

## Il WebGIS di SAVEMEDCOASTS-2: un sistema di supporto alle decisioni per la gestione sostenibile delle coste contro l'innalzamento del livello del mare

Antonio Falciano<sup>1</sup>, Marco Anzidei<sup>2</sup>, Michele Greco<sup>3,4</sup>, Maria Lucia Trivigno<sup>1</sup>, Antonio Vecchio<sup>5,6</sup>, Charalampos Georgiadis<sup>7</sup>, Petros Patias<sup>8</sup>, Michele Crosetto<sup>9</sup>, José Navarro<sup>9</sup>, Enrico Serpelloni<sup>2</sup>, Cristiano Tolomei<sup>2</sup>, Giovanni Martino<sup>3</sup>, Giuseppe Mancino<sup>1</sup>, Francesco Arbia<sup>4</sup>, Christian Bignami<sup>2</sup>, Fawzi Doumaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro di Geomorfologia Integrata per l'Area del Mediterraneo (CGIAM), Potenza, Italy.

<sup>2</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Rome, Italy.

<sup>3</sup>Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata (UNIBAS), Potenza, Italy.

<sup>4</sup>Fondazione Ambiente Ricerca Basilicata (FARBAS), Potenza, Italy.

<sup>5</sup>Radboud Radio Lab, Department of Astrophysics/IMAPP–Radboud University, Nijmegen, Netherlands.

<sup>6</sup>LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Meudon, France.

<sup>7</sup>School of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Thessaloniki, Greece.

<sup>8</sup>School of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Thessaloniki, Greece.

<sup>9</sup>Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), Castelldefels, Barcelona, Spain.  
a.falciano@cgiam.org

### Riassunto

Nel presente lavoro si mostra un'applicazione webGIS sviluppata per il progetto SAVEMEDCOASTS-2 (*Sea Level Rise Scenarios along the Mediterranean Coasts 2*, [www.savemedcoasts2.eu](http://www.savemedcoasts2.eu)), finanziato dalla Commissione Europea sotto l'egida della Direzione Generale per la Protezione Civile e le Operazioni di Aiuto Umanitario (*Directorate-General for European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations* - DG-ECHO). L'obiettivo principale di SAVEMEDCOASTS-2 è la prevenzione dei disastri naturali lungo le coste del Mediterraneo, che sono altamente esposte all'effetto combinato dell'innalzamento del livello del mare (*Sea Level Rise* - SLR) e della subsidenza del terreno. Il webGIS è focalizzato sulla visualizzazione interattiva e sull'analisi di scenari multitemporali di inondazione costiera fino al 2100 dovuti agli effetti cumulativi dell'innalzamento relativo del livello del mare (*Relative Sea Level Rise* - RSLR), delle maree astronomiche e delle mareggiate in specifiche aree di studio situate nel bacino del Mediterraneo. Gli scenari si basano sul V Rapporto di Valutazione (*Fifth Assessment Report* - AR5) pubblicato dal Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC, 2019) per i percorsi rappresentativi di concentrazione di gas serra (*Representative Concentration Pathways* - RCP) 2.6 e 8.5, sulla topografia ad alta risoluzione e sui tassi di movimento verticale del terreno forniti da dati geodetici.

La piattaforma include anche una valutazione preliminare degli effetti a cascata sulle aree di studio come conseguenza del RSLR previsto. Ciò anche al fine di fornire una valutazione quantitativa degli effetti attesi sulla costa per supportare i decisori politici e i pianificatori del territorio nel definire e dare priorità alle adeguate misure di adattamento o mitigazione. Più nel dettaglio, il webGIS è dotato di app dashboard dedicate. Selezionando parametri di input predefiniti attraverso controlli intuitivi, ciascuna area di studio viene esaminata mediante: (1) una rapida visualizzazione e un'analisi esplorativa degli scenari di rischio di inondazione, (2) il confronto interattivo tra le estensioni spaziali di inondazioni permanenti e temporanee e, infine, (3) l'analisi esplicativa delle serie temporali previste e delle curve danno-altezza d'acqua riguardanti indicatori rilevanti del rischio di inondazione costiera.

In conclusione, tali app facilitano la comprensione della vulnerabilità degli ecosistemi costieri con elevato dettaglio, rendendo il webGIS uno strumento di supporto alle decisioni maturo e robusto in grado di gestire la dimensione spaziale e temporale di alcuni dei problemi legati al riscaldamento globale attraverso una piattaforma integrata. Infine, si rivolge a scienziati, decisori e cittadini per favorire una pianificazione e gestione sostenibile delle coste.

**Parole chiave:** Subsidenza, Mareggiate, Mediterraneo, Ebro, Rodano, Venezia, Metaponto, Chalastra.

### **Abstract**

*Here we show a webGIS application developed for the SAVEMEDCOASTS-2 project (Sea Level Rise Scenarios along the Mediterranean Coasts 2, [www.savemedcoasts2.eu](http://www.savemedcoasts2.eu)), funded by the European Commission under the umbrella of the Directorate-General for Civil Protection and Humanitarian Aid Operations (DG-ECHO). The main goal of SAVEMEDCOASTS-2 is the prevention of natural and human-induced disasters along the Mediterranean coasts, due to the combined effect of Sea Level Rise (SLR) and land subsidence. The webGIS focuses on the interactive visualization and analysis of multi-temporal coastal flooding scenarios up to 2100 due to the combination of Relative Sea Level Rise (RSLR), astronomical tides and storm surges for a set of specific areas in the Mediterranean basin. Scenarios are based on the Fifth Assessment Report released by the Intergovernmental Panel on Climate Change (2019) for the Representative Concentration Pathways RCP2.6 and RCP8.5, high-resolution topography and rates of vertical land movements provided by geodetic data.*

*Preliminary assessment of cascading effects is also shown in the platform to provide a quantitative evaluation of the expected impacts on the coastal zone to support policymakers and land planners in defining and prioritizing adequate adaptation or mitigation measures. The webGIS is equipped with dedicated dashboard apps that allow the selection of input parameters through user-friendly controls. Each study area is examined by: (1) a quick view and exploratory analysis of flooding risk scenarios, (2) the interactive comparison between permanent and temporary flooding spatial extents, and finally (3) the explanatory analysis of the expected time series and damage-water level curves concerning relevant indicators of coastal flooding risk.*

*The webGIS allows understanding the vulnerabilities of the coastal ecosystem with high details, thus representing a robust decision support tool to manage spatial and temporal dimensions of global warming-related issues through an integrated platform. Finally, scientists, decision-makers and citizens will find a useful tool for sustainable coastal planning and management.*

**Keywords:** *Subsidence, Sea Level Rise, Storm surges, Mediterranean, Ebro, Rhone, Venice, Metaponto, Chalastra, GeoNode.*

### **Introduzione**

L'aumento delle temperature globali dall'inizio dell'era industriale sta causando il progressivo scioglimento dei ghiacciai terrestri, l'espansione termica degli oceani e, di conseguenza, l'innalzamento del livello del mare (SLR). Questi fenomeni producono impatti significativi a scala globale sulle coste (erosione costiera, inondazioni, salinizzazione delle falde acquifere, ecc.), sull'ambiente marino (fioriture algali, invasione di specie aliene, ecc.) ed effetti meteorologici estremi. Si stima che gli effetti del riscaldamento globale (*Global Warming* - GW) nel bacino del Mediterraneo potranno essere anche più gravi rispetto ad altre aree del pianeta, poiché in quest'area il tasso di avanzamento è il 20% più veloce rispetto alla media mondiale (MedECC, 2020; Widlansky et al., 2020). I paesi europei che si affacciano sul Mar Mediterraneo sono potenzialmente esposti ad un SLR medio per il 2100 compreso tra 20 e 110 cm più alto del livello del XX secolo, a seconda della concentrazione di gas serra di origine antropica che verrà emessa nell'atmosfera (MedECC, 2020). Gli effetti del GW e del SLR richiedono un approccio globale, sia nella comprensione che nella modellazione del fenomeno. E' inoltre necessario seguire un approccio locale nell'identificazione delle misure da implementare per aumentare la capacità di resilienza, identificando gli strumenti più efficienti per la mitigazione (Loizidou et al., 2023). Il SLR sta già colpendo le coste del Mar Mediterraneo e nei prossimi decenni si possono ipotizzare impatti rilevanti con effetti anche drammatici sulle attività umane, soprattutto nelle zone costiere ad elevata densità di popolazione. Insieme agli altri impatti del GW, il SLR porterà ad aumentare i rischi di inondazione ed erosione lungo le coste, con conseguenze significative per le popolazioni, le risorse, l'economia e l'ambiente in queste aree. Attualmente, il GW sta già influenzando gli ecosistemi umani e naturali più velocemente della realizzazione di interventi di mitigazione, adattamento e aumento della resilienza. Pertanto, è necessario rafforzare la loro capacità di adattamento ai cambiamenti climatici attraverso l'adozione di misure e strumenti per far fronte agli eventi attuali e per i decenni futuri.

In questo studio mostriamo un'applicazione webGIS appositamente realizzata per i progetti SAVEMEDCOASTS e SAVEMEDCOASTS-2 (*Sea Level Rise Scenarios along the Mediterranean Coasts, [www.savemedcoasts.eu](http://www.savemedcoasts.eu) e [www.savemedcoasts2.eu](http://www.savemedcoasts2.eu)*), finanziati dall'Unione Europea attraverso la DG-ECHO. I progetti mirano a prevenire gli effetti del SLR entro il 2100, sostenendo le popolazioni costiere esposte a questo fenomeno. In

particolare, entrambi i progetti, tra il 2016 e il 2022, si sono concentrati sui principali delta fluviali e lagune del bacino del Mediterraneo o sulle aree costiere di elevato valore ambientale o turistico, dove la subsidenza esacerba localmente gli effetti del SLR, con conseguente aumento del rischio di sommersione costiera.

Nel webGIS sono state utilizzate le velocità attuali di movimento verticale del terreno (*Vertical Land Movements* - VLM) ottenute dall'analisi dei dati geodetici delle reti GNSS (*Global Navigation Satellite System*) operanti nell'area del Mediterraneo combinate con misurazioni radar interferometriche ad apertura sintetica (*Interferometric Synthetic Aperture Radar* - InSAR), dati mareografici e dati *Light Detection And Ranging* (LiDAR) ad alta risoluzione acquisiti da aereo o mediante droni. I dati climatici e le proiezioni di SLR del V Rapporto di Valutazione (AR5) e del Rapporto Speciale sull'Oceano e la Criosfera in un Clima che Cambia (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* - SROCC) (Oppenheimer et al., 2019) rilasciati da IPCC, sono stati utilizzati per valutare il SLR atteso e i possibili scenari di inondazioni costiere fino al 2100 in alcune aree del Mediterraneo. La velocità di subsidenza delle coste, valutata fino a diversi mm/anno nelle aree indagate, rappresenta un fattore rilevante per l'accelerazione del SLR a scala locale, i cui effetti combinati con le mareggiate stanno amplificando i processi di erosione e le inondazioni costiere.

### Arece di studio

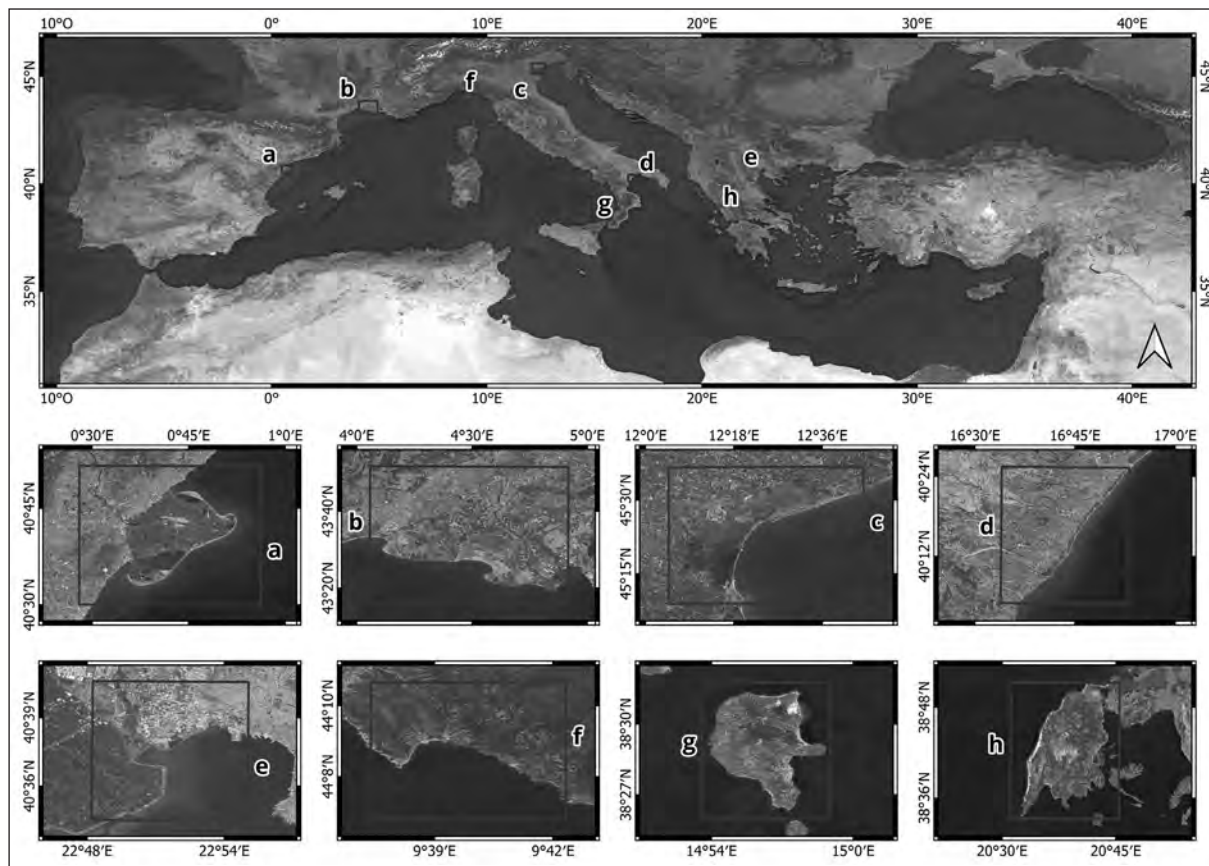
Le aree di studio del progetto SAVEMEDCOASTS-2 comprendono: il Delta dell'Ebro (Spagna), il Delta del Rodano (Francia), la Laguna di Venezia (Italia), la Piana di Metaponto (Italia) e la Piana di Chalastra (Grecia) (Figura 1a, 1b, 1c, 1d, 1e). Invece, le aree pilota indagate nel precedente progetto SAVEMEDCOASTS sono: le Cinque Terre (Italia), l'isola di Lipari (Italia) e l'isola di Lefkada (Grecia) (Figura 1f, 1g, 1h). Per la descrizione delle aree di studio si rimanda ai siti web dei progetti e a Falciano et al. (2023).

### Metodologia

L'approccio metodologico adottato nel webGIS di SAVEMEDCOASTS-2 include i risultati che derivano da un flusso di lavoro messo a punto durante l'implementazione del progetto:

1. Valutazione del RSLR attuale e proiettato fino all'anno 2100 lungo le coste del Mediterraneo secondo le proiezioni AR5 dell'IPCC per gli scenari estremi di "mitigazione" RCP2.6 e di "business as usual" RCP8.5. Le proiezioni sono aggiornate localmente con i tassi attuali di VLM. Questi ultimi sono stati stimati attraverso l'analisi geodetica combinata di dati InSAR e GNSS;
2. Mappatura dell'estensione spaziale delle potenziali aree di inondazione calcolata dalla combinazione delle proiezioni di RSLR (RCP2.6 e RCP8.5), delle maree astronomiche più alte (HAT) e delle condizioni di mareggiata (ordinaria o estrema) per tutte le epoche considerate (2021, 2030, 2050 e 2100);
4. Valutazione preliminare degli effetti a cascata per indirizzare i decisori politici e i pianificatori costieri nella stesura di piani di adattamento ai cambiamenti climatici e misure contro il SLR. Sovrapponendo alle aree potenzialmente inondate i livelli relativi a insediamenti umani e infrastrutture locali (edifici, reti di trasporto, canali di drenaggio, zone agricole, ecc.) ed ecosistemi ambientali (uso/copertura del suolo, aree protette, ecc.), le misure da adottare possono essere valutate in termini di indicatori percentuali di danno/integrità su specifiche componenti antropiche o ambientali.

Tradurre il RSLR in potenziali scenari di inondazione per le coste e le risorse esposte è fondamentale affinché i decisori e i pianificatori costieri possano valutare eventuali misure di adattamento. La qualità di tali scenari è vincolata dalla accuratezza verticale dei Modelli Digitali di Elevazione (*Digital Elevation Model* - DEM) adottati. Ad esempio, i DEM acquisiti mediante telerilevamento satellitare e liberamente disponibili, come il modello *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e il DEM Copernicus, ottenuti dai dati dei sensori satellitari (Purinton e Bookhagen, 2017), sono caratterizzati da una risoluzione troppo bassa rispetto alle esigenze e da incertezze con bias positivo che sottostima l'elevazione del terreno, soprattutto in aree densamente vegetate o popolate (Kulp e Strauss, 2018, 2019). Questi modelli di elevazione globale non sono adatti per valutare in dettaglio gli scenari di RSLR nelle aree costiere esposte al SLR (Vernimmen e Hooijer, 2023). Pertanto, sono stati utilizzati DEM ad alta risoluzione appositamente realizzati nei progetti o disponibili presso le autorità locali (Tabella 1). I dati batimetrici per la modellazione delle mareggiate sono stati ottenuti dalla Rete europea di osservazioni e dati sull'ambiente marino (*European Marine Observation and Data Network* - EMODnet), ad eccezione del delta del Rodano poiché il prodotto LITTO3D-PACA-2015 fornisce un modello digitale del terreno comprendente anche l'informazione batimetrica.



**Figura 1.** Aree di studio dei progetti SAVEMEDCOASTS e SAVEMEDCOASTS-2: (a) Delta dell'Ebro (Spagna); (b) Delta del Rodano (Francia); (c) Laguna di Venezia (Italia); (d) Piana di Metaponto (Italia); (e) Piana di Chalastra (Grecia); (f) Cinque Terre (Italia); (g) Isola di Lipari (Italia); (h) Isola di Lefkada (Grecia). Sfondo: "Sentinel-2 cloudless—<https://s2maps.eu> (accessed on 7 August 2023) by EOX IT Services GmbH (Contains modified Copernicus Sentinel data 2020)".

**Tabella 1.** DEM utilizzati per ogni caso di studio e loro principali caratteristiche.

Caso di studio	Denominazione	Fonte	Anno	Risoluzione spaziale (m)	Accuratezza orizzontale (m)	Accuratezza verticale (m)
Cinque Terre (Italy)	SCANCOAST	Regione Liguria	2014	0.02	0.02	0.02
Lipari Island (Italy)	V3	INGV	2015	0.02	0.03	0.03
Lefkada Island (Greece)	SAVEMEDCOASTS	AUTH	2017	0.04	0.02	0.03
Ebro Delta (Spain)	IGN MDT02	IGN <sup>1</sup>	2019	2	0.3	0.15
Rhone Delta (France)	LITTO3D-PA-CA-2015	Shom	2015	1	0.5-2	0.2-0.5
Venice Lido (Italy)	LiDAR PST	MASE <sup>2</sup>	2011	2	0.3	0.15
Cavallino Treporti (Italy)	N/A <sup>3</sup>	CVN <sup>4</sup>	2018	0.5	N/A	N/A
Metaponto (Italy)	LiDAR PST	MASE	2016	0.5	0.3	0.15
Chalastra Plain (Greece)	SAVEMEDCOASTS-2	AUTH	2020	0.05	0.05	0.10

<sup>1</sup>Instituto Geográfico Nacional (Spain). <sup>2</sup>Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (Italia). <sup>3</sup>Non disponibile. <sup>4</sup>Consorzio Venezia Nuova (Italy).

Poiché il VLM svolge un ruolo cruciale negli scenari di RSLR, i tassi di velocità verticale del suolo sono stati calcolati per ciascuna area di studio utilizzando dati geodetici provenienti dalle reti GNSS (*Global Navigation Satellite System*) nell'area euro-mediterranea e da misurazioni interferometriche radar ad apertura sintetica (InSAR) basate su dati Copernicus Sentinel-1A e 1B. Sono stati anche utilizzati dati mareografici delle stazioni del *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL). Le tecniche adottate per la valutazione della subsidenza o del sollevamento della fascia costiera comprendono la *Permanent Scatterers* (PS) (Crosetto et al., 2016) e la *Small Baseline Subset* (SBAS) (Lanari et al., 2007), le cui velocità sono calibrate con dati GNSS e poi interpolate con l'algoritmo Multilevel B-Spline Interpolation (con raffinamento B-spline) (Lee et al., 1997). La media delle due interpolazioni spaziali è stata quindi considerata rappresentativa dell'attuale subsidenza del terreno per l'intera estensione dell'area indagata. Per comprendere l'entità del fenomeno, si riporta la media spaziale delle velocità verticali del suolo valutate per ciascuna area di studio in Tabella 2.

**Tabella 2. Media spaziale delle velocità verticali del terreno  $V_{up}$  valutate per le aree di studio esaminate ( $V_{up} < 0$  in caso di subsidenza e  $V_{up} > 0$  in caso di sollevamento). A causa dell'elevata frammentazione della Laguna di Venezia, si riportano solo i valori relativi agli specifici siti pilota per i quali sono state modellate le mareggiate, ovvero il Lido di Venezia e Cavallino Treponti.**

Caso di studio	$V_{up}$ (mm/yr)
Cinque Terre (Italy)	-0.29±0.02
Lipari Island (Italy)	-9.0±2.0
Lefkada Island (Greece)	-0.88±0.08
Ebro Delta (Spain)	-0.96±1.55
Rhone Delta (France)	-2.19±1.38
Venice Lido (Italy)	-2.15±0.79
Cavallino Treponti (Italy)	-2.79±1.03
Metaponto (Italy)	-1.21±1.20
Chalastra Plain (Greece)	-5.97±1.69

Le proiezioni di RSLR fino al 2100 per le zone costiere esaminate sono state valutate rispetto alle proiezioni climatiche AR5 dell'IPCC (Oppenheimer et al., 2019) che hanno influenza sull'innalzamento del livello del mare (SLR) e al VLM assunto a velocità costante entro l'orizzonte temporale considerato. Il contributo dell'aggiustamento isostatico glaciale (*Glacial Isostatic Adjustment - GIA*) incluso nelle proiezioni dell'IPCC è stato sottratto e sostituito con i valori di velocità verticale calcolati dall'analisi geodetica GNSS+InSAR, che comprendono sia il GIA che altri segnali (tettonica, ecc.) (Anzidei et al., 2020). In questo modo è stata fornita una stima più realistica delle proiezioni di RSLR in punti specifici e lungo i transetti adottati nel modello di mareggiata. I risultati supportano la valutazione degli scenari multitemporali di RSLR e di mareggiata in condizioni di RSLR con estremo dettaglio. Per approfondire la caratterizzazione delle zone costiere soggette al RSLR e l'accuratezza della valutazione dell'estensione delle aree esposte a inondazione, ciascun sito indagato è stato ulteriormente suddiviso in diverse aree di interesse (*Areas of Interest - AOI*) per le quali il tasso di subsidenza è stato valutato localmente. In questo modo, le proiezioni locali di RSLR e gli scenari di inondazione sono forniti ad alta risoluzione spaziale e sono maggiormente rappresentativi di aree specifiche. Pertanto, per ciascuna AOI sono stati valutati scenari di inondazione sito-specifici. A causa dell'elevato numero di possibili combinazioni di condizioni al contorno, i potenziali scenari di inondazione dovuti al RSLR nelle singole AOI e nei vari orizzonti temporali esaminati sono stati raggruppati per RCP in modo da restituire una serie temporale di proiezioni di RSLR. A titolo di esempio, la mappa della RSLR per gli scenari climatici RCP8.5 per la Città di Venezia è mostrata in Figura 2.

I dati sul clima ondoso sono stati definiti come una rianalisi delle condizioni atmosferiche e ondose mediante i metodi di *hindcasting* WAVEWATCH III (WWIII) per l'intero Mar Mediterraneo, gestiti dal Dipartimento di Ingegneria Ambientale, Chimica e Civile dell'Università di Genova (Mentaschi et al., 2013, 2015). Tale modello consente l'analisi climatica del moto ondoso facendo riferimento a diversi eventi di forti tempeste osservate nel bacino del Mediterraneo negli ultimi venticinque anni. I risultati della simulazione sono stati poi convalidati utilizzando i dati delle boe forniti da varie fonti ufficiali, ove disponibili. La forzante del ven-

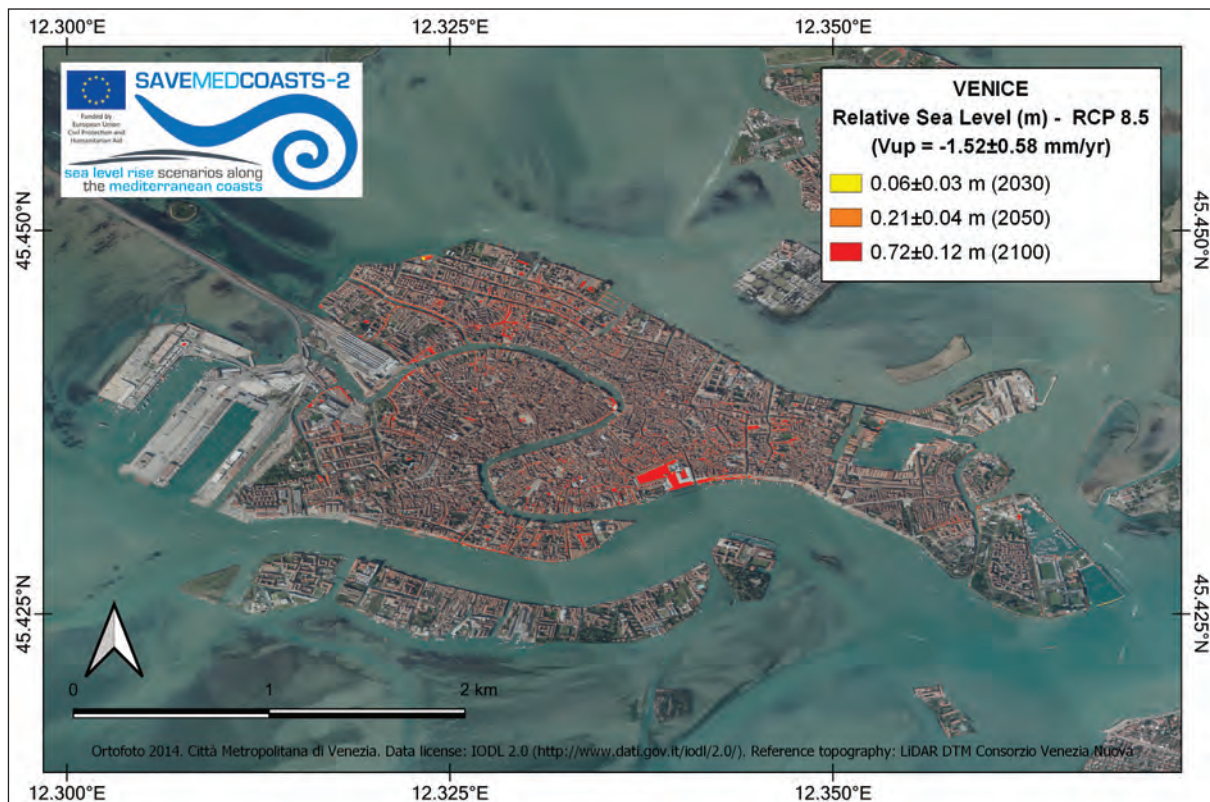


Figura 2. Mappa di Venezia con gli scenari di RSLR al 2030, 2050 e 2100 per le proiezioni climatiche RCP8.5 secondo il report AR5 di IPCC. Gli scenari includono il contributo della velocità media di subsidenza calcolata dall'analisi combinata InSAR-GNSS. Sfondo: Ortofoto 2014. Città Metropolitana di Venezia. Topografia di riferimento: DTM LiDAR ex Consorzio Venezia Nuova.

to è stata simulata utilizzando il modello WRF (*Weather and Research Forecasting*) per tutti i casi di studio, mentre le simulazioni delle onde sono state effettuate utilizzando il modello WWIII.

In caso di indisponibilità di dati locali dettagliati, i dati sulle onde per ciascuna area di studio e ciascun Tempo di Ritorno (T) sono stati derivati attraverso l'analisi omnidirezionale, come valutazione del primo ordine. L'analisi dell'altezza estrema delle onde è stata effettuata per ciascuna località indagata seguendo il metodo *Peak Over Threshold* (POT). Le analisi in termini di tempesta omnidirezionale sono state eseguite in ciascuna località riguardando periodi di ritorno rispettivamente di 1 e 100 anni (Tabella 3).

Tabella 3. Altezza d'onda significative  $H_s$  per area di studio e periodo di ritorno.

Area di studio	$H_s$ (m)	
	T = 1 anno	T = 100 anni
Cinque Terre (Italy)	4.98	7.05
Lipari Island (Italy)	4.53	6.73
Lefkada Island (Greece)	4.22	6.60
Ebro Delta (Spain)	4.24	8.09
Rhone Delta (France)	4.30	8.35
Venice Lagoon (Italy)	4.50	6.50
Metaponto (Italy)	4.34	6.30
Chalastra Plain (Greece)	2.63	4.63

Per ciascuna area di studio, i dati di marea sono stati ottenuti dal Servizio permanente per il livello medio del mare (*Permanent Service for Mean Sea Level - PSMSL*) presso il Centro oceanografico nazionale del Regno Unito (*National Oceanography Centre – United Kingdom, NOC-UK*) e dal sistema di monitoraggio delle stazioni di misura del livello del mare presso l'UNESCO-IOC (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization - Intergovernmental Oceanographic Commission*). I valori della marea astronomica più alta (*Highest Astronomical Tide - HAT*) per ciascuna area di studio considerata sono riportati nella Tabella 4.

**Tabella 4. Valori tipici della marea astronomica più alta (HAT) per ogni area di studio.**

Area di studio	HAT (m)
Cinque Terre (Italy)	0.36
Lipari Island (Italy)	0.38
Lefkada Island (Greece)	0.35
Ebro Delta (Spain)	0.40
Rhone delta (France)	0.40
Venice Lagoon (Italy)	0.80
Metaponto (Italy)	0.30
Chalastra Plain (Greece)	0.30

Le mareggiate (*Storme Surges - SS*), responsabili delle inondazioni temporanee costiere, sono state modellate in condizioni ordinarie ( $T = 1$  anno) ed estreme ( $T = 100$  anni) per il RSLR (inondazione costiera permanente) calcolato al 2030, 2050 e 2100. Gli scenari di SS sono stati analizzati considerando il contributo del RSLR aggiornato in base al VLM (subsidenza o sollevamento del terreno), come stimato dall'analisi geodetica GNSS+InSAR. In ciascuna area di studio è stato considerato il contributo delle maree astronomiche, mentre è stata trascurata la componente meteorologica. Tale analisi è stata assunta coerente con i possibili scenari osservabili, a causa della probabilità di accadimento molto bassa degli effetti cumulativi di eventi di marea astronomica, marea meteorologica e mareggiata, sia per  $T = 1$  anno che  $T = 100$  anni.

È importante delineare la differenza rilevante che si è verificata per la valutazione degli scenari di mareggiata implementata nei progetti. SAVEMEDCOASTS-2 prevedeva l'applicazione della metodologia speditiva per la valutazione del rischio di inondazioni costiere adottata nel precedente progetto SAVEMEDCOASTS, vale a dire la combinazione di innalzamento del livello del mare (SLR), subsidenza (LS), marea astronomica più alta (HAT) e mareggiata (SS) relativa a diversi  $T$ , dove la componente SS era calcolata come un sollevamento statico del livello del mare a causa del massimo *run-up* che si verifica in fase di tempesta. Tuttavia, in SAVEMEDCOASTS-2, la morfologia costiera delle aree di studio (ad eccezione del litorale di Venezia) era pianeggiante e il modello speditivo di inondazioni da mareggiata adottato in SAVEMEDCOASTS non era applicabile. Più nello specifico, la modellazione della propagazione spazio-temporale dell'onda di mareggiata e la valutazione del massimo *run-up* dinamico, nonché del superamento (*overtop*) delle opere di difesa (naturali o artificiali) qualora esso si verificasse, è stata realizzata attraverso la routine 1-D XBeach di Delft3D. XBeach è un modello numerico complesso progettato per simulare l'idrodinamica e la morfodinamica della zona costiera che combina la propagazione delle onde, le variazioni del livello dell'acqua, il trasporto dei sedimenti e i cambiamenti della morfologia della spiaggia in un unico modello integrato e nidificato. Tale modello è ampiamente utilizzato per valutare l'erosione delle spiagge, la formazione del moto ondoso e le inondazioni costiere. Il modello è in grado di simulare gli effetti di tempeste, tsunami, SLR e altri processi costieri.

I dati HAT sono stati utilizzati come condizione al contorno per la stima e la mappatura dell'inondazione costiera dovuta a condizioni di mareggiata con  $T$  di 1 anno e 100 anni nel 2021 e per gli scenari RCP2.6 e RCP8.5 riguardanti le proiezioni di RSLR valutate nel 2030, 2050 e 2100 per ciascun sito di indagine lungo una serie di transetti. Nel dettaglio, utilizzando il modello numerico selezionato per ciascun sito di indagine, è stata valutata la massima estensione dell'*overwashing* lungo ciascun transetto utilizzando le condizioni al contorno sopra menzionate. Il modello XBeach è stato utilizzato per stimare l'estensione delle aree costiere allagabili dovuta agli effetti combinati del SLR con eventi di mareggiata ordinari ed estremi.

Per ciascuna area di studio è stata implementata la modellizzazione idrodinamica per la valutazione della propagazione delle mareggiate. In particolare, ai fini della valutazione dell'area di inondazione, è stato adottato il modello 1-D per la propagazione delle onde lungo un transetto predefinito, considerando come condizione al contorno la combinazione di ogni RCP, T e epoca di riferimento (2021, 2030, 2050 o 2100). Nel dettaglio, per ciascuna area target sono stati selezionati da due (Piana di Chialastra) fino a sei (Laguna di Venezia) transetti.

### **Potenziati scenari di inondazione costiera**

La valutazione degli scenari di inondazione costiera per ciascuna area di studio ha previsto le seguenti attività e fasi di lavoro:

- valutazione del clima ondoso e della distribuzione di probabilità per la valutazione delle condizioni estreme riferite alle SS ordinarie ( $T = 1$  anno) ed estreme ( $T = 100$  anni);
- definizione dell'onda di mareggiata di progetto, studiando la propagazione del moto ondoso dal mare aperto verso la costa;
- definizione dei transetti dal mare aperto verso l'entroterra (possibilmente perpendicolari alla costa) da considerare nella modellizzazione delle mareggiate;
- valutazione all'interno del buffer di 200 m di ciascun transetto del tasso medio di VLM derivato dall'analisi geodetica e calcolo dei valori di RSLR relativi a diversi scenari IPCC;
- modellizzazione 1-D delle mareggiate per ciascun transetto e combinazione di condizioni ordinarie ( $T = 1$  anno) o estreme ( $T = 100$  anni), scenari di RSLR (RCP2.6 e RCP8.5) e HAT per il 2021, 2030, 2050 e 2100;
- analisi dei risultati del modello in termini di  $H_s$  (altezza significativa delle onde offshore),  $f_p$  (frequenza di picco),  $z_0$  (livello del mare come combinazione di RSLR, subsidenza e HAT),  $R_{max}$  (massimo *run-up* della mareggiata) e *overtop* per ciascun transetto e per ciascuna combinazione dei parametri sopra indicati;
- mappatura delle potenziali aree di inondazione (*flooding area* - FA) raggruppate per ciascuna combinazione di scenario di RSLR e condizione di mareggiata (ordinaria o estrema) per tutte le epoche considerate (2021, 2030, 2050 e 2100). L'analisi è conforme all'approccio "*bathhtub*" (vasca da bagno) e alla Massima altezza d'acqua/Inondazione (*Maximum Water/Flood Elevation* - MWE) definita secondo i seguenti criteri: a) livello massimo del mare osservato tra tutti i transetti, ogni volta che non si verifica il superamento (*overtop*); b) altrimenti, massimo *overtop* osservato tra tutti i transetti.

Il metodo adottato per valutare l'estensione spaziale delle potenziali aree allagabili è l'approccio passivo standard "*bathhtub*" con regola di connettività zero (Yunus et al., 2016), in cui le aree che ricadono al di sotto di un livello d'acqua target e non sono necessariamente collegate idraulicamente al mare sono considerate allagate. Inoltre, gli scenari di inondazione non tengono conto di alcun sistema di adattamento o protezione (ad es. il Modulo Sperimentale Elettromeccanico - MoSE - nel caso della Laguna di Venezia). Tale approccio è stato ritenuto accettabile alla luce degli obiettivi del progetto, nonostante i limiti (Gallien et al., 2014; Seenath et al., 2016) in termini di fenomeni concomitanti alle inondazioni costiere non considerati nella valutazione degli scenari (Anderson et al., 2018) come l'innalzamento del livello delle falde acquifere, il cuneo salino, il ruscellamento superficiale a causa di piogge intense, ecc., e in termini di tempo di calcolo. I principali prodotti delle attività precedentemente descritte sono i seguenti:

- le mappe dei potenziali scenari di inondazione costiera per ciascuna area di studio, sulla base delle proiezioni di RSLR stimate per il 2030, 2050 e 2100;
- le mappe delle potenziali aree di inondazione (v. ad es. Figura 3) raggruppate per ciascuna combinazione di scenario di RSLR e condizione di mareggiata per tutte le epoche considerate (2021, 2030, 2050 e 2100).

Per quanto riguarda gli orizzonti temporali della proiezione RSLR e degli scenari di inondazione, si ritiene che le epoche proposte (2030, 2050 e 2100) hanno una distribuzione temporale adatta per gli *stakeholder*. In particolare, i decisori politici, i pianificatori urbani o del territorio necessitano di scenari di riferimento a breve, medio e lungo termine (sulla scala della durata media della vita umana) per preparare eventualmente piani di adattamento e di rischio in risposta al RSLR.

### **Effetti a cascata degli scenari di inondazione**

La valutazione preliminare degli effetti a cascata sul territorio, sull'ambiente e sui sistemi antropici riguardanti le aree di studio SAVEMEDCOASTS-2 è inclusa nel webGIS per indirizzare i *policy maker* e i piani-



ficatori urbani o territoriali nella stesura di piani di adattamento ai cambiamenti climatici contro il SLR. Le aree target di SAVEMEDCOASTS sono escluse da questa specifica analisi e saranno esaminate nei prossimi aggiornamenti del webGIS.

L'approccio adottato per raggiungere questo obiettivo è un "modello di danno da inondazione" (*flood-damage*), basato sulla sovrapposizione degli scenari di inondazione (aree allagate) con gli insediamenti umani e le infrastrutture (edifici, reti di trasporto, canali di bonifica, colture pregiate, ecc.), e gli ecosistemi ambientali (uso e copertura del suolo, aree protette, ecc.) per valutare la misura da adottare in termini di indicatori percentuali di danno/integrità riguardanti la particolare componente antropica o ambientale presa in considerazione.

Le metodologie di valutazione della vulnerabilità/integrità fisica, generalmente sviluppate come modelli di danno da inondazione (curve *stage-damage*, modelli multivariati) e indicatori di vulnerabilità/danno, definiscono la relazione tra il danno da inondazione e le corrispondenti variabili che influenzano il danno (Malgwi et al., 2021; Papathoma-Köhle et al., 2017). Pertanto, la valutazione degli indicatori di danno fornisce conoscenze rilevanti e di base per la valutazione della resilienza sistemica e specifica, e la pianificazione della mitigazione (Papathoma-Köhle et al., 2017), la valutazione delle perdite economiche (Blanco-Vogt e Schanze, 2014; Merz et al., 2010) e l'analisi costi-benefici, supportando l'allocazione delle risorse per la protezione dai pericoli/rischi (Fuchs, 2009; UNISDR, 2015). Tali sforzi sono generalmente considerati passi importanti per la riduzione del rischio di catastrofi e le azioni di mitigazione (UNISDR, 2015). Nella presente analisi, i modelli di danno da alluvione mostrano la relazione tra il danno indotto dall'inondazione costiera a causa degli effetti combinati di SLR, VLM e mareggiata (T = 1 e 100 anni) fino al 2100 e la profondità dell'acqua (curve *stage-damage*).

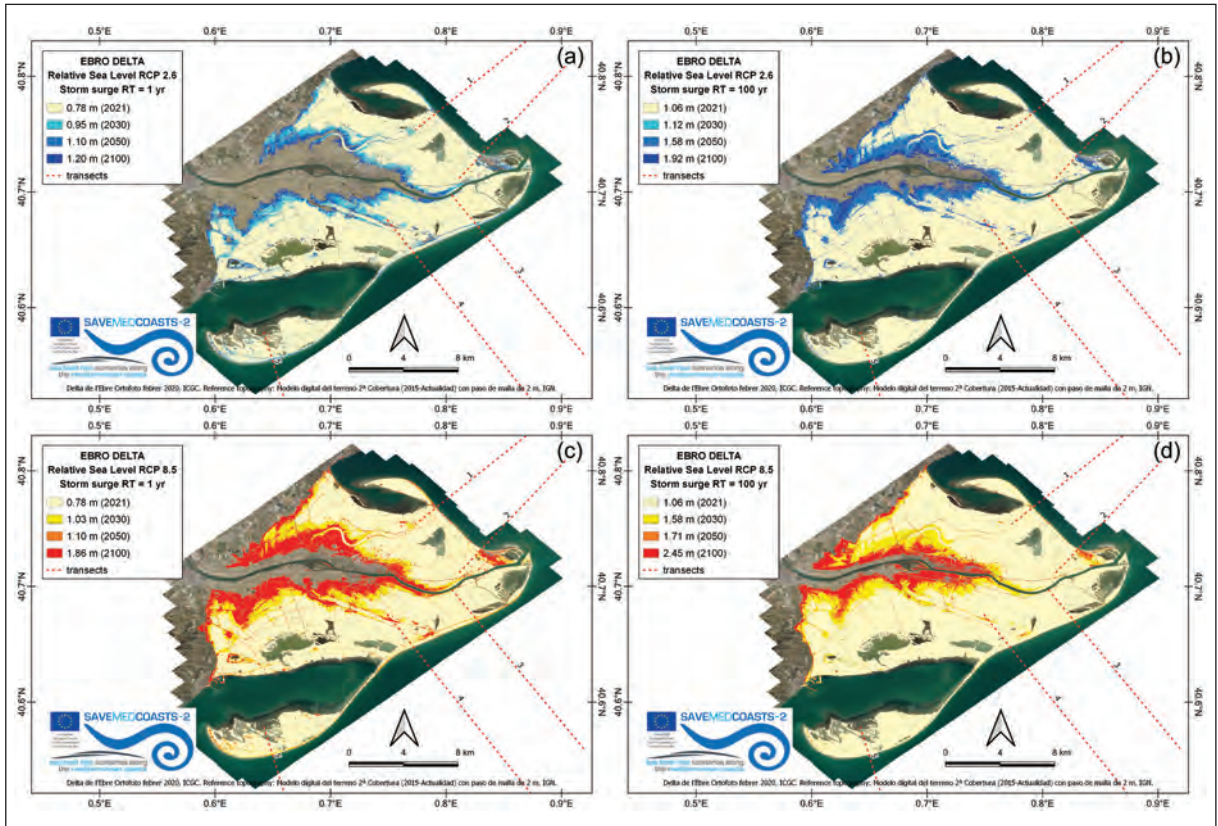
A seconda dell'estensione dell'area inondata e degli insediamenti umani e/o degli habitat/ecosistemi compromessi, analizzando gli scenari previsti corrispondenti agli effetti combinati di SLR, VLM e mareggiate in condizioni ordinarie o estreme negli orizzonti temporali considerati, sono stati selezionati diversi indicatori per ciascuna area pilota (Tabella 5), in base alla loro specifica rilevanza nel contesto territoriale considerato.

**Tabella 5. Indicatori di rischio di inondazione adottati per ogni caso di studio di SAVEMEDCOASTS-2.**

Indicatore di rischio di inondazione	Area di studio				
	Delta dell'Ebro	Delta del Rodano	Lido di Venezia e Cavallino Treporti	Metaponto	Piana di Chialastro
Accommodations (i0)				●	
Buildings (i1)			●	●	
Drainage Network (i2)				●	
Irrigation Areas (i3)			●	●	
Protected Areas (i4)	●	●	●	●	●
Rice Fields (i5)	●	●			●
Road Network (i6)	●	●	●	●	●

### Il webGIS di SAVEMEDCOASTS-2

L'applicazione di *web mapping* di SAVEMEDCOASTS-2 è uno strumento di supporto per la pianificazione e la gestione costiera attraverso l'analisi degli scenari di rischio di inondazione, in grado di gestirne efficacemente la componente spaziale e temporale all'interno di una piattaforma integrata dotata di strumenti dedicati (Zanutigh et al., 2014). Per raggiungere questo obiettivo, in fase di progettazione dell'interfaccia utente del webGIS sono stati considerati due aspetti fondamentali (Holman et al., 2008; Zanutigh et al., 2014): (a) un layout *user-friendly* dell'applicazione, aderente al modello concettuale del fenomeno analizzato. Adottando controlli (es. slider) è possibile commutare o confrontare in modo interattivo diversi scenari di rischio scegliendo tra una gamma plausibile e realistica di valori dei parametri di input; (b) l'equilibrio tra il livello di complessità del modello (e quindi dell'interfaccia utente) e la velocità di ottenimento dei risultati per incentivare l'utilizzo dello strumento nell'analisi degli scenari di rischio. In questo modo si evitano configurazioni del modello troppo complicate per l'utente medio e la restituzione dei risultati in tempo reale. Le mappe e le applicazioni che descrivono gli scenari di SLR implementate nel webGIS possono essere utilizzate sia dalla comunità scientifica, sia dai decisori politici e dai pianificatori costieri. Inoltre, possono anche servire come strumenti di comunicazione per



**Figura 3.** Delta dell'Ebros (Spagna). Scenari potenziali di inondazione costiero al 2021, 2030, 2050 e 2100 per le seguenti combinazioni di RSLR e mareggiata: (a) RCP2.6 e T = 1 anno; (b) RCP2.6 e T = 100 anni; (c) RCP8.5 e T = 1 anno; (d) RCP8.5 e T = 100 anni. Le aree inondabili sono mostrate in giallo pallido al 2021, in scala del blu per RCP2.6 e in scala giallo-rossa per RCP8.5 fino al 2100. Ortofoto: Delta de l'Ebre Ortofoto febrer 2020, Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Topografia di riferimento: Modelo digital del terreno 2a Cobertura (2015-Actualidad), Instituto Geográfico Nacional (IGN).

sensibilizzare il pubblico e le scuole sui rischi costieri (DeLorme et al., 2018). L'analisi dei requisiti funzionali e architetture della piattaforma, a seguito di un'analisi approfondita delle soluzioni software webGIS, ha portato all'adozione di un'architettura scalabile, estensibile e aperta, in grado di essere facilmente ampliata e aggiornata (Greco et al., 2017; Pickle, 2009), rappresentata da GeoNode.

GeoNode è una piattaforma web a sorgente aperto per la creazione e la condivisione di dati e mappe geospaziali, costruita sul framework web Django. È progettato per aiutare le organizzazioni e le comunità a creare, condividere e collaborare facilmente su dati e mappe geospaziali, consentendo loro di costruire sistemi di gestione dei contenuti geospaziali (*Geospatial Content Management System - GeoCMS*) e nodi di infrastrutture di dati spaziali (*Spatial Data Infrastructure - SDI*). GeoNode utilizza una varietà di software geospaziali *open source* maturi e robusti come PostGIS, GeoServer e OpenLayers per fornire potenti strumenti per la gestione e la condivisione dei dati geospaziali. È un progetto ufficiale della *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) ed è ampiamente utilizzato da organizzazioni in vari settori, tra cui quelli governativi, la gestione ambientale e delle risorse naturali, gli aiuti umanitari, ecc. Il suo sviluppo è stato avviato dalla *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* (GFDRR) nel 2009 (GFDRR, 2017) e poi adottato da diverse organizzazioni come la Banca Mondiale e le Nazioni Unite. Con GeoNode gli utenti possono cercare in anteprima e scaricare dati e mappe, rendendolo uno strumento essenziale per la gestione e la condivisione dei dati geospaziali grazie anche alla sua interoperabilità basata sugli standard *Open Geospatial Consortium* (OGC). Informazioni più dettagliate su GeoNode possono essere trovate in Corti et al. (2019).

La prima versione sperimentale del webGIS di SAVEMEDCOASTS-2, lanciata durante il progetto SAVEMEDCOASTS, è accessibile pubblicamente online da ottobre 2017 all'indirizzo <http://webgis.savemedcoasts>.

*eu*. Durante l'implementazione del progetto, sono stati raccolti dati già esistenti e nuove acquisizioni (ad esempio, ortofoto ad altissima risoluzione e modelli digitali del terreno basati su rilievi mediante droni) per il bacino del Mediterraneo, due aree di studio in Italia (due siti alle Cinque Terre e tre sull'isola di Lipari) e una in Grecia (due siti sull'isola di Lefkada).

La piattaforma webGIS è stata utilizzata come catalogo dati e per la creazione e condivisione di mappe dei casi di studio utilizzate come ausilio alla comunicazione nei diversi workshop locali tenuti con gli *stakeholder*. Inoltre, nella sezione Documenti del webGIS sono state caricate anche diverse mappe delle pianure costiere predisposte a inondazioni marine nel bacino del Mediterraneo. Nel dettaglio, queste mappe sono state prodotte durante l'implementazione del progetto SAVEMEDCOASTS dopo un'attenta identificazione e analisi di tutte le aree costiere del Mediterraneo con altitudine inferiore a 2 m sopra il livello medio del mare e sono organizzate per paese, fornendo un'utile panoramica delle aree più critiche potenzialmente soggette ad inondazioni costiere. Il webGIS del progetto SAVEMEDCOASTS-2 è una revisione tecnica, aggiornamento e espansione del precedente webGIS sviluppato nel progetto SAVEMEDCOASTS. La piattaforma ha ora aumentato le sue prestazioni complessive e la sua efficacia come sistema di supporto alle decisioni (*Decision Support System - DSS*) per pianificatori costieri, decisori e *stakeholder* attraverso soluzioni di mappatura di facile utilizzo. L'obiettivo principale era quello di migliorare le funzionalità del webGIS per contribuire a diffondere i risultati del progetto in modo più efficace in termini di comunicazione, aumentando il pubblico e l'interesse tra gli *stakeholder* (decisori, pianificatori del territorio, comunità scientifica, ecc.) e il pubblico in generale.

Le funzionalità più interessanti progettate e implementate nel webGIS di SAVEMEDCOASTS-2 sono specifiche applicazioni di *web mapping* (di seguito "app" per brevità) sui potenziali scenari di inondazione e i loro effetti a cascata, accessibili attraverso l'apposito menu "Apps". In particolare, sono state progettate e sviluppate tre app, descritte nel seguito.

### **App 1: Scenari di mareggiata**

L'app "*Storm surge scenarios*" ("Scenari di mareggiata") nasce da due esigenze fondamentali: (i) ricercare e visualizzare scenari di inondazione senza doversi districare tra numerosi layer il cui nome/titolo differisce a seconda delle abbreviazioni della nomenclatura adottata (es. *rhone\_delta\_rt001\_rcp85\_2030*) e (ii) quello di associare i relativi dati numerici a tali scenari. Nel dettaglio, questa app mappa gli scenari di inondazione dovuti agli effetti combinati di SLR, VLM, HAT e mareggiate in condizioni ordinarie o estreme riguardanti casi di studio specifici di SAVEMEDCOASTS - Acquacalda, Baia dei Portinenti, Canneto, Marina Corta, Marina Lunga, Monterosso e Vernazza (Italia) - e di SAVEMEDCOASTS-2 - Cavallino Treporti, Lido di Venezia e Metaponto (Italia), Piana di Chalastra (Grecia), Delta dell'Ebro (Spagna) e Delta del Rodano (Francia) (Figura 4).

L'app è semplice e facile da usare. Innanzitutto, l'utente può impostare i parametri di input (caso di studio, scenario IPCC, periodo di ritorno della mareggiata e orizzonte temporale) utilizzando i pannelli creati ad hoc e poi cliccare sul pulsante "*Show on map*" ("Mostra sulla mappa"). Quindi, nei pannelli inferiori viene visualizzata una mappa contenente lo scenario risultante insieme ai principali dati numerici associati (SLR, VLM, HAT,  $R_{max}$ , MWE e l'area potenzialmente allagata a causa di MWE). Inoltre, sotto i pannelli dei risultati numerici, è presente un glossario degli acronimi e dei termini utilizzati nell'app insieme ad uno schema grafico che illustra come viene valutato il MWE. Tale schema può differire a seconda del caso di studio selezionato e del suo progetto di pertinenza.

Per quanto riguarda la pianificazione costiera, questa app rappresenta un agevole strumento di consultazione e analisi in quanto mostra rapidamente le mappe dei potenziali scenari di inondazione (temporanei) per una mareggiata corrispondente alle specifiche condizioni al contorno definite mediante i parametri di input selezionati dall'utente. L'app consente, pertanto, l'individuazione in maniera interattiva della zona buffer da adottare nella pianificazione del territorio costiero, evitando così un utilizzo del territorio incompatibile con gli indirizzi derivanti dai risultati del progetto.

### **App 2: Confronto tra scenari**

L'app "*Comparison between scenarios*" ("Confronto tra scenari") (Figura 5) consente agli utenti di visualizzare e confrontare gli scenari di inondazione dovuti esclusivamente al RSLR (lato sinistro della mappa) e agli effetti combinati del RSLR, della marea astronomica più alta e delle mareggiate (lato destro della mappa) per l'area di studio selezionata.

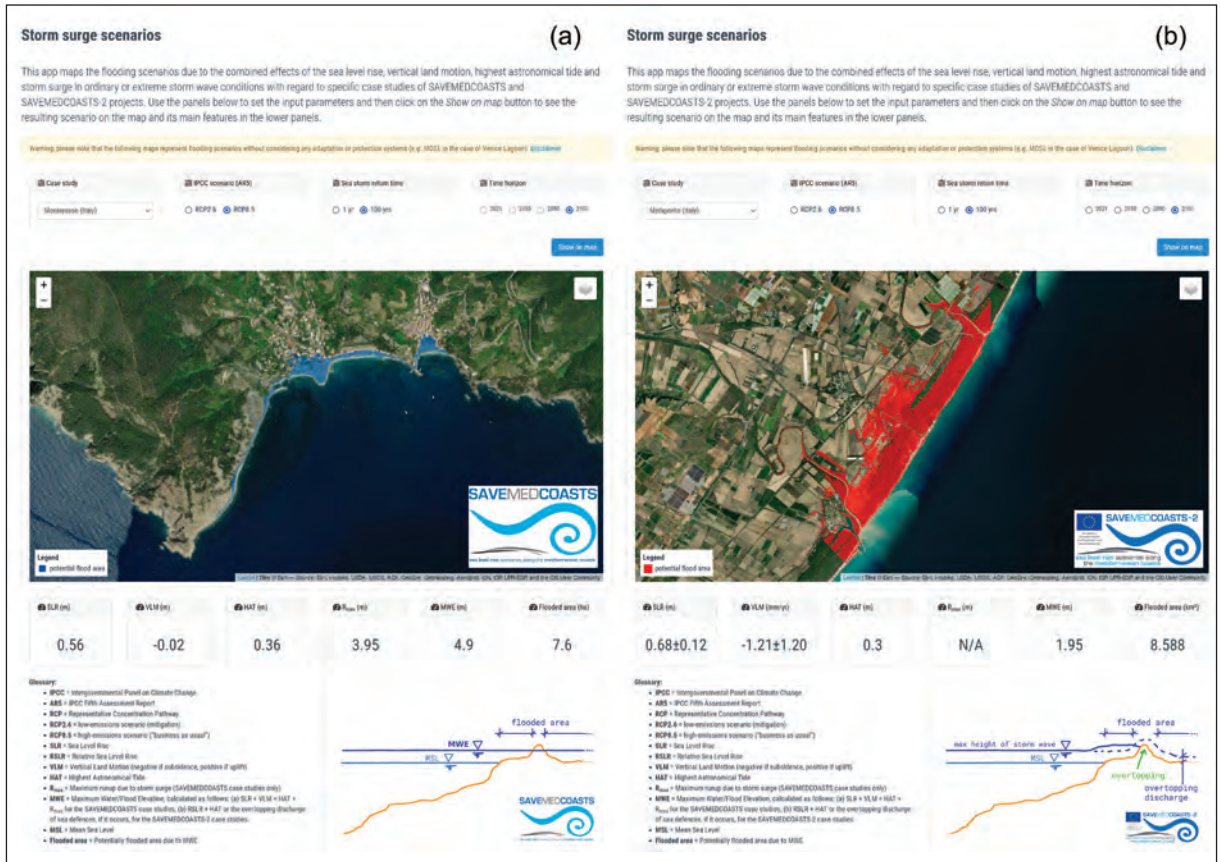


Figura 4. Esempi di risultati dell'app “Storm surge scenarios” nello scenario climatico RCP8.5, mareggiata in condizioni estreme (T = 100 anni) e orizzonte temporale 2100: Monterosso (a) e Metaponto (b).

I principi di funzionamento sono i seguenti: si impostano i parametri di input (caso studio, scenario IPCC, periodo di ritorno della mareggiata e orizzonte temporale) utilizzando i pannelli disponibili e quindi si clicca sul pulsante “Show on map” per vedere gli scenari risultanti sulle mappe. Gli scenari di inondazione (permanente) di RSLR sono mostrati sul lato sinistro della mappa, mentre quelli dovuti alla combinazione delle condizioni di RSLR, HAT e SS sono mostrati sulla destra.

Le principali informazioni numeriche associate sono riportate nei pannelli inferiori (SLR, VLM, HAT, MWE, Area 0 e Area 1, dove le ultime due rappresentano le aree potenzialmente inondate, rispettivamente in caso di condizioni di inondazione permanente e temporanea). Lo spostamento orizzontale dello slider della mappa consente all’utente di confrontare gli scenari in base ai parametri di input. Più specificamente, tale app consente di valutare la differenza di impatto potenziale in termini di estensione spaziale dovuto alla concomitante azione delle maree astronomiche e delle mareggiate, oltre alla componente di inondazione permanente, rispetto a quello dovuto esclusivamente al RSLR.

Nell’ottica della pianificazione delle coste, dato uno scenario climatico IPCC, una condizione probabilistica di mareggiata e un orizzonte temporale, questa app consente di valutare “al volo” l’estensione spaziale minima (permanente) e massima (temporanea) della potenziale inondazione costiera prevista e, di conseguenza, le “zone cuscinetto” da includere eventualmente nei piani di adattamento costiero.

**App 3: Indicatori di rischio di inondazione**

L’app “Flood risk indicators” (“Indicatori di rischio di inondazione”) (Figura 6) mostra i potenziali scenari di inondazione dovuti agli effetti combinati di RSLR, HAT e mareggiate riguardanti le aree indagate, insieme ad un indicatore di rischio di inondazione (Tabella 5) selezionato dall’utente tra quelli disponibili (strutture ricettive, edifici, rete fognaria, canali di bonifica, aree protette, risaie e rete stradale).

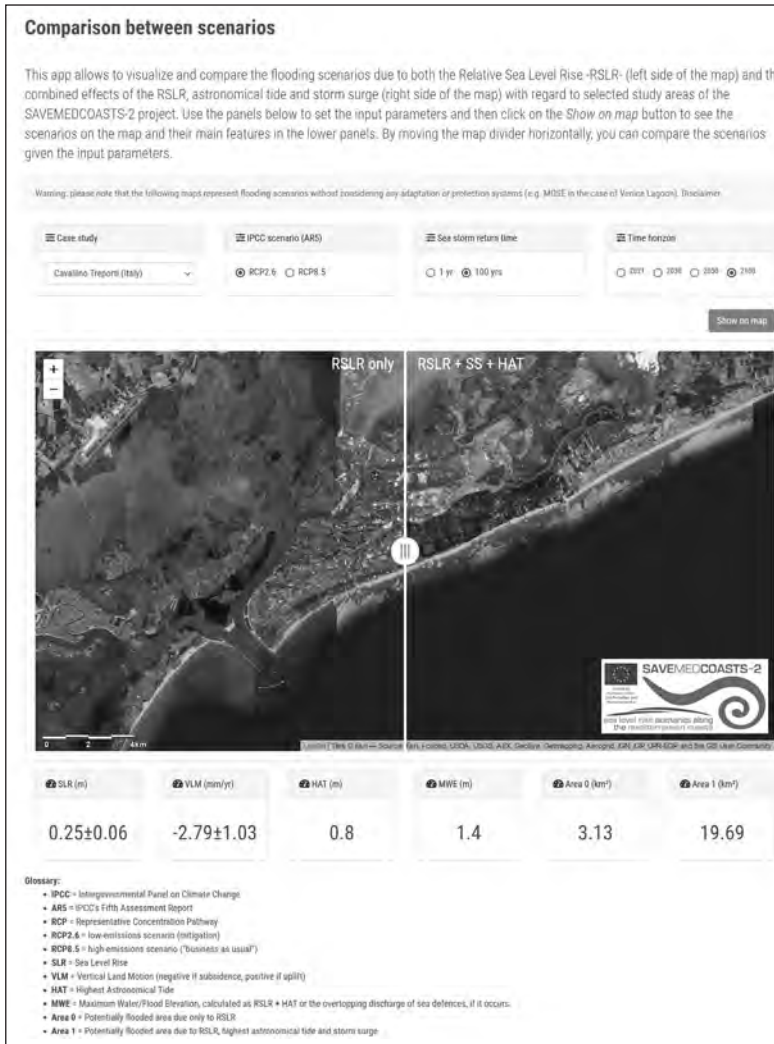


Figura 5. Cavallino Treporti. Risultati dell'app “Comparison between scenarios” ottenuti considerando lo scenario climatico RCP2.6, una mareggiata in condizioni estreme (T = 100 anni) e l’orizzonte temporale al 2100.

La disponibilità degli indicatori di rischio nell’apposito menu a discesa dipende dal sito selezionato, in quanto varia da sito a sito. L’utente può scegliere i parametri desiderati nei pannelli di input e quindi cliccare sul pulsante “Show on map” per consultare la mappa risultante, le sue principali informazioni quantitative in formato tabellare e, infine, due grafici che rappresentano le serie temporali dell’indicatore di rischio di inondazione prescelto e la sua curva *damage-water level* nel sito considerato. Il valore percentuale di ciascun indicatore di rischio di alluvione si riferisce all’estensione totale del dominio considerato nel caso di studio. L’utilità di tale app è molto elevata nella pianificazione costiera perché consente al decisore (ad es. il pianificatore del territorio) di scoprire quale indicatore del rischio di inondazione e quindi quale componente dell’ecosistema (es. aree protette o rete stradale) è più vulnerabile alle inondazioni costiere in caso di eventi di mareggiata e pianificare, di conseguenza, le misure di adattamento o mitigazione.

### Conclusioni

Il webGIS realizzato per i progetti SAVEMEDCOASTS e SAVEMEDCOASTS-2 consente di mostrare e gestire mappe dettagliate sulla potenziale estensione prevista dagli scenari di inondazione costiera fino al 2100 come conseguenza del RSLR per i siti target dei progetti. Gli scenari di inondazione rappresentati per le proiezioni climatiche RCP2.6 e RCP8.5, ulteriormente combinati con eventi di mareggiata in condizioni ordinarie (T = 1 anno) o estreme (T = 100 anni), sono basati sul rapporto AR5 SROCC (Oppenheimer et al., 2019). Rispetto alle mappe di inondazione realizzate in passato, quelle pubblicamente disponibili sulla piattaforma webGIS di SAVEMEDCOASTS-2 sono più realistiche poiché includono la topografia ad alta risoluzione e il contributo

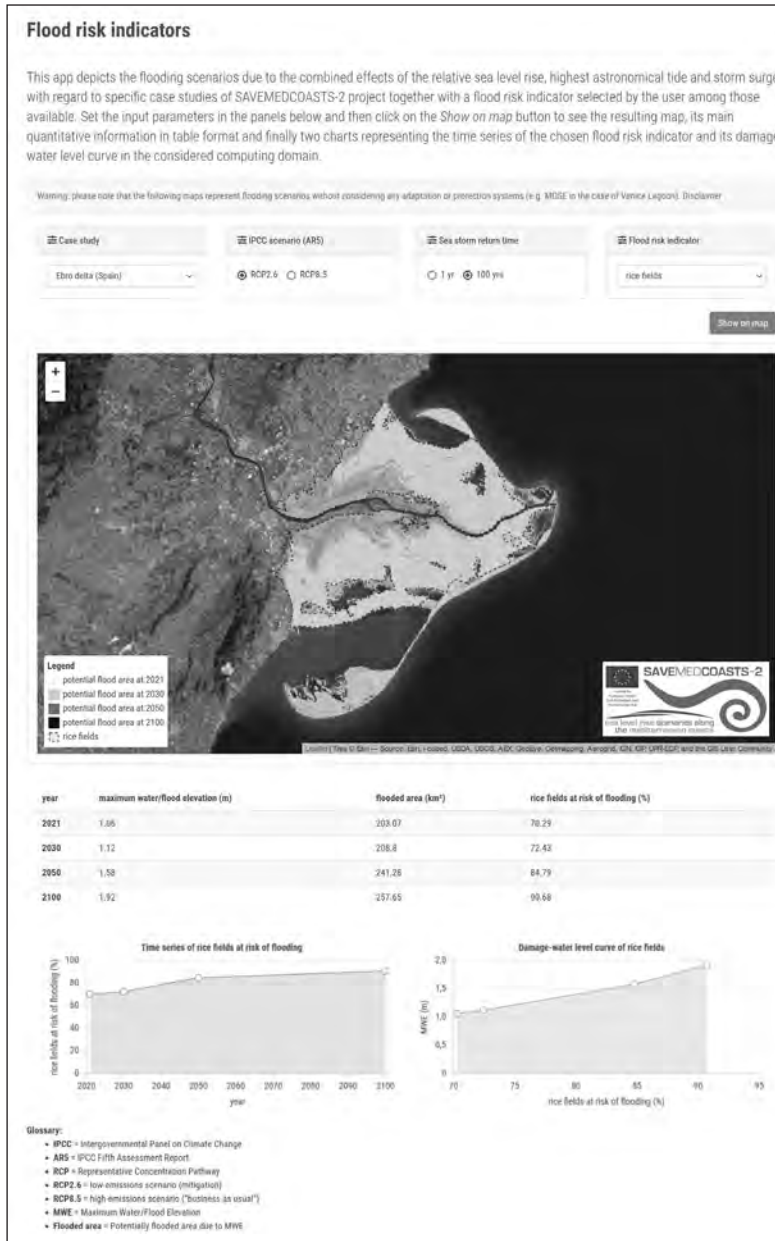


Figura 6. Delta dell’Ebro (Spagna). Esempio d’uso dell’app “Flood risk indicators” per lo scenario climatico RCP2.6, una mareggiata con T = 100 anni e “rice fields” come indicatore di rischio di inondazione.

della subsidenza, valutata mediante l’analisi di dati geodetici e satellitari, nel valore totale previsto di SLR. A tale proposito, citiamo il recente studio di Vecchio et al. (2024) per l’intera area mediterranea che mette in evidenza come la subsidenza cambi, anche sensibilmente, i valori delle proiezioni dell’IPCC riportate nel Report AR6. Una valutazione preliminare degli effetti a cascata sulle aree pilota di SAVEMEDCOASTS-2 dovuti agli effetti combinati di RSLR per eventi di mareggiata ordinari ed estremi fornisce una valutazione quantitativa degli effetti considerati lungo la zona costiera, l’ambiente e gli insediamenti umani attraverso un approccio basato sul modello “flood-damage”. Le app e le mappe implementate nel webGIS mostrano la rilevanza di ciascun indicatore di danno rispetto all’impatto totale per lo scenario di inondazione considerato. La qualità dei risultati presentati dipende da alcune assunzioni di base (invarianza del tasso di subsidenza e degli esposti), dall’accuratezza dei DTM e dal metodo adottato per valutare l’estensione spaziale delle potenziali aree di inondazione. Il webGIS può rappresentare un valido supporto per i decisori politici e i pianificatori del territorio nella definizione di piani di adattamento ai cambiamenti climatici contro la questione SLR, esacerbato dal VLM. La crescente minaccia per la popolazione che vive lungo la costa dovrebbe spingere i pianificatori del territorio e

i decisori a prendere in considerazione scenari simili a quelli riportati in questo studio per una gestione costiera responsabile. Gli scenari di RSLR per i prossimi decenni sono cruciali per comprenderne i rischi associati in modo che la popolazione e i decisori possano essere preparati ad affrontare questi cambiamenti anche attraverso il webGIS di SAVEMEDCOASTS-2, che è uno strumento importante per i cittadini e gli *stakeholder*.

### Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Xenia Loizidou, Demetra Orthodoxou, Demetra Petsa e Michael Loizides (ISOTECH, Cipro); Silvia Torresan, Elisa Furlan e Arthur Essenfelder (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italia); Claudia Ferrari, Chiara Tenderini e Isabella Marangoni (Comune di Venezia, Italia); Marco Favaro e Alvise Papa (Centro Maree del Comune di Venezia, Italia); Athanasios Petousis (PED-IN, Grecia); Luca Natale (Parco Nazionale delle Cinque Terre, Italia); Alessandro Bosman (IGAG-CNR, Italia); Raffaele Giampietro, Pierpaolo Gruosso ed Enrico Santangelo (FARBAS, Italia); Giovanna Forlenza, Gemma Musacchio, Maddalena De Lucia, Elena Eva e Stefano Solarino (INGV, Italia) per il loro prezioso contributo alle attività del progetto.

Si ringrazia il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti-”Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche del Veneto già Magistrato alle Acque del Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia” già Magistrato alle Acque di Venezia e il Comune di Venezia per aver fornito i dati LiDAR.

### Bibliografia

- Anderson T.R., Fletcher C.H., Barbee M.M., Romine B.M., Lemmo S., Delevaux J.M.S., 2018. *Modeling multiple sea level rise stresses reveals up to twice the land at risk compared to strictly passive flooding methods*. Sci Rep, 8, 1: 14484.
- Anzidei M., Doumaz F., Vecchio A., Serpelloni E., Pizzimenti L., Civico R., Greco M., Martino G., Enei F., 2020. *Sea Level Rise Scenario for 2100 A.D. in the Heritage Site of Pyrgi (Santa Severa, Italy)*. Journal of Marine Science and Engineering, 8, 2: 64.
- Blanco-Vogt A., Schanze J., 2014. *Assessment of the physical flood susceptibility of buildings on a large scale - conceptual and methodological frameworks*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14, 8: 2105–2117.
- Corti P., Bartoli F., Fabiani A., Giovando C., Kralidis A.T., Tzotsos A., 2019. *GeoNode: an open source framework to build spatial data infrastructures*. PeerJ Preprints.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthy N., Crippa B., 2016. *Persistent Scatterer Interferometry: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Theme issue «State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science», 115, 78–89.
- DeLorme D., Stephens S., Hagen S., Bilskie M., 2018. *Communicating with Coastal Decision-Makers and Environmental Educators via Sea Level Rise Decision-Support Tools*. Journal of Science Communication, 17.
- Falciano A., Anzidei M., Greco M., Trivigno M.L., Vecchio A., Georgiadis C., Patias P., Crosetto M., Navarro J., Serpelloni E., Tolomei C., Martino G., Mancino G., Arbia F., Bignami C., Doumaz F., 2023. *The SAVEMEDCOASTS-2 webGIS: the Online Platform for Relative Sea Level Rise and Storm Surge Scenarios up to 2100 for the Mediterranean Coasts*. Journal of Marine Science and Engineering, 11, 11: 2071.
- Fuchs S., 2009. *Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria - paradigms of vulnerability revisited*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 2: 337–352.
- Gallien T.W., Sanders B.F., Flick R.E., 2014. *Urban coastal flood prediction: Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage*. Coastal Engineering, 91, 18–28.
- GFDRR, 2017. *Open Data for Resilience Initiative and GeoNode : A Case Study on Institutional Investments in Open Source*. GFDRR, Washington, DC.
- Greco M., Martino G., Guariglia A., Trivigno L., Losurdo A., Sansanelli V., 2017. *Sviluppo di un DSS integrato per il monitoraggio dell'ambiente costiero*. Studi costieri, 26: 147–160.
- Holman I., Rounsevell M., Berry P., Nicholls R., 2008. *Development and Application of Participatory Integrated Assessment Software to Support Local/Regional Impact and Adaptation Assessment*. Climatic Change, 90, 1–4.
- Kulp S.A., Strauss B.H., 2018. *CoastalDEM: A global coastal digital elevation model improved from SRTM using a neural network*. Remote Sensing of Environment, 206, 231–239.
- Kulp S.A., Strauss B.H., 2019. *New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding*. Nat Commun, 10, 1: 4844.

- Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., Pepe A., 2007. *An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: a DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis*. Pure appl. geophys., 164, 4: 637–661.
- Lee S., Wolberg G., Shin S.Y., 1997. *Scattered data interpolation with multilevel B-splines*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 3, 3: 228–244.
- Loizidou X.I., L. Orthodoxou D., I. Loizides M., Petsa D., Anzidei M., 2023. *Adapting to sea level rise: participatory, solution-oriented policy tools in vulnerable Mediterranean areas*. Environ Syst Decis.
- Malgwi M.B., Schlögl M., Keiler M., 2021. *Expert-based versus data-driven flood damage models: A comparative evaluation for data-scarce regions*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 57, 102148.
- MedECC, 2020. *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report*. Zenodo.
- Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A., 2013. *Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea*. coas, 65, sp2: 1551–1556.
- Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A., 2015. *Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea*. Ocean Modelling, 90, 82–94.
- Merz B., Kreibich H., Schwarze R., Thielen A., 2010. *Review article «Assessment of economic flood damage»*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 8: 1697–1724.
- Oppenheimer M., Glavovic B.C., Hinkel J., van de Wal R., Magnan A.K., Abd-Elgawad A., Cai R., Cifuentes-Jara M., DeConto R.M., Ghosh T., Hay J., Isla F., Marzeion B., Meysignac B., Sebessvari Z., 2019. *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Papathoma-Köhle M., Gems B., Sturm M., Fuchs S., 2017. *Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows*. Earth-Science Reviews, 171, 272–288.
- Pickel E., 2009. *GeoNode - A New Approach to Developing SDI*.
- Purinton B., Bookhagen B., 2017. *Validation of digital elevation models (DEMs) and comparison of geomorphic metrics on the southern Central Andean Plateau*. Earth Surf. Dynam., 5, 2: 211–237.
- Seenath A., Wilson M., Miller K., 2016. *Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment: Which is better for guiding coastal management?* Ocean & Coastal Management, 120, 99–109.
- UNISDR, 2015. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. Presentato al Third United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction, United Nations, Sendai, Japan.
- Vecchio A., Anzidei M., Serpelloni E., 2024. *Sea Level Rise Projections up to 2150 in the Northern Mediterranean Coasts*. Environ. Res. Lett., 19, 014050.
- Vernimmen R., Hooijer A., 2023. *New LiDAR-Based Elevation Model Shows Greatest Increase in Global Coastal Exposure to Flooding to Be Caused by Early-Stage Sea-Level Rise*. Earth's Future, 11, 1: e2022EF002880.
- Vousdoukas M.I., Mentaschi L., Mongelli I., Ciscar J.C., Hinkel J., Ward P., Gosling S., Feyen L., 2020. *Adapting to rising coastal flood risk in the EU under climate change: JRC PESETA IV project : Task 6*. Publications Office of the European Union, LU.
- Widlansky M.J., Long X., Schloesser F., 2020. *Increase in sea level variability with ocean warming associated with the nonlinear thermal expansion of seawater*. Commun Earth Environ, 1, 1: 1–12.
- Yunus A.P., Avtar R., Kraines S., Yamamuro M., Lindberg F., Grimmond C.S.B., 2016. *Uncertainties in Tidally Adjusted Estimates of Sea Level Rise Flooding (Bathtub Model) for the Greater London*. Remote Sensing, 8, 5: 366.
- Zanuttigh B., Simcic D., Bagli S., Bozzeda F., Pietrantonio L., Zagonari F., Hoggart S., Nicholls R.J., 2014. *THESEUS decision support system for coastal risk management*. Coastal Engineering, Coasts@Risks: THESEUS, a new wave in coastal protection, 87, 218–239.

**Ricevuto il 16/10/2023; accettato il 05/03/2024**