

# METODOLOGIA PER LA MAPPATURA DI PERICOLOSITÀ DELLE AREE COSTIERE MARINE

*Luisa Perini<sup>1</sup>, Lorenzo Calabrese<sup>1</sup>e Giovanni Salerno<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Regione Emilia-Romagna

<sup>2</sup> Libero professionista

## 1 – Introduzione

Le inondazioni delle aree costiere causate da eventi di mareggiata rappresentano un elemento di rischio per le coste europee tanto concreto ed attuale da aver indotto la Commissione ad inserire questo tema tra gli obiettivi della direttiva 2007/60/CE (EFD), recepita dal decreto legge n. 49/2010.

La Regione Emilia-Romagna, attraverso il proprio gruppo di lavoro dedicato, ha deciso di produrre autonomamente tali elaborati sfruttando l'ampia mole di dati e di studi sul tema contenuti nel Sistema Informativo del Mare e della Costa.

Su proposta del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS), il gruppo di lavoro ha deciso di procedere alla creazione di carte di pericolosità da inondazione costiera, mettendo a punto un metodo 'semplificato' per la mappatura delle aree inondabili che si basa sull'uso del GIS piuttosto che di modelli idraulici, i quali richiederebbero tempi e costi non compatibili con le risorse del progetto.

Questo tipo di approccio si fonda sulla disponibilità di un modello digitale del terreno ad altissima risoluzione e di accurati studi in merito ai parametri del clima meteo marino che hanno fornito i dati per creare gli scenari di analisi necessari. Un fondamentale supporto è stato fornito dalle informazioni degli eventi di mareggiata storici e dalle simulazioni modellistiche condotte in alcuni siti studio della costa regionale. Grazie a questi dati, infatti è stato possibile verificare e collaudare la cartografia prodotta.

Il problema della sommersione della fascia costiera è stato affrontato in alcuni progetti europei quali Cenas (1990-1993) e MICORE (2008-2010) che hanno prodotto importantissimi risultati ai quali si fa riferimento soprattutto per la costruzione degli scenari di analisi.

Nell'ambito del progetto MICORE, in particolare, il SGSS, in collaborazione con ARPA-SIMC e UNife, ha prodotto il catalogo delle 'mareggiate storiche' dove sono stati raccolti dati e informazioni sulle mareggiate che hanno afflitto le coste regionali nel periodo 1946-2010 (Perini et al. 2011). Tale lavoro ha costituito un riferimento indispensabile per la realizzazione delle cartografie previste dalla direttiva.

## 2 - Le alluvioni storiche in Emilia-Romagna

Il rischio di alluvione costiera in Emilia-Romagna è imputabile sia alla morfologia della piana costiera che all'elevato grado di sfruttamento antropico di questo ambito territoriale, avvenuto soprattutto a partire dal dopoguerra.

Questo processo continuo di occupazione delle aree prospicienti la spiaggia, che non si è arrestato completamente nonostante le raccomandazioni legate al programma di Gestione Integrata della Fascia Costiera, ha avuto come conseguenze:

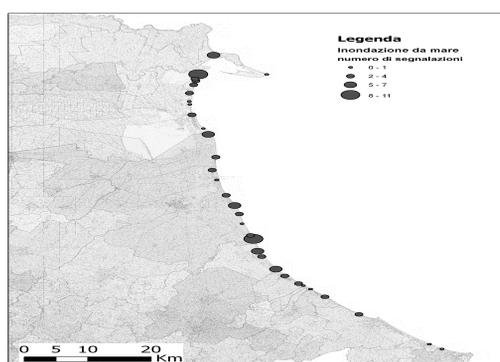
- la forte riduzione, se non la perdita totale, della spiaggia;
- lo spianamento o la frammentazione delle dune costiere, che costituiscono la naturale barriera all'ingressione dell'acqua da mare, oltre che di un serbatoio naturale di sabbia;
- un estremo irrigidimento della linea di costa determinato dalla costruzione di opere di difesa rigide che hanno modificato il profilo topo-batimetrico della spiaggia e il trasporto solido litoraneo;
- un aumento dell'esposizione dei beni a rischio.

In questo contesto, in occasione di eventi di mareggiata intensi, si osservano processi idraulici e sedimentologici quali:

- l'inondazione dell'intera spiaggia, con conseguente danneggiamento delle strutture turistico - balneari;
- l'erosione della spiaggia (compresa la porzione sommersa) e della duna, con conseguente trasporto sedimentario in aree di retro spiaggia (formazione di ventagli di washover) e di spiaggia sommersa esterna (depositi di rip current);
- lo scavalcamento delle opere di difesa (rigide o morbide temporanee) e l'allagamento delle zone depresse retrostanti, oppure la formazione di brecce negli argini in sabbia.

Nel territorio regionale, la tipologia di fenomeni e le caratteristiche dei processi in atto sono ricorrenti e le località storicamente colpite coincidono quasi sempre con quelle attualmente più critiche. L'analisi storica delle mareggiate (passaggio fondamentale, peraltro previsto dalla normativa, ai sensi dell'art. 4) riveste, quindi, un ruolo molto importante per la conoscenza dei fenomeni e dei relativi impatti e può risultare uno strumento utile anche ai fini della valutazione e validazione dei risultati ottenuti dalla modellazione (più o meno raffinata).

In tal senso, la Regione Emilia-Romagna dispone di un grande numero di informazioni acquisite nell'ambito del progetto europeo Micore, grazie al quale è stato prodotto uno specifico catalogo, particolarmente completo e dettagliato, attraverso il quale sono state elaborate le mappe di pericolosità, su base storica. Esse evidenziano le aree particolarmente soggette ai fenomeni di erosione costiera, inondazione marina, esondazione di canali e dalla combinazione di più fenomeni (fig. 1).



**Fig. 1** - Nel periodo 1946-2010 sono 31 le località che hanno subito danni per ingressione marina in occasione di fenomeni di mareggiata; tra queste quelle che presentano le maggiori ricorrenze sono: Lido di Savio, Lido Adriano, Lido di Volano e Goro

L'analisi storica ha evidenziato che le alluvioni costiere sono legate all'innalzamento della superficie del mare prodotto da più fattori concomitanti: marea astronomica, storm surge e wave set-up (fig. 2).



**Fig. 2** -L'innalzamento totale della superficie del mare in occasione di un evento di mareggiata è un parametro complesso ed è la somma della marea astronomica, del surge dalla determinato da fattori atmosferici quali la pressione barometrica e dal vento sotto costa, nonché dall'accumulo dell'acqua nella zona di frangimento delle onde (wave set-up)

### 3 - Gli scenari utilizzati nell'analisi

Nell'ambito della metodologia semplificata utilizzata per l'analisi di pericolosità dell'Emilia-Romagna si è deciso di simulare l'inondazione prodotta dall'innalzamento del livello del mare in occasione di mareggiate caratterizzate dall'azione concomitante di onda e alta marea. I parametri considerati nella simulazione sono stati pertanto: il sollevamento meteorologico (storm-surge), la marea astronomica e il sovrizzo dell'onda ( wave set-up).

Come richiesto dalla direttiva, sono stati analizzati tre scenari:

- Lo scenario Frequente P3 (corrispondente ad eventi con  $Tr = 10$  anni).

- Lo scenario Poco Frequente P2 (corrispondente ad eventi con  $T_r = 100$  anni).
- Lo scenario Raro P1 (corrispondente ad eventi con  $T_r \gg 100$  anni, definito anche super-100).

Lo scenario P1,  $T \gg 100$  (o super 100), è stato introdotto in accordo con i Servizi Tecnici Regionali, per tener conto di aree che storicamente sono state colpite da mareggiate molto intense ma delle quali non sono note le caratteristiche meteo marine.

Come valore di riferimento si è deciso di utilizzare il massimo valore di innalzamento della superficie del mare calcolato per gli scenari estremi all'interno del Piano Costa dell'Emilia-Romagna del 1982 (Idroser, 1982), valutato attraverso un approccio modellistico.

Per la definizione dei valori da applicare agli scenari P3 e P2 si è fatto riferimento ai valori più attendibili reperiti nella bibliografia più recente, derivanti da analisi statistiche.

E' importante sottolineare che, in assenza di un'analisi dei tempi di ritorno combinati dei diversi parametri, si è scelto di adottare, come semplificazione, il criterio dello scenario peggiore determinato dalla concomitanza dei 3 parametri.

Scenario	Tempo di ritorno (anni)	Valori di Storm-Surge in metri <i>Masina e Cianola, 2011</i>	Valore medio di massima marea astronomica <i>(Idroser 1996)</i>	Valore medio di set-up in metri <i>Decouttere et al 1997</i>	Elevazione totale superficie del mare
Frequente P3	$T_{dr} = 10$	H critica = 0,79 m s.l.m.	0.40 m	0.30	1,49 m
Poco Frequente P2	$T_{dr} = 100$	H critica = 1.02 m s.l.m.	0.40 m	0.39	1,81 m
Raro P1	$T_{dr} \gg 100$				2,5 m

**Tab. 1 - Sintesi dei valori di innalzamento della superficie del mare considerati nell'analisi**

#### 4 – Metodologia per la mappatura della pericolosità nelle aree costiere

Il metodo di analisi proposto per la mappatura della pericolosità nelle aree costiere, si basa su un approccio semplificato che risponde alle esigenze di ottenere un primo prodotto in tempi brevi, come richiesto dalla Direttiva e dal D.lgs. 49/2010 (disporre delle mappe di pericolosità e di rischio al giugno 2013), tenendo conto delle scarse risorse economiche disponibili.

Si ritiene, inoltre, che la mappatura della pericolosità basata su metodologie semplificate sia, in questa fase, la più indicata per affrontare lo studio di un territorio complesso e dinamico come quello costiero, ove si analizzano processi precedentemente esclusi dai PAI. Si sottolinea inoltre che approcci più complessi potranno essere applicati successivamente in occasione dei cicli di revisione previsti dalla Direttiva (a partire dal 2015).

In generale, salvo particolari situazioni, il metodo semplificato non renderà possibile la definizione dei tiranti idrici e delle velocità (come richiesto all'art. 6, c. 3 del D.Lgs. 49/2010), senza tuttavia inficiare la sostanziale conformità rispetto agli obiettivi che si pone la normativa di riferimento.

Il metodo proposto ha indubbi vantaggi in termini di semplicità e rapidità di utilizzo e, per il collaudo, può beneficiare dei risultati di un certo numero di studi pregressi, come quelli legati al catalogo delle mareggiate storiche, e quelli in cui è stata effettuata la modellistica idraulica bidimensionale a scala locale.

La metodologia che si propone è stata presentata e discussa sia all'interno di tavoli di lavoro regionali (estesi ai vari settori competenti in materia) che in ambito extra regionale, ove sono stati condivisi l'impostazione generale, i punti di forza e i limiti.

Le mappe di pericolosità predisposte non tengono conto della presenza di misure di difesa temporanee, quali ad esempio le dune invernali e la protezione con paratie mobili, non essendo queste vere e proprie opere strutturali, ma strumenti utilizzati per la gestione del rischio, posti in essere, in particolare nel periodo invernale, per ridurre i danni conseguenti alle mareggiate, dagli enti e dai privati.

##### 4.1 - Perimetrazione delle zone inondabili

Per l'individuazione spaziale delle aree inondabili sono state utilizzate in prima approssimazione le

metodologie indicate nel Report T03-08-02 'Guidelines on Coastal Flood Hazard Mapping', basate essenzialmente sul confronto tra altezze critiche del mare e l'assetto morfologico.

L'altimetria della piana costiera regionale, tuttavia, risulta poco adatta all'applicazione del suddetto metodo a causa dell'estensione delle aree con quota al di sotto del livello medio del mare nel territorio costiero ferrarese-ravennate, si manifesta un marcato sovradimensionamento degli allagamenti, che non ha riscontro nei dati storici. Si è pertanto optato per l'introduzione di un 'fattore correttivo' per tenere conto della perdita di carico dell'acqua nel corso di un evento di inondazione.

Questo fattore è stato determinato sperimentalmente confrontando i risultati del modello con alcune misure di run-up e con la perimetrazione delle aree inondate in corrispondenza di centri abitati, dati acquisiti in occasione di recenti mareggiate, e contenuti nel database in\_storm. L'analisi di questi dati ha fornito un range di possibili valori, tra i quali è stato scelto quello maggiormente cautelativo: il modello assume che lo smorzamento dell'allagamento possa essere espresso da un angolo d'inclinazione verso terra della superficie dell'elevazione totale del mare la cui cotangente ha come valore 0,002.

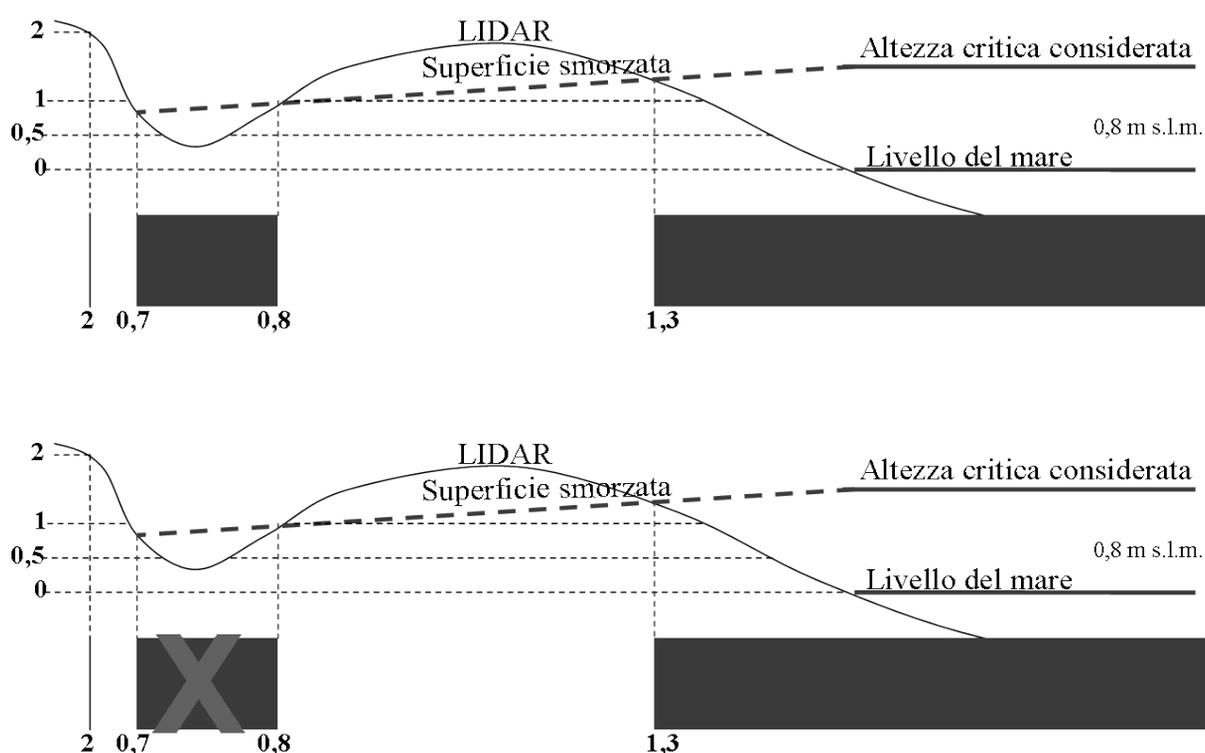
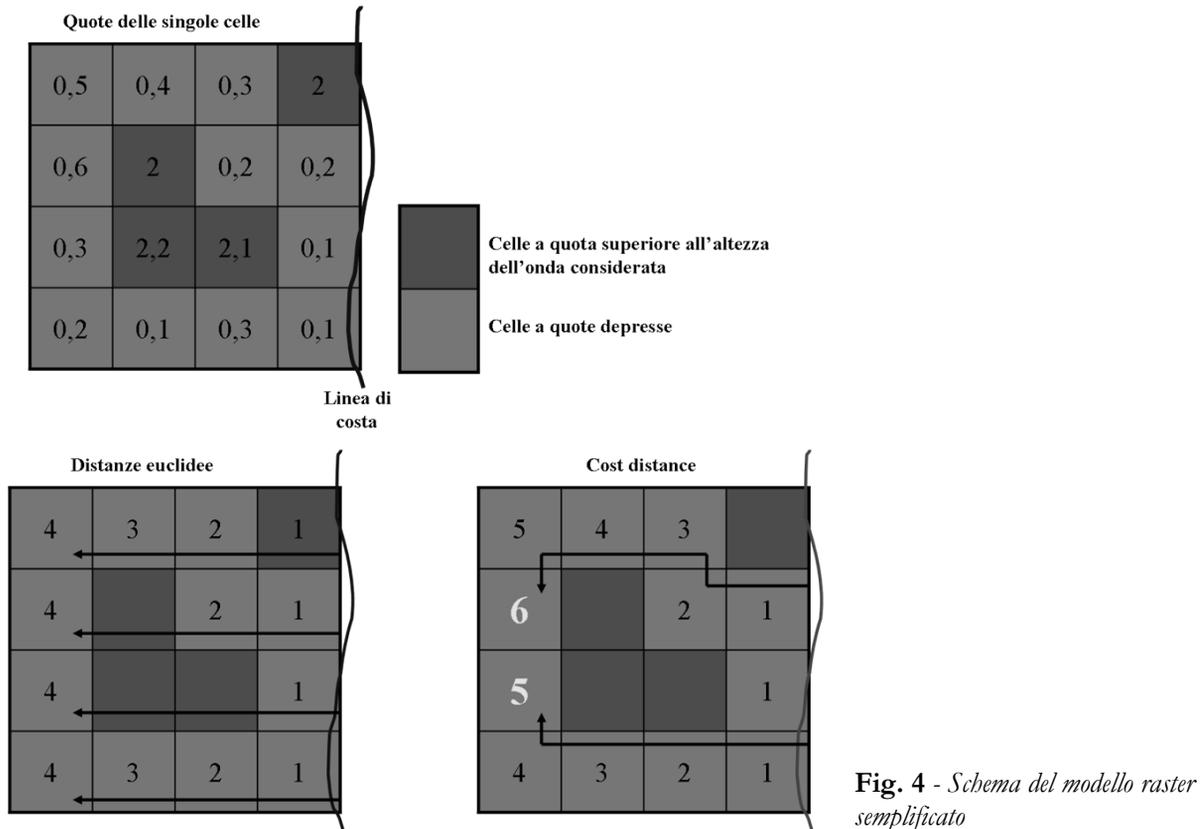


Fig. 3 - Rappresentazione schematica della propagazione dell'onda; esclusione dei varchi non in comunicazione con la linea di riva

La semplice applicazione di una correzione basata sulla distanza lineare dalla linea di costa generava comunque interpretazioni del fenomeno ancora sovradimensionate, soprattutto in contesti con aree elevate distribuite longitudinalmente alla linea di costa, subito seguite verso terra da aree depresse.

Per evitare queste sovrastime, il modello utilizza una distanza dalla linea di riva non di tipo euclideo, ma che tiene conto dei percorsi minimi possibili effettuati dalle acque per raggiungere le diverse aree (che risulta quasi sempre maggiore rispetto alla distanza euclidea). Per fare questo sono stati utilizzati strumenti di analisi GIS (Cost Distance, implementato nell'estensione Spatial Analyst del software ArcGIS) che hanno considerato, oltre la distanza dalla linea di riva, anche la quota e il rilievo topografico.

Il risultato del modello è una matrice raster in cui ciascuna cella assume un valore in funzione della distanza dalla linea di riva. Questa distanza viene utilizzata per smorzare le altezze d'acqua fino all'intersezione con la superficie morfologica.

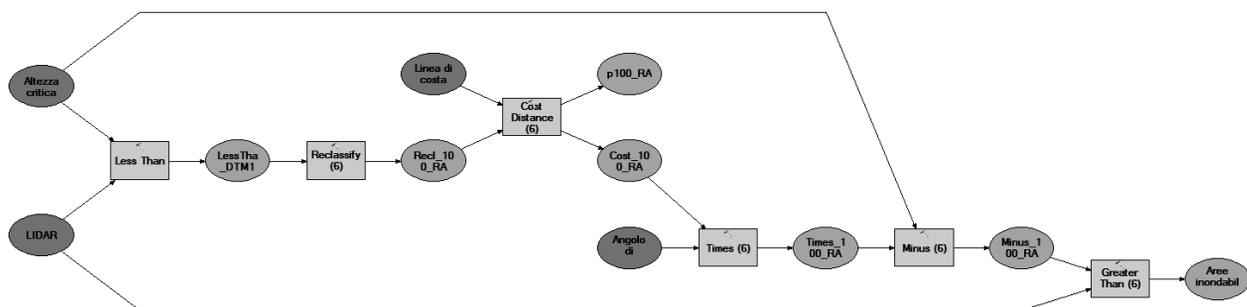


Questo tipo di approccio permette di individuare le porzioni della fascia costiera potenzialmente inondabili per ciascuno dei diversi scenari considerati. L'analisi di distribuzione delle aree individuate permette poi di delimitare quelle zone, morfologicamente depresse, che presentano 'varchi' e che consentono l'ingressione marina, escludendo così quelle 'isolate', che non verrebbero interessate dalle inondazioni (vedi schema figura 4 ed esempio di mappatura in figura 7).

La procedura appena descritta è stata tradotta in un protocollo metodologico costituito da una concatenazione di operatori di analisi geografica, costruita utilizzando l'applicazione Model Builder di ArcGIS.

Il modello prodotto assume come dati in input un solo strato geografico (DTM da Lidar) e due valori (angolo di smorzamento e altezza del mare critica) che costituiscono dei parametri, ossia è possibile specificarli ogni volta che il modello viene lanciato per valutare scenari differenti.

L'output del modello è costituito da un dato geografico che individua le aree potenzialmente inondabili per lo scenario prefigurato.



**Fig. 5 – Implementazione della metodologia nel Model Builder**

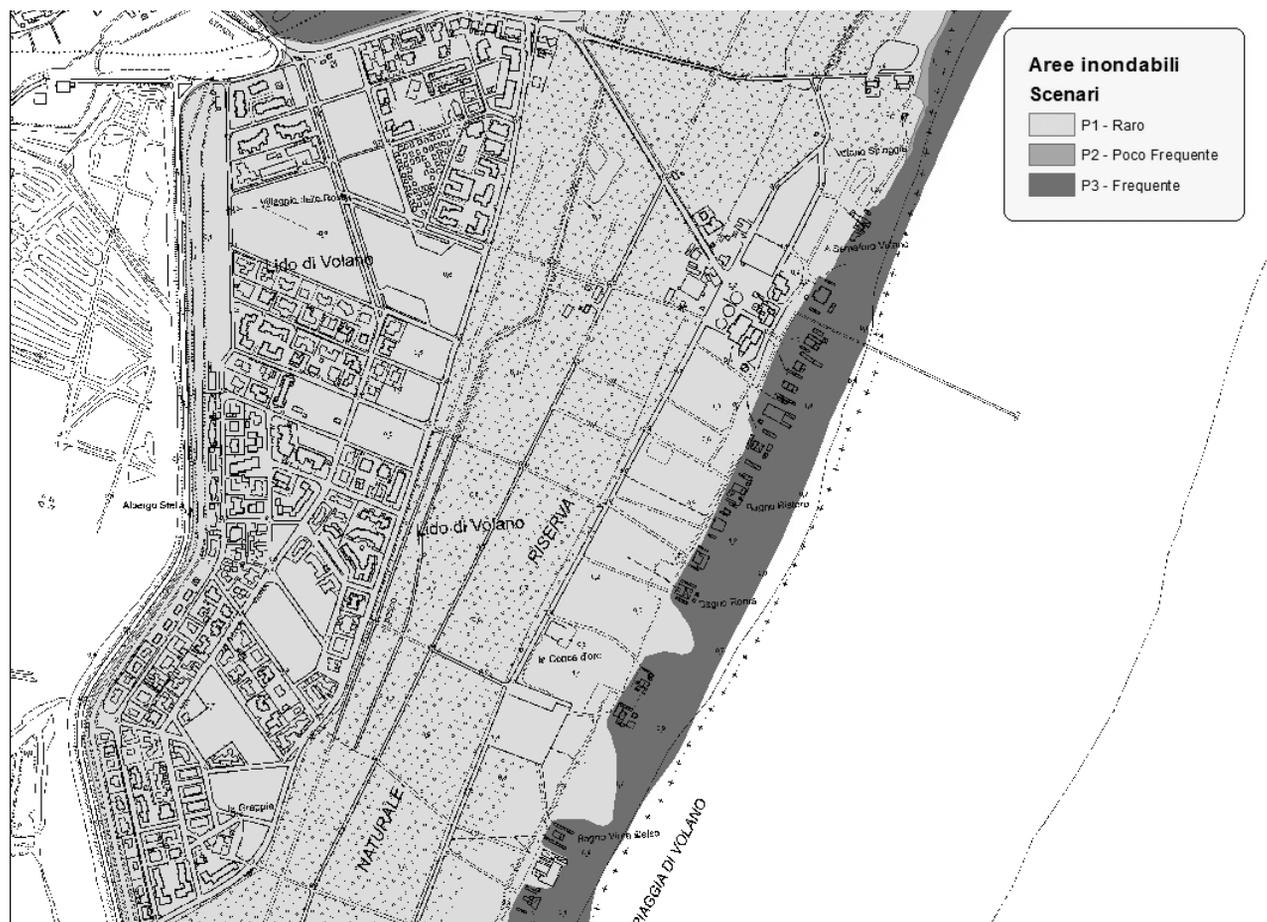


Fig. 6 - Esempio di mappatura nella zona di Lido di Volano

Una prima validazione del metodo è stata fatta confrontando, in alcune specifiche zone, i risultati ottenuti con quelli derivanti dall'applicazione di modelli idraulici bidimensionali sperimentati in due casi di studio della costa regionale, Cesenatico e Savio (Zanuttigh et al.2011). Un ulteriore importante confronto è stato quello con i dati cartografici relativi agli eventi storici, elaborati nell'ambito del progetto Micore e contenuti sia nel volume 'Le mareggiate e gli impatti sulla costa dell'Emilia-Romagna 1946-2010' che nel database in\_Storm.

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/divulgazione/publicazioni/libri/mareggiate-impatti-costa-Emilia-Romagna>

Al termine dei confronti e delle validazioni sono state prodotte le mappe definitive che riportano le aree costiere allagabili e sono state effettuate alcune analisi statistiche sintetizzate nelle tabelle e nelle figure di seguito riportate.

Attualmente le mappe sono in corso di ulteriore collaudo anche grazie ai nuovi dati acquisiti in occasione di un evento meteo-marino estremo che ha colpito le coste regionali il 6 febbraio 2015, che è stato caratterizzato da valori di onda e marea combinati assimilabili a un tempo di ritorno di circa 100 anni. I risultati dell'analisi sono stati molto incoraggianti e hanno ulteriormente convalidato l'accuratezza delle mappe (Perini et al. in prep).

#### 4.2 – Individuazione degli elementi strategici e mappatura del danno

La Direttiva Alluvioni indica al comma 5 dell'articolo 6 alcuni elementi sensibili da tenere in considerazione nelle analisi di mappatura del rischio.

Il primo elemento da considerare è la popolazione potenzialmente coinvolta per gli eventi dei diversi scenari.

La popolazione coinvolta residente in ciascun è stata calcolata utilizzando la densità di popolazione riscontrata nelle diverse sezioni censuarie interessate da fenomeni di inondazioni.

Gli altri elementi strategici considerati sono suddivisi in base alla primitiva geografica con cui sono

rappresentati; in particolare, gli elementi che saranno presi in considerazione sono:

- le aree su cui insistono insediamenti produttivi, impianti tecnologici di rilievo, in particolare quelli definiti a rischio ai sensi di legge;
- le infrastrutture a rete e le vie di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale;
- il patrimonio ambientale e i beni culturali di interesse rilevante;
- le aree sede di servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, strutture ricettive ed infrastrutture primarie.

Per l'elaborazione della Mappa del Danno, invece, si è utilizzata la Cartografia dell' Uso del Suolo, aggiornata al 2008, a cui è stata attribuita una classificazione da 1 a 4 per esprimere il valore di danno 'potenziale' in caso di allagamento

#### 4.3 – La valutazione del rischio

Le linee guida proposte dal MATTM hanno previsto la possibilità di modulare il rischio in relazione all'intensità dei processi attesi attraverso la flessibilità delle classi di rischio introdotta in alcune celle della matrice, pervenendo così alla definizione di due matrici, una più cautelativa e una meno cautelativa; per il settore costiero si è scelto di utilizzare la matrice meno cautelativa, illustrata in fig. 7.

CLASSI DI RISCHIO		CLASSI DI PERICOLOSITA'		
		P3	P2	P1
CLASSI DI DANNO	D4	R4	R3	R2
	D3	R3	R3	R1
	D2	R2	R2	R1
	D1	R1	R1	R1

Fig. 7 – Matrice meno cautelativa adottata in ambito costiero

Applicando la matrice ai layer di pericolosità e di danno è stato derivato lo strato informativo del rischio, del quale in figura 12 viene rappresentato lo stralcio relativo al centro abitato di Cesenatico.



Fig. 8 – Esempio di mappa del rischio

Complessivamente, nella porzione costiera della Regione Emilia-Romagna, le aree a rischio predominanti sono le R1; in tabella 2 sono riportate le superfici complessive ricadenti in ciascuna classe; in figura 9 viene rappresentata in grafico la loro distribuzione.

Classe di rischio	Superficie totale (ha)
R1	4701
R2	1979
R3	777
R4	415

Tab. 2 – Superfici interessate dai diversi livelli di rischio

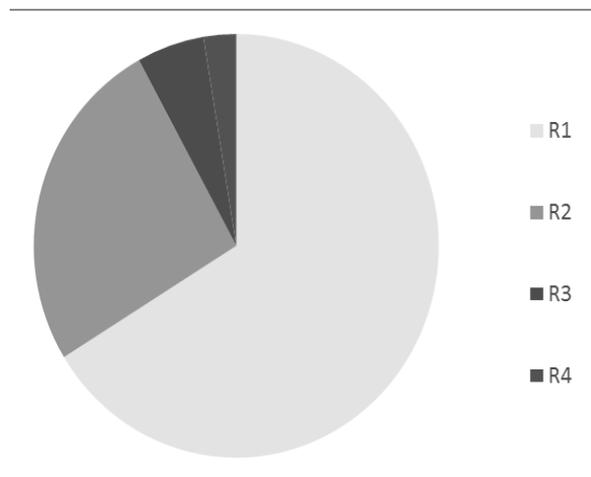


Fig. 9 – Distribuzione delle differenti classi di rischio

## 8 - Considerazioni Finali

Le mappe di pericolosità e rischio dell'area costiera emiliano-romagnola costituiscono la tappa iniziale del percorso di piano e altresì forniscono un primo strumento utile ad evidenziare le criticità che caratterizzano questo ambito territoriale e/o le aree che necessitano di ulteriori e più approfondite analisi.

Per la lettura delle mappe è importante ricordare nuovamente quanto sottolineato nella parte metodologica ovvero che in questa analisi non si è tenuto conto della presenza di difese temporanee come le 'dune invernali' né delle misure di protezione civile già in atto che prevedono, per esempio, la chiusura di alcuni varchi che interrompono la continuità delle difese radenti presenti in questa porzione di territorio.

Le fasi successive di analisi richiederanno, pertanto, eventuali aggiustamenti della perimetrazione in base agli impatti dei futuri eventi notevoli di mareggiata ed approfondimenti volti sia a verificare l'efficacia delle protezioni temporanee utilizzate nel settore nord sia i punti di discontinuità della duna e degli argini attraverso i quali può avvenire una importante propagazione del flusso.

## Bibliografia

AA.VV. (2008) –“Applicazione delle linee guida per la Gestione Intergrata della Zona Costiera (GIZC) a scala provinciale. Area di studio:la costa del Ferrarese” Rapporto Finale (monografia) Progetto Interreg IIIB NP CADSES (2006-2008) Plancoast “Spatial planning in coastal zone”. Regione Emilia Romagna.

Armaroli C., Perini L., Calabrese L., Ciavola P. e Salerno G., 2014, « Evaluation of coastal vulnerability: comparison of two different methodologies adopted by the Emilia-Romagna Region (Italy)», in *Geophysical Research*, Vol. 16, EGU2014-11299, 2014.

Decouttere C., De Baker K, Monbaliu J. & Berlamont J. 1997. Storm wave simulation in the Adriatic Sea. In CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, The Netherlands: pp. 189-210.

Calabrese L., Luciani P., Perini L. e Salerno G., 2012, «Mapping of flood risk in Emilia-Romagna coastal areas», in *Atti del LXXXVI Congresso della Società Geologica Italiana*, Rende (CS), 18-20 Settembre 2012.

Gambolati, G., Giunta, G., Putti, M., Teatini, P., Tomasi, L., Betti, I., Morelli, M., Berlamont, J., De Backer, K., Decouttere, C., Monbaliu, J., Yu, C.S., Broeker, I., Kristenser, E.D, Elfrink, B., Dante, A. And Gonella, M., 1998. *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*. CENAS, Kluwer Academic (ed.), Dordrecht, The Netherlands, pp. 1-34.

Houtenbos, A.P.E.M., Hounjet, M.W.A., Barends, B.J., 2005. Subsidence from geodetic measurements in the Ravenna area. Proceedings of the 7th International Symposium on Land Subsidence (Shanghai, China), pp. 79–99.

Idroser (1982) - *Piano progettuale per la difesa della costa Adriatica emiliano-romagnola*. Regione Emilia-Romagna.

Idroser (1996) - *Progetto di Piano per la difesa del mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp. 365.

Masina M. & Ciavola P. (2011). *Analisi dei livelli marini estremi e delle acque alte lungo il litorale ravennate*. Studi Costieri 2011 – 18 pp.87-101

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., Deserti M., Valentini A., Ciavola P., Armaroli C. (a cura di) (2011) – *Le Mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna,1946-2010*. I quaderni di Arpa, pp. 141. Arpa Emilia Romagna, Bologna, ISBN 88-87854-27-5.

Perini L., Calabrese L. e Salerno G., 2013, «Applicazione del D.Lgs. 49/10 in ambito costiero», in *Atti della XIV Conferenza Italiana Utenti ESRI*, Roma 18-19 Aprile 2013.

Perini L., Calabrese L., Salerno G., Ciavola P. e Armaroli C., 2015, « Evaluation of coastal vulnerability: comparison of two different methodologies adopted by the Emilia-Romagna Region (Italy)», in *Natural Hazards and Earth System Science (NHESS) Discuss.*, 3, 4315-4352, doi:10.5194/nhessd-3-4315-2015, 2015.

Perini L., Calabrese L., Lorito S. & Luciani P. (in prep)., Il rischio da mareggiata in Emilia-Romagna: l'evento del 6 Febbraio 2015 . Sottomesso alla rivista Il Geologo dell'Emilia-Romagna.

Report Number T03-08-02 'Guidelines on Coastal Flood Hazard Mapping'

Teatini P., Ferronato M., Gambolato G., Bertoni W., Gonella M., 2005 – A century of land subsidence in Ravenna, Italy. *Environmental Geology* 47(6), pp 831-846.

Zanuttigh B., Perini L. & Mazzoli P., 2011. Scenarios of combine driver and sea water inundation along the Adriatic Coast. *Geophysical Research Abstract* vol. 13, EGU2011 -1694.