

Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 31
2023



Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra

Via Micheli, 6 - 50121 Firenze

Tel. 055 2756547

Redazione: **Irene Cinelli**

E-mail: irene.cinelli@unifi.it

Comitato scientifico

Segreteria: **Pierluigi Aminti**

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Via S. Marta, 3 - 50139 Firenze

Tel. 055 2758840

E-mail: aminti@dicea.unifi.it

Carl Leonetto Amos - Southampton (UK)

Giorgio Anfuso - Cadice (Spagna)

Mario Calabrese - Napoli

Lorenzo Cappietti - Firenze

Nicola Corradi - Genova

Leandro D'Alessandro - Chieti

Giuliano Fierro - Genova

Leopoldo Franco - Roma

Alberto Lamberti - Bologna

Elvidio Lupia Palmieri - Roma

Alessandro Mancinelli, Ancona

Alberto Noli - Roma

André Ozer - Liegi (Belgio)

Piero Ruol - Padova

Umberto Simeoni - Ferrara

Adrian Stanica - Bucarest (Romania)

Giuseppe Roberto Tomasicchio - Bari

Lilian Wetzel - Rio Grande (Brasile)

Finito di stampare nel mese di Aprile 2024

Edizioni Tassinari

Studi costieri N. 31



**Numero stampato con il contributo
del DISTAV dell'Università di Genova**

Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero

Approcci innovativi e di intelligenza artificiale per l'analisi del “*Marine and Beach Litter*”: stato dell'arte degli studi condotti lungo le coste pugliesi

¹Sozio Angelo, ^{1,2}Rizzo Angela, ³Aucelli Pietro P. C., ¹La Salandra Marco, ⁴Martella Rocco, ^{1,2}Mastronuzzi Giuseppe, ^{1,2}Scardino Giovanni, ³Scarrica Vincenzo M., ³Staiano Antonino, ^{1,2}Scicchitano Giovanni

¹Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari, Italia

²Centro Interdipartimentale per la Dinamica Costiera, Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari, Italia

³Dipartimento di Scienze e Tecnologia, Università degli Studi di Napoli “Parthenope”, Napoli, Italia

⁴Istituto Statale “A. Righi” Taranto, Italia

angelo.sozio@uniba.it; angela.rizzo@uniba.it

Riassunto

La continua diffusione di sostanze inquinanti e rifiuti nell'ambiente marino-costiero è divenuta una delle maggiori problematiche che interessano il bacino del Mediterraneo, soprattutto considerando il continuo aumento della concentrazione di polimeri artificiali nelle matrici ambientali (acqua, sedimento) e nella catena trofica. In questo lavoro vengono presentate le attività svolte per la caratterizzazione geo-ambientale di alcuni siti costieri del versante adriatico pugliese (in particolare il sito di Torre Guaceto) ed i progressi raggiunti nel monitoraggio del *Marine Litter* tramite un approccio di *citizen science*. Le procedure di analisi volte all'individuazione di rifiuti spiaggiati (*Beach Litter* - BL) sono basate sia su rilievi diretti *in situ* sia su analisi di riconoscimento automatico da immagini fotogrammetriche acquisite tramite SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto). I risultati ottenuti hanno evidenziato che la percentuale più alta di elementi di BL con dimensione > di 2.5 cm è rappresentata da polimeri artificiali (>80%). Per monitorare la distribuzione dei rifiuti in mare (*Marine Litter* - ML), è stata sviluppata l'applicazione “nauticAttiva” per dispositivi cellulari utilizzando la piattaforma iNaturalist (dominio di *National Geographic*), attraverso la quale è stato poi sviluppato un *geodatabase* dedicato. L'applicazione permette di raccogliere fotografie georeferenziate e di classificare gli oggetti individuati usando un approccio di *citizen science*, in quanto tutti gli utenti che installano sul proprio dispositivo mobile l'applicazione possono fornire osservazioni sui rifiuti presenti nell'ambiente marino. Le analisi ad oggi effettuate favoriscono l'identificazione e la valutazione della distribuzione spaziale del *Marine e Beach Litter*, fornendo un valido strumento per il monitoraggio di aree estese e per la pianificazione di interventi di gestione delle aree costiere.

Parole chiave: ambiente costiero, rilievo aerofotogrammetrico, rifiuti antropici, identificazione automatica, monitoraggio ambientale, *citizen science*.

Abstract

The continuous spread of pollutants and waste materials in marine and coastal environment has become one of the major issues affecting the Mediterranean basin, especially considering the continuous increase in the concentration of polymers in environmental matrices (water, sediment) and in the trophic chain. In this paper, activities performed for the geo-environmental characterization of some coastal sites along the Adriatic coast of the Apulia region (Southern Italy and Torre Guaceto site in detail) are presented. The procedures aimed at the detection of beach litter (BL) include both direct in situ surveys and automatic recognition analysis on photogrammetric images acquired by UASs (Unmanned Aerial Systems). The results obtained for a beach sector sited in the Marine Protected Area/Natural Reserve of Torre Guaceto (Brindisi) showed that the highest percentage of BL elements with size > 2.5 cm was represented by artificial polymers (>80%). Furthermore, to assess the distribution of litter in the sea (marine litter - ML), the “nauticAttiva” application for mobile devices was implemented with the exploitation of the iNaturalist platform (National Geographic domain). The application allows the collection of georeferenced

photographs and the classification of identified objects using a citizen science approach, where any user can provide observations of litter items on the sea surface. To date, from the reported analyses, a suitable system is outlined for the identification and spatial distribution of marine and beach litter, also providing a valuable tool for the investigation of large areas in a perspective of integrated coastal management.

Keywords: *coastal environment, aero-photogrammetric survey, anthropogenic waste, automatic identification, environmental assessment, citizen science.*

Introduzione

Negli ultimi decenni, la quantità di rifiuti presenti lungo le coste a scala globale è fortemente aumentata e gli effetti negativi che ne derivano sono stati ampiamente documentati a livello nazionale ed internazionale. La presenza di rifiuti in ambiente marino-costiero impatta negativamente su ecosistemi, salute umana, economia e società. Piani di gestione intergovernativi per lo sviluppo sostenibile sia in seno alle Nazioni Unite (UNEP) che a livello europeo (OSPAR) si propongono di regolamentare la gestione di tali elementi inquinanti tracciando delle linee guida per il loro monitoraggio. I termini *Marine Litter* (ML) e *Beach Litter* (BL) indicano tutti i materiali solidi fabbricati e/o elaborati da attività antropica e in seguito deposti, abbandonati o persi in ambiente marino-costiero e ivi presenti in maniera persistente (OSPAR, 2010; UNEP, 2021). Tentare di gestire un flusso così alto di rifiuti verso le aree costiere significa soprattutto conoscerne le aree sorgenti e i processi che mobilitano tali elementi. Infatti, i meccanismi che trasportano i rifiuti solidi dall'entroterra verso la fascia costiera possono essere di varia natura. Il centro di comunicazione ambientale *GRID-Arendal*, partner UNEP, ha individuato numerose sorgenti di *litter* collocate sia sulla terraferma sia in ambiente marino (<https://www.grida.no/resources/6922>). Fra questi, vi sono gli impianti fognari di centri urbani e industrie i quali, a seguito di forti piogge ed eventi estremi possono eccedere la loro capacità di gestione delle acque reflue e far defluire i rifiuti direttamente verso i bacini d'acqua senza che vengano trattati. Inoltre, le discariche situate in vicinanza delle aree costiere o fluviali rappresentano probabili sorgenti di ML e BL. A seguire, vi sono rifiuti provenienti dalle reti stradali dei centri urbani che raggiungono fiumi e mari grazie al dilavamento superficiale operato dalle acque meteoriche. Inoltre, in ambiente costiero possono essere riscontrati oggetti provenienti da impianti di lavoro e produzione situati in ambiente forestale, agricolo, edile e di estrazione (miniere, cave). Fra le principali fonti di rifiuti in ambiente marino, *GRID-Arendal* individua le attività legate al commercio marittimo, alla navigazione nonché alle attività di balneazione lungo le spiagge. Da notare che anche gli stessi animali e organismi marini possono assumere il ruolo di agenti trasportatori passivi ingerendo la componente di *litter* costituita dai frammenti con diametro inferiore a 5 mm (*microlitter*) o mobilitando col loro corpo rifiuti anche più grandi. Inoltre, fonti di *litter* secondarie all'interno dello stesso ambiente costiero possono formarsi a seguito di un elevato accumulo di BL o ML proveniente da fonti esterne. Ad esempio, Andriolo et al., (2022) individuano una porzione del sistema dunale lungo un settore di costa atlantica portoghese assimilabile del tutto ad un *reservoir* di BL mentre Piazzolla et al., (2020) individuano un'elevata componente di microplastiche nei sedimenti del fondo marino lungo un'area costiera del Lazio, nel Tirreno settentrionale. Al fine di far riferimento ad una scala uniforme per i vari enti che si occupano del monitoraggio e dell'acquisizione dei dati sul campo, gli elementi di ML e BL sono classificati sulla base della loro dimensione (GESAMP, 2019; Tab. 1). Tale classificazione influenza anche le metodologie da utilizzare per le attività da effettuare, dato che elementi di diverse dimensioni richiedono strumenti differenti per essere campionati ed analizzati.

In Italia, Legambiente realizza annualmente campagne di monitoraggio su numerose spiagge e, secondo i risultati dell'indagine condotta nel 2023 (Fig. 1a), i materiali più abbondanti risultano essere i polimeri artificiali (72,5%). Ciò è in accordo anche con le statistiche a livello europeo rese disponibili dal *Joint Research Centre* (JRC, 2017), il quale per l'anno 2016 ha registrato un'elevata percentuale (84%) di polimeri artificiali sulle coste europee (Fig. 1b). Tali criticità confermano sempre più il bisogno di contrastare l'incremento preoccupante del ML e BL e la comunità scientifica si è dimostrata particolarmente sensibile a questa tematica. Infatti, negli ultimi 10 anni il numero di pubblicazioni scientifiche in cui compaiono i termini "*Marine Litter*" e "*Beach Litter*" è nettamente aumentato, soprattutto in paesi europei (Cesarano et al., 2021). Le numerose problematiche legate alla sempre più elevata abbondanza di ML e BL lungo

le coste italiane ed internazionali (Rangel-Buitrago et al., 2019; Asensio-Montesinos et al., 2020; Bao et al., 2018; Rizzo et al., 2021) hanno portato allo sviluppo e al miglioramento delle metodologie e delle tecniche di monitoraggio costiero sfruttando approcci sempre più innovativi e all'avanguardia. Una delle metodologie più innovative per questa tipologia di monitoraggio costiero si basa sulla realizzazione di rilievi aerofotogrammetrici associati alla capacità di elaborazione di algoritmi di *Machine Learning* per il riconoscimento automatico di BL su immagini ad alta definizione (Andriolo et al., 2020; Gonçalves et al., 2022, Scarrica et al., 2022). Difatti, un censimento visivo *in situ* richiede un elevato dispendio di energie e tempo da parte degli operatori e i risultati possono essere caratterizzati da una più o meno elevata soggettività (Gonçalves et al., 2020). Di conseguenza, negli ultimi anni sono stati valutati sistemi di monitoraggio alternativi per migliorare ed integrare i tradizionali approcci visivi, sfruttando l'uso di immagini acquisite tramite SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) che vengono poi analizzate automaticamente con tecniche di *Machine Learning* (Bao et al., 2018; Bak et al., 2019). Diversi studi hanno mostrato che algoritmi di *Machine Learning* lavorano particolarmente bene nell'ambito del monitoraggio ambientale da immagini acquisite in remoto, quali *Random Forest* (RF), *Support Vector Machines* (SVM) e *K-Nearest Neighbours* (KNN) (Hastie et al., 2009).

Tabella 1. Categorie dimensionali proposte per la classificazione degli elementi di *Marine e Beach Litter*, assumendo una forma quasi sferica dell'elemento e considerando il lato lungo (GESAMP, 2019; *GESAMP: *Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*; **MSFD: *Marine Strategy Framework Directive*; *NOWPAP: *Northwest Pacific Action Plan*)**

Categorie	Dimensione relativa	Intervalli dei valori	Unità di misura	Riferimenti
Mega	Molto grande	> 1 m	Metri	GESAMP*
Macro	Grande	25 – 1000 mm	Metri; centimetri; millimetri	MSFD**
Meso	Media	5 – 25 mm	Centimetri; millimetri	MSFD
Micro	Piccola	< 5 mm	Millimetri; micron	NOWPAP***; MSFD
Nano	Estremamente piccola	< 1 µm	Nanometri	-

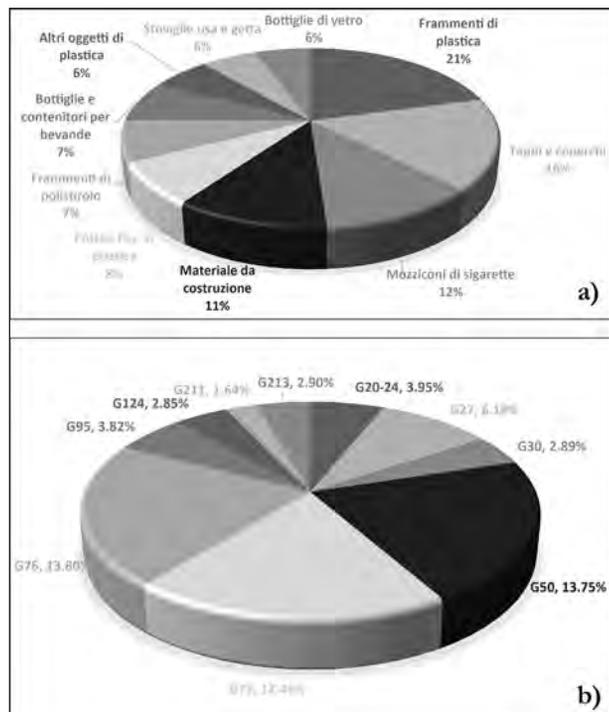


Figura 1. Grafici a torta che illustrano le 10 categorie di BL e ML più abbondanti rilevate a seguito delle campagne di monitoraggio condotte da a) Legambiente lungo le coste italiane nell'anno 2023 e b) dal JRC su spiagge europee nell'anno 2016. Le sigle delle categorie di BL sono riferite alle linee guida europee definite in Vlachogianni et al., 2017.

In questo studio si riporta lo stato dell'arte e i risultati raggiunti nell'ambito dei progetti di ricerca "*Marine & Beach litter monitoring in Apulia*" (POC PUGLIA FESRT-FSE 2014/2020), finanziato dalla Regione Puglia tramite il programma RiPARTI (*assegni di Ricerca per riPARTire con le imprese*), e del progetto RETURN, finanziato tramite fondi PNRR, i quali mirano alla messa a punto di un protocollo per la valutazione della distribuzione e della classificazione dei rifiuti spiaggiati, utile per lo sviluppo di programmi di monitoraggio ambientale ad alte prestazioni, secondo i requisiti internazionali e nazionali. Nello specifico, in questo lavoro sono illustrati gli studi in corso e i risultati preliminari derivanti dalle analisi condotte lungo un settore di spiaggia all'interno dell'Area Marina Protetta (MPA) di Torre Guaceto (BR). In particolare, seguendo le linee guida europee (Vlachogianni, 2017; Fleet et al., 2021), sono state svolte campagne di acquisizione dati *in situ* mirate al conteggio manuale dei rifiuti presenti in spiaggia. In concomitanza sono stati effettuati voli con rilievi aero-fotogrammetrici lungo il tratto costiero indagato, così da poter poi analizzare le immagini ad alta risoluzione tramite un algoritmo di *Machine Learning* ed ottenere, come risultato finale, una classificazione automatica dei rifiuti spiaggiati. Tale approccio permetterà, inoltre, di avere una stima preliminare della distribuzione e abbondanza del BL in un determinato settore di spiaggia facilitando le attività di monitoraggio *in-situ*. Inoltre, sono riportati i progressi delle attività di monitoraggio della ML effettuato in collaborazione con la Lega Navale Italiana. Tra le idee più innovative proposte in questo contesto di soluzioni alla minaccia posta dal ML e BL vi sono metodi di monitoraggio di rifiuti che possono essere affrontati attraverso approcci di *citizen science*, in questo caso integrati con i telefoni cellulari (Mastronuzzi, 2023; Scardino et al., 2022). D'altra parte, la disponibilità di telefoni cellulari è da considerarsi ubiquitaria all'interno della società e, di conseguenza, tali strumenti ormai di uso quotidiano possono essere integrati con applicazioni *web mobile*, come l'app "nauticAttiva" proposta in questo studio, che consentano di raccogliere molti dati per applicazioni scientifiche relative ad aree estese e in un breve intervallo temporale. I dati ottenuti dalle attività in corso permetteranno di comprendere meglio la complessità legata alla mobilità e distribuzione dei rifiuti su scala di bacino, fornendo una visione completa della problematica rappresentata dai rifiuti in ambiente marino-costiero. Difatti, la conformazione semi-chiusa del Mar Mediterraneo rende molto complicata la mobilitazione dei rifiuti, i quali possono raggiungere le coste trasportati da fiumi, vento e ruscellamento superficiale (Campanale et al., 2020; Guerranti et al., 2020; Khan et al., 2020). Questo pone una necessità particolare di comprendere le dinamiche interne al bacino del Mediterraneo di modo da ponderare e meglio pianificare futuri interventi di monitoraggio, gestione e bonifica lì dove vengono individuate aree a maggior rischio di inquinamento da ML e BL.

Area di studio

In questo lavoro sono illustrati i risultati derivanti dalle varie analisi finora condotte in un settore di spiaggia che ricade all'interno dell'Area Marina Protetta (AMP) di Torre Guaceto, situata a circa 15 km a nord della città di Brindisi (Fig. 2a). L'AMP è stata istituita nel 1991 con un decreto del Ministero dell'Ambiente. Il tratto di linea di costa adriatica ricadente nell'area copre circa 8 km ed ha un'estensione areale di quasi 3.000 ettari, comprendente sia zone terrestri che marine, suddivisa in tre aree con diversi livelli di interdizione e protezione: zona A (più alto livello di protezione), zona B e zona C. Inoltre, il sito è incluso sia nel catasto dei geositi della Regione Puglia (CGP0249 - "L'area umida di Torre Guaceto"; Mastronuzzi et al., 2013) sia nella rete ecologica Natura 2000 come Area a Protezione Speciale (SPA - IT9140008 "Torre Guaceto") e Sito di Interesse Comunitario (SCI - IT9140005 "Torre Guaceto e Macchia San Giovanni"). Essendo l'area di studio inserita all'interno di un'AMP, le operazioni di pulizia programmate sono molto limitate così come la fruizione ricreativa da parte di bagnanti. Di conseguenza, la distribuzione e abbondanza di rifiuti risulta essere legata maggiormente a processi di trasporto e mobilitazione naturali. Inoltre, quest'area è attraversata dal Canale Reale, un torrente lungo 48 km che separa l'altopiano murgiano dalla pianura di Taranto-Brindisi (Mastronuzzi et al, 2011, 2018). Il settore di spiaggia considerato per le analisi si trova in prossimità della foce del Canale Reale (Fig. 2b), un canale dalla portata molto limitata, regimato artificialmente nel suo tratto finale. Tale corso d'acqua è considerato fra le principali vie preferenziali attraverso le quali i rifiuti possono raggiungere le spiagge nell'AMP, soprattutto in seguito al verificarsi di eventi meteo-marini estremi.

Il progetto "nauticAttiva" prevede la condivisione di fotografie acquisite tramite cellulare in ambiente ma-

rino, per cui l'area entro la quale è possibile monitorare la distribuzione di rifiuti in mare è data idealmente dalle capacità di navigazione e mobilità in mare degli utenti. Si rimanda al paragrafo "Risultati" per visionare l'areale coperto dai dati raccolti al momento della stesura del presente lavoro (litorale ionico e adriatico della

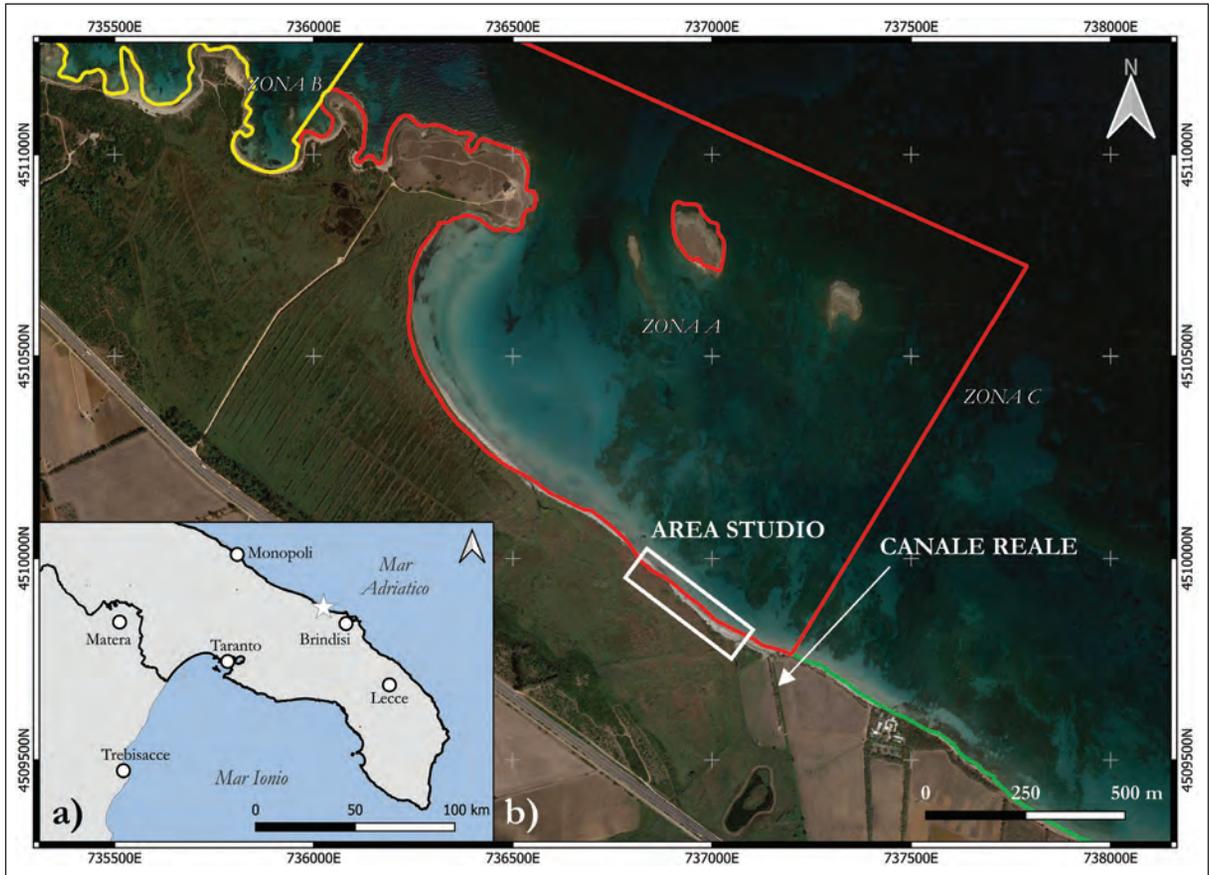


Figura 2. Ubicazione dell'AMP di Torre Guaceto lungo la costa adriatica pugliese. a) L'area di Torre Guaceto è indicata dalla stella bianca; b) il rettangolo bianco identifica il settore di spiaggia analizzato nel maggio 2023. Sono riportati anche i limiti delle zone dell'AMP a diverso grado di interdizione.

Puglia, Stretto di Messina, costa meridionale della Sardegna).

Metodologia

L'analisi del *BL* è stata condotta seguendo due approcci metodologici differenti: il monitoraggio diretto sul campo, basato sul conteggio dei rifiuti *in-situ*, e il monitoraggio indiretto da ortofoto ottenute dal post-processing di immagini fotogrammetriche acquisite tramite SAPR. Quest'ultima metodologia ha previsto, inoltre, l'elaborazione dei dati raccolti da parte di un algoritmo di *Machine Learning* preposto al riconoscimento automatico dei rifiuti spiaggiati. Quest'ultimo è stato addestrato su immagini precedentemente acquisite tramite SAPR in aree costiere differenti dall'area test descritta in questo lavoro. Immagini ad alta risoluzione provenienti da Leirosa (Portogallo), Capitolo (Monopoli, Bari) e Valdelagrana (Cadice, Spagna) hanno fornito un *dataset* relativamente robusto sul quale addestrare gli algoritmi di *Machine Learning* utilizzati per il riconoscimento automatico, mentre il settore di spiaggia ubicato all'interno dell'AMP di Torre Guaceto (BR) è stato utilizzato per testare le capacità di riconoscimento degli algoritmi. La figura 3 riporta uno schema riassuntivo delle tecniche adottate per il progetto di ricerca presentato in questo lavoro. Il monitoraggio diretto in campo ed il riconoscimento automatico sono stati eseguiti all'interno di tre sub-aree delimitate da box rettangolari aventi come vertici i GCP (*Ground Control Point*) usati per la georeferenziazione dell'ortomosaico (Fig. 8), di modo da avere uniformità dell'area indagata per entrambe le metodologie

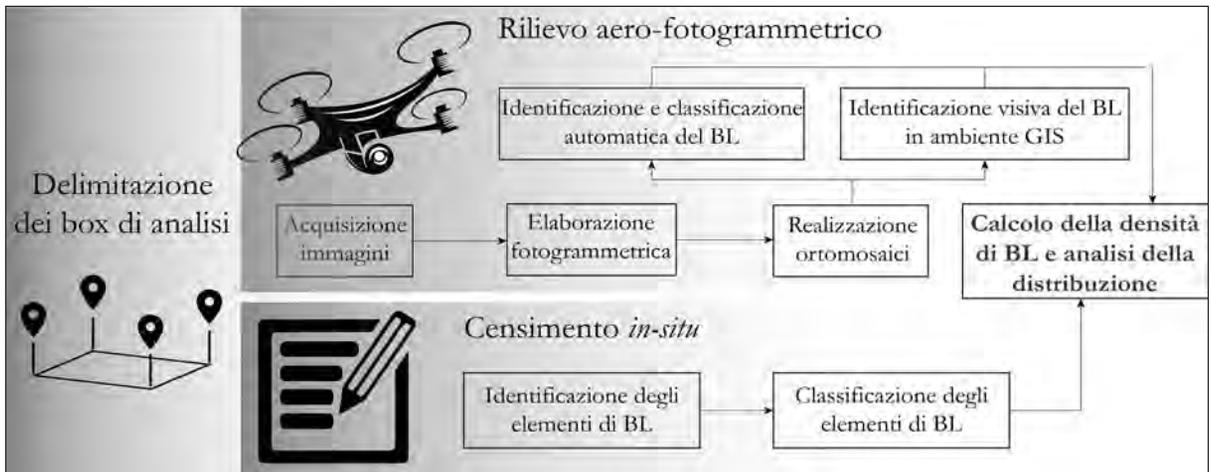


Figura 3. Schema riassuntivo degli approcci metodologici utilizzati per l'analisi del BL.

nel calcolo delle densità di BL.

Durante le campagne di conteggio in-situ tutti gli elementi riconosciuti come BL di dimensioni superiori a 2.5 cm (appartenenti quindi alla categoria "macro litter") sono stati identificati, fotografati e classificati secondo le linee guida per il monitoraggio dei rifiuti marini nei mari europei, sviluppate dall'Unione Europea (Galgani et al., 2013). Dai dati raccolti è stato possibile ricavare una prima stima della densità di rifiuti, calcolata come numero di oggetti raccolti nell'area di campionamento (area di ogni box) ed espressa, quindi, come elementi/m². Il rilievo aero-fotogrammetrico è stato eseguito utilizzando un drone multirottore "DJI Inspire 2" equipaggiato con fotocamera DJI Zennuse X5S (sensore 4/3" CMOS da 20.8 MP e risoluzione delle immagini di 5280 × 3956 pixel) di proprietà del Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università di Bari. Le missioni di volo sono state pianificate con delle rotte a griglia perpendicolari alla linea di riva, con la fotocamera orientata perpendicolarmente al suolo (-90°) ed una quota di volo di 15 m AGL (*Above Ground Level*) dal punto di decollo. La frequenza di scatto e la velocità di volo sono state settate di modo da ottenere una sovrapposizione frontale e laterale delle immagini rispettivamente dell'80% e del 65%. La georeferenziazione delle immagini acquisite dal SAPR è stata ottenuta grazie alla messa in posto di GCP (*Ground Control Point*) le cui coordinate sono state misurate tramite un ricevitore GNSS (*Global Navigation Satellite System*) in modalità RTK (*Real Time Kynematic*). La post-elaborazione delle immagini, condotta sfruttando un *software* basato sul principio di *Structure from Motion* (SfM; Ulmann S., 1976), ha seguito una procedura rigorosa (Fig. 4) per l'ottenimento, come prodotto finale, di un ortomosaico georeferenziato in scala RGB dell'area di studio. Successivamente, attraverso l'utilizzo del *software* QGIS (v 3.28), l'area di studio è stata analizzata mappando tutti gli elementi di BL riconoscibili. A tal fine, è stato creato un database dedicato integrato in uno *shapefile* di punti in cui ogni elemento è stato identificato con un punto inserito manualmente dall'operatore al centro dell'elemento stesso. Inoltre, nel *database* è stata inserita una breve descrizione

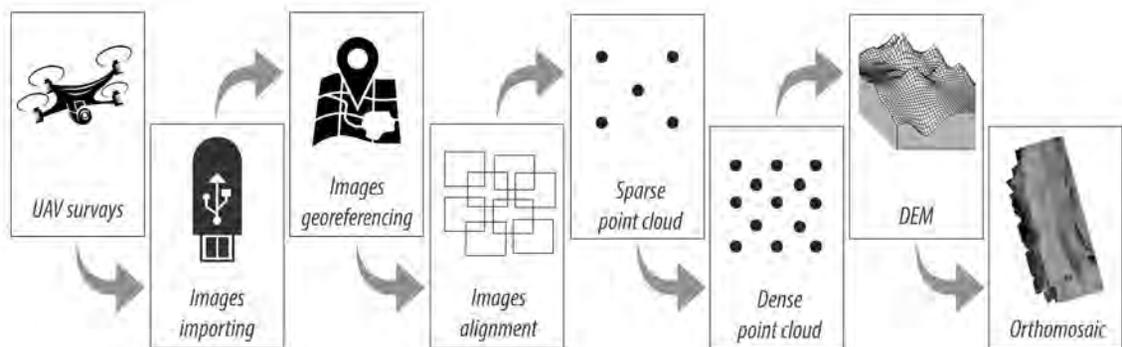


Figura 4. Schema riassuntivo della post-elaborazione fotogrammetrica delle immagini acquisite da SAPR per l'ottenimento di un ortomosaico del settore di spiaggia interessato.

di ogni oggetto e classificato sulla base del *J-code* proposto dalla Commissione Europea (Fleet et al., 2021). In accordo con questa classificazione, sono state identificate le seguenti categorie di *litter*:

- Polimeri artificiali/plastica
- Indumenti/tessuti
- Vetri/ceramica
- Metalli
- Carta/cartone
- Legni processati
- Gomma

Nel momento in cui non è stato possibile assegnare una specifica classe ad un oggetto, è stata attribuita la categoria “altro/non specificato”.

L'ortomosaico ricavato dall'elaborazione fotogrammetrica è stato utilizzato anche per il riconoscimento automatico di rifiuti tramite un approccio di *Machine Learning*. In particolare, è stato utilizzato un algoritmo di *computer vision* basato su una Rete Neuronale Convolutionale, il Mask-RCNN (*Mask Region-Based Convolutional Neural Network*) (He et al., 2017; Scarrica et al., 2022), il quale esegue la segmentazione ad istanza di oggetti su immagini tramite un'architettura della rete organizzata in due fasi (Fig. 5): durante la prima fase avviene la generazione di *ROI* (regioni di interesse) in corrispondenza degli oggetti riconosciuti nell'immagine di input, mentre, una seconda fase prevede la segmentazione degli stessi tramite la generazione di una maschera e di una *bounding box* con successiva classificazione degli elementi assegnando loro un'etichetta

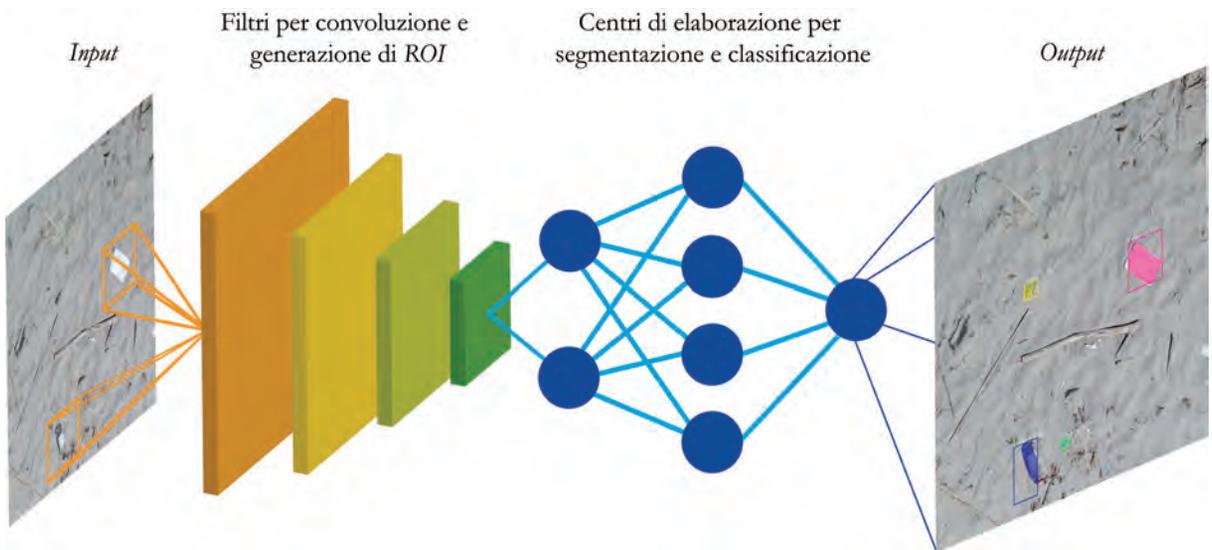


Figura 5. Illustrazione semplificata dell'algoritmo di Machine Learning basato su Mask-RCNN utilizzato per il riconoscimento automatico del BL su ortomosaici.

(*label*, corrispondente alla categoria dell'oggetto).

L'algoritmo richiede una fase di addestramento (*training*) preliminare durante la quale vengono inserite come *input* immagini con gli oggetti da riconoscere e classificare secondo delle categorie (*labels*) indicate dall'operatore. Per questo motivo, l'ortomosaico è stato suddiviso in ritagli più piccoli, di dimensione 1000x1000 *pixel*, per essere meglio gestiti dall'algoritmo, sui quali sono state eseguite le operazioni di digitalizzazione e classificazione manuale degli oggetti. Questi saranno poi successivamente riconosciuti e classificati dall'algoritmo Mask-RCNN in maniera automatica durante la fase di test. In questo modo è stato creato un *dataset* di immagini da utilizzare sia nella fase di addestramento che nella fase di test dell'algoritmo, in rapporto di circa 9:1. Sono state scelte tre classi per la classificazione automatica: 1- “Bottiglia”, 2- “Legno lavorato”, 3- “Altro”. Tali categorie sono state definite considerando la forma delle tipologie di rifiuti spiaggiati più comuni e riprendendo le linee guida europee. Per meglio valutare l'accuratezza

ratezza del Mask-RCNN è stato condotto un test di confronto analizzando lo stesso *dataset* di immagini con differenti algoritmi disponibili all'interno del *plugin* del *software* QGIS, *Orfeo ToolBox* (<https://www.orfeo-toolbox.org>), una libreria che racchiude tecniche di *remote sensing* per l'elaborazione di immagini satellitari. L'algoritmo scelto per la segmentazione è stato *Meanshift* (Cheng Y., 1995) mentre come classificatore è stato utilizzato l'algoritmo *Support Vector Machine* (SVM; Cortes C. & Vapnik V., 1995). L'accuratezza di entrambi gli algoritmi di classificazione, Mask-RCNN e SVM, è stata valutata e quantificata tramite il *Mean Average Precision using Intersection over Union* (mAP@IoU), approccio già utilizzato in precedenti applicazioni (Scarrica et al., 2022). Questo parametro è definito come la media delle aree sottese ad ogni curva di *precision accuracy* e *user accuracy (recall)*, ed esprime il grado di sovrapposizione fra l'insieme degli elementi di *ground truth* e quello degli elementi predetti dall'algoritmo (Everingham et al., 2010). I valori sono compresi fra 0 (nessuna sovrapposizione) and 1 (sovrapposizione totale). Con il termine *ground truth* si identificano quelle maschere corrispondenti effettivamente agli oggetti da classificare e che vengono utilizzate come punto di riferimento dall'algoritmo per la discriminazione delle varie classi. Per quanto riguarda il monitoraggio dei rifiuti sulla superficie del mare, è stata sviluppata un'applicazione installabile su dispositivi cellulari che consente di fotografare oggetti di ML e fornisce agli amministratori dell'app informazioni di dettaglio sulla tipologia di rifiuto e la sua posizione. Lo sviluppo dell'app "nauticAttiva" rientra tra le attività di un accordo istituito fra l'Università di Bari Aldo Moro (Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali e Dipartimento di Bioscienze, Biotecnologie e Ambiente) e la Lega Navale Italiana. Il progetto è basato su un approccio di *citizen science*, in quanto l'app è scaricabile gratuitamente da chiunque sia interessato a fornire un contributo alla ricerca scientifica ed è installabile su qualsiasi dispositivo cellulare che sia dotato di connessione alla rete e provvisto di ricevitore GNSS. L'app è stata implementata sulla piattaforma "*iNaturalist*" messa a disposizione da *National Geographic* (<https://www.inaturalist.org/>). La modalità di utilizzo dell'app risulta essere molto semplice (Fig. 6) in quanto, previa registrazione tramite *account*, è possibile scattare fotografie georeferenziate dell'oggetto una volta attivato il ricevitore GNSS integrato all'interno del dispositivo mobile. È possibile, inoltre, inserire anche una breve descrizione dell'oggetto fotografato indicando, ad esempio, le dimensioni e il colore dello stesso. Una volta scattate, le fotografie vengono inviate in tempo reale (nel momento in cui c'è copertura di rete) ad un server ubicato presso UNIBA, che gestisce il *database*. Questo verrà analizzato dai responsabili scientifici del progetto che forniranno un'identificazione e classificazione dei vari elementi di ML riconosciuti rendendo così possibili valutazioni preliminari circa la distribuzione del ML in ambiente marino-costiero.

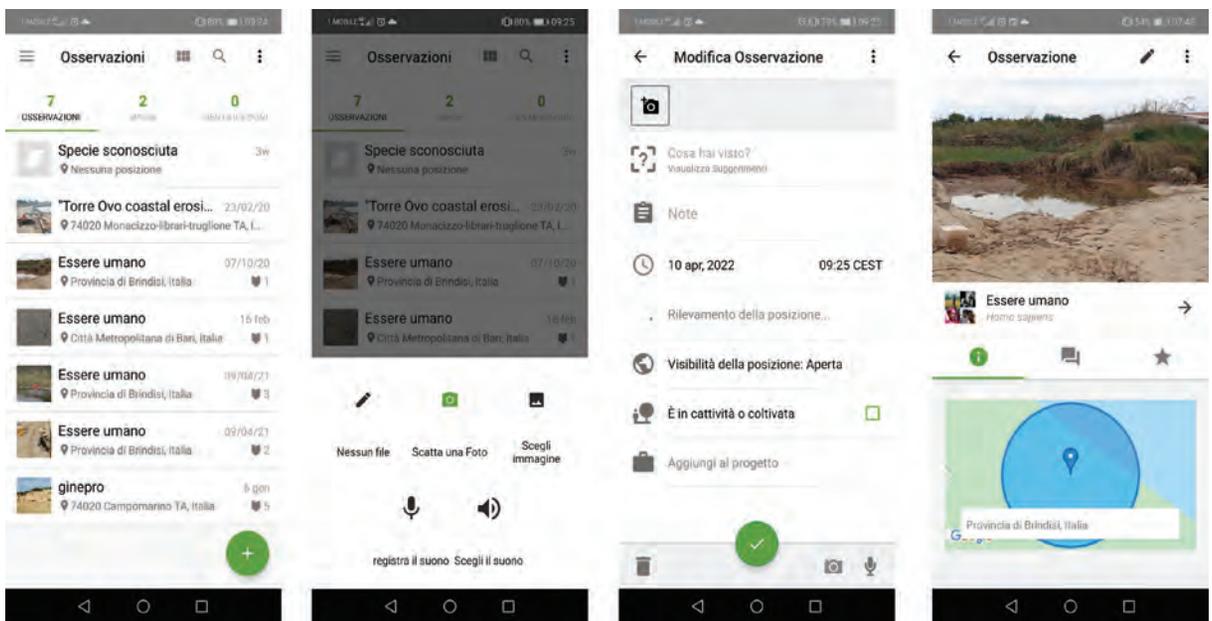


Figura 6. Schermate relative alla modalità di uso dell'app "nauticAttiva" così come si mostrano su un dispositivo cellulare.

Risultati

In questa sezione sono illustrati i risultati ottenuti durante la campagna di acquisizione dati condotta nel maggio 2023 nell'area studio di Torre Guaceto per il monitoraggio della BL e i risultati derivanti dall'utilizzo dell'app "nauticAttiva".

Le analisi condotte *in situ*, mirate al conteggio degli elementi di BL più grandi di 2,5 cm e catalogati utilizzando i codici forniti dal manuale per il monitoraggio stilato dalla Commissione Europea (Fleet et al., 2021), hanno permesso di valutare l'abbondanza delle categorie più rappresentate presenti nell'area di indagine. Una prima valutazione statistica dei risultati ottenuti è riportata in Figura 7.

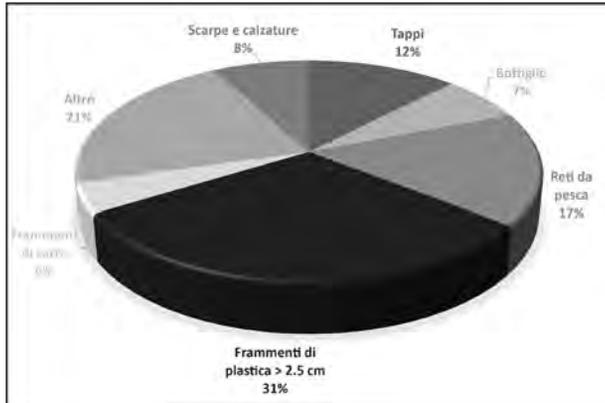


Figura 7. Abbondanze delle categorie di BL ottenute dal conteggio in situ all'interno dei tre box individuati nel settore di spiaggia analizzato.

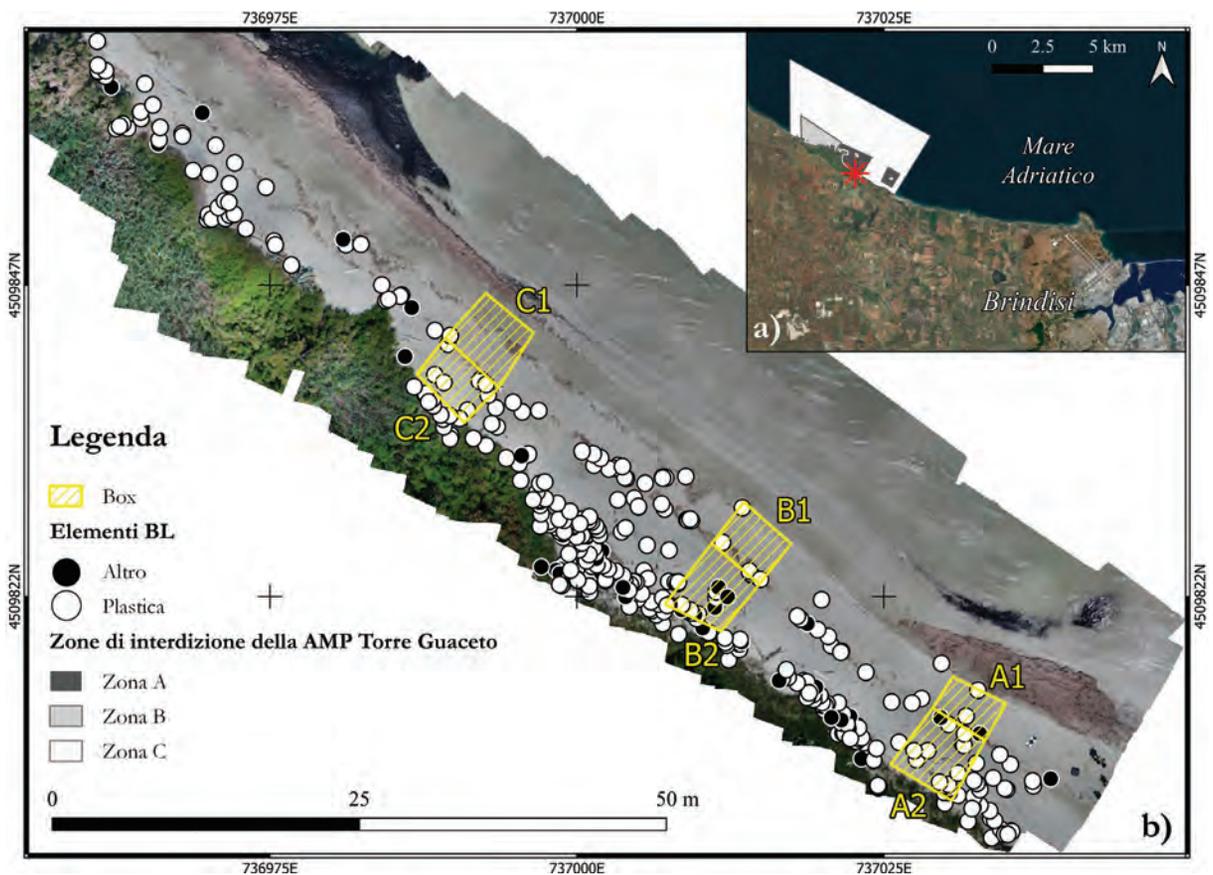


Figura 8. a) Ubicazione dell'area di studio all'interno dell'Are Marina Protetta di Torre Guaceto, indicata dalla stella rossa b) ortomosaico dell'area di studio derivante dal *post-processing* del rilievo aero-fotogrammetrico con gli elementi di BL identificati manualmente. Sono riportati anche i box entro i quali è stato effettuato sia il censimento *in situ* e sia l'analisi tramite *Machine Learning*.

Dai risultati si evince che la tipologia di elementi di BL più abbondanti sono i frammenti di polimeri artificiali (plastica e polistirolo) più grandi di 2,5 cm (J79-J80-J82-J124; 32%) seguiti dalle reti da pesca (J53-J54-J58; 21%) e dai tappi e anelli in plastica di bottiglie per bevande (J21-J23-J24; 14%). La densità calcolata considerando l'area totale coperta nei box entro i quali è stato effettuato il conteggio è di: 1,5 elementi/m² per il box A (A1+A2), 0,9 elementi /m² per il box B (B1+B2) e 0,47 elementi /m² per il box C (C1+C2) (Fig. 8). Tali risultati sono in accordo con i dati raccolti in precedenti lavori condotti lungo la stessa fascia costiera (Rizzo et al., 2021; Scarrica et al., 2022).

L'ortomosaico ottenuto come risultato dell'elaborazione delle immagini fotogrammetriche ha un valore di GSD (*Ground Sampling Distance*) pari a 2,1 mm/pixel; ad ogni pixel del raster è associato un valore RGB che va da 0 a 255 per ogni banda spettrale ed è stato esportato in formato *GeoTiff* per essere gestibile all'interno del *software* QGIS. Una volta importato all'interno del *software*, due operatori hanno condotto manualmente l'operazione di individuazione e marcatura degli oggetti di BL riconosciuti su un'area di 1300 m². La totalità degli elementi individuati e classificati è di 382, dei quali gli oggetti in plastica rappresentano circa l'88% (Fig. 8). Anche in questo caso, i risultati sono in accordo con i lavori precedentemente condotti nell'area, seppur su settori di spiaggia differenti (Rizzo et al., 2021; Scarrica et al., 2022).

Gli algoritmi di riconoscimento automatico sono stati testati utilizzando un *dataset* comune di immagini per la fase di addestramento e testati entrambi su medesime immagini di test per avere un confronto visivo immediato delle performance di riconoscimento e classificazione a parità di condizioni ambientali (stesso sfondo sabbioso e texture del sedimento) e di illuminazione. La Tabella 2 riporta i valori di accuratezza delle performance degli algoritmi utilizzati per il riconoscimento automatico, espressa col parametro mAP. La prestazione dell'algoritmo basato su Mask-RCNN (0.178) risulta essere due ordini di grandezza superiore rispetto a quella calcolata per SVM (0.005) per quanto riguarda la classificazione degli oggetti riconosciuti sull'immagine.

Tabella 2. Risultati in termini di accuratezza relativi alle prestazioni dei due algoritmi di *Machine Learning* a confronto.

Algoritmi utilizzati	N° Classi	mAP@IoU=0.1
Mask-RCNN	3	0.178
SVM	3	0.005

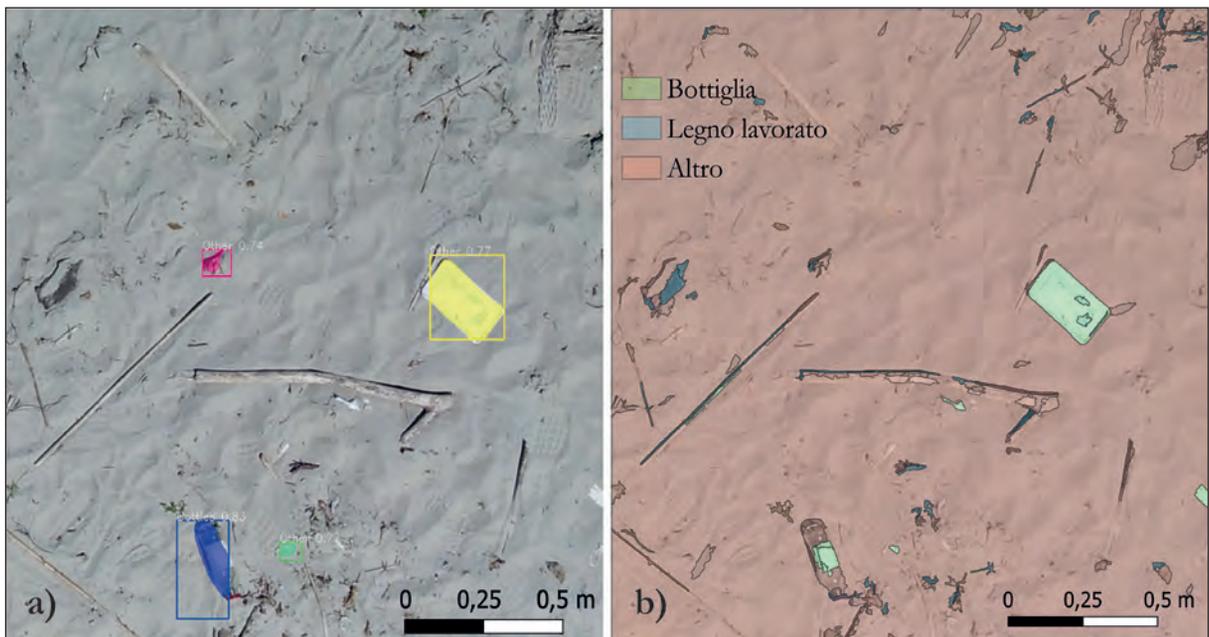


Figura 9. Esempio di segmentazione e classificazione su un ritaglio dell'ortomosaico di lato 1000x1000 pixel eseguito utilizzando a) algoritmo basato su Mask-RCNN e b) SVM.

Questo risultato ha avuto un riscontro visivo anche nelle immagini di output esportate, due delle quali sono riportate a confronto nella Figura 9. La Figura 9a mostra come l'algoritmo basato su Mask-RCNN genera singole maschere in corrispondenza degli oggetti identificati mentre *Meanshift* (Fig. 9b) tende a generare un numero elevato di poligoni frammentati in fase di segmentazione, andando a considerare anche il *background* (superficie sabbiosa) alla stregua di un oggetto (in questo caso specifico etichettato da SVM con l'etichetta "Other").

Il numero di immagini raccolto finora tramite l'app "nauticAttiva" ha permesso una prima stima della tipologia di ML presenti in ambiente marino ed, in particolare, nell'area oggetto di studio che va dalle coste pugliesi fino alla Sardegna meridionale, passando per lo Stretto di Messina (Fig. 3). In base alla qualità delle fotografie è stato assegnato un determinato peso espresso tramite tre gradi di affidabilità: alto (in cui i polimeri artificiali sono chiaramente osservabili), medio (in cui i polimeri artificiali possono essere confusi con altri detriti) e basso (in cui si osservano materiali di diversa origine poco riconoscibili). Le foto così raccolte sulla piattaforma iNaturalist hanno costituito un database dal quale è stato possibile identificare detriti di polimeri artificiali maggiori di 5 mm e classificarli secondo le categorie di rifiuti presenti all'interno delle guide ufficiali pubblicate dall'Unione Europea (Galgani et al. 2013; Fleet et al., 2021). Inoltre, le coordinate GNSS associate ad ogni foto hanno permesso di visualizzare, una volta importate le posizioni in un software GIS (*Geographic Information System*), la distribuzione del ML in differenti aree del Mediterraneo (Fig. 10). La descrizione dell'app "nauticAttiva" è stata pubblicata in un articolo in cui vengono riportati i risultati preliminari del monitoraggio (Scardino et al., 2022) e qui indicati in Figura 10 per quanto riguarda la costa adriatica pugliese. Dalla valutazione della densità di ML si evince un'abbondanza dei polimeri artificiali

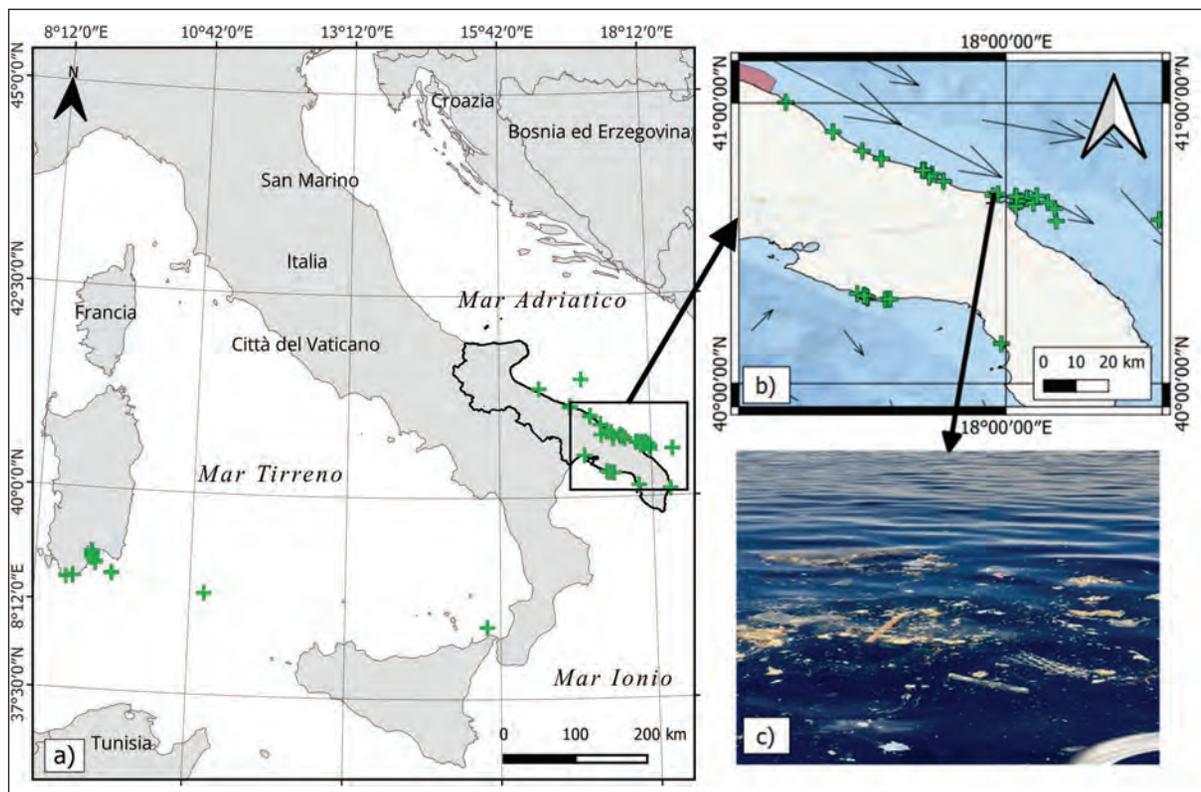


Figura 10. Prime stime di distribuzione di ML ottenute utilizzando all'app "nauticAttiva" all'interno del bacino del Mediterraneo. a) Aree interessate dal monitoraggio tramite l'app. Le croci verdi indicano i punti in cui sono state acquisite le fotografie; b) dettaglio del tratto di costa pugliese; c) esempio di rifiuti galleggianti fotografati tramite l'app "nauticAttiva" (modificata da Scardino et al., 2022).

come bottiglie, polistirolo e frammenti di reti. Lo studio riporta che l'84% della plastica identificata era materiale galleggiante e i polimeri artificiali più abbondanti identificati col progetto "nauticAttiva" sono associati ad attività ricreative collocate direttamente lungo la fascia costiera (tappi di bottiglie e bottiglie per

bevande). I secondi polimeri più abbondanti sono risultati essere reti, frammenti di reti e boe, elementi legati, quindi, ad attività che si svolgono direttamente in ambiente marino. Scardino et al., (2022) evidenziano, inoltre, come l'interazione fra questi oggetti e le correnti marine risulta essere articolata. Difatti, l'accumulo e la dimensione di tali rifiuti sono fortemente influenzati dalle correnti lungo costa (*longshore drift* e *crossshore current*), come riportano le osservazioni in Sardegna meridionale. Inoltre, considerando la natura semi-chiusa del bacino del Mediterraneo rispetto alla più estesa circolazione oceanica, la distribuzione del *ML* risente maggiormente delle correnti che agiscono su più livelli all'interno della colonna d'acqua (superficie, medie profondità e correnti di profondità) in quanto sono assenti *gyre* dal diametro dell'ordine dei chilometri che permettono la formazione di aree stabili. A complicare maggiormente il pattern di distribuzione vi sono le *contour current* e le correnti a gravità che favoriscono la deposizione del *ML* all'interno del sedimento che caratterizza il fondale marino.

Discussione e conclusioni

I risultati preliminari riportati in questo studio costituiscono un punto di riferimento sia per ulteriori sviluppi nello studio e nel monitoraggio costiero che per future pianificazioni di interventi per la gestione delle aree costiere regionali. In particolare, dai risultati mostrati si evince la necessità di un miglioramento della performance di riconoscimento automatico dell'algoritmo Mask-RCNN. Per quest'ultimo raggiungere valori più elevati di accuratezza potrebbe essere più facile dato che esso necessiterebbe sostanzialmente di un maggior numero di poligoni etichettati su immagini SAPR nella fase di addestramento. A tal proposito è in corso la messa a punto di un protocollo di volo da adottare nel caso in cui il rilievo aerofotogrammetrico sia finalizzato alla elaborazione delle immagini da parte di un algoritmo di *Machine Learning* per il riconoscimento automatico. In base a tale protocollo, un valore GSD almeno di 4 mm/px e mai superiore ad 1 cm/pixel risulterebbe adatto per una prestazione ottimale durante le fasi di addestramento e test di Mask-RCNN, oltre che a fornire informazioni circa le caratteristiche tecniche riguardo il settaggio del SAPR e l'ambiente tidale in cui ricade l'area da sorvolare. Per esempio, fra le caratteristiche tecniche indicate vi è un'altezza di volo del SAPR di massimo 20 m proprio per permettere il riconoscimento e l'etichettatura delle diverse categorie di oggetti BL presenti nelle ortofoto. Inoltre, la possibilità di ottenere dei risultati già georeferenziati permetterebbe di eseguire una prima valutazione della distribuzione degli elementi di BL lungo il profilo di spiaggia ed eventualmente mettere in evidenza punti di accumulo, senza necessariamente la messa in atto di campagne periodiche di valutazione sul campo. Ciò risulta molto utile per i vari interventi di manutenzione e monitoraggio, nonché nella pianificazione spaziale e temporale di interventi di gestione dell'area costiera. Al contrario, il metodo *Meanshift/SVM* si rivela essere troppo limitato dall'analisi statistica spettrale dei pixel. Infatti, questa tipologia di algoritmi associa pixel aventi valori delle bande spettrali (RGB) simili ed eventualmente le loro prestazioni potrebbero cambiare utilizzando immagini con più di tre bande spettrali, anche per controbilanciare la mancanza di informazioni data dalla forma dei poligoni di addestramento. Un altro limite di *Meanshift* emerso dall'analisi condotta è legato alle zone d'ombra delle immagini, in particolare alle ombre proiettate dagli oggetti e prodotte dall'inclinazione della luce solare. Questo ha pesanti conseguenze nel processo di segmentazione, soprattutto per quanto riguarda la sovrastima degli oggetti identificati, perché il poligono risultante viene delineato considerando anche l'ombra dell'oggetto o, in certi casi, l'ombra viene vista dall'algoritmo come un elemento a sé stante. Inoltre, una ulteriore prossima implementazione delle funzionalità del Mask-RCNN, sarà volta ad ottenere anche la posizione georeferenziata degli oggetti riconosciuti e classificati in ogni immagine di input. Tale implementazione permetterà l'esportazione di file .txt per ogni immagine analizzata contenenti informazioni circa la classe di appartenenza dell'oggetto identificato e le sue coordinate XY secondo il sistema di riferimento dell'immagine di input. La conoscenza della posizione degli elementi BL all'interno dell'area studio porterà ad una prima stima della loro distribuzione lungo il profilo di spiaggia ed alla individuazione di eventuali punti di accumulo. Queste fasi preliminari risultano essere cruciali per l'efficienza degli interventi di gestione messi in atto al fine di rimuovere i rifiuti dalla zona interessata e all'individuazione di aree che possono essere considerate come "sorgenti" di *litter*. Infine, l'approccio multidisciplinare presentato in questo lavoro propone di rendere più efficienti le procedure di analisi del BL in ambiente costiero.

L'app "nauticAttiva" si è rivelata essere uno strumento alla portata di tutti per il monitoraggio dell'ambiente marino includendo anche le componenti biologiche che ne fanno parte. Infatti, l'app può essere sfruttata per

il monitoraggio di organismi marini, quali cetacei e tartarughe marine che molto spesso subiscono in maniera diretta gli effetti negativi della presenza di elementi inquinanti. Il database generato dall'utilizzo dell'app "nauticAttiva" risulta essere adatto per l'identificazione e la classificazione del ML e BL avente dimensioni (lato lungo) maggiori di 5 mm (meso, macro e mega *litter*; Tab. 1). Per un riconoscimento ottimale degli oggetti fotografati si suggerisce di acquisire le immagini ad una distanza massima di 5 m. I limiti di questo primo approccio di *citizen science* emersi dallo studio (Scardino et al., 2022) sono l'affidabilità del dataset la quale risulta strettamente connessa alla qualità delle fotografie scattate, le tempistiche legate all'operazione di selezione delle stesse e valutazione della densità del ML e, infine, l'errore legato alla posizione fornita dal ricevitore GNSS integrato del dispositivo.

Le informazioni apportate da questo studio possono essere utilizzate per identificare strategie di gestione pianificate su misura per le aree analizzate al fine di eliminare, o almeno ridurre, i rifiuti dalla loro fonte. Per quanto riguarda la fascia costiera, le azioni di gestione devono concentrarsi sul controllo della produzione di rifiuti in corrispondenza della stessa e sulla riduzione della generazione di rifiuti derivanti da attività antropiche concentrate nelle vicinanze della zona costiera. Inoltre, le operazioni di pulizia locale dovrebbero essere effettuate dopo eventi meteo-marini intensi che amplificano l'apporto di rifiuti, come nel caso di mareggiate, piogge estreme e inondazioni fluviali. Invece, focalizzandosi sull'ambiente marino, l'app "nauticAttiva" costituisce uno strumento altamente versatile ed efficiente per migliorare la conoscenza della distribuzione del ML.

Ringraziamenti

Le attività di ricerca sono finanziate da Regione Puglia, nell'ambito del programma RiPARTI (assegni di Ricerca per riPARTire con le Imprese) POC PUGLIA FESRT-FSE 2014/2020 - "*Marine & Beach litter monitoring in Apulia*"), responsabile scientifico: dott.ssa Angela Rizzo. Le attività ad esso associate sono state condotte nell'ambito dell'Accordo di Ricerca tra il Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ed il Dipartimento di Scienze e Tecnologie dell'Università di Napoli Parthenope. Le attività di campo sono finanziate anche dalla Convenzione di Ricerca stipulata tra il Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro e l'Area Marina Protetta di Torre Guaceto, responsabile scientifico: prof. G. Scicchitano. Inoltre, le attività di ricerca rientrano tra le attività del progetto "RETURN" finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4, Componente 2, Investimento 1.3-D.D. 1243 2/8/2022-Unione Europea NextGenerationEU (n. PE000000005, CUP: B53C22004020002). Gli autori ringraziano, inoltre, l'Environmental Surveys s.r.l, partner industriale del progetto RiPARTI, per la strumentazione e il supporto tecnico; lo staff del Consorzio di Gestione di Torre Guaceto e del centro Velico Torre Guaceto per il supporto logistico fornito durante le attività di campo; i prof. Luca Dimuccio, Rui Ferreira e Giorgio Anfuso per l'esecuzione dei rilievi aero-fotogrammetrici nei siti del Portogallo e della Spagna. Infine, le attività inerenti al progetto "nauticAttiva" sono condotte nell'ambito dell'Accordo tra l'Università di Bari Aldo Moro e la Lega Navale Italiana.

Bibliografia

- Addamo A. M., Laroche P., Hanke G., 2017. *Top Marine Beach Litter Items in Europe. A review and synthesis based on beach litter data*. Joint Research Centre, Technical Report. MSFD Technical Group on Marine Litter. doi:10.2760/496717.
- Andriolo U., Gonçalves G., 2022. *Is coastal erosion a source of marine litter pollution? Evidence of coastal dunes being a reservoir of plastics*. Marine Pollution Bulletin, 174: 113307.
- Andriolo U., Gonçalves G., Bessa F., Sobral P., 2020. *Mapping marine litter on coastal dunes with unmanned aerial systems: A showcase on the Atlantic Coast*. Science of the Total Environment, 736: 139632.
- Asensio-Montesinos F., Anfuso G., Oliva Ramirez M., Smolka R., Garcia Sanabria J., Fernandez Enrriquez A., Arenas P., Macias Bedoya A., 1999. *Beach litter composition and distribution on the Atlantic coast of Cadiz (SW Spain)*. Regional Studies in Marine Science, 34: 101050.
- Bak S.H., Hwang D.H., Kim H.M., Yoon H.L., 2019. *Detection and monitoring of beach litter using uav image and deep neural network*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42: 55-58.

- Bao Z., Sha J., Li X., Hanchiso T., Shifaw E., 2018. *Monitoring of beach litter by automatic interpretation of unmanned aerial vehicle images using the segmentation threshold method*. Marine Pollution Bulletin, 137: 388-398.
- Campanale C., Stock F., Massarelli C., Kochleus C., Bagnuolo G., Reifferscheid G., Uricchio V.F., 2020. *Microplastics and their possible sources: the example of ofanto river in Southeast Italy*. Environmental Pollution, 258: 113284.
- Cesarano C., Aulicino G., Cerrano C., Ponti M., Puce S., 2021. *Scientific knowledge on marine beach litter: a bibliometric analysis*. Marine Pollution Bulletin 173, 113102.
- Cheng Y., 1995. *Mean shift, mode seeking, and clustering*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 17(8): pp.790–799.
- Cortes C., Vapnik V., 1995. *Support-vector networks*. Machine learning, 20: 273–297
- European Union, 2013. *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas*. EU. Ispra.
- Everingham M., Van Gool L., Williams C. K., Winn J., Zisserman A., 2010. *The pascal visual object classes (voc) challenge*. International journal of computer vision, 88: 303–338
- Fleet D., Vlachogianni T., & Hanke G., 2021. *A joint list of litter categories for marine macrolitter monitoring*. EUR, 30348: 52. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-21445-8, doi:10.2760/127473.
- Galgani F., Hanke G., Werner S., Oosterbaan L., Nilsson P., Fleet D., Kinsey S., Van Franeker J., Vlachogianni T., Scoullou M., Mira Veiga J., Palatinus A., Matiddi M., Maes T., Korpinen S., Budziak A., Leslie H., Gago J., Liebezeit G., 2013. *Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas*. European Commission, Joint Research Centre. In: MSFD Technical Subgroup on Marine Litter (TSG-ML). EUR 26113.
- GESAMP, 2019. *Guidelines on the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean*. In: Kershaw, P.J., Turra, A., Galgani, F. (Eds.), (IMO/ FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/ UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP, 99: 10.
- Gonçalves G., Andriolo U., Gonçalves L., Sobral P., Bessa F., 2020. *Quantifying marine macro litter abundance on a sandy beach using unmanned aerial systems and objectoriented machine learning methods*. Remote Sensing, 12 (16): 2599.
- Gonçalves G., Andriolo U., Gonçalves L.M.S., Sobral P., Bessa F., 2022. *Beach litter survey by drones: Mini-review and discussion of a potential standardization*. Environmental Pollution, 315: 120370.
- Guerranti C., Perra G., Martellini T., Giari L., Cincinelli A., 2020. *Knowledge about microplastic in Mediterranean Tributary River ecosystems: lack of data and research needs on such a crucial marine pollution source*. Journal of Marine Science and Engineering, 8: 216.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., 2009. *The Elements of Statistical Learning – Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd Ed. Springer, 423-438, 463-470, 587-601.
- He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R., 2017. *Mask R-CNN*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 42 (2): 386–397.
- Khan F.R., Shashoua Y., Crawford A., Drury A., Sheppard K., Stewart K., Sculthorp T., 2020. *The plastic Nile[®]: first evidence of microplastic contamination in fish from the Nile River (Cairo, Egypt)*. Toxics, 8 (2): 22.
- Mastronuzzi G., 2023. *iNaturalist-NauticaAttiva. La citizen science al servizio dello studio della distribuzione delle plastiche nell'ambiente marino e costiero*. Lega Navale-Periodico della Lega Navale Italiana dal 1897, maggio-giugno 2023: 22-23.
- Mastronuzzi G., Caputo R., Di Bucci D., Fracassi U., Iurilli V., Milella M., Sanso P. S. G., 2011. *Middle-late pleistocene evolution of the adriatic coastline of Southern Apulia (Italy) in: response to relative sea-level changes*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 1: 207–221.
- Mastronuzzi G., Milella M., Piscitell P., Simone O., Quarta G., Scarano T., Calcagnile L., Spada I., 2018. *Landscape analysis in torre guaceto area (Brindisi) aimed at the reconstruction of the late Holocene Sea level curve*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 41: 65–79.
- Mastronuzzi G., Valletta S., Damiani A., Fiore A., Francescangeli R., Giandonato P. B., Iurilli V., Sabato L., 2013. *Geositi della Puglia*. ISBN 9788890671685.
- Natura 2000 Networking Programme. www.natura.org.

- OSPAR, 2010. *Guideline for Monitoring Marine Litter on the Beaches in the OSPAR Maritime Area*. Edition 1.0: 1–16.
- Piazzolla D., Cafaro V., de Lucia G., Mancini E., Scanu S., Bonamano S., Piermattei V., Vianello A., Ventura G., Marcelli M., 2020. *Microplastic pollution in coastal sediments of the northern Tyrrhenian Sea, Italy: microplastics and fly-ash occurrence and distribution*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 241: 106819.
- Rangel-Buitrago N., Velez Mendoza A., Gracia C. A., Mantilla-Barbosa E., Arana V. A., Trilleras J., Arroyo-Olarte H., 2019. *Litter impacts on cleanliness and environmental status of Atlantico department beaches, Colombian Caribbean coast*. *Ocean and Coastal Management*, 104835.
- Rizzo A., Rangel-Buitrago N., Impedovo A., Mastronuzzi G., Scardino G., Scicchitano G., 2021. *A rapid assessment of litter magnitudes and impacts along the Torre Guaceto marine protected area (Brindisi, Italy)*. *Marine Pollution Bulletin*, 173: 112987.
- Scardino G., Martella R., Mastronuzzi G., Rizzo A., Borracesi Q., Musolino F., Romanelli N., Zarccone S., Cipriano G., Retucci A., 2022. *The nauticAttiva project: A mobile phone-based tool for the citizen science plastic monitoring in the marine and coastal environment*. *Marine Pollution Bulletin*, 185(2): 114282.
- Scarrica V. M., Aucelli P. P. C., Cagnazzo C., Casolaro A., Fiore P., La Salandra M., Rizzo A., Scardino G., Scicchitano G., Staiano A., 2022. *A novel beach litter analysis system based on UAV images and Convolutional Neural Networks*. *Ecological Informatics*, 72: 101875.
- Ulmann S., 1976. *The interpretation of structure from motion*. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, A- I. MEMO, 476.
- United Nations Environment Programme - UNEP, 2021. *From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>.
- Vlachogianni T., 2017. *Methodology for monitoring marine litter on beaches*. In: *Macro-Debris (>2.5cm)*. *DeFishGear*: 1–16.

Ricevuto il 26/10/2023, accettato il 13/02/2024

La laguna di Orbetello nel XIX secolo Malaria, pesca e ingegneria idraulica

Marco Piccardi¹ e Enzo Pranzini¹

¹Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze

Riassunto

Questo articolo fornisce una sintesi critica di studi e documenti volta ad inquadrare il fenomeno della formazione e del popolamento dei tomboli che chiudono la Laguna di Orbetello, per analizzare poi i progetti messi in atto nel XIX secolo per la salvaguardia della laguna stessa. Una scelta che intende riportare all'attenzione degli studiosi e degli amministratori di questo territorio l'abbondanza e, in certi casi l'inadeguatezza, degli studi propedeutici che hanno determinato il fallimento di molte di quelle opere su cui furono investiti, dopo l'Unità d'Italia, grandi capitali.

Nel corso dell'Ottocento, due orientamenti si fanno preponderanti. Se gli interventi della prima metà del secolo furono intesi a garantire l'approvvigionamento idrico del centro lagunare e le comunicazioni terrestri con l'Argentario (Porto Santo Stefano in particolare) e verso l'interno (con l'asse viario litoraneo), quelli successivi ebbero l'obiettivo di assicurare i livelli lagunari ed aprire le acque ad una più moderna ed efficace navigabilità. Entrambi gli obiettivi dovettero da subito fare i conti con due questioni fondamentali per la comunità locale: la salubrità dell'acqua e dell'aria, e le attività di pesca, che da secoli caratterizzavano la laguna.

Parole chiave: evoluzione costiera, tomboli, lagune, cartografia storica, malaria.

Abstract

This article provides a critical synthesis of studies and documents aimed at framing the phenomenon of the formation and population of the tombolos that enclose the Orbetello Lagoon, followed by an analysis of the projects implemented in the 19th century to safeguard the lagoon itself. This choice is intended to draw the attention of scholars and administrators of this territory to the abundance, and in some cases, the inadequacy, of the preparatory studies that led to the failure of many of those works on which large amounts of capital were invested after the Unification of Italy.

During the nineteenth century, two orientations became predominant. While the interventions of the first half of the century aimed to secure the water supply of the lagoon town and land communications with Argentario (particularly Porto Santo Stefano) and inland (via the coastal road axis), those that followed aimed to stabilize the lagoon levels and enhance navigability. Both objectives immediately confronted two fundamental issues for the local community: the quality of water and air, and the fishing activities, which had been central to the lagoon's character for centuries.

Key words: coastal evolutions, tombolos, lagoons, historical cartography, malaria.

Abbreviazioni: ASF Archivio di Stato di Firenze, ASG Archivio di Stato di Grosseto, BNCF Biblioteca Nazionale Centrale Firenze, BNFG Biblioteca Nazionale di Francia Gallica.

Il Tombolo della Giannella e il Tombolo della Feniglia, collegandosi al Monte Argentario, delimitano, rispettivamente a nord-ovest e a sud-est, la Laguna di Orbetello, che è poi separata in due specchi d'acqua, le lagune di Ponente e di Levante, da un terzo tombolo mediano sul quale sorge la città di Orbetello. [...]

Il termine tombolo, dal latino tumulus, viene utilizzato per indicare un accumulo di sabbia in prossimità della riva, e lungo la costa toscana si ritrova, come toponimo, associato sia ad ampie zone occupate da depositi dunari, sia a lingue di sabbia che collegano un'isola alla terraferma. Il termine è stato adottato dalla letteratura scientifica internazionale grazie a Gulliver (1899), che lo utilizzò proprio per indicare una barra sabbiosa che collega un'isola a terra, limitandone quindi l'accezione, come osservò poi Johnson (1919), che mise in evidenza come il termine italiano avesse una utilizzazione assai più ampia. Fu comunque Gulliver a fare esplicito riferimento al 'double tombolo' che, collegando il Monte Argentario con la costa, racchiude la Laguna di Orbetello (da Ferri e Pranzini, 2006).

La formazione dei tomboli e la chiusura della laguna

Che dire della foce dell'Albegna [...] L'inutile fiume, solo capace a rapire greggi e a inondare sementi (Del Rosso, 1905, p. 46).

Negli ultimi due secoli, l'evoluzione morfologica della Laguna di Orbetello (Fig. 1) e lo sviluppo dei suoi tre tomboli sono stati oggetto di numerose ipotesi che impongono una sintesi (che comunque ad oggi appare non conclusiva) e che sarà risolta in questo paragrafo, facendo riferimento ai contributi più significativi.

Tutti gli studi più recenti portano comunque ad escludere la formazione sincrona dei tre tomboli proposta da Giovan Battista Brocchi nel 1820, e si concentrano sulla cronologia del loro sviluppo, sul momento della chiusura della laguna e sull'origine dei sedimenti che li formano, dando comunque per scontato che il tombolo interno si sia formato prima di quelli esterni.

Una delle prime sistemazioni cronologiche può essere riscontrata in Cocchi (1870) che vede (insieme a Lotti, 1891, Merciai 1910 e 1929, Schmiedt 1964) la formazione della Feniglia in età etrusca e quella di Giannella in epoca più recente (cfr. Uggeri 1982). Differentemente, Gulliver (1899) propone prima la formazione del tombolo della Giannella (che partendo dal continente avrebbe raggiunto quella che era l'Isola Argentario) e successivamente quello della Feniglia (con sviluppo dall'isola verso il continente). In questo caso, sarebbe stata la formazione della Feniglia ad aver interrotto lo sviluppo del tombolo centrale. Nei primi decenni del



Figura 1. Area di riferimento e toponomastica essenziale.



secolo scorso, anche Marinelli (1921) si concentra sul tombolo di Orbetello (il primo anche nella sua opinione) che si salda temporaneamente all'Argentario formando una penisola attaccata alla terra ferma da un solo e sottilissimo picciolo. L'Argentario sarebbe poi tornato isola per il collasso del tombolo centrale ad opera probabilmente dei marosi finché lo sviluppo dei due tomboli esterni non diede all'isola stessa una nuova e doppia saldatura al continente.

Alberto Mori (1931) suggerisce una formazione che si interrompe per il sollevamento post pliocenico, quando la diminuzione dei fondali, avrebbe creato un appiglio più meridionale ai sedimenti e provocato l'emersione del Tombolo di Feniglia, parallelo a quello centrale. In questo panorama, la formazione di Giannella sarebbe successiva al riempimento del golfo pliocenico identificabile nell'attuale pianura alluvionale dell'Albegna, e riconducibile alla formazione di un delta da parte di questo fiume capace di deviare la corrente litoranea di nord ovest. Sarà però il padre di Alberto, Assunto Mori (1931) a scrivere che il tombolo centrale non subì un collasso e neppure venne mozzato dall'erosione (come sostiene anche Braun, 1914) bensì arrestato nel suo sviluppo, come dimostrerebbe l'assenza di una beach rock (detta in Italia 'panchina') presso Terra-rossa. Brambati et al. (1979) spiegano la sommersione con la risalita eustatica ed ipotizzano una sostanziale stabilità del Tombolo di Feniglia negli ultimi due-mila anni, mentre quello della Giannella

Figure 2 a,b. Orbetello e Argentario nel XVI e XVII secolo. La mancata saldatura della Giannella all'Argentario lascia spazio ad un troppo ampio canale di Nassa. a) Abraham Ortelius, *Senensis ditionis, accurata descriptio* (da un originale di Claudio Duchetti/Claude Duchet, secondo Rombai e Azzari (1993) probabilmente stampata a Roma, nel 1557, Collezione privata Enzo Pranzini; b) Anonimo, fine del XVII (BNCF, Carte geografiche, Nuove Accessioni, cart. 4, p. 10, dettaglio; su concessione del Ministero della Cultura/ Biblioteca Nazionale Centrale Firenze, riproduzione vietata).

(di formazione più recente) avrebbe subito *notevoli modificazioni perché alimentato direttamente dall'Albegna che mutò posizione in relazione all'eustatismo*.

Anche Bellotti (2017), rimarcando la primogenitura del tombolo centrale di Orbetello, afferma che la saldatura definitiva all'Argentario della Giannella sarebbe successiva a quella della Feniglia. La formazione di entrambi i tomboli dovrebbe essersi conclusa tra la fine del II e l'inizio del I millennio a. C.

Queste ricostruzioni possono affidarsi anche ai rinvenimenti archeologici. Feniglia *dovette configurarsi alcuni millenni fa come è dimostrato dalla strada romana che su di esso si sviluppa* (Lazzarotto et al., 1964, in Brambati et al. 1979) e dalle opere idrauliche di età romana a Poggio Pertuso. Barocca (2012), sulla base di quanto affermato da Del Rosso (1898), Ademollo (1881) e Raveggi (1933), ipotizza *che già dall'epoca romana esistessero i canali di Pertuso e di Ansedonia* e la peschiera di Nassa. È però Uggeri (1982) a sottolineare che ogni ipotesi sulla formazione del Tombolo della Giannella in epoca storica recente sia da ritenersi infondata anche sulla base di indagini sul terreno condotte dall'autore, che avevano individuato una *serie di insediamenti capannicoli di orizzonte appenninico lungo i tomboli, che pertanto dovevano essere non solo formati, ma anche già consolidati nel secondo millennio a. C.* (una datazione posta in discussione da Negroni et al., 2017; ma per questo si veda il paragrafo successivo).

La teoria sulla formazione del tombolo della Giannella in epoca recente è frutto anche di una lettura impropria (un problema che trova altri esempi anche ai giorni nostri, cfr. Piccardi et al., 2020) di cartografie

del passato, che avrebbero evidenziato la mancata saldatura dello stesso tombolo all'Argentario (Figg. 2 a,b). In proposito, si può guardare anche a Marincich e Provenza (2022), che probabilmente si rifanno a Brambati et al. (1979), dove si può leggere: *rappresentazioni cartografiche del 1572 e del XVII secolo raffigurano [il Tombolo della Giannella] chiaramente disgiunto dall'Argentario. La saldatura al promontorio vien fatta risalire alla seconda metà del XVIII secolo*.

Le più recenti applicazioni della cartografia storica alla ricostruzione del territorio in periodo moderno palesano il fatto che, senza un confronto sincronico e diacronico, una rappresentazione pregeodetica (ma lo stesso può valere per le prime carte geodetiche a piccola scala) non può essere considerata affidabile o comunque fornire precise misurazioni. Purtroppo, la cartografia di terra (Rombai et al., 1979, e in Figg. 2, 4c e 6) come quella nautica Sei e Settecentesca dedicata alla nostra area, diversamente da quanto accade in buona parte della Toscana, mostra

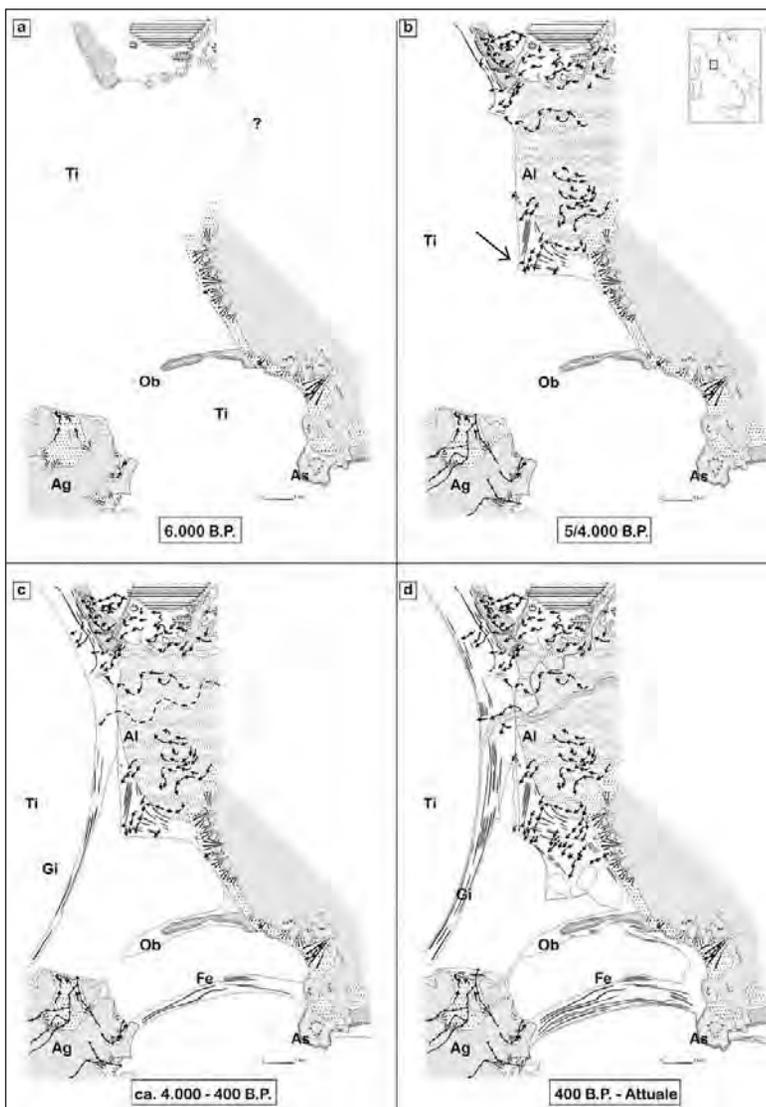


Figura 3. Evoluzione morfologica della laguna di Orbetello. La freccia indica l'apparato deltizio di Patanella. (Coltorti, Ravani, 2017, dettaglio).

scarso interesse per la superficie lagunare e diffuse approssimazioni su posizione e caratteri dei diversi elementi territoriali. Si fanno anche rare quelle carte a grande e grandissima scala, anch'esse assai diffuse nel resto della Toscana (Piccardi e Pranzini, 2014), capaci di inquadrare piccole porzioni di territorio con grande dettaglio e garantire precise misurazioni.

Tornando ad un passato più lontano, per una sintesi degli studi merita volgersi allo schema evolutivo proposto da Coltorti e Ravani (2017) e riprodotto in Figura 3. Nel corso del Pleistocene superiore (quando il mare doveva essere a -130 m ca. rispetto ai giorni nostri), vi insisteva un'ampia pianura costiera attraversata da corsi d'acqua tra i quali spiccava l'Albegna. Alla vigilia dell'Olocene e durante l'ultimo acme glaciale si sarebbe sviluppata una serie di apparati dunari *verosimilmente, a nord della foce attuale e a Orbetello*. Con la risalita del livello marino durante la trasgressione Versiliana, l'Argentario si fa isola e la sedimentazione fluviale genera nuovi apparati deltizi. Tra questi, Porto Bufalaro (e Patanella) sviluppatasi prima del 3000 a.C., e quindi i Tomboli della Giannella e di Feniglia che creano la laguna. Del resto, la Toscana offre più casi in cui *il flusso litoraneo dei sedimenti fu talmente rapido che alcune insenature vennero sbarrate prima che avvenisse il loro colmamento: si formarono così molte di quelle lagune che orlavano la costa toscana nei secoli passati* (Lepore et al., 2011).

La sommersione della soglia che collegava Monte Argentario alla terraferma, avvenuta nelle fasi finali della trasgressione Versiliana, deve essere stata *subito contrastata dalla sedimentazione che avveniva al riparo dell'isola e che portava alla formazione di più tomboli, oltre a quello su cui si trova Orbetello*.

Mentre sulla formazione del Tombolo della Giannella tutti gli autori sono concordi, con migrazione dei sedimenti provenienti dalla foce dell'Albegna a formare uno spit che si allungava verso l'Argentario, per la genesi del Tombolo di Feniglia il problema si presenta più complesso.

Sull'origine dei sedimenti che lo compongono si erano espressi Bartolini et al. (1977), che ne avevano ipotizzato una provenienza meridionale, anche se la maggiore frequenza di minerali pesanti a sud di Ansedonia li aveva indotti a pensare che questo processo fosse stato attivo *soltanto in passato, quando le condizioni fisiografiche erano differenti*.

Successive analisi composizionali (Regione Toscana, 2006) hanno confermato che i sedimenti della Feniglia sono analoghi a quelli provenienti dalla foce del Fiume Fiora, tanto da essere racchiusi in un'unica provincia petrografica 'feldspatoclastica'; anche se sul tratto Ansedonia - Capalbio, vi è una quantità rilevante di pirosseni che induce a suggerire una sub-provincia 'feldspatoclastica a pirosseni'.

Questa discontinuità con le spiagge meridionali la si rileva anche dal colore delle sabbie, che è assai più chiaro alla Feniglia che non immediatamente a sud di Ansedonia (CIEL*a*b* = 49.35, 1.87, 10.22 vs 43.99, 1.58, 7.81; Regione Toscana e UNIFI, 2015).

Tutto ciò è coerente con l'ipotesi espressa da Lepore et al. (2011), secondo i quali il Tombolo di Feniglia potrebbe essere *il risultato della migrazione verso riva di una barra sabbiosa, processo sostenuto proprio dall'innalzamento del livello marino*, secondo il modello proposto da Shepard nel 1963 per la formazione delle *barrier island* del Golfo del Messico.

È comunque da segnalare che l'immissione di acqua all'interno della laguna non è limitato a quella marina, essendovi anche afflussi di acqua dolce, come osservato da Brambati et al. (1979). Questi autori scrivono che la laguna è *interessata da contributi di acque dolci sia superficiali che freatiche*. I primi dipendono dall'Albegna (con il nuovo canale di Fibbia) e dai ruscamenti dell'Argentario, del Poggio dei Venti e di Ansedonia. Quelli freatici, oltre che dall'Argentario *si possono verosimilmente ipotizzare lungo tutta la costa interna della Laguna di Ponente (Patanella) e più in generale in tutta la laguna come dimostrato dalle polle osservate da Moro*. Altri contributi freatici provengono dai tomboli per la presenza di una falda accertata nell'immediato sottosuolo. Del resto, era stato Nicolosi (1910) ad osservare che *La natura sabbiosa di queste due lingue di terra, basse e sottili, permette l'infiltrazione e quindi il ricambio delle acque*.

Il popolamento

dico ancora, che non sarebbe fuore di ragione, il far porto di tutto lo stagno d'Orbetello
(Lettera di Angelo Claudio Tolomei a Nicola Cesano, ASF,
Segreteria di Gabinetto, 242, ins 2, a. 1544)

La laguna di Orbetello è l'unico superstite degli antichi bacini lagunari toscani che hanno prima subito un fenomeno di interrimento (testimoniato sin dall'età romana) e poi le opere di bonifica degli ultimi tre secoli

(Dolfini et al., 2014). La sua frequentazione è documentata nella ricognizione del 1968 della Laguna di Orbetello, Monte Argentario, Isola del Giglio e Giannutri condotta dalle Università di Firenze e di California (Santa Cruz) e in quella delle Università di Pisa e Siena nell'ambito del progetto *Ager Cosanus* e Valle dell'Albegna (cfr. Cambi, 1986). Ancora più recentemente Goiran et al. (2023) hanno presentato le operazioni avviate per un progetto di ricerca internazionale i cui risultati sono in fase di elaborazione.



Figure 4 a, b, c. Orbetello e Argentario nelle carte dei secoli XVI-XVIII. a) Francesco De Marchi a. 1599; b) Anonimo, XVII sec. BNF, Marine, Portefeuille, 82 BIS, Div. 17, c. 3; c) Anonimo, 1790, BNF, Cartes et Plans, GE D 15899 bt-v1b8493704j.

Uggeri (1982) scrive di numerosi villaggi disseminati lungo la Giannella tra la fine del III e gli inizi del II millennio a.C. mentre, sulla Feniglia, sono stati individuati gruppi di capanne con pavimento d'argilla. Purtroppo, reperti e dati cui Uggeri fa riferimento sono stati pubblicati senza *mappe di dettaglio, né disegni dei materiali rinvenuti lasciando quindi molti dubbi sull'esattezza delle datazioni proposte per alcuni siti e sulla loro precisa collocazione* (Cardosa, 2017). Le date ora proposte sono state recentemente quanto parzialmente corrette in Dolci (2014) e in Negroni et al. (2017) che ritardano al II millennio a.C., nell'età del Bronzo Finale (1200-950 a.C.), una prima strutturazione insediativa intorno alle lagune. Ancora più tardo (dal IV secolo a.C.) sarebbe un sistema di fattorie che si dispone nelle piane alluvionali e costiere (alcune di esse sulla Giannella). Lo stesso Dolci scrive che, con l'inizio dell'età orientalizzante (dalla fine dell'VIII secolo a. C.), la laguna di Orbetello assume l'assetto che manterrà nelle epoche successive. In questo l'autore è confortato da Coltorti e Ravani (2017) che, dopo aver accennato a vari rinvenimenti di epoca etrusca e guardando alla Torre e al Forte delle Saline nei pressi della foce dell'Albegna, concludono che *dal periodo romano fino al XVII secolo la linea di costa rimase sostanzialmente inalterata*. Si tratta di un dato critico: una sua conferma starebbe a significare che la posizione della foce dell'Albegna è rimasta stabile dall'età etrusco-ellenistica ad oggi, diversamente da quanto accaduto per le foci di altri fiumi toscani come nell'esempio di Magra (Piccardi et al, 2018), Serchio (Piccardi, 2016, Piccardi e Pranzini 2016), Arno (Piccardi e Pranzini 2014, Guarducci et al., 2009) e Ombrone (Guarducci et al., 2011). Coltorti e Ravani (2017) tornano agli scritti di Mazzanti (1983) per individuare a Patanella (Figura 3) uno dei primi interventi antropici ad alto impatto intesi ad evitare l'interrimento della laguna: la deviazione verso Nord della foce dell'Albegna. Tracce di questo delta sono ancora ben visibili in laguna, e la sua emersione potrebbe essere ricondotta anche al crollo dei livelli lagunari (cfr. paragrafo 6 e tabella 1).

Uggeri (1982) aveva proposto un *fitto insediamento dell'età del bronzo* che, seguendo il comune destino demografico di altre zone litoranee nel trasferimento su posizioni di altura, si spopola tra XII e X secolo a.C. Un'affermazione recentemente corretta da Cardosa (2000), che osserva come, tra la prima età del Bronzo (prima metà del IV millennio a.C.) e quella del Ferro (intorno all'XI secolo a.C.), i siti protostorici collocati alle estremità del Tombolo di Feniglia possano assumere valore strategico, garantendo un parziale riparo dai venti e la vicinanza a luoghi di approvvigionamento idrico, che invece mancano completamente per tutta l'estensione del tombolo. Lo stesso Cardosa (2017a e 2017b) corregge la collocazione cronologica offerta e derivata da Bronson e Uggeri (1970), Uggeri (1982), Mazzolai (1977) per i siti di Poggio Pertuso, III Faro e Taglio di Ansedonia (già attribuiti al Bronzo Medio, 2000–1550 a.C.), per ricondurli a non prima del XII secolo a.C. Saranno poi Coltorti e Ravani (2017) a ricondurre la datazione dei manufatti di Poggio Pertuso e Duna Feniglia (nei pressi della sede dei carabinieri forestali ai piedi del colle di Ansedonia) alla prima età del Ferro (IX-VIII sec. a. C.) Alla crisi di questi centri non avrebbe *fatto seguito il completo spopolamento del territorio*, quanto e piuttosto *la sostanziale continuità nello sfruttamento delle risorse alieutiche delle lagune* e la distribuzione sul territorio di una rete di abitati sottomessi ai grandi centri (Ciampoltrini, 2009). Per quanto riguarda il popolamento dell'istmo centrale, è sempre Ciampoltrini (2019), sulla base degli scavi ottocenteschi di De Witt) a scrivere *dell'evidenza sepolcrale, di una comunità fiorita sull'istmo, forse a più riprese, almeno dal volgere fra VIII e VII e il pieno III (se non anche II) secolo a.C.* e a ritardare la costruzione delle mura poligonali agli anni della fondazione di Cosa (a. 273 a.C.)

Dunque, in periodo romano si infittiscono gli insediamenti nella parte meridionale della Giannella, mentre tra ultimo secolo a.C. e primo secolo d.C., i siti abitati si moltiplicano, in particolare sulla Feniglia, dove si contano dieci siti di insediamento e nove ville con altrettante peschiere sulla laguna di levante (Uggeri, 1982).

In Boschian et al. (2006) si scrive di resti romani rinvenuti lungo la linea di spiaggia interna del Tombolo di Feniglia *giacenti a quote che vanno da 0,01 m a 1,53 m sul livello delle acque lagunari* ma, sullo stesso tombolo, altri resti romani si trovano *sommersi a circa 40-50 cm dalla linea di spiaggia alla profondità di -0,51 m circa*. In proposito non possiamo dimenticare che le sabbie della Feniglia vennero ampiamente utilizzate dagli *Spagnoli nello erigere nel secolo XVI i terrapieni e le fortificazioni che si vedono ad Orbetello* (Ademollo, 1881). Alle fonti sopracitate si aggiunge la più recente ricognizione di *Paesaggi d'acque* (2017). Il volume dedicato alla Laguna di Orbetello e all'Argentario è frutto di un lungo processo di ricognizione del territorio, riprende soprattutto le indagini delle Università di Firenze e di California, rammentate sopra, arricchendole con nuove scoperte e utilizzando più aggiornate tecniche di riconoscimento dei reperti. *Paesaggi d'acque*, offre,



Figure 5 a, b. Imbarcazioni lagunari e mura di Orbetello; da Nicolosi, 1910.

tra l'altro, nuove periodizzazioni che vanno parzialmente a correggere quelle prodotte in studi precedenti e una puntuale georeferenziazione dei siti archeologici a partire dal Paleolitico fino ad arrivare alla tarda età romana. Per quanto riguarda il popolamento dei tomboli, si data la prima occupazione della Feniglia all'inizio del I millennio, mentre per la Giannella si rimanda ad una fase medio recente dello stesso millennio. Facendo riferimento a Cardoso (2017b), possiamo dire che buona parte dei 28 luoghi archeologici censiti sui due tomboli (8 su Giannella e 20 su Feniglia) riconducono ad affioramenti in superficie di materiali archeologici molti dei quali privi (almeno ad oggi) del supporto di coeve strutture murarie (per la localizzazione di questi siti si rimanda alle carte offerte nelle stesse pagine di Cardoso, 2017b). Per quanto riguarda la Giannella i diversi siti sono stati rispettivamente ricondotti ad un ordine temporale che corre dalla tarda età del Bronzo (affioramenti di Casa al Pino) fino all'età tardo antica romana (V sec. d. C.). L'analisi dei reperti ha permesso, tra l'altro, di individuare in un campo adiacente al Depuratore, la posizione di una Fattoria (età tardo repubblicana, Prima età imperiale: I a.C. - I d.C.), di un importante insediamento con funzione di porto (età repubblicana, imperiale e tardo antica: II secolo a. C - V sec. d. C) nella piana adiacente a Torre delle Saline e di tre Ville rustiche con funzione residenziale e produttiva (età repubblicana e imperiale: II secolo a.C - II sec. d.C.). Gli insediamenti (alcuni corredati da resti o affioramenti di creste murarie) si moltiplicano sul Tombolo di Feniglia e si accompagnano ad altre unità archeologiche ove non mancano aree distinte solo da affioramento di materiali. Nel loro insieme, i siti sono stati ricondotti ad un ordine temporale che corre dalla età del Ferro (IX-VIII sec. a. C.), nei siti prossimi a Poggio Pertuso o ad Ansedonia, fino all'età tardo antica (IV sec. d. C.), come nell'esempio di località Gorghili. Vi si riconoscono aree produttive connesse allo sfruttamento delle risorse marine: così per il sito di Duna Feniglia (IX-VIII sec. a. C.) presso la sede dei carabinieri forestali ai piedi del colle di Ansedonia, per l'area prospiciente l'ingresso ovest (lato poggio Pertuso) alla ex Casa forestale (prima età del Ferro: IX - VIII sec. a. C.) e per un campo al centro della pineta (prima età imperiale). Di grande interesse il posizionamento di edifici di tipo residenziale e produttivo che possono mantenere strutture murarie in elevato e resti di pavimentazione (età tardo repubblicana/Prima età imperiale: I a.C. - I d.C.) e che si dispongono su 4 delle punte che distinguono il fronte lagunare del tombolo. Su un'altra punta anche un insediamento riconducibile allo stesso periodo e funzionale ad una attività portuale. Bronson ed Uggeri (1970) vi individuarono *Cinque piattaforme artificiali riferibili a peschiere romane* ricordate in Dolci (2017) come *una serie di banchine parallele e a distanze regolari che interessano l'intero arco del tombolo*. A tutte queste si riconosce *una effettiva funzione portuale* soprattutto dedicata al trasporto lagunare del vino e alla sua esportazione grazie a *Portus Fenilie*, posto sulla spiaggia marittima ai piedi del colle di Ansedonia. Altri due insediamenti (età tardo repubblicana, età imperiale e tardo antica: I a.C.-IV d.C.) sono stati riconosciuti in prossimità del canale di Ansedonia, mentre, in un campo vicino all'ingresso est alla riserva, rimangono strutture in alzato e creste di muri nonché un quartiere produttivo per la salagione del pesce e la produzione di *garum* pertinenti a *Portus Fenilie*. Guardando adesso ad Orbetello, in letteratura si riscontrano notizie di un approdo navale in città in età etrusca (Ciampoltrini 1995) e poi romana, ma è sempre Ciampoltrini (2009) a richiedere estrema cautela nella ricostruzione di paesaggi, e ancor più di contesti sociali e politici, per momenti storici in cui l'estrema diluizione delle informazioni archeologiche disponibili lascia campo soprattutto alla fluidità delle ipotesi.

Si potrebbe dire che è proprio a partire da questa mancanza di fonti che ha operato Mario Pincherle, la cui bibliografia è in gran parte dedicata ad ipotesi su antiche civiltà perdute. Nel 1989 pubblica *Il Porto invisibile di Orbetello* dove teorizza un centro lagunare che si sviluppa all'interno delle mura poligonali di quello che fu un porto fortificato (staccato da terra) riconducibile all'incerta se non improbabile civiltà dei Pelasgi.

Al di là della legittimità di una simile ipotesi, quello che qui interessa è la notizia di un porto lagunare artificialmente interrato nel XII secolo, nonché i sondaggi e le perforazioni a ridosso delle mura effettuate da Pincherle nel 1988: le stesse che forniranno dati sui livelli lagunari.

Va da sé che un'area per l'ancoraggio di imbarcazioni deve essere sempre esistita intorno ad Orbetello. Tra la documentazione ottocentesca raccolta all'Archivio di Stato di Firenze nella filza 242 (ins 2) del fondo Segreteria di Gabinetto, si trova un opuscolo a stampa del 20 giugno 1544 (Tolomei, 1544) che anticipa di circa tre anni la pubblicazione delle Lettere di Angelo Claudio Tolomei (1547). Contiene la nota lettera di Tolomei (1491 o 1492 – 1556, lo stesso che fondò l'Accademia della Virtù, meglio nota come Accademia Vitruviana) dedicata al Granduca e inviata a Gabriele Maria Cesano (1490-1568). La lettera, nel patrocinare la costruzione di un porto e di una nuova città lagunare (idea che si riaffercherà più volte fino al XIX secolo), evidenzia il ruolo attivo (oggi perduto) degli umanisti nella progettazione e il riferimento all'esperienza passata, a quella romana in particolare, per la selezione dei luoghi su cui si intende costruire opere a mare.



Figure 6 a, b, c. Orbetello, Argentario, Talamone e parte dell'Arcipelago Toscano nel XVI secolo. a) In Tolomei, 1547; b) Girolamo Bellarmato, *Chorographia Tusciae*, a. 1536, (ASF, Carte Nautiche 13 dettaglio, riproduzione vietata); c) Orlando Malavolti, *L'antico Stato di Siena*, dettaglio a. 1599.

La lettera è accompagnata da una carta della bassa Maremma con una laguna connotata da un'ampia apertura di Nassa (Figura 6a), ma il confronto con la carta del Belarmato, precedente di una decina di anni (Figura 6b), oltre a palesare evidenti debiti, dimostra anche l'arbitrarietà del disegno della Giannella che, nell'originale, risulta assai più stretto. Quello che qui più interessa, è un passaggio dell'opuscolo dove la morfologia lagunare risulta il primo fattore della difesa di un porto: *Dalla banda della terra a piedi del monte v'è lo stagno*

d'Orbetello, che circonda intorno a 18 miglia [...] dico ancora, che non sarebbe fuore di ragione, il far porto di tutto lo stagno d'Orbetello, perché essendo dal mare allo stagno una lista di terra, non più larga d'un tiro d'archibuso, non sarebbe molto gran cosa il tagliarla, e farla tanto cupa, che vi potessero passar le galee, le quali dal mare allo stagno, e dallo stagno al mare passerebbero agevolmente; e quando questo luogo fosse ben contemplato da buoni ingegneri, credo che un tal disegno si condurrebbe ad effetto senza impedimento alcuno.

Cinque anni dopo, il 13 settembre 1552, Leone di Antonio Ricasoli informa Cosimo de' Medici del piano, discusso dalla Balia di Siena, per allagare la città di Orbetello (Mediceo del Principato, 1851 folio 67). Siamo nel pieno della insurrezione senese antispagnola, che gode del sostegno fiorentino. Il piano si dovrebbe concretizzare con l'apertura di un nuovo canale inteso *ad alzare l'acqua in Orbetello sino a mezzo le case*, ma l'operazione, secondo lo stesso estensore costosa e difficilmente realizzabile, non troverà esecuzione.

Prima degli interventi della metà del secolo XIX: la malaria

Si vive bene in Orbetello, e si muore nei suoi contorni.

Ferdinando Tartini (1838)

La crescita di Cosa dalla seconda metà del III sec a.C. sembra determinare lo spopolamento di Orbetello, almeno fino all'805 (Cartei et al., 2015), quando l'Abbazia della Tre Fontane riceve in dono da Papa Leone III e Carlo Magno vasti territori che includono il centro lagunare. Da allora laguna e Argentario subiranno una serie di passaggi politici che vedrà protagonisti gli Aldobrandeschi di Sovana (1269) e gli Orsini fino al 1414, anno della sottomissione a Siena. Dal 1556-1557 prende forma lo Stato dei Presidi, quando Orbetello, Argentario, Talamone e Porto Longone (oggi Porto Azzurro nell'Isola d'Elba) divengono, nei fatti, *enclaves* spagnole. Nel 1707 l'area viene occupata dagli Asburgo, dal 1737 al 1799 passa ai Borboni di Napoli e quindi subisce l'occupazione francese (Rombai, 2006) fino al congresso di Vienna, quando diviene parte al Granducato di Toscana. È questa instabilità politica che fa scrivere a Capezzuoli (1982) di terre condannate dal XVI secolo in poi al totale immobilismo economico, culturale e politico. Da questo giudizio negativo viene correttamente esclusa la questione sociale dove gli abitanti, una volta esclusi inevitabili atti di sopraffazione, non dovevano cavarsela male anche perché soggetti ad una economia di guerra al servizio agli eserciti avvicendatisi nel tempo. È una lunga memoria di Filippo Giannetti, riconducibile al terzo e quarto decennio del XIX secolo (ASF, Segreteria di Gabinetto, 158, ins 7), a stigmatizzare la crisi economica seguita alla partenza di Asburgo, Borboni e francesi che, nella sostanza e visto che i residenti dovevano contribuire alla difesa, sostanzialmente garantivano un salario minimo agli orbetellani. D'altro canto, in un documento di Luca Lambardi (già affittuario per la pesca nella laguna di Levante) del 3 giugno 1837 (ASF, Segreteria di Gabinetto, 242, ins 2) si giustifica la crisi economica attraversata dalla città anche con le case sfitte e col crollo delle rendite dopo l'abbandono delle guarnigioni.

Anche a causa del tardo ingresso in area granducale, la bonifica delle maremme, già avviata in altre aree in periodo mediceo e continuata con maggior convinzione sotto i Lorena, interessò tardi la laguna di Orbetello: qui, fino al 1859, *non poteva dirsi neppure iniziata* (Barsanti, 2003). Tuttavia, anche in questa area periferica, dove ancora nel 1930 tra Chiarone e Albegna si segnala il *massimo disordine idraulico* (Tofani e Petrocchi, 1930), non mancarono gli interventi Lorenese. Una delle prime preoccupazioni fu quella dell'approvvigionamento idrico del centro lagunare. Se è Pincherle (1989) a rammentarci una sorgente di acqua dolce all'interno della città, Giorgio Santi (1798), alla fine del XVIII secolo, viaggia nella provincia inferiore senese in compagnia del botanico Gaetano Savi per scrivere che *Orbetello manca di acqua dolce, se si eccettuan poche cisterne, tanto che per i bisogni della Città si fa venire a barili l'acqua purissima dal vicino monte Argentario, e questa non poco contribuisce a preservar dai mali di Maremma gli Orbetellani*. In questa situazione, nell'ultimo periodo lorenese, si progetta un acquedotto che, dalle sorgenti dell'Argentario, attraversando la laguna, porti l'acqua in città.

La posa delle tubature suggerisce anche la risposta al problema delle comunicazioni via terra tra Orbetello e i porti dell'Argentario, ovvero la costruzione di un ponte realizzato nel 1842 (Figura 7, lo stesso che, a partire dall'inizio del XX secolo ospiterà la linea ferroviaria Santo Stefano - Orbetello). Alle nefaste conseguenze sulla piscicoltura previste da Luca Lambardi, si accompagnarono progetti intesi a limitare le conseguenze della nuova costruzione sui flussi lagunari. Un primo progetto di Federico Prucker (ASF, Segreteria di Gabinetto, 158) prevedeva 5 luci lunghe 8 braccia ciascuna (4,70 m ca.) però alla fine si optò per un ponte a tre

Orbetello, dove più forte sarebbe la corrente, risulta la più stretta: ancora nel 1976, Mari rileva che gli scambi tra le due lagune erano molto limitati.

La costruzione del chilometrico ponte/diga non rappresenta il primo progetto di periodo moderno ad alto impatto sulla laguna. Stando a Luca Lambardi (ASF, Segreteria di Gabinetto, 242), che scrive nel giugno 1837, cinque anni prima dell'inaugurazione del ponte, la superficie delle acque si era ridotta per un intervento degli anni Venti che aveva diminuito l'apporto di acque dolci in laguna. Al *restringimento dell'area del lago* avrebbe contribuito l'innalzamento del terrapieno *che si erge a diga* e protegge la nuova strada per Talamone (Figura 8), lo stesso che adesso ferma le frequenti tracimazioni del Fosso Radicata (affluente di sinistra dell'Albegna) che precedentemente, scendendo il piano del Ginzone, finivano in laguna (Figg. 8 e 10).

Egli ricorda che, con la costruzione della nuova strada per Talamone negli anni Venti del XIX secolo, alla laguna vennero a mancare pesci e *cria* del Radicata la cui ricchezza di materie organiche era di *somma utilità* per gli itticoltori, tanto che successivamente, nella stagione secca, la *cria* veniva raccolta da carri nel piano del Ginzone e gettata in laguna (contribuendo all'innalzamento dei fondali). Un apporto tanto importante da suggerire la costruzione di arcate sullo stesso terrapieno.



Dopo l'inaugurazione del ponte, il Fosso Reale lungo le mura di terraferma e il Fosso degli Spalti (un fossato di difesa adiacente alle mura) continueranno a garantire la comunicazione tra le due lagune (Figg. 9 a,b) ma non potranno evitare il rialzamento dei fondali lungo le gronde di ponente e nella porzione di levante priva di canali a mare (Del Rosso, 1898).

La diga andava a limitare anche il flusso mareale favorito dal regime dei venti dominanti (di libeccio in

Figure 9 a, b. Orbetello e la sua laguna prima della costruzione del ponte diga a) Nel 1735 (Anonimo, BNFG, Cartes et plans, GE D-16467, btv1b8494205j) b) Intorno al 1819 con il dettaglio sul Fosso degli Spalti (Giacomo Passerini, ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, 524 II, tavola I, riproduzione vietata).

inverno, di maestrale in estate) che Moro (1877b) registrò come perpendicolari o leggermente obliqui alla diga. Con venti di scirocco e di mezzogiorno *la massa superficiale dell'acqua è spinta nel Golfo di Talamone*. È così che i venti muovono le acque di levante verso il tombolo di Orbetello e la diga, mentre quelle di ponente indirizzano verso Giannella. Un regime dei venti parzialmente modificatosi visto che Brambati et al. (1979), confermando la costanza dei venti da SW, annotano, a partire dal 1971, un chiaro calo di quelli di SE e un netto aumento dei venti da Sud.

Ai venti che investono la laguna hanno dedicato grande attenzione Bartolini et al. (1977), sottolineando la

fase critica avviatasi nel 1968 che *ha segnato l'inizio di una tendenza, tuttora in atto, che ha portato ad una netta diminuzione della velocità media dei venti foranei ed in particolare della frequenza dei venti con velocità superiore a 28 nodi*. In aggiunta, *gli anemometri avevano registrato anche una variazione nel tempo dell'incidenza relativa dei tre venti foranei che interessano il settore di traversia*.

Gli interventi ottocenteschi sulla laguna si sposarono alle questioni della salubrità dell'area litoranea e alla lotta contro la malaria. Oggi sappiamo che le bonifiche hanno migliorato le condizioni di vita della popolazione, ma la bonifica non fa scomparire la malaria. L'anofele depone uova e sviluppa lo stato larvale nel periodo che corre da giugno a ottobre, soprattutto in raccolte di acque dolci o salse. *Meno favorevoli invece sono le ampie superfici liquide, mosse da vento o piogge torrenziali, dove le uova deposte vengono spazzate via e le larve uccise* (Cherubini e Vannozzi, 1987). Gli stessi autori scrivono che le crisi epidemiche possono attivarsi per l'aumento dell'umidità, la diminuzione del bestiame (preferito dall'anofele), l'immigrazione anche temporanea di individui malarici o non immuni, e anche che esseri umani e animali possono acquisire un'immunità che cresce con l'invecchiamento. Savi (1839) fornisce un lungo elenco di quelle che all'epoca erano ritenute le principali cause *alle quali è stata attribuita l'origine della Cattiv'aria*.

Una credenza errata, quanto diffusa e resistente allo scorrere del tempo, fu quella che l'anofele si sviluppasse dal miscuglio di acque dolci e salse: teoria che provocò nuovi guai alla laguna di Orbetello conducendo, nonostante i contraddittori sollevati dal fisico e matematico Antonelli, alla chiusura del Canale di Fibbia sulla foce dell'Albenga che alimentava la laguna con acque dolci e salmastre. Gaetano Giorgini (uno delle più eminenti figure della tarda età granducale, dal 1859 direttore idraulico delle bonifiche toscane e direttore generale del Dipartimento Acque e Strade) fu tra i più solerti propugnatori della bonifica. Nel suo Rapporto (1860), riconosceva che il vasto stagno di Orbetello *grazie alla sua salsedine, gode, non meno che la città dello stesso nome, di aria generalmente salubre; se si eccettuano alcune parti del suo contorno, nelle quali dalle terre vicine si versano fonti di acqua dolce*.

Ma la salubrità della laguna e la salute degli Orbetellani, prima degli interventi della seconda metà XIX secolo, è stigmatizzata, talvolta con stupore, da descrizioni e resoconti di viaggio. Terramocia (2008) ricorda che in una pergamena del XV secolo, si scriveva di "salubrità dell'aria". Giorgio Santi (1798), dopo aver rilevato la diffusione delle febbri malariche alla Marsiliana d'Albegna, visita la laguna e l'Argentario: *Il colorito degli abitanti è tale, che indica sufficiente salubrità nell'aria*. La salubrità della città lagunare pochi anni prima della costruzione del ponte, viene sottolineata anche da Ferdinando Tartini (1838, Appendice 10) che annota: *Si vive bene in Orbetello, e si muore nei suoi contorni [...] esposta all'azione dei venti marini che penetrando nelle bassate delle feniglie, l'hanno mantenuta sempre sana*. Tartini non mancherà di preoccuparsi per l'accumulo di materie vegetali in laguna: *per rimuovere una causa di fetide e perniciose esalazioni è stato ordinato che coll'ajuto di adattate macchine si estrarrebbero molte materie ora ammassate al piede delle mura di Orbetello verso lo stagno, e per mezzo di chiatte e puntoni si trasportino in luoghi dai quali non possano più arrecar danno*. Ma è ancora una volta Santi (1798) a ricordarci che il problema della diffusione delle specie vegetali in laguna è questione antica: *questo Stagno, che dà tanti vantaggi ad Orbetello, gli reca non piccola molestia colla gran quantità di Conferve, di Ulve, e di altre piante acquatiche [...] e in estate, quando le acque son basse, vi si putrefanno, e tramandano un fetore insopportabile*. In proposito, Ademollo (1881) scrive che nel 1776 *le acque del lago divennero infense [sic!] e nocive alla salute degli Orbetellani, i quali andavano tuttodì deperendo; ciò fu attribuito agli ammassi di piante acquatiche che soffermandosi lungo le palizzate, fatte intorno alle mura per mire difensive, ivi si scomponevano*. La situazione andò aggravandosi fino a che, nel 1792, Ferdinando re di Napoli decise di investire la considerevole somma di 8400 ducati per riordinare le palizzate e *ripulire i fossi e distruggere le piante palustri*. Sembra però che la prima testimonianza di *acque torbide e guaste* sia da ricondurre al 1723. Una situazione che condusse a rinunciare all'affitto delle peschiere (Fanciulli, 1992).

Anche Salvagnoli Marchetti (1846) e Martelli (1846) indagheranno sulla salubrità della nostra area. Le memorie statistiche di Salvagnoli Marchetti (1846) riportano che *Nei territori soggetti alla malaria questa proporzione è quasi la stessa, poichè a Orbetello è del 54 per 100, a Magliano e a Grosseto è del 59, a Gavorrano del 66, e a Suvereto del 68 per cento*. Poi, pur tornando sul concetto della mescolanza di acque dolci e salate, specifica: *In mezzo a questa generale desolazione, merita però osservazione una piccola città, fabbricata nel centro di un vasto stagno maremmano, la quale si conserva assai salubre, sebbene, secondo le prime apparenze, dovesse soffrire anche più di altre località dalla influenza deletere dei paduli*.

L'ingegneria idraulica in laguna

sicché potevasi passeggiare a piede asciutto per vasti tratti, ne' quali prima non perdevasi mai l'acqua. Giovanni Antonelli (1870a)

Molti dei progetti per la laguna presentati nell'Ottocento granducale e postunitario non si concretizzarono o rimasero incompiuti. Quelli realizzati non mancarono di suscitare grandi polemiche, frutto anche degli interessi, spesso contrastanti, di pescatori, neoindustriali e cavatori. Progetti che potevano entrare in contrasto con l'igiene pubblica e che impattavano col sostanziale equilibrio basato sullo sfruttamento di pesca e peschiere (anche se non mancarono conflitti tra appaltatori e "liberi" pescatori) che per secoli aveva distinto lo specchio lagunare. La bonifica del Circondario di Orbetello doveva coprire una vasta area litoranea tra Talamone e Capalbio. Le prime operazioni si avviarono sui Paduli di Macchiatonda e della Tagliata che, pur separati da una sottile striscia di terra, nel 1824 comunicavano anche con il Lago di Burano. Per comprendere le ragioni di questi interventi dobbiamo tornare alle teorie sulla insalubrità delle aree intorno al centro lagunare. Salvagnoli Marchetti (1846) riteneva che l'alta salinità della laguna contribuisse a tener lontana la malaria, tanto che *i pescatori del lago passano impunemente nella estiva stagione la maggior parte delle notti sopra i loro barchetti, abbandonandosi al sonno, ancorchè bagnati da abbondanti rugiade, le quali sono, come ognun sa, micidiali in tutti i luoghi di aria cattiva.* A tal riguardo, nel 1877 Moro avvertirà che anche in inverno, ovvero quando la laguna è al massimo degli apporti meteorici, la sua salinità era leggermente superiore a quella del mare, mentre De Magistris (1899) scrive che la salinità della laguna va a decrescere sensibilmente partendo da Nassa, dove è pari a quella del mare. Tornando a Salvagnoli Marchetti, questo autore faceva ricadere la responsabilità delle febbri diffuse nei *vicini colli ed alle continue pianure [...] agli effluvi che si sviluppano dal padule di Burano e da quello della Torre delle Saline, ai quali necessariamente si avvicina chiunque si scosta anche poco dalla città.* Intorno alla metà del XIX secolo, alla generale salubrità dell'area lagunare sfuggiva l'area dello Stagnone

- Porto Bufaloro, vicina all'Albegna, *uno dei più pestiferi ristagni del litorale* (Figura 10). Si riteneva che proprio da qui la malaria si diffondesse anche al di fuori della laguna, soprattutto in estate, quando *Rimanendo allora quel fiume quasi senza acque proprie, le acque marine nei giornalieri flussi del mare, risalgono a molta distanza e ristagnano nel di lui alveo colle poche acque dolci discese dai monti, sopra un fondo putrido e puzzolente.* Nel mondo scientifico del tempo non mancavano idee diverse, come quelle dell'ingegnere Raffaele Pareto - uno delle menti ingegneristiche italiane della II metà del XIX secolo la cui fama oltrepassò i confini alpini - ma solo a fine 800 perse del tutto credibilità la teoria che l'anofele si sviluppasse dal miscuglio di acque dolci e salse. Nel frattempo, Gaetano Giorgini (1860) propose *un ponte-cateratte o una steccaia sul fiume Albegna, che non lasciasse risalire dentro terra le acque marine sino alla distanza alla quale si putrefanno adesso colle acque dolci* e di chiudere il Canale di Fibbia, lasciando alla sola bocca di Nassa le comunicazioni tra mare e laguna. Nelle intenzioni



Figura 10. La strada per Talamone, Porto Bufaloro e l'area di Stagno/Stagnone in una carta del 1819 circa (Giacomo Passerini, ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, 524 v, tavola IV, dettaglio, riproduzione vietata).

di Giorgini, alla chiusura di Fibbia dovevano corrispondere la riapertura del canale di Ansedonia e lo scavo di un nuovo canale su Giannella, ma una volta falliti i tentativi per *nuove comunicazioni tra il detto stagno e il mare, allora ci movemmo a combattere la chiusura del noto canale [di Fibbia], e a chiedere che fosse riaperto* (Antonelli 1870a). La chiusura di Fibbia (che impedendo l'ingresso delle torbe dell'Albegna poteva rallentare l'innalzamento dei fondali ma riduceva sensibilmente il patrimonio ittico della laguna), l'abbandono del nuovo canale della Giannella e il ritardo di decenni nell'apertura del canale di Ansedonia aprirono un aspro dibattito, che vide tra i protagonisti principali, da un lato Gaetano Giorgini e l'ingegnere Antonio Angeli (1870, tra le sue proposte anche quella della riduzione della superficie dello specchio lagunare) e, dall'altro, la comunità di Orbetello, sostenuta da Padre Giovanni Antonelli (1870a). Questi, nel dicembre 1869, visitò la laguna per concludere che *la salubrità di Orbetello e l'innocuità dello Stagno giunse fino a giorni nostri, e precisamente fino all'epoca in cui fu chiuso il Fosso di Fibbia*.

Negli ultimi decenni del XIX secolo, Alfredo Baccarini diviene una figura centrale per i destini dell'area. Infatti egli fu direttore dell'Ufficio del Genio civile di Grosseto (1871-72), dove lavorò al compimento delle opere di bonifica della Maremma toscana, quindi Direttore generale delle opere idrauliche del ministero dei Lavori Pubblici (1873-76) e infine, dal 1878 al 1883, Ministro dei Lavori Pubblici, ovverosia colui che sarà chiamato a sostenere i finanziamenti per la sistemazione della laguna.

L'opuscolo del 1898 curato dal Sindaco Del Rosso offre utili spunti sui progetti avviati nell'Ottocento: vi si introducono, tra gli altri, quelli di Giovanni Moro, quelli di Morandini e Franchi sul rimboschimento della Feniglia e quello di Baccarini (1872) che prevedeva, tra l'altro, il proseguimento delle escavazioni per tre canali allacciati (Figg. 11 a,b), la riapertura del canale di Ansedonia, l'allargamento dei canali di Nassa e Fibbia, e nuove luci sul ponte diga. Del Rosso interviene dopo il fallimento del progetto Baccarini, imputato all'imperizia degli esecutori, che ebbe l'effetto di peggiorare la situazione delle aree di gronda, dove l'acqua si fece stagnante aggravando la situazione sanitaria. Si è calcolato che il collasso del canale progettato da Baccarini provocò l'innalzamento di 85 cm del suo letto e l'*impaludamento mantenevasi per centinaia di metri nell'interno del lago* (Moro, 1877b). Nel 1876 le piogge si protrassero *sin a matura estate* ma il 20 ottobre (con Nassa e Fibbia in attività) le acque erano ancora a 50 cm

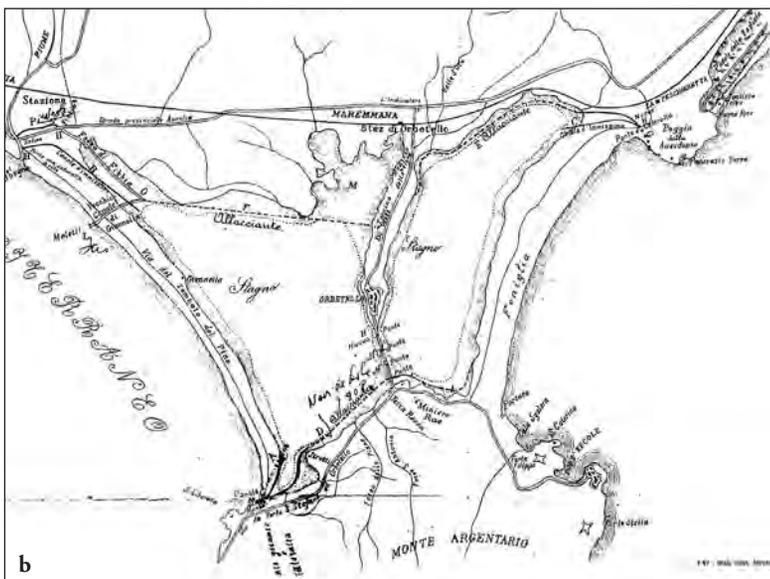
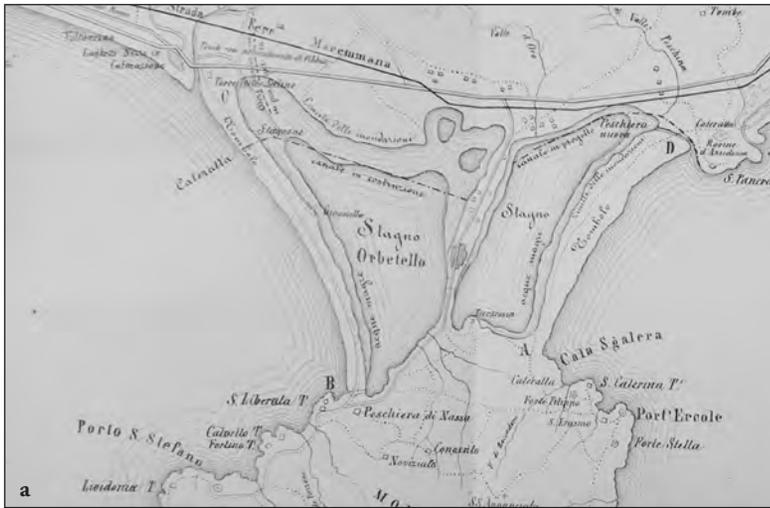


Figure 11 a, b. La Laguna di Orbetello a) nel 1867, con i lavori in corso d'opera e il canale di Nassa (Pareto 1867, dettaglio); b) nel 1898, con la dimostrazione dei lavori conclusi e in corso d'opera (Del Rosso, 1898, dettaglio).

sotto il livello del mare. Moro prosegue specificando che una crescita di 10 centimetri dovuta alle forti piogge cadute nei 3 o 4 giorni seguenti *rimase stazionaria su li 40 cm dell'idrometro dalli 25 del mese stesso fino alli 8 novembre: allora per una nuova pioggia notturna salì a cm 43 e fermossi a quel livello*. Una volta cessate le piogge, i livelli rimasero stabili. Questo suggerì a Moro che da metà ottobre a fine novembre *l'immissione di Nassa e Fibbia sarebbe stata eguale all'evaporazione subita dallo Stagno*.

È sempre Moro (1877b), dopo i sospetti già sollevati da Antonelli, a sostenere in maniera convincente che il progetto era sacrificato anche da un errato calcolo dei movimenti di marea interna dovuto all'interpretazione dei dati forniti dall'idrometro lagunare, che portò il progettista a sovrastimare, *secondo le osservazioni che egli ebbe da Livorno*, la marea lagunare fino a 86 centimetri. Insomma, lo zero dell'idrometro di Orbetello (che in realtà corrispondeva al livello minimo lagunare al momento della massima evaporazione (come in Pareto 1867 e Moro 1877a), venne fatto corrispondere alla bassa marea. Diversamente lo zero dell'idrometro non corrispondeva *al basso mare ma è circa 50 cm più basso e che la marea orbetellana non è di 86 ma di circa 25 cm nella sua media oscillazione* anche se in situazioni eccezionali può arrivare a 50 cm come *ben 300 osservazioni hanno dimostrato* (Moro, 1877b). Oggi si calcola che l'escursione di marea non superi i 40 cm.

Sempre seguendo le riflessioni di Moro (1877b), Baccarini con la sottostima dell'evaporazione estiva a favore di una marea sovrastimata, non considerò che i canali allaccianti si sarebbero seccati divenendo stagnanti e fonte di malattie. Ciononostante, l'idea dei canali allaccianti non fu abbandonata. Nel 1883 iniziano i lavori per un nuovo quanto ambizioso e costoso progetto: tre anni dopo l'Impresa esecutrice Bartolomeo Dani ricorre contro la rescissione del contratto imposta dal ministero. Nell'occasione l'Impresa (1886) produce una memoria difensiva che, nel dipingere le difficoltà incontrate nell'esecuzione dei lavori, offre spunti di un certo interesse. Il contratto prevedeva l'immediata esecuzione dei lavori, ma questioni organizzative e difficoltà nel reperimento della folta manodopera (comunque restia ad impegni estivi in aree insalubri) ritardano l'avvio dei primi lavori all'agosto dello stesso anno. La ditta doveva immediatamente impegnarsi per lo *scavo dei canali di immissione, al taglio della roccia di Ansedonia, ed alla costruzione e prolungamento dei moli a Giannella e a Nassa, la costruzione di nuovi ponti sulla diga, la sistemazione di Fibbia e l'allacciante tra Nassa e Pertuso*. I lavoratori occupati nel taglio di Ansedonia che percepivano *una paga di oltre il 30% superiore a quella ordinaria*, non vi dimoravano perché esposti alla malaria, e vi erano quotidianamente trasferiti sottraendo un numero considerevole di ore al lavoro. Contro l'avvio e l'esecuzione dei lavori giocarono anche la situazione del livello della laguna che non diminuì nella fase estiva e autunnale (rimase ad un'altezza superiore a quella del livello del mare: +25 cm in agosto, +15 cm in settembre, + 20 cm in ottobre) e le copiose acque che scendevano dalla collina dell'Argentario. Non ultimo, il fondale lagunare (la materia prima per la costruzione del rilevato dell'arginatura parallela alla gronda) si rivelò totalmente inadatto tanto da crollare nella laguna, e una pioggia di appena sei ore ricoprì di acqua una parte dell'allacciante già prosciugato.

Per questo i lavori, iniziati nell'agosto 1883, vennero abbandonati a novembre dello stesso anno. Nel maggio 1884 il peggioramento della situazione lagunare condusse, contro il parere dell'impresa esecutrice, ad anticipare l'apertura del nuovo canale di immissione di Nassa, anche perché il capitolato imponeva anche l'adozione di espedienti *per impedire la fuga del pesce a mare pei nuovi canali*. La prematura apertura e l'immissione di ingenti volumi di acqua marina, oltre ad innalzare il livello, mise in crisi molti dei lavori in corso e andò a riflettersi sui pali di fondazione a sostegno di pigne e spalle, tanto che *prima ancora che le dette pile raggiunsero la dovuta altezza, cominciarono a muoversi*. L'impresa subappaltò il canale allacciante Madonna delle Vigne - Ponte della Feniglia (Ansedonia). Lungo 1 km ca., doveva correre sul tracciato del già tentato canale per arrivare a fondali da 0,50 a 0,90 m. Avviati i lavori, il subappaltatore Pietropaoli si rese presto conto delle difficoltà e abbandonò l'impresa. Saranno poi Tofani e Petrocchi (1930) a scrivere dell'abbandono dei progetti maremmani di Baccarini e della presentazione di un nuovo progetto generale del Ministero nel 1894. Le nuove luci previste sul ponte diga vennero comunque realizzate negli anni successivi. De Magistris (1899) scrive che levante e ponente comunicano grazie al Fosso Reale e a quello degli Spalti *e per mezzo degli otto ponti che s'aprono, ad intervalli disuguali, lungo la diga*.

A fine '800 si iniziò a prendere in seria considerazione il problema dell'accumulo sedimentario sulla gronda della Feniglia. La sedimentazione, imputata ai tagli delle alberature del tombolo (molto richieste dall'attività mineraria e dalle carbonaie), comunque *non giunge ad una velocità d'invasione contro Orbetello superiore a sette metri [annui]* (Del Rosso, 1898).

Dal 1824 si parlava di rimboschimento (Fanciulli, 1999). Se Camiz et al. (2017) rimandano ad un manto

vegetale originario di Giannella e Feniglia *costituito da macchia mediterranea*, alla metà del XVI secolo Tolomei scrive: *ma sopra tutto è degna di contemplazione quella spaziosa e bella selva di pini tra il mare e lo stagno verso il monte, la qual per tal cagione si chiama hoggidi volgarmente la Pineta* (Tolomei, 1544). D'altro canto, la veduta di Ignazio Fabroni della seconda metà del XVII secolo dedicata alla laguna (Figura 16a) illustra una Feniglia colonizzata da essenze vegetali dal fusto basso e non lineare che potrebbero richiamare querce o quercioni.

Secondo Del Rosso (1898), a fine Ottocento la Feniglia si estendeva per 500 ettari *di cui solo 50 sono boscati o cespugliati 57 sono di terreni nudi ma fermi e 347 sono renai mobili che minacciano l'esistenza del lago* Lo stesso autore guarda alle stime offerte una quindicina di anni prima da Giovanni Morandini, quando lo sfruttamento del patrimonio boschivo della Feniglia, per i lavori lagunari e per l'attività estrattiva, si fece allarmante. Il Comune si attivò per un esproprio che fallì per l'opposizione dei due privati che si dividevano i terreni del tombolo. Ebbene, una quarantina di anni prima gli ettari interessati dal rimboschimento saranno 137, quasi raddoppiati nel 1885 e quasi triplicati nel 1892, per raggiungere i 347 ettari. Il rimboschimento individuato da Camiz et al. (2017) a partire dal 1912, proseguirà *ininterrottamente per circa 50 anni*.

Canalizzazioni, flussi e bocche a mare: la pesca

non valse che a finire di spendere ben cento mila lire in tutto quel conato di restaurazione; perciocché colla solita stabilità e prontezza il flutto marino ostruiva la nuova bocca.
(Antonelli 1870a)

Antonelli (1870b) e Pareto (1867) concordano nel ritenere che nei secoli passati la laguna fosse servita da quattro canali a mare *senza che si possa dire se queste abbiano mai funzionato contemporaneamente*. Sappiamo però che allo scadere del XVI secolo Francesco De Marchi (1599) riprende il progetto di Tolomei per un porto lagunare, e propone di scavare un nuovo canale sulla Feniglia *dove meno il mare conduceva arena*. Una *entrata a mare* da affiancare alla sola allora esistente nella parte di ponente della laguna e *distante cinque miglia*, escludendo, come esplicitato dalla Figura 4a, altri canali attivi, oltre a quello di Nassa. Sono però le fonti esaminate in Fanciulli (1999) e gli statuti quattrocenteschi (Damiani, 2013) a dare concretezza all'ipotesi che Nassa e Fibbia con le relative peschiere, abbiano iniziato a coesistere almeno a partire dal XV secolo.

Le peschiere erano affittate dal Comune, che da esse ritraeva la sua maggiore entrata solitamente destinata ad opere pubbliche. Ad esempio, nel 1838, la Comunità aveva incamerato la rispettabile somma di oltre



Figure 12 a,b. Tracce di antiche canalizzazioni (Giacomo Passerini, 1819 ca.; ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, 524/I, dettagli, riproduzione vietata); a) Pertuso; b) Ansedonia.

11.000 ducati (ma le variazioni annuali delle rendite potevano essere assai significative, cfr Fanciulli 1999). L'appalto delle peschiere riguardava la sola laguna di ponente, dove le aree più favorevoli erano quelle più vicine ai canali di immissione (in Antonelli 1870b si può leggere che il canale di Fibbia era lungo circa 400 m). Quella di levante, distinta da una inferiore pescosità, restò, fatte salve poche quanto brevi parentesi, riservata ai “liberi” pescatori che, almeno fino alla inaugurazione del ponte diga del 1842, potevano pescare anche nelle ristrette aree non appaltate di ponente. L'appalto, avviatosi quantomeno alla fine del XV secolo ebbe durata variabile (da un minimo di un anno ad un massimo di 9 anni) e fu soppresso nel 1945, dopo una interruzione durata dal 1899 al 1907, anni in cui si concretizzò una gestione diretta del Comune in accordo con i pescatori (Damiani, 2013).

Nella cartografia ottocentesca non mancano le tracce di antichi canali di collegamento tra mare e laguna non più attivi (Figg. 12 a,b). Antonelli (1870a) scrive che la bocca di Pertuso (talvolta Portuso) su Feniglia *raccomandata alle alte scogliere del monte Argentario si vede ancora in carte 700esche*. Ciononostante, le rappresentazioni cartografiche dei secoli precedenti, non forniscono elementi utili a definirne numero, flussi e periodo di attività. Prima Bronson Uggeri (1970), poi Cardoso (2000), e più recentemente Santarelli (2015) tornano sugli scritti cinquecenteschi di Pietro Cataneo e ai suoi consigli di provvedere sia alla vigilanza del Canale di Nassa - Santa Liberata come a *quello di verso Portercole che al momento ha dal mare per il suo flusso e reflusso turata la bocca di rena*. Pareto (1867) rinvenne tracce del Pertuso quando riconobbe *dei tagli fatti a scalpello nella roccia là dove s'immetteva in mare con lo sbocco turato da una duna*. Simili tracce, stando a Del Rosso (1905), saranno ancora ben visibili ad inizio Novecento. Tra 1952 e 1953 vi si avviarono lavori per un nuovo canale mai portato a termine (Bronson, Uggeri 1970).

Lambardi (1837) scrive sui canali di Nassa e Fibbia, *quello di Nassa ammette l'introduzione direttamente dal mare e per soli pochi mesi dell'anno, nel qual tempo remossi sono tutti gli ordegni da pesca*. Finito questo periodo Nassa si dispone per la pesca, dove non mancano anguille, spigole, orate, saraghi triglie muggini gronghi, cefali, gamberi e molluschi.



Figure 13 a,b,c. Nassa, canale e peschiera a) In un dettaglio dei fogli di mappa del Catasto Generale Toscano del 1824 (ASG, Catasto Generale Toscano, Orbetello, riproduzione vietata); b) In una foto da Nicolosi, 1910; c) Nel 2019 (foto Valentina Ugolini).



Il canale (Figg. 13 a,b,c), protetto dall'Argentario e dalla punta di Santa Liberata *dalla invasione delle arene*, è quello che vanta un plurisecolare e probabilmente ininterrotto periodo di attività. Tuttavia, a Nassa l'apporto delle acque marine è sempre di gran lunga inferiore a quella che si ottiene nell'altra peschiera di Fibbia. Il contributo di Fibbia era allora essenziale sia per il livello della laguna sia per il suo patrimonio ittico (dove il contributo di Nassa risultava di gran lunga inferiore).

Questo comporterà continui conflitti tra gli appaltatori delle due aree, perché a Fibbia non si poteva praticare la pesca in modo continuativo senza pregiudizio per Nassa. Ancor più aspri potevano essere i conflitti tra appaltatori e "liberi" pescatori. Giovan Battista Thaon (s.d., probabilmente 1826-1827), dopo aver specificato che le pesche *già da vari anni sono scarsissime e nello stagno e nel mare*, scrive che negli anni Venti del XIX secolo almeno 50 erano le famiglie di pescatori orbetellani. Quest'ultimi non solo venivano accusati di pescare nottetempo in aree appaltate, ma anche di disporre trasversalmente le loro reti nelle immediate adiacenze delle bandite depauperandole.

È ancora Lambardi (1837) a spiegarci la tecnica di gestione delle acque, dove quelle dell'Albegna ordinariamente predominano sulle marine. Il pesce risale la corrente fluviale e in parte finisce dentro il canale di Fibbia e poi in laguna, dove va alla ricerca delle acque marine per trovarle nelle peschiere di Fibbia.

Le situazioni più vantaggiose per i pescatori si creano in caso di piene, quando il pesce, dopo aver risalito il fiume, fugge velocemente in mare *al primo fiuto delle torbe* che lo ucciderebbero. In simili occasioni, la maggior parte del pesce ritornerebbe in mare. Per questo gli appaltatori avevano escogitato una *chiusarana*: una rete che attraversava l'Albegna adatta a deviare il riflusso dei pesci verso Fibbia. Una soluzione messa in atto solo una volta l'anno, in alcuni giorni di maggio, perché si riteneva (a torto secondo l'autore) che solo nei tre mesi precedenti il pesce risalisse l'Albegna. Al governo della cataratta di Fibbia era addetto un pescatore a servizio dei locali appaltatori. Pincherle (1989), ad oltre un secolo dai fatti da lui narrati, riporta un racconto secondo il quale una delle cause che portarono alla chiusura di Fibbia (1860 -1870) fu la colossale sbornia presa dall'addetto alla cataratta durante la piena dell'Albegna del 1858: completamente ebbro, egli avrebbe trascurato di chiudere le cateratte provocando l'inondazione della laguna, l'intorbidimento delle acque, la conseguente moria di pesci e l'innalzamento del fondale.

Abbiamo già scritto che alla chiusura di Fibbia avrebbe dovuto corrispondere l'apertura di un canale trasversale al tombolo della Giannella e la riapertura del canale di Ansedonia (Figg. 14 a,b). Baccharini (1872) scrive che già nel 1859 si era iniziato a lavorare sulle tracce dell'antico canale ma a lavori iniziati *il mare lo rendeva inutile con una diga di arena, tanto imponente sia per mole che per celerità di accumulamento, da non permettere nemmeno che nascesse la voglia e l'ardire di lottare contro ad una opposizione così fiera e potente*. Nel 1861 fu fatto un nuovo tentativo per girare *ad altro vento la foce del ravvivato canale di Ansedonia*, ma anche in questo caso si andò incontro a fallimento, *perciocché colla solita stabilità e prontezza il flutto marino ostruiva la nuova foce, senza riguardo veruno alla sua nuova esposizione!*

I tentativi sul Tombolo di Feniglia vennero temporaneamente abbandonati per dedicarsi, nel 1867, ad un progetto analogo su quello della Giannella, tra Casa di Giannella e la foce d'Albegna: un canale *sormontato da stabile ponte-cateratte, e fiancheggiato allo sbocco marino da elevati muri*. Questo doveva essere il capo del

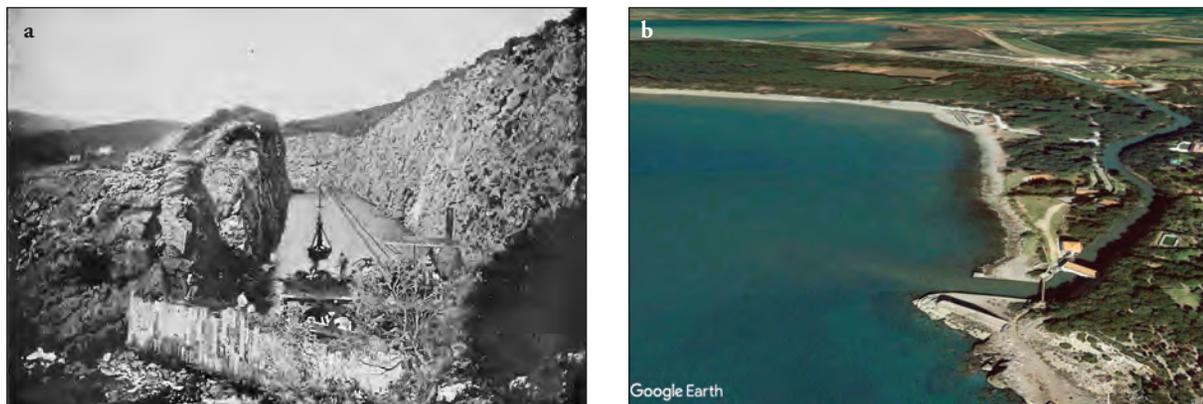


Figure 14 a, b. Il nuovo canale di Ansedonia a) In una foto da Nicolosi 1910 b) In un'immagine di GoogleEarth.

canale allacciale, in cui doveansi raccogliere tutte le acque, che possono discendere dalle gronde orientali del lago, ma anche qui l'insabbiamento rese vano ogni sforzo.

Secondo il Ministero che aveva sostenuto la chiusura di Fibbia, il canale di Nassa era allora *largo metri 4,80* cosicchè l'acqua marina vi circola in quattro direzioni diverse mantenendo da *Giugno sino a Settembre* le acque nel lago di Orbetello a *42 centimetri, termine medio, al disopra del livello del prossimo mare* (Antonelli 1870a).

Pochi anni prima, i due canali paralleli di Nassa avrebbero avuto un'ampiezza complessiva di *3,11m con piccolissime profondità* rispetto al livello del mare: *0,65 m* la prima, *0,75 m* la seconda (Pareto (1867)). La luce di poco più di *3 metri* era peraltro ostruita da reti e cannicci dei pescatori. Graticciate e cannicciate connotavano l'intera laguna trasformandola in *un arcipelago di stagnetti*. Un fenomeno ancor più evidente a Terrarossa, che dava una immagine *piuttosto di prateria che di superficie ondos*a (Moro 1877b).

Fu ancora una volta Pareto (1867) a studiare i flussi di Nassa. Il 15 dicembre 1866, *a mare basso e calmo perfettamente vide acqua nel canale di Nassa che scorreva, con la velocità di circa 0,20 m al secondo (non enorme davvero!), verso gli stagni*. Nell'occasione, egli cercò riscontri tra i pescatori, i quali dichiararono *che ciò succedeva con velocità variabili ma sempre nello stesso senso, da più di sette mesi*. Ciò - una volta escluse rapsodiche fasi di deflusso lagunare (conosciute come *stagnese*) seguite a piogge intense accompagnate da *forti burrasche*

capaci di ribaltare i flussi - stava a significare che le acque dolci, dal maggio precedente, non erano uscite dalla laguna.

Baccarini nel 1872 ricorda che le bocche di Nassa e Fibbia sono regolate da cateratte: le due di Nassa hanno rispettivamente la larghezza di *Metri 1. 90* e di *Metri 1. 21*, mentre una sola interclude il Fosso di Fibbia restringendolo a *Metri 1. 58*. Fu in questa situazione che si decise per l'ampliamento del canale di Nassa (adesso attraversato da un ponte a tre arcate, la corda o luce viva delle quali è di *m. 5.04*) e per la riapertura di Fibbia: due operazioni che risultarono tutt'altro che risolutive. Oggi le due bocche a mare di Nassa - Santa Liberata superano insieme i *30 m*, mentre quella di Fibbia si apre solo per circa *20 m*.

L'esigenza di aumentare i flussi spingerà lo stesso Baccarini a proporre *una somma di aperture anche più di dieci volte maggiore di quelle riunite di Nassa e di Fibbia* e ad insistere per la realizzazione del canale di Ansedonia, tagliato *in una sporgenza di vivo scoglio, contro il quale si spezzano i marosi che vi si accavallano profondi e non vi permettono i sedimenti delle materie che tengono in sospensione o che sono convogliate dalla corrente litorale*. Come anticipato, anche il nuovo piano, portato avanti sino al 1882, non risolverà il cronico problema del dissesto idraulico lagunare.

Orbetello non demorde, e lo stesso anno riprendono i lavori che prevedono, tra l'altro, il ria-



Figure 15 a,b,c . Tagliata etrusca e spacco della Regina; a) in Del Rosso (1905). La freccia rossa indica lo sbocco a mare della Tagliata (Bagno della Regina), quella blu lo sbocco a mare dello Spacco; b) L'ingresso della Tagliata nel 2019 (foto Valentina Ugolini); c) Il Bagno della Regina nel 2019 (foto Valentina Ugolini).

dattamento di Nassa per il passaggio di imbarcazioni di maggiore stazza (Fanciulli, 1999). Riprende anche forza l'idea di aprire il canale di Ansedonia. A questi lavori si dedica l'impresa Dani che, nel 1885, come anticipato, dopo l'insuccesso nello scavo dei canali allacciati, fallisce anche ad Ansedonia. Si arriva così al 1897, dopo altri dieci anni di lavoro, si apre lo sbocco al mare del canale: a fine anno una mareggiata schianta la tura posta a quasi 2 km dalla bocca al mare per penetrare in laguna trasportando *rene e alche della Feniglia* tanto che *questa ne fu per centinaia di metri all'entrata del canale nel lago, tutto ripieno*.

All'inizio del secolo scorso la laguna è ancora alimentata da due sole bocche: quella di Nassa è regolata da paratoie metalliche, quella di Fibbia da cateratte in legname (Nicolosi, 1910). Entrambi hanno *una sezione di 16 m al fondo e 18 alla superficie, con la platea ad un metro sotto il livello medio delle basse maree* (De Magistris, 1899). Del Rosso (1905) descrive un canale di Fibbia o delle Saline lungo circa 3000 metri (una misura molto vicina a quella dei giorni nostri) *in buona parte interrato e si attende dallo Stato che lo riduca, almeno in parte, alla profondità stabilita in progetto; mentre ora in alcuni punti ha un tirante d'acqua assolutamente deficiente e diminuito notevolmente dalle erbe che nella stagione calda vi vegetano rigogliosamente*. Il canale di Ansedonia è chiuso da *una potentissima tura, posta per impedire la sua completa ostruzione che le forze del mare in pochi giorni compirebbero e ci si interroga sulle capacità progettuali etrusche dal momento che la limitrofa Tagliata (Figg. 15 a,b,c) resta da tremila anni, e senza alcuna annuale manutenzione, libera dal più lieve ingombro di alge e di rene*.

Superfici, fondali, rotte e percorsi lagunari

Nel mese di Ottobre 1866 poteva in gran parte passeggiarsi a piedi asciutti come il Giordano al passaggio dell'Arca e le poche acque che vi sono rimaste somigliano più un pantano, che il bacino di un lago (Antonelli, 1870a)

Oggi si considera che la laguna si estenda per circa 27 km², ma è un valore che, soprattutto nei secoli passati, era soggetto ad una significativa variabilità, se non altro stagionale (Tabella 1).

Superfici e fondali erano connotati da una significativa riduzione nel periodo estivo, ma non dobbiamo scordare l'altrettanto antico quanto rapsodico fenomeno delle gelate che nel XVII e XVIII, in piena Piccola Era

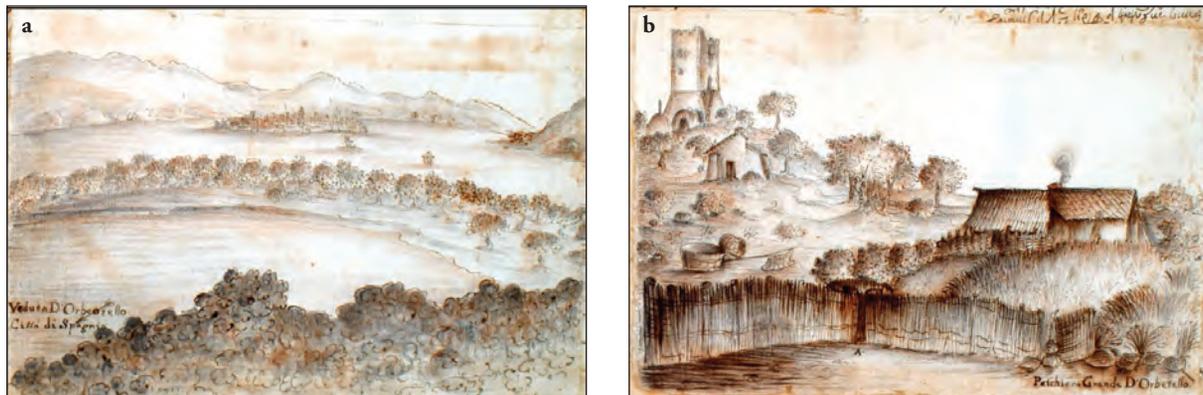


Figure 16 a, b. Vedute di Ignazio Fabroni, 1664-1687 (BNCF, Ms. Rossi-Cassigoli, su concessione del Ministero della Cultura/ Biblioteca Nazionale Centrale Firenze, riproduzione vietata) a) La laguna di Orbetello; b) La peschiera di Nassa.

Glaciale, investirono la laguna, come negli anni 1603, 1654, 1709, 1710, 1755 e 1788 (Dal Rosso, 1905; Fanciulli, 1992; Damiani, 2013). Significativa è la descrizione del primo evento, come riportata da Lambar-di (1866): *e per otto giorni tutta la sua superficie fu praticabile [...] giuochi ginnastici vi si fecero [...] Scioltosi il ghiaccio immensa quantità di pesce fu presa*.

Di solito la laguna gelava *soltanto intorno alle sue rive [...] ma nel gran freddo del 1789 si agghiacciò in tutta la sua estensione, e ne morì si gran quantità di Pesce, che nel disgelo si vedeva coperta l'acqua di olio animale, e di Pesci morti* (Santi, 1798). Il confronto delle misurazioni della superficie della laguna del passato (in certi casi anche con quello più recente) non è agevole. Regolata da numero ed ampiezza variabili dei canali di immissione e soggetta a forte evaporazione, la laguna inevitabilmente ha sviluppato situazioni effimere (come nell'esempio di emersioni o, al contrario di allagamenti dei contorni) ma altri ostacoli sorgono quando si

guarda al mese in cui sono effettuati i rilevamenti, e non mancano problemi derivati dal passaggio al sistema metrologico postunitario.

Pochi, dunque, sono coloro che azzardano stime, tra questi Santarelli (2015) che riferendosi al XVI secolo scrive di navi leggere che gettano l'ancora davanti alla città, *sebbene la laguna avesse all'incirca la stessa profondità della attuale*. A fine XVIII secolo Santi scrive di erbe lacustri *le quali staccate dalla forza dei venti son gettate alla sponda*. Nella lettera di Tolomei del 1544 si calcolava in 18 miglia il perimetro della laguna, e proprio a questo secolo risalirebbero le prime notizie sugli insabbiamenti (Damiani, 2013). Lo stesso perimetro (sollevando perplessità sull'effettuazione di nuove o comunque rigorose misurazioni), viene offerto da Lazzaro Spallanzani (1936) nel suo 'Viaggio nelle due Sicilie' della fine del XVIII secolo, da Giovan Battista Thaon in un documento riconducibile agli anni Venti del XIX secolo, e da Giovan Battista Brocchi (1818). Per quanto riguarda la superficie del lago - messi da parte gli eventi eccezionali come i temporali che nel 1758 e nel 1776 riempiono la laguna provocando l'evasione a mare del pesce (Del Rosso, 1905) - possiamo volgerci ad Antonelli (1870b) che riporta le stime offerte dalla letteratura ottocentesca. Si sofferma dunque sui dati forniti da Giorgini (1827), che calcola in circa 3.000 ettari l'area coperta dalle acque del lago *probabilmente nel suo massimo*. Riferisce poi della stima di Pareto (1867) che *ne ammette in estate per 23 milioni [di m²]*, e infine riporta il proprio calcolo pari a poco più di 26 milioni di m² *quando non si trattasse di straordinaria quantità d'acqua*.

Tabella 1. Superficie, fondale, livello e profondità della laguna

Superficie		
Intorno al 1827	Giorgini	30 milioni di m ² (massima capacità)
Prima della chiusura di Fibbia (ante 1860)	Antonelli	26 milioni di m ² (massima capacità) estate: 18 milioni di m ²
Dopo la chiusura di Fibbia (post 1860)	Antonelli	estate: 13 milioni di m ²
1867	Pareto	estate: 23 milioni di m ²
1870	Cocchi	32 milioni di m ² (incluse le gronde e gli acquitrini circostanti) ma solo da 26 a 30 milioni di m ² , a seconda della stagione, sono coperti dalle acque.
Fine del XIX sec.	Moro	26 milioni di m ²
1979	Brambati et al.	27 milioni di m ²
	Arpat	27 milioni di m ²
2017	Camiz et al.	ponente: 15 milioni di mq; levante: 12 milioni di m ²
2022	Provenza e Barbagli	ponente: 16,631 milioni di m ² ; levante: 10,455 milioni di m ²
Fondale		
"Tempi antichi"	Pincherle	4 m, ovvero 3 m più basso di quello del 1988 (h massima 1 m)
"Tempi antichi"	Moro	5 m
Prima decade XIX sec.	Giannetti	sotto i 4 m (h massima)
Livello		
1867	Pareto	da maggio a dicembre: può essere sotto il livello del mare
1870a	Antonelli	da giugno a settembre: mediamente 42 cm sopra il livello del mare
Anni Settanta del XIX secolo	Moro	estate: 80 cm sotto il livello del mare ottobre: 50 cm sotto il livello del mare
1879	Ademollo	con piogge abbondanti: 97 cm sopra il livello del mare estate: 80 cm sotto il livello del mare

1883	Dani	agosto: 25 cm sopra il livello del mare settembre: 15 cm sopra il livello del mare ottobre: 20 cm sopra il livello del mare
Profondità		
Prima metà XVII secolo	Pincherle	Area a contatto con le mura: 1.70 - 1,80 m ovvero 70 - 80 cm più alto di quello del 1988 (h massima 1 m)
Prima della chiusura di Fibbia (ante 1860)	Antonelli	Estate 45 cm (dato raccolto da testimonianze di pescatori e frequentatori della laguna)
Dopo la chiusura di Fibbia (post 1860)	Antonelli	Estate 25 cm (dato raccolto da testimonianze di pescatori e frequentatori della laguna)
1866	Pareto	h massima: 1,70 m
1870	Cocchi	h media: circa 1.30 m
Anni Settanta del XIX secolo	Moro e Ademollo	h media: 1,50 m nell'area centrale: 2 m (h massima) in prossimità delle gronde: 20 cm
1899	De Magistris	giugno: ponente 1,48 m; levante 1,45 m (con una depressione centrale di h massima pari a 4.40 m)
1976	Mari	0.50 m-1.70 m (non supera i 2 m)
1979	Brambati et al.	h massima: 1,50 m levante: Feniglia, h media 0.6-0.9 m; istmo di Orbetello indicativamente 1.5 m ponente: Giannella, h media 1.3 m circa; istmo di Orbetello media 0.6-0.9 m
1988	Pincherle	h massima: 1 m

Se guardiamo ai 27 ettari circa della superficie del terzo millennio, i calcoli operati dopo la costruzione del ponte diga possono essere considerati coerenti (come ammesso dallo stesso Antonelli) anche nell'evidenza di un restringimento della superficie dopo la chiusura del canale di Fibbia. Lo stesso Antonelli (1870b) avverte *che ogni piccola differenza d'altezza d'acqua nello Stagno comporta una differenza enorme nella superficie del fondo lasciata scoperta*. Sulla base di colloqui con i pescatori che fornirono anche le altezze minime estive, egli calcola che nelle estati precedenti alla chiusura di Fibbia, il lago si riduceva a 18 milioni di metri quadrati: dopo la tura si sarebbe ridotto a 13 milioni cinquecento ettari più di quel fondo allo scoperto, e assai meno della metà dell'acqua; risultandone, coi dati premessi, 3 milioni e 250 mila metri cubi in questo, e 8 milioni e 100 mila in quel primo. Cocchi (1870) fornisce stime diverse, scrivendo di una superficie lagunare di circa 32 km² comprese le gronde e le terre paludose collocate specialmente alla estremità [...] de' quali solamente da 26 a 30 chilometri a seconda della stagione sono coperti dall'acqua.

Quel che è certo (le stime guardano alla seconda metà del XIX secolo, ma con tutta probabilità un fenomeno analogo doveva presentarsi anche nei secoli precedenti) e vista la situazione dei canali a mare, la superficie della laguna doveva fare i conti con gli effetti della evaporazione quando il livello si abbassava *fin a quasi un metro sotto il livello del mare [...]* Ond'è che per più mesi, da aprile a dicembre rimangono scoperti amplissimi tratti di gronde. Angeli (1870) ammette che in estate il livello è più basso di quello del mare, ma aggiunge che questo viene parzialmente riequilibrato grazie all'ingresso di acqua marina dai canali di Nassa e Fibbia, che però non riescono a recuperare il livello prodotto dall'acqua piovana e scolanti dalle colline. Antonelli (1870b) riporta delle stime pluviometriche utili anche ad un confronto con le precipitazioni dei nostri giorni: *in questi nostri climi la quantità della pioggia annuale, o non eccede il metro, o di poco lo supera ma in caso di forti piogge, in 24 ore cadono da 6 a 10 centimetri d'acqua [...]* quindi se per le accennate cause di dispersione, si computi a tre quarti quella che dalle gronde scende nel lago, vedremo ascendere a 26 milioni di metri cubi l'acqua che in un anno vi cade direttamente, e a 29 e mezzo quella che vi cala dal terreno circostante

Una certa concordia si riscontra tra i diversi autori nel ritenere che nell'ultimo secolo l'accumulo sedimentario fosse andato crescendo. Coloro che non accettano la chiusura di Fibbia come causa del restringimento delle acque lagunari, guardano ad un innalzamento dei fondali e ad un restringimento delle superfici dovuto

a fenomeni di dilavamento dall'Argentario, al diffondersi della vegetazione lacustre, all'apporto di sedimenti dal mare e dai fiumi che *si depositino di mano in mano lungo le gronde restringendo gli specchi dell'acqua di tutto lo spazio corrispondente al loro volume* (Baccarini, 1872).

La testimonianza diretta di Ademollo (1881) rivela un rapido restringimento della superficie lagunare dopo la costruzione del ponte diga (che tuttavia riceve il plauso dell'autore), e la perdita di un antico equilibrio dovuto anche alla chiusura, tra 1860 e 1870, del Canale di Fibbia. Nel suo scritto si può leggere: *Io mi rammento che il piano di Terrarossa all'estremità sud della diga, 30 anni or sono era molto, ma molto più ristretto. Altrettanto si osserva dalla parte di Ansedonia e della Via Aurelia [...] ovunque è protrazione delle sponde, ovunque è rimpicciolimento del lago [...] Tutti rammentiamo che 20 o 30 anni or sono il lago aveva una maggiore estensione ed una maggiore profondità anche nell'estate.*

Anche se in letteratura compaiono ipotesi su un fondale lagunare alto fino al doppio di quello riscontrato nella seconda metà del XIX secolo (e triplo rispetto a quello attuale), gli scandagli (uno sotto la diga e tre al centro dei due bacini) eseguiti da Moro (1877b) avrebbero rilevato tre metri di melma *sopra il nativo suo fondo postpliocenico*, dunque *originariamente lo stagno aveva tre e più metri di maggior fondezza* riconducendoci a fondali di oltre 5 metri. Lo spessore dei depositi sedimentari va però velocemente decrescendo fino a ridursi a pochi centimetri in prossimità delle gronde.

Santi (1798), scrivendo di una laguna attraversata da piccole barchette a fondo piatto e *che tali son tutte quelle usate nello Stagno*, ci riporta a bassi fondali che dovevano connotare la laguna anche nel secolo precedente. Nell'occasione dell'assedio dello Stato dei Presidi da parte dell'esercito francese (a. 1646, Figura



17), Orbetello venne attaccata da truppe di fanteria con l'ausilio di imbarcazioni di basso pescaggio, rinunciando alle navi utilizzate contro le fortezze dell'Argentario. È però una memoria di Filippo Giannetti dei primi decenni del secolo XIX a ricordare che, prima della costruzione del ponte, la profondità massima poteva arrivare e poco meno di 4 metri.

Come già scritto, Pincherle (1989), quando la profondità della laguna non superava il metro, eseguì delle perforazioni nell'area lagunare a contatto con le mura che sono riassunte in Figura 18. I

Figura 17. L'assedio di Orbetello e dell'Argentario nel 1646 (Mattahus Merian, 1593 – 1650, Collezione privata Enzo Pranzini).

sondaggi condussero a rilevare una paleria infissa su quello che fu ritenuto essere il fondale del XVII secolo, suggerendo un'altezza maggiore di 70 - 80 cm e un fondale antico posto 3 metri sotto a quello del 1988.

Dopo la chiusura del canale di Fibbia, Antonelli (1870a) consultò pescatori e frequentatori del lago, che gli raccontarono di come in estate l'altezza media sul fondo potesse stimarsi in circa 45 centimetri e *che dopo la detta chiusura non può ritenersi che giunga a 25*. È ancora Padre Antonelli (1870a) ad osservare che, due anni dopo la chiusura di Fibbia, *le acque riscontravansi stremate di tanto, che più della metà del fondo di quel bacino era allo scoperto [...] nel mese di Ottobre 1866 poteva in gran parte passeggiarsi a piedi asciutti come il Giordano al passaggio dell'Arca e le poche acque che vi sono rimaste somigliano più un pantano, che il bacino di un lago.*

Alla diminuzione dei livelli si associò la diffusione di *casi di febbri endemiche, proprie delle paludi malsane* e in estate lo stagno in secca ospitava una grande quantità di insetti ed esalava *una prodigiosa quantità d'idrogeno solforato e bollicine di gas fetentissimo* (1872).

Igino Cocchi (1870) riferisce di una profondità media della laguna di circa 1,30 m. Si apre allora un dibattito dove Angeli (1870) imputa la cosa ad un significativo innalzamento del fondale, mentre Antonelli lo nega

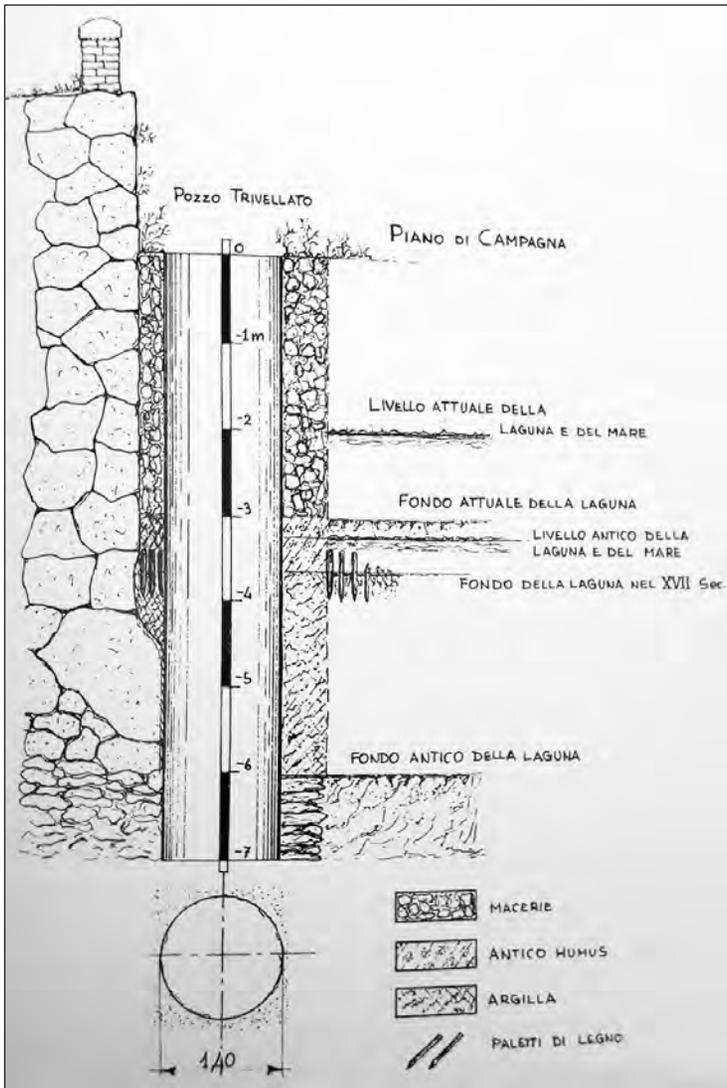


Figura 18. I carotaggi eseguiti a fianco delle mura da Mario Pincherle (1989).

(se fosse avvenuto un riempimento di fondo, lo specchio avrebbe dovuto dilatarsi) per propendere verso una diminuzione degli apporti idrici.

Nella sua visita alla laguna del dicembre 1866, Raffaele Pareto (1867) si sofferma anche sui fondali: [lungo la terraferma] il fondo è melmoso e di belletta, mentre è sabbioso lungo i tomboli, e ghiaioso e sassoso alle falde del Monte Argentario. Ciò si spiega con le torbide finissime degli scoli di terraferma, mentre dall'Argentario rotolano soltanto ciottoli e ghiaie. Egli scrive che a maggio e dicembre gli stagni possono avere ed hanno un livello più basso di quello del mare: addirittura il 15 Dicembre 1866 esso [è] ancora più basso non solo delle acque medie, ma altresì di quelle di bassa marea con mare calmo e senza venti che spingessero il mare alla costa. Il punto più profondo della laguna non supera 1,70 m, ma è la situazione delle gronde che più preoccupa l'ingegnere. Queste hanno lievissima pendenza lungo la terra ferma, trovandosi quindi ridotte a mere paludi. Le gronde emergenti si facevano più ampie sul tombolo della Giannella, ma Quando il mare alla spiaggia alzasi più di un metro, il livello degli stagni può essere portato assai più alto di quello del mare: può allora iniziare fase di stagnese, ovvero sia lo scarico a mare.

Ciononostante, la causa principale della diminuzione delle acque in laguna resta l'evaporazione. Sempre secondo Pareto, il dislivello aumenterà quando i nuovi canali lagunari entreranno in funzione, perché trascineranno fuori dal lago le acque di molti scoli che valgono a compensare l'evaporazione e la loro perdita non potrà essere compensata dalla sola peschiera di Nassa e dagli scoli di Monte Argentario. L'evaporazione poteva avere anche un effetto positivo, perché, secondo Thaon di Revel (s.d.) *L'acqua è molto salsa, sicché nell'estate in molti luoghi, ove le acque si evaporano del tutto, rimane sopra la nuda arena un'efflorescenza salina abbondantissima in parecchie migliaia di libbre, le quali a malgrado della rigorosa vigilanza pure di contrabbando sono poste in commercio.*

La situazione sanitaria si fa più critica intorno alle gronde verso terra che hanno, diversamente dalle sabbiose dei tomboli, e da quelle di ciottoli e ghiaie adiacenti all'Argentario, fondi melmosi. All'innalzamento dei fondali concorrono gli scarichi urbani e le cloache che formano depositi pestiferi emergenti intorno ad Orbetello. Una situazione che ha contribuito allo spopolamento e alla rovina dei casolari, che fino a pochi decenni avanti costellavano l'istmo di Orbetello, e più in generale le sponde del lago.

Non per questo Pareto (1867) appoggia la richiesta di riaprire velocemente Fibbia e di abbandonare tutto quanto fatto per i canali allacciati. Egli riteneva scontati i vantaggi resi dalla navigabilità interna e, indipendentemente dalla malaria, dalla fine del miscuglio di acque dolci e salmastre. I nuovi canali avrebbero favorito il deflusso dei sedimenti e, una volta accompagnati da opere di difesa dai materiali grossolani dell'Argentario, avrebbero potuto contribuire a stabilizzare il fondo e rallentare la colmata del lago. Chiamato a prendere

posizione sulla controversia tra Angeli, Giorgini e Padre Antonelli, pur riconoscendo le argomentazioni di coloro che vedevano nella chiusura di Fibbia la ragione dell'abbassamento dei livelli lagunari e della riduzione del pesce, Pareto non concorda con la riapertura ma suggerisce di insistere sui lavori per i nuovi canali a mare di Ansedonia e Giannella.

Quello che sappiamo è che la riapertura di Fibbia (1870) non migliorò di molto la situazione. In Moro (1877b), si fa ampio riferimento allo studio di Baccharini sulle Maremme per scrivere che nei mesi di luglio agosto e settembre l'evaporazione riduceva di 70 cm l'altezza delle acque della laguna. Calcolando che Nassa e Fibbia facevano affluire 24.000 m³ al giorno si stimò che, per contrastare l'evaporazione, fosse necessario un afflusso quotidiano 10 volte maggiore: 240.000 m³. Moro tornò allora sull'ampliamento dei canali di immissione esistenti e sull'apertura del Canale di Ansedonia, l'unione delle due bocche di Nassa nonché il raddoppio dei tempi di immissione: da 12 a 24 ore al giorno. Negli anni in cui Moro si trova ad operare, le profondità massime individuate nell'area centrale della laguna non superano i due metri e vanno gradual-



Figure 19 a, b, c. La laguna intorno 1819 (Giacomo Passerini, ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, 524/I, intero e dettagli, riproduzione vietata). b) Rotta lagunare da e per Porto Santo Stefano c) Passaggi pedestrì e settori percorribili da cavalli e carri in periodo di bassi fondali.

mente decrescendo verso le gronde fino ad un velo d'acqua di circa 20 cm. In estate il livello scendeva fino allo zero dell'idrometro, ossia a circa 80 cm sotto quello del mare. Anche i fondali da lui osservati - composti da una materia che *non è limo argilloso calcareo ma una poltiglia carica di sostanze carboniche, idrogenate, azotate, iodate e fosforate costituita da spoglie vegetali e animali con frantumi bianche di conchiglie del genere pecten* - destavano forte inquietudine. Una preoccupazione condivisa da Del Rosso (1898). Egli allargò le osservazioni alle *materie volatili che sopra vi soffiano i venti* e alla vegetazione lagunare, che si sperava di debellare con la corrente provocata dall'apertura di più bocche e con escavazioni quotidiane. Si calcolò infine (il dato trovò concordi Padre Antonelli e Giovanni Moro e venne accettato dal Baccarini) che nei quattro mesi estivi evaporavano circa 20 milioni di mc (pari a circa 160.000 mc quotidiani).

Nuove stime sulla profondità del lago arrivano a fine secolo grazie allo studio di De Magistris (1899) che effettuò, nel mese di giugno, *60 scandagli nel lago a destra 70 in quello di levante* e trovò che la profondità massima delle lagune era rispettivamente 1,48 e 1,45 m. Sotto l'apertura centrale del ponte lunga 28,40 m insisteva una zona di depressione *come un imbuto* con una profondità massima di 4,40 m. Una cavità che si è andata riempiendo alquanto *negli ultimi 10 anni cioè dopo l'apertura dei tre canali* che, del resto hanno avuto il merito di regolarizzare *il livello dei due laghi [...] che seguono le oscillazioni del Mar Tirreno*.

A circa cento anni di distanza dai dati forniti da Padre Antonelli, Mari (1976) fornisce stime che propongono una *profondità molto modesta (0,50-1,70 m.) che non supera mai i due metri* mentre sono Brambati et al. (1979) a guardare alla morfologia di fondali *piatti, privi di canali naturali nonché di quei caratteri morfologici (barene, piane di marea, ghebbi etc.) che sono peculiari delle lagune, strettamente dipendenti dal flusso e riflusso delle maree*. Il forte dislivello tra i fondali prossimi alle gronde rilevato in Moro (1877b) sembra stemperarsi nella laguna di Levante, dove i fondali degradano lievemente dal Tombolo di Feniglia (con profondità medie di 0,6-0,9 m) verso l'istmo di Orbetello raggiungendo qui le massime profondità (indicativamente 1,5 m). Simili quote si ribaltano a Ponente, dove la massima profondità (1,3 m circa) si riscontra lungo il Tombolo della Giannella, per diminuire gradualmente verso l'istmo (mediamente 0,6-0,9 m).

Abbiamo visto che i bassi fondali e le vaste aree che emergevano in estate creavano collegamenti naturali sfruttabili a piedi o a cavallo. Questi percorsi affiancavano il tradizionale trasporto su imbarcazioni di basso pescaggio. Prima della costruzione del ponte e degli interventi della seconda metà del XIX secolo, la più frequentata rotta lagunare per il trasporto di persone e merci da e per l'Argentario non toccava la vicina Terrarossa e non profittava dell'apertura di Nassa (Figg. 19 a,b,c). Da Orbetello le imbarcazioni dirigevano verso la parte meridionale della Giannella per scaricare davanti alla Torre al Pino (oggi Casa al Pino) profittando di un piccolo pontile (Figura 20).

Da qui si approfittava dei circa 400-450 m della Via del Pino che attraversava perpendicolarmente il tombolo (Figura 20) per ricaricare le merci su imbarcazioni dirette a Porto Santo Stefano. Giovan Battista



Thaon (s.d.) scrive che *nella stagione estiva potrebbe guardarsi [sic!] in tutti i punti se non vi si opponesse la qualità del suo fondo*, mentre Giorgini (1827) aggiunge che in estate *una parte considerevole del di lui fondo [resta] scoperta ed esposta ai cocenti raggi del sole [tanto che risulta] praticabile alle Vetture*.

Nel tentativo di dare ordine alla narrazione degli interventi lagunari ottocenteschi, abbiamo fin qui trascurato la rete di canali allacciati. E' questo un progetto di carattere polifunzionale più volte tentato nella laguna di Orbetello e,

Figura 20. L'attraversamento della Giannella e il piccolo molo lagunare presidiato, nel 1824, dal fabbricato (poi Torre) del Pino (ASG, Catasto Generale Toscano, riproduzione vietata).

ancora una volta, solo parzialmente quanto tardivamente realizzato. Quando Pareto (1867) studia i locali fenomeni lagunari, si sta scavando l'allacciante della Giannella che corre lungo la gronda dello stesso tombolo e che doveva essere parte di una rete di comunicazioni destinata a perimetrare l'intera area lagunare con canali navigabili comunicanti arginati sul lato lagunare (Figura 21) e percorsi da imbarcazioni dal basso pescaggio (Figura 22).

L'opera - intesa anche a servire la miniera di ferro di Terrarossa (inaugurata nel 1874) che esige nuove comunicazioni verso Porto Santo Stefano - avrebbe dovuto garantire anche la separazione della fascia malsana delle gronde (dove più frequenti sono gli impaludamenti e gli effetti negativi della secca estiva) dal resto della laguna, nonché separare le acque dolci dalle salate per *raccogliere gli scoli di terraferma e portarli direttamente in mare* (Pareto, 1867).

Quello per la Giannella, al momento della visita di Pareto, avrebbe dovuto sfociare nel nuovo canale che tagliava l'omonimo tombolo (Figura 21) regolato da una cateratta *già costruita* che presto, come anticipato, sarà otturata dalle sabbie ed abbandonata insieme allo scavo degli allacciamenti. Baccharini (1872) non si diede per vinto e propose la ripresa dei lavori agli allacciamenti prevedendone una larghezza di fondo di tre metri.

Il primo di questi avrebbe dovuto accostarsi alla gronda di levante per collegare la Madonna delle Vigne (alla base del tombolo centrale) al canale di immissione di Ansedonia *con uno sviluppo di chilometri*



Figura 21. Il canale allacciante per la Giannella col taglio sul tombolo in un dettaglio della carta di Raffaele Pareto (1867, cfr Figura 11a).

5.5 1. Il secondo, *movendo da Portuso, si tiene alla falda di Monte Argentario fino alla peschiera di Nassa fornendo un cammino di chilometri 6.66*. Il terzo avrebbe prolungato per oltre 1 km quella porzione dell'allacciante della Giannella già scavata e poi abbandonata per connettersi al nuovo canale sullo stesso tombolo.

Un solo allacciante, con un nuovo tracciato, entrerà in attività a quasi mezzo secolo dal primo progetto (Figura 23). Dal 1908 (o 1907 secondo Mari, 1976) servirà la rotta Santa Liberata (Nassa) - Orbetello.

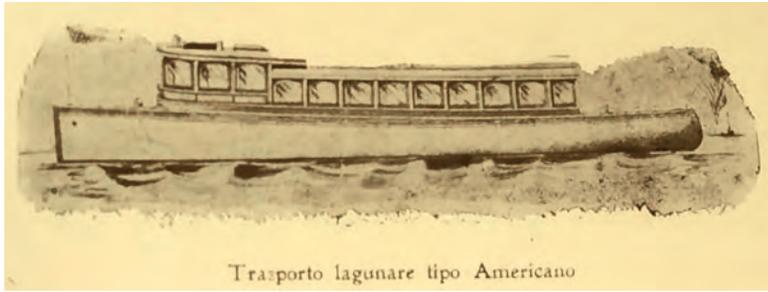


Figura 22. Imbarcazione adatta al traffico lagunare: lunghezza 15 m, larghezza 3 m, pescaggio massimo 0,40 m, velocità 15 km orari (Impresa Bartolomeo Dani, 1886).

Lungo 8,5 km, largo 12 m al fondo e 18 m al pelo d'acqua, con una profondità da 1,50 a 2,50 m, e risulterà particolarmente utile all'impresa Prodotti Chimici Colla e Concimi (poi Montedison) prossima alla stazione ferroviaria. Al tempo della visita di Alberto Mori (1931) il Canale di Nassa (ove insisteva un ponte girevole) ospitava un discreto traffico (circa 40.000 tonnellate l'anno) per l'esportazione dei concimi chimici e l'importazione delle fosforiti trasportate su barconi.

Conclusioni

L'analisi comparativa delle fonti suggerisce la massima cautela quando si utilizza la letteratura ottocentesca dedicata alla laguna di Orbetello. La prudenza verso la periodizzazione etrusco romano, suggerita da Ciampoltrini, va estesa anche a dati e stime del XIX secolo, che spesso risultano discordanti fra di loro. Possiamo pensare che fino all'inizio dell'Ottocento la laguna abbia vissuto un certo equilibrio sistemico (rapsodicamente messo in crisi da mareggiate, piogge eccezionali, gelate, ecc.) che si rafforza nella convivenza di pesca, navigabilità leggera e difesa militare su uno specchio d'acqua sostanzialmente esente dalla malaria. È un equilibrio che pare entrare in crisi quando si intende aumentare le funzioni della laguna: la

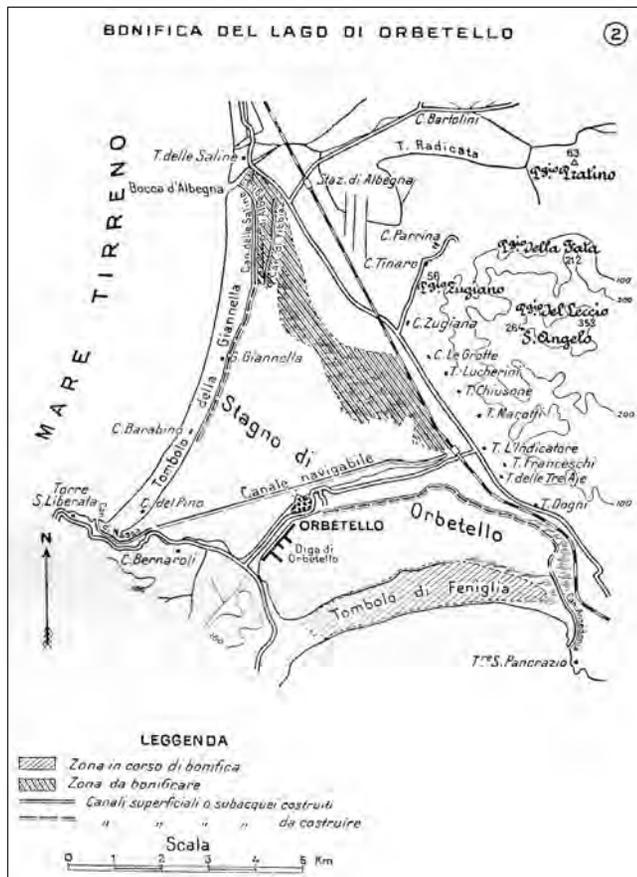


Figura 23. Nel 1915 il canale navigabile realizzato nella laguna di ponente (Tofani-Petrocchi 1930).

costruzione del ponte diga, i tentativi irrisolti di canalizzazione delle acque per una navigabilità capace di ospitare imbarcazioni di maggior pescaggio, le nuove attività di estrazione, la stessa ingegneria lagunare, il disboscamento della Feniglia, cui faranno seguito, a Novecento inoltrato, l'apertura di stabilimenti chimici e un'aviosuperficie per idrovolanti.

Tra coloro che scrissero su Orbetello, non mancano percezioni olistiche. Lambardi, che guarda alla terraferma e ai lavori per la nuova strada per Talamone e alla *cria*, ne fa esempio Luca. D'altro canto, e a partire dall'Unità d'Italia, uno dei primi o il primo pensiero che stimolò studi e progetti orbetellani, fu la risposta alla crisi di una economia locale che per secoli si era basata sulla presenza militare straniera e da cui, tutto sommato, aveva ricevuto frutti non del tutto disdicevoli. Certamente si operò con approssimazione, talvolta su progetti sbagliati, si dilapidarono ingenti capitali senza che si raggiungessero i risultati desiderati e, purtroppo, in questi termini, non sembra di parlare di due secoli fa.

Bibliografia

- Ademollo A., 1872. *La maremma toscana*. L'Ombrone periodico della provincia di Grosseto, numeri 37-41.
- Ademollo A., 1881. *Il lago di Orbetello nelle epoche antiche fino a noi*. L'Ombrone periodico della provincia di Grosseto, numeri 37-41.
- Angeli A., 1870. *Relazione intorno alla memoria del Padre Antonelli sullo stagno di Orbetello*. G. Barbarulli, Grosseto.
- Antonelli G., 1870a. *Sulle condizioni del lago di Orbetello, dall'anno MDCCCLIX all'anno MDCCCLXIX. Memoria di Giovanni Antonelli*. Calasanziana, Firenze.
- Antonelli G., 1870b. *Il lago di Orbetello: memoria seconda*. Calasanziana, Firenze.
- Baccarini A., 1872. *Sul compimento delle opere di bonificazione e sulla definitiva regolazione delle acque nelle maremme Toscane. Per Alfredo Baccarini ingegnere capo del genio civile a Grosseto (1872)*. E. Sinimbughi, Roma.
- Barocca N., 2012. *Maritima Regio. L'ambiente costiero nell'antico agro Cosano*. In: Ciacci A., Rendini P., Zifferero A. (a cura di), *Archeologia della vite e del vino in Toscana e nel Lazio. Dalle tecniche dell'indagine archeologica alle prospettive della biologia molecolare*. All'Insegna del Giglio, Firenze. pp. 459-474.
- Barsanti D., 2003. *Le bonifiche e le trasformazioni territoriali*. In: Guarducci A. (a cura di), *Orbetello e l'identità della Maremma: '800-'900*. Centro editoriale toscano, Firenze. pp. 27-36.
- Bartolini C., Corda L., D'Alessandro L., La Monica G.B., Regini E., 1977. *Studi di geomorfologia costiera: III - Il tombolo di Feniglia*. Boll. Soc. Geol. It., 96. pp. 117-157.
- Bellotti P., 2017. *La laguna e i suoi tomboli: meccanismi di formazione e caratteri sedimentologici*. In: Negroni Catacchio N., Cardosa M., Dolfini A., (a cura di), *Paesaggi d'acque. La laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana*. Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano. pp. 296-301.
- Boschian A. Bossio A., Dall'Antonia B., Mazzanti R., 2006. *Il Quaternario della Toscana costiera*. Studi Costieri n 12. pp. 3-207.
- Brambati A., Fanzutti G.P., Marocco R., Panella S., Magazzi G., 1979. *Caratteristiche sedimentologiche ed idrologiche della Laguna di Orbetello (Toscana)*. Archivio di Oceanografia e Limnologia, 19:179-222.
- Braun G., 1914. *Der Monte Argentario in Toskana*. Petermanns Geographische Mitteilungen.
- Brocchi G., 1818. *Osservazioni naturali fatte al promontorio Argentaro ed all'isola del Giglio: lettere del Sig. Brocchi al Signor Conte Bardi*. In: Biblioteca Italiana ossia Giornale di letteratura scienze ed arti, Milano. pp. 237-253.
- Bronson C., Uggeri G., 1970. *Isola del Giglio, Isola di Giannutri, Monte Argentario, Laguna di Orbetello*. Studi Etruschi XXXVIII. pp. 201-214.
- Cambi F., 1986. *L'archeologia di uno spazio geografico: il progetto topografico "ager cosanus" valle dell'Albegna*. Archeologia Medievale; Vol. 13. Pp. 527-544.
- Camiz S., Cappello I., Cardosa M., Coltorti M., Poscolieri M., 2017. *Il quadro geografico*. In: *Paesaggi d'acque*, a cura di N. Negroni Catacchio, M. Cardosa, A. Dolfini. La laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana. Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano. pp. 36-47.
- Capezzuoli M., 1982. *Lo Stato dei Presidi sotto Filippo II: la comunità di Orbetello*. In: Ferretti R. (a cura di), *Aspetti e problemi di storia dello Stato dei Presidi in Maremma. Temi di ricerca e contributi presentati all'incontro di studi svoltosi a Grosseto il 22-23 giugno 1979*. La Poligrafica, Grosseto. pp.71-89.

- Cardosa M., 2000. *La frequentazione protostorica del tombolo di Feniglia (Orbetello - GR)*. In: Atti del quinto incontro di studi preistoria e protostoria in Etruria, Milano. pp. 145-156.
- Cardosa M., 2017a. *Storia degli scavi e delle ricerche*. In: N. Negroni Catacchio, M. Cardosa, A. Dolfini, (a cura di), *Paesaggi d'acque. La laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana*. Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano. pp. 20-33.
- Cardosa M., 2017b. *Catalogo dei siti*. In: *Paesaggi d'acque*, a cura di N. Negroni Catacchio, M. Cardosa, A. Dolfini. La laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana. Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano. pp. 122-215.
- Cartei A., Bevilacqua M.G., Calvani C., Pierini R., Taddei D., 2015. *Orbetello, a fortress on the water. A research for the valorization of the city and its bastioned front*. In: *Defensive Architecture of the Mediterranean. XV to XVIII centuries*. Vol II. Rodríguez-Navarro. pp. 49-56.
- Cherubini A., Vannozi F., 1987. *Problemi storici e interpretativi in fatto di malaria*. *Rivista di Storia dell'Agricoltura* XXVII, n. 2. pp. 211-229.
- Ciampoltrini G., 1995. *Un pocolom e le mura di Orbetello*. *Archeologia Classica*, XLVII. pp. 289-302.
- Ciampoltrini G., 1977. *Albinia, fluvius habet positionem. Scavi 1983-1988 nell'approdo alla foce dell'Albegna (Orbetello, GR)*. *Rassegna di Archeologia*, 14. pp. 253-29.
- Ciampoltrini G., 2009. *L'insediamento costiero fra Chiarone e Albegna nell'Età del ferro. Nuovi dati*. In: Bruni S. (a cura di) *Etruria e Italia preromana*. Studi in onore di Giovannangelo Camporeale. Fabrizio Serra, Pisa-Roma. pp. 233-237.
- Ciampoltrini G., 2019. *Archeologia urbana a Orbetello*. In: Cardosa M. (a cura di), *Le antiche mura "etrusche" di Orbetello*. C&P Adver Effigi, Arcidosso. pp. 97-111.
- Cocchi I., 1870. *Note geologiche sopra Cosa, Orbetello e Monte Argentario nella provincia di Grosseto*. *Boll. Reg. Com. Geol. It.*, I, Firenze. pp. 277-309.
- Coltorti M., Ravani S., 2017. *Caratteri geomorfologici della fascia costiera compresa tra la foce del fiume Albegna, la Laguna di Orbetello ed Ansedonia*. In: *Paesaggi d'acque*, a cura di N. Negroni Catacchio, M. Cardosa, A. Dolfini. La laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana. Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano. pp. 48-63.
- Damiani G., 2013. *Laguna di Orbetello. Storia, lavoro e vita sociale dal 1414 al 1960*. C&P Adver Effigi, Arcidosso.
- De Magistris L.F., 1899: *I laghi costieri di Orbetello*. *Boll. Soc. Geog. It.* s. III, 12. pp. 259-261.
- Del Rosso R., 1898. *La bonifica del lago di Orbetello. Relazione del sindaco Raffaele Del Rosso*. Osvaldo Paggi, Pitigliano.
- Del Rosso R., 1905. *Pesche e peschiere antiche e moderne nell'Etruria marittima*. Piaggi, Firenze.
- Dolci M., 2014. *Paesaggi d'Acque. Survey della laguna di Orbetello e del Monte Argentario*. Lanx Rivista Della Scuola Di Specializzazione in Archeologia Università degli Studi di Milano. pp. 24-31.
- Dolci M., 2017. *L'età romana e tardo antica*. In: Negroni Catacchio N., Cardosa M., Dolfini A., (a cura di), *Paesaggi d'acque. La laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana*. Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano. pp. 344-368.
- Dolfini A., Dolci M., Ravasi T., 2008. *Il survey della laguna di Orbetello: per un'archeologia dei paesaggi relitti*. In: *Atti del IX Convegno di Preistoria e Protostoria in Etruria (Valentano-Pitigliano 2006)*. Milano. pp. 241-260.
- Fanciulli P., Santunione C., 1992. *Bibliografia Ragionata della Laguna di Orbetello*.
- Fanciulli P., 1999. *Storia documentaria dei Reali Presidios di Toscana: lo Stato dei Presidi nelle carte degli archivi spagnoli e italiani: oltre trecento documenti inediti degli archivi spagnoli (Simancas, Escorial, Madrid) e italiani (Firenze, Napoli, Roma)*. Laurum Editore, Pitigliano.
- Ferri S., Pranzini E., 2006. *Evoluzione del litorale dei tomboli della Giannella e di Feniglia*. In: Ludovico A. (a cura di), *La Laguna di Orbetello*, Graffietti stampati, Montefiascone. pp. 63-77.
- Giannetti F., s. d. [primi decenni XIX sec.], ASF, Segreteria di Gabinetto f. 158, ins. 7.
- Giorgini G., 1827. *Memoria intorno alla causa più probabile della insalubrità della Maremma letta all'Accademia dei Georgofili l'anno 1827*. In: Salvagnoli Marchetti A., 1846 *Memorie economico-statistiche sulle Maremme Toscane*. Le Monnier, Firenze.
- Giorgini G., 1860. *Rapporto del Direttore Idraulico*. In: Salvagnoli Marchetti A., *Rapporti a sua eccellenza il Governatore Generale della Toscana sulle operazioni idrauliche ed economiche eseguite nel 1859-60 nelle maremme toscane e pubblicate per ordine superiore*. Tipografia delle Murate, Firenze. pp. 3-40.

- Goiran J.P., Bertini A., Leporatti Persiano M., Vittori C., Brocard G., et al., 2023. *Histoire et paléogéographie des paysages côtiers d'Orbetello (Toscane): Une approche pluridisciplinaire pour l'étude des relations entre une ville et sa lagune*. Bollettino di Archeologia online, XIV(1). pp.163-183.
- Guarducci A., Piccardi M., Rombai L., 2009. *Acque di costa tra mare e terra: il paesaggio della pianura costiera di Pisa e Livorno secondo la cartografia del XVIII secolo*. Storia Urbana. pp. 35-58.
- Guarducci A., Kukavivic M., Piccardi M., Rombai L., 2011. *Linea di costa e torri di guardia in Toscana: il caso grossetano (dal XVII secolo ad oggi)*. In: Atti del quarto seminario di studi storico-cartografici. Dalla mappa al GIS. Brigati, Genova. pp. 187-211.
- Gulliver F.P., 1899. *Shoreline Topography*. In: Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, vol 34. Metcalf and Co, Boston. pp.151-258.
- Impresa Bartolomeo Dani, 1886. *Breve Censo Storico critico sulla condotta della Impresa Bartolomeo Dani nell'esecuzione dei lavori di risanamento al Lago di Orbetello*. Meucci, Livorno.
- Lambardi L., 1837. ASF, Segreteria di Gabinetto 242, ins. 2.
- Lambardi S., 1866. *Memorie sul Montargentario ed alcune altre sui paesi prossimi*. Tofani, Firenze. (rist. anast. Forni, Bologna, 1974).
- Lazzarotto A., Mazzanti R., Mazzoncini F., 1964. *Geologia del Promontorio Argentario (Grosseto) e del Promontorio del Franco (Isola del Giglio - Grosseto)*. Boll. Soc. Geol. It., fasc. 2, pp. 1-124.
- Lepore F., Piccardi M., Pranzini E., 2011. *Costa e Arcipelago Toscano nel Kitab i Babriye. Un confronto cartografico (secoli XIII-XVII)*. Felici Editore, Ghezano.
- Lotti B. L., 1891. *Note descrittive sul rilevamento delle tavolette di Orbetello, Talamone e Grosseto, nella Maremma Toscana*. Boll. Reg. Com. Geol. It., serie 3, vol.2. pp. 11-32.
- Ludovico A., 2006. *Assetto territoriale della Laguna di Orbetello*. In: Ludovico A. (a cura di), La Laguna di Orbetello, Graffietti stampati, Montefiascone. pp. 13-37.
- Marchi F. de, 1599. *Della architettura militare del capitano Francesco de' Marchi bolognese gentil'huomo omano libri tre [...]*. Comino Presegni, Brescia.
- Mari M.,1976. *Osservazioni sulla malacofauna delle lagune di Orbetello*. In: Atti della Società toscana di Scienze Naturali residente in Pisa, Memorie, Serie B Vol. LXXXIII. pp. 190-204.
- Marincich S., Provenza F., 2022. *Geomorfologia e idrodinamismo*. In: Renzi M. (a cura di), La laguna di Orbetello. Storia, ambiente, gestione e progetti futuri. Effigi, Grosseto. pp. 58-62.
- Marinelli O.,1921. *Stagni e paludi costiere in Italia*. Le vie di Italia, anno XXVII, n.1. pp 1137-1146.
- Martelli C., 1846. *La Maremma Toscana*. Memoria di Carlo Martelli. Stamperia Fabiani, Bastia.
- Mazzanti R., 1983. *Il punto sul Quaternario della fascia costiera e dell'Arcipelago di Toscana*. Boll. Soc. Geol. It., 102. pp 419-556.
- Mazzolai A., 1977. *Il Museo Archeologico della Maremma*. Arti Grafiche La Commerciale, Grosseto.
- Merciai G., 1910. *Mutamenti avvenuti nella configurazione del litorale tra Pisa e Orbetello dal Pliocene in poi*. Nistri, Pisa.
- Merciai G., 1929. *Sulle condizioni fisiche del litorale etrusco tra Livorno e Civitavecchia*. Studi Etruschi III. Firenze. pp. 347-358.
- Mori Alberto, 1931. *L'escursione geografica interuniversitaria in Maremma e nell'Amiata. Relazione del Dott. Mori Alberto*. Rivista geografica italiana, Vol. 38. pp. 76-97.
- Mori Assunto, 1931. *La sesta escursione geografica interuniversitaria nella Maremma Grossetana e nell'Amiata*. Rivista geografica italiana, Vol. 38. pp 532-556.
- Moro G., 1877a. *Il risanamento dello Stagno di Orbetello. Memoria prima*. In: Del Rosso R. (a cura di), 1898, La bonifica del lago di Orbetello. Relazione del sindaco Raffaele Del Rosso. Osvaldo, Pitigliano. pp. 40-49.
- Moro G., 1877b. *Il risanamento dello Stagno di Orbetello. Memoria terza*. In: Del Rosso R. (a cura di), 1898, La bonifica del lago di Orbetello. Relazione del sindaco Raffaele Del Rosso. Osvaldo, Pitigliano. pp. 83-98.
- Negrone Catacchio N., Cardoso M., Dolfini A., 2017. *Ricostruire il paesaggio antico*. In: Negrone Catacchio N., Cardoso M., Dolfini A., (a cura di), Paesaggi d'acque. La laguna di Orbetello e il Monte Argentario tra Preistoria ed Età Romana. Centro Studi di Preistoria e Archeologia, Milano. pp. 372-381.
- Negrone Catacchio N., Rossi F., 2019. *Duna Feniglia (Orbetello, Gr). Un insediamento produttivo dell'età del*

- ferro*. In: Bollettino di Archeologia On Line X, 2019/1-2. pp. 51- 66
- Nicolosi C.A., 1910. *Il litorale maremmano: Grosseto Orbetello*. Istituto Italiano d'Arti Grafiche, Bergamo.
- Pareto R., 1865. *Sulle bonificazioni, risaie ed irrigazioni del Regno d'Italia: relazione a S. E. il ministro di agricoltura, industria e commercio (Luigi Torelli)*. Tipografia e litografia degli ingegneri, Milano.
- Pareto R., 1867. *Relazione al ministro di agricoltura, industria e commercio (Filippo Cordova). Sugli stagni d'Orbetello in provincia di Grosseto*. In: *Giornale dell'ingegnere, architetto ed agronomo*, vol 15, Saldini, Milano. Pp. 257-268.
- Piccardi M., Pranzini E., 2014. *Carte a piccola, grande e grandissima scala negli studi sull'evoluzione del litorale. Cosa è successo a Bocca d'Arno tra il XVI e il XIX secolo? L'universo*, Anno XCIV, n. 5. pp. 8-38.
- Piccardi M., 2016. *L'onorata professione della militare e civile architettura. La breve e sfortunata storia del primo fortino di Bocca di Serchio (1758- 1793)*. In: *Fortificazioni nell'età Moderna sulla Costa del Mediterraneo (Fortmed)*. Didapress, Firenze. pp. 205-212.
- Piccardi M., Pranzini E., 2016. *Le foci del Serchio e del Fiume Morto nelle restituzioni cartografiche pre-geodetiche*. Studi Costieri, n. 23, Anno XCIV. pp. 21-58.
- Piccardi M., Pranzini E., Rombai L., 2018. *Historical cartography and coastal dynamics of the Apuan littoral in the modern and contemporary periods: the port of Marina di Carrara (Tuscany, Italy)*. e-Perimtron, vol. 13, n. 1. Pp. 32-49.
- Piccardi M., Correa I.D., Pranzini E., 2020. *Cispata bay and mestizos evolution as reconstructed from old documents and maps (16th–20th century)*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 669. pp. 1-27.
- Pincherle M., 1989. *Il porto invisibile di Orbetello*. Pacini, Pisa.
- Provenza A., Barbagli F., 2022. *Relazione tra uomo e ambiente antica nel tempo*. In: Renzi M. (a cura di), *La laguna di Orbetello. Storia, ambiente, gestione e progetti futuri*. Effigi, Grosseto. pp. 39-47.
- Pruker F., 1838. ASF, Segreteria di Gabinetto f. 158, ins. Acquedotto e progetto ponte Pruker.
- Raveggi P., 1933. *Ville imperiali romane nell'agro cosano*. *Maremma* n.s. 2, fasc. 3. pp. 3-8.
- Regione Toscana, TEI, HYDEA. GEOSYSTEM PARMA, DEAM, STG, 2006. Studio e ricerca per l'implementazione del quadro conoscitivo della costa toscana nell'ambito del Piano Regionale di Gestione integrata della Costa. Analisi petrografiche. Rel. Inedita.
- Rombai L., Ciampi G., De Vita M., 1979. *Cartografia storica dei Presidiosi in Maremma (secoli XVI-XVIII)*. Consorzio Universitario della Toscana Meridionale, Siena.
- Rombai L., Azzari M., 1993. *Imago et descriptio Tusciae: la Toscana nella geocartografia dal XV al XIX secolo*. Regione Toscana/Marsilio, Venezia.
- Rombai L., 2006. *L'amministrazione dello Stato dei Presidiosi/Presidiosi di Orbetello*. In: *Trame nello spazio. Quaderni di geografia storica e quantitativa. Mappe e potere. Pubbliche istituzioni e cartografia nella Toscana moderna e contemporanea (secoli XVI-XIX)*, All'Insegna del Giglio, Sesto Fiorentino, Pp. 145-147.
- Salvagnoli Marchetti A., 1846. *Memorie economico statistiche sulle Maremme Toscane*. Le Monnier, Firenze.
- Santi G., 1798. *Viaggio secondo per le due provincie senesi che forma il seguito del Viaggio al Montamiata*. Rannieri Prosperi, Pisa.
- Santarelli E., 2015. *Proposte e progetti per una città e per un grande porto nei Presidiosi di Toscana (Secc. XVI-XIX)*. *Progressus*, rivista di storia scrittura e società, anno II, n.1, Università di Siena. pp. 2-59.
- Savi P. 1839. *Alcune considerazioni sulla cattiv'aria delle maremme toscane*. Nistri, Pisa.
- Schmiedt G., 1964. *Contribution of photo interpretation to the reconstruction of the geographic-topographic situation of the ancient ports in Italy*. In: *Tenth Congress of International Society of Photogrammetry*, Lisbona. pp. 3-38.
- Shepard F.P., 1960. *Gulf Coast barriers*. In: Shepard F.P. et al. ed., *Recent Marine Sediments, North west Gulf of Mexico*. Tulsa, Okla. Amm. Ass. Petroleum Geologist, 338-344.
- Spallanzani L., 1936. *Le opere di L. S. pubblicate sotto gli auspici della Regia Accademia d'Italia*. U. Hoepli, Milano Officine Grafiche Fasciste, vol. 5., Reggio Emilia.
- Tartini F., 1838. *Memorie sul bonificamento delle Maremme Toscane*. Molini, Firenze.
- Thaon G. B., s.d. *Saggio Topografico e statistico nell'antico Stato dei Presidiosi* (ASF, Segreteria di Gabinetto, 668).
- Terramoccia I., 2008. *Orbetello: storia, cronaca, curiosità*. Effigi, Arcidosso.
- Tofani M., Petrocchi B., 1930. *Studi su trasformazioni fondiari. Maremma Toscana*. Vol. 2, Libreria internazionale Treves dell'Ali, Roma.

- Tolomei C., 1544. *Lettera di Angelo Claudio Tolomei a Nicola Cesano*. ASF, Segreteria di Gabinetto, 242, ins 2.
- Tolomei C., 1547. *De le lettere di M. Claudio Tolomei. Libri Sette. Con una breve dichiarazione in fine di tutto l'ordin de l'ortografia di questa opera. Con privilegio del sommo Pont. de la Cesarea Mae. del Senato Veneto e del Duca di Fiorenza per anni dieci*. Gabriel Giolito de Ferrari, Venezia.
- Uggeri G., 1982. *Il popolamento del territorio cosano nell'antichità*. In: Ferretti R. (a cura di), *Aspetti e problemi di storia dello Stato dei Presìdi in Maremma*. Temi di ricerca e contributi presentati all'incontro di studi svoltosi a Grosseto il 22-23 giugno 1979. La Poligrafica, Grosseto. pp. 37-53.
- Regione Toscana e UNIFI, 2015. *Quadro conoscitivo per la gestione dei sedimenti costieri*. Settori n. 52 e 53.

Fonti inedite manoscritte e cartografiche

- ASF, Segreteria di Gabinetto, filze 158, 242, 668.
- ASF, Catasto Generale Toscano, Orbetello.
- ASF, Carte Nautiche 13.
- ASF, Manoscritti, 785, c. 4.
- ASF, Mediceo del Principato, 1851, f. 67
- ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, Lavori stradali, idraulici, rurali e fabbricati, N° 546, 524 III, tavola II.
- ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, Lavori stradali, idraulici, rurali e fabbricati, N° 546, 524/II, tavola I.
- ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, Lavori stradali, idraulici, rurali e fabbricati, N° 546, 524 v, tavola IV.
- ASG, Ufficio de' Fossi e delle Coltivazioni di Grosseto, Lavori stradali, idraulici, rurali e fabbricati, N° 546, 524/I.
- BNCF, Carte geografiche, Nuove Accessioni, cart. 4, p.10.
- BNCF, Ms. Rossi-Cassigoli.
- BNFG, Cartes et Plans, GE D 15899 btv1b8493704j.
- BNFG, Marine, Portefeuille, 82 BIS, Div. 17, c. 3, btv1b8495604j.
- BNFG, Département Cartes et plans, GE D-16467, btv1b8494205j.
- BNFG, département Estampes et photographie, reserve qb-201 (39)-fol btv1b8404150j.
- Collezione privata Enzo Pranzini.

Ricevuto il 11/11/2023, accettato il 10/03/2024

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 Falciano¹, Marco Anzidei², Michele Greco^{3,4}, Maria Lucia Trivigno¹, Antonio Vecchio^{5,6}, Charalampos Georgiadis⁷, Petros Patias⁸, Michele Crosetto⁹, José Navarro⁹, Enrico Serpelloni², Cristiano Tolomei², Giovanni Martino³, Giuseppe Mancino¹, Francesco Arbia⁴, Christian Bignami², Fawzi Doumaz²

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

²Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Rome, Italy.

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

⁴Fondazione Ambiente Ricerca Basilicata (FARBAS), Potenza, Italy.

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

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

⁷School of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Thessaloniki, Greece.

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

⁹Centre 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), 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), 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 e 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.

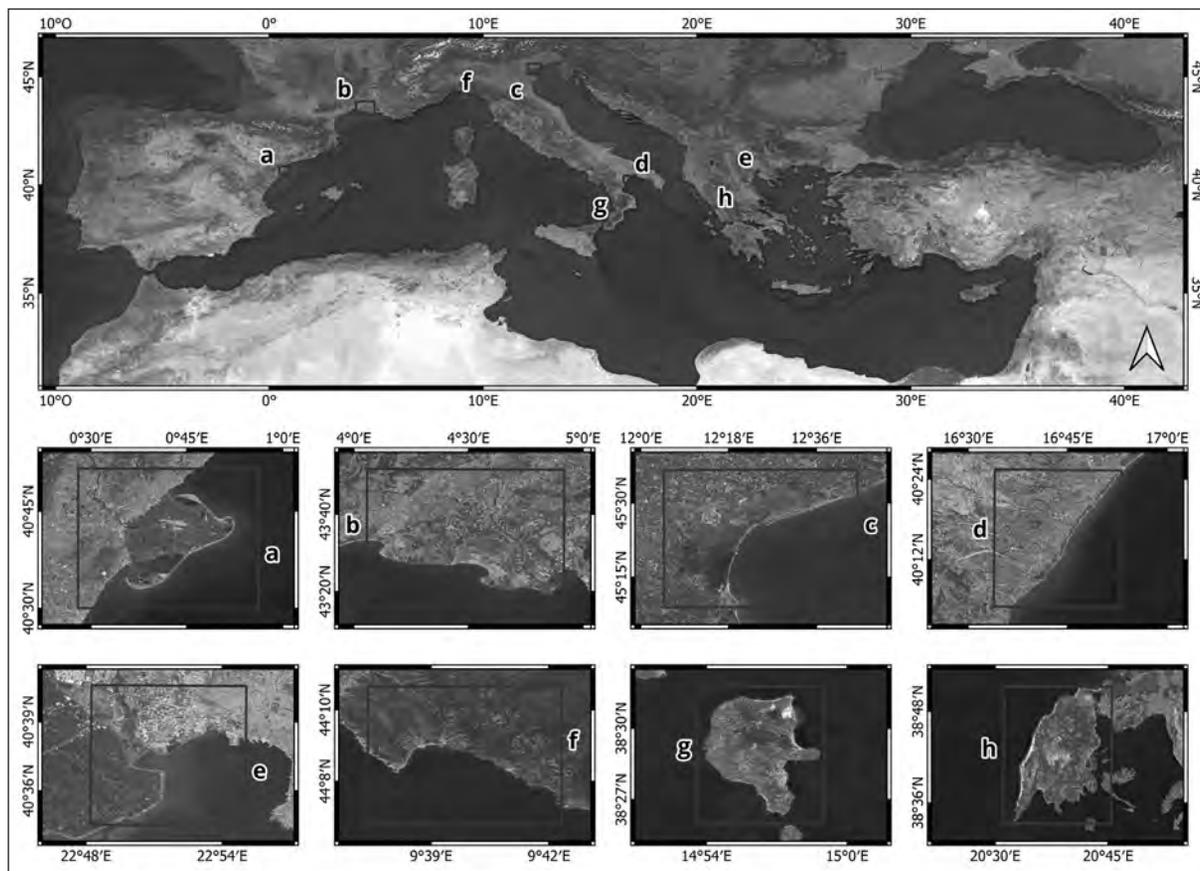


Figura 1. Aree di studio dei progetti SAVEMEDCOASTS e SAVEMEDCOASTS-2: (a) Delta dell'Ebro (Spagna); (b) Delta del Rodano (Francia); (c) Laguna di Venezia (Italia); (d) Piana di Metaponto (Italia); (e) Piana di Chalastra (Grecia); (f) Cinque Terre (Italia); (g) Isola di Lipari (Italia); (h) Isola di 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 ¹	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 ²	2011	2	0.3	0.15
Cavallino Treporti (Italy)	N/A ³	CVN ⁴	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

¹Instituto Geográfico Nacional (Spain). ²Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (Italia). ³Non disponibile. ⁴Consorzio 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-

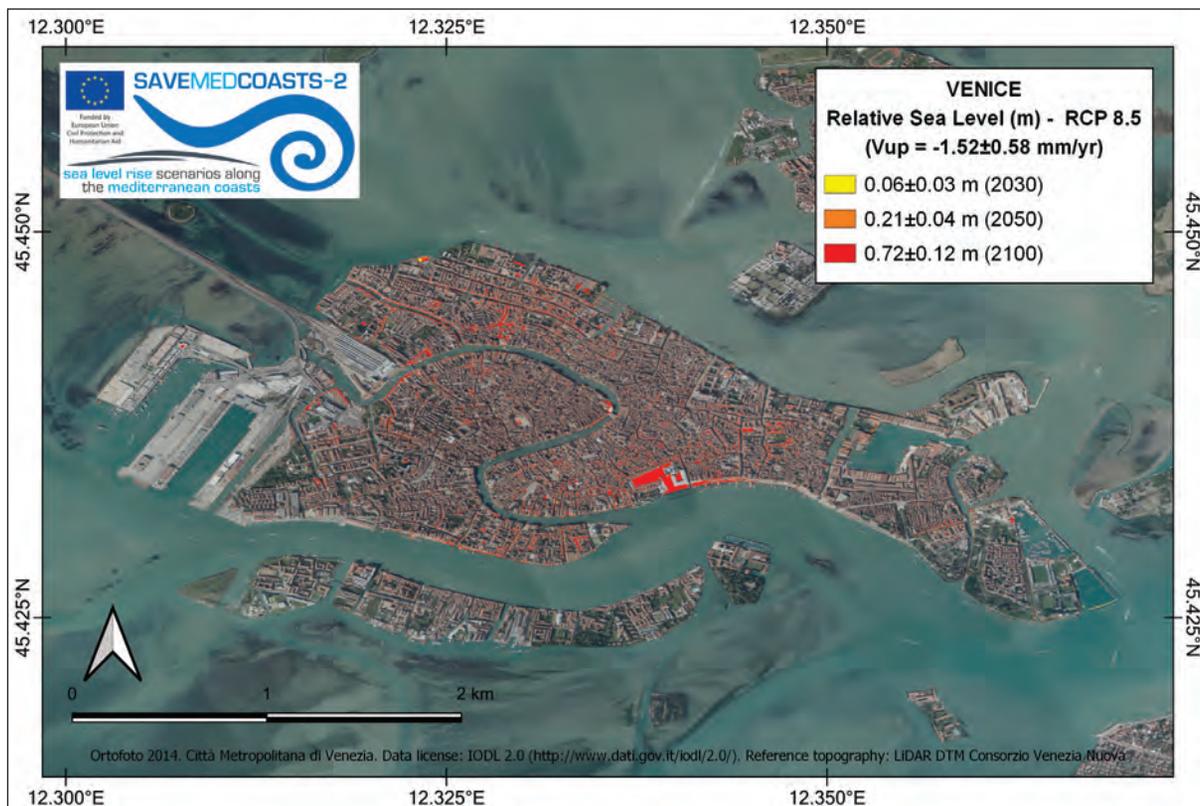


Figura 2. Mappa di Venezia con gli scenari di RSLR al 2030, 2050 e 2100 per le proiezioni climatiche RCP8.5 secondo il report AR5 di IPCC. Gli scenari includono il contributo della velocità media di subsidenza calcolata dall'analisi combinata InSAR-GNSS. Sfondo: Ortofoto 2014. Città Metropolitana di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

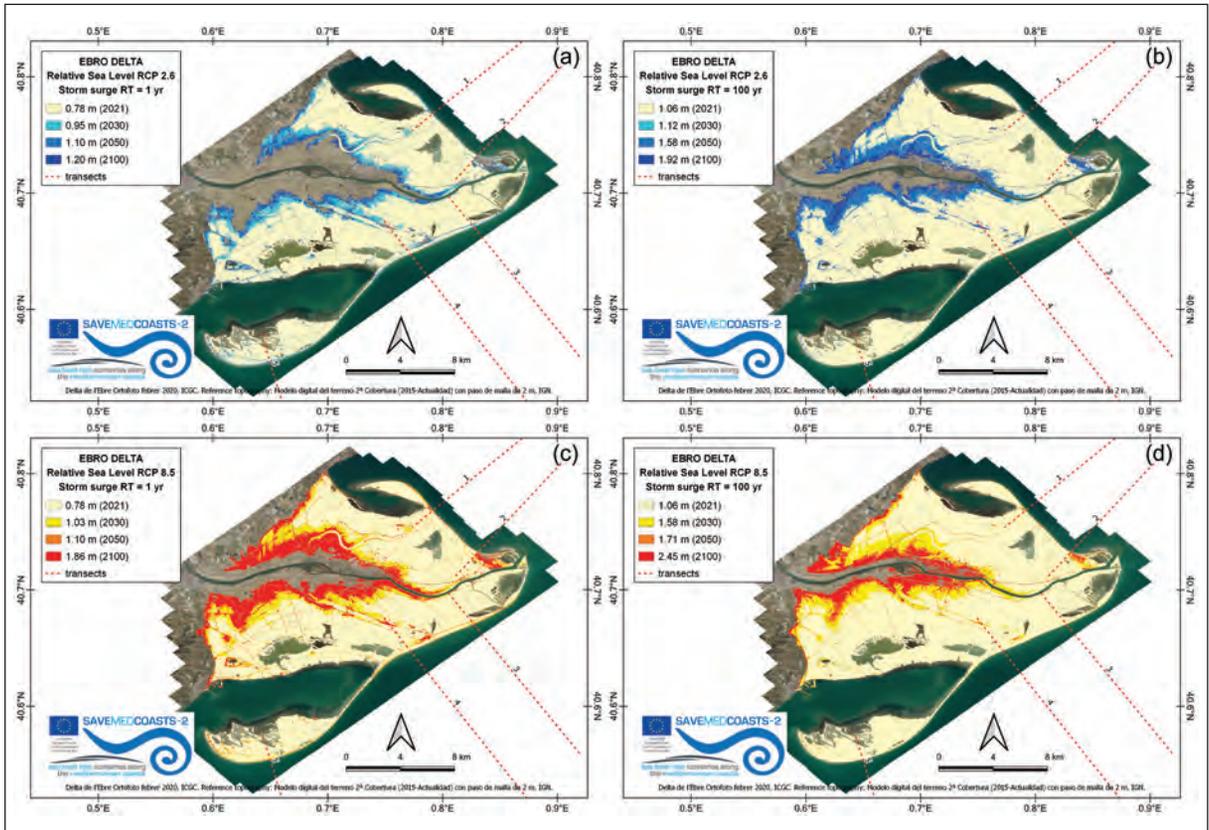


Figura 3. Delta dell'Ebros (Spagna). Scenari potenziali di inondazione costiero al 2021, 2030, 2050 e 2100 per le seguenti combinazioni di RSLR e mareggiata: (a) RCP2.6 e T = 1 anno; (b) RCP2.6 e T = 100 anni; (c) RCP8.5 e T = 1 anno; (d) RCP8.5 e T = 100 anni. Le aree inondabili sono mostrate in giallo 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.

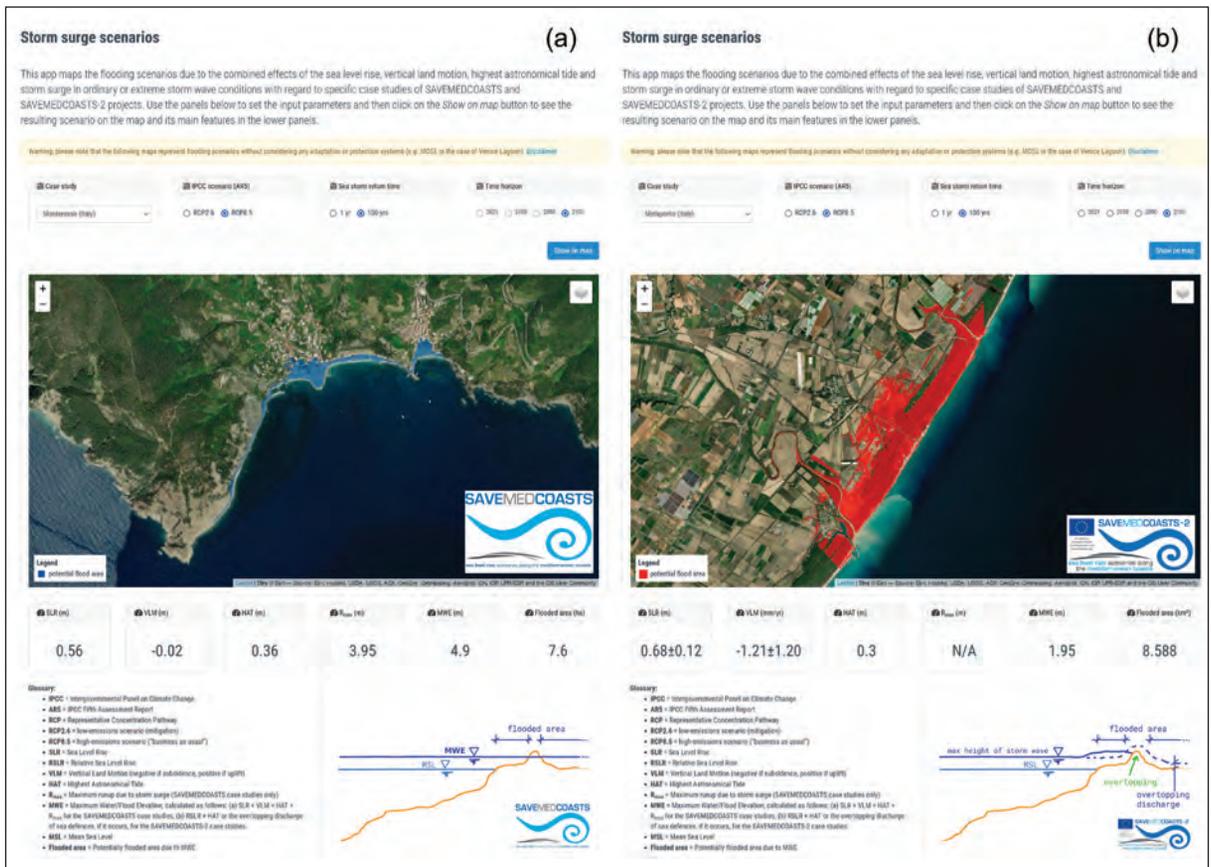


Figura 4. Esempi di risultati dell'app “Storm surge scenarios” nello scenario climatico RCP8.5, mareggiata in condizioni estreme (T = 100 anni) e orizzonte temporale 2100: Monterosso (a) e Metaponto (b).

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).

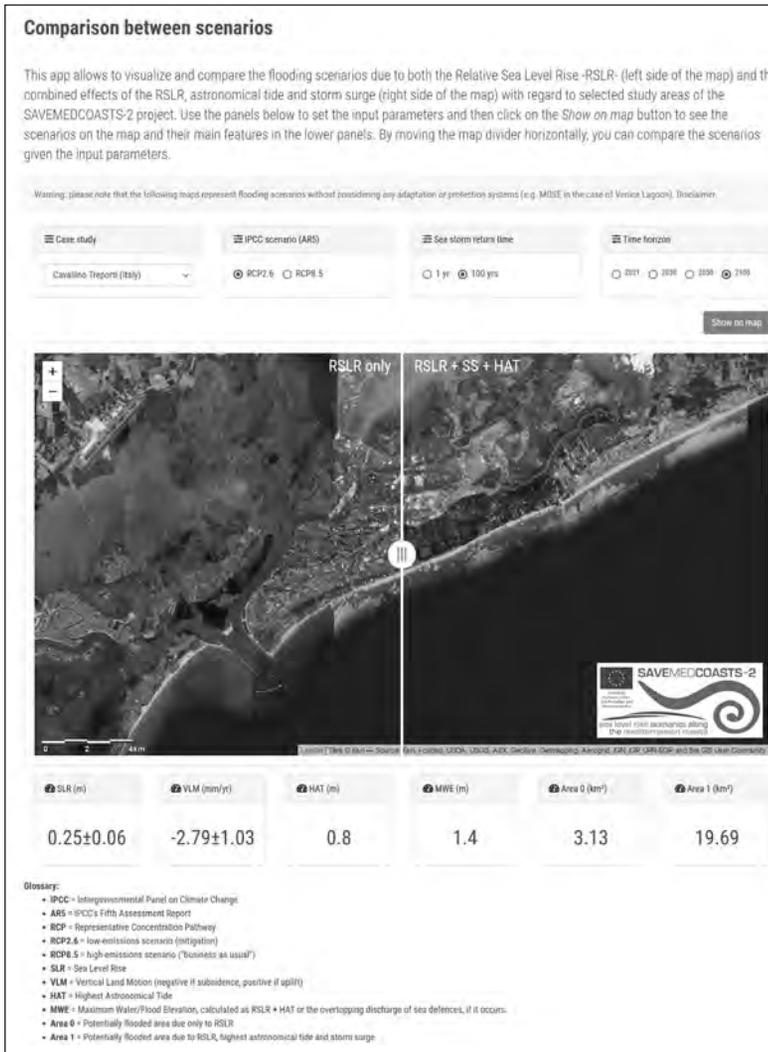


Figura 5. Cavallino Treporti. Risultati dell'app “Comparison between scenarios” ottenuti considerando lo scenario climatico RCP2.6, una mareggiata in condizioni estreme (T = 100 anni) e l’orizzonte temporale al 2100.

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 Grusso 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

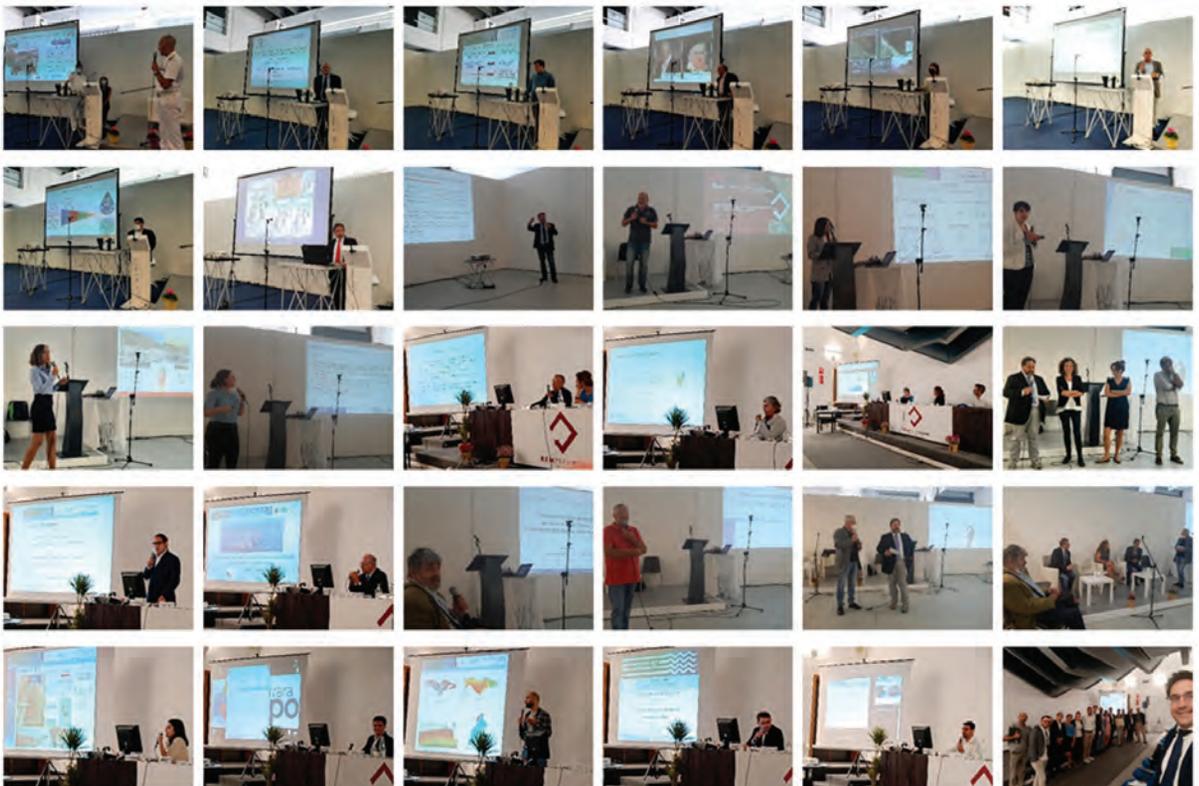
- Anderson T.R., Fletcher C.H., Barbee M.M., Romine B.M., Lemmo S., Delevaux J.M.S., 2018. *Modeling multiple sea level rise stresses reveals up to twice the land at risk compared to strictly passive flooding methods*. Sci Rep, 8, 1: 14484.
- Anzidei M., Doumaz F., Vecchio A., Serpelloni E., Pizzimenti 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., Pietrantoni 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

Convegno Nazionale di Studi Costieri e G3 2022, 2023, 2024, ...

Care Lettrici e cari Lettori di Studi Costieri, in questo numero sono pubblicati gli articoli dei partecipanti alle edizioni degli anni 2022 e 2023 del nostro Convegno Nazionale di Studi Costieri e “Premio G3 - Miglior Presentazione di Studi Costieri”. Con la prossima edizione, che si terrà come di consueto a settembre 2024, sempre nell’ambito della rassegna Remtech-Expo a Ferrara, saremo giunti alla XV-esima edizione annuale. In tutti questi anni sono intervenuti più di centocinquanta relatori di varia estrazione: ricercatori, tecnici, amministratori impegnati in svariate attività sull’ambiente costiero e il cui insieme rappresenta numerose differenti discipline. La nostra rivista, STUDI COSTIERI, nel 2024 compie i venticinque anni di attività durante i quali ha pubblicato trentuno volumi che contengono oltre quattrocento articoli, un patrimonio di informazioni sulle coste italiane che



non ha eguali in nessun'altra rivista tecnico-scientifica pubblicata al mondo e al quale si può accedere liberamente on-line. Dal 2021 abbiamo anche dato avvio agli ulteriori tre premi: il premio di Laurea, il premio di Dottorato e il Premio MIFORMA-GNRAC, grazie ai quali possiamo sostenere e promuovere tutti coloro che si stanno formando nel campo degli studi costieri. Il 2024 è stato anche l'anno della riorganizzazione dell'immagine e comunicazione on-line del GNRAC; è stato realizzato il nuovo sito web, www.gnrac.it, che oltre ad essere la vetrina delle attività dell'associazione incorpora anche funzioni utili a chi la gestisce e ai soci che oggi dispongono della loro area personale.

Desideriamo ringraziare tutto coloro che collaborano attivamente alla vita associativa, facendosi responsabili di attività nei vari gruppi di lavoro, quelli che sostengono le attività con donazioni finalizzate (e.g.: per la realizzazione del nuovo sito web), le centinaia di socie e i soci che annualmente rinnovano la loro vicinanza al GNRAC e tra questi anche le imprese socie sostenitrici e le cittadine e i cittadini che annualmente devolvono il 5-permille delle loro tasse alla nostra associazione per i premi di laurea, di dottorato, il premio G3 e il bando MIFORMA-GNRAC.

Siamo onorati come GNRAC di aver sviluppato grazie a tutti loro questa ampia comunità interdisciplinare che si distingue, per numerosità, intensità, continuità delle azioni e impatti sul territorio, come un *unicum* nel panorama nazionale dei soggetti che si dedicano all'ambiente costiero.

Prima di salutarvi, approfittiamo per ricordarvi i principali eventi che organizziamo per la seconda parte del 2024:

- 1) Il workshop nazionale GNRAC del 2024 che si terrà a Genova, 4-5 giugno 2024, e sarà dedicato alla memoria del Prof. Giuliano Fierro, socio fondatore e primo presidente del GNRAC.
- 2) La scuola estiva: 4th Hands-on course 2024, Hands-on course on experimental and numerical modelling of wave-structure interaction, che si terrà a Firenze, 1-5 luglio 2024.
- 3) Il workshop "Le Spiagge del D-Day" che si terrà in Normandia, Francia, 2-5 settembre 2024.
- 4) La giornata di formazione GNRAC: applicazione di un modello previsionale della linea di riva in spiagge tra due promontori - prof. Jung L. Lee e prof. Jhon Hsu, che si terrà a Firenze il 6 settembre 2024.
- 5) Il CNSC e "XV-esimo Premio G3 – Miglior Presentazione di Studi Costieri", che si terrà a Ferrara il 20 settembre 2024.
- 6) L'evento dedicato alle coste nell'ambito di ECOMONDO che il GNRAC co-organizza a Rimini, 5-6 novembre 2024.

Il presidente GNRAC
Prof. Ing. Lorenzo Cappiotti

Studio sperimentale del sistema di protezione costiera a Marina di Pisa

Amanda Zannella^{1,2}, Andrea Esposito^{2,3}, Irene Simonetti^{1,2} & Lorenzo Cappietti^{1,2,4}

¹Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale,
Via di Santa Marta 3 – 50139 Firenze

²Laboratorio congiunto A-MARE, Università degli Studi di Firenze

³AM3 Spin-off s.r.l., Via Madonna del Piano, 6, 50019 Sesto Fiorentino, Firenze

⁴GNRAC – Gruppo Nazionale per la Ricerca sull’Ambiente Costiero,
Corso Europa 25 – 16132 Genova
lorenzo.cappietti@unifi.it

Riassunto

La costa di Marina di Pisa, situata a sud del delta del fiume Arno, è soggetta a intensa erosione dalla seconda metà del XIX secolo e fin dai primi anni del XX secolo iniziarono tentativi di protezione che si sono gradualmente rafforzati nel tempo. Nel 2000, il sistema di difesa era costituito da un muro a scogliera, aderente alla strada costiera, dalla foce dell’Arno fino a 2.3 km a Sud, alto circa 3.0-4.0 m s.l.m.m., davanti al quale, a distanza di circa 50-100 m, si trovavano 10 scogliere frangiflutti emerse, oggi alte circa 2.0-3.0 m s.l.m.m., lunghe da 200 a 270, separate da varchi di circa 15 m e collegate alla costa da una serie di pennelli. Nei primi anni 2000, il sistema di difesa ha iniziato ad essere modificato con un intervento sperimentale basato sull’aggiunta di un ripascimento in ghiaia davanti al muro radente e successiva trasformazione dei frangiflutti emersi in frangiflutti sommersi. Questa tipologia di intervento è stata applicata ad un primo tratto centrale lungo circa 500 m e successivamente estesa verso Nord di ulteriori 500 m. La parte terminale di questa seconda realizzazione non garantisce tutt’ora una protezione soddisfacente, poiché durante le mareggiate più intense si verificano ingenti tracimazioni di acqua e ghiaia sulla strada litoranea, nonostante le numerose operazioni di rimodellamento effettuate fino alla fine del 2021. In questo lavoro è stato studiato tale tratto di opera di protezione ricostruendo il modello fisico in scala e testandolo all’interno di un canale marittimo, al fine di esaminare l’effetto dei parametri progettuali delle due principali componenti del sistema di difesa, ovvero il frangiflutti sommerso e il ripascimento in ghiaia, sul fenomeno della inondazione di acqua e ghiaia. Sono stati variati tre parametri di progetto: larghezza e altezza del ripascimento in ghiaia, e larghezza della berma del frangiflutti sommerso. Complessivamente, sono state studiate quindici configurazioni basate su diverse combinazioni dei suddetti parametri di progetto, tutte sottoposte alle stesse sollecitazioni di moto ondoso incidente. L’effetto di tali parametri è stato valutato con riferimento a tre principali indici: la tracimazione di ghiaia, la tracimazione d’acqua e il profilo di equilibrio finale del ripascimento in ghiaia, che include l’altezza e la distanza dalla strada litoranea della cresta formatasi sotto l’azione del moto ondoso.

Parole Chiave: Frangiflutti Sommersi, Ripascimenti in Ghiaia, Marina di Pisa, Modellazione Sperimentale.

Abstract

The coast of Marina di Pisa, located in the south of the delta of the Arno River, has been subjected to intense erosion since the second half of the XIX century, with protective initiatives starting in the first half of the XX century, and being reinforced overtime. By 2000, the defense system was composed of a 3.0-4.0 m m.s.l. seawall against the promenade, starting at the south of the mouth of the Arno River to 2.3 km south. Furthermore, located 50-100 m offshore, there were 10 emerged breakwaters at 2.0-3.0 m s.l., at 200 to 270 meters long, separated by gaps of 15 m and connected to the coast by a series of groins. In the early 2000s, the defense system began to be modified based on an experimental study testing the addition of gravel nourishment in front of the seawall and the submergence of the corresponding emerged breakwater. This type of intervention was applied to an initial central section approximately 500 m long and subsequently extended northwards by another 500 m. The final section of this second implementation does not yet

guarantee satisfactory protection, since during intense storm surges large overtopping of water and gravel occurs on the promenade, despite the numerous remodeling operations carried out until the end of 2021. In this study, the unsatisfactory section of the protection system was studied by reconstructing the scaled physical model and testing it inside a wave flume, in order to examine the effect of the design parameters of the two main components of the defense system, i.e. the submerged breakwater and the gravel nourishment, on water and gravel overtopping. Three design parameters were varied: width and height of the gravel nourishment, and width of the berm of the submerged breakwater. Overall, fifteen configurations were studied based on different combinations of the aforementioned design parameters, all subjected to the same incident wave stresses. The effect of these parameters was evaluated with reference to three main indices: gravel overflow, water overflow and the final equilibrium profile of the gravel nourishment, which includes the height and distance of the crest from the coastal road formed under the wave motion action.

Keywords: *Submerged Breakwater, Gravel Beaches, Marina di Pisa, Experimental Modelling.*

Introduzione e Area di studio

Marina di Pisa è una località costiera situata sulla costa settentrionale della Toscana a Sud della foce del fiume Arno. Questo tratto di costa ha subito una lunga storia di erosione fino alla completa sparizione delle spiagge di sabbia e al conseguente aumento del rischio di inondazione e distruzione dell'abitato. I primi fenomeni di erosione sono emersi immediatamente dopo la fondazione di Marina di Pisa nel 1872, quando ancora esisteva una vasta spiaggia di sabbia tra la città e il mare. A certificare l'arretramento del delta dell'Arno già nel 1878 è il regio Istituto Geografico Militare (I.G.M.) con misurazioni in loco. Cartoline del 1915 mostrano alcuni primi interventi di protezione del litorale eseguiti con materiale ligneo, come palizzate e pennelli permeabili (Pranzini et al., 2018). In seguito con l'aggravarsi dei fenomeni di erosione e con le prime inondazioni dell'abitato fu necessario intervenire con opere a scogliera, costruendo prima un muro radente la strada litoranea e poi raddoppiando il sistema di difesa con antistanti frangiflutti a scogliera.

Nel 2000 Marina di Pisa risultava protetta per circa 2.3 km di costa da: i) un muro a scogliera radente la strada litoranea progettato con altezza di 4.0m s.l.m.m. la cui costruzione iniziò fin dal 1928; ii) 10 frangiflutti a scogliera emersi progettati con cresta a 4.0 m s.l.m.m. e costruiti a Nord nel periodo 1935-1940 e più a Sud nel 1965-1975, lunghi da 200 a 270 metri, separati da varchi con ampiezza di circa 15 m e distanti del muro radente circa 50-100 metri (Figura 1°). Questo complesso e costoso sistema di difesa basato su opere a scogliera si è rivelato determinante per la sopravvivenza stessa di Marina di Pisa. Nella Figura 1b, infatti, la mappa della linea di costa ricreata da Bini et al. (2021) e l'immagine satellitare di Marina di Pisa del 1988 (Figura 1a) mostrano la differenza nell'evoluzione a Nord e a Sud del delta del fiume Arno. È evidente una netta differenza nell'erosione ai due lati del fiume, poiché il confine meridionale è stato fortemente protetto, mentre il lato settentrionale è stato lasciato libero di erodere fino al 2000, perdendo oltre 1 km di territorio. D'altra parte, se tale sistema di difesa è stato efficace nel non far arretrare la linea di costa e quindi nel permettere la sopravvivenza dell'abitato di Marina di Pisa, il fenomeno erosivo è continuato sui fondali marini che si sono fortemente abbassati passando da circa 4m a circa 7-8m immediatamente al largo delle scogliere perdendo un ordine di grandezza del milione di metri cubi di sabbia. Le maggiori profondità dei fondali all'esterno dei frangiflutti hanno permesso la propagazione di onde più alte che a loro volta hanno causato cedimenti delle scogliere e imposto le necessarie operazioni di ricarica con massi di dimensioni maggiori per garantirne la stabilità sotto le incrementate condizioni di moto ondoso. Inoltre, l'azione dei moti ondosi incidenti più energetici ha causato un aumento del flusso d'acqua attraverso e sopra i frangiflutti, aumentando così, durante le mareggiate, il livello del mare tra essi e il muro radente, fenomeno noto come *wave piling-up* (Cappietti et al. 2013). Ciò ha favorito le frequenti tracimazioni del muro radente adiacente alla strada litoranea, causando allagamenti di strade e edifici e portando spesso alla chiusura della strada litoranea. Negli anni 2003-2009, si intervenne con un intervento sperimentale ideato e studiato presso l'Università di Firenze, ipotizzando che parte delle ragioni che hanno portato al forte approfondimento dei fondali esterni alle scogliere siano da ricercarsi, oltre nel ridotto apporto solido dell'Arno, anche nell'elevata agitazione ondosa che si forma a causa delle forti riflessioni ondose indotte dai frangiflutti emersi e che gli stessi causassero anche l'anomalo incremento del livello del medio del mare durante le mareggiate. L'intervento è consistito nella realizzazione di un ripascimento in ghiaia con il compito di assorbire l'incremento dell'energia ondosa a costa che si determina per effetto della trasformazione dei frangiflutti emersi in frangiflutti sommersi che sono molto meno riflettenti dei primi e permettono ai flussi di acqua di riguadagnare il largo senza accumularsi a costa. Aminti & Pranzini,

(2000) condussero un primo studio su modello fisico dell'intervento sperimentale da realizzarsi alle celle 7 e 6 (Figura 1a). I test sperimentali evidenziarono che, per evitare le tracimazioni di acqua e ghiaia sulla strada litoranea in presenza di onde incidenti con altezza significativa $H_{1/3}=3.69$ m e un periodo $T_{1/3}=9.95$ s (misurati a una profondità di 7 m al piede della scogliera lato mare), doveva essere implementata la seguente configurazione: i) ripascimento da $100 \text{ m}^3/\text{m}$ con ghiaia da 16 mm, finalizzato a creare una spiaggia con berma orizzontale larga 49 m con e a quota 2 m sopra il livello del medio mare; ii) abbassamento della cresta del frangiflutti emerso fino al livello del medio mare, creando così un frangiflutti con cresta larga 10 m. Nel 2003 fu realizzato un ripascimento in ghiaia con circa $50 \text{ m}^3/\text{m}$ e di diametro 3-7 mm lasciando invariato il frangiflutti (i.e., ancora emerso con cresta a 1.5 m sopra il m.s.l.). Una violenta mareggiata avvenuta nell'ottobre del 2003 ($H_s=6.6$ m, $H_{\max}=11.5$ m, $T_p=10.5$ s, secondo i parametri misurati dall'ondametro installato presso La Spezia) provocò la tracimazione di una notevole quantità di acqua e ghiaia sulla strada, mettendo in evidenza l'inadeguatezza del ripascimento in ghiaia realizzato (Cappietti et al. 2013). La trasmissione del moto ondoso oltre il frangiflutti emerso e il correlato aumento dei livelli del mare dietro allo stesso (*piling-up*) erano ancora troppo elevati, mentre il volume di ripascimento con ghiaia era ancora troppo poco e la dimensione della ghiaia troppo piccola per evitare la tracimazione sulla strada (Ellis e Cappietti 2013). L'esperienza della mareggiata del 2003 dette modo di acquisire ulteriori

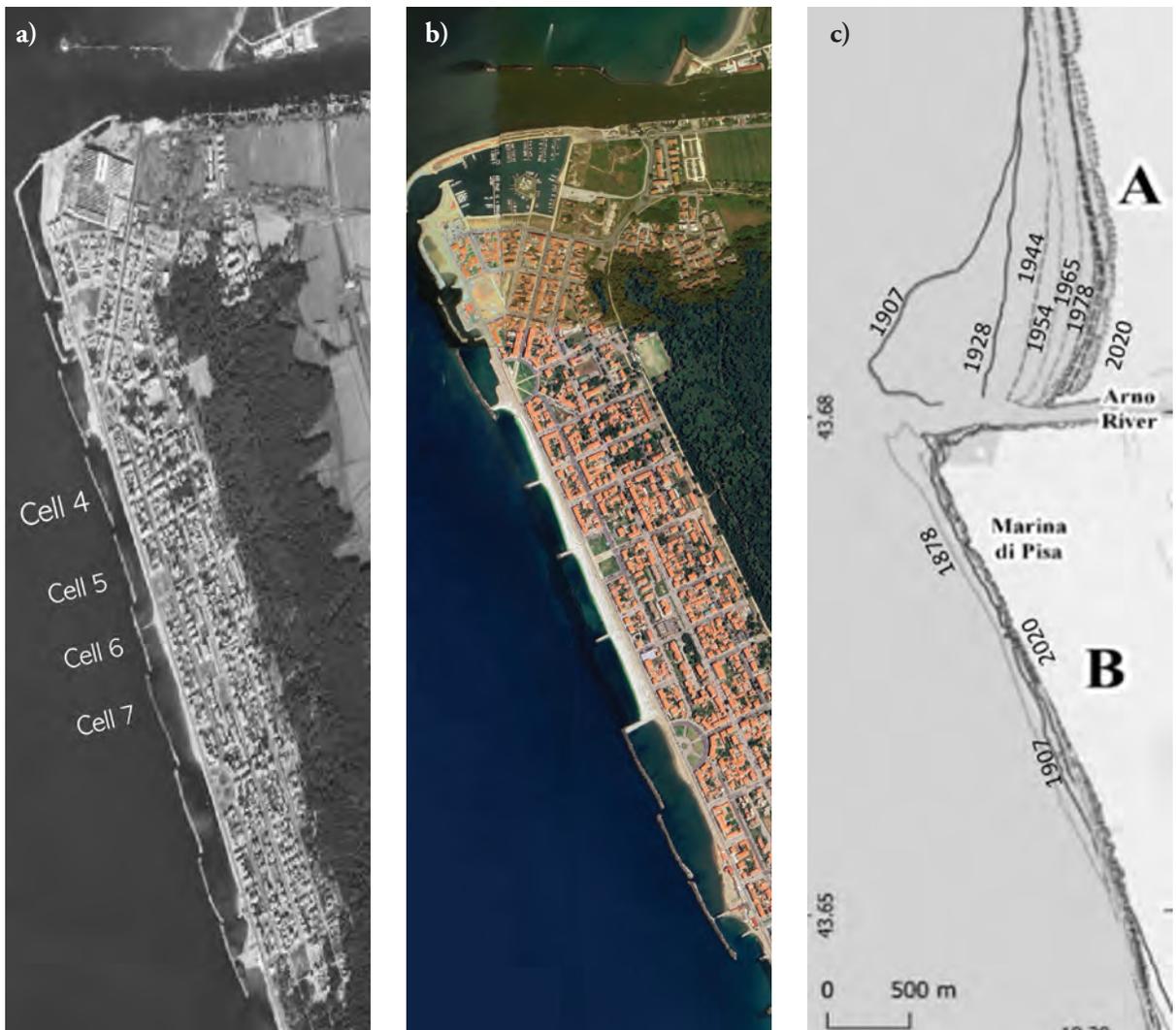


Figura 1. a) Marina di Pisa nel 1988 (I.G.M., s.d.); b) Marina di Pisa nel 2021, con una convenzione di denominazione per le celle (Google Earth); c) Evoluzione storica della posizione della linea di costa presso il fiume Arno dal 1878 al 2020 con evidenziate le date più importanti (Bini et al., 2021, modificato).

elementi conoscitivi sul campo e portò ad un nuovo approfondimento degli studi con il quale si pervenne ad una ricalibrazione dei parametri progettuali dell'intervento sperimentale. I lavori ripresero nel 2006 per concludersi nel 2007 e fu versato un volume maggiore di ghiaia e dalla pezzatura più grande (40-80 mm) ed inoltre, il frangiflutti emerso fu convertito in un frangiflutti sommerso la cui cresta fu allargata a circa 20m per aumentare la dissipazione dell'energia delle onde incidenti (Cappiotti, 2011). Nei successivi 16 anni (2007-2023) il sistema di difesa sperimentale implementato alla cella 6 e 7 non ha mai registrato ulteriori casi di tracimazione di acqua o ghiaia sulla strada e non ha avuto necessità di alcuna ricarica del materiale.

La morfodinamica del ripascimento con ghiaia sotto l'azione delle onde differisce notevolmente da quella della sabbia per numerosi fattori rilevanti, tra i quali: l'alta permeabilità, la porosità e l'inerzia maggiore di ciascun granulo. La velocità di risalita delle onde frangenti è superiore alla velocità di sedimentazione della ghiaia (Lorang, 2002), il che consente il trasporto di una grande quantità di materiale verso terra e al contempo l'alta permeabilità della spiaggia consente l'infiltrazione dell'acqua, riducendo la capacità di trasporto solido del flusso d'acqua di ritorno (Austin & Buscombe, 2008; Buscombe & Masselink, 2006; Nordstrom et al., 2008). Questa asimmetria determina un progressivo trasporto e accumulo della ghiaia verso costa che porta alla formazione di una cresta in risposta all'azione dei moti ondosi e che agisce come una barriera di protezione per la costa. La capacità delle spiagge di ghiaia di formare naturalmente una barriera di protezione contro le inondazioni costiere, a differenza della sabbia che si erode facilmente, costituisce il tratto distintivo che permette al ripascimento di essere una valida opzione per la protezione costiera dalle inondazioni, se ben progettato.

Lo schema di difesa sperimentale testato alle celle 6 e 7 fu successivamente impiegato anche per le due celle immediatamente a Nord, i.e. le celle 5 e 4 con lavori conclusi nel 2018. Il livello di protezione della cella 4 è risultato ancora inaccettabile a causa della persistenza di grandi quantità di ghiaia e di acqua tracimanti sulla strada litoranea durante le mareggiate più intense, nonostante le numerose operazioni di rimodellamento effettuate fino alla fine del 2021. Tale problema della cella 4 può essere principalmente correlato alle seguenti differenze rispetto alle celle 6 e 7 dove il sistema di protezione ha ottime prestazioni: i) una minore quota dell'estradosso del muro radente la strada litoranea, ii) la maggiore profondità dei fondali al piede del frangiflutti, sia lato mare che dal lato della costa; iii) la minore distanza del frangiflutti sommerso rispetto al muro radente; iv) un sommergezza maggiore del frangiflutto sommerso. L'obiettivo di questo articolo è di analizzare, a partire dai risultati ottenuti dai test sperimentali condotti su un modello fisico in scala ridotta, l'influenza che hanno i principali parametri progettuali delle due principali componenti del sistema di difesa costiera alla cella 4, i.e. il frangiflutti sommerso e il ripascimento con ghiaia, sul grado di protezione in termini del controllo della tracimazione di acqua e ghiaia sulla strada litoranea.

Metodi

Lo studio sperimentale su modello fisico, commissionato dalla Regione Toscana, è stato condotto nel canale per onde e correnti (WCF1) del Laboratorio di Ingegneria Marittima (LABIMA) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze (www.labima.unifi.it). Il canale utilizzato è lungo 37 m, largo 0.80 m e profondo 0.80 m. Può generare altezze d'onda massime di 0.35 m, con periodi che vanno da 0.8 a 2.5 secondi (LABIMA, 2020), tramite un generatore d'onda di tipo a pistone. Il modello di costa è stato riprodotto in scala 1:36, utilizzando la similitudine di Froude utilizzando una sezione del rilievo batimetrico della cella 4 effettuato nel maggio 2022 (Figura 2).

La configurazione attuale (2022) nella cella 4 è composta da un ripascimento con ghiaia/ciottoli di dimensione nel fuso 40-80 mm e largo circa 11,5 m. Nel modello è stata utilizzata ghiaia di 1-2 mm. Il muro radente ha estradosso a circa 3.1 m sopra il livello del medio mare, con una larghezza della cresta di circa 5 m e massi da 1-4 tonnellate. Nel modello è stato costruito con ciottoli da 21-84 g ma la quota di estradosso è stata simulata a 4.1 m s.l.m.m, come alla cella 7, perché questa è ritenuta una condizione imprescindibile per sviluppare anche alla cella 4 un'efficace sistema di difesa dalle inondazioni. Il frangiflutti sommerso ha una cresta larga 20 m, situata 1 m sotto il livello del medio mare, costituito da massi da 5-10 tonnellate (105-210 g in scala modello). I fondali tra il frangiflutti e il muro radente sono stati realizzati in sabbia di 0,1mm. Sono stati testate 15 differenti configurazioni del modello del sistema di difesa variando i tre seguenti parametri principali:

- 1) l'estensione del frangiflutti sommerso: $BWW = 30 \text{ m}, 40 \text{ m e } 50 \text{ m}$;
- 2) la larghezza del ripascimento con ghiaia: $BW = 40 \text{ m}, 50 \text{ m}, 60 \text{ m}, 70 \text{ m}$;
- 3) l'altezza del ripascimento con ghiaia $BH = 2 \text{ m e } 3 \text{ m}$,



Figura 2. Fotografia aerea della cella 4 nel 2021 (a sinistra, fonte Google Earth); parametri di progetto del frangiflutti e del ripascimento in ghiaia indagati nel presente lavoro (in basso).



come illustrato in Figura 2. Le combinazioni testate di tali parametri sono riportati in Tabella 1. Le configurazioni sono state testate sotto lo stesso moto ondoso, rappresentativo delle peggiori condizioni fisicamente compatibili con la profondità d'acqua di 7 m al piede esterno del frangiflutti sommerso: i.e. $H_s = 4.3$ m e periodo di picco $T_p = 12$ s e un innalzamento di tempesta del livello del mare pari a 0,8 m con una durata di 6 ore. È importante sottolineare che i test sono stati condotti con il profilo iniziale del ripascimento in ghiaia costituito da una berma emersa piana ed orizzontale e che questa configurazione iniziale si è rivelata la peggiore perché, per alcune larghezze e altezze del ripascimento, le prime onde riescono a causare tracimazioni sulla strada che poi diminuiscono quando il processo morfodinamico porta alla costruzione della cresta di ghiaia. Durante i test, è stato effettuato il rilievo iniziale del profilo riprodotto e il rilievo finale dopo l'azione del moto ondoso di prova. Sono state misurate le tracimazioni di ghiaia (in kg/s/m) e di acqua (in l/s/m), come riportato in Tabella 1.

Tabella 1. Parametri e risultati del test nel Prototipo.

Codice del Laboratorio	Larghezza Cresta del Frangiflutti [m]	Larghezza Ripascimento [m]	Altezza Ripascimento [m]	Tracimazione di Ghiaia (kg/s/m)	Tracimazione di acqua (l/s/m)
C1	20	40	2	2.2	3.2
C2	20	70	2	0.3	0.1
C3	20	40	3	0.8	1.4
C4	20	50	3	0.3	0.7
C5	20	60	3	0	0.1
C6	30	40	2	0.3	1.4
C7	30	50	2	0.5	0.8
C8	30	60	2	0.3	0.1
C9	30	70	2	0	0.1
C10	30	40	3	0	0.2
C11	30	50	3	0	0.2
C12	40	60	2	0.3	0.2
C13	50	40	2	0.5	0.2
C14	50	50	2	0.3	0.2
C15	50	60	2	0	0

Risultati e discussione

Gli effetti sulla tracimazione

L'analisi di sensitività ha dimostrato che un aumento della larghezza e dell'altezza del ripascimento con ghiaia e un aumento della larghezza del frangiflutti sommerso comportano una diminuzione sia delle tracimazioni di acqua sia delle tracimazioni di ghiaia. Inoltre, i valori di tracimazione suggeriscono che l'effetto di riduzione dovuto all'aumento della larghezza del ripascimento con ghiaia è maggiore rispetto all'aumento dell'estensione del frangiflutti. È emerso anche che, se da un lato il frangiflutti sommerso e il ripascimento con ghiaia risultano entrambi efficaci per diminuire la quantità di ghiaia e acqua tracimante, dall'altro lato l'aumento in uno dei parametri riduce l'efficacia relativa dell'aumento dell'altro. A titolo esemplificativo, la Figura 3 mostra la diminuzione dell'efficacia dell'aumento della larghezza del frangiflutti all'aumentare della larghezza del ripascimento con ghiaia (BW).

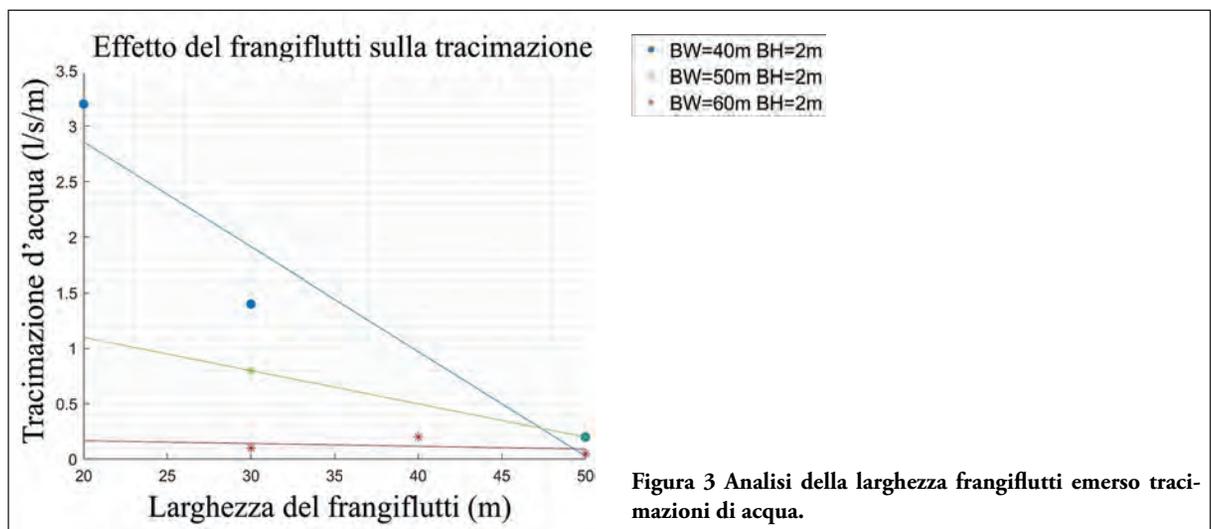
Pertanto, quando si lavora con questo approccio di protezione costiera, è imperativo adottare una configurazione che massimizzi l'efficacia congiunta di entrambe le componenti.

Effetti sul profilo finale

La quantità di materiale utilizzato per il ripascimento con ghiaia e la larghezza del frangiflutti sommerso mostrano un impatto diretto sulla posizione della cresta nel profilo finale, il che a sua volta ha grande importanza sul controllo delle tracimazioni di ghiaia sul lungomare (si veda ad esempio Figura 4).

Se il volume del ripascimento con ghiaia non è adeguato a creare una spiaggia sufficientemente ampia, allora la morfodinamica porta alla formazione della cresta in posizione più arretrata in corrispondenza della strada litoranea. Il parametro che maggiormente influenza la posizione della cresta, tra quelli studiati, è la larghezza del ripascimento con ghiaia: all'aumentare di questo, la cresta si allontana dalla strada litoranea.

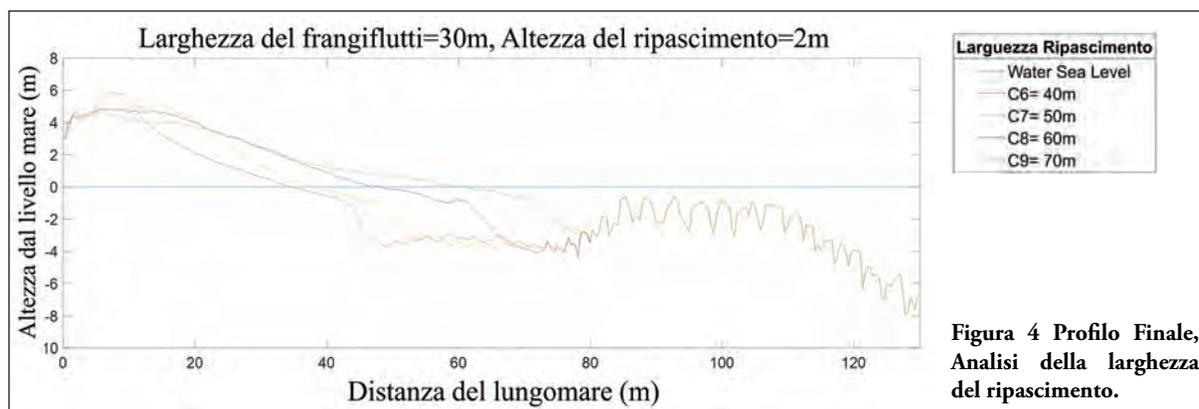
L'allargamento del frangiflutti sommerso ha mostrato di avere un effetto simile ma con una efficacia molto inferiore rispetto all'allargamento del ripascimento a mantenere la posizione di cresta più lontana possibile



dalla strada litoranea. Inoltre, le configurazioni che includevano un valore elevato della larghezza del ripascimento (BW), in combinazione con un'elevata larghezza della cesta del frangiflutti (BWW) non hanno mostrato la formazione di alcuna cresta. Questo fenomeno può essere dovuto alla grande dissipazione di energia sul frangiflutto ma anche alla mancanza di spazio e di profondità d'acqua tra il frangiflutti e il ripascimento che non consente alle onde interagire con la ghiaia in maniera efficace ai fini della formazione della cresta.

Conclusioni

Marina di Pisa subisce da più di un centennio forti fenomeni di erosione costiera. Numerose strategie di protezione sono state messe in atto per tutto il XX secolo fino alla costruzione di un muro a scogliera radente la



strada litoranea per circa 2300 m, con estradosso alto circa 4 metri sul livello del medio mare davanti al quale, a distanza di 50-100 m sono stati costruiti 10 frangiflutti emersi a scogliera di lunghezza variabile tra 200 m e 270 m, oggi alti circa 2.0-3.0m e distaccati da varchi di circa 15m. Nel periodo 2003-2007 un primo intervento sperimentale è stato realizzato alle celle 7 e 6 e dopo alcuni anni di monitoraggio è stato esteso anche alle celle 5 e 4. In queste celle (7, 6, 5, 4) i frangiflutti emersi sono stati trasformati in frangiflutti sommersi (circa 0.0-1.0 m sotto il livello del medio mare) e utilizzati in combinazione con un ripascimento in ghiaia 40mm-80mm. Sebbene l'intervento sperimentale alle celle 7, 6 dopo la ricalibrazione del 2006-2007 abbia sempre garantito la protezione delle inondazioni per 16 anni senza nessuna ricarica di materiale, la stessa tipologia di intervento estesa alle celle 5 e 4, con lavori terminati nel 2018, ha mostrato differenti prestazioni. Alla cella 5 il grado di protezione è sostanzialmente confrontabile con quello delle celle 6 e 7 mentre la cella 4 soffre ancora di importanti fenomeni di tracimazione di acqua e ghiaia durante le mareggiate. Per tale cella, l'effetto dei parametri progettuali dei due principali componenti del sistema di protezione (i.e. frangiflutti e ripascimento in ghiaia) sull'attenuazione delle tracimazioni di acqua e ghiaia è stato studiato su un modello fisico in scala ridotta testando in canale marittimo numerose alternative al variare della larghezza e altezza del ripascimento di ghiaia e della larghezza della cresta del frangiflutti sommerso. Le misure sperimentali hanno permesso di quantificare quanto l'aumento dell'estensione sia del ripascimento che del frangiflutti determini minori tracimazioni di acqua e ghiaia sulla strada litoranea. È interessante notare come l'aumento dell'estensione di uno dei componenti sia associabile ad una riduzione della necessità di aumentare anche l'altro componente e pertanto, è possibile sviluppare una configurazione ottimizzata anche sotto il profilo economico. Un'altra evidenza sperimentale interessante è che nel caso di un'ampia estensione sia del frangiflutti che del ripascimento in ghiaia con quest'ultimo che arriva in prossimità del frangiflutti la morfodinamica sotto l'azione dei moti ondosi non porta alla formazione di una evidente cresta di ghiaia post mareggiata. È importante notare che, sebbene l'obiettivo della protezione dalle inondazioni possa essere certamente raggiunto con questo schema di protezione caratterizzato da ripascimento in ghiaia e frangiflutti sommerso, è necessario informare e condividere con la comunità locale l'accettabilità degli effetti caratteristici di questa tipologia di opera di protezione. Per esempio, va accettata la formazione di creste molto alte al termine delle mareggiate più intense e degli oneri connessi con la relativa manutenzione là dove si volesse operare con mezzi di cantiere per abbassare la cresta nei mesi estivi. Infine, deve essere evidenziato che il complesso di ripascimento in ghiaia e frangiflutti sommerso costituisce un'opera finalizzata all'esclusiva difesa idraulica dalle inondazioni dell'abitato di Marina di Pisa.

Bibliografia

- Aminti L.P., Pranzini E., 2000. *Indagine sperimentale per la ristrutturazione delle difese di Marina di Pisa*. Studi Costieri, 3: 57-70.
- Austin M. J., Buscombe D., 2008. *Morphological change and sediment dynamics of the beach step on macrotidal gravel beach*. Marine Geology, 249(3-4): 167-183.
- Bini M., Casarosa, N., Luppichini, M., 2021. *Exploring the relationship between river discharge and coastal erosion: An integrated approach applied to the Pisa coastal plain (Italy)*. Remote Sensing, 13(2):1-22.
- Buscombe, D., Masselink G., 2006. *Concepts in gravel beach dynamics*. Earth-Science Reviews, 79(1-2): 33-52.

- Cammelli C., Jackson N. L., Nordstrom, K.F., Pranzini, E., 2006. *Assessment of a Gravel Nourishment Project Fronting a Seawall at Marina di Pisa, Italy*. Journal of Coastal Research, II:770–775.
- Cappiotti L., 2011. *Converting emergent breakwaters into submerged breakwaters*. Journal of Coastal Research: 479-483.
- Cappiotti L., Sherman D. J., Ellis J.T., 2013. *Wave transmission and water setup behind an emergent rubble-mound breakwater*. Journal of Coastal Research, 29(3): 694-705.
- Ellis, J.T., Cappiotti L., 2013. *Storm-driven hydrodynamic and sedimentological impacts to an engineered coast*. Journal of Coastal Research, 65 (10065): 1461-1466.
- I.G.M., (n.d.) Geoprodotti. Retrieved October 10, 2022, from https://igmi.org/it/geoprodotti#b_start=0&c4=1145906.03%2C5404546.12%2C1146606.03%2C5405246.12&c4=intersects&c2=%2Ffoto-aeree%2F1942%2Fpdf_2400_dpi_autenticato.
- LABIMA, 2020, August 27. Wave-Current Flume One, www.labima.unifi.it.
- Lorang M.S., 2002. *Predicting the crest height of a gravel beach*. Geomorphology, 48(1-3) :87-101.
- Nordstrom K. F., Pranzini E., Jackson N. L., Coli M., 2008. *The marble beaches of Tuscany*. Geographical Review, 98(2): 280–300.
- Pranzini E., Anfuso G., Cinelli I., Piccardi M., Vitale, G., 2018. *Shore protection structures increase and evolution on the Northern Tuscany Coast (Italy): Influence of tourism industry*. Water, 10(11).

Ricevuto il 23/05/2023, accettato il 28/02/2024

Sviluppo e deformazione di terrazzi marini lungo il bordo NE della Piana Campana: vincoli cronologici

Ciro Cerrone¹

¹Università degli Studi di Napoli Federico II, ciro.cerrone@unina.it

Introduzione

I paleo indicatori del livello del mare, come i terrazzi marini, sono ottimi *markers* per stimare i tassi dei processi tettonici (Anderson et al., 1999), nel caso in cui la componente glacio-idro-isostatica sia correttamente rimossa (Rovere et al., 2016). Infatti, la quota di un terrazzo marino è il risultato dell'interazione tra movimenti verticali della crosta terrestre e fluttuazioni del livello del mare. Inoltre, i terrazzi marini preservati su coste rocciose lungo margini continentali rappresentano affidabili indicatori di *uplift* (Lajoie, 1986; Pirazzoli, 1993).

Dati di sottosuolo come sondaggi profondi ed indagini geofisiche, hanno permesso di delineare la formazione e lo sviluppo della Piana Campana sul lungo termine, e di definire il suo assetto strutturale (Santangelo et al., 2017 e riferimenti in esso contenuti). Ciononostante, non sono noti dati di letteratura sul comportamento tettonico durante il Quaternario degli *horst* che circondano il *graben* della Piana Campana, eccezion fatta per il margine meridionale costituito dalla penisola Sorrentina (Figura 1). Il lavoro qui presentato (Cerrone et al., 2021) parte da una segnalazione (Romano et al., 1994) di depositi marini ascrivibili tentativamente all'Ultimo Interglaciale lungo il margine meridionale di Mt. Fellino, bordo nord-orientale della Piana Campana, Italia.

Area di studio e metodi

L'area di studio è situata nel settore NE del bacino costiero della Piana Campana, lungo il margine Tirrenico dell'Appennino Meridionale (Figura 1). Tale piana costiera si è formata come conseguenza dei processi estensionali attivi nel bacino di retro-arco del Tirreno meridionale che, dal Neogene al Pleistocene Medio, coesistevano con il raccorciamento crostale in Appennino Meridionale (Patacca et al., 1990; Sartori et al., 1990). I processi estensionali in Piana Campana sono stati accompagnati da intensa attività esplosiva a partire da 400 ky e tuttora attiva nei Campi Flegrei e Vesuvio. L'area investigata si estende sul margine meridionale di Mt. Fellino, una dorsale formata da calcari Mesozoici deformati e piegati in una struttura ad anticlinale a scala chilometrica, dove Romano et al. (1994) segnalava la presenza di sabbie marine nei pressi dell'abitato di Cancellò (terminazione occidentale della dorsale di Monte Fellino) a circa 50 m sul livello del mare (a.s.l.) correlato geomorfologicamente con l'Ultimo Interglaciale. Inoltre, gli stessi autori osservano un conglomerato marino a circa 120 m a.s.l. di età presumibile, secondo gli Autori, Pleistocene Medio.

In questo lavoro si è adottato un classico approccio geomorfologico, focalizzato sull'analisi delle evidenze di terrazzi marini e dei depositi associati, lungo il margine meridionale di Monte Fellino. L'analisi topografica è stata effettuata usando carte topografiche di estremo dettaglio alla scala 1:5.000 e DTM con risoluzione di 5 x 5 m. Per ogni terrazzo marino identificato nell'area di studio, si è misurata la quota del margine interno (*inner edge*) tramite un GPS. Lo studio è stato integrato con analisi stratigrafiche e micropaleontologiche dei depositi Quaternari associati ai terrazzi, sia di origine marina che continentale. Al fine di ottenere un vincolo cronologico indiretto relativo alla formazione dei terrazzi marini nell'area indagata, è stata effettuata una datazione con il metodo del decadimento dell'Uranio su un campione di calcite proveniente da una frattura che disseca le sabbie marine.

Risultati e discussione

Integrando analisi geomorfologiche, stratigrafiche, analisi di facies dei depositi affioranti e raccolta di dati strutturali, sono stati identificati, nel settore NE della Piana Campana, due ordini di terrazzi marini, la cui quota varia lungo lo strike della Faglia di Polvica.

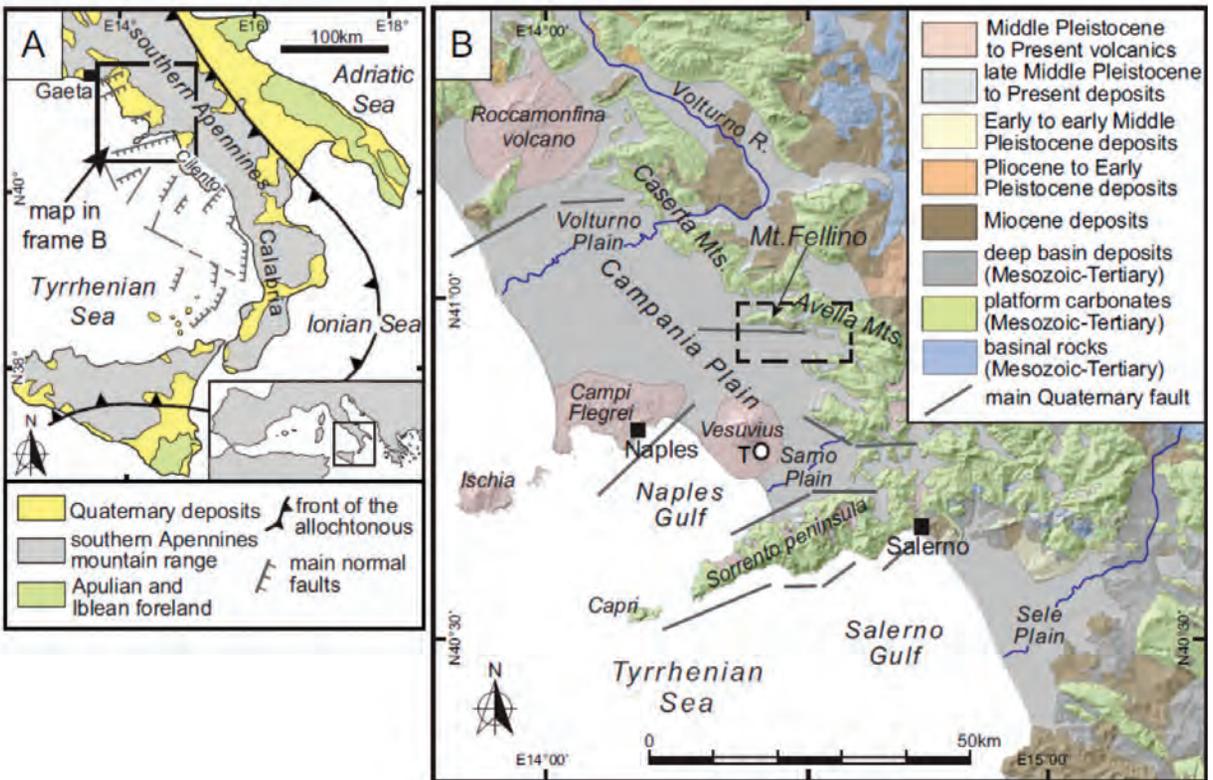


Figura 1. A: Schema tettonico del margine Tirrenico dell'Appennino Meridionale (ridisegnato e modificato da Moussat et al., 1986). B: Schema tettonico della Piana costiera Campana (localizzazione nel diagramma A; modificato da Ascione et al., 2013); la linea tratteggiata indica l'area di studio.

La quota del terrazzo più basso (nominato T1) varia dai 40 ai 70 m s.l.m., mentre il terrazzo più alto (nominato T2) varia tra i 70 e i 110 m s.l.m. (Figura 2). La Faglia di Polvica è una faglia situata alla base del bordo meridionale di Monte Fellino estesa per circa 15 km con orientazione E-W. I resti dei terrazzi marini dell'area sono visibili grazie a nuovi scavi effettuati in cave di calcari che permettono una chiara visione delle forme e depositi marini lungo le tre dimensioni e dei sistemi di faglie che dislocano questi depositi. Un campione di calcite all'interno delle sabbie marine che costituiscono il terrazzo marino più alto è stato datato con il metodo del decadimento dell'Uranio, ottenendo un'età di $316 \pm 87 / -53$ ky e permettendo così di assegnargli un'età riferibile al Pleistocene Medio, nonostante l'enorme asimmetria nella datazione ottenuta. Ciò è dovuto al fatto che l'età si avvicina al limite superiore della tecnica di datazione utilizzata. Sono stati caratterizzati due differenti sistemi di faglie che dissecano i terrazzi marini. In particolare, un sistema di faglie normali con orientazione E-W ed un sistema di *transfer faults* con direzione NNW. Tali sistemi rientrano in un sistema di faglie estensionali a grande scale con orientazione circa da N-S a NNW-SSE, consistente con l'assetto strutturale regionale riconosciuto in precedenza da dati sismici.

Conclusioni

Lo studio multidisciplinare sui paleo indicatori del livello del mare illustrato in questo lavoro, ha permesso di ottenere nuovi dati di affioramento e vincoli cronologici utili a ricostruire la storia evolutiva e deformativa del bacino costiero della Piana Campana nel corso del tardo Quaternario.

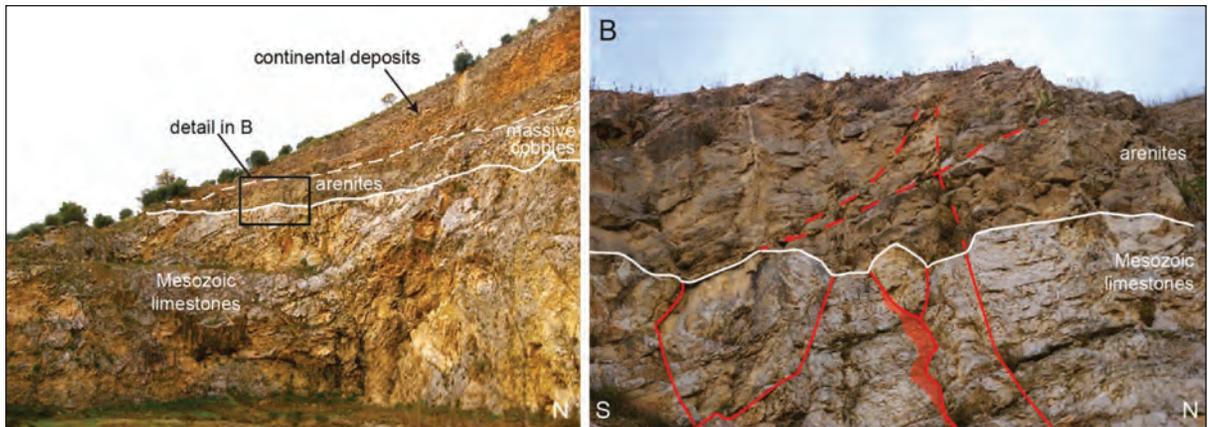


Figura 2. A: Veduta del terrazzo marino sepolto T2, con indicazione dei sedimenti marini (areniti, che passano lateralmente ad un deposito ciottoloso) e continentali che sovrastano la piattaforma di abrasione, contrassegnata dalla linea bianca. B: Vista dettagliata di parte dell'affioramento (località in A); linea bianca come in A. Nel diagramma sono mostrate le faglie con orientazione NNW che dissecano la piattaforma di abrasione e localmente passano nelle areniti sovrastanti. Queste ultime sono anche tagliate da faglie normali a basso angolo con immersione a S.

Questo lavoro colma una significativa lacuna di conoscenza di un territorio che ha attirato una pletera di studi geofisici, ma sorprendentemente carente in osservazioni geologiche dirette sulle unità quaternarie affioranti e le strutture associate. Pertanto, questi risultati forniscono fino ad oggi unici vincoli all'evoluzione geologica della Piana Campana, che si sono sviluppati nel contesto del bacino di retro-arco tirrenico. I dati strutturali raccolti indicano che le dislocazioni si sono sviluppate principalmente lungo faglie normali con immersione generalmente verso S andando, al contempo, ad interferire con le oscillazioni eustatiche del tardo Quaternario, controllando così l'evoluzione dell'area di Piana Campana investigata. I terrazzi marini descritti in questo lavoro raggiungono anche centinaia di metri di larghezza e sono mascherati dall'azione combinata dell'erosione e/o essi possono essere seppelliti da spessi coltri di depositi continentali accumulati durante la recessione della falesia. Pertanto, questo lavoro punta l'attenzione sull'utilizzo di approcci multidisciplinari per lo studio di terrazzi marini, poiché la sola analisi topografica/geomorfologica in determinati contesti geomorfologici, potrebbe essere insufficiente per una corretta identificazione e caratterizzazione dei paleo indicatori del livello del mare.

Bibliografia

- Anderson R.S., Densmore A.L., Ellis M.A., 1999. *The generation and degradation of marine terraces*. Basin Res. 11 (1), 7–19.
- Ascione A., Mazzoli S., Petrosino P., Valente E., 2013. *A decoupled kinematic model for active normal faults: insights from the 1980, $M_s = 6.9$ Irpinia earthquake, southern Italy*. Bull. Geol. Soc. Am. 125, 1239–1259.
- Cerrone C., Vacchi M., Fontana A., Rovere A., 2021. *Last Interglacial sea-level proxies in the western Mediterranean*. Earth Syst. Sci. Data 13, 4485–4527. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4485-2021>
- Lajoie K.R., 1986. Coastal tectonics. In: Usselman, T.M. (Ed.), *Studies in Geophysics, Active Tectonics*. National Academy Press, Washington DC, pp. 95–124.
- Moussat E., Rehault J.P., Fabbri A., 1986. *Rifting et évolution tectono-sédimentaire du Bassin Tyrrhénien au cours du Neogene et du Quaternaire*. Giorn. Geol. 48 (1/2), 41–62.
- Patacca E., Sartori R., Scandone P., 1990. Tyrrhenian basin and Apenninic Arcs: kinematic relations since Late Tortonian times. Mem. Soc. Geol. It. 45, 425–451.
- Pirazzoli P.A., 1993. *Global sea-level changes and their measurement*. Global Planet. Change 8, 135–148.
- Romano P., Santo A., Voltaggio M., 1994. *L'evoluzione geomorfologica della piana del fiume Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene medio-superiore-Olocene)*. Il Quat. 7 (1), 41–56.
- Rovere A., Stocchi P., Vacchi M., 2016. *Eustatic and relative sea level changes*. Curr. Clim. Change Rep., 221–231.

- Santangelo N., Romano P., Ascione A., Russo Ermolli E., 2017. *Quaternary evolution of the Southern Apennines coastal plains: a review*. Geol. Carpathica 68, 43–56.
- Sartori R., 1990. The main results of ODP Leg 107 in the frame of Neogene to Recent geology of peri-Tyrrhenian areas. Proc. Ocean Drill. Program, Sci. Results. Vol. 107, pp. 715–730.

Ricevuto il 21/02/2024; accettato il 27/02/2024

Integrazione ottimale di diverse risorse rinnovabili per lo sviluppo sostenibile delle isole

¹Elisa Dallavalle

¹Alma Mater Studiorum Università di Bologna, elisa.dallavalle3@unibo.it

Introduzione

Le energie rinnovabili marine possono rivelarsi fondamentali nell'adattamento al cambiamento climatico. Tuttavia, la ancora bassa efficienza di conversione, la variabilità delle risorse rinnovabili e la necessaria ottimizzazione dello spazio marino richiedono l'integrazione di diverse fonti. Parallelamente, molte isole sono tuttora fortemente dipendenti dai combustibili fossili, pur essendo ricche di risorse rinnovabili ad oggi scarsamente sfruttate. In questo contesto, è stata sviluppata una metodologia per l'individuazione delle combinazioni ottimali di diverse risorse rinnovabili ed è stata applicata al caso dell'Isola di Tenerife, combinando in particolare pannelli solari e convertitori di energia da moto ondoso per alimentare un impianto di desalinizzazione nella maniera più continuativa possibile. Il lavoro è parte del progetto PON PlaCE (<https://bluegrowth-place.eu/>).

Area di studio e metodi

Il metodo proposto per l'identificazione del mix energetico ottimale, descritto nel dettaglio da Dallavalle et al. (2023), si compone essenzialmente di tre fasi: i) la valutazione delle risorse disponibili e delle attività da alimentare e del loro andamento a livello orario; ii) il progetto del sistema, con la selezione dei dispositivi ed il calcolo dell'energia prodotta e la caratterizzazione delle componenti addizionali, quali sistemi di stoccaggio dell'energia, sistemi di back-up e connessione alla rete; iii) l'ottimizzazione, ossia l'individuazione della combinazione ottimale di rinnovabili (RES). Il metodo, applicabile qualsiasi siano le risorse disponibili, le attività da alimentare e le caratteristiche del sistema elettrico, viene qui applicato nel caso di un'isola, Tenerife. Le Canarie sono ricche di risorse rinnovabili e allo stesso tempo, a causa della scarsità idrica, sono fortemente dipendenti da sistemi di dissalazione, con notevole richiesta di energia, ad oggi soddisfatta perlopiù attraverso combustibili fossili. La risorsa solare e l'energia da moto ondoso sono state individuate essere le più promettenti per l'area di studio considerata. Sulla base delle caratteristiche del sito, sono state individuate le aree possibili per l'installazione dei convertitori di energia da moto ondoso (WECs) e dei pannelli solari e sono stati individuati i dispositivi più adatti tra quelli disponibili (Wave Dragon e Canadian Solar CS6K-270P). È stata quindi studiata la loro combinazione ottimale per l'alimentazione di un ampliamento di un impianto di desalinizzazione a Santa Cruz de Tenerife, con domanda energetica costante nel tempo. Il sistema è stato ipotizzato essere privo di sistemi di stoccaggio, provvisto di un sistema di back-up, per i momenti di assenza di rinnovabili, e connesso alla rete elettrica principale, cui vengono inviati i surplus di energia.

Risultati e discussione

Il metodo per la combinazione ottimale delle rinnovabili è stato applicato confrontando l'energia disponibile e l'energia richiesta a livello orario, con l'obiettivo di individuare il numero di WECs e di pannelli solari che consente di massimizzare le ore all'anno in cui la richiesta energetica del dissalatore viene soddisfatta esclusivamente mediante rinnovabili (t_{RES}). I risultati (Fig. 1) mostrano che l'impiego di due WECs consente di aumentare notevolmente t_{RES} fino a raggiungere un valore asintotico. La combinazione ottimale individuata

è quindi quella di due Wave Dragon e un impianto fotovoltaico di 35'000 m², che consente di soddisfare la domanda energetica del dissalatore per l'85% di ore all'anno con sole rinnovabili e riduce al 15% le ore in cui è necessario l'impiego dei combustibili fossili. È stato infine analizzato il bilancio economico (Fig. 2). Il tempo di ritorno dell'investimento (PBP), individuato dall'intersezione tra la curva dei costi degli impianti e dei guadagni dati dalla vendita dei surplus di energia, risulta inferiore alla vita utile del dissalatore e si riduce notevolmente in presenza di incentivi statali sull'energia da moto ondoso, assunti essere pari alla Feed-In-Tariff (FIT) prevista dal governo spagnolo fino al 2014 (86 €/MWh).

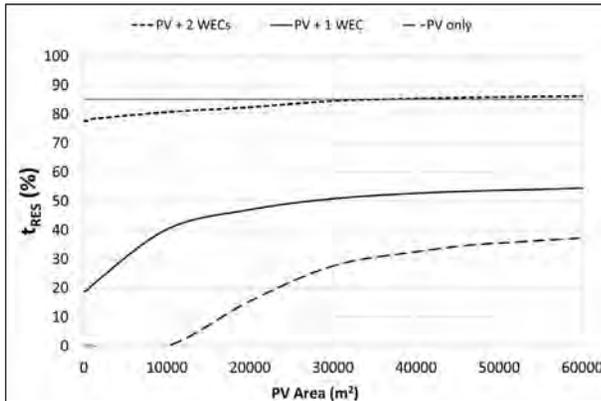


Figura 1. Ore di copertura energetica da rinnovabili al variare del numero di WECs e di pannelli solari (Dallavalle et al., 2021).

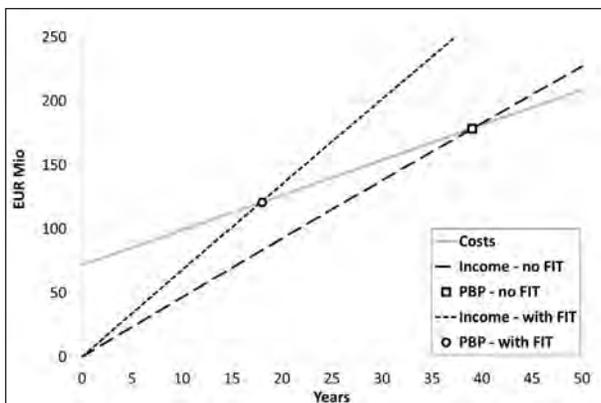


Figura 2. Costi cumulati e guadagni dell'impianto ibrido, in presenza o in assenza di incentivi (Dallavalle et al., 2021).

Conclusioni

Il metodo proposto per l'individuazione della combinazione ottimale di differenti risorse rinnovabili è del tutto generale e può essere applicato indipendentemente dal numero, dal tipo e dall'andamento nel tempo delle risorse disponibili e delle attività da alimentare e qualsiasi siano le proprietà e le componenti del sistema. Esso si è rivelato un utile strumento per valutare gli effetti positivi dell'inclusione di WECs all'interno di impianti ibridi, in particolare per quanto riguarda l'incremento della continuità energetica a livello temporale. La preliminare analisi economica ha inoltre indicato come l'integrazione dei WECs con altre fonti energetiche rinnovabili più consolidate, in particolare in presenza di incentivi statali, possa contribuire a renderli più economicamente sostenibili, incoraggiandone la sperimentazione e la futura commercializzazione.

Bibliografia

- Dallavalle E., Cipolletta M., Casson Moreno V., Cozzani V., Zanuttigh B., 2021. *Towards green transition of touristic islands through hybrid renewable energy systems. A case study in Tenerife, Canary Islands*. Renewable Energy, 174: 426-443.
- Dallavalle E., Zanuttigh B., Contestabile P., Giuggioli A., Speranza D., 2023. *Improved methodology for the optimal mixing of renewable energy sources and application to a multi-use offshore platform*. Renewable Energy, 210: 575-590.

Modellizzazione dei processi eutrofici nella laguna di Orbetello

Tommaso Salaorni¹

¹Università di Firenze, tommaso.salaorni@unifi.it

Riassunto

La Laguna di Orbetello, situata nella provincia di Grosseto, in Toscana, è un corpo idrico di transizione. Comunica con il Mar Tirreno tramite i tre canali di Fibbia, Nassa ed Ansedonia, che permettono dei ricambi idrici piuttosto modesti. Essa rappresenta una risorsa economica grazie alle attività di pesca e all'attrattiva turistica della zona della laguna e del Monte Argentario. La laguna è da decenni soggetta a fenomeni di eutrofizzazione, che in passato hanno provocato ripetute morie della fauna acquatica lagunare. Si configura quindi la necessità di sviluppare un supporto decisionale ad eventuali scenari di risanamento e recupero della zona, che sia in grado di simulare con sufficiente precisione i processi biologici e fisici presenti in laguna e simulare scenari variati rispetto al caso reale in modo da valutare l'impatto di più scenari di recupero. Il modello che è stato sviluppato, nella versione corrente, è in grado di riprodurre con precisione soddisfacente i livelli di ossigeno disciolto nella colonna d'acqua, e presenta un grande margine di miglioramento.

Parole chiave: Eutrofizzazione, modellistica, inquinamento, risanamento, macroalghe, modello, itticultura.

Abstract

The Orbetello Lagoon, located in the province of Grosseto, in Tuscany, is a transitional body of water. It communicates with the Tyrrhenian Sea via the three canals of Fibbia, Nassa and Ansedonia, which allow rather modest water exchanges. It represents an economic resource coming from fishing activities and the tourist attraction of the lagoon area and Monte Argentario. The lagoon has been subject to eutrophication phenomena for decades, which in the past have caused repeated death waves of the lagoon's aquatic fauna. There is therefore a need to develop a decision-making support for possible rehabilitation and recovery scenarios of the area, which has capable of simulating with sufficient precision the biological and physical processes present in the lagoon and simulating scenarios different from compared to the real case in order to evaluate the impact of multiple recovery options. The model that has been developed, in the current version, is able to reproduce the levels of dissolved oxygen in the water column with satisfactory precision and has great room for improvement.

Keywords: Eutrophication, modeling, pollution, remediation, macroalgae, model, fish culture.

Introduzione al problema

L'eutrofizzazione rappresenta uno squilibrio ecologico causato dall'accumulo eccessivo di nutrienti, in particolare azoto e fosforo, nelle acque superficiali. Questo processo conduce ad una grande proliferazione di alghe e batteri causando impatti negativi sull'ecosistema, come la riduzione dell'ossigeno disponibile per la fauna ittica e l'alterazione della qualità dell'acqua.

Le lagune costiere sono ecosistemi caratterizzati da una produttività primaria pari a 10-15 volte superiore a quella delle aree continentali (Carrada e Fresi, 1998) (Duarte, 1995) (Valiela, 1995). Ciò è dovuto alla

presenza di un'intensa attività microbica che, degradando le sostanze organiche, permette di ricircolare i nutrienti in esse presenti (Mann, 1988) (Sorokin et al., 1996). A ciò si aggiunga lo stock abbondante che viene a formarsi nello strato sedimentario del fondale e che può tornare ad essere bio-disponibile al variare delle condizioni ambientali locali. Su questo stato nutrizionale si instaura una complessa rete alimentare che, più di altri sistemi marini, è collegata alla dinamica dei produttori bentonici e planctonici (Mann, 1988) (Izzo & Hull, 1991) (Borum & Sand-Jensen, 1996). Già tra il 1975 ed il 1993 la laguna di Orbetello conobbe sempre più frequenti fenomeni di eutrofizzazione (Cognetti, et al., 1978) (Lenzi & Angelini, 1984) (Bucci, et al., 1992) (Cartei & Innamorati, 1997) con pronunciate fioriture algali accompagnate da crisi anossiche. Le crisi furono spesso accompagnate dalla morte di organismi aerobici, come nel 1986 e 1993 quando si stimarono perdite di pesci per, rispettivamente, 150 e 90 tonnellate (Lenzi, 1992) (Innamorati, 1998). Le problematiche legate all'eutrofizzazione delle acque della laguna di Orbetello sono associate ad una serie di cause che hanno comportato nel tempo l'accumulo di nutrienti all'interno del corpo lacustre. Nel tempo ad alcune di queste si è posto rimedio, come con la costruzione dell'impianto trattamento reflui di Terrarossa, che prende in carico la rete fognaria di Orbetello, la quale scaricava precedentemente in laguna. Tuttavia, permangono gli allevamenti ittici che, scaricando i propri reflui (uno direttamente in laguna, l'altro nei canali di collegamento con il mare), rappresentano tutt'ora un elemento di apporto nutrizionale non trascurabile (Lenzi, et al., 2000), e l'apporto dal fiume Albegna che comunicando con la laguna tramite il canale di Fibbia, potrebbe essere un'ulteriore fonte di contaminanti.

Monitoraggio corrente

Su commissione della Regione Toscana, ARPAT svolge attività monitoraggio della laguna, tra cui campionamenti delle acque per analisi chimiche e acquisizione e validazione di dati acquisiti in continuo dal seguente sistema di strumentazione:

- 3 sonde multi-parametriche installate in laguna, denominate Ponente, Levante, Levante 2. Misurano pH, conducibilità elettrica, temperatura, potenziale redox e ossigeno disciolto nelle acque;
- 3 correntometri, installati in corrispondenza dei canali di Fibbia e Ansedonia e in corrispondenza della cosiddetta Diga (infrastruttura che collega Orbetello al Monte Argentario);
- 3 anemometri installati in corrispondenza delle stazioni di Ponente e levante, ed in corrispondenza della stazione meteo del SIR;
- 4 idrometri installati uno in ciascun canale ed uno in prossimità della Diga;
- 2 punti di campionamento manuale, denominati MAS-88 e MAS-89 e gestiti da ARPAT, designati per la raccolta di campioni dalle acque della laguna allo scopo di condurre analisi chimiche.

Questi dati, completati da rilevazioni in-situ condotte dal Dott. Leporatti (Leporatti, 2022), dai dati di Copernicus Marine Service e da studi precedenti sulla laguna di Orbetello, compongono il database su cui ci si è basati per la conduzione di questo lavoro.



Figura 1. Posizionamento di centraline, punti di campionamento e strumentazioni di monitoraggio.

Approccio metodologico alla modellizzazione

Per la costruzione del modello ecologico si è fatto utilizzo del software Mike 21, che fornisce una suite di strumenti per la modellizzazione biologica ed idrodinamica. È uno strumento per la creazione di modelli di ecosistemi acquatici atti a descrivere la qualità dell'acqua, i fenomeni eutrofici, le contaminazioni da metalli pesanti e l'ecologia dei corpi idrici superficiali. Questo mette a disposizione una serie di modelli matematici predefiniti e gli strumenti per la creazione di modelli personalizzati. Per il presente lavoro si è scelto di utilizzare uno dei modelli forniti dal software e di adattarlo, con modifiche anche piuttosto profonde, al funzionamento tipico e particolare della laguna di Orbetello.

Esistono due macro-approcci alla modellizzazione matematica: l'approccio ad agente e l'approccio a processo. La modellizzazione orientata ai processi è una tecnica di modellizzazione ormai ben consolidata. Solitamente la variazione di una massa o di una concentrazione variabili nel tempo è descritta da un'equazione differenziale ordinaria (EDO):

$$\frac{dA}{dt} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

Un termine (P_1 , P_2 , P_3) che si trova nella parte destra di tale EDO è comunemente chiamato "processo" poiché di solito descrive il contributo di un singolo processo biologico o reazione chimica per la variabile A , ad es. il cambiamento di A dovuto al processo di crescita e respirazione della vegetazione. La dinamica di A deriva quindi dall'interazione di tutti i processi ad essa associati.

La modellizzazione orientata ai processi è ampiamente applicata, ad es. per modellizzare concentrazioni come livelli di ossigeno, inquinamento o biomassa. Essa costituisce la spina dorsale del modello biologico della laguna.

Il modello si struttura mediante un insieme di entità interagenti, dette oggetti, le quali, attraverso relazioni matematiche, elaborano tutti i fattori che influenzano la dinamica della simulazione.

- a) Variabili di stato: rappresentano le caratteristiche target che vengono consultate per valutare la qualità dell'acqua e lo stato di salute della laguna, ad esempio ossigeno disciolto e solidi sospesi;
- b) Costanti: rappresentano argomenti nelle espressioni del modello che sono costanti nel tempo ma possono cambiare nello spazio. Esempi tipici sono i coefficienti di calibrazione, le relazioni stechiometriche o le concentrazioni di semi saturazione;
- c) Forzanti: rappresentano fattori esterni all'ecosistema lagunare che prendono parte alle espressioni del modello. Esempi sono la temperatura, la salinità o la batimetria;
- d) Variabili ausiliarie: le variabili ausiliarie rappresentano calcoli intermedi che sono necessari a più di un processo. Permettono di eseguire il calcolo una volta sola per poi passare il risultato a tutti i processi che lo necessitano, risparmiando risorse.

Per quanto riguarda la laguna, questa viene schematizzata in una mesh di calcolo composta da un numero finito di elementi triangolari (celle). La dimensione di ciascuna cella varia in accordo con quelle che sono le necessità di calcolo: i canali e le aree di maggior interesse hanno bisogno di essere modellizzate con una risoluzione spaziale maggiore (celle più piccole), mentre zone dove si ritiene opportuna una maggiore approssimazione permettono l'utilizzo di risoluzioni meno stringenti. La scelta della risoluzione della mesh si traduce quindi in un'analisi costi-benefici: una mesh ad alta risoluzione offre il vantaggio di fornire risultati più dettagliati nello spazio e consente calcoli più precisi relativi al trasporto e alla movimentazione in acqua di solidi sospesi e specie chimiche disciolte. Tuttavia, ciò comporta tempi di calcolo significativamente più lunghi. Una risoluzione più bassa fornirà risultati meno dettagliati, ma avrà il prezioso beneficio di snellire, anche significativamente, i tempi di calcolo. Quest'ultimo aspetto non è da sottovalutare: il processo di costruzione, correzione e calibrazione del modello è fortemente iterativo. La complessità intrinseca del modello rende difficile anticipare con precisione gli effetti di una modifica o l'introduzione di nuovi processi. Ogni parte del modello è interconnessa con le altre, generando dinamiche di causa-ed-effetto intricate e spesso difficili da valutare a priori. Modifiche e aggiunte richiedono quindi l'esecuzione di numerose simulazioni, mettendo alla prova la funzionalità del modello e sottoponendolo a stress-test. Questo approccio iterativo è essenziale per garantire una valutazione accurata e completa delle modifiche apportate, ma risente fortemente della durata di ciascuna simulazione.

È cruciale poi selezionare attentamente la mesh per il modello, in quanto mesh diverse possono produrre risultati leggermente differenti. La scelta deve essere quanto più definitiva possibile, ma senza escludere la possibilità di apportare modifiche in futuro. Al contrario, la struttura della mesh deve agevolare l'implementazione di cambiamenti minimizzando le variazioni. Ad esempio, potrebbe essere auspicabile simulare gli effetti di dragaggi o modifiche morfologiche al fondale. Introdurre tali modifiche comporta inevitabilmente modifiche nella mesh e, pertanto, è fondamentale che tali aggiornamenti siano il più contenuti possibile. Questo approccio consente di mantenere la flessibilità necessaria per adattare il modello alle esigenze future, senza compromettere la coerenza e la stabilità della simulazione. Alla luce di queste considerazioni, si è deciso di fare uso di una mesh (figura 2) composta da 7199 celle e che richiede circa 9-11 ore per simulare un anno di processi in laguna.

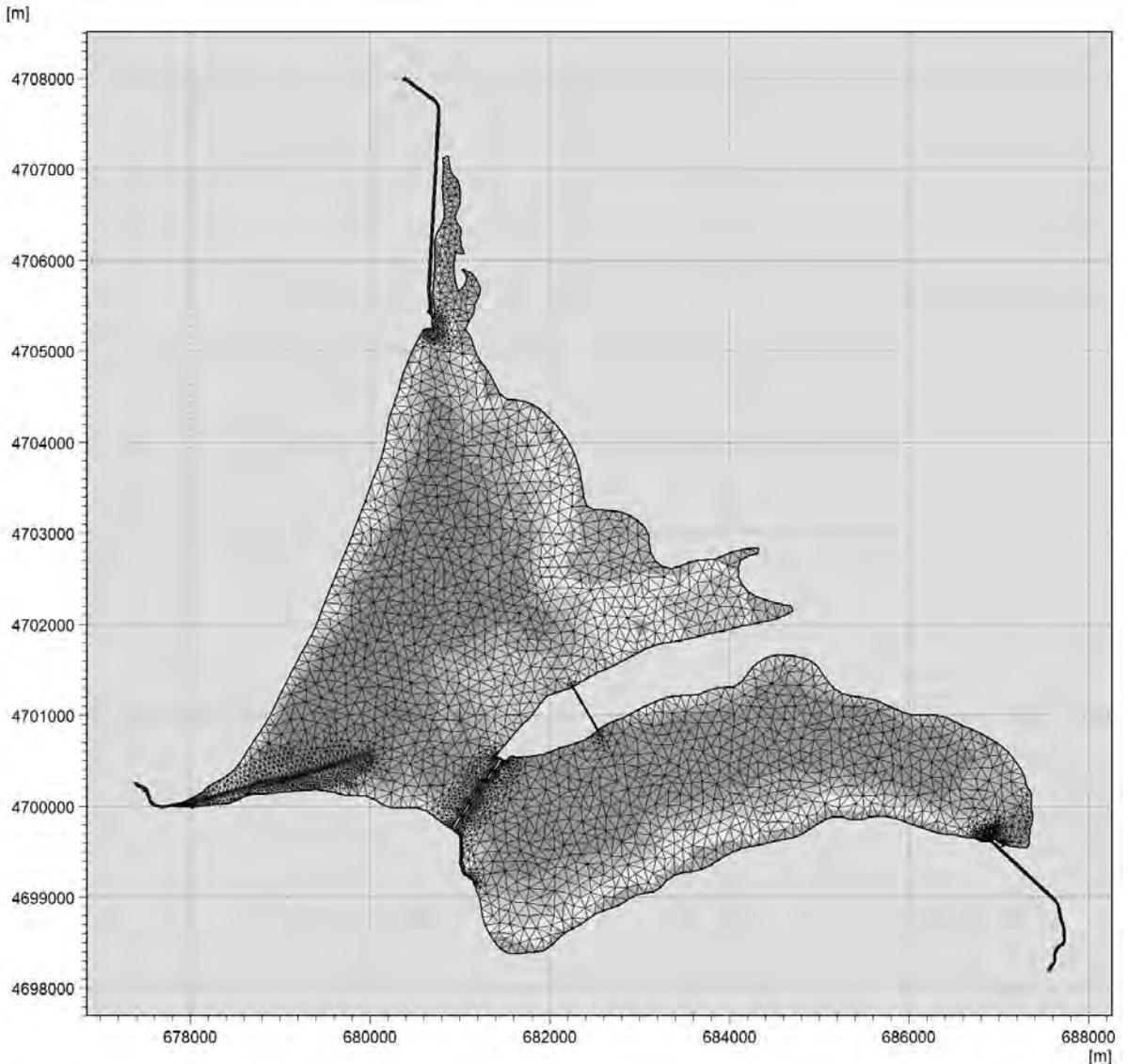


Figura 2. Mesh di calcolo utilizzata per le simulazioni del modello ecologico.

Il modello deve tenere conto anche di tutte le interazioni che si svolgono sulla profondità della laguna, dalla superficie dell'acqua fino all'interno del fondale. Questo potrebbe essere ottenuto tramite un funzionamento tridimensionale, composto da una mesh tridimensionale in cui ciascuna cella può comunicare in tutte le

direzioni con le celle circostanti. Una soluzione di questo tipo comporta però la creazione di un modello più complesso e una dilatazione dei tempi di calcolo. Il modello si serve invece di proprietà dette "ambiti" (figura 3), da associare ad oggetti come concentrazioni, costanti, variabili di stato ecc. Ogni ambito descrive la posizione verticale dell'oggetto nella colonna d'acqua. Gli ambiti hanno principalmente lo scopo di organizzare il modello e imitare una struttura tridimensionale. Gli elementi con ambiti non comunicanti, infatti, non possono interagire tra loro: un elemento appartenente all'ambito della superficie dell'acqua, ad esempio, non può interagire direttamente con un altro elemento definito nell'ambito del sedimento, perché sono separati dall'ambito della colonna d'acqua.

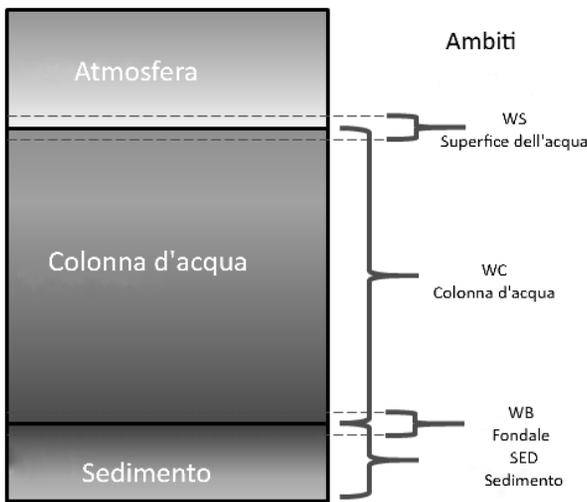


Figura 3. Schema degli ambiti di calcolo.

Struttura del modello biologico

Per quanto riguarda il lato biologico del modello, questo prevede esplicitamente quattro popolazioni di specie viventi: fitoplancton, zooplancton, macroalghe e vegetazione radicata al fondale. Altre popolazioni, come i batteri eterotrofi o nitrificati coinvolti nella degradazione del materiale organico, sono inclusi implicitamente nelle formule di calcolo e non vengono calcolate esplicitamente tramite una variabile di stato dedicata. Questo comporta un importante risparmio di risorse. Il fondale e il materiale organico che lo compongono sono parte integrante e fondamentale dell'ecosistema lagunare. Questo viene modellizzato tramite i cicli dell'azoto (figura 4) e del fosforo (figura 5). Il funzionamento generale del modello, con un focus per quanto riguarda il bilancio dell'ossigeno disciolto in acqua, è schematizzato in figura 6.

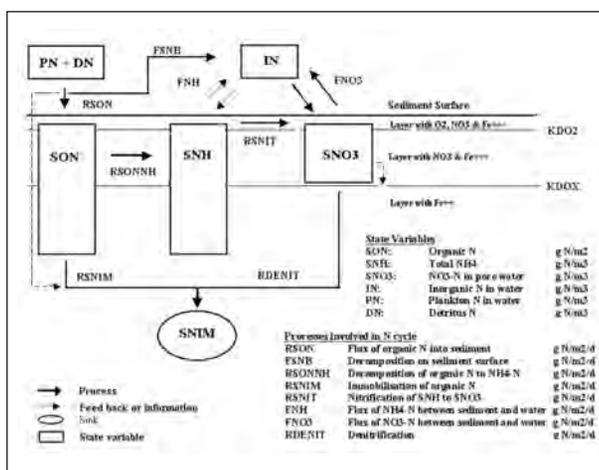


Figura 4. Schematizzazione del ciclo dell'azoto all'interno del sedimento.

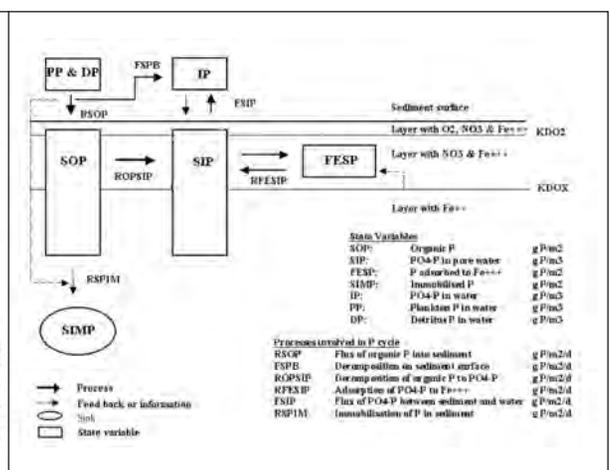


Figura 5. Schematizzazione del ciclo del fosforo all'interno del sedimento.

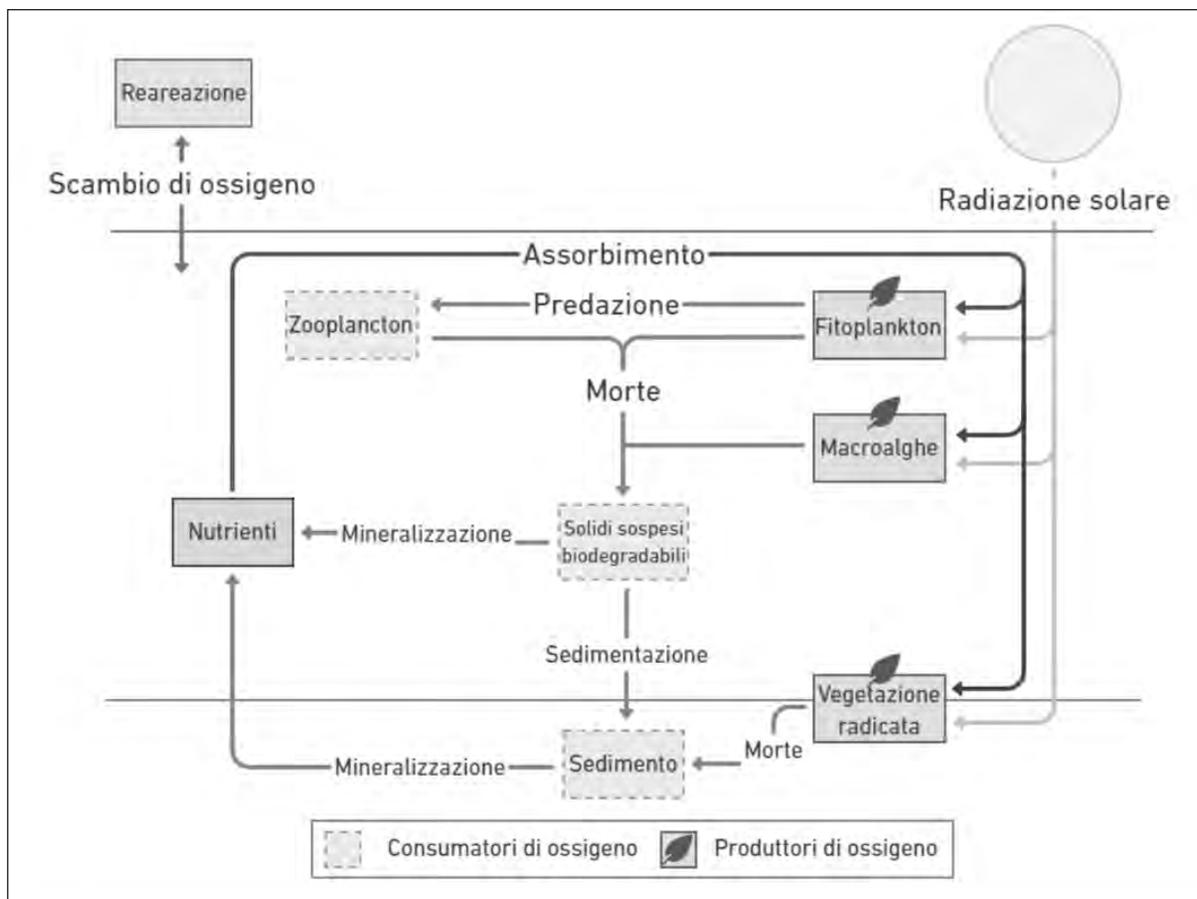


Figura 6. Schematizzazione generale del modello biologico.

Il modello utilizza 25 variabili di stato (tabella 1) per rappresentare la qualità dell'acqua e le condizioni del fondale (sedimento) all'interno della laguna.

Tabella 1. Le variabili di stato che definiscono il modello ecologico.

Fitoplancton C	[mg/l]	Detrito N	[mg/l]
Fitoplancton N	[mg/l]	Detrito P	[mg/l]
Fitoplancton P	[mg/l]	Inorganico N	[mg/l]
Clorofilla-a	[mg/l]	Inorganico P	[mg/l]
Zooplancton C	[mg/l]	Ossigeno disciolto	[mg/l]
Detrito C	[mg/l]	Macroalghe C	[g/m ²]
Veg. radicata C	[g/m ²]	Macroalghe N	[g/m ²]
Veg. Radicata n. fusti	[-]	Macroalghe P	[g/m ²]
Profondità di penetrazione di NO ₃ nel sedimento	[m]	Organico P nel sedimento	[g/m ²]
PO ₄ adsorbito da Fe ⁺⁺⁺	[g/m ²]	Fosfati nei sedimenti	[g/m ²]
N organico nel sedimento	[g/m ²]	NO ₃ -N nell'acqua interstiziale (sedimento)	[g/m ²]
Ammonio nel sedimento	[g/m ²]	P immobilizzato nel sedimento	[g/m ²]
N immobilizzato nel sedimento	[g/m ²]		

Dati in ingresso al modello

Dati necessari

Per ogni simulazione sono necessari dei dati relativi alla laguna stessa e alle acque in ingresso al sistema ecologico:

- a) Condizioni iniziali: rappresentano il punto di partenza di ogni simulazione. Nello specifico sono composte da un valore per ogni variabile di stato per ogni punto del dominio di calcolo;
- b) Condizioni a contorno: sono le informazioni sulla qualità delle acque in ingresso dai canali. Nello specifico sono serie temporali che devono coprire tutta la durata del periodo da simulare. Inoltre, essendo relative a delle portate in ingresso, le uniche variabili di stato per le quali devono essere forniti dati sono quelle per le quali nel modello è previsto il trasporto in acqua (tutte quelle misurate in mg/l in tabella 1);
- c) Dati fisici ed idrodinamici: il modello richiede informazioni riguardanti salinità, batimetria, temperatura dell'acqua, vento, densità e dati idrodinamici completi, ovvero informazioni dettagliate sui flussi d'acqua nella laguna per l'intero periodo di simulazione. La ricostruzione bidimensionale del campo di correnti, dell'andamento dei livelli idrici, della temperatura e della salinità dell'acqua nella laguna di Orbetello è stata eseguita mediante simulazione numerica con il modulo Hydrodynamic Flexible Mesh del codice di calcolo Mike 21, non oggetto di questo articolo. Il codice è basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nella versione bidimensionale per flussi incomprimibili sotto le ipotesi Bussinesq e quella di distribuzione idrostatica della pressione (Shallow Water Equations – SWE). L'uso delle SWE è giustificato nello studio presente dalle profondità relativamente limitate dei fondali della laguna (aventi valori medi di circa 1.13 m). Per risolvere le SWE, il codice utilizza uno schema di soluzione esplicito ai volumi finiti. Questo tipo di simulazioni risultano spesso onerose: l'approccio adottato consente di eseguirle una volta sola per ogni mesh e fornire i risultati direttamente al modello ecologico, accelerando il lavoro;
- d) Sorgenti: rappresentano le acque in ingresso alla laguna da qualsiasi fonte che non siano i canali. Nel presente lavoro sono le acque meteoriche e di run-off dal bacino imbrifero della laguna e gli scarichi delle itticultore intensive di Ittima e Vigneto.

Per tutti i dati necessari si è fatto largo uso dei dati disponibili dal monitoraggio della laguna.

Provenienza dei dati per le condizioni iniziali

I dati riguardanti le condizioni iniziali sono stati estratti dalle seguenti fonti:

- a) Le tre centraline multi-parametriche presenti in laguna, per i dati riguardanti l'ossigeno disciolto;
- b) Dalla banca dati dei punti di campionamento MAS-88 e MAS-89 per quanto riguarda: Fitoplancton, Clorofilla, Azoto inorganico, Fosforo inorganico, Azoto totale, Fosforo totale;
- c) Dai dati riportati nelle relazioni tecniche del Dott. Leporatti (Leporatti, 2022) per quanto riguarda: macroalghe e vegetazione radicata con la loro rispettiva distribuzione in laguna;
- d) I resoconti tecnici stilati da ARPAT per la Regione Toscana per quanto riguarda gli scarichi delle itticultore intensive;
- e) Dati di letteratura (Izzo, et al., 2019) e di monitoraggio ambientale (Fanciulletti, et al., 2018) per i dati sul sedimento.

Molte di queste informazioni non sono disponibili nella forma necessaria per il modello. Si è fatto ricorso alle informazioni presenti in letteratura per convertire i dati disponibili nelle forme necessarie per il funzionamento del modello. In particolare:

- a) Fitoplancton, che viene fornito da ARPAT in cellule/litro viene convertito nelle sue frazioni C, N e P (Reynolds, 2006);
- b) Zooplancton, per i quali non si hanno dati, viene messo in relazione con la popolazione di fitoplancton e convertito nella sua frazione C (Reynolds, 2006) (D'Alelio, et al., 2016);
- c) Macroalghe e vegetazione radicata, per le quali sono disponibili dati espressi in Tonnellate Peso Umido (TPU), vengono convertite nelle loro frazioni C, N e P (Reynolds, 2006) (D'Alelio, et al., 2016).

Provenienza dei dati per le condizioni a contorno

Come anticipato, i dati riguardanti le condizioni a contorno sono analoghi a quelli necessari per le condizioni iniziali. A cambiare è la provenienza dei dati, per i quali si fa riferimento ai punti di campionamento MAR-AL, MAR-AS e MAR-SS, situati in mare. Rimangono analoghi anche i metodi di conversione di questi dati nei formati necessari per il modello.

Provenienza dei dati per le sorgenti

I dati necessari per l'inserimento nel modello degli scarichi delle itticolture provengono dai resoconti di monitoraggio stilati da ARPAT per la Regione Toscana. Per quanto riguarda i dati sulle acque meteoriche, si è fatto ricorso ai dati provenienti dalle stazioni meteorologiche locali e ad EPA SWMM per il calcolo delle portate di run-off.

Assunzioni

All'interno del modello, sono state introdotte alcune assunzioni esemplificative del problema al fine di agevolare il processo di simulazione e affrontare la mancanza di dati disponibili.

- Gli scarichi delle itticolture intensive vengono supposti costanti durante tutto l'anno e pari al valor medio;
- È nota la presenza di scaricatori di piena che servono il sistema fognario di Orbetello. In assenza di informazioni sulla loro attivazione, la portata in ingresso in laguna è considerata nulla per tutta la durata della simulazione;
- Il canale di Fibbia comunica con la foce del fiume Albegna (figura 1). La portata in ingresso in laguna dal canale viene rappresentata con i dati pari riportati dal sito di campionamento ARPAT MAR-AL, che in realtà è localizzato in mare di fronte alla foce del fiume Albegna.

Risultati ottenuti

Il modello restituisce una serie temporale per ogni variabile di stato, per ogni cella della mesh. È possibile salvare serie temporali per i valori assunti dai processi e dalle variabili ausiliarie, al fine di monitorarne il funzionamento e di avere un processo di risoluzione dei problemi più efficiente. La qualità del funzionamento del modello viene valutata in base al confronto tra i valori calcolati dal modello e i valori relativi al monitoraggio o presenti in laguna. Il confronto chiave, tuttavia, si concentra sulle misurazioni dell'ossigeno disciolto ottenute dalle tre centraline. Questo parametro non solo presenta dati sperimentali estremamente dettagliati su cui è possibile fare un confronto su base oraria, ma assume anche un ruolo di rilievo nelle situazioni di crisi distrofiche. La sua criticità risiede nel fatto che la sua diminuzione eccessiva rappresenta il principale fattore problematico per la fauna.

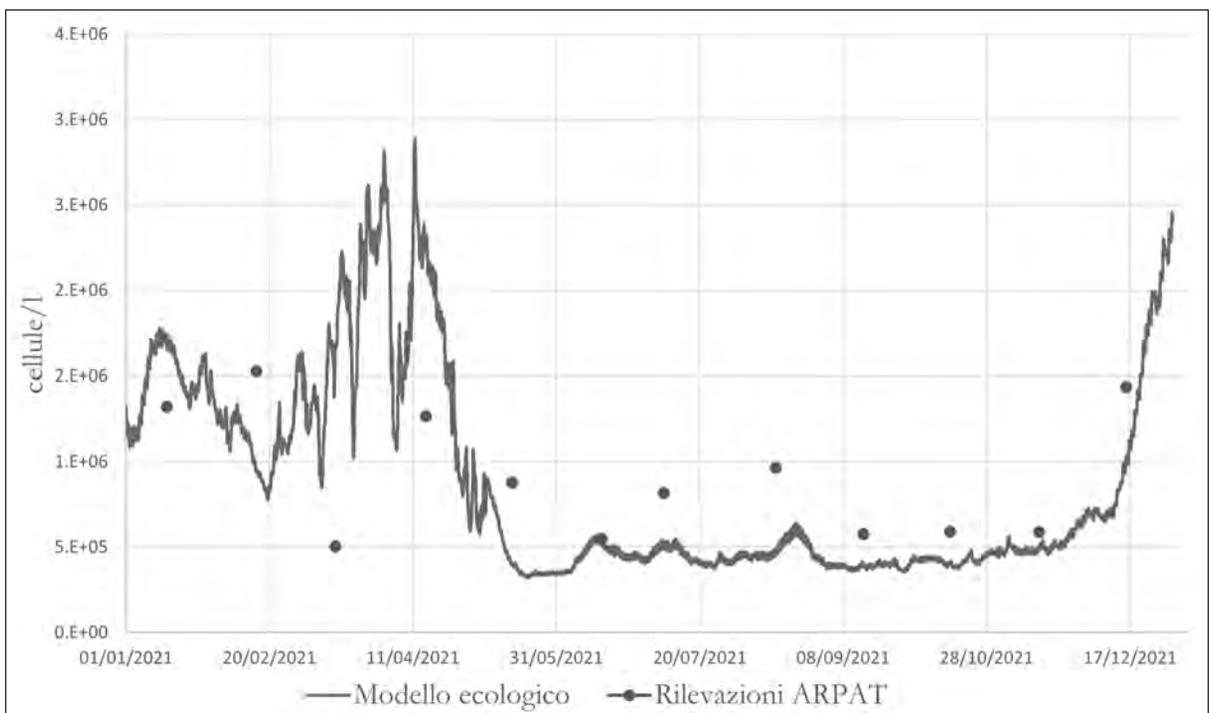


Figura 7. Andamento della popolazione di fitoplancton in laguna. Non essendo disponibili dati sul fitoplancton dai punti di campionamento MAS-88 e MAS-89 successivi al 2015, si è scelto di riportare una media mensile per ogni mese dell'anno, estrapolata dai dati precedenti). Il simulato è inoltre in linea con i dati di letteratura disponibili (Nuccio, et al., 2002).

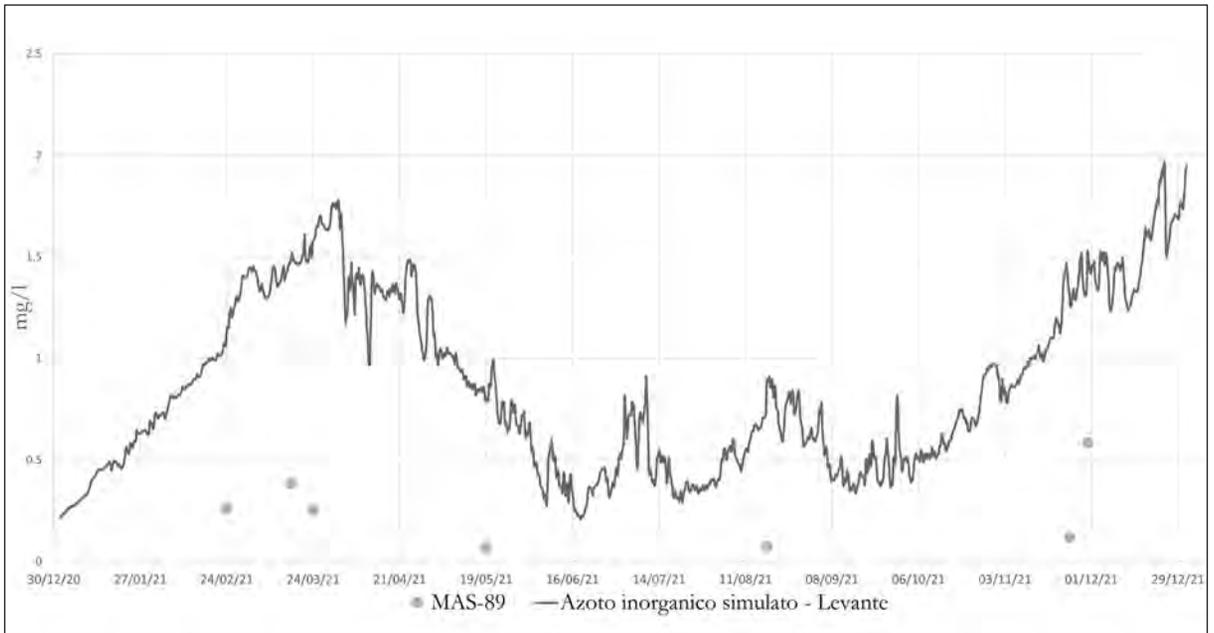


Figura 8. Andamento dell'azoto inorganico disciolto in laguna a Levante, confrontato con le rilevazioni di ARPAT da MAS-89.

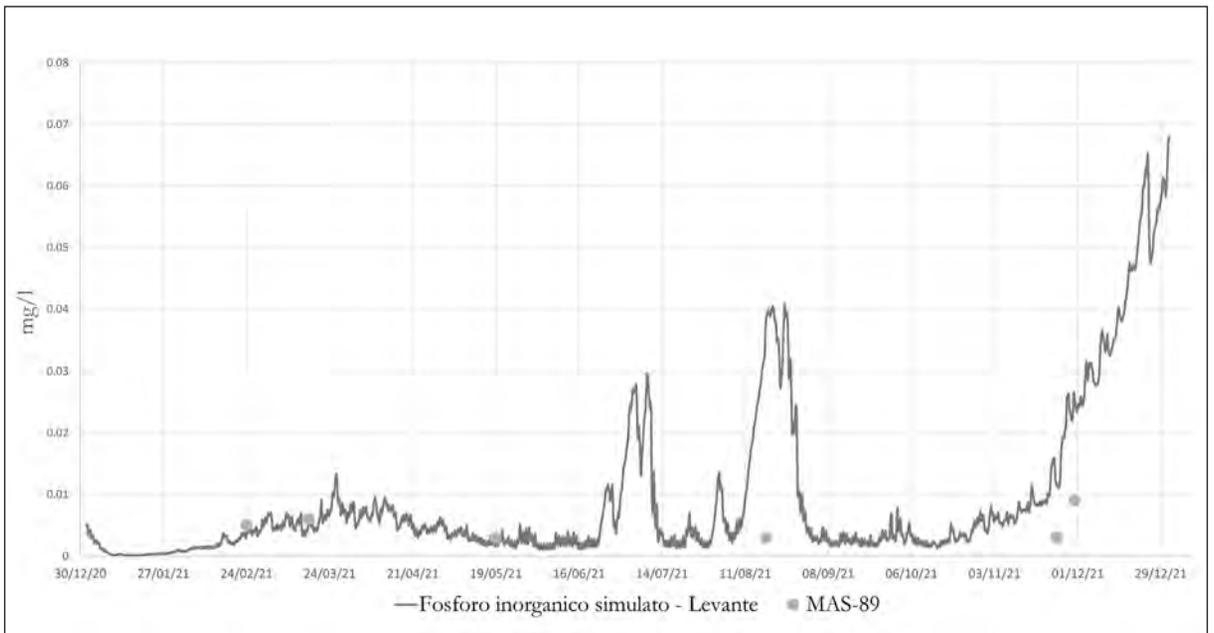


Figura 9. Andamento del Fosforo inorganico disciolto in laguna a Levante, confrontato con le rilevazioni di ARPAT da MAS-89.

Conclusioni

Il modello dimostra le sue potenzialità per le modellizzazioni di ambienti come quello della laguna di Orbetello. Questo necessita ancora di numerosi affinamenti, che possono essere coadiuvati da dati migliori sul sedimento, i quali risultano ad oggi difficili da reperire. Una volta completato, potrà essere di aiuto come supporto decisionale per la mitigazione delle problematiche ambientali che da decenni affliggono la laguna.

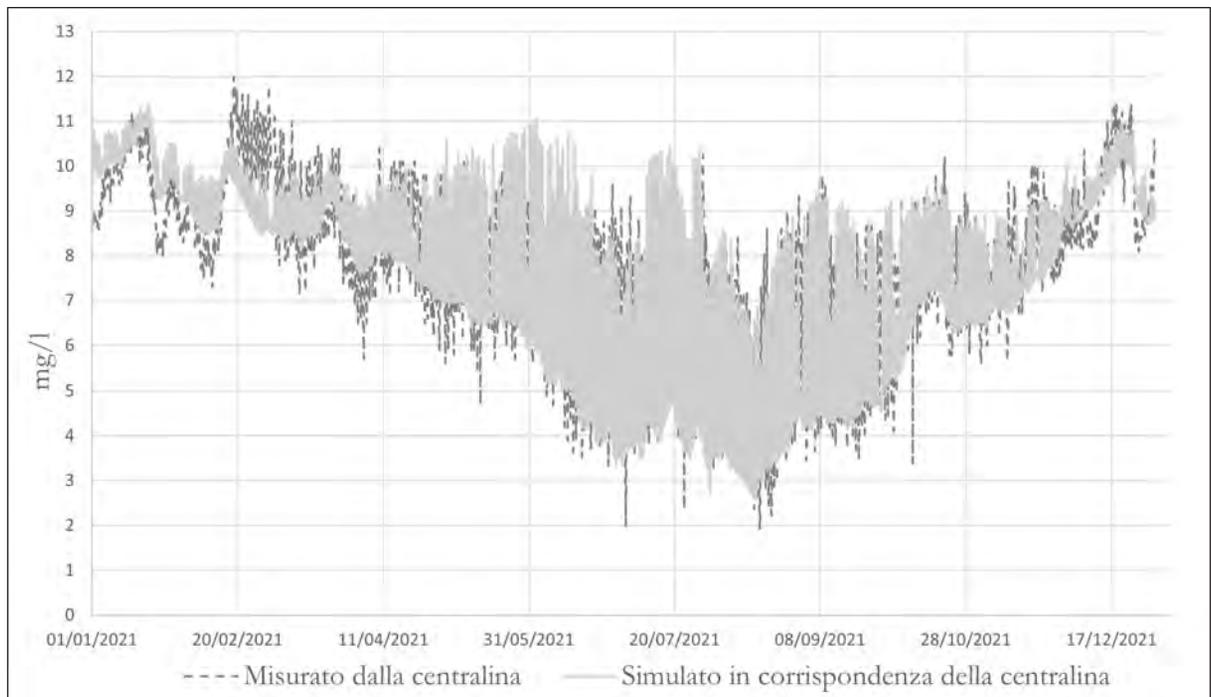


Figura 10. Ossigeno disciolto in acqua, confronto tra i valori simulati in corrispondenza della centralina ARPAT Levante 2, e i valori misurati dalla centralina stessa.

Bibliografia

- Borum & Sand-Jensen, 1996. Is Total Primary Production in Shallow Coastal Marine Waters Stimulated by Nitrogen Loading?
- Bucci, et al., 1992. Ecological conditions in the Orbetello Lagoon and suggested actions for its restoration.
- Carrada & Fresi, 1998. Le lagune salmastre costiere. Alcune riflessioni sui problemi e sui metodi.
- Cartei & Innamorati, 1997. Variazioni delle condizioni trofiche della laguna di Orbetello.
- Cognetti, Angelis & Orlando, 1978. Risanamento e protezione dell'ambiente idrologico delle lagune di Orbetello, Comune di Orbetello, Regione Toscana.
- D'Alelio, Libralato, Wyatt & Ribera D'Alcalà, 2016. Ecological-network models link diversity, structure and function in the plankton food web.
- Duarte, 1995. Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes.
- Fanciulletti; Macii; Franchi; Lenzi, 2018. *Valutazione dell'impatto dei reflui delle aziende Ittima e Vigneto nella laguna di Orbetello*, Follonica: Studio Stalf.
- Innamorati, 1998. La laguna di Orbetello: risanamento e gestione conservativa.
- Izzo & Hull, 1991. The anoxic crises in dystrophic processes of coastal lagoons: an energetic explanation.
- Izzo, et al., 2019. Indicatori funzionali della stabilità ecologica di ambienti lagunari.
- Lenzi, 1992. Experiences for the management of Orbetello Lagoon: eutrophication and fishing.
- Lenzi & Angelini, 1984. Indagine sulle condizioni ambientali della laguna di Orbetello. Chimico-fisica e carica microfitica.
- Lenzi, Palimieri & Porrello, 2003. Restoration of the eutrophic Orbetello lagoon.
- Leporatti, 2022. Valutazione delle attuali condizioni ambientali della laguna di Orbetello nell'anno 2021-2022, finalizzata all'avvio dei lavori di gestione e dei sistemi di mitigazione a contrasto dell'eutrofizzazione.
- Mann, 1988. Production and use of detritus in various freshwater, estuarine and coastal marine.
- Nuccio, Melillo, Massi & Innamorati, 2002. Phytoplankton abundance, community structure and diversity in the eutrophicated Orbetello lagoon (Tuscany) from 1995 to 2001.
- Reynolds, 2006. *The Ecology of Phytoplankton*. s.l.:Cambridge University Press.

Sorokin, Giovanardi & Dalla Venezia, 1996. Study of ecosystem of the Lagoon of Venice, with emphasis on antropogenic impact.
Valiela, 1995. *Marine Ecological Processes*. New York: Springer New York.

Ricevuto il 20/11/2023; accettato il 30/12/2023

Verso un Gemello Digitale della Costa Italiana

Juan Pablo Duque Ordoñez¹

¹Politecnico di Milano, juanpablo.duque@polimi.it

Introduzione

Nel contesto dell'iniziativa Destination Earth, un progetto a lungo termine per sfruttare la grande quantità di dati prodotti dalle agenzie europee e dalle organizzazioni scientifiche di tutto il mondo, è nato l'obiettivo di costruire un Digital Twin of the Earth (European Commission, 2023). Il Digital Twin Earth è un modello digitale della Terra ad alta precisione che integra vari aspetti del sistema terrestre al fine di monitorare e simulare i fenomeni naturali e le attività umane correlate, e che è in grado di esplorare il passato e il presente, e prevedere il futuro. Lo sviluppo di questo modello rientra anche nelle politiche "European Green Deal" (European Commission, 2019) e il "European Strategy for data" (European Commission, 2020). Inoltre, prevede la creazione di gemelli digitali più piccoli e modulari che compongono un sistema di gemelli (Nativi, Mazzetti, Craglia, 2021).

In questo articolo invece viene presentata una piattaforma web che integra e unisce un'ampia serie di oltre 60 livelli geospaziali di dati ambientali e demografici, forniti apertamente e gratuitamente da diverse sorgenti. Questa piattaforma utilizza tecnologie open-source e dati aperti. Con le informazioni disponibili su questa piattaforma, gli utenti sono in grado di fare esplorazioni e analisi su molti livelli informativi relativi a terre e mare ma anche studiare i dati demografici per capire come queste variabili interagiscono tra loro. In particolare, questa applicazione è focalizzata sulle aree costiere italiane.

La piattaforma costituisce un primo approccio allo sviluppo di un Gemello Digitale delle coste italiane nell'ambito della Digital Twin Earth. È anche una dimostrazione di come l'integrazione di dati geospaziali può essere utilizzata per creare gemelli digitali della terra.

Questo articolo contiene la descrizione della piattaforma sviluppata e il suo flusso di lavoro, oltre a una breve descrizione dei dati integrati nell'applicazione. Inoltre viene presentato un caso di studio sull'acidificazione degli oceani nell'area di Genova, e infine le conclusioni.

Piattaforma web sviluppata

La piattaforma sviluppata è un'applicazione web per l'integrazione di dati geospaziali, con l'obiettivo di fungere da prototipo di come l'integrazione dei dati possa essere utilizzata per costruire un Gemello Digitale della costa italiana. Questa applicazione utilizza il modello architettonico "Mediator/Wrapper" come strategia d'integrazione. Tale scelta rende l'applicazione più modulare, flessibile e scalabile, ma permette anche l'integrazione di diversi fonti di dati. Ciò corrisponde al paradigma dell'integrazione virtuale dei dati, in cui questi non sono replicati e ospitati dal proprietario dell'applicazione, ma vengono forniti attraverso servizi. In questo modo si evita la duplicazione dei dati.

L'iniziativa per il Digital Twin Earth ha individuato alcune tecnologie e concetti per la sua realizzazione (Fernandez, 2020). Questa piattaforma affronta componenti come Big Data e interoperabilità integrando diverse fonti di dati geospaziali e sfruttando standard dell'Open Geospatial Consortium (OGC) per i dati geospaziali. Inoltre, l'applicazione integra componenti come Cloud Computing e connettività fornendo

un'interfaccia web liberamente accessibile per ricercatori, studenti, e amministratori, sia per l'esplorazione che per l'analisi dei dati integrati.

Il flusso di lavoro dell'applicazione è composto da 5 fasi, come illustrato nella Figura 1. Inizialmente si deve scegliere un contesto spaziotemporale per filtrare i dati secondo una localizzazione e un periodo temporale. I dati integrati sono costituiti da centinaia di gigabyte e sono esposti tramite servizi web. Con questo primo filtro si facilita l'accesso alle informazioni, riducendo la quantità di dati da recuperare solo all'area e al periodo di interesse.



Figura 1. flusso di lavoro dell'applicazione.

Nella seconda fase, i livelli informativi da utilizzare per la visualizzazione e l'elaborazione vengono selezionati tra le varie opzioni filtrate nella prima fase. Questo permette di caricare solo i livelli desiderati senza scaricare il totale dei dati.

La terza fase comprende invece la visualizzazione e l'esplorazione dei dati. In questa fase, i dati possono essere esplorati nel tempo e nello spazio, ma anche sovrapposti e interrogati. Ciò consente di confrontare visivamente e identificare le relazioni temporali e spaziali.

La quarta fase è dedicata all'analisi dei dati. Per i dati caricati nella piattaforma è disponibile una serie di analisi. L'analisi puntuale comprende i profili di profondità e le serie temporali in una singola posizione, mentre l'analisi dell'area comprende le statistiche zonali (media, minimo, massimo, deviazione standard) e gli istogrammi dell'intera area di interesse.

Infine, la quinta fase è dedicata alla condivisione e alla persistenza. È possibile salvare e condividere il lavoro scaricando i parametri definiti nel corso di una sessione di lavoro nell'applicazione come scenario. Uno scenario è un file che contiene le informazioni necessarie per caricare l'applicazione nello stato in cui si trovava al momento del salvataggio. Questo permette di condividere il lavoro svolto in questa piattaforma anche con altri colleghi e ricercatori.

Dati utilizzati

La finalità di questa piattaforma è analizzare l'interazione tra mare, terra e popolazione. In questo primo approccio sono stati integrati in totale 68 strati geospaziali. Tutti i dati provengono da fonti pubbliche e aperte e comprendono un'ampia varietà di variabili e contesti.

Per i dati marini e marittimi, sono stati utilizzati i dati di Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). In particolare, sono integrate variabili biologiche, fisiche e chimiche nella piattaforma. I dati marini hanno un'alta risoluzione temporale, essendo forniti in tempi giornalieri e mensili. Tuttavia, la risoluzione spaziale è bassa, circa 3,5 km. Essi costituiscono comunque un'ampia gamma di variabili (come clorofilla, concentrazione di CO₂, pH, temperatura, tra altre), e sono fondamentali per la comprensione della componente marina della costa.

Per l'ambiente terrestre sono stati utilizzati dei dati di Copernicus Land Monitoring Service (CLMS). Questi comprendono, tra gli altri, copertura del suolo (in particolare, Corine Land Cover e Coastal Zones), corpi idrici e area edificata. Questi dati hanno una risoluzione temporale bassa, essendo prodotti ogni sei anni, e una risoluzione spaziale tra 10 e 100 metri.

Infine, per i dati della popolazione sono stati usati i livelli di densità della popolazione di WorldPop. Questi dati vengono prodotti ogni anno con una risoluzione spaziale di circa 70 metri. Gli strati dal 2015 al 2020 sono integrati nella piattaforma.

Caso di studio

Per dimostrare le capacità della piattaforma sviluppata è stato definito un caso di studio per analizzare l'acidificazione del mare nel area di Genova. In breve, l'acidificazione degli oceani è un processo in cui l'acqua del

mare diventa più acida a causa di una maggiore concentrazione di CO₂ nella superficie. Inizialmente, è stato selezionato il contesto spaziotemporale. L'area d'interesse comprende la città di Genova

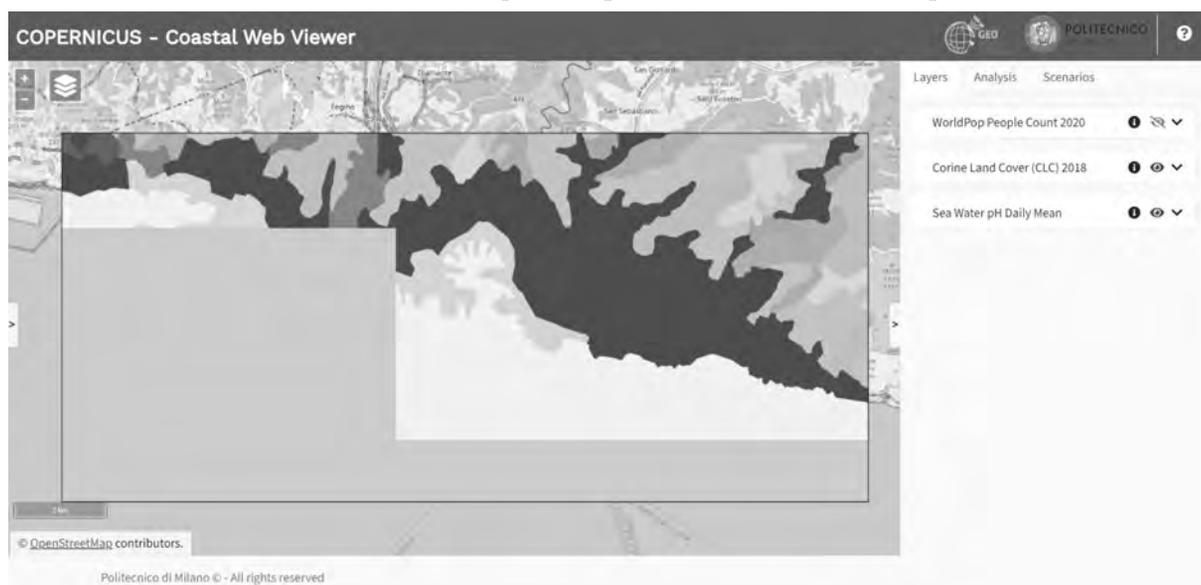


Figura 2. Area d'interesse con i livelli di copertura del suolo (Corine Land Cover 2018), pH (Sea Water pH Daily Mean), e popolazione (WorldPop People Count 2020).

e suoi dintorni. Le date vanno dal 1 luglio 2020 al 1 settembre 2021.

Dopo la selezione del contesto, sono stati selezionati diversi livelli per l'analisi dell'area d'interesse. Nella Figura 2 è possibile valutare i livelli di pH dell'acqua marina, ma anche la densità di popolazione e la copertura del suolo sulla terra. È possibile inoltre confrontare i diversi livelli nello spazio e nel tempo, osservando le diverse concentrazioni di composti chimici nell'acqua in diversi giorni, ma anche a diverse profondità.

Per l'analisi dei dati, nella Figura 3 è possibile vedere la variazione del livello di pH nel tempo in un punto dell'area d'interesse lungo il periodo temporale scelto. In tale analisi è possibile vedere la variazione tra le stagioni calde e fredde, con un pH più basso (quindi, acque più acide) nelle stagioni calde quando ci sono

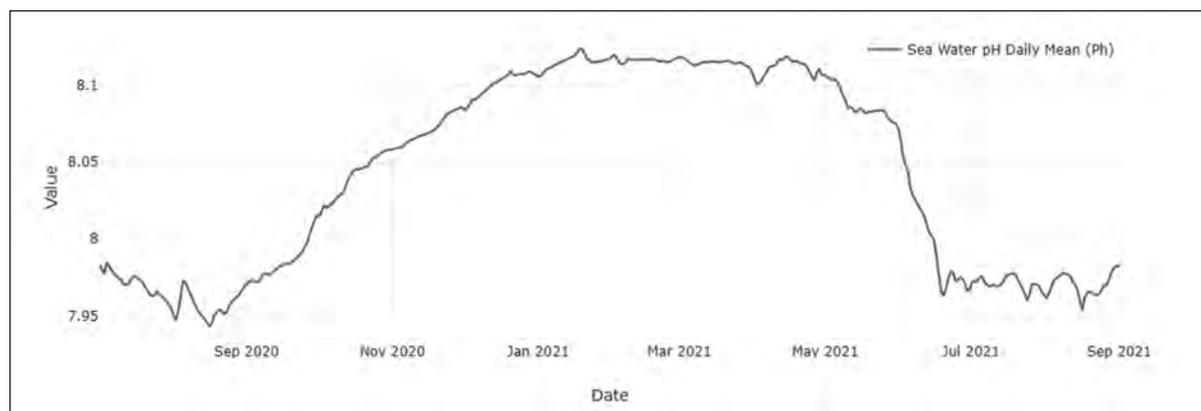


Figura 3. Livello di pH nel tempo da luglio 2020 a settembre 2021 in un punto localizzato nell'area d'interesse.

più persone per motivi turistici.

Conclusioni

Questo articolo è un riassunto della tesi magistrale "Towards a Digital Twin of the Italian Coast" (Duque, 2022). Presenta un primo approccio a un gemello digitale della terra per la costa italiana affrontando il

problema dell'interoperabilità dei dati con l'implementazione di una piattaforma web che utilizza l'architettura di software Mediator/Wrapper come strategia d'integrazione. Questa piattaforma innovativa permette l'integrazione e l'utilizzo di molteplici fonti di dati che difficilmente vengono messe insieme, per la loro visualizzazione, esplorazione, e analisi in contesti costieri.

Bibliografia

- Duque J., 2022. *Towards a Digital Twin of the Italian Coast*. Tesi Magistrale, Politecnico di Milano. <https://hdl.handle.net/10589/186454>
- European Commission, 2023. *Destination Earth*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>.
- European Commission, 2020. *A European Strategy for data*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/strategy-data>
- European Commission, 2019. *The European Green Deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- Fernandez D., 2020. *Scientific needs to realise Digital Twin Earth, Phi-Week 2020 summary*. Nessuno Ed. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/c3e12f114c2d4b1f9da4033e4cf9c624>.
- Nativi S., Mazzetti P., Craglia M., 2021. *Digital Ecosystems for Developing Digital Twins of the Earth: The Destination Earth Case*. *Remote Sensing*, Vol 13, Iss 11:, 2119. doi: 10.3390/RS13112119.

Ricevuto il 03/10/2023; accettato il 30/10/2023

Sulla incertezza della stabilità dei massi di armatura

Giulio Scaravaglione

Politecnico di Bari, giulio.scaravaglione@poliba.it

Introduzione

La stabilità idraulica delle scogliere frangiflutti si basa storicamente su equazioni empiriche in grado di mettere in relazione la resistenza al movimento dei massi di mantellata con le forze indotte dal moto ondoso. Tali equazioni empiriche, che sono state sviluppate principalmente sulla base di studi di laboratorio su piccola scala presentano notevoli incertezze. In particolare, tutt'ora non vi è un consenso unanime su quale sia la migliore formula di progettazione e sui relativi campi di applicazione. Gli stessi manuali, come ad esempio il Rock Manual (CIRIA, 2007), mostrano infatti delle zone di sovrapposizione tra le formule, circostanza questa, che crea incertezza tra gli addetti ai lavori su quale sia meglio utilizzare.

L'incertezza nella stabilità idraulica è dovuta non solo all'incertezza aleatoria intrinsecamente legata alla natura stocastica delle onde, alla geometria dei massi, e all'interlocking tra le unità, ma anche all'incertezza epistemica legata alle limitazioni di conoscenza, alle misure di laboratorio, agli errori, ecc. Mentre l'incertezza aleatoria appare irriducibile, quella epistemica appare riducibile.

Sebbene l'incertezza aleatoria nella stabilità idraulica sia sempre stata considerata dominante rispetto all'incertezza epistemica, l'entità di entrambi i contributi non è mai stata quantificata in modo esplicito, al fine di valutare la validità di questa ipotesi. Una chiara comprensione e quantificazione dei due contributi potrebbe agevolare la ricerca scientifica garantendo una maggiore fisica nelle formulazioni.

Il presente studio intende analizzare l'influenza dell'incertezza idrodinamica derivante dalle misure ondose di laboratorio sulle formule di progetto utilizzando un modello numerico del tipo Boussinesq 1-D.

Principali cause di incertezza

L'altezza d'onda è il parametro dominante nelle formule di stabilità, per cui la relativa incertezza è molto importante. L'incertezza idrodinamica totale è data, come noto, dalla sommatoria di diversi contributi che derivano dalle osservazioni e dalle caratterizzazioni parametriche. Ad esempio, l'incertezza inerente alle osservazioni delle onde può essere attribuita a diverse cause come: la generazione delle onde, i metodi di misura, a come e dove vengono osservate le onde incidenti, alle procedure di analisi di riflessione e ad altri fenomeni. L'incertezza idrodinamica è tipicamente maggiore in condizioni di acque basse con ampie surf zones (Hughes, 1993), in quanto i metodi utilizzati per analizzare le onde incidenti e riflessi derivano dalla teoria lineare che non sarebbe applicabile a tali casi. In laboratorio, tutti questi aspetti sono accentuati. Mansard e Funke (1987) hanno condotto lo stesso test in 9 laboratori diversi con l'obiettivo di valutare le differenze nei risultati dei test causate dalle diverse condizioni sperimentali (Mansard e Funke, 1987). I risultati hanno permesso di riscontrare un'elevata variabilità nei valori d'onda caratteristici, nonostante lo stesso modello fisico.

Metodologia

Gli sforzi per descrivere i complessi fenomeni di onda-struttura si sono basati su campagne di prove sperimentali, le quali hanno prodotto ampi dataset ottenuti in diversi laboratori in diversi periodi storici. Per-

tanto, reperiti i dati di danno disponibili in letteratura, è stato costituito un unico database caratterizzato da diverse condizioni spettrali e di profondità. Sfruttando questo nuovo ed esteso set di dati (più di 700), sono state confrontate criticamente le più note formule di stabilità per le mantellate di scogliere in massi naturali. Tale confronto ha portato alla conclusione che nessuna formula di stabilità è significativamente migliore delle altre a causa di un'elevata incertezza nei dati di laboratorio. Tuttavia, è difficile (se non impossibile) quantificare l'incertezza epistemica quando si confrontano insieme dati non omogenei.

Per questo motivo, è stato fatto il setup di un modello numerico del tipo Boussinesq 1-D (Lynett et al., 2002) con cui riprodurre accuratamente le condizioni d'onda incidenti e riflesse al piede della struttura dei test di laboratorio. Prima dell'applicazione è stata condotta una fase preliminare di convergenza e calibrazione del modello numerico. La forma spettrale e i relativi parametri d'onda sono stati uguagliati in prossimità del generatore di moto ondoso. Infatti, accertata la corretta calibrazione del momento, generando identiche condizioni ondose a largo, è possibile confrontare i vari dati di laboratorio al piede della struttura con onde coerenti e confrontabili. Si riporta, a titolo di esempio, in Figura 1, la variazione longitudinale dei parametri d'onda (H_{m0} e $T_{m-1,0}$) lungo il canale misurate in laboratorio (cerchi) e calcolate numericamente (linea continua) dimostrando che, vi è un considerevole scostamento dell'ordine del 10-20% tra i dati numerici e i dati di laboratorio.

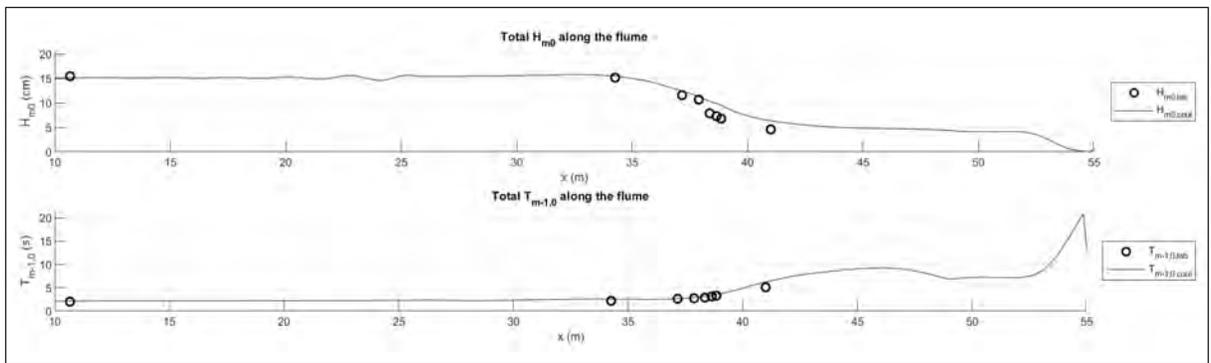


Figura 1. Variazioni longitudinali di H_{m0} e $T_{m-1,0}$ lungo il canale misurate in laboratorio e calcolate numericamente.

Risultati e conclusioni

I risultati preliminari mostrano notevoli differenze sistematiche quando si confrontano studi svolti in differenti laboratori e in diversi periodi storici. Tali differenze sono più evidenti per i periodi ($T_{m-1,0}$) piuttosto che per le altezze d'onda (H_{m0}) calcolati al piede della struttura (Figura 2, dove si riportano solo alcuni dei dati dell'intero dataset). Le cause relative a questa incertezza possono essere molteplici. Ad esempio, in laboratorio non è possibile, a causa di limitazioni fisiche, eliminare totalmente la ri-riflessione nel canale. Ancora, le classiche analisi di riflessione che si basano sulla teoria lineare inducono elevate incertezze se applicate in condizioni non lineari.

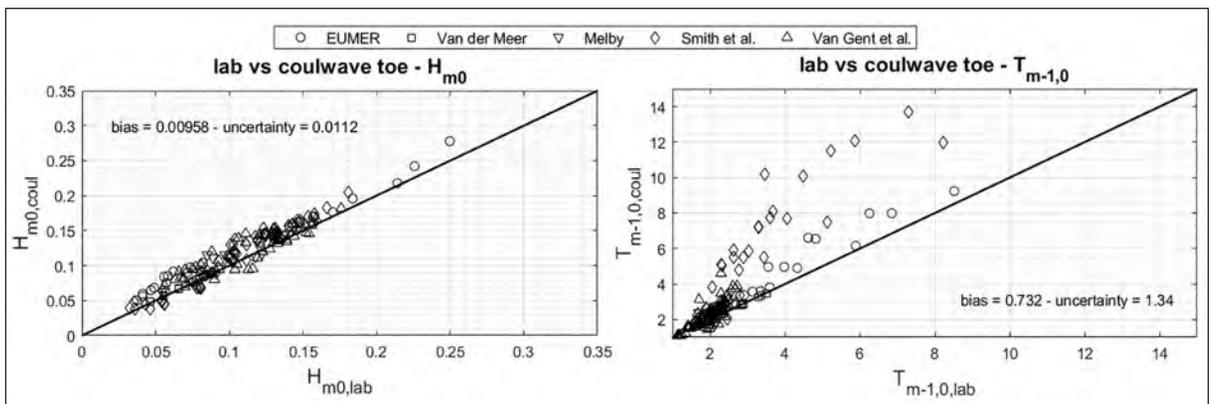


Figura 2. Confronto dati numerici vs dati laboratorio per valori caratteristici d'onda al piede della struttura.

Studi che utilizzano misure d'onda senza la struttura nel canale e che utilizzano i classici metodi di analisi di riflessione hanno mostrato incertezze relativamente minori rispetto a quelli con la struttura all'interno del canale.

Tale approccio consente una migliore comprensione dell'incertezza migliorando la comprensione della fisica e della forzante sulla struttura. Inoltre, è possibile separare l'errore indotto dalle formule di stabilità da quelli legati ai test di laboratorio al fine di valutare il contributo dell'incertezza idrodinamica sull'incertezza totale dei modelli predittivi.

A causa della recente tendenza di progettare le strutture costiere utilizzando un più moderno approccio di tipo probabilistico, un miglioramento della fisica potrebbe essere più opportuno anche a scapito dell'aumento dell'incertezza.

Bibliografia

- CIRIA, CUR, CETMEF, 2007. *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering*, (2nd edition), C683, CIRIA, London, 2007.
- Hughes, S.A., 1993. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. Vol. 7. World Scientific.
- Mansard, E.P.D., Funke, E.R., 1987. *Experimental and analytical techniques in wave dynamics, a comparative study*. In IAHR Seminar on Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins, pp. 91-116.
- Lynett P., Liu P.L.F., Sitanggang K.I., Kim D.H., 2002. *Modeling wave generation, evolution, and interaction with depth integrated dispersive wave equations COULWAVE code manual*. Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package.

Fotogrammetria topografica e subacquea per la modellazione 3D georeferenziata unificata

¹Ali Alakbar Karaki, ¹Stefano Cunietti, ¹Ilaria Ferrando, ¹Domenico Sguerso

¹Geomatics Laboratory, Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering (DICCA), University of Genoa, 16145, Genoa, Italy

Introduzione

La fotogrammetria è emersa come strumento fondamentale in numerose discipline, illustrando il modo in cui comprendiamo e interagiamo con l'ambiente circostante. L'articolo presenta una metodologia innovativa che integra la fotogrammetria topografica tramite un veicolo aereo senza pilota (UAV) con la fotogrammetria subacquea. Questa metodologia trova ampie applicazioni in campi quali il rilevamento, la cartografia, l'archeologia, la geologia e il monitoraggio ambientale. La sua capacità di ricostruire modelli tridimensionali accurati (Obanawa et al., 2020) a partire da immagini bidimensionali ha spinto questo strumento all'avanguardia della moderna analisi geospaziale e a realizzare un approccio interdisciplinare (Karaki et al., 2022). L'integrazione di queste due applicazioni, la fotogrammetria topografica e subacquea, rappresenta un'importante opportunità per creare un quadro unificato per l'analisi geospaziale delle aree costiere, fornendo un modello 3D continuo per l'ambiente emerso e sommerso.

Area di studio e metodi

Il metodo proposto integra la fotogrammetria topografica da UAV con la fotogrammetria subacquea eseguita da uno snorkeler, con l'obiettivo di combinare dati provenienti da ambienti diversi in un modello 3D coerente e georeferenziato. Gli elementi chiave includono la fotogrammetria topografica basata su UAV e la fotogrammetria subacquea condotta da uno snorkeler. Lo snorkeler, una fotocamera subacquea e un marker rivolto verso l'alto, funge da GCP dinamico rispetto all'UAV. La metodologia si basa sulla localizzazione fotogrammetrica della posizione dello snorkeler, in sostituzione del sistema di navigazione globale (GPS). Le tecniche di elaborazione delle immagini determinano la posizione dello snorkeler e calcolano le coordinate della fotocamera durante la raccolta dei dati subacquei, con il supporto di ortofoto che armonizzano le informazioni spaziali aeree. Collegando questi approcci, questo studio fa progredire la modellazione geospaziale, ampliando le possibilità di valutazione globale del paesaggio. Per fornire una comprensione più chiara della metodologia, abbiamo fatto un'applicazione attraverso un caso di studio pratico a Sestri Levante e abbiamo acquisito i dati provenienti dall'UAV e dallo snorkeler e, attraverso l'elaborazione dei dati, abbiamo stimato la posizione dello snorkeler al fine di collegare entrambi gli ambienti.

Risultati e discussione

L'implementazione della metodologia proposta ha dato risultati degni di nota, evidenziando l'efficacia e l'adattabilità dell'approccio nella fusione di dati provenienti da ambienti diversi. L'ordine di fusione dei dati è stato correlato alla stima accurata della posizione dello snorkeler e, come risulta dall'applicazione sul campo, la stima del posizionamento dello snorkeler è stata paragonabile all'ordine di errore delle ortofoto ottenute provenienti da UAV, non superiore a pochi centimetri. La valutazione dell'errore è stata effettuata mediante processi di Bundle Block Adjustment. Quindi, attraverso l'impiego

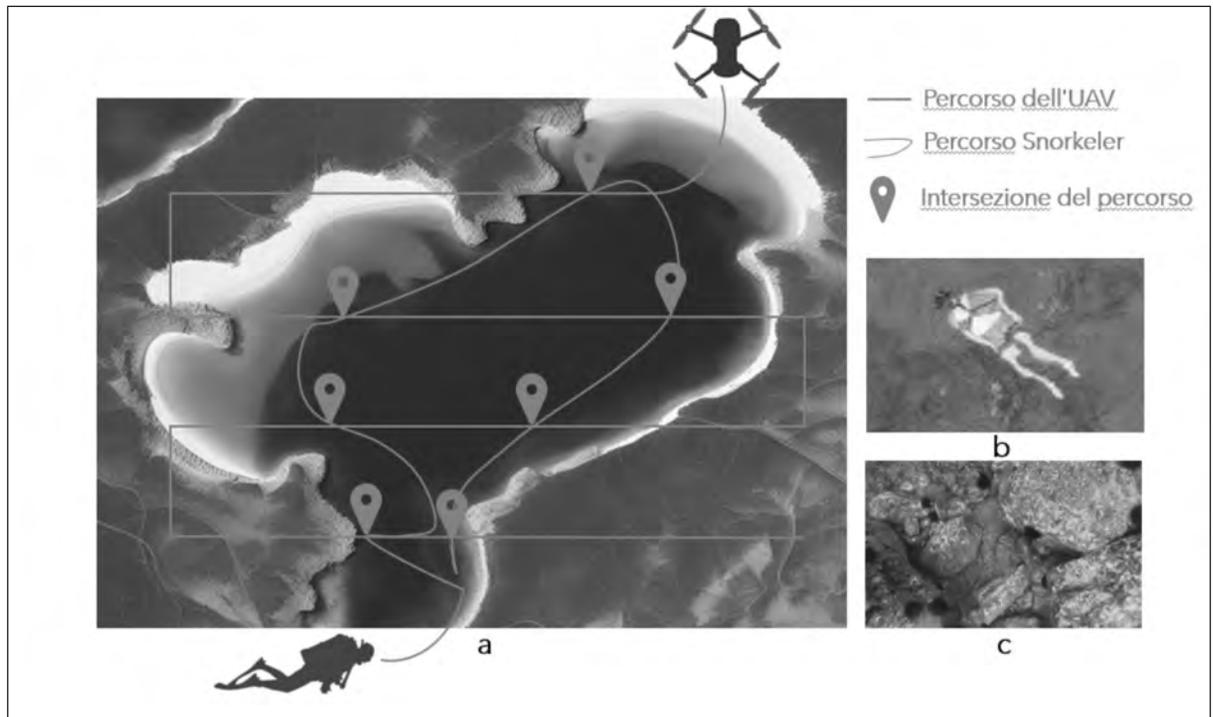


Figura 1 L'integrazione tra fotogrammetria topografica e subacquea; (a) mostra l'intersezione dei percorsi; (b) snorkeler rilevato dall'UAV; (c) immagine subacquea

sistematico della fotogrammetria topografica da UAV e della fotogrammetria subacquea simultanea da parte degli snorkelisti, è stato possibile creare un modello coerente e georeferenziato che integra i paesaggi terrestri e quelli acquatici.

Conclusioni

Il successo di questa metodologia dipende dall'abile integrazione di più componenti, tra cui una precisa pianificazione del percorso di volo per gli UAV, metodi innovativi di acquisizione dei dati subacquei e tecniche di elaborazione delle immagini. Attraverso la generazione di ortofoto e modelli georeferenziati, la metodologia non solo dimostra la sua efficacia in termini di posizionamento, ma rafforza anche la sua applicabilità in diversi contesti interdisciplinari.

Bibliografia

- Karaki, A.A., Bibuli, M., Caccia, M., Ferrando, I., Gagliolo, S., Odetti, A. and Sguerso, D., 2022. Multi-platforms and multi sensors integrated survey for the submerged and emerged areas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), p.753.
- Obanawa, H., Tabayashi, Y., Murakami, T., Kohno, H., Shimokawa, S. and Mizutani, A., 2020. Underwater three dimensional measurements. *Geophysical Approach to Marine Coastal Ecology: The Case of Iriomote Island, Japan*, pp.139-151.

Confronto di diversi metodi di estrazione della linea di riva da immagini satellitari

¹Riccardo Angelini

¹Università di Firenze, riccardo.angelini@unifi.it

Introduzione

Le aree costiere sono cruciali per la biodiversità che le accompagna e per le diverse attività umane che ospitano, sia a scopo ricreativo che economico. Il monitoraggio dell'ambiente costiero coinvolge diversi indicatori, tra i quali la posizione della linea di riva costituisce il più significativo e universalmente riconosciuto. Diversi autori si sono soffermati sulle possibili definizioni della linea di separazione tra mare e terraferma (Boak e Turner, 2005); in questo studio ci riferiremo alla linea di riva "istantanea", ovvero automaticamente identificabile da immagini satellitari, o digitalizzata manualmente da un operatore attraverso ortomosaici ad alta risoluzione usate come verità a terra. La raccolta tradizionale di dati sul campo, mediante tradizionali tecniche topografiche, può risultare onerosa in termini di tempo e costi per ampie aree costiere (Spinosa et al., 2021). Le immagini satellitari provenienti da sensori sia attivi (radar) che passivi (multispettrali/iperspettrali) possono ovviare ad alcuni di questi problemi grazie alla capacità di fornire dati su larga scala e a cadenza regolare. I metodi automatici di estrazione della linea di riva possono essere suddivisi in "thresholding" ovvero la definizione di una semplice soglia per separare acqua e suolo; metodi basati sulla classificazione delle immagini e metodi di "edge detection" che mirano a determinare i bordi tra le regioni di interesse nell'immagine (Toure et al., 2019). La maggior parte degli approcci è stata implementata per sensori passivi. Pochi sono stati adattati ai sensori attivi e ancor meno alla integrazione delle due fonti. Alla luce di questo, lo studio si è proposto di confrontare diverse tecniche di estrazione della linea di costa da immagini sia ottiche che radar.

Area di studio e metodi

Le aree di studio considerate sono state due: la spiaggia sabbiosa della Feniglia, tombolo di 6km che chiude a sud la laguna di Orbetello, formatosi dal combinato disposto di innalzamento del mare olocenico e diffrazione delle onde sulla paleo-isola del Monte Argentario (Barnes, 1980) e la spiaggia di Castelldefels, 20km a sud di Barcellona, aperta e con un doppio sistema di barre, generata dai depositi del fiume Llobregat. I dati utilizzati per le analisi comprendono 7 linee di riva di riferimento provenienti da 5 rilievi GNSS e 2 ortomosaici ad alta risoluzione (20cm), e le corrispondenti immagini Sentinel-2 e Sentinel-1 più vicine a tali date (± 3 giorni). Sono state inoltre verificate le condizioni meteo-marine e mareali per le corrispondenti date. Le elaborazioni sono state condotte a partire da una prima fase di preprocessing, per le analisi radar svolta con il software Open Source SNAP, per le analisi multispettrali svolta in ambiente python come tutte le successive analisi. In generale la fase di preprocessing per entrambe le fonti di date ha mirato a garantire dati ricampionati con la stessa risoluzione spaziale e ortorettificati, nonché ha visto il calcolo di diversi indici spettrali o polarizzazioni radar noti in letteratura (Ozturk and Sesli, 2015) (Tian et al., 2017), volti ad aumentare le capacità di distinzione del confine acqua-suolo nelle immagini. Lo step successivo ha visto l'applicazione di 3 diversi metodi di "thresholding": una soglia fissa, il metodo Otsu (Otsu, 1979) e un metodo a soglie locali denominato Niblack

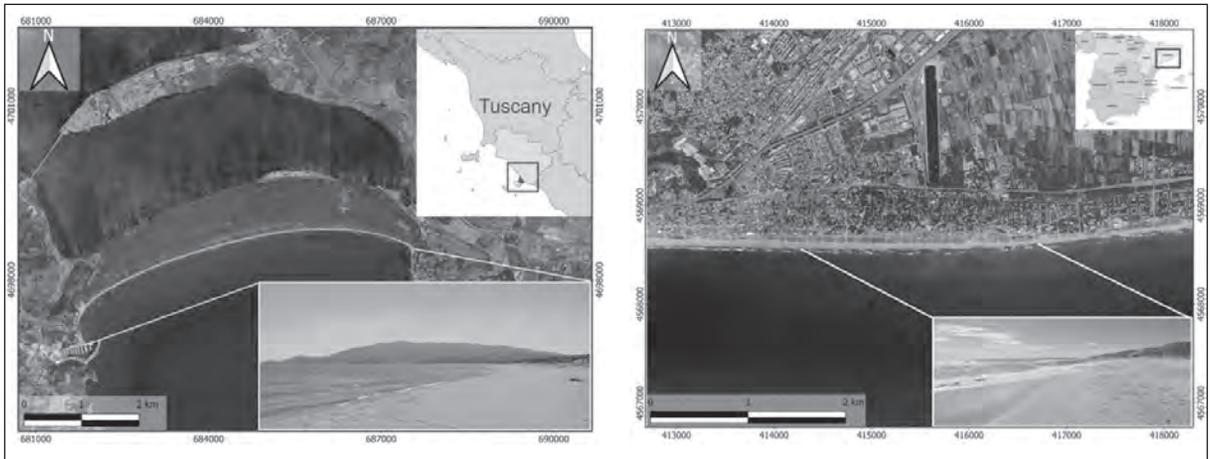


Figura 1. Le due aree, a sx la spiaggia della Feniglia, a dx il tratto considerato della Spiaggia di Castelldefels.

e 2 metodi di classificazione non supervisionata: K-means (García-Rubio et al., 2015) e il Gaussian Mixture Model (GMM) (figura 2). Poi abbiamo la fase di estrazione della linea di riva, con i principali passaggi: lettura dei file raster e identificazione delle zone connesse al loro interno; estrazione dei contorni delle regioni connesse identificate, conversione in geometria lineare, passando per i centroidi dei pixel, smussamento delle geometrie risultanti. Infine, la valutazione dell'accuratezza delle linee di riva estratte mediante il confronto con i riferimenti.

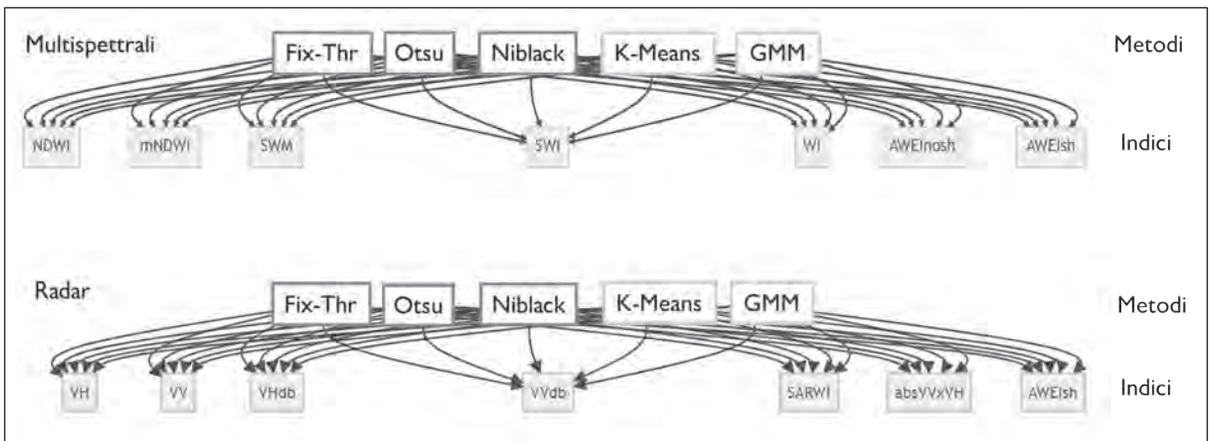


Figura 2. Combinazione di indici spettrali o polarizzazioni radar e metodologie testate.

Risultati e discussione

I risultati mostrati in tabella mostrano i 3 migliori risultati provenienti dalle analisi multispettrali e ottiche, mediati su tutti i casi di studio. La tabella 1 mostra i risultati in termini di distanza media assoluta dal riferimento, ed inoltre sono state calcolate anche distanza media con segno scarto quadratico medio e mediana. Bisogna specificare che in totale sono state testate 35 combinazioni di metodi e indici per la parte ottica e 35 per la parte radar per ciascuna data.

I risultati della parte multispettrale si sono dimostrati molto soddisfacenti, raggiungendo accuratze sub-pixel, confermando precedenti ricerche (Angelini et al., 2023). Le analisi radar al contrario hanno mostrato dei limiti che necessitano di ulteriori conferme. I risultati sembrano affetti da un bias negativo che indicherebbe una maggiore propensione del dato radar a cogliere la distinzione tra la linea della precedente alta marea o run-up e la spiaggia asciutta. In generale altre fonti di errore possono essere associate al dato ondametrico e mareale nonché alla differenza in giorni tra i riferimenti e le immagini satellitari. Valutazioni a riguardo sono state svolte mantenendo la distanza temporale tra le immagini entro i 3 gior-

ni e con un'analisi delle condizioni meteomarine nelle date in esame. Le altezze d'onda e di marea sono risultate essere di due ordini di grandezza inferiore alla risoluzione spaziale disponibile.

Tabella 1. Risultati delle analisi multispettrali e radar in termini di distanza media assoluta

Risultati Multispettrale (Sentinel-2)						
	Indice	Metodo	Distanza Media Assoluta [m]	Scarto Quadratico Medio [m]	Distanza Media [m]	Mediana [m]
1	NDWI	Fix-Thr	4.26	6.36	-0.67	-1.46
2	SWM	Fix-Thr	4.82	6.83	-0.30	-0.45
3	AWEI	Otsu	5.00	6.97	0.25	-0.25

Risultati Radar (Sentinel-1)						
	Indice	Metodo	Distanza Media Assoluta [m]	Scarto Quadratico Medio [m]	Distanza Media [m]	Mediana [m]
1	VVdb	Fix-Thr	12.77	15.83	-0.79	-2.05
2	SARWI	Fix-Thr	13.96	16.86	-1.16	-3.37
3	Abs(VVxVH)	Fix-Thr	14.00	16.73	-1.22	-3.45

Conclusioni

Lo sviluppo di metodologie semplici e replicabili per l'identificazione e l'estrazione della linea di riva da immagini satellitari, rappresenta un importante tema di ricerca, in un ambiente che sarà soggetto a forti mutamenti. Sul fronte dell'accessibilità dei dati e delle metodologie svolte, i risultati sono stati ottenuti mediante l'utilizzo di software open-source per le analisi come python e SNAP nonché tramite l'uso di dati gratuiti come quelli disponibili dal programma Copernicus. Le accuratezze raggiunte nell'ordine di qualche metro su tratti di litorale di diversi chilometri aprono possibilità nell'ambito del monitoraggio a vasta scala dell'ambiente costiero. Le prospettive sono incoraggianti in considerazione del futuro lancio di nuove costellazioni con maggiore risoluzione spaziale e temporale rispetto alle attuali.

Bibliografia

- Angelini R., Angelats E., Luzi G., Ribas F., Masiero A., Mugnai, F., 2023. *A review and test of shoreline extraction techniques*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XLVIII-1-W1-2023, 17–24. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-17-2023>.
- Barnes R.S.K., 1980. *Coastal Lagoons*. CUP Archive.
- Boak E., Turner I., 2005. *Shoreline Definition and Detection: A Review*. J. Coast. Res. J. Coast. Res. 21, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>.
- García-Rubio G., Huntley,D., Russell P., 2015. *Evaluating shoreline identification using optical satellite images*. Mar. Geol. 359, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.11.002>.
- Otsu N., 1979. *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 9, 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
- Ozturk D., Sesli F.A., 2015. *Shoreline change analysis of the Kizilirmak Lagoon Series*. Ocean Coast. Manag., Special Issue: Third International Symposium on Integrated Coastal Zone Management (ICZM): Towards Sustainable Coasts - “Recent developments and advancements” 118, 290–308. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.009>.
- Spinosa A., Ziemba A., Saponieri A., Damiani L., El Serafy G., 2021. *Remote Sensing-Based Automatic Detection of Shoreline Position: A Case Study in Apulia Region*. J. Mar. Sci. Eng. 9, 575. <https://doi.org/10.3390/jmse9060575>.
- Tian H., Li, W. Wu, M., Huang N., Li G., Li,X., Niu,Z., 2017. *Dynamic Monitoring of the Largest Freshwater Lake in China Using a New Water Index Derived from High Spatiotemporal Resolution Sentinel-1A Data*. Remote Sens. 9, 521. <https://doi.org/10.3390/rs9060521>.

Toure S., Diop O., Kpalma K., Maiga, A.S., 2019. *Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review*. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 8, 75. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020075>.

Ricevuto il 30/10/2023; accettato il 15/11/2023

La linea fragile. Uno sguardo ecologista alle coste italiane

di Alex Giuzio

Edizioni dell'asino, Aprile 2022, 90 pp., 10 euro



Se diciamo che le coste italiane hanno caratteristiche uniche al mondo, forse molti pensano agli aspetti naturalistici, ai beni archeologici che si affacciano sul mare o a borghi marinari incastrati in stretti golfi, ma non è questo che rende unico il nostro paese. La particolarità è il modo con il quale siamo riusciti a rovinare tutto questo.

Con *La linea fragile. Uno sguardo ecologista alle coste italiane*, Alex Giuzio ci guida alla lettura delle contraddizioni che si incontrano percorrendo il perimetro della nostra penisola.

Dal Redattore capo di *Mondo balneare*, una rivista che nella versione on line ha mezzo milione di accessi al mese, ci attenderemmo un occhio benevolo nei confronti del settore turistico-balneare a cui in prevalenza si rivolge.

Nel leggere questo libretto di piccolo formato e con appena novanta pagine, la prima cosa che emerge è la consapevolezza dell'autore del degrado che hanno raggiunto le nostre coste e la sua onestà intellettuale nel riconoscere che proprio il settore a cui si rivolge la sua rivista è uno dei responsabili della 'fragilità' nelle nostre coste. Tutta colpa dei concessionari? Certamente no: nel ricostruire la storia degli stabilimenti balneari e del quadro normativo che li regola, emerge una chiara responsabilità della politica che non è riuscita a gestire un'attività di

rilevante interesse economico per il nostro paese ma fonte di forti conflittualità. Il titolo del capitolo in cui si affronta questo argomento 'Storia e intrighi delle concessioni balneari' potrebbe essere quello di un film comico o drammatico.

In 'Un mare di gente in una fisarmonica', spiega in modo chiaro la difficoltà di gestire un territorio in cui la popolazione ha oscillazioni stagionali che trasformano le località turistiche costiere in un mare di gente per poi chiudersi in una specie di letargo non appena arriva il freddo.

Alex Giuzio non è tenero neppure con il modo con il quale è stata gestita l'erosione costiera, che ha portato a trasformare centinaia di chilometri di costa sabbiosa in costa rocciosa, e a versare sulle spiagge sedimenti

che, per le loro dimensioni, ben si sapeva che se ne sarebbero presto tornati sugli alti fondali. Proprio da questi viene estratta molta sabbia che finisce sulle spiagge, ma sui nostri fondali, in particolare su quelli dell'Adriatico, sono presenti piattaforme offshore per l'estrazione di idrocarburi che, fra l'altro, indicano la subsidenza delle aree costiere, che è una delle principali cause dell'erosione. E quanto pagano le multinazionali oil & gas la concessione dei nostri fondali? A parità di superficie, circa un milionesimo di quanto pagano gli stabilimenti balneari!

In 'Treni vista mare' si analizza lo sviluppo della rete ferroviaria che, per ragioni morfologiche, ma anche di convenienza (non c'era bisogno di espropri), si è allungata sul bordo della penisola, occupando gli arenili, spesso innescandone l'erosione e impedendo l'accesso al mare.

Anche 'L'insostenibile presenza degli abusi edilizi' è una caratteristica delle nostre coste e una delle principali cause del degrado del territorio. Anche in questo caso la politica è responsabile al pari di tutta la nostra società, in cui l'illegalità è tollerata e quasi elemento di vanto. Quando si legge che dal 2004 al 2018 è stato abbattuto solo l'11% degli edifici irregolari presenti lungo la fascia costiera di 150 m ci si rende conto dell'esistenza di responsabilità diffuse, contro cui solo qualche associazione ambientalista è disposta a puntare il dito.

Un'altra anomalia italiana sono i porti turistici, la cui costruzione è stata enormemente facilitata da interventi legislativi, come la Legge Burlando, che hanno portato alla proliferazione di approdi turistici, con casi da Guinness dei primati: su 63 comuni costieri in Liguria sono stati costruiti 31 porti. E i porti non sono solo uno stimolo alla cementificazione costiera, ma dietro a questa si annida spesso la criminalità e le strutture aggettanti in mare innescano quasi sempre l'erosione dei litorali.

La nostra costa è stata violentata, ma potremmo anche non preoccuparci perché tutto questo andrà sott'acqua nel giro di qualche decennio per l'innalzamento del livello del mare. Purtroppo, è ciò che sta accadendo perché, come rimarca Alex Giuzio, per mitigarne gli effetti si dovrebbero prendere decisioni impopolari che nessun politico prenderà mai.

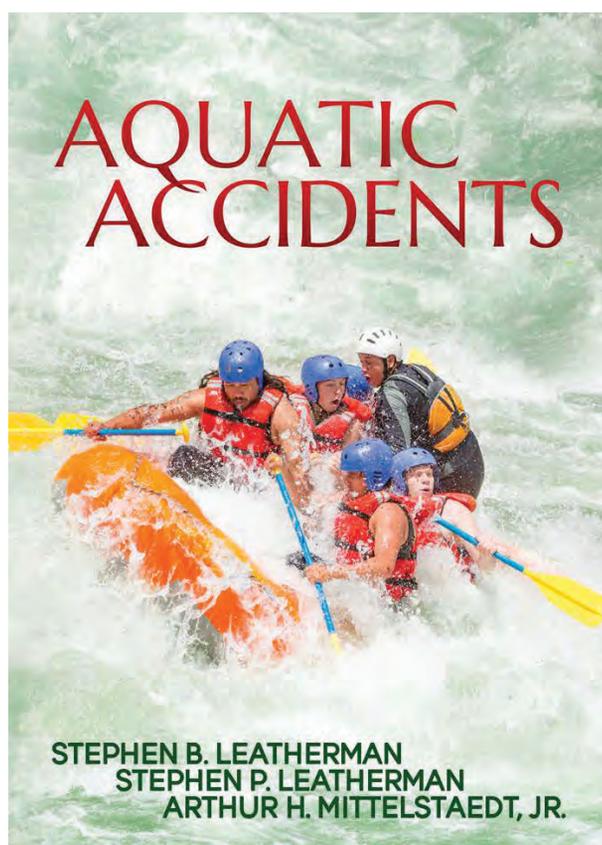
Ecco che la Linea fragile diverrà presto una linea rotta, sempre che non lo sia già.

E.P

Aquatic Accidents

a cura di Stephen P. Leatherman, Stephen B. Leatherman, Arthur H. Mittelstaedt Jr.,

The Peppertree Press, Sarasota, Florida, 2023. 139 pp., \$ 42,95



Stephen P. Leatherman (padre) è un nome ben noto della geomorfologia costiera (Department of Earth & Environment, Florida International University), soprattutto per alcuni studi sulle spiagge barriera negli USA (per ciò che mi riguarda, un argomento di grande fascino), ma si è occupato anche della sicurezza della balneazione siglandosi con l'appellativo di "Dr. Beach" ("Dottor Spiaggia")!. Ha pubblicato, nel 2003, un breve pamphlet, di carattere divulgativo, *Dr Beach's Survival Guide*, in cui esamina i pericoli cui vanno incontro i bagnanti americani, utenti delle spiagge, suddiviso in tre capitoli: *Sharks, Rip currents, and Beach Smart* (*Squali, correnti di ritorno e il "beach smart"* - quelle informazioni di cui dispongono gli esperti sui i pericoli del sole per (il cancro alla pelle), i fulmini, le maree rosse, le meduse, ecc., dove si concede qualche incursione nei mari tropicali che presentano alcuni pericoli per la balneazione, per fortuna assenti nel nostro, come i serpenti marini o le cubo meduse. Non è il caso, invece delle *rip current* (correnti di ritorno), che anche in Italia provocano una cinquantina di vittime per stagione balneare e che regge bene il confronto con gli USA. Sulle *rip current* Leatherman ha curato (con J. Fletemeyer) un libro importante: *Rip Currents – Beach Safety, Physical Oceanography and Wave Modeling*, (CRC Press, 2011), dove presenta

un raccolta di articoli di grande rilievo scientifico, fondamentali per chi, come il sottoscritto, si occupa di sicurezza della balneazione e che considera l'analisi geomorfologica qualcosa di imprescindibile per affrontare la questione della sicurezza sulle spiagge nel suo complesso.

Se abbiamo insistito sul nome di Leathermann (padre) è perché è stato un pioniere nel proporre alla geomorfologia ufficiale un campo di indagine, la sicurezza della balneazione, che, terreno di incontro con le associazioni di salvamento e le loro conoscenze, può costituire un nuovo settore di indagine (molti dati, presentati nel suo libro, sono tratti dal manuale *Open Water Lifesaving* USLA, l'associazione federata dei bagnini di salvataggio delle spiagge americane, o da altre associazioni di salvamento che operano nelle acque

interne o nelle piscine). Fenomeni puramente fisici vengono studiati come un pericolo per gli uomini, come appunto le rip current o i frangenti in prossimità della battigia. Qualcosa che è accaduto anche in altri paesi (con A. Short in Australia, G. Masselink nel Regno Unito, e in Italia con E. Pranzini).

Il nuovo libro, *Aquatic Accidents*, è stato curato anche da Stephen B. Leatherman (figlio) (del quale abbiamo letto una bella dissertazione di dottorato in *Coastal science* - sulle rip current e la sicurezza della balneazione, non poteva essere diversamente!) e Arthur H. Mittelstaedt Jr., un professore, oggi in pensione, esperto della balneazione in ambienti ricreativi, piscine, aqua park, ecc. Il nuovo libro non ha il carattere divulgativo della guida alla sopravvivenza del Doctor Beach, diretto ai bagnanti, ma si occupa del problema degli annegamenti e della sicurezza della balneazione ad un livello più professionale esaminando sotto questo profilo tutti gli ambienti acquatici e i corpi idrici (oceano, laghi, fiumi, piscine, aqua park, *hot tubes*) avvalendosi per ciascuno degli argomenti di un esperto del settore, e fornendo un quadro complesso e completo del fenomeno, anche se gli argomenti sono trattati in modo solo descrittivo (e talora un po'brigativo), non potendo essere diversamente in un libro di sole 139 pagine.

Gli argomenti affrontati sono i seguenti: l'annegamento, le piscine, gli aqua park, spas and tubes, gestione del servizio di salvataggio, legislazione e gestione del rischio, correnti di ritorno, frangenti pericolosi, incidenti nella navigazione da diporto, tuffi, snorkeling, incidenti subacquei, surf, incidenti nei laghi e nei fiumi, animali marini pericolosi. C'è anche un'appendice sulla gestione chimica dell'acqua delle piscine - che non c'entra niente col resto - ma è un argomento obbligatorio nei manuali diretti a chi si occupa di impianti natatori.

L'argomento più vicino a quelli trattati da questa rivista è quello delle rip currents, che scegliamo come esempio da illustrare per i dati che offre. Le rip current sono sulle spiagge americane di gran lunga il pericolo più grande, provocano un centinaio di vittime ogni anno (molto più delle vittime di pescicani, tornadi, uragani e fulmini messi assieme), l'80% dei salvataggi dei bagnini si svolgono nelle rip, da cui vengono tirati fuori circa 50.000 persone ogni estate. Lo stato in cui si verifica il maggior numero di vittime è la Florida, seguita dalla California e la Carolina del sud. Dati che non sono poi così lontani da quelli italiani: circa 50 vittime per estate, i salvataggi sono per l'83% dei casi nelle correnti di ritorno, quelli complessivi (non solo quelli nelle correnti), circa 60.000.

La regione più colpita in Italia è, tenendo conto della lunghezza della costa balneabile, l'Emilia Romagna, ma le correnti di ritorno di questa regione appartengono ad un tipo non analizzato nel libro dei Leatherman, perché non sono un fenomeno naturale, ma sono provocate artificialmente dalle strutture rigide protettive della costa.

Dario Giorgio Pezzini

La strategia di Noè. Come adattarsi al mare che avanza

di Enzo Pranzini

Manifestolibri, Febbraio 2024, 108 pp, 10 euro



Per difendere un terzo delle coste della Terra dall'ingressione marina, prodotta dall'innalzamento del livello del mare, si dovranno spendere più di 18 trilioni di dollari da qui al 2100. I rimanenti due terzi delle coste dovranno essere abbandonati, perché il costo della loro difesa sarebbe superiore a quello dello spostamento delle popolazioni o del valore che si andrebbe a salvare.

Sono i risultati di uno studio pubblicato dalla Banca mondiale, e fanno riferimento ad un innalzamento delle acque di circa un metro, ma sappiamo che non possiamo escludere valori maggiori, tanto che in alcuni stati ci si prepara a 2,5 metri.

Ecco che il titolo del libro indica una possibile soluzione: seguire l'esempio di Noè, che ben consigliato, non andò a costruire scogliere per opporsi al Diluvio universale, e tantomeno si mise a versare sabbia sulle spiagge, bensì adottò quella strategia che oggi chiamiamo 'arretramento strategico'.

Il libro fa una breve storia dell'insediamento dell'uomo lungo le coste, così attrattive per clima, terre fertili, facili collegamenti, e, più recentemente, luogo di svago e di ricerca del benessere fisico. Ma l'autore ricorda che mai l'uomo andava a costruire troppo vicino alla riva, se non per stringenti necessità nautiche o militari; e del mare aveva una grande paura, tanto che i mostri che affollavano le carte geografiche delle terre sconosciute sparirono quando queste venivano colonizzate, ma fino al '700 rimasero addirittura sul Mediterraneo, solcato da millenni.

Nel volume si fa un'analisi delle tecniche di difesa utilizzate fino ad oggi, mettendo in evidenza vantaggi e svantaggi delle diverse soluzioni, e si affronta il problema del ripascimento artificiale delle spiagge.

È questa la strategia su cui molte comunità costiere fanno affidamento per opporsi al mare che avanza,

illudendosi di avere a disposizione una risorsa infinita di sedimenti. Ma la sabbia è una risorsa finita e l'estrazione in corso la rende sempre più rara e costosa; innescando anche un mercato illegale che per valore è il terzo dopo quello della droga e della contraffazione.

La gran parte della sabbia non serve per ricostituire le spiagge, bensì per espandere il territorio di piccoli stati con forte sviluppo demografico, e l'idea che possano scatenarsi guerre per la sabbia diventa sempre più credibile.

Al primo segnale di 'allerta meteo', Noè iniziò a costruire l'arca, mentre noi che sappiamo da molti decenni quale sarà il nostro futuro, pur nell'incertezza del livello che verrà raggiunto dal mare, rimandiamo il problema a chi verrà dopo di noi, e i costi economici, sociali e ambientali che dovranno sostenere le generazioni future saranno enormemente maggiori.

Perché non cominciamo anche noi a costruire la nostra arca? La risposta che da l'autore, che opera nel settore da oltre cinquant'anni, è che le ricadute in termini elettorali arriverebbero fra molti anni, mentre quelle prodotte da una scogliera o da un camion di sabbia arrivano alle prossime elezioni.

Franco Giacotti
WaterFrontLab

Norme per gli Autori

Studi costieri pubblica articoli scientifici originali in lingua italiana su argomenti relativi alla dinamica e difesa dei litorali ed alla gestione integrata della fascia costiera. Gli articoli scientifici sono sottoposti a revisione da parte di due esperti indicati dal Comitato scientifico.

Studi costieri pubblica anche Note tecniche e Riassunti di tesi di Laurea e di Dottorato di ricerca inerenti gli stessi temi. **Studi costieri** ospita inoltre rapporti sull'attività svolta da Amministrazioni pubbliche in materia di gestione integrata della fascia costiera. Questi ultimi due tipi di contributi sono soggetti solo ad una revisione di tipo redazionale.

Gli Autori degli articoli sono pregati di rispettare le seguenti norme. Gli articoli non redatti in piena conformità con esse non potranno essere presi in considerazione per la pubblicazione.

I manoscritti devono essere inviati per posta elettronica con allegate figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su CD o per posta elettronica secondo le istruzioni riportate in seguito.

Titolo - Massimo 150 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Titolo corrente - Massimo 80 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Autore/i - Nome e Cognome per esteso, seguito da un numero in apice per indicare l'eventuale Istituto di appartenenza ed il relativo indirizzo.

Riassunto - Non più di 2.000 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Parole chiave - Inserire 5 - 8 parole chiave, possibilmente non già comprese nel titolo.

Abstract - Riassunto, anche esteso, in lingua inglese di non più di 5.000 caratteri.

Keywords - In questo caso le parole chiave possono anche essere la traduzione di termini compresi nel titolo.

Stile - Adeguarsi allo stile dei lavori pubblicati su questo numero. Tutti i testi, compreso il titolo generale e quello dei paragrafi, devono essere scritti in Maiuscolo e minuscolo. Non inserire caratteri strani, di formato diverso o sottolineati. Il neretto è utilizzato solo per il titolo dei paragrafi.

Eventuali sottoparagrafi possono portare un titolo in corsivo neretto. Non inserire righe bianche nel testo se non alla fine dei paragrafi e dei sottoparagrafi.

Evitare il più possibile i rientri e, comunque, farne di un solo ordine. Gli elenchi puntati sono identificati da -, 1) oppure a); ogni elemento dell'elenco è chiuso con ; salvo l'ultimo che chiude con un punto.

Il carattere Garamond corpo 11, interlinea singola, può essere usato per valutare la lunghezza dell'articolo a stampa.

Formule - Se possibile utilizzare il formato testo; in alternativa l'editore di formule di Word impostando il carattere Garamond corpo 11 chiaro (corpo 9 nero se le formule sono incluse in una didascalia di figura o di tabella). Utilizzare caratteri in neretto e corsivo solo se imposto dalla nomenclatura internazionale.

Tabelle - I caratteri alfabetici/numerici per le tabelle sono in stile Garamond corpo 10. Le Tabelle sono identificate con Tabella n, oppure (Tab. n) se fra parentesi. Devono essere precedute da una didascalia. Non inserire tabelle in forma di immagini.

Figure (fotografie, schemi, diagrammi) - Salvo accordi specifici con la Redazione, vengono pubblicate solo figure in bianco e nero. Le figure sono identificate con Figura n, oppure (Fig. n) se fra parentesi. Tutte le figure devono avere una didascalia. La larghezza massima a stampa delle figure è 16 cm. Ad eccezione delle

figure stampate a giustezza piena, tutte le altre non potranno avere una base superiore a 10 cm. La Redazione è a disposizione per discutere aspetti tecnici relativi a questo punto.

Note a piè di pagina - Sono da evitare il più possibile e, se lunghe o numerose, verranno riportate in corpo minore in fondo all'ultima pagina dell'articolo con richiami numerici nel testo. Indicazioni di Progetti e Finanziamenti verranno inserite prima della Bibliografia con gli eventuali Ringraziamenti.

Riferimenti bibliografici - Nell'articolo le citazioni sono racchiuse fra () con il seguente formato: (Verdi, 1990) o (Rossi e Verdi, 1989); (Verdi et al., 1987) qualora il numero degli Autori sia maggiore di due. Se citato nell'ambito di una frase il nome di un Autore (1995) è seguito dall'anno della pubblicazione a cui si fa riferimento.

Bibliografia - Tutti e solo i lavori citati nel testo devono comparire in Bibliografia. La Bibliografia deve essere in ordine alfabetico per cognome; es.:

Bianchi A., Rossi V., Verdi T., 1999. *Nuovi metodi di difesa dei litorali*. Studi costieri, 19: 153-157 (19 è il numero del fascicolo, 153-157 le pagine).

Neri A., Rossi C., 1978. *Elementi di geomorfologia costiera*. Nessuno Ed., Roma. 324 pp.

Violi K., 1998, *Il ripascimento dei litorali in Italia*. Atti XXI Congr. Soc. Ital. Geomorfologia. Bari. pp. 34-76.

Evitare di usare AA.VV., anche se il numero degli Autori è elevato.

Versione definitiva - Il file contenente la versione definitiva dell'articolo, in Word per Windows, deve essere inviato dopo la comunicazione di accettazione del manoscritto. Il testo non deve essere giustificato e, fatta eccezione per le formule scritte con l'editore specifico, può essere scritto con qualsiasi carattere.

Le didascalie delle figure (grafici e foto) dovranno essere inserite nel testo nel punto più opportuno.

Le figure dovranno essere inviate in file separati (.tif o .jpg a 300 dpi alla dimensione di stampa) e salvate con il nome del primo Autore seguito da Fig n (es. Rossi Fig 1.jpg). Figure costituite da più parti devono essere montate dagli Autori in un file unico.

Altre informazioni - Nella preparazione degli articoli si tenga conto del fatto che una buona impaginazione necessita di un elevato rapporto testo/figure. Anche se gli Autori non devono procedere all'impaginazione dell'articolo, è bene che operino in modo tale da facilitare l'inserimento di ciascuna Figura dopo il rispettivo richiamo. Analogo discorso vale per le Tabelle.

Diritti d'autore - Nella lettera di accompagnamento del manoscritto gli autori, o anche uno solo di essi, devono dichiarare che quanto contenuto nell'articolo è di loro proprietà e che autorizzano il GNRAC a pubblicare tutto il materiale da loro inviato. Nel caso di utilizzazione di figure tratte da altra pubblicazione gli Autori dovranno inviare l'autorizzazione alla stampa dell'Editore proprietario dei diritti. Analogamente deve essere fatto per riprese aeree e per la cartografia.

Il Direttore della collana si ritiene autorizzato ad utilizzare gli articoli per eventuali ristampe o per l'edizione di volumi tematici. Di ciò verrà comunque data notizia agli Autori.

Contributo alle spese di stampa - Agli Autori è richiesto un contributo di € 27,00 (IVA incl.) per pagina pubblicata in bianco e nero sulla Rivista. Il costo per la stampa di figure a colori verrà valutato di volta in volta in funzione del loro numero e della posizione nel volume. Gli Autori sono pregati di inviare, insieme alle bozze corrette, le indicazioni necessarie per l'intestazione della nota di debito.

I manoscritti devono essere inviati alla
Redazione di Studi costieri
 c/o Dipartimento di Scienze della Terra
 Via Micheli, 6 - 50121 Firenze
 Tel. 055 055 2756547
 E-mail: epranzini@unifi.it

Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Numero 31

Indice

Approcci innovativi e di intelligenza artificiale per l'analisi del "Marine and Beach Litter": stato dell'arte degli studi condotti lungo le coste pugliesi	p. 03 - 18
Angelo Sozio, Angela Rizzo, Pietro P. C. Aucelli, Marco La Salandra, Rocco Martella, Giuseppe Mastronuzzi, Giovanni Scardino, Vincenzo M. Scarrica, Antonino Staiano, Giovanni Scicchitano	
La laguna di Orbetello nel XIX secolo Malaria, pesca e ingegneria idraulica	p. 19 - 52
Marco Piccardi e Enzo Pranzini	
Il WebGIS di SAVEMEDCOASTS-2: un sistema di supporto alle decisioni per la gestione sostenibile delle coste contro l'innalzamento del livello del mare	p. 53 - 68
Antonio Falciano, Marco Anzidei, Michele Greco, Maria Lucia Trivigno, Antonio Vecchio, Charalampos Georgiadis, Petros Patias, Michele Crosetto, Josè Navarro, Enrico Serpelloni, Cristiano Tolomei, Giovanni Martino, Giuseppe Mancino, Francesco Arbia, Christian Bignami, Fawzi Doumaz	
Convegno Nazionale di Studi Costieri e G3 2022, 2023, 2020, ...	p. 69 - 70
Lorenzo Cappiotti	
Studio sperimentale del sistema di protezione costiera a Marina di Pisa	p. 71 - 78
Amanda Zannella, Andrea Esposito, Irene Simonetti & Lorenzo Cappiotti	
Sviluppo e deformazione di terrazzi marini lungo il bordo NE della Piana Campana: vincoli cronologici	p. 79 - 82
Ciro Cerrone	
Integrazione ottimale di diverse risorse rinnovabili per lo sviluppo sostenibile delle isole	p. 83 - 84
Elisa Dallavalle	
Modellizzazione dei processi eutrofici nella laguna di Orbetello	p. 85 - 96
Tommaso Salaorni	
Verso un Gemello Digitale della Costa Italiana	p. 97 - 100
Juan Pablo Duque Ordoñez	
Sulla incertezza della stabilità dei massi di armatura	p. 101 - 104
Giulio Scaravaglione	
Fotogrammetria topografica e subacquea per la modellazione 3D georeferenziata unificata	p. 105 - 106
Ali Alakbar Karaki, Stefano Cunietti, Ilaria Ferrando, Domenico Sguerso	
Confronto di diversi metodi di estrazione della linea di riva da immagini satellitari	p. 107 - 110
Ali Alakbar Karaki, Stefano Cunietti, Ilaria Ferrando, Domenico Sguerso	
Recensioni	p. 111 - 116
Norme per gli Autori	p. 117 - 118

**Gruppo Nazionale per la
Ricerca sull'Ambiente Costiero**

ISSN 1129-8588