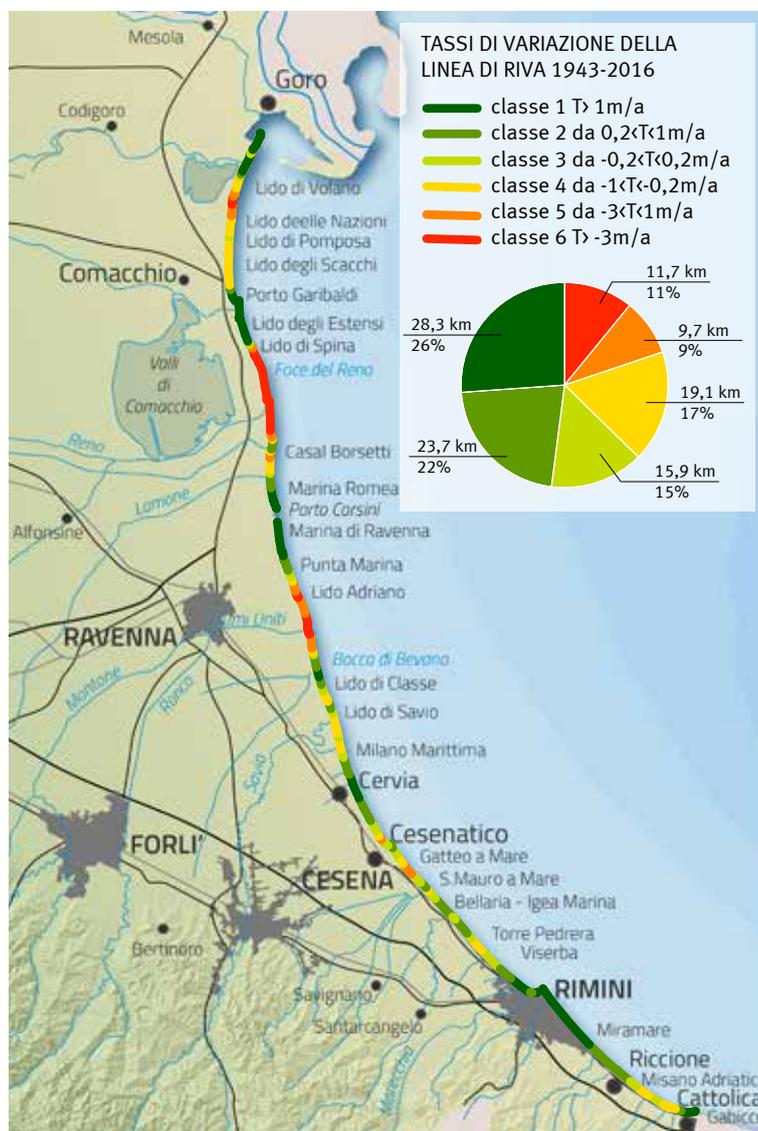


Tabella 4
Superfici in arretramento e in avanzamento per provincia nel periodo 1943-2014.

	FERRARA	RAVENNA	FORLI'-CESENA	RIMINI
arretramento [Ha]	111,9	404,5	18,4	16,3
avanzamento [Ha]	194,1	151,6	8,1	168,3
perdita o guadagno [Ha]	82,2	-252,9	-10,3	152,0

3.2. Suscettibilità della costa all'inondazione marina [SI_i]

L'indicatore di Suscettibilità della costa al fenomeno dell'inondazione marina (SI_i) è stato anch'esso calcolato analizzando e incrociando, attraverso un'analisi spaziale pesata, 3 categorie di variabili della costa: morfologiche, evolutive e antropiche, alcune delle quali coincidono con quelle utilizzate per l'indicatore di suscettibilità all'erosione.

- Variabili Morfologiche:** ampiezza della spiaggia emersa libera dalle infrastrutture permanenti (2014); quota di chiusura verso terra della spiaggia emersa (2012); presenza di ventagli di washover; caratteristiche morfologiche del dosso costiero (*) al 2012-2014;
- Variabili Evolutive:** subsidenza recente (2011-2016);
- Variabili di pressione antropica;** espresso attraverso la percentuale di antropizzazione della costa.

(*) Per dosso costiero si intende la porzione di costa retrostante la battigia, con quote superiori ai 2 metri. Essa include il 'beach ridge', le dune e/o cordoni litorali o opere di difesa artificiali. Dal punto di vista altimetrico, è stato ritagliato sulla base dell'isolinea +2 m s.l.m. La classificazione dettagliata di questo elemento morfologico è descritta nell'Allegato.

Anche in questo caso il calcolo dell'indicatore è stato effettuato nel settore costiero regionale compreso tra Cattolica e Lido di Volano, è stata esclusa la Sacca di Goro, perché totalmente protetta con opere di difesa radenti e lo scanno di Goro perché non sono presenti aree antropizzate retrostanti.

Nell'analisi finale dell'indicatore di suscettibilità all'inondazione (SI_i), si è applicato un peso in percentuale ad ogni variabile secondo la formula:

$$SI_i = \text{Variabili Morfologiche (80\%)} + \text{Variabili Evolutive (10\%)} + \text{Pressione Antropica (10\%)}$$

Il livello informativo finale SI_i è stato a sua volta rappresentato in 5 classi di criticità (Fig. 3).

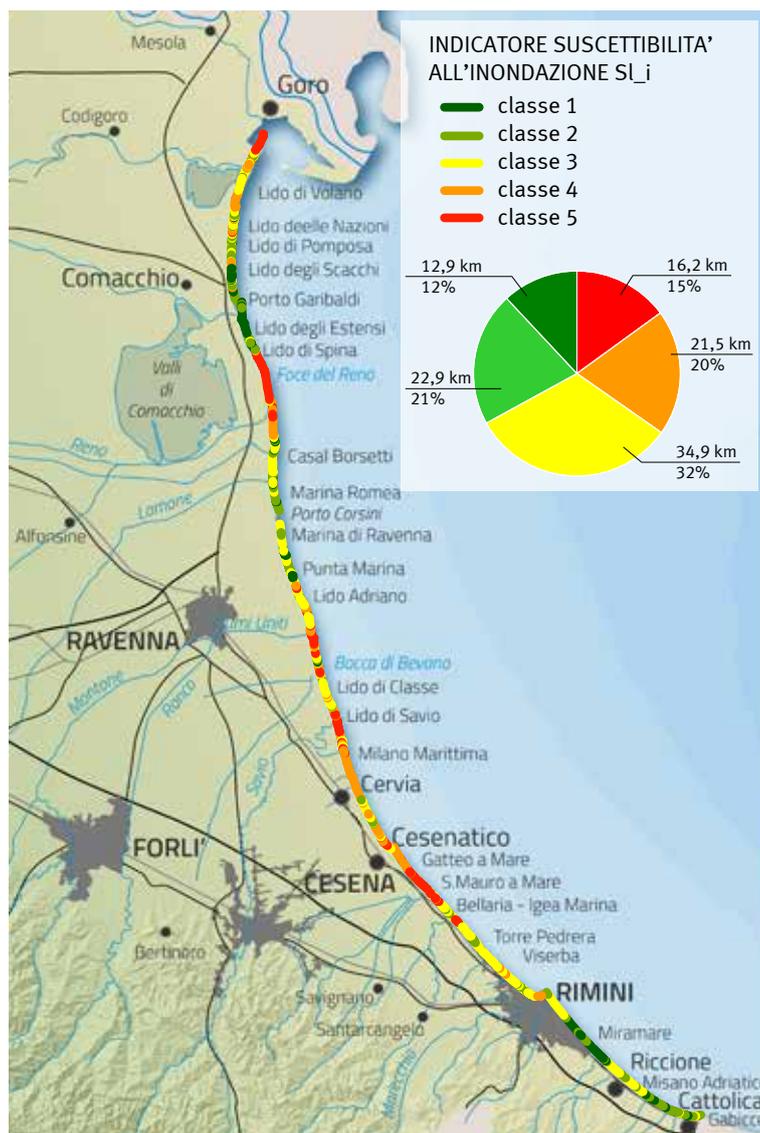
Tabella 5
Pesi attribuiti alle singole variabili utilizzate per il calcolo dell'indicatore SI_i.

VARIABILI MORFOLOGICHE 80%		VARIABILI EVOLUTIVE 10%		PRESSIONE ANTROPICA 10%	
Ampiezza spiaggia libera	20%	Tassi subsidenza	100%	Antropizzazione della costa	100%
Quota chiusura Spiaggia	30%				
Caratteristiche del dosso costiero	40%				
Presenza di ventagli washover	10%				

Come si evince dalla mappa e dal grafico, circa il 35% della costa presenta un'elevata propensione all'inondazione marina (classi 4 + 5). Poiché, come vediamo dalla formula, i parametri morfologici sono quelli che hanno maggior peso nella valutazione, va posta particolare attenzione all'ampiezza della spiaggia, alla quota di chiusura verso terra della spiaggia e alle caratteristiche del cosiddetto 'dosso costiero'.

La distribuzione delle classi di suscettibilità per provincia (Tab. 6) evidenzia che quella più critica in termini di percentuale è Forlì-Cesena, con il 46% di costa nella classe più elevata, che però corrisponde ad una lunghezza complessiva di 4 km. In termini di lunghezza assoluta di costa nelle classi di elevata criticità è invece Ravenna la provincia più fragile.

Le due province sopra citate sono quelle in cui il 'dosso costiero', è nelle condizioni più critiche (Fig. 4 e Tab. 8), infatti nella provincia di Forlì-Cesena oltre il 70% della costa è priva di dosso costiero (Classe 5) e a Ravenna oltre il 30%. In provincia di Ferrara, dove sono ancora presenti ampi tratti di cordone litorale, e dove sono state erette 'dune artificiali', l'assenza di dosso corrisponde al 14% della costa, infine, nel riminese, il



classe	FERRARA		RAVENNA		FORLÌ-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità						
1	5	22	1,9	4	0,0	0	6,1	19
2	6,1	27	8,0	18	0,1	1	8,7	27
3	4,4	20	13,4	30	1,0	12	16,0	49
4	4,3	19	12,5	28	3,5	41	1,0	3
5	2,7	12	8,8	20	4,0	46	0,8	2

Figura 3 Indicatore di 'suscettibilità all'inondazione' della costa (SI_i).

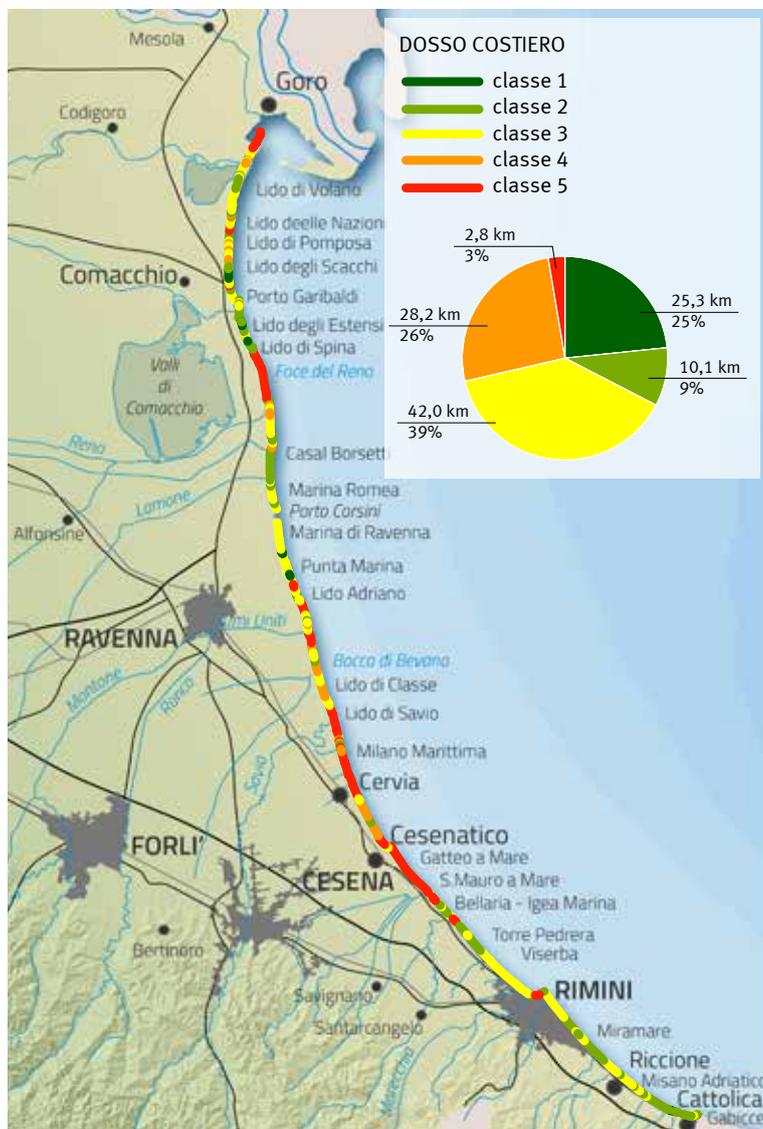
Tabella 6 classi di 'suscettibilità all'inondazione marina' per provincia.

valore scende al 3,7%. Questo risultato è da attribuire al fatto che la piana costiera sud è molto più stretta e pendente e che, a tergo della spiaggia, si registrano quote immediatamente superiori ai 2 metri spesso in concomitanza di rilevati stradali che fungono da argine per eventuale ingressione marina.

Con riferimento ai parametri di spiaggia più significativi, in questo caso valutiamo la combinazione di ampiezza della spiaggia libera da infrastrutture A < 50 m

Tabella 7
lunghezza spiaggia
con $A < 50$ m e $Q_c < 1.5$
m.

	FERRARA	RAVENNA	FORLÌ-CESENA	RIMINI
lunghezza [km]	2,7	5,2	1,3	2,4
% costa provinciale	12,0	11,7	15,0	7,4



e quota di chiusura verso terra $Q_c < 1.5$ m. Il tratto più critico per lunghezza insiste nella provincia di Ravenna, mentre in percentuale è ancora la provincia di Forlì -Cesena ad avere il debole primato.

A conferma di questi risultati, se incrociamo i dati con le mappe di 'pericolosità all'ingressione marina', elaborate in occasione del I° Ciclo della direttiva alluvioni nel 2013, osserviamo che i settori costieri dove l'ampiezza della fascia allagabile per eventi di mareggiata frequenti ($P_3 = Tr 10$ anni) è più estesa e interessa le aree antropizzate, ricadono proprio nelle classi 5 o 4 della cartografia della suscettibilità all'inondazione marina.

I tratti più critici in questo senso sono nelle 2 province di Ravenna e Forlì - Cesena, ovvero:

- La zona da Lido Adriano a lido di Dante;
- L'area di Lido di Savio;
- Il litorale di Cesenatico, con particolare attenzione al settore nord (Cesenatico Colonie) e alla località Valverde.

Figura 4
Classi di vulnerabilità legate alle caratteristiche del 'dosso costiero' e lunghezze per provincia. Le classi sono elaborate sulla base di tre parametri: Ampiezza, Quota media e Quota massima, come descritto in A1.5.

classe	FERRARA		RAVENNA		FORLÌ-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità						
1	1,6	7	0,7	2	0,0	0	0,5	2
2	6,7	29	7,4	17	0,0	0	14,1	43
3	9,5	42	14,8	33	1,0	11	16,8	51
4	1,5	7	7,6	17	1,0	11	0,0	0
5	3,3	15	14,1	31	6,7	78	1,2	4

Tabella 8
Classi di criticità del dosso.



Figura 5
Alcune località tra le più critiche per il rischio inondazione.

3.3. Suscettibilità combinata ai fenomeni di erosione e inondazione [SI_tot]

L'analisi della suscettibilità combinata (o totale) è stata prodotta al fine di evidenziare le aree critiche per la somma dei due fattori, erosione costiera e inondazione marina.

L'elaborazione di **SI_tot** deriva dalla somma aritmetica delle classi dei due fenomeni, normalizzata in 5 classi totali.

Si tratta quindi di una classificazione relativa che non deve essere messa a confronto con le due mappe precedenti, se non per capire quale dei due fenomeni influisce maggiormente sulla propensione al rischio di un'area.

Per la lettura di questa mappa si deve tener presente, infatti, che ci sono tratti della costa che, per condizioni morfologiche, quote molto basse e assenza di dosso, presentano una elevata criticità al fenomeno di inondazione marina, al contrario potrebbero presentare una spiaggia ampia e una dinamica evolutiva non critica e, per questo, risultano avere una bassa suscettibilità all'erosione; un esempio in questo senso è il tratto di costa immediatamente a sud dei moli del porto di Rimini. In questo caso la classe di suscettibilità totale risulta infatti inferiore rispetto alla classe di suscettibilità alla sola inondazione.

Figura 6
Classi di suscettibilità totale o combinata.

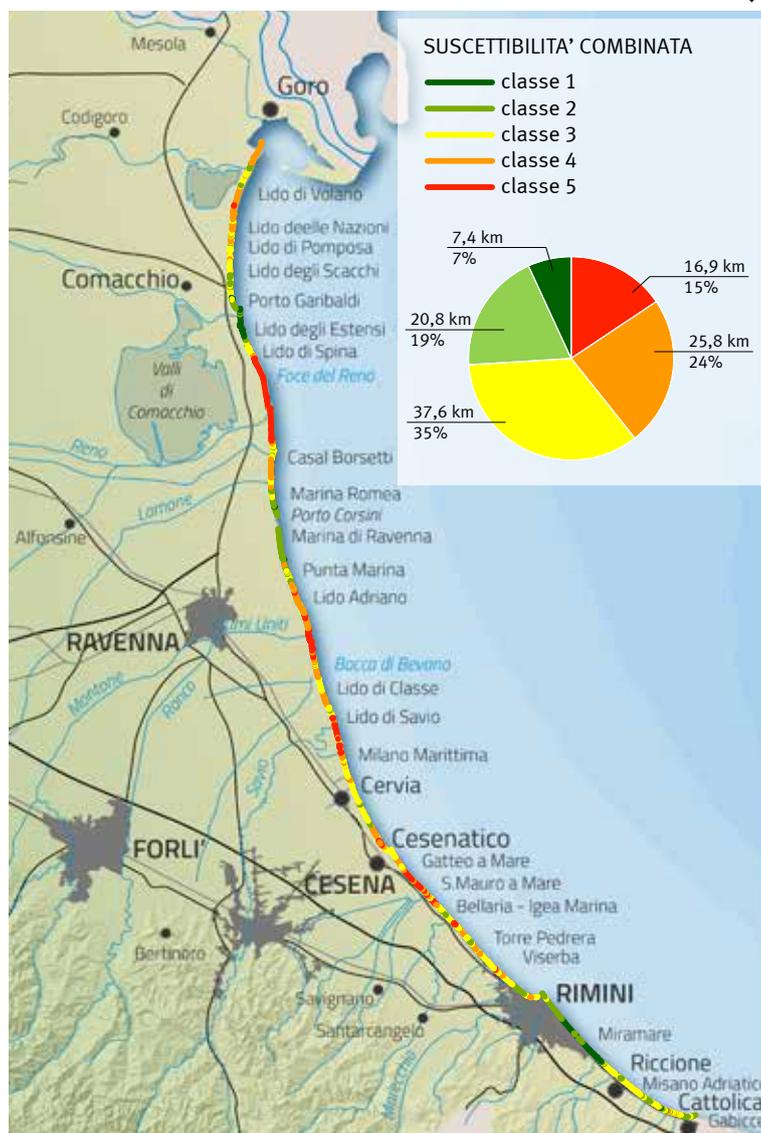


Tabella 9
Classi di suscettibilità
combinata per pro-
vincia.

classe	FERRARA		RAVENNA		FORLÌ-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità
1	2,7	12	0,1	1	0,0	0	4,6	14
2	3,1	14	8,0	18	0,0	0	9,6	30
3	8,5	38	12,1	27	2,2	25	14,7	45
4	7,1	31	12,1	27	3,6	42	3,0	9
5	1,1	5	12,3	27	2,9	33	0,7	2

Come si evince dalla Tabella 9, analogamente alla suscettibilità all'inondazione marina, anche per quanto attiene la 'Suscettibilità combinata' il settore costiero più critico risulta essere quello centrale della costa regionale. In particolare, la provincia di Forlì-Cesena, è quella con la più elevata percentuale di costa nella classe 5 (33%) e, a seguire, la provincia di Ravenna (27%).

3.4. Suscettibilità al fenomeno dell'erosione costiera in condizione di costa non protetta [SNP_e]

La suscettibilità della costa emiliano-romagnola ai fenomeni di erosione e di inondazione marina fin qui illustrata è stata elaborata sulla base di variabili (quali: ampiezza spiaggia, dinamica della linea di riva ecc.) che rappresentano la fotografia di una costa molto protetta, sia con opere rigide che attraverso interventi di ripascimento. Il risultato è quindi assimilabile al concetto di 'Vulnerabilità reale' proposto da Fontolan 2005 e 2011. Negli stessi lavori viene trattata anche l'elaborazione della 'Vulnerabilità potenziale', ovvero della vulnerabilità dei litorali in assenza di protezione.

Anche nel presente lavoro si propone un metodo molto semplificato di analisi della suscettibilità (o vulnerabilità fisica) del territorio al fenomeno dell'erosione costiera in assenza di opere/ripascimenti, che permette di evidenziare quali sono i tratti di costa dove la criticità del territorio ai fenomeni di erosione aumenterebbe nel caso in cui gli interventi di mitigazione venissero meno o raggiungessero un grado di inefficienza totale.

Per fare questo è stato elaborato un ulteriore indicatore **Sope** (Suscettibilità opere), che esprime il valore del livello di protezione della costa ed è legato alla presenza di opere rigide e/o di ripascimenti. Nel caso delle opere rigide l'indicatore è valutato sulla base della tipologia degli interventi e dal loro stato. Esso esprime quindi il valore di incremento potenziale della vulnerabilità della costa nel caso in cui tali interventi venissero meno.

In **Sope**, infatti, le classi maggiori sono attribuite ai tratti di costa meglio protetti. I parametri considerati per l'elaborazione di **Sope** sono stati infatti:

- La tipologia delle opere rigide (dal catalogo 2014 con aggiornamenti al 2018);
- Lo stato di conservazione delle opere (elaborato nel 2017);
- La quantità di sedimento portato a ripascimento per metro lineare di spiaggia (analisi aggiornata al 2018).

La formula utilizzata per l'elaborazione di *Sope* è:

$$Sope = \text{Opere rigide (classe+ stato) (70\%)} + \text{Interventi morbidi (classe) (30\%)}$$

OPERE RIGIDE [70%]			RIPASCIMENTI [30%]		
	classe	tipologia e stato		classe	tipologia e stato
Assenza opera	0		No ripascimenti	0	
Opere poco/mediamente protettive	1	Opere miste in cattivo stato e trasversali (anche soffolte) in stato intermedio	Ripascimenti medio/bassi	1	Apporti < 100 m ³ /ml
Opere molto protettive	2	Opere longitudinali emerse in buono/ottimo stato	Ripascimenti medio/alti	2	Apporti >100 m ³ /ml

Tabella 10
Classi di riferimento delle opere e dei ripascimenti utilizzate per il calcolo di SNP.

Figura 7
Classi *Sope* semplificate (livello di protezione della costa).

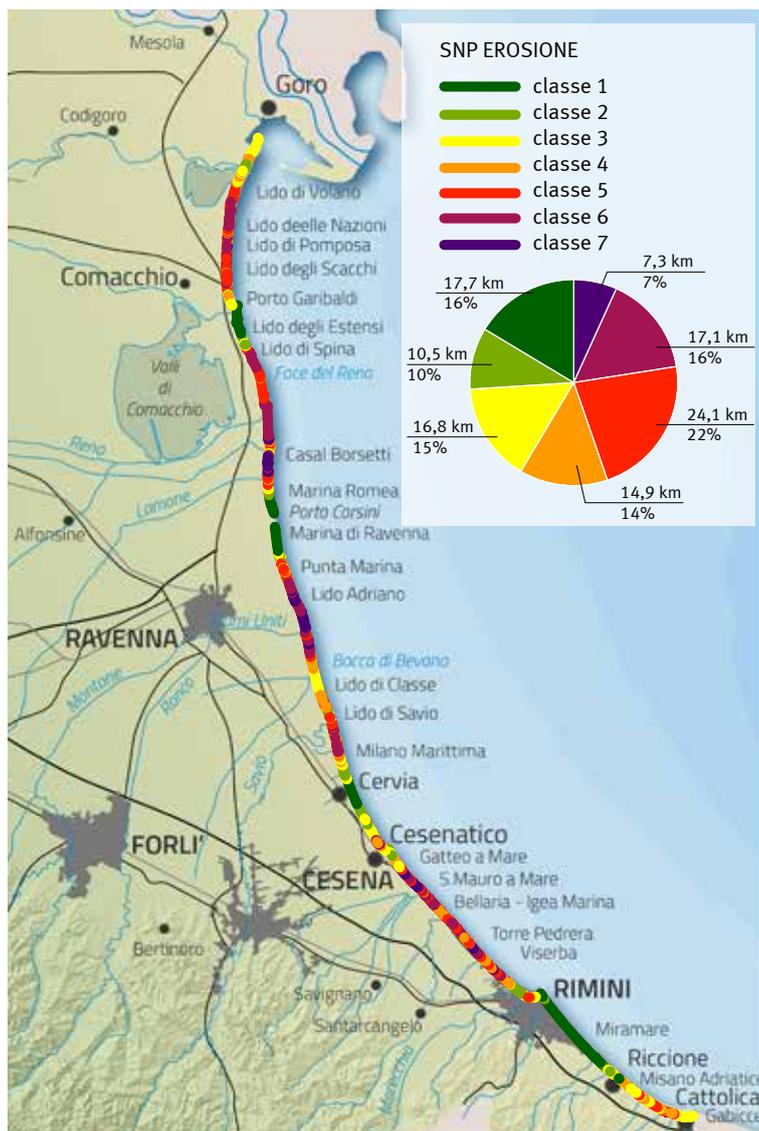
La metodologia di costruzione e analisi di *Sope*, illustrata con maggior dettaglio in Allegato (capitolo A4), include una prima classificazione dei tratti di costa basata sulla tipologia di protezione rigida (Perini et al. 2008) e sul loro stato/efficienza, utilizzando per questo una metodologia semplificata ed inedita prodotta dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli nel 2017. L'incrocio dei dati ha portato, tuttavia, ad un elaborato molto complesso e poco leggibile alla scala regionale. Si è quindi optato per una semplificazione del livello informativo, utilizzando una 'ranking' da 0 a 2, che riguarda sia le opere rigide che gli interventi di ripascimento (Tab. 10). Il prodotto cartografico finale è infatti, la cartografia '*Sope* semplificata' (Fig. 7).

Il passaggio successivo è stato l'elaborazione della Suscettibilità al fenomeno dell'erosione costiera in condizione non protetta (*SNP erosione*), che è il risultato della formula

$$SNP_{erosione} = SI_e + Sope$$

Le classi finali sono 7, ovvero 2 in più rispetto a *SI_e*. Infatti, le zone prive di protezione mantengono la stessa classe di *Sa_e*, quelle protette aumentano il rischio di un fattore 1 o





▲
Figura 8
 Classi di suscettibilità
 all'erosione costiera
 in condizioni di costa
 non protetta SNP.

2 a seconda che siano attualmente mediamente o molto protette. A titolo di esempio, la classe 7 rappresenta il livello di rischio atteso in un settore che attualmente è ben protetto con opere rigide e/o con ripascimenti, nel caso in cui questi interventi venissero meno.

Dalla mappa si osserva chiaramente come le zone a più alto rischio (5-6-7) siano molto ampie e diffuse sia nella zona centrale della regione sia nel territorio ferrarese a nord di Porto Garibaldi. Queste aree, infatti, sono attualmente protette con opere di difesa longitudinali distaccate in buono stato, il cui valore **Sope** è 2.

La lunghezza delle aree totali in classe 5, nelle condizioni attuali di costa protetta è, di 18,3 km, mentre la lunghezza totale delle classi 5+6+7 è uguale a 48,5 km, che corrisponde al 39.3% della costa analizzata.

Analogamente all'analisi sopra descritta è stata elaborata anche un'analisi dell'aumento della criticità all'inondazione marina in caso di rimozione o inefficienza delle opere attualmente presenti. L'elaborazione proposta, tuttavia, non riesce ad evidenziare con chiarezza il fattore 'stato di efficienza' dell'opera e quindi si preferisce tralasciare la presentazione del risultato. In allegato, al contrario, è riportata anche la descrizione delle opere rigide di all'inondazione marina.

Il documento illustra la metodologia utilizzata per l'elaborazione delle diverse variabili impiegate per costruire le cartografie di suscettibilità della costa ai fenomeni di erosione e inondazione marina. Ogni paragrafo, che contiene anche un'analisi sintetica dei contenuti, rappresenta quindi il metadato da associare allo strato informativo.

A.1. VARIABILI MORFOLOGICHE

A1.1. Ampiezza spiaggia emersa [A]

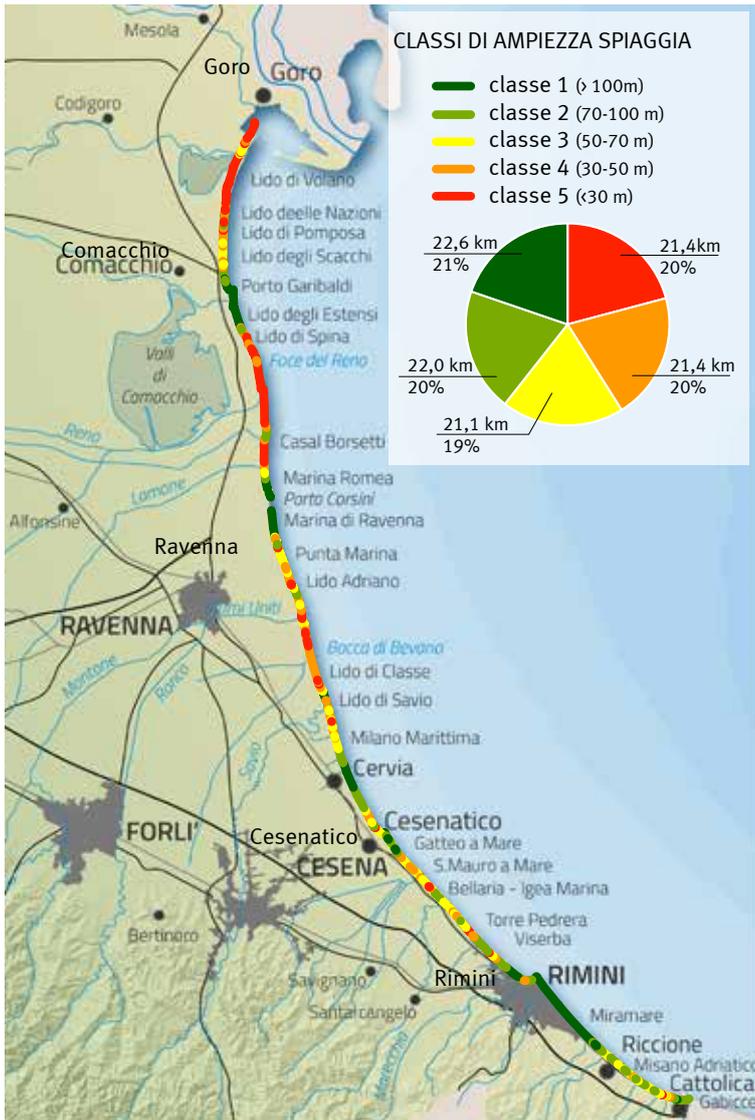
Questo dataset contiene le informazioni relative all'ampiezza della "spiaggia libera emersa" della costa compresa tra Cattolica (RN) e la Foce del Po di Volano. Per spiaggia emersa si intende, infatti, la porzione di spiaggia libera da infrastrutture, compresa tra la linea di riva e il primo elemento antropico o naturale (Es: Struttura balneare o Duna); punto che definiamo 'chiusura della spiaggia emersa'. Essa rappresenta il settore dinamico dei litorali, in costante evoluzione per effetto dei fenomeni meteomarini e spesso anche per azione antropica rispetto ai processi morfodinamici, quindi in costante evoluzione.

L'elaborazione della variabile 'Ampiezza Spiaggia emersa' (A) e delle successive (Quota media e Quota di chiusura) viene prodotta partendo dal poligono di 'spiaggia emersa' mappato sulla base della fotointerpretazione del Volo Agea 2014. Sono stati costruiti una serie di transetti ortogonali alla linea di riva (T), paralleli tra loro e equidistanti 10 metri, la cui lunghezza, compresa tra la linea di riva e il punto di chiusura della spiaggia, equivale proprio ad "A".

Il dato finale è rappresentato in cinque 'classi di ampiezza', ovvero di lunghezza dei transetti (Fig. A1). Per passare dalla classificazione dei transetti ad un file lineare, si è operata una suddivisione in zone omogenee di ampiezza, per tratti ampi almeno 100 metri.



Figura A1
Esempio di classi di ampiezza della spiaggia emersa.
(Torre Pedrera)

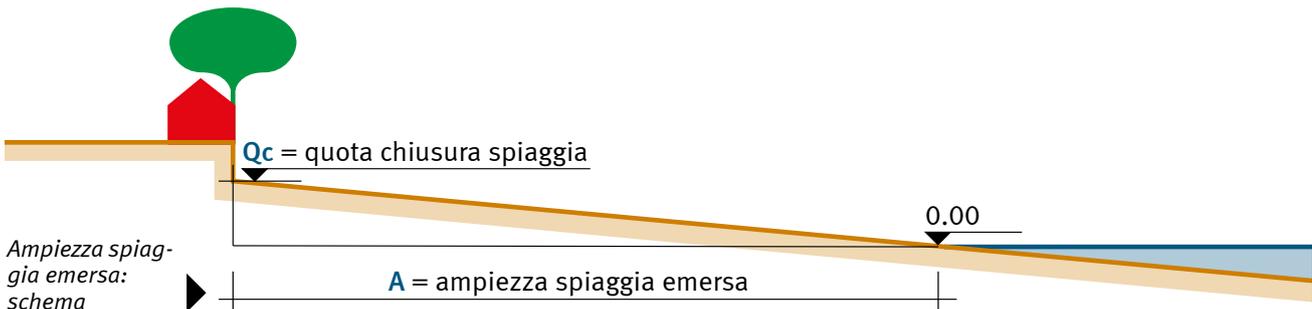


L'indicatore 'Ampiezza spiaggia' è importante anche dal punto di vista economico, poiché implica la capacità della spiaggia di ospitare infrastrutture turistiche mobili e/o file di ombrelloni. Come si evince dalla mappa (Fig. A2), il 53,5% della costa tra Cattolica e Volano è caratterizzata da una spiaggia con ampiezza $A < 50$ metri (classi 4 + 5). In questa percentuale sono inclusi i tratti dove sono presenti le opere radenti e dove la spiaggia è spesso assente. Solo il 46,5% dei litorali ha quindi un'ampiezza $A > 50$ metri (classi 3 + 2 + 1), valore generalmente considerato come riferimento minimo per classificare i litorali in buono stato, al fine della fruizione turistica. Va sottolineato che molte spiagge ad ampiezza ridotta sono prospicienti a centri urbani e non esiste alcun livello di protezione tra la spiaggia e l'abitato.

Figura A2
Classificazione regionale dell'ampiezza della spiaggia libera da infrastrutture fisse.

classe	FERRARA		RAVENNA		FORLI'-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità
1 [>100 m]	4,7	21	7,1	16	0,7	8	10,1	31
2 [70 -100 m]	1,9	9	7,6	17	2,2	26	10,2	31
3 [50- 70 m]	3,0	13	6,1	14	3,2	37	8,8	27
4 [30 - 50 m]	4,5	20	12,5	28	2,1	24	2,3	7
5 [<30 m]	8,4	37	11,4	25	0,4	5	1,1	4

Tabella A1
Classi di ampiezza spiaggia libera per provincia.



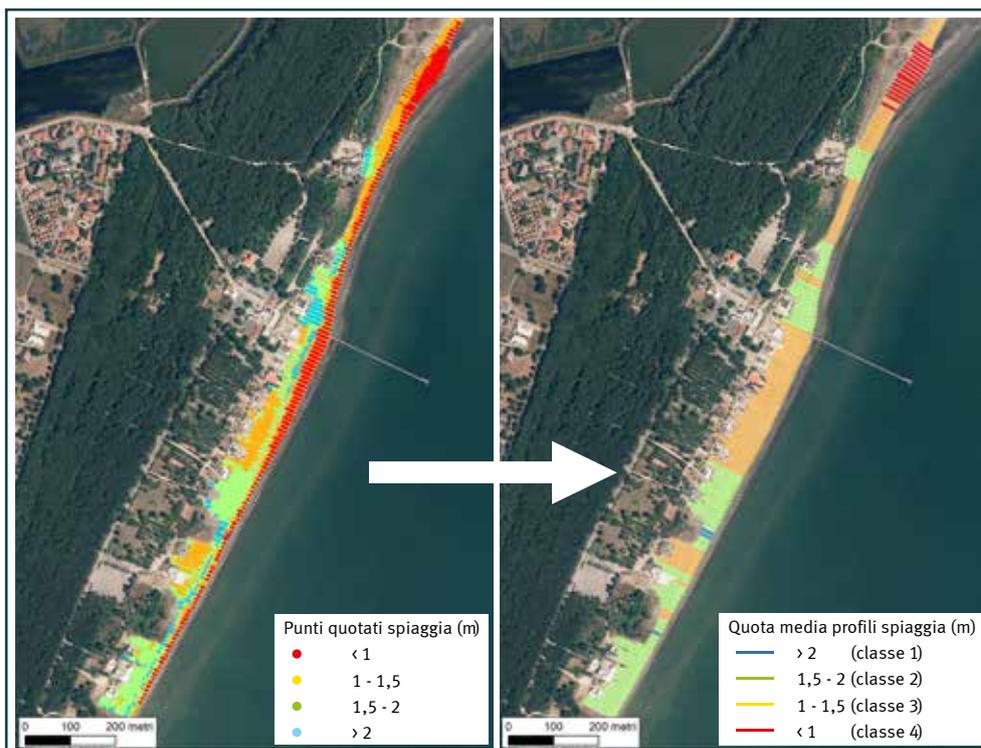
A1.2. Quota media spiaggia emersa [Qm]

Per ogni transetto T costruito sul poligono di 'spiaggia emersa' (Fig. A3) è stata calcolata la quota media ottenuta dall'incrocio con il DTM-Lidar 2012 (Fig. A 4). L'analisi è stata effettuata estraendo, per ciascun transetto, le quote altimetriche di punti equidistanti un metro e calcolando la media di tali valori (Fig. A5).

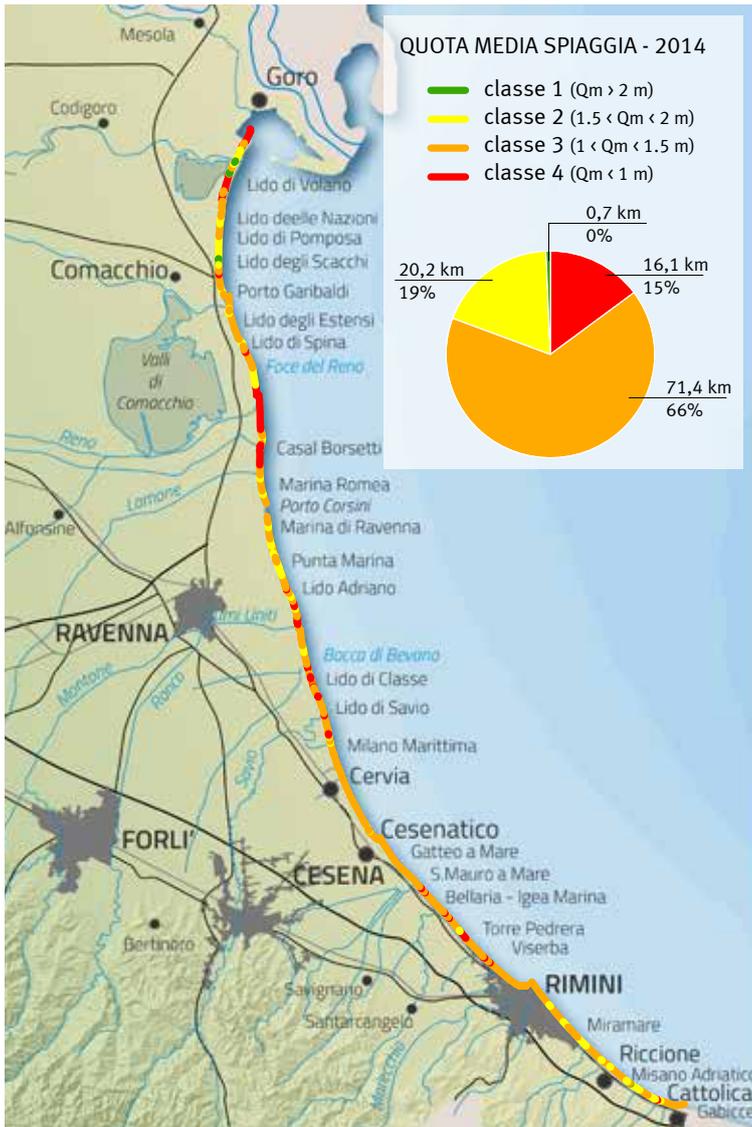


◀◀ **Figura A3**
Transetti.

◀ **Figura A4**
Punti quotati lungo i transetti.



◀ **Figura A5**
Calcolo della Q_m per transetto a partire dai punti quotati.
(Lido di Volano)



A valori di classe più bassi (classe 1) corrisponde una suscettibilità all'erosione più bassa, a valori di classe maggiore (classe 4) corrisponde una suscettibilità all'erosione più elevata.

Come si evince dall'immagine di Figura A6, che rappresenta la distribuzione regionale di questa variabile, la quota media delle spiagge regionali è piuttosto bassa, infatti il 76% di esse ricade nella classe 3 ($1 \text{ m} < Q_m < 1.5 \text{ m}$). Le due province con la percentuale maggiore di spiagge a quota molto bassa ($Q_m < 1 \text{ m}$) sono Ferrara e Ravenna, tuttavia le altre 2 province, Forlì-Cesena e Rimini, hanno una percentuale elevatissima di spiagge in classe 3 ($1 \text{ m} < Q_m < 1.5 \text{ m}$). Questo dato evidenzia diverse caratteristiche /problematiche dei litorali:

- siamo in presenza di spiagge generalmente poco pendenti e quindi dissipative;
- hanno una scarsa disponibilità di sedimento;
- se la Q_m è bassa ed è associata ad una scarsa ampiezza della spiaggia, aumenta il rischio di perdita di territorio in caso di innalzamento del livello del mare.

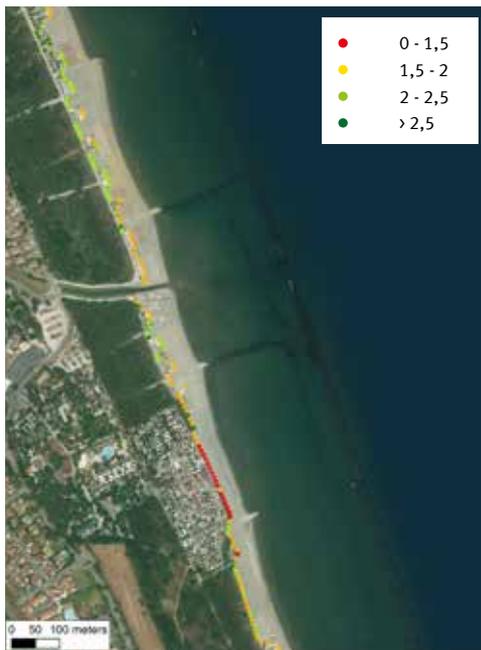
Figura A6
 Classificazione regionale della Q_m – Quota media della spiaggia libera.

Tabella A2
 Classi di Q_m – Quota media della spiaggia libera per provincia.

classe	FERRARA		RAVENNA		FORLÌ-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità						
1 [> 2 m]	0,6	3	0,0	0	0,0	0	0,1	1
2 [$1.5 - 2$ m]	6,8	30	7,9	18	0,5	6	5,0	15
3 [$1 - 1.5$ m]	10,4	46	27,6	62	7,9	91	25,5	78
4 [< 1 m]	4,7	21	9,2	20	0,3	3	2,0	6

A1.3. Quota di chiusura della spiaggia emersa [Q_c]

La quota di chiusura è stata estratta dal DTM 2012 nel punto di intersezione tra i transetti ed il limite verso terra del poligono della spiaggia emersa (Fig. A7). La classificazione finale (Fig. A9) è stata effettuata per tratti omogenei di Q_c con lunghezza minima di almeno 100m (Fig.8) ed è espressa in 4 classi; alla classe 1 corrisponde la quota più elevata ($> 2,5 \text{ m}$).



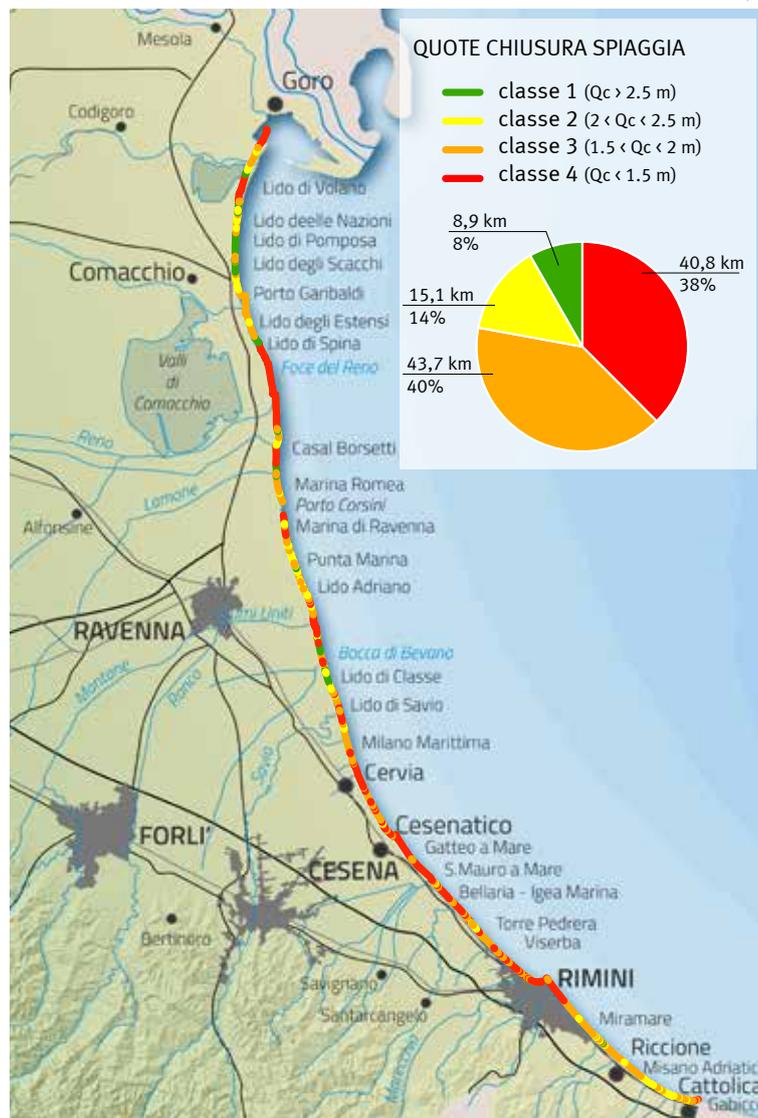
◀ **Figura A7**
Quote punti di chiusura della spiaggia (Q_c).
(Punta Marina)

◀ **Figura A8**
Tratti omogenei per Q_c .
(Punta Marina)

Figura A9
Classificazione regionale della Q_c – Quota di chiusura della spiaggia libera.

Questo indicatore evidenzia i tratti della costa maggiormente predisposti all'allagamento del retrospiaggia, qualora quest'ultimo non sia protetto dalla presenza di una duna o di un argine artificiale. Si veda a questo proposito l'indicatore 'Dosso Costiero'. Come si evince dalla Figura 10 e dal grafico, più dell'80% delle spiagge presenta una Quota di chiusura inferiore a 2 m (classi 3 + 4) e solo l'8% ha altezze superiori a 2.5 m, valore questo che equivale al battente di riferimento per lo scenario di pericolosità all'inondazione $Tr \gg 100$ anni.

La provincia più critica risulta essere quella di Forlì-Cesena, dove quasi l'80% dei suoi 8.6 km di spiaggia ha una quota di chiusura inferiore al 1.5 m. L'altra provincia molto critica è Ravenna dove circa il 75 % delle spiagge sono in classe 5 (40%) e 4 (35%).



classe	FERRARA		RAVENNA		FORLI'-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità
1 [>2.5 m]	5,2	23	3,5	8	0,0	0	0,2	1
2 [2- 2.5 m]	3,1	14	7,0	15	0,3	4	4,6	14
3 [1.5 - 2 m]	8,8	39	15,5	35	1,6	18	17,8	55
4 [<1.5 m]	5,4	24	18,6	42	6,8	78	10,0	30

Tabella A3
Classi di Q_c – quota chiusura spiaggia libera per provincia.

A1.4. Pendenza della spiaggia sommersa

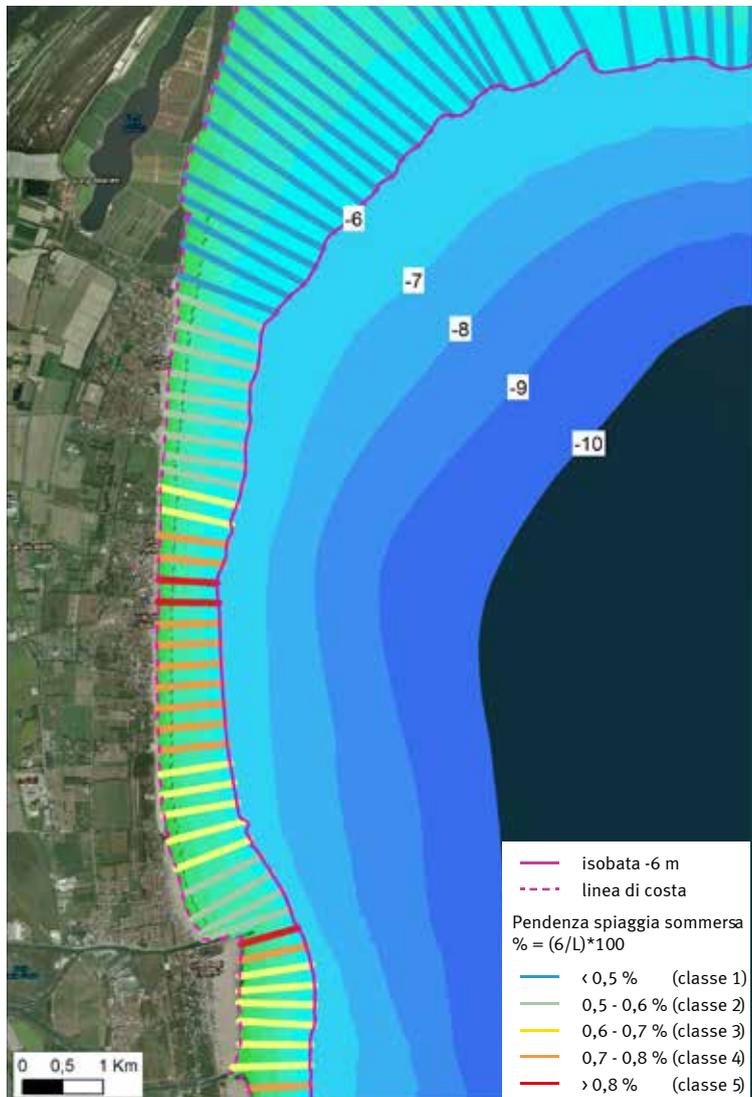
Figura A10
dettaglio della classificazione basata sulla pendenza della spiaggia sommersa.

La variabile 'pendenza spiaggia sommersa' rappresenta la pendenza media del fondale, calcolata lungo una serie di transetti estesi tra la linea di riva e la profondità di -6 metri. I valori di profondità sono stati estratti dal DTM_2012_costa_RER che costituisce un modello altimetrico integrato della piana costiera dell'Emilia-Romagna e dei fondali antistanti (per questo livello informativo vedi rapporto tecnico dedicato in: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa>). Lungo ciascuno dei transetti tracciati ortogonalmente alla linea di riva e spazati 250 metri, è stata calcolata la pendenza in percentuale, utilizzando il rapporto tra il dislivello (uguale a 6 metri) e la lunghezza del transetto (L) secondo la formula:

$$\text{Pendenza (\%)} = (6/L) * 100$$

Questo parametro rappresenta anche, implicitamente, l'ampiezza della spiaggia sommersa compresa tra le batimetriche di tra 0 e 6 m, infatti, per la classe 5 tale ampiezza risulta essere inferiore ai 750 m e per la classe 1 sempre superiore a 1200 m. Come si evince dalla sottostante figura A11, gran parte della spiaggia sommersa ha una pendenza media inferiore a 0.7% (Classe 3).

Le classi maggiori 4 e 5 sono, invece, concentrate nei settori più critici intorno alla foce del fiume Reno e di Fiumi Uniti dove l'approfondimento dei fondali è legato allo smantellamento degli apparati sommersi dei 2 corsi d'acqua come conseguenza della riduzione del trasporto fluviale, e della accelerata subsidenza antropica legata alle attività estrattive a mare.



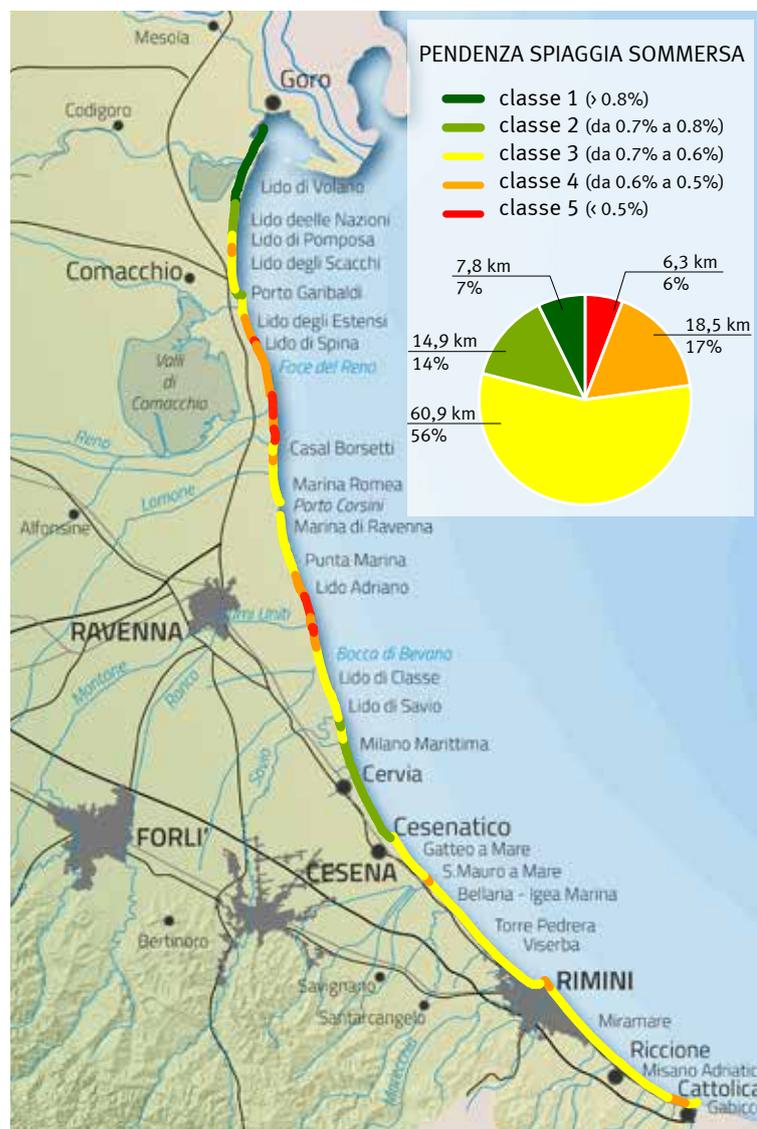


Figura A11
Classificazione regionale della pendenza della spiaggia sommersa.

classe	FERRARA		RAVENNA		FORLÌ'-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità	lunghezza km	% arrotondata all'unità
1	7,8	35	0,0	0	0,0	0	0,0	0
2	3,7	16	8,8	20	2,5	28	0,0	0
3	6,9	31	18,3	41	5,6	65	30,1	92
4	3,6	16	11,8	26	0,6	7	2,5	8
5	0,5	2	5,8	13	0,0	0	0,0	0

Tabella A4
Classi di pendenza della spiaggia sommersa per provincia.

A1.5. Dosso costiero

La mappatura del Dosso Costiero è basata sull'analisi del DTM Lidar del 2012, dal quale sono state estratte le aree immediatamente retrostanti la linea di riva, con quote superiori ai 2 metri rispetto al livello del mare (Fig. A12). Il dato include elementi naturali e/o artificiali, ovvero: il rilevato di spiaggia (*beach ridge*), la duna e i rilevati artificiali quali: strade, aree antropizzate e opere di difesa.

Dal DTM 2012 è stata estratta l'isolinesa dei 2 metri che delimita l'area del dosso, ricontrollata anche attraverso un'accurata foto-interpretazione. In corrispon-



Figura A12
Quote DTM 2012 in metri.
(Porto Garibaldi)



Figura A13
Classificazione
ampiezza dosso in
metri.
(Porto Garibaldi)



Figura A14
Classificazione Quota
media dosso in metri.
(Porto Garibaldi)



Figura A15
Classificazione Quota
massima dosso in
metri.
(Porto Garibaldi)

denza del ‘dosso’ sono stati tracciati i transetti ortogonali alla linea di riva ed equidistanti tra loro circa 10 metri, classificati poi sulla base dei tre parametri descrittivi: **Lunghezza del transetto o Ampiezza del dosso**, **Quota media** e **Quota massima** (Figg. A13-A15). I due parametri di quota sono stati ottenuti dalla ulteriore intersezione con il DTM 2012. Lungo ciascun transetto sono stati estratti una serie punti, equidistanti tra loro un metro, che sono stati analizzati per determinare sia la **Quota media** (valore medio delle quote di tutti i punti quotati di ogni singolo transetto) sia la **Quota massima** (valore del punto con quota maggiore di ogni singolo transetto).

Ciascuno dei 3 parametri è stato classificato in un range da 1 a 4, dove alla classe 1 è stato assegnato il valore meno critico e alla classe 4 quello più critico.

Infine, per elaborare una classificazione complessiva, che tenga conto dei 3 fattori, a ciascun transetto è stato attribuito un valore che corrisponde alla somma delle 3 classi (**Ampiezza**, **Quota media** e **Quota massima**), ottenendo valori da un minimo di 3 ad un massimo di 12 che sono stati normalizzati in scala da 1 a 4. La classe 1 è quella che corrisponde al dosso con caratteristiche migliori per quota e ampiezza e alla classe 4 il dosso che presenta le caratteristiche peggiori. È stata infine aggiunta la classe 5, di massima vulnerabilità, che indica i tratti dove il ‘dosso costiero’ non è presente (Fig. A16).

Come in parte già anticipato nel paragrafo 3.2 del presente rapporto, dove è riportata anche la mappa complessiva del dosso (Fig. 4 par. 3.2) alcune zone della costa sono particolarmente critiche rispetto a questa variabile. Il 23% della costa analizzata, infatti, è priva di ‘dosso costiero’ (classe 5). La situazione più evidente è quella della provincia di Forlì-Cesena dove oltre il 70% della costa versa in queste condizioni.

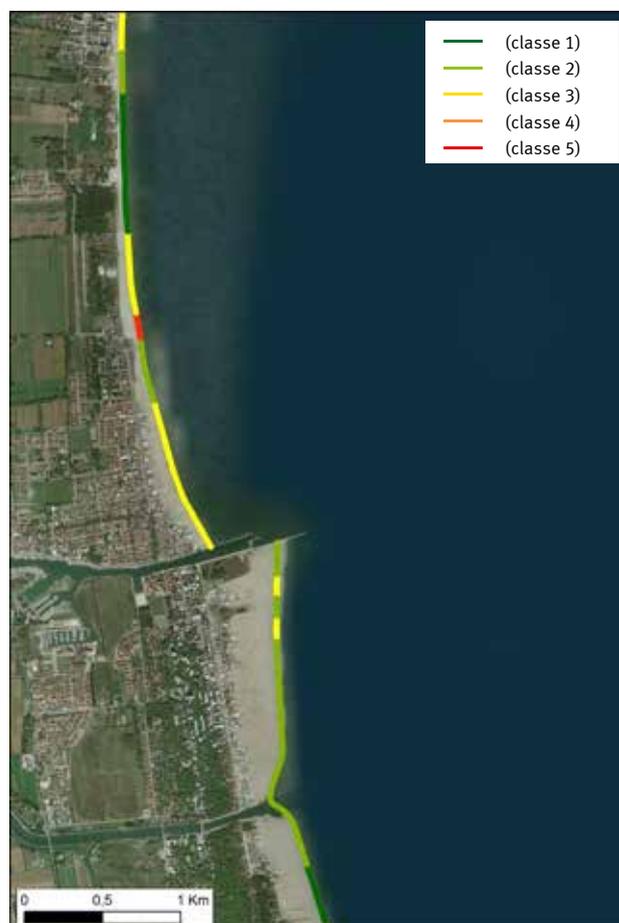
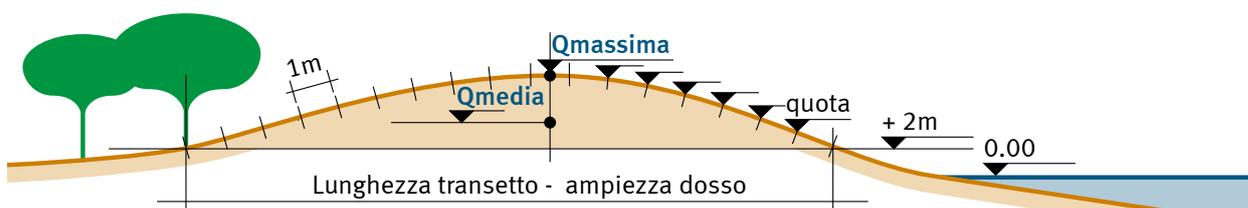


Figura A16
Dosso costiero classe totale.
(Porto Garibaldi)

classe	FERRARA		RAVENNA		FORLÌ-CESENA		RIMINI	
	lunghezza km	% arrotondata all'unità						
1	1,6	7	0,7	2	0,0	0	0,5	2
2	6,7	30	7,4	17	0,0	0	14,1	43
3	9,5	42	14,8	33	1,0	11	16,8	51
4	1,5	6	7,6	17	1,0	11	0,0	0
5	3,3	15	14,1	31	6,7	78	1,2	4

Tabella A5
Dosso Costiero - Classi per provincia.

Quota media dosso costiero: schema

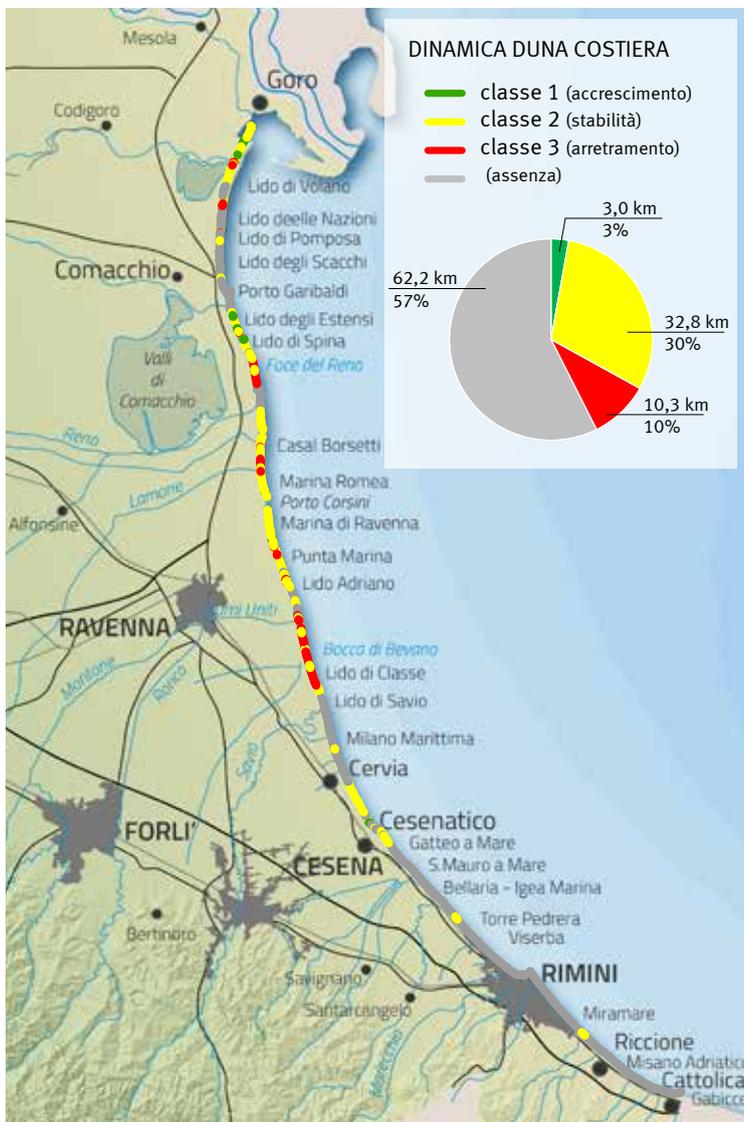


A1.6. La duna

Nonostante la classificazione della ‘duna’ non sia entrata come elemento a sé stante nella valutazione della suscettibilità della costa ai fenomeni di erosione e inondazione marina, poiché nel calcolo è stata considerata come parte del ‘dosso costiero’, nell’ambito del presente rapporto si propone comunque una breve scheda su questo importante elemento morfologico.

Il lavoro di mappatura e classificazione della duna è molto complesso, infatti, oltre alla fotointerpretazione e al confronto tra i diversi voli aerei disponibili, essa si basa sull’analisi di diversi dataset di raster altimetrici, che permettono un puntuale controllo di quote, pendenze, presenza di varchi e della loro evoluzione nel tempo. Tutte queste informazioni necessitano di un’osservazione diretta, in campo, per il collaudo dell’interpretazioni basata sul telerilevamento. A fronte di ciò e della consapevolezza che la conoscenza approfondita di questo elemento morfologico sia cruciale per mettere in atto azioni di contrasto al futuro innalzamento del livello del mare, in occasione del presente studio, è stato

Figura A17
Distribuzione della duna e dei cordoni litorali più recenti e loro dinamica evolutiva.



avviato un progetto dedicato alla cartografia della duna.

L’aggiornamento della cartografia della duna è stato realizzato sulla base della fotointerpretazione del volo aereo Agea 2017 (confrontato anche con le immagini Bing 2018), utilizzando come base cartografica di partenza la mappa geomorfologica costiera del 2008.

A differenza delle precedenti elaborazioni, la nuova cartografia include, oltre alla duna recente, anche i cordoni dunali prossimi alla linea di riva e attualmente sede di pinete o di nuclei urbani, che presentano età variabili dal XX secolo fino al XIV-XVI secolo, come risulta dalla cartografia geologica 1:50000 prodotta nell’ambito del progetto CARG (Fogli 187, 205 e 223).

Nella nuova cartografia delle dune, accanto alla classificazione già utilizzata in passato e basata sulla natura e la presenza o meno di vegetazione (“tipo duna”), sono stati introdotti nuovi campi, ovvero: tipologia di copertura vegetazionale, livello di antropizzazione e quota (Fig. A18). È stato inserito anche un campo note in cui vengono descritti ulteriori dettagli rilevanti tra cui, per esempio, le informazioni relative agli interventi di stabilizzazione o di ripristino che hanno modificato l’assetto o l’evoluzione dell’elemento morfologico negli ultimi anni.

Tipo duna	Vegetazione	Antropizzazione	Quota
Artificiale	Rada - assente	Bassa	< 2m
Attiva	Erboso - arbustiva	Medio	> 2 m
Semi-stabilizzata	Mista	Alta	
Stabilizzata	Arborea		

Un ulteriore elemento di novità, rispetto alle mappe geomorfologiche precedenti, riguarda l'introduzione della classe 'duna artificiale' per includere gli elementi morfologici come i giardini a mare di Cesenatico o le dune di Lido Adriano, che sono opere artificiali erette allo scopo di proteggere l'abitato dall'ingressione marina e ubicate dove, in passato, era presente una duna naturale. In alcuni casi si tratta di interventi che hanno forma e vegetazione molto simili alle morfologie naturali, dalle quali è difficile effettuare una netta distinzione.

Grazie alla disponibilità di nuovi dati, tra cui le immagini aeree di altissima risoluzione e i dati Lidar 2019, acquisiti dall'Autorità di Distretto per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità ai sensi della Direttiva Alluvioni 2007/60, è stato introdotto un nuovo attributo relativo alla dinamica evolutiva della duna, con riferimento all'ultimo decennio. Il ricco set di dati permette, infatti, di effettuare analisi quali-quantitative molto accurate sullo stato e l'evoluzione del sistema dunale (Fig. A17).

Allo stato attuale lo studio è stato svolto a scala regionale e, come per le altre variabili finora discusse, la cartografia bidimensionale è stata interpretata e sintetizzata attraverso una informazione lineare, 'Duna 2019', che consente l'analisi statistica dei parametri descrittivi della duna, con riferimento alla lunghezza di costa sottesa.

La mappa di Figura A17 illustra il dato relativo alla distribuzione e dinamica della duna costiera aggiornata al 2019. È importante ricordare che, analogamente agli elementi descritti nei precedenti paragrafi, anche la Duna è stata mappata e classificata solo nel tratto di costa tra Cattolica e lo Scanno di Volano, per una lunghezza di costa di 108.4 km. Lunghezze e percentuali non sono quindi confrontabili con quelli dei lavori precedenti (Perini e Calabrese 2010) in cui i calcoli includevano tutta la costa fino a Gorino. Come accennato in precedenza, un ulteriore elemento di differenza sta nel fatto che la presente mappa include anche cordoni dunali più arretrati e relitti che, pur non essendo coinvolti direttamente nei processi eolici e marini attuali, possono giocare un ruolo di protezione per il fenomeno dell'in-

Figura A18
Esempio di classificazione della duna sulla base dei campi 'tipo duna'.
(Punta Marina)



gressione marina. Di conseguenza la presenza complessiva della duna costiera non può che risultare superiore rispetto alle precedenti classificazioni.

Come si evince dalla mappa e dal grafico associato, considerando i 108.4 km di costa tra Cattolica e lo Scanno di Volano, la duna è attualmente presente per una lunghezza complessiva di circa 46 km (che corrispondono al 42.6% della costa considerata). Va sottolineato, inoltre, che una parte limitata di queste morfologie è ricostruita artificialmente. Con riferimento all'ultimo decennio, nei 108 km di costa analizzati si osserva che: il 30% presenta dune in condizioni di stabilità, grazie anche all'intervento dell'uomo, il 3% si trova in stato di avanzamento e il 10% presenta dune in arretramento o con un sensibile abbassamento della quota.

A1.7. Depositi di washover (o ventaglio di rotta)

I depositi di washover sono stati mappati sulle ortofoto più recenti (2014) e su quelle storiche (a partire dal 1936). Essi rappresentano un tipo di morfologia di impatto da mareggiate e sono legati al trasferimento di grossi quantitativi di sabbia dal 'beach ridge' o dalla duna verso il retrospiaggia. Questi fenomeni, in alcuni casi, portano al completo smantellamento delle dune. La mappatura dei depositi di washover è puntuale e rappresenta le zone dove tali morfologie sono rilevabili da ortofoto. La mappatura riguarda sia i depositi recenti, cioè quelli

Figura A19
Distribuzione e rilevanza dei depositi washover lungo il litorale regionale.

Figura A20
Distribuzione e rilevanza dei depositi washover lungo il litorale regionale. Dettaglio per Lido di Dante.



attualmente presenti lungo la costa, che quelli mappati sulle carte storiche e ora non più visibili perché sostituiti da opere di difesa radenti. Il censimento è quindi accompagnato dalla data di riferimento della morfologia; si è deciso infatti di mappare anche i depositi più importanti presenti nel passato perché sono indicatori di zone di particolare debolezza della costa, rispetto a quella tipologia di fenomeno (Fig. A19). A ciascun punto è stata attribuita una classe di importanza (rilevanza). Rilevanza 1: washover dubbio o di piccole dimensioni, Rilevanza 2: washover storico e non più attivo, perché arginato, o attivo e di dimensioni medie, Rilevanza 3: washover di dimensioni importanti e persistente (presenti da lungo tempo).

Come per le altre variabili anche in questo caso si è prodotto un file lineare in cui la zona costiera è stata suddivisa in tre classi (Fig. A20) così distinte:

Classe 0

Assenza di ventagli di washover;

Classe 1

Presenza di ventagli di washover di rilevanza 1 e 2;

Classe 2

Presenza di ventagli di washover di rilevanza 3.

2. VARIABILI EVOLUTIVE

A2.1. Dinamica Linea di Riva a breve termine (2012-2014) [LR]



La classificazione della fascia costiera rispetto alla variabile ‘Dinamica linea di riva a breve termine’ (2012-2014), è stata elaborata sulla base di transetti ortogonali alla costa che intercettano le due linee di riva, consentendo così monitorare gli spostamenti verso mare, tratti in avanzamento della costa, e quelli in cui la linea di costa si sposta verso terra, zone in arretramento.

Le linee di riva sono state fotointerpretate sui voli aerei ortorettificati AGEA 2011 e 2014 e per la fotointerpretazione si è seguito il criterio dell’asciutto-bagnato, come descritto nel lavoro (Calabrese L. e Lorito S. 2010).

Il calcolo si basa sull’utilizzo dell’apposito ‘tool’ per GIS sviluppato da U.S. Geological Survey (USGS) e denominato *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Il tool permette di definire una linea di base a terra dalla quale vengono generati transetti ad essa ortogonali ed equidistanti tra loro 20 metri. Lungo ogni transetto vengono intersecate le linee di riva, ottenendo così l’informazione sullo spostamento della posizione nel tempo. Spostamenti negativi denotano l’arretramento della linea di riva, quelli positivi un avanzamento.

La classificazione è stata effettuata considerando le lunghezze di Avanzamento/Arretramento per zone omogenee (tratti ampi almeno 100 metri) con riferimento alla seguente suddivisione (Fig. A21):

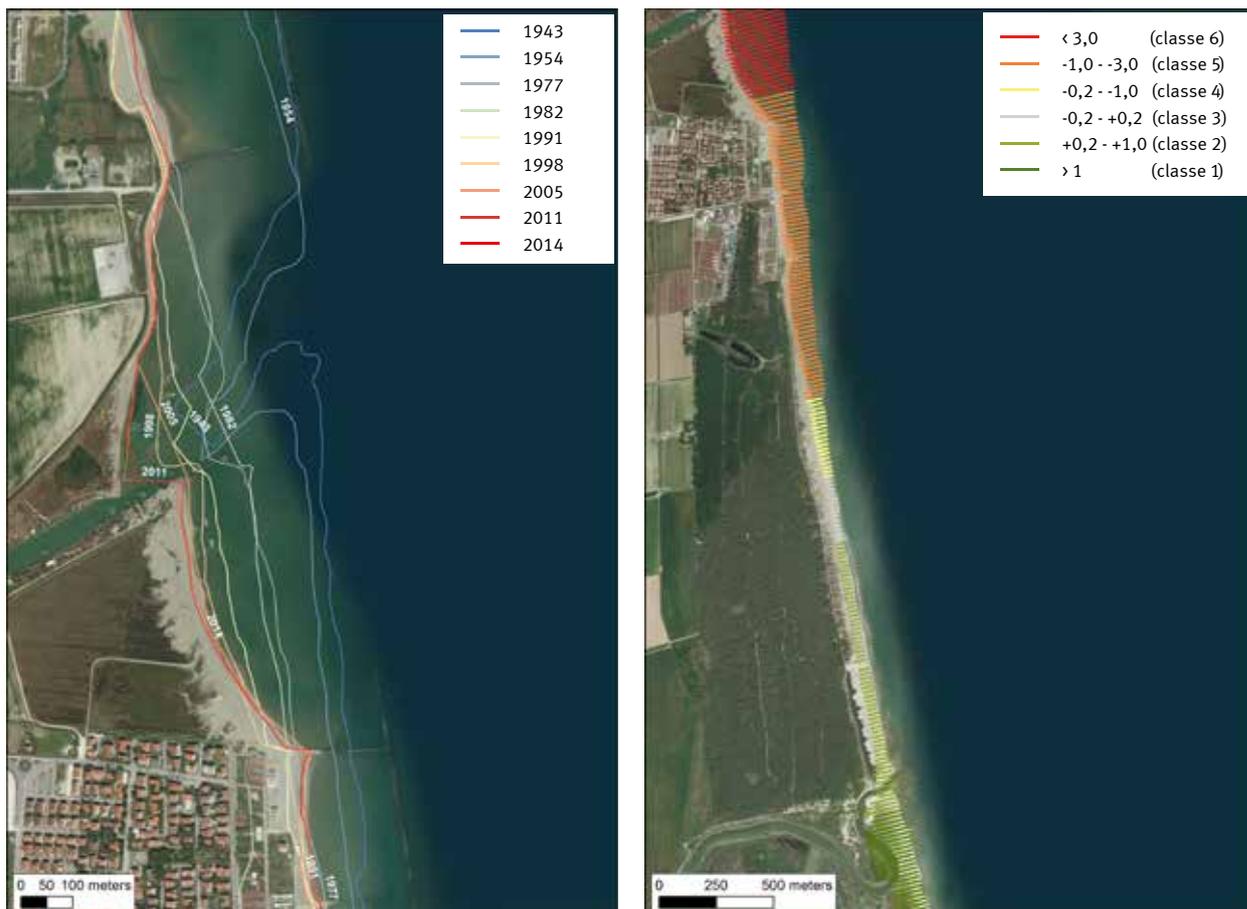
▲
Figura A21
Esempio di classificazione della costa sulla base della dinamica recente delle linee di riva.
(Lido di Volano)

LR >+20 metri	(Classe 1) Avanzamento
LR tra +5 e +20 metri	(Classe 2) Lieve Avanzamento
LR tra +5 e -5	(Classe 3) Stabile
LR tra -5 e -20	(Classe 4) Lieve Arretramento
LR <-20	(Classe 5) Arretramento

A2.2. Tassi di evoluzione Linea di Riva nel lungo periodo (1943-2014) [T_LR]

L’analisi dell’evoluzione della linea di riva sul lungo periodo permette di individuare le aree caratterizzate da erosione cronica dei litorali. Nell’ambito di questo lavoro sono stati calcolati i tassi di avanzamento/arretramento dei litorali dal 1943 al 2014.

Sono state utilizzate le linee di riva relative agli anni 1943, 1954, 1976, 1982, 1991, 1998, 2005, 2011 e 2014, mappate con fotointerpretazione dei voli aerei ortorettificati, seguendo il criterio di mappatura dell’asciutto-bagnato (Fig. A22), L’analisi delle statistiche evolutive di variazione della linea è stata svilup-



pata utilizzando l'estensione per GIS DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*), sviluppata dal Servizio Geologico americano USGS. Tale strumento permette la generazione automatizzata e manuale di transetti di misurazione a partire da una linea di base preventivamente tracciata. Il DSAS calcola i tassi di variazione del litorale utilizzando quattro diversi metodi: (1) velocità dell'endpoint (EPR), (2) regressione lineare semplice (LRR), (3) regressione lineare ponderata e (4) mediana dei quadrati. Gli altri parametri sono l'errore standard, il coefficiente di correlazione e l'intervallo di confidenza che vengono calcolati attraverso la regressione lineare semplice e ponderata. I risultati di tutti i calcoli vengono archiviati in una tabella che può essere collegata al file transetti da un campo di attributo comune. L'interprete deve poi analizzare quale modello di calcolo sia il più corretto e rappresentativo del litorale o dei diversi tratti dei costa. Nel caso in esame è stato utilizzato il metodo della regressione lineare.

La classificazione della fascia costiera è stata effettuata per zone omogenee (tratti ampi almeno 100 metri), considerando i tassi di variazione della linea di riva nel lungo termine (Avanzamento/Arretramento) espressi in metri/anno, sono state quindi attribuite 6 classi così definite (Fig. A23):

- T_LR > +1 m/a (Classe 1)
- T_LR tra +0.2 e +1 m/a (Classe 2)
- T_LR tra -0.2 e +0.2 (Classe 3)
- T_LR tra -0,2 e -1 m/a (Classe 4)
- T_LR tra -1 -3 m/a (Classe 5)
- T_LR tra < -3 m/a (Classe 6)

Figura A22
 Linee di riva dal 1943 al 2014.
 (Foce Fiumi Uniti)

Figura A23
 Tassi di variazione
 linea di riva dal 1943.
 (Lido di Dante, foce di Bevano) al 2014
 (m/anno).

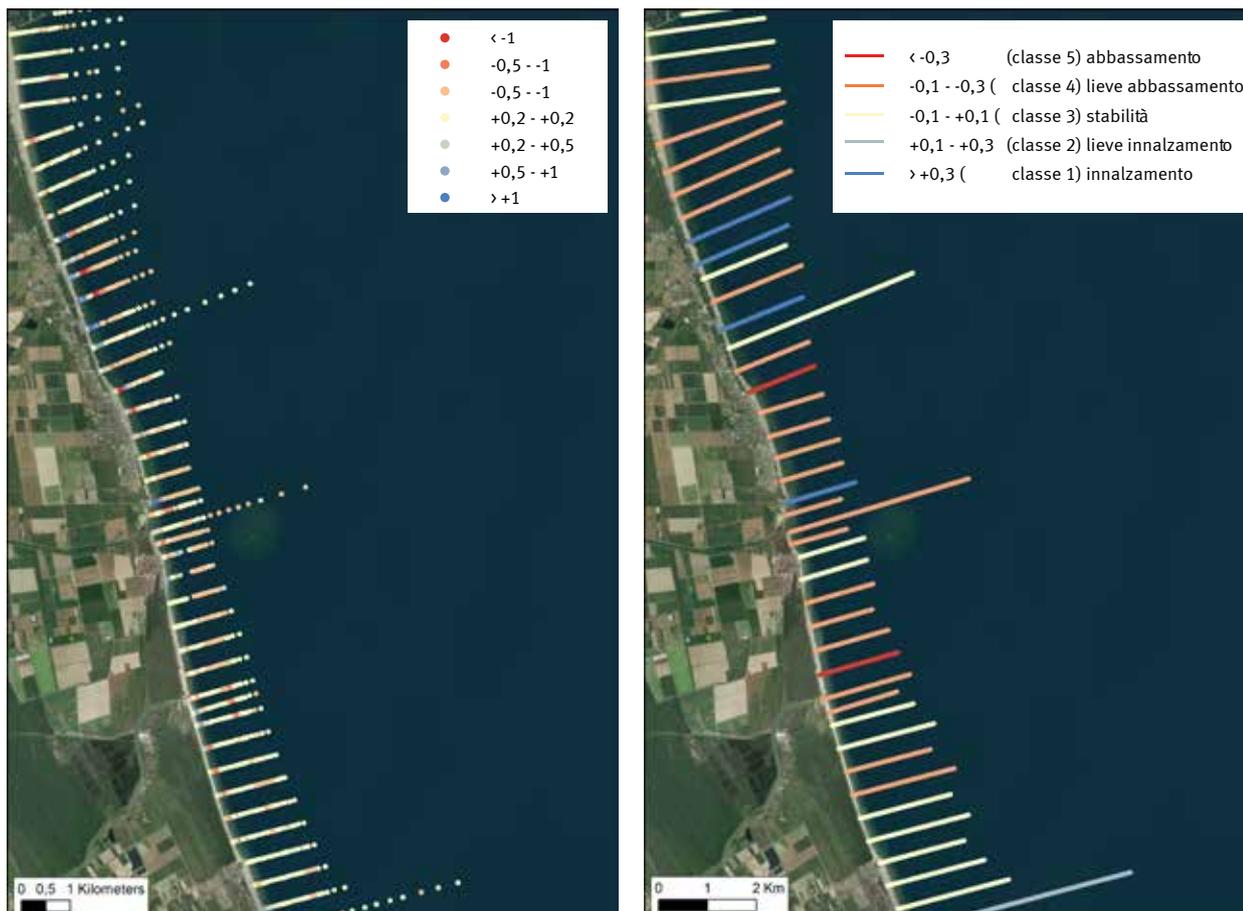


Figura A24
Punti di intersezione (trasetti-isobate) differenze batimetriche 2006-2012 (m). (Foce Fiumi Uniti)

Figura A25
Profili batimetrici a confronto valori medi (m). (Foce Fiumi Uniti)

Le classi 1 e 2 indicano una tendenza all'avanzamento, la classe 3 una situazione di stabilità, mentre le classi 4, 5 e 6 indicano una situazione da che va da un modesto ad un forte arretramento.

A2.3. Dinamica Fondali 2006-2012 [DF]

Al fine di valutare la dinamica dei fondali della spiaggia sommersa è stata messa a punto una metodologia che utilizza le isobate e i punti realmente acquisiti lungo i 252 transetti appartenenti alla della rete regionale – Arpae 2006-2012. Lungo ciascun transetto, in corrispondenza dei punti di intersezione delle Isobate 2012, sono stati estratti i valori batimetrici acquisiti nel 2012 e nel 2006 utilizzando la strumentazione di indagine batimetrica 'multibeam'. Per un dettaglio sulle campagne regionali, gestite da Arpae per conto della regione si rimanda al sito di Arpae (https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3294&idlivello=1884). Per ciascuno dei punti è stata calcolata la differenza dei valori batimetrici (Fig. A24); tali valori sono stati analizzati dal punto di vista statistico per determinare il valore minimo, medio e massimo. Il valore medio delle differenze batimetriche è stato attribuito a ciascun transetto ottenendo così una mappa delle classi di abbassamento/innalzamento (Fig. A25).

Per la dinamica dei fondali sono state individuate 5 classi basate sulle differenze medie di profondità tra il 2006 ed il 2012 così suddivise:

DF < -0,3 metri	(CL 5); abbassamento
DF tra -0,1 e -0,3 metri	(CL 4); lieve abbassamento
DF tra -0,1 e +0,1 metri	(CL 3); stabilità
DF tra +0,1 e +0,3 metri	(CL 2); lieve innalzamento
DF > +0,3 metri	(CL 1); innalzamento

A2.4. Tassi di subsidenza 2011-2016 [SU]

La Subsidenza (abbassamento del suolo) è un fenomeno naturale che può essere accelerato da processi antropici, per questo la Regione Emilia-Romagna da decenni effettua il monitoraggio del fenomeno nel settore di pianura, avvalendosi di Arpae che gestisce le reti regionale di monitoraggio (https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=2051&idlivello=1423).

A partire dal 2002 le mappe delle velocità sono state elaborate anche attraverso la tecnica interferometrica (SAR) che, via via, ha sostituito completamente gli altri metodi. L'aggiornamento più recente delle mappe deriva dall'elaborazione dei dati SAR relativi al periodo 2011-2016 (Arpae, 2018).

Sulla base dei valori di subsidenza più recenti si è elaborata una classificazione della fascia costiera suddividendo i valori di velocità di abbassamento in 3 categorie (Fig. A26):

Classe 1: Velocità abbassamento -
Bassa: < di 2,5 mm/anno

Classe 2: Velocità abbassamento -
Media: tra 2,5 e 7,5 mm/anno

Classe 3: Velocità abbassamento -
Alta: > di 7,5 mm/anno

Come si evince dall'immagine sono limitate le zone della fascia costiera con subsidenza elevata. Queste zone sono dislocate nell'area del delta, dove lo spessore dei depositi recenti è consistente e con valori di compressibilità ancora elevati e a sud di Ravenna. Qui l'area è più estesa per effetto dei prelievi di gas dal sottosuolo che inducono ancora valori di compattazione accelerata. Altre zone di limitata estensione nel riminese ove i valori sono forse da attribuire principalmente ai prelievi idrici.

Figura A26
Subsidenza della fascia costiera 2006-2011 e classi di rischio.



A3. INDICATORE DI PRESSIONE ANTROPICA [PA]

-  area agricola eterogenea
-  difesa longitudinale distaccata
-  duna attiva
-  duna semi-stabilizzata
-  duna stabilizzata
-  spiaggia con infrastrutture
-  spiaggia emersa
-  vegetazione erbosa
-  zona urbanizzata

Figura A27
Uso del suolo.
Lido degli Scacchi

Figura A28
Transetti uso del suolo.

Figura A29
Transetti pressione antropica.



La pressione antropica della fascia costiera è calcolata in una fascia ampia circa 300 m a partire dalla linea di riva verso l'entroterra. Per la classificazione è stata utilizzata la Cartografia Uso del Suolo della Costa 2008-SGSS (Fig. A27) che è stata intersecata con transetti costruiti perpendicolarmente alla linea di riva e equidistanti 10 m. Si è così ottenuta, per ciascun transetto, la lunghezza dei diversi tipi di uso del suolo intercettati (Fig. A28). La sommatoria delle lunghezze delle diverse classi d'uso attribuibili all'azione antropica (Urbano; spiaggia con Infrastrutture; darsene e/o opere portuali) sono state utilizzate per il calcolo della percentuale di antropizzazione rispetto alla lunghezza totale del transetto, utilizzando la seguente formula:

$$\% \text{ Area urbanizzata} = (\text{Sommatoria lunghezza area antropizzate} / \text{Lunghezza totale transetto}) * 100$$

La fascia costiera è stata poi suddivisa in 5 classi relative alla percentuale di antropizzazione per aree omogenee (tratti con ampiezza minima di 100 metri), così definite (Fig. A29):

- PA = 0% - 10% (CL 1)
- PA = 10% - 30% (CL 2)
- PA = 30% - 60% (CL 3)
- PA = 60% - 80% (CL 4)
- PA = 80% - 100% (CL 5)



A4. INDICATORI DI PROTEZIONE DELLA COSTA

A4.1. Classificazione delle opere rigide di contrasto ai fenomeni di erosione e loro efficacia

Il livello informativo utilizzato è il 'Catalogo delle opere di difesa costiera' 2014 con aggiornamenti al 2018, da cui sono stati estratti i poligoni delle opere di difesa di contrasto all'erosione dei litorali, ovvero: le opere a mare (tipo: opere longitudinali distaccate e trasversali emerse e soffolte) e quelle aderenti (tipo: Scogliere radenti e palizzate) che sono state costruite per proteggere dall'arretramento i tratti di costa ormai privi di litorale.

La metodologia di analisi consiste in:

- elaborazione di una classificazione basata sul 'tipo opera';
- elaborazione di una classificazione basata sull'efficacia e sullo stato di criticità dell'opera;
- una classificazione finale dei tratti di costa protetti da opere che sintetizza i due parametri precedenti;
- una classificazione semplificata ridotta a 3 classi.

Tipo OPERE RIGIDE contrasto erosione	
classe	
1	Assenza opera
2	Difese trasversali e longitudinali soffolte
3	Difese miste a celle soffolte
4	Opere longitudinali emerse e /o radenti e difese miste



La classificazione basata sul 'tipo opera' parte dal presupposto che le opere più idonee a contrastare i fenomeni erosivi siano quelle emerse distaccate e/o quelle radenti alla quale è stata attribuita la classe 4 (Fig. A30). Qualora tali opere diminuissero drasticamente la loro efficacia o venissero meno, il tratto di costa sotteso si troverebbe in uno stato di forte criticità. La classe 1 è invece riservata ai tratti di costa non protetti.

► **Tabella A6**
Classificazione tipo Protezione Rigida della Costa al fenomeno dell'erosione.

▲ **Figura A30**
Tipo di opera di difesa.
(Casal Borsetti)

Per definire lo stato di ‘Criticità/Efficacia’ delle opere di contrasto all’erosione ci si è basati, invece, sull’analisi dei seguenti fattori, distinti tra opere distaccate/ trasversale e opere radenti:

Per opere distaccate e/o trasversali			
	dislivello dei fondali	escavazione dei varchi	stabilità della linea di riva
Valore 1	> di 2 m	approfondimento del varco >> dei fondali	costante arretramento (erosione) e/o necessità di costanti interventi di manutenzione
Valore 0	< di 2 m	approfondimento <= al dislivello dei fondali	area protetta da opere risulta in avanzamento stabile e non necessita di interventi

Per opere distaccate e/o trasversali			
	distanza dell’opera dalla linea di riva	presenza di varchi	Avvallamenti (abbassamenti differenziali)
Valore 1	> 30 m	presenti	> 0,5 m
Valore 0	< 30 m	assenti	< 0,5 m

Figura A31
criticità opera di difesa.
(Casal Borsetti)



A ciascun fattore è stato attribuito un valore di criticità da 0 a 1, in cui il valore 1 esprime la maggior criticità.

La criticità finale delle opere risulta avere valori in un range da 0 a 3 (4 classi). Classe 0 quando tutti i fattori sono in classe 0 e Classe 3 quando tutti i fattori sono in classe 1 (Fig. A31).

La combinazione delle due classificazioni fornisce un quadro complessivo del livello di protezione rigida della costa, ottenuto attraverso la matrice:

Classi opere rigide (erosione) =
Classe tipo opera (70%)
Classe Criticità (30%)

Il livello informativo risultante (Classificazione del livello di Protezione Rigida della Costa al fenomeno dell’Erosione - CPRCE), è caratterizzato da un range di valori che va da 7 a 28 che è stato suddiviso secondo la tecnica del Natural Breaks in 5 classi così suddivise (Fig. A32):

- range valori: 7-8 (Classe 1) aree prive o scarsa protezione all’erosione.
- range valori: 9-11 (Classe 2)
- range valori: 12-14 (Classe 3)
- range valori: 15-22 (Classe 4)
- range valori: 23-28 (Classe 5) aree con la massima protezione all’erosione

Al fine della elaborazione di SNP (Susceptibilità della costa in condizioni non protette - vedi par. 3.4 della relazione) si è tuttavia riscontrato che questa classificazione, incrociata con quella dei ripascimenti, determinava una frammentazione della costa troppo elevata e poco rappresentativa per una sintesi regionale. A tale scopo si è quindi provveduto ad una semplificazione del file - CPRCE in 3 classi di criticità, secondo il seguente schema:



CLASSI SEMPLIFICATE OPERE RIGIDE contrasto erosione		
	classe	tipologia e stato
Assenza opera	0	
Opere poco/mediamente protettive	1	Opere miste in cattivo stato e trasversali (anche soffolte) in stato intermedio
Opere molto protettive	2	Opere longitudinali emerse in buono/ottimo stato

A4.2. Classificazione delle opere rigide di contrasto ai fenomeni di inondazione e loro efficacia

Il livello informativo è stato realizzato estraendo dal Catalogo 2014 (aggiornato al 2018) solo le opere di difesa erette a contrasto dei fenomeni di inondazione marina, ovvero: le difese longitudinali aderenti (per lo più in massi), le opere radenti in terra e/o gli argini prossimi e immediatamente retrostanti la spiaggia; gli argini interni; le difese trasversali (che proteggono dall'erosione di canali in caso di alta marea); i muretti.

Tipo OPERE RIGIDE contrasto inondazione	
classe	
1	Assenza opera
2	Argine interno/difesa trasversale e muretti
3	Opera radente in terra e/o argine interno prossimo al litorale
4	Difesa longitudinale aderente in massi

La Classificazione della vulnerabilità è stata fatta considerando sia il tipo di opera che lo stato di criticità dell'opera. Per quanto riguarda il tipo di opera sono stati assegnati punteggi da 1 a 4, secondo lo schema in tabella.

Per determinare la criticità di queste opere (e quindi la loro efficacia) si è

Tabella A7
Classificazione semplificata del livello di protezione rigida della costa rispetto al fenomeno dell'erosione.

Figura A32
Opere rigide contrasto erosione; classificazione finale livello di protezione. (Casal Borsetti)

Tabella A8
Classificazione tipo protezione rigida della costa rispetto al fenomeno dell'inondazione.

utilizzato il criterio altimetrico, basato sul confronto tra la quota dell'opera e i tre scenari di sopraelevazione del livello del mare utilizzati nell'ambito della Direttiva Alluvioni 2007/60, recepita a livello nazionale dal d.lgs. 49/2010.

Dai modelli altimetrici più recenti, ottenuti con tecnologia laserscan (DTM LIDAR 2008, 2010, 2012), sono state estratte le quote lungo le singole opere di difesa, che, a loro volta, sono state confrontate con i livelli di riferimento dei diversi scenari di inondazione utilizzati per l'elaborazione delle mappe di pericolosità all'inondazione marina ai sensi della succitata norma.

Dal confronto si è prodotta la classificazione di criticità delle opere (Fig. A34), secondo il seguente schema:

Tabella A9
Classi di criticità delle opere in funzione della quota.

Figura A33
tipo opera di difesa.
(Lido di Volano)

Figura A34
Criticità dell'opera/
efficacia.

classe di criticità	Valore Quota Opera	Scenari di riferimento Direttiva Alluvioni
1	> di 2,5 m	Tr >> 100 anni (raro)
2	da 1,8 m a 2,5 m	Tr = 100 anni (poco frequente)
3	da 1,5 m a 1,8 m	Tr = 10 anni (frequente)
4	< 1,5 m	Inferiore Tr = 10 anni



La classificazione finale CPRCI è stata elaborata attraverso la formula:

Classi opere rigide inondazione = Classe tipo opera (70%) - Classe Criticità (30%)

I valori ottenuti presentano un range di valori da 7 a 25 che sono stati normalizzati in 5 classi (Fig. A35), dove la classe 1 rappresenta la costa attualmente meno protetta e la classe 5 quella maggiormente difesa :

range valori: 7-8	(Classe 1)
range valori: 9-11	(Classe 2)
range valori: 12- 15	(Classe 3)
range valori: 16 - 18	(Classe 4)
range valori: 19-25	(Classe 5)



A4.3. Classificazione degli interventi di ripascimento

La classificazione della fascia costiera sulla base degli interventi di ripascimento è stata effettuata utilizzando i dati del 'Data Base Ripascimenti' parte del Sistema Informativo del Mare e della Costa – RER, aggiornato al 2018. Il database contiene i dati dei ripascimenti effettuati lungo la costa emiliano-romagnola a partire dal 1984 e contiene l'informazione relativa alla provenienza del sedimento: 'esterno' al sistema spiaggia, quando proviene da cave terrestri o cave sottomarine, oppure 'interno' al sistema, quando appartiene ad altre zone del litorale dove c'è accumulo di sedimento. In quest'ultimo caso la sabbia può essere trasferita in altre zone della costa oppure può essere semplicemente movimentata dalla parte sommersa verso quella emersa. Le aree sono divise in celle litoranee seguendo uno schema "gestionale" di SICELL, e, ad ogni singola cella, sono associate le seguenti informazioni:

- Apporti esterni
- Apporti da altre celle
- Spostamenti interni
- Prelievi

Figura A35
Opera di Difesa Contrasto Inondazione. Classificazione del livello di protezione. (Lido di Volano)

La classificazione elaborata distingue i settori più critici, quelli in cui avvengono gli apporti maggiori (classe 5), da quelli in cui gli apporti sono minori o addirittura dove si effettuano prelievi (classe 1 e 2).



La suddivisione in “Classi di criticità” (Fig. A36) è stata effettuata sulla base dei campi ‘apporti e prelievi’ ed è calcolata in quantità di sedimento in m^3/m lineare di lunghezza della cella, secondo il seguente schema:

- (Classe 1)
Prelievi maggiori di $100 m^3/ml$
- (Classe 2)
Prelievi minori di $100 m^3/ml$
- (Classe 3)
Nessun Apporto o Prelievo
- (Classe 4)
Apporti minori di $100 m^3/ml$
- (Classe 5)
Apporti maggiori di $100 m^3/ml$

Anche in questo caso, al fine della classificazione dell'indicatore Suscettibilità all'erosione non protetta (SNP) (vedi par. 3.4 della relazione), si è utilizzata una classificazione semplificata, riferita ai soli tratti di costa dove avviene apporto di sedimento. Il concetto è che l'eventuale assenza di quei sedimenti apportati al sistema aumenterebbe il livello di suscettibilità della costa al fenomeno dell'erosione.

Figura A36
Ripascimenti.
(Porto Corsini)

Tabella A10
Classificazione
dell'apporto sedi-
mentario in $m^3/metro$
lineare di costa.

classe	ripascimenti	quantitativi
0	NO	nessun apporto
1	medio/bassi	apporti $<100 m^3/ml$
2	medio/alti	apporti $>100 m^3/ml$

BIBLIOGRAFIA

- Arpae (2018). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola - Seconda fase* https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=2045&idlivello=1425
- Aucelli, P. P., Di Paola, G., Rizzo, A., & Roskopf, C. M. (2017). *Rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana*. Studi costieri 2017 - 26: 75 – 90. Studi costieri 2016 - 24: 21 - 26
- Bisiccia C., Baioni D., Alesi P., Fontolan G. e Tramontana M. (2016). *Scenari di vulnerabilità e rischio da mareggiata nell'area costiera nord marchigiana*.
- Calabrese L., Perini L., Lorito S., Luciani P. & Molinari F.C. (2008). *Il progetto INTERREG IIIB PlanCoast: linee guida per la "Gestione Integrata delle Zone Costiere"*. Ambiente e Territorio, 54-57.
- Calabrese L., Perini L., Luciani P., Lorito S. e Cibin U. (2010). *Evoluzione della costa e della linea di riva negli ultimi 50 anni*. In: Perini, L. e Calabrese, L. (a cura di) (2011). *Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna; Bologna*: Pendragon. Monografie ISBN 978-888342847; pp 165-177
- Calabrese L. e Lorito S. (2011). *Mappatura della linea di riva da foto aerea*. In: Perini, L. e Calabrese, L. (a cura di) (2011). *Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna; Bologna*: Pendragon. Monografie ISBN 978-888342847; pp 43-56
- Cutter, S.L. (1996). *Vulnerability to environmental hazards*. Progr. Hum. Geogr. 20 (4), 529–539.
- Cutter, S.L., et al., (2000). *Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina*. Ann. Assoc. Am. Geogr. 90 (4), 713–737.
- Fontolan G., Bezzi A., Pillon S., Schiozzi L., Delli Quadri F. (2005). *Programma di previsione e prevenzione in materia di Protezione Civile – Rischio da Mareggiata – Aggiornamento*. Provincia di Venezia, Settore Tutela e valorizzazione del Territorio – Ufficio Protezione Civile. Università degli Studi di Trieste; Coastal Group – Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine.
- Fontolan G., Bezzi A., Pillon S. (2011). *Rischio da mareggiata*. In: (a cura di A.Vitturi) *Atlante Geologico della Provincia di Venezia*. Cartografie e Note illustrative. Provincia di Venezia: pp. 581-600 + Tavola 16. ISBN 978-88-907207-0-3.
- Gornitz V.M., Daniels R.C., White T.W., Biedwell K.R. (1994). *The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast*. In: C.W. Finkl Ed., *Coastal hazards: perception, susceptibility and mitigation*. Journal of Coastal Research, Special Issue n. 12: 327-338
- Hammer-Klose E.S. and Thieler E.R. (2001). *Coastal vulnerability to sea-level rise, a preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts*. U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-68, 1 CD. Available on-line at: <http://pubs.usgs.gov/dds/dds68/> (last access: 10.08.2011)
- Ozyurt G., (2007). *Vulnerability of coastal areas to sea level rise: a case of study on Göksu Delta*. Thesis submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle-East Technical University. January 2007. Available on-line at: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12608146/index.pdf>
- Ozyurt G., Ergin A. and Esen M. (2008). *Indicator based coastal vulnerability assessment model to sea level rise*. Paper presented at the Seventh International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC VII "Best Practices in the Coastal Environment", 24-28 February 2008, Dubai, UAE.
- Perini L., Lorito S. & Calabrese L. (2008). *Il Catalogo delle opere di difesa costiera della Regione Emilia-Romagna*. Studi Costieri 15, pp. 39-56. ISSN1129-8588 Nuova Grafica Fiorentina.
- Perini L., Calabrese L. (2010). *Le dune costiere dell'Emilia-Romagna: strumenti di analisi, cartografia ed evoluzione*. Studi Costieri, 17, 71-84.

- Perini L., Calabrese L., Luciani P., Olivieri M., Galassi G., and Spada G. (2017). *Sea-level rise along the Emilia-Romagna coast (Northern Italy) in 2100: scenarios and impacts*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 2271–2287. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2271-2017>
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., Duarte Santos, F., Gomes, A., Hilden, M., Laihonon, P., Marinova, N., and Santini, M. (2011). *Methods for assessing coastal vulnerability to climate change*, Euro-pean Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC CCA) Technical Paper, Bologna (IT) 93.
- Thieler E.R., Williams S.J. and 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. Available at: <http://pubs.usgs.gov/fs/fs095-02/> (last access. 10.08.2011)
- Varnes D.J., IAEG Commission on Landslide (1984). *Landslide Hazard Zonation – a review of principles and practice*. UNESCO, pp. 63.

