



Venezia2021

**Programma di ricerca scientifica
per una laguna “regolata”**

Linea 3.2

***Dinamiche erosive e morfosedimentarie in
laguna di Venezia***

Rapporto Finale

Periodo 01/11/2018 - 30/06/2022

Andrea D’Alpaos (GEOSCIENZE-UNIPD)

30/09/2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Andrea D'Alpaos".

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

L'attività di ricerca condotta nell'ambito della Linea 3.2 ha avuto come obiettivo principale l'analisi dell'evoluzione dei pattern eco-geomorfologici che caratterizzano le morfologie tipiche della laguna di Venezia (reti di canali a marea, piane subtidali, bassofondali e barene) e gli ecosistemi ad esse legati, attraverso un approccio innovativo ed interdisciplinare che ha integrato osservazioni in campo ottenute tramite analisi di dati telerilevati e raccolti in situ, analisi di laboratorio dei campioni prelevati in Laguna, e analisi condotte con modelli matematici. Tutti gli obiettivi iniziali della Linea 3.2 sono stati raggiunti:

1) si è proceduto a monitorare i pattern eco-geomorfologici che caratterizzano i sistemi di barena nel piano verticale e orizzontale e la loro evoluzione temporale, attraverso l'analisi di dati ottenuti da remote sensing (dati multispettrali satellitari, acquisiti con droni -Unmanned Aerial Vehicle UAV, o con ecoscandaglio a multi fascio ad altissima risoluzione -Multibeam Echosounder System MBES) e da rilievi in situ (prelievo di campioni di suolo, rilievi topografici, rilevamento della distribuzione della vegetazione). Questo monitoraggio ha permesso di fornire una "fotografia" della condizione attuale delle morfologie lagunari, fondamentale per stimare i processi erosivi e deposizionali che caratterizzano le morfologie lagunari nello stato attuale e la possibile evoluzione futura in risposta alle variazioni delle forzanti naturali ed antropiche.

I dati ottenuti da remote sensing subaereo (UAV/satellite) e subacqueo (MBES) sono stati efficacemente accoppiati sviluppando modelli digitali del terreno e batimetrie ad alta risoluzione per l'analisi quantitativa delle variazioni morfologiche. L'analisi delle quote delle superfici di barena e della distribuzione della vegetazione basata su rilievi in situ ha evidenziato come la risposta delle barene alla variazione delle forzanti sia sito specifica, con zone di barena in grado di tenere il passo con l'aumento del livello medio del mare e zone ad esse adiacenti che invece hanno perso quota rispetto al medio mare. Nell'ottica di uno scenario di aumento consistente del medio mare, sempre più estese porzioni di barena potrebbero necessitare di interventi ad hoc per fronteggiare gli effetti dei cambiamenti climatici e delle pressioni antropiche, tra cui la regolazione delle maree alle bocche tramite il sistema MOSE;

2) sono stati stimati i processi erosivi e deposizionali, sul piano verticale ed orizzontale, in atto in prossimità di barene naturali (tralasciando l'analisi delle barene artificiali), assieme alle caratteristiche dei suoli e della vegetazione alofila, sulla base di osservazioni in campo ad alta risoluzione spaziale e temporale;

3) sono stati stimati i processi erosivi e deposizionali nei canali a marea attigui alle barene oggetto di studio sulla base di osservazioni in campo ad alta risoluzione spaziale e temporale. Tali analisi hanno evidenziato il peculiare comportamento dei canali a marea rispetto ai loro corrispettivi fluviali, indicando anche come la maggior parte dei canali analizzati si sia sviluppata nella transizione tra bassofondo e barena per effetto della concentrazione locale del flusso lungo vie preferenziali determinata dalla presenza di vegetazione alofila. L'analisi comparativa dei dati batimetrici raccolti nei canali a marea (2013 - 2021) ha evidenziato una situazione di sostanziale stabilità nella laguna Nord (canale San Felice), con alcune zone in deposizione, e un processo di predominante erosione nella laguna centrale (canale Malamocco-Marghera);

4) si è evidenziata la straordinaria capacità delle barene della laguna di sequestrare e immagazzinare carbonio organico, rimuovendo CO₂ dall'atmosfera e contribuendo a limitare l'effetto dei gas serra;

5) è stato messo a punto, testato ed utilizzato un nuovo modello matematico di tipo eco-geomorfologico in grado di simulare la risposta degli ecosistemi di barena alle variazioni delle forzanti ambientali (livello del medio mare e idroperiodo, disponibilità e trasporto di sedimento, variazioni climatiche che influenzano le dinamiche eco-geomorfologiche) osservate e previste. Il modello a metacomunità sviluppato è il primo modello spazialmente esplicito in letteratura in grado di simulare le dinamiche locali di diverse comunità (nascita, morte e competizione) attraverso meccanismi di dispersione.

I risultati dell'attività di ricerca risultano fondamentali nell'ottica di una gestione sostenibile della Laguna e delle attività ad essa legate, alla luce del degrado morfologico che ha caratterizzato la Laguna in particolare

nell'ultimo secolo e che potrebbe essere fortemente influenzato dalle attività legate all'utilizzo e alla gestione del sistema MOSE.

2. Tre risultati concreti divulgabili ai decisori politici/ pubblico generico

2.1 Cartografia integrata del sistema barena-canale Malamocco-Marghera

L'analisi comparativa dei dati batimetrici raccolti nell'ambito del progetto e di quelli pregressi (Figura 1a) ha evidenziato una sostanziale stabilità dei fondali di canale nella laguna Nord (Canale S. Felice) dove il 99% dell'area studiata del canale è rimasta stabile dal 2013 al 2021, con alcune aree in deposizione. D'altro canto, il 29% dell'area studiata nella laguna centrale (canale Malamocco-Marghera) ha subito erosione durante lo stesso periodo. L'integrazione dei dati raccolti sulla barena S. Felice con drone aereo (UAV) e nel canale S. Felice con un ecoscandaglio a multifascio (MBES) ha permesso per la prima volta di avere una cartografia integrata del sistema barena-canale ripetuta per gli anni 2020 e 2021 (Figura 1g). Il confronto tra i diversi monitoraggi ha permesso di documentare le variazioni del sistema barena-canale nel tempo.



Figura 1. (a) Area di studio nella Laguna Nord con in arancione l'area mappata con il MBES; (b) dati di quota della barena S. Felice e di batimetria del Canale S. Felice acquisiti nel 2021; (c) foto della barena S. Felice; (d) imbarcazione Litus del CNR-ISMAR con la strumentazione MBES utilizzata per i rilievi batimetrici nella laguna; (e) drone aereo DJI SPARK on sensore ottico 1/2.3" e lente 25 mm f/2.6, utilizzato per acquisire le foto aeree e creare il modello digitale della barena; (f) ecoscandaglio a multifascio Kongsberg EM2040C (MBES) usato per acquisire i dati batimetrici dei canali analizzati; (g) Visualizzazione 3D della cartografia integrata del sistema barena-canale di S. Felice.

2.2 Effetti delle chiusure del MOSE sul processo di sedimentazione sulle barene

La sedimentazione sulle barene, processo fondamentale perché le barene possano accrescersi verticalmente e tenere il passo con l'innalzamento del livello del mare, avviene principalmente durante gli eventi di acqua alta, che contribuiscono al 70% circa dell'apporto di sedimenti. Per questo motivo la regolazione delle acque alte per mezzo delle barriere del MOSE, anche se ad oggi limitata nel tempo, modifica il trasporto di sedimenti all'interno della laguna, riducendo mediamente del 30% (

Figura 2) la sedimentazione sulle barene (Tognin et al., 2021)¹, aumentando l'erosione dei bassifondali e favorendo la sedimentazione nei canali, alcuni dei quali dovranno quindi essere dragati (Tognin et al., 2022)². La ridotta sedimentazione sulle barene ha conseguenze negative anche sulla loro capacità di sequestro e stoccaggio di carbonio (C) organico. Attualmente le barene della laguna stoccano valori molto elevati di C organico che variano tra 9'800 e 24'700 ton C / km², a conferma della loro potenzialità nello stoccare carbonio. Se le barene non riuscissero a tenere il passo con il livello medio del mare e si trasformassero in bassifondali per annegamento, o se venissero erose lateralmente dalle onde da vento e da natante, lo stock di C organico si ridurrebbe drasticamente. Inoltre, a causa del minore tasso di accrescimento legato alla regolazione delle acque alte per mezzo del MOSE, il tasso di sequestro di C da parte delle barene veneziane, che varia tra 49 e 113 ton di C per km² l'anno (con valor medio 85 ± 25 ton C /km² /anno,

Figura 2), a testimoniare la straordinaria capacità delle barene di catturare C atmosferico, verrebbe ridotto mediamente del 33%, con riduzioni comprese tra il 25 ed il 50%.

È del tutto evidente che la difesa della città di Venezia e dei centri abitati sia una questione irrinunciabile, che non può essere messa in discussione. Le analisi condotte evidenziano tuttavia l'esistenza di effetti negativi sulla morfologia lagunare, conseguenza delle chiusure del MOSE. Questi effetti dovranno essere contrastati con interventi diversificati, come ad esempio l'aumento dell'apporto di sedimenti di origine fluviale, la conservazione e il ripristino delle barene, la protezione dei bassifondali con soluzioni a basso impatto ambientale (*nature based solutions*) e una migliore ed ottimale gestione delle chiusure del MOSE.

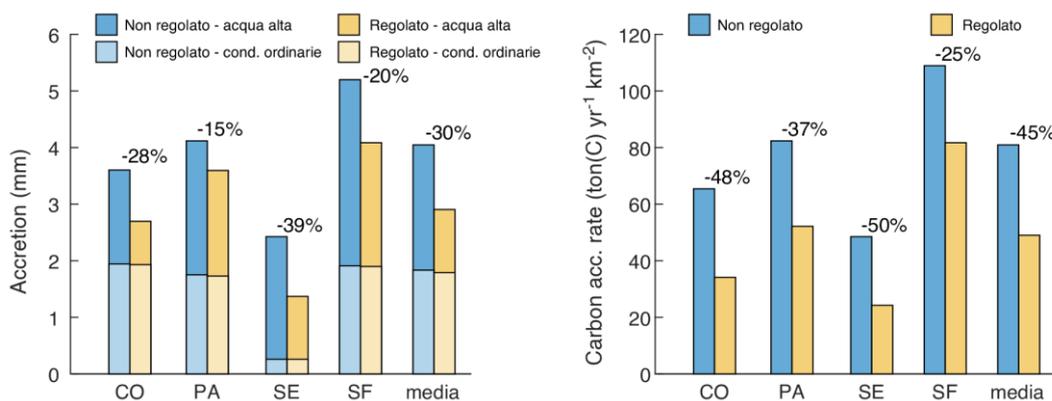


Figura 2. (a) Accrescimento verticale e (b) tasso di sequestro di carbonio nello scenario di laguna non regolato (blu) e laguna regolata (giallo) con il sistema MOSE. Per l'accrescimento di distingue ulteriormente in contributo degli eventi di acqua alta (tonalità scura) e delle condizioni ordinarie (tonalità chiara). Le categorie si riferiscono ad alcune aree di

¹ Tognin D., D'Alpaos A., Marani M., & Carniello L. (2021). Marsh resilience to sea-level rise reduced by storm-surge barriers in the Venice Lagoon. *Nature Geoscience*, 14(12), 906–911, **pubblicato all'interno del Programma Venezia2021**.

² Tognin D., Finotello A., D'Alpaos A., Viero D. P., Pivato M., Mel R. A., Defina A., Bertuzzo E., Marani M., & Carniello L. (2022). Loss of geomorphic diversity in shallow tidal embayments promoted by storm-surge barriers. *Science Advances*, 8(13), eabm8446, **pubblicato all'interno del Programma Venezia2021**.

studio (CO: Conche, PA: Pagliaga, SE: Sant'Erasmus, SF: San Felice) e alla loro media (si veda la Figura 4 per l'ubicazione delle barene).

2.3 Sviluppo di un modello ecogeomorfologico a scala di barena

L'applicazione del modello ecogeomorfologico (Finotello et al., 2022) a casi studio all'interno della laguna di Venezia ha evidenziato come i processi biotici, pur essendo di fondamentale importanza per sostenere l'accrescimento verticale delle barene³, non siano sufficienti da soli a far fronte ai tassi di incremento del medio mare previsti, nemmeno nell'ipotesi più conservativa di un tasso di incremento del medio mare di 5.1 mm/anno per i prossimi 100 (Figura 3). È pertanto necessario garantire la presenza di un'adeguata concentrazione di sedimenti trasportati in sospensione dalle correnti di marea al fine di assicurare una maggiore resilienza delle barene (Figura 3). È stato inoltre evidenziato come la scomparsa delle barene per progressivo annegamento dovuto all'innalzamento del livello medio del mare avvenga preferenzialmente nei siti posti a maggiore distanza dai canali, e pertanto caratterizzati da quote topografiche ridotte a causa del ridotto apporto di materiale minerale da parte delle correnti di marea. Questa osservazione riveste importanza per tutte le iniziative di salvaguarda e ripristino delle superficie di barena mediante apporto di artificiale di materiale solido e suggerisce che tale materiale debba essere preferenzialmente apportato nelle zone più distali rispetto alla rete di canali che tipicamente innerva le barene.

³ Finotello A., D'Alpaos A., Marani M. & Bertuzzo E. (2022). A Minimalist Model of Salt-Marsh Vegetation Dynamics Driven by Species Competition and Dispersal. *Frontiers in Marine*, 9(866570), 1–23, **pubblicato all'interno del Programma Venezia2021.**

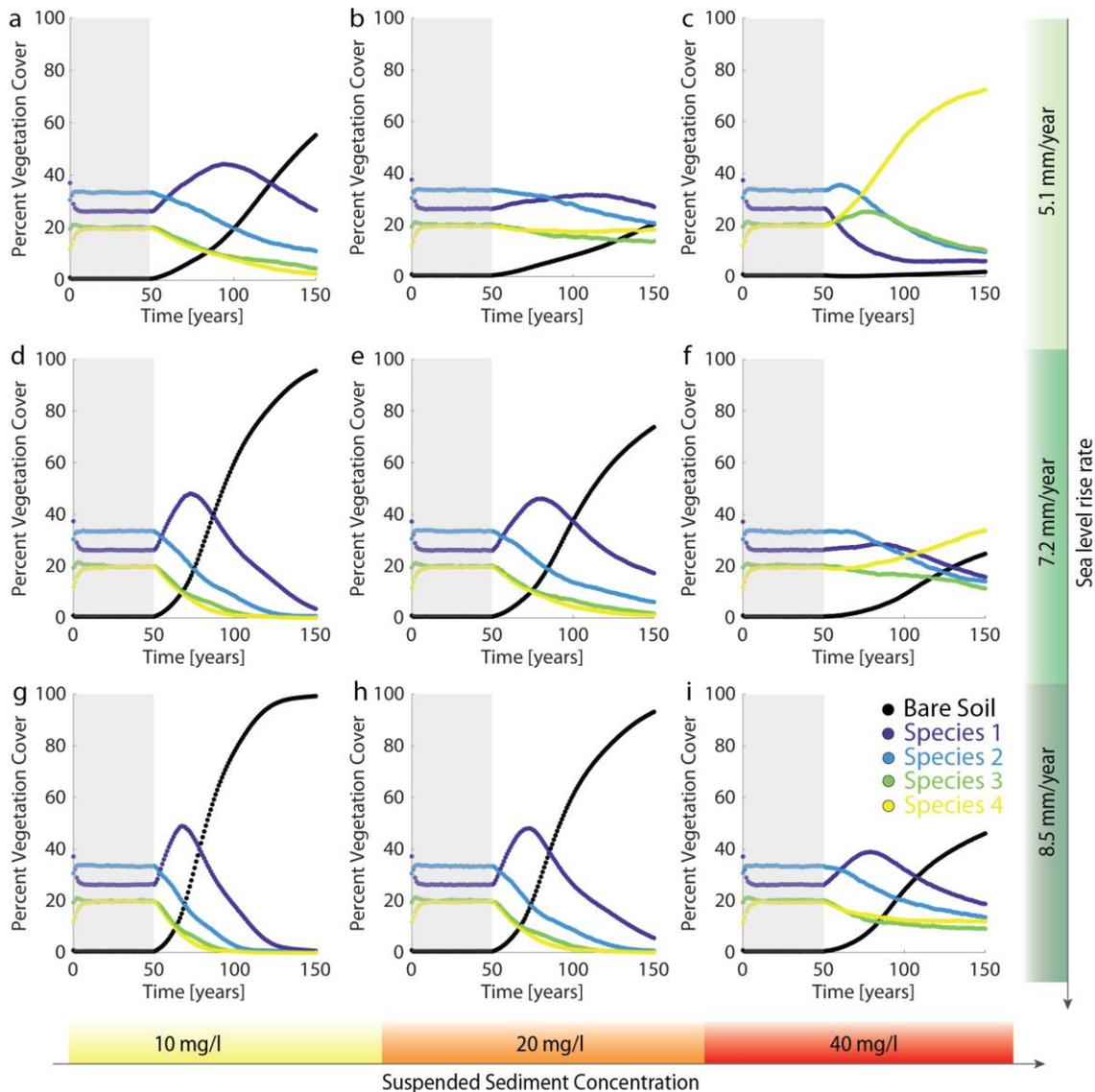


Figura 3. Risultati delle simulazioni condotte col modello ecogeomorfologico in termini di variazione nel tempo della copertura vegetale per la Barena San Felice, nei 9 diversi scenari di cambiamento climatico analizzati. I diversi scenari sono caratterizzati da distinti tassi di innalzamento del medio mare (crescenti dall'alto verso il basso) e da diverse concentrazioni medie di sedimenti in sospensione (crescenti da sinistra a destra). I diversi colori dal blu al giallo rappresentano diverse specie di vegetazione alofila, mentre in nero è rappresentata la superficie di suolo nudo (i.e., bare soil). Percentuali di suolo nudo pari al 100% indicano la totale scomparsa della barena.

3. Spunti per il futuro

L'obiettivo perseguito dalla Linea è consistito nel monitorare l'evoluzione dei pattern eco-geomorfologici che caratterizzano i sistemi di barena nel piano verticale e orizzontale e le reti di canali a marea.

In particolare, si è evidenziato come la risposta dei sistemi di barena alla variazione delle forzanti sia sito specifica, con zone di barena in grado di tenere il passo con l'aumento del livello medio del mare e zone ad esse adiacenti che invece perdono costantemente quota rispetto al medio mare. Si è inoltre evidenziato come la potenza delle onde incidenti sia il parametro fondamentale che governa l'erosione laterale dei margini barenali. Tale potenza è marcatamente sito specifica, con barene che sono esposte a potenze maggiori, altamente erosive, e barene che sono esposte a potenze minori, debolmente erosive. Anche le osservazioni sul contenuto di carbonio organico nei suoli e sulla capacità delle barene di sequestrare carbonio

suggeriscono una variabilità spaziale importante, che rende necessarie analisi di dettaglio locali. È quindi necessario migliorare le attuali conoscenze acquisendo ulteriori informazioni sulle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche delle barene veneziane e continuando il monitoraggio di tali caratteristiche nei siti oggetto di studio all'interno del progetto. I futuri interventi di mantenimento e recupero morfologico dovranno, per forza di cose, conoscere e considerare le condizioni locali per poter essere efficaci nel preservare e conservare le morfologie lagunari assieme alla componente biotica.

Si è inoltre evidenziato che gli eventi di acqua alta sono responsabili del 70% della deposizione dei sedimenti sulle barene e che le chiusure delle bocche, imprescindibili per la salvaguardia di Venezia e degli altri centri abitati, da un lato favoriscono i processi erosivi sui bassofondali e l'interramento dei canali, dall'altro riducono in modo importante la deposizione sulle barene, vitale per la loro sopravvivenza.

Nell'ottica di uno scenario di aumento consistente del medio mare, sempre più estese porzioni di barena potrebbero necessitare di interventi ad hoc per fronteggiare gli effetti dei cambiamenti climatici e delle pressioni antropiche, tra cui la regolazione delle maree alle bocche tramite il sistema MOSE. È chiaro che la difesa della città di Venezia non possa essere messa in discussione essendo irrinunciabile. Tuttavia gli effetti negativi sulla morfologia lagunare dovuti alle chiusure del MOSE andranno necessariamente contrastati con interventi diversificati che devono essere appositamente studiati. Le conoscenze attuali non consentono interventi ad hoc sito specifici, per i quali saranno necessarie nuove analisi.

Le analisi condotte sono risultate fondamentali per mettere a punto, testare e validare modelli che consentano di simulare in modo predittivo il comportamento ecomorfodinamico dei sistemi a marea, valutando gli effetti prodotti da diversi scenari di cambiamento climatico o di sistemi di gestione come il MOSE. Ulteriori analisi dovranno essere condotte per migliorare ulteriormente le capacità descrittive dei modelli: gli studi modellistici, condotti tramite lo sviluppo di modelli ecomorfodinamici, sono in continua evoluzione e per poter fornire risultati sempre più utili ed efficaci necessitano di modelli in continuo aggiornamento e sviluppo.

Le attività svolte dalla Linea 3.2 hanno fornito risultati di grande rilievo, come testimoniato dal consistente numero di pubblicazioni favorevolmente accettate e apprezzate dalla comunità scientifica, ma esse devono considerarsi come un punto di partenza per un approccio interdisciplinare che coniughi in modo organico osservazioni in campo e tramite remote sensing, analisi di laboratorio e modellazione matematica.

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività

Le attività della Linea 3.2 sono strutturate in 3 attività coordinate da ISMAR-CNR (*Analisi di dettaglio dei processi erosivi in zone critiche tramite remote sensing*), UNIPD (*-Analisi in situ per la stima delle caratteristiche del suolo della vegetazione e dei processi erosivi-deposizionali*) e UNIVE (*Modello ecogeomorfologico*), ciascuno dei quali ha perseguito obiettivi specifici ma strettamente interconnessi.

L'obiettivo generale della Linea è consistito nel monitorare l'evoluzione dei pattern eco-geomorfologici che caratterizzano i sistemi di barena nel piano verticale e orizzontale, attraverso l'uso di dati multispettrali satellitari e dati raccolti con drone aereo (UAV) e ecoscandaglio a multifascio (MBES) e analisi in situ ed in laboratorio, in modo da fornire informazioni rilevanti sulla condizione attuale del sistema e migliorare la capacità predittiva dei modelli matematici, necessari per sviluppare scenari futuri, utili per la gestione dell'ecosistema lagunare.

Se pur con metodi e approcci diversi, i tre WP hanno contribuito in modo organico e interdisciplinare al raggiungimento degli obiettivi. La Linea 3.2 ha efficacemente analizzato pattern di erosione e deposito a scala di barena, considerando, in particolare, un importante numero di sistemi di barena e due sistemi di canali a marea nei quali sono state condotte le analisi con i diversi metodi e approcci dalle singole Unità Operative. L'ubicazione delle aree di studio oggetto delle attività della Linea 3.2 è riportata in Figura 4.

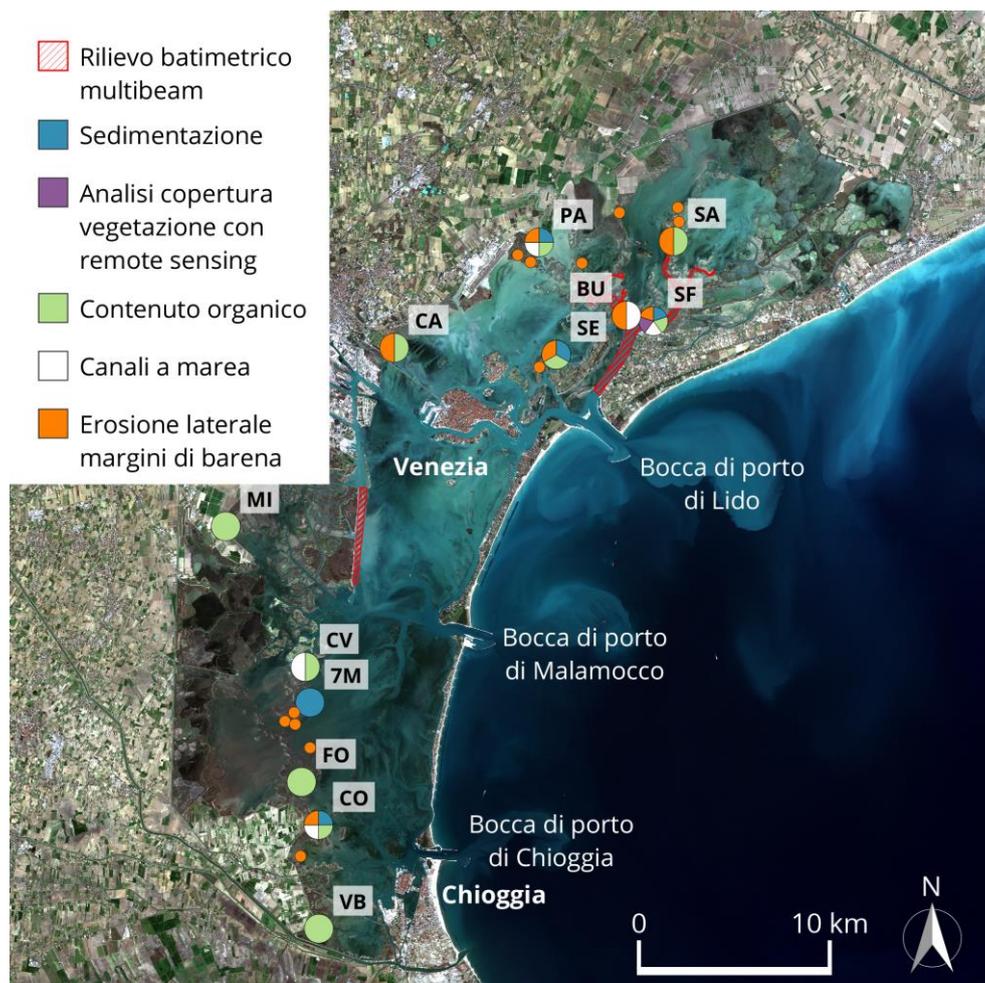


Figura 4. Ubicazione delle aree di studio oggetto della Linea 3.2. Rilievo batimetrico multibeam (tratteggio rosso), misura della sedimentazione sulla superficie di barena (blu), analisi della copertura della vegetazione con tecniche di remote sensing (viola), analisi del contenuto di sostanza organica dei suoli di barena (verde), analisi delle dinamiche di erosione e deposizione nei canali a marea (bianco), analisi dell'erosione laterale dei margini di barena (arancio).

Attività del WP 3.2.1 -Analisi di dettaglio dei processi erosivi in zone critiche tramite remote sensing

Strumentazione

Le attività di acquisizione dati mediante MBES si sono svolte a bordo del motoscafo Litus negli anni 2019, 2020 e 2021. Per tutti gli anni, si è adoperato il multibeam echosounder Kongsberg EM2040C settato con frequenza di 320 kHz con 800 beams (400 per swath) in modalità "equidistant". Il multibeam è stato integrato con il sistema di posizionamento Kongsberg Seapath 330 con l'unità inerziale Kongsberg Seatex Motion Reference Unit (MRU) 5 Motion Sensor, il sensore GPS con una correzione in tempo reale RTK (Real Time Kinematic) che ha garantito un'accuratezza centimetrica del posizionamento orizzontale. Ogni giorno all'inizio delle attività è stato rilevato il profilo di velocità del suono lungo la colonna d'acqua e tale operazione è stata ripetuta ogni due ore circa o ogni qual volta cambiavano in modo significativo la temperatura e la salinità dell'acqua al variare delle fasi mareali. Sono stati condotti, inoltre, due diversi rilievi UAV sulla barena San Felice per monitorare i cambiamenti temporali della topografia nell'ottobre 2020 e nel giugno 2021. Lo scopo dell'indagine è stato quello di ottenere le caratteristiche tridimensionali a piccola scala della barena utilizzando un drone DJI P4 PRO V2 equipaggiato con una fotocamera di fascia consumer e algoritmi di structure from motion (SfM), dotata di un'altissima risoluzione con un sensore CMOS da 1 pollice in grado di girare video a 4K/60fps e foto da 20MP. Il 7 ottobre 2020 si sono acquisite 516 immagini e un'area totale di 17 ettari è stata coperta con 1 volo a 45 m di altezza. Da questo set di dati sono stati ottenuti un'ortofoto e un Modello Digitale di Superficie con una risoluzione di 1.6 cm/pixel e 6.5 cm/pixel rispettivamente. Il 10 giugno 2021 con lo stesso UAV si è coperta la stessa area dell'anno precedente ed esteso il rilievo per una superficie totale di 105 ettari acquisendo 1767 immagini con 5 voli a 50 metri, ottenendo un ortomosaico a 2.9 cm/pixel e un Modello Digitale di Superficie a 11.5 cm/pixel.

Elaborazione dei dati acquisiti e analisi comparativa

I dati di batimetria acquisiti con il multibeam sono stati elaborati con il software Caris HIPS & SIPS 11.0.8, seguendo le procedure standard che prevedono la conversione dei dati, la verifica della corretta applicazione della correzione di marea, la creazione delle superfici, la pulizia dei dati spuri e l'applicazione dei coefficienti di rifrazione per la correzione degli errori della velocità del suono. Tutti i dati sono stati convertiti in ASCII e importati in ARCGIS per l'interpretazione finale. Le variazioni di batimetria sono state calcolate come differenza tra i dati relativi alle batimetrie del 2013, 2019, 2020 e i dati relativi alla batimetria del 2021.

Le immagini RGB ottenute dai rilievi UAV sono state elaborate con il software Agisoft Photoscan. Per questo tipo di elaborazioni viene impiegata la tecnica SfM, che permette di ricostruire la forma di oggetti attraverso la collimazione automatica di punti da un insieme di foto. La tecnica è basata su algoritmi di computer vision. In prima analisi viene effettuato l'allineamento dei punti noti dalle singole foto, si ricavano i parametri fotografici e successivamente vengono incrociati i punti riconoscibili su più foto, trovando le coordinate nello spazio dei punti stessi. Nei metadati di ogni singolo scatto sono contenute le informazioni relative alla posizione negli assi x, y e z scritti su ogni immagine con i valori determinati dalla stazione di volo a bordo del drone. L'elaborazione delle immagini consente quindi di realizzare il modello digitale di elevazione e l'immagine ortorettificata dell'area d'interesse.

Armonizzazioni dati AUV e MBES

Nella realizzazione di un'unica superficie comprendente sia la barena che il canale si è deciso di usare i dati da drone per la parte emersa, i dati da MBES per la parte di canale, e di ricostruire le parti di canale a bassissimo fondale non coperte dal MBES. Inizialmente, il Digital Elevation Model (DEM) derivato dai dati MBES e UAV è stato convertito in punti e unito in un shapefile per consentire l'interpolazione. I dati sono stati interpolati con i metodi Inverse Distance Weighting (IDW) e Triangulated Irregular Networks (TIN) per creare una superficie per tutta l'area per due anni consecutivi. Per l'analisi del cambiamento morfologico, è stata fissata una soglia di $\pm 0,5$ m per tenere conto degli errori sostenuti dalla raccolta e dall'elaborazione dei dati (es. precisione GPS, risoluzione dell'immagine, ecc.). Pertanto, i risultati dell'analisi del cambiamento presentati sono classificati come segue: erosione ($< -0,51$ m), stabile ($-0,5 - 0,5$ m) e accrescimento ($> 0,51$ m). Tutte le analisi sono state eseguite con ArcGIS. In questo modo è stato possibile ottenere una migliore rappresentazione della area a bassissimo fondale tra canale e barena.

Per l'armonizzazione dei dati UAV e MBES di Malamocco-Marghera, sono state incontrate diverse limitazioni che hanno impedito il successo dell'integrazione dei dati: (i) i dati acquisiti con singlebeam echosounder (SBES) nelle aree di basso fondale nell'ambito della Linea 1.1 sono stati raccolti solo nel 2019; (ii) i dati UAV sono stati acquisiti con droni diversi, quindi l'accuratezza e la risoluzione delle immagini sono diverse; e (iii) per i dati MBES, attività di dragaggio erano in corso nel canale durante il rilievo del 2021 per cui segni del dragaggio sono presenti nei dati. Pertanto, per i confronti, i dati MBES del 2020 rappresentano una condizione più "naturale" del canale. A causa delle limitazioni menzionate, l'interpolazione dei dati UAV e MBES e la relativa analisi dei cambiamenti non è stata possibile per l'intero canale Malamocco-Marghera. Sono stati invece confrontati separatamente i dati del 2019 e del 2020 acquisiti con UAV e MBES.

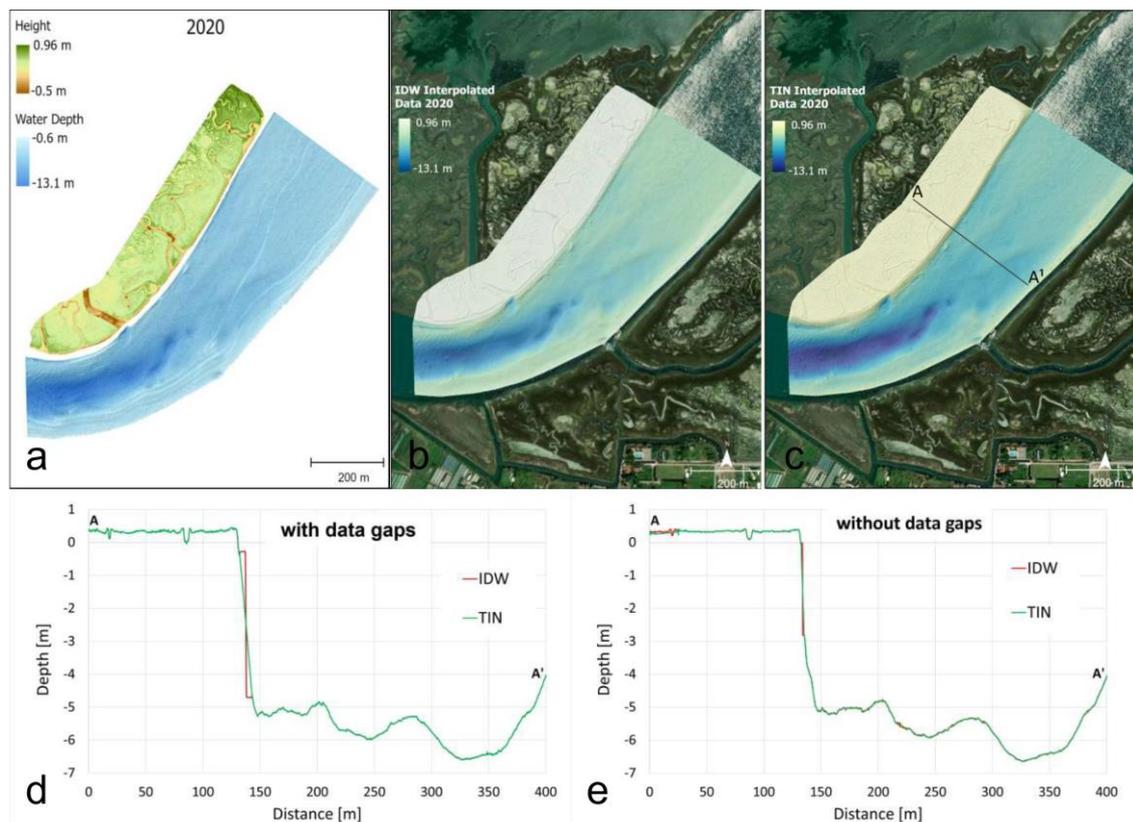


Figura 5. (a) DEM da rilievo AUV e restituzione batimetrica da MBES e loro interpolazione con metodo IDW (b) e TIN (c); confronto tra i due metodi in presenza (d) di gap tra i dati maggiore di 0.5 m e (e) di un gap inferiore a 0.5 m tra i due dataset.

Analisi della copertura vegetale e dei pattern eco-geomorfologici

Per quanto riguarda le analisi della copertura vegetale, queste sono state ottenute analizzando immagini satellitari multispettrali, ad alta risoluzione spaziale attraverso metodi di classificazione di dati supervisionati e non supervisionati multispettrali, sviluppati ad hoc per le barene e le specie vegetali della laguna di Venezia proposti da Yang et al. (2020)⁴ nell'ambito del presente progetto. Il metodo sviluppato per stimare l'abbondanza frazionaria delle diverse specie alofile e del suolo nudo, che si basa su di una classificazione soft tramite l'algoritmo Random Forest, è stato applicato all'immagine multispettrale WorldView-2 acquisita per la barena San Felice in laguna di Venezia, barena caratterizzata da un'elevata diversità delle specie di vegetazione. Questo ha permesso di analizzare la distribuzione spaziale delle specie dominanti nella barena

⁴ Yang, Z., D'Alpaos, A., Marani, M., Silvestri, S. (2020). Assessing the Fractional Abundance of Highly Mixed Salt-Marsh Vegetation Using Random Forest Soft Classification Remote Sens. 12 (19) 3224, **pubblicato all'interno del Progetto Venezia2021.**

in esame per le diverse associazioni vegetali, fornendo una fotografia attuale della copertura vegetale che rappresenta un punto di partenza fondamentale per indagini future di confronto.

Attività del WP 3.2.2 - Analisi in situ per la stima delle caratteristiche del suolo della vegetazione e dei processi erosivi-deposizionali

Con riferimento all'analisi dei campioni di suolo prelevati in barena, questi si differenziano in campioni superficiali prelevati da trappole di sedimento predisposte sulla superficie della barena in 5 barene all'interno della Laguna di Venezia (San Felice, Sant'Erasmus, Conche, Fondo dei Sette morti e Pagliaga-Dese, stazioni individuate dai marker azzurri in Figura 4 in Figura 6) e campioni provenienti da carote sedimentarie a profondità variabile tra 50 cm e 100 cm, prelevate sui margini (Figura 7) di 20 diverse barene (Figura 4) e nelle porzioni interne di 10 barene in laguna (San Felice, Sant'Erasmus, Saline, Pagliaga, Campalto, Mira, Canale Virgilio, Fossej, Conche, Valle di Brenta, stazioni individuate da marker verdi e arancioni rappresentati in Figura 4 e in Figura 6). Queste analisi hanno consentito di determinare i principali processi responsabili per l'arretramento laterale delle barene, i pattern di deposizione di materiale inorganico e organico nel breve periodo (prelievo campioni superficiali dalle trappole di sedimento) e i pattern di accrescimento di suolo inorganico e organico nel lungo periodo (prelievo campioni a profondità pari a 100 cm), assieme ai pattern di stoccaggio di materia organica (carbonio sequestrato dall'atmosfera e immagazzinato nei suoli di barena).

Le posizioni di tutti i campionamenti, dei carotaggi e delle stazioni di misura sono state rilevate con GPS differenziale (Leica Viva GS14) in modalità RTK o con una stazione totale costituita da teodolite Wild T2002 e distanziometro Leica Di2002. Tutti i campioni raccolti sono stati analizzati in laboratorio per determinare il contenuto di sostanza organica tramite la perdita al fuoco (Loss On Ignition – LOI), la frazione inorganica e la distribuzione granulometria della frazione inorganica tramite diffrazione laser (Mastersizer 2000, Malvern Instruments) per caratterizzare la natura del materiale sedimentato. Inoltre, un sottoinsieme di 100 campioni è stato sottoposto ad analisi elementare (CHNS, varioMicro Cube V4.0.10 Elementar Analysensysteme GmbH), per ottenere una relazione tra contenuto di sostanza organica e contenuto di carbonio. I campioni sono stati asciugati a 40°C per 48 ore fino al raggiungimento di un peso costante e pesati per quantificare l'accumulo di sedimenti (Figura 8a). Il contenuto di sostanza organica è stato determinato tramite LOI bruciando il campione alla temperatura costante di 375°C per 16 ore (Figura 8c – d). La differenza di peso, prima e dopo il processo, ha permesso di stimare la quantità di sostanza organica e inorganica presente (Figura 8e). Dopo la rimozione della frazione organica con un trattamento con H₂O₂ si è anche determinata la distribuzione granulometrica della frazione inorganica tramite diffrazione laser.

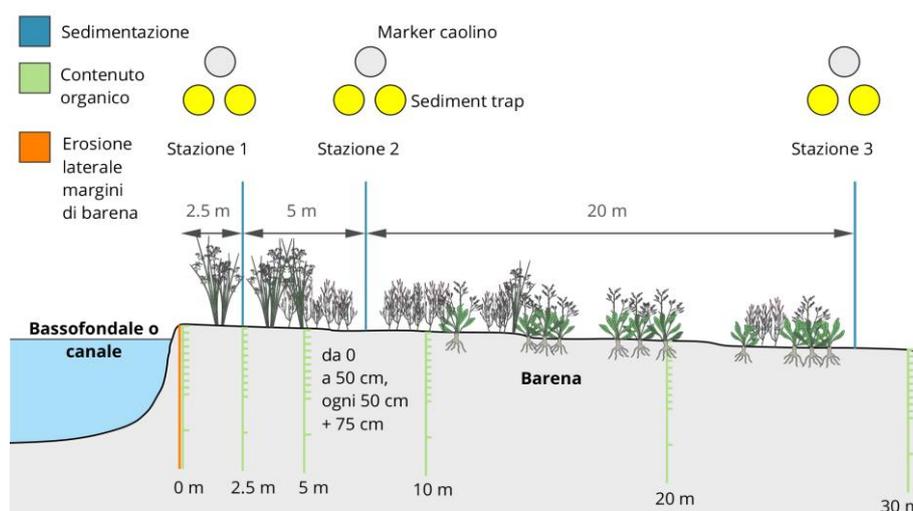


Figura 6. Rappresentazione schematica della posizione delle stazioni di misura e dei campionamenti. Le stazioni di misura della sedimentazione sulla superficie sono poste a 2.5, 5 e 27.5 m dal margine e sono dotate di un marker di caolino (bianco) e due sediment trap per la misura del tasso di sedimentazione (giallo). I carotaggi per la determinazione del contenuto organico (verde) sono alla distanza 0, 2.5, 5, 10, 20 e 30 m dal margine. I campioni per la stima delle caratteristiche del suolo e la loro relazione con l'erosione laterale dei margini di barena sono presi in corrispondenza del margine (arancione).

Analisi dei driver di erosione laterale delle barene.

Per quanto riguarda l'analisi dei processi che governano l'erosione laterale delle barene, si è analizzato l'arretramento di 20 barene distribuite all'interno della laguna di Venezia su scale temporali decennali (Figura 7). Attraverso l'interpretazione di un'ampia serie di dati di campo, ottenuti da 20 carotaggi indisturbati sui margini barenali ed analizzati in laboratorio, combinata con la modellazione numerica delle onde del vento che colpiscono i margini delle barene formatesi in diverse condizioni ambientali (Carniello et al., 2011)⁵, sono stati analizzati i contributi delle proprietà del suolo, della copertura vegetale e della potenza delle onde incidenti sui tassi di arretramento delle barene misurati sulla base di immagini aeree storiche.

I tassi di arretramento laterale lineare, ζ_L [m/yr], e volumetrico, ζ_V [m²/yr], per unità di lunghezza del margine di barena (Figura 7c) sono stati misurati a partire da due serie di fotografie aeree acquisite dalla Regione Veneto nel 1978 e nel 2010. La densità media della potenza d'onda incidente, σ [W/m], è stata determinata, per ciascun caso studio, sulla base dei risultati numerici ottenuti mediante l'utilizzo del modello WWTM sviluppato dal Dip.to ICEA dell'Università di Padova (vd. Attività Linea 1.3, WP 1.3.3 in particolare).

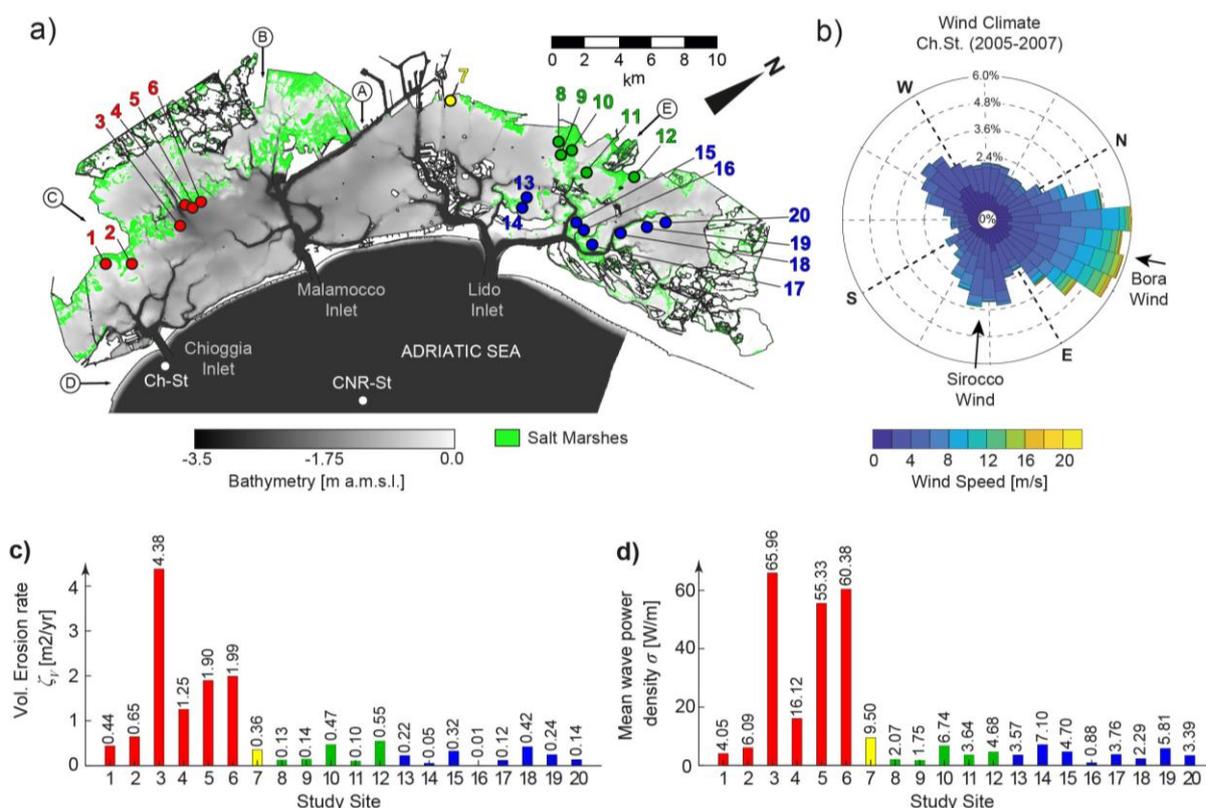


Figura 7. a) Mappa batimetrica della laguna di Venezia (Italia) basata sui dati batimetrici più recenti e accurati disponibili. Sono indicate le posizioni della stazione anemometrica di Chioggia (Ch-St) e della stazione della Piattaforma Oceanografica del CNR (CNR-St). I punti colorati indicano i siti di campionamento e l'origine della barena: il rosso indica le barene originate dall'alternanza di apporti di acqua dolce e di acqua marina; il giallo è per le barene originate su terreni continentali; il verde indica le barene ai margini delle acque fluviali che ancora entrano in Laguna; il blu è per le barene che fiancheggiano i principali canali di marea situati nel settore NE della laguna di Venezia, vicine alla bocca di Lido, sviluppate su aree prive di apporti di acqua dolce; b) rosa dei venti costruita a partire dai dati Ch-St raccolti dal 2005 al 2007; c) Distribuzione dei tassi di erosione e d) della potenza d'onda in ciascun sito di studio. I colori indicano diverse origini delle barene analizzate.

⁵ Carniello L., A. D'Alpaos, and A. Defina (2011). Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 92, 263–276, doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001.

Analisi dei tassi di deposizione inorganica e organica annuale a scala di barena.

Con riferimento all'analisi dei tassi di deposizione inorganica e organica lungo transetti nelle 5 barene analizzate all'interno della laguna di Venezia (Figura 4), in ciascun transetto (Figura 6) sono state installate 3 stazioni di misura poste rispettivamente a 2.5 m, 7.5 m e 27.5 m dal margine di barena. Ogni stazione era dotata di un marker (caolino) posto sulla superficie della barena per determinare il tasso di accrescimento verticale annuale e di 3 trappole di sedimento per determinare l'accumulo di sedimenti sulla superficie. Per due di queste trappole i sedimenti venivano raccolti mensilmente, o dopo un evento meteomarinario particolarmente intenso, mentre i sedimenti sulla terza trappola venivano raccolti annualmente, per confrontare le dinamiche deposizionali su scala temporale breve (mensile e di evento) e annuale. Da ottobre 2018 ad aprile 2022 sono stati effettuati 46 campionamenti e sono stati raccolti e analizzati 3'324 campioni.

Analisi delle caratteristiche dei suoli e dei processi deposizionali con riferimento al contenuto organico.

Per quanto riguarda l'analisi delle caratteristiche dei suoli e dei processi deposizionali è stata effettuata una serie di carotaggi alla profondità di circa 1 m nei suoli di barena, lungo transetti perpendicolari al margine (6 carotaggi per transetto a 2.5, 5, 10, 20 e 30 m dal margine stesso, si veda la Figura 6) in 10 aree di studio (si veda la Figura 4) per un totale di 60 carotaggi e 720 campioni analizzati (un campione ogni 5 cm dalla superficie fino alla profondità di 50 cm ed un campione a 75 cm di profondità). Le analisi in laboratorio hanno riguardato la stima della dry bulk density, del contenuto organico e inorganico, e della distribuzione granulometrica. In corrispondenza di ciascun carotaggio sono state inoltre registrate, all'interno di un quadrato di 1x1 m, le caratteristiche della vegetazione in termini di specie presenti e relativa copertura. Cento di questi campioni sono stati sottoposti ad analisi elementare per ottenere una relazione tra il contenuto di materia organica misurato tramite LOI e il contenuto di carbonio.

Analisi dei pattern di erosione e deposito e loro variazioni per effetto della regolazione delle maree alle bocche ad opera del sistema MOSE a scala di laguna.

Al fine di analizzare gli impatti delle chiusure del sistema MOSE sui pattern di erosione e deposito all'interno della laguna sono state condotte delle simulazioni numeriche, coadiuvate da dati di campo. Si è utilizzato il modello idro-morfodinamico agli elementi finiti sviluppato dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova (vd. Attività Linea 1.3, WP 1.3.3 in particolare) per simulare gli effetti dell'attivazione delle barriere mobili nel periodo Ottobre 2020 - Gennaio 2021, focalizzandosi in particolare sulle prime due chiusure avvenute il 3 e il 15 ottobre 2020, per comprendere gli impatti della regolazione delle maree sul trasporto di sedimenti all'interno della laguna e le possibili implicazioni per l'evoluzione morfologica delle sue tipiche forme lagunari (i.e., barene, canali e bassofondali). Per analizzare gli effetti delle regolazioni del MOSE, i risultati per lo scenario regolato sono stati confrontati con quelli relativi alle condizioni non regolate, ovvero le condizioni che si sarebbero verificate in assenza della chiusura delle barriere mobili. I risultati delle simulazioni sono stati analizzati in termini di i) differenze nei livelli di marea, ii) altezze d'onda significative, iii) sforzo tangenziale al fondo, iv) concentrazioni di sedimenti sospesi (SSC), v) variazione nella durata e nell'intensità dell'allagamento delle barene. Inoltre, i potenziali effetti a lungo termine delle chiusure del MOSE sulla morfodinamica lagunare, così come gli effetti a cascata dovuti al degrado delle forme lagunari, sono stati analizzati.



Figura 8. Fasi delle analisi di laboratorio condotte sui campioni raccolti. Asciugatura in forno per misurare il peso secco (a). Trattamento con perossido di idrogeno per la rimozione della sostanza organica (b). Per la determinazione del contenuto di sostanza organica i campioni vengono bruciati in muffola (c), poi vengono lasciati in essiccatore fino al raggiungimento della temperatura ambiente (d) e pesati nuovamente per determinare il peso dopo aver eliminato la componente organica (e).

Attività del WP 3.2.3 - *Modello ecogeomorfologico*

È stato sviluppato e testato un nuovo modello ecomorfodinamico spazialmente esplicito, bidimensionale, per simulare l'evoluzione accoppiata della topografia della barena e della vegetazione alofila che la colonizza (Finotello et al., 2022). Il modello simula la presenza di diverse specie alofile distribuite in un dominio bidimensionale in cui ogni sito è caratterizzato da una determinata quota rispetto al livello medio del mare.

Il modello consiste di due moduli. Il primo è un modulo morfodinamico che tiene conto dei processi idrodinamici e di trasporto dei sedimenti negli ambienti di barena, consentendo di simulare processi di erosione e deposizione. Il secondo è un modulo ecologico che riproduce la dinamica della vegetazione alofila, tenendo conto dei meccanismi di competizione e dispersione delle specie in modo spazialmente esplicito. Per il modulo morfodinamico si è scelto di utilizzare un modello bidimensionale alle differenze finite che risolve sia i campi idrodinamici semplificati, sia il campo di trasporto dei sedimenti, insieme all'evoluzione topografica della superficie di barena. Il modulo risolve le equazioni delle onde lunghe in acque basse, opportunamente semplificate per ridurre i tempi di calcolo e consentire simulazioni a lungo termine (cioè da decenni a secoli), mantenendo la descrizione delle principali caratteristiche della circolazione idrodinamica. Il modulo morfodinamico interagisce direttamente con il modulo ecologico perché tutti i processi morfodinamici sono mediati dall'eventuale presenza di vegetazione sulla barena. In particolare, la vegetazione può influenzare sia la deposizione inorganica, attraverso la cattura diretta dei sedimenti e

l'aumento dell'attrito del fondo, sia la sedimentazione organica, in modo direttamente proporzionale alla biomassa vegetale locale, quest'ultima calcolata dal modulo ecologico.

Nel modulo ecologico, ogni specie vegetale è caratterizzata da una specifica "habitat quality function" che esprime e sintetizza la predisposizione di ciascuna specie a colonizzare siti di barena posti a quote altimetriche diverse. Tale funzione di qualità dell'habitat è modellata da una funzione logistica. Le interazioni ecologiche tra gli individui di diverse specie sono simulate come segue: a ogni passo temporale, la specie i -esima che occupa un determinato sito j muore con una probabilità che dipende dal tasso di mortalità locale della specie, il quale risulta a sua volta inversamente proporzionale alla qualità dell'habitat locale. La probabilità che il sito venga ri-colonizzato è quindi calcolata stocasticamente in base alla pressione di colonizzazione totale esercitata sul sito da tutte le specie esistenti e l'eventuale specie colonizzatrice viene infine selezionata proporzionalmente alla pressione di colonizzazione che ciascuna specie esercita sul sito. Tale pressione dipende dalla somma del tasso di colonizzazione delle specie che occupano i vari siti del sistema, ponderato da una funzione di dispersione esponenziale che tiene conto della distanza di ciascun sito dal sito colonizzabile. Il tasso di colonizzazione dipende, a sua volta, dalla qualità dell'habitat che i potenziali colonizzatori possiedono sia nel proprio sito sia nel sito da colonizzare. La colonizzazione è consentita anche dalla progenie di ulteriori individui appartenenti a specie che non sono attualmente presenti nel sistema, consentendo così la speciazione e l'importazione di colonizzatori esterni.

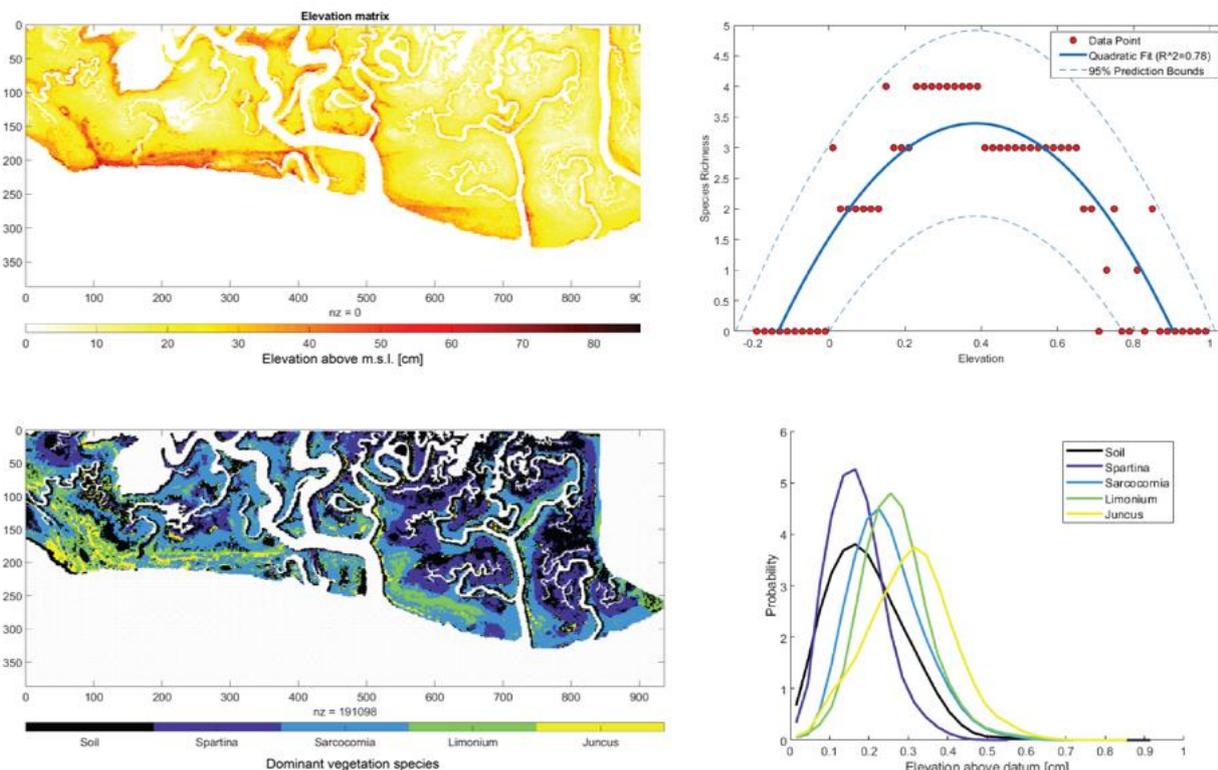


Figura 9. Rilievo topografico e classificazione delle specie alofile per una porzione della barena di San Felice. Le quote topografiche sono espresse in centimetri e riferite alla quota del livello medio mare locale. Sono inoltre rappresentate le nicchie ecologiche realizzate per ciascuna specie alofila e l'andamento della diversità di specie al variare della quota della barena.

Una volta sviluppato il modello dal punto di vista teorico e numerico, ne è stata testata la capacità di riprodurre i pattern di zonazione della vegetazione e di ricchezza di specie osservati in natura. A tal fine, sono state effettuate diverse simulazioni esplorative su un dominio corrispondente alla barena di San Felice per la quale erano disponibili sia dati topografici accurati sia una precisa classificazione spaziale delle specie alofile (Figura 9). Sono state effettuate diverse simulazioni numeriche, considerando un numero costante di specie vegetali pari al numero di specie osservate in campo e assumendo una quota costante per ogni cella

(escludendo quindi possibili feedback ecomorfodinamici), al fine di osservare meglio le dinamiche della vegetazione. I risultati mostrano come il modello sia in grado di riprodurre in modo efficace e robusto le caratteristiche delle nicchie ecologiche e le distribuzioni delle diverse specie osservate in natura che è tipicamente più alta a quote intermedie e più bassa agli estremi dell'intervallo di elevazione della barena (Figura 10). I risultati variano a seconda delle caratteristiche delle funzioni di qualità dell'habitat adottate e sono particolarmente sensibili alle variazioni della capacità competitiva interspecifica di ciascuna specie, evidenziando così l'importanza di questi parametri sulle dinamiche evolutive della vegetazione alofila. È stata inoltre testata la capacità del modello nel replicare i risultati di esperimenti ecologici classici che prevedono il trapianto di specie al di fuori del range di quote tipico per ciascuna specie di vegetazione. I risultati mostrano che il modello è in grado di riprodurre efficacemente i risultati di tali esperimenti, a differenza dei modelli ecogeomorfologici esistenti, i quali non considerano gli effetti della dispersione e della competizione le diverse specie di vegetazione, di riprodurre le dinamiche osservate in tali esperimenti.

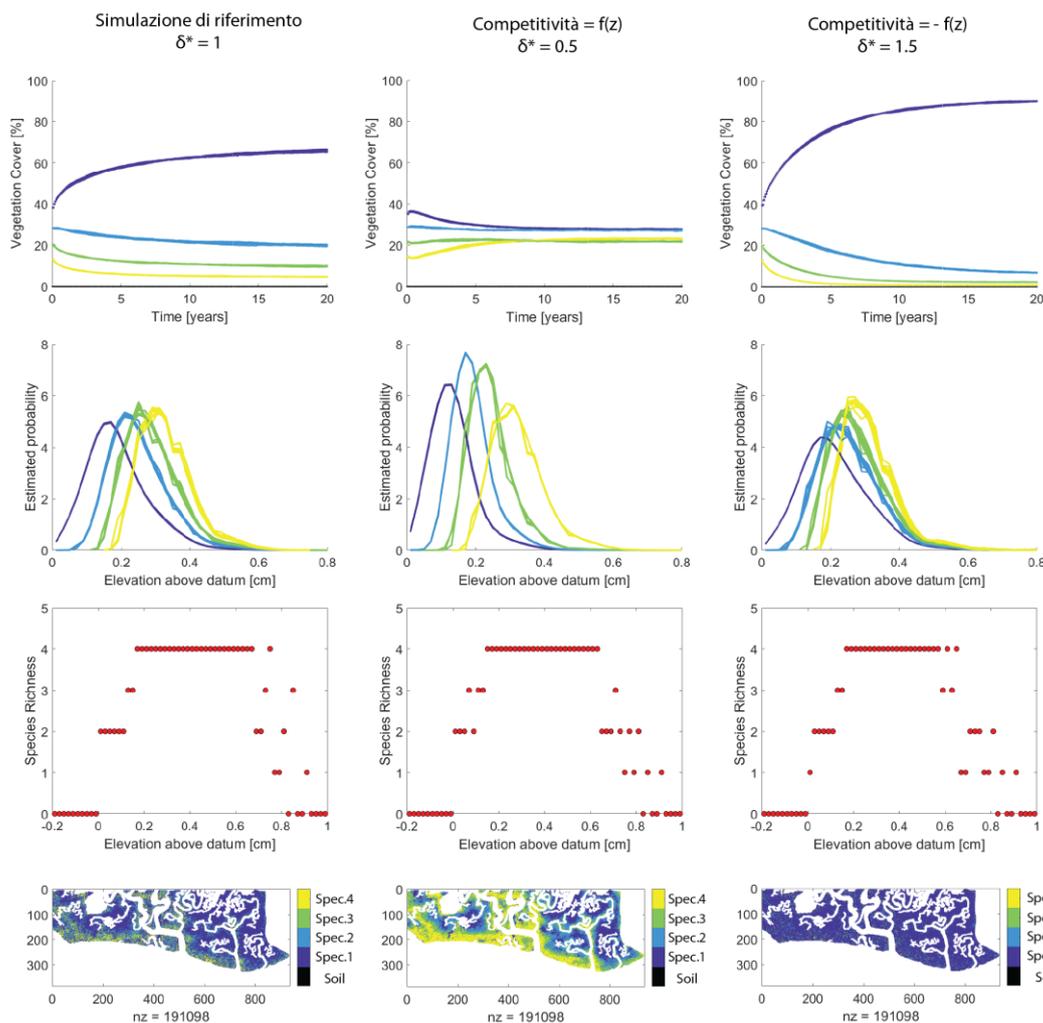


Figura 10. Modulo Ecologico. Effetti della capacità di competizione interspecifica delle specie alofile su a) evoluzione temporale dell'abbondanza relativa di ciascuna specie; b) Nicchie ecologiche realizzate; c) Diversità di specie; d) Distribuzione spaziale delle specie alofile al variare della competitività interspecifica.

Terminata la calibrazione di dettaglio, si è proceduto all'applicazione del modello ecogeomorfologico completo, al fine di analizzare l'evoluzione di un caso studio delle barene lagunari al variare del tasso di incremento del medio mare relativo, nonché della disponibilità di sedimenti inorganici trasportati in sospensione dalle maree. I risultati ottenuti nell'ambito suggeriscono che il modello sia robusto sia dal punto di vista teorico che pratico e quindi adatto a soddisfare le esigenze per cui è stato sviluppato.

5. Risultati per attività

Risultati del WP 3.2.1 -Analisi di dettaglio dei processi erosivi in zone critiche tramite remote sensing

In base ai dati batimetrici acquisiti durante il progetto, il canale San Felice non ha mostrato variazioni significative tra il 2013 e il 2021. Tuttavia, nella parte nord del canale San Felice sono state osservate aree di deposizione nella forma di banchi di sabbia e dune. Il più alto grado di accrezione è stato osservato nell'anno 2019, quando lo 0,64% dell'area monitorata (3.14 km²) ha registrato deposizione. Sono state documentate anche piccole aree di erosione che rappresentano solo 1% dell'area monitorata (4.17 km²) dal 2013 al 2021. I dati batimetrici acquisiti per diversi anni hanno anche permesso di documentare diverse caratteristiche morfologiche nel canale San Felice, come campi di dune, barre e forme erosive. In generale, il canale San Felice è stabile, ma sono state osservate aree in deposizione nella parte nord del canale (Figura 11).



Figura 11. Differenze in batimetria nel canale di San Felice. Nella figura si rappresenta la differenza di batimetria tra il 2021 e il 2020, 2019, 2013. È stata fissata una soglia di $\pm 0,5$ m per tenere conto degli errori commessi nella raccolta e nell'elaborazione dei dati (ad es. precisione del GPS, risoluzione delle immagini, ecc.). Pertanto, i risultati dell'analisi delle variazioni topografiche presentate sono classificati come segue: erosione ($< -0,51$ m), stabilità (0,5-0,5 m) e accrescimento ($> 0,51$ m).

Per quanto riguarda il canale di Malamocco-Marghera, la serie di dati batimetrici dal 2013 al 2021 ha permesso di documentare i processi di deposizione ed erosione nel canale. Il confronto tra i dati batimetrici del 2013, 2019 e 2020 rispetto a quelli del 2021, evidenzia che tra i dati del 2019 e del 2021, si osserva deposizione in 50% dell'area di studio totale (0.46 km²), ma l'anno successivo queste aree non sono più presenti. Questo cambiamento potrebbe essere il risultato del consistente dragaggio dell'area nell'ambito della manutenzione del canale di navigazione. Inoltre, il confronto dei dati UAV e MBES degli anni 2019 e 2020 mostra l'erosione del bordo della barena e deposizione nel canale. Ciò suggerisce che la barena si stia erodendo per effetto del passaggio delle navi e dell'azione della marea e di intensi eventi meteorologici e i materiali erosi vengano trasportati sul fondo del canale. Nel complesso, il canale di Malamocco-Marghera è in erosione, il che può essere la conseguenza dei continui dragaggi per mantenere il canale di navigazione.

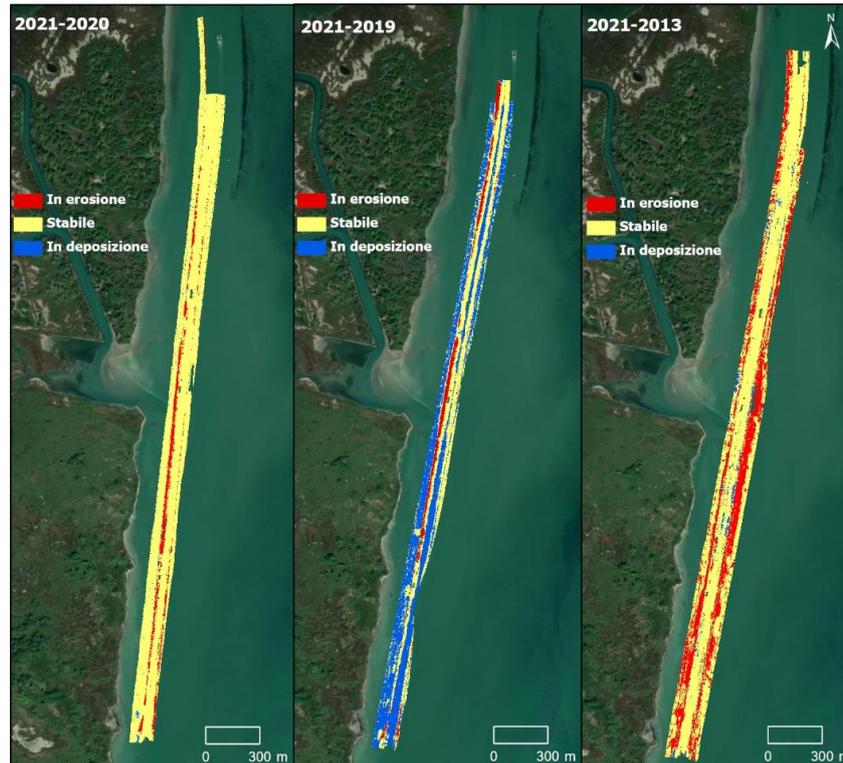


Figura 12. Differenze in batimetria 2021 rispetto a 2020 – 2019 – 2013 nel canale di Malamocco-Marghera (range +/- 0.5m).

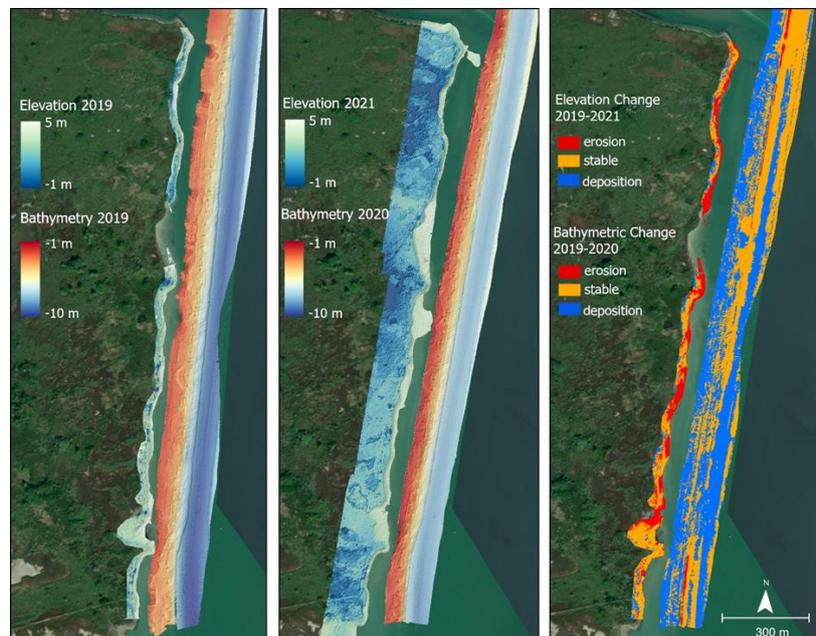


Figura 13. Confronto dei dati UAV e MBES rilevati nel 2019 e nel 2020/2021. L'analisi dei cambiamenti mostra l'erosione ai margini della barena e la deposizione nel canale di Malamocco-Marghera.

Risultati del WP 3.2.2 - *Analisi in situ per la stima delle caratteristiche del suolo della vegetazione e dei processi erosivi-deposizionali*

Analisi dei driver di erosione laterale delle barene

Le analisi confermano l'esistenza di una correlazione lineare positiva e statisticamente significativa tra i tassi di erosione volumetrica e la densità di potenza media delle onde che impattano sui bordi delle barene (Figura 14), come inizialmente proposto da Marani et al. (2011)⁶ e successivamente confermato da Finotello et al. (2020)⁷. Anche se saranno necessarie ulteriori analisi per chiarire se le diverse specie di alofile possano attenuare attivamente l'erosione laterale delle barene, i nostri risultati suggeriscono che il driver principale dell'arretramento delle barene è la potenza delle onde che impattano sul bordo delle barene stesse. Al contrario, le caratteristiche del suolo qui analizzate non influenzano in modo significativo l'arretramento laterale, nonostante la forte variabilità del tipo di suolo osservata tra le barene caratterizzate da origini, traiettorie evolutive e distanza dalle fonti di acqua dolce e di sedimenti inorganici diversi. Inoltre, i risultati dimostrano che il coefficiente di proporzionalità tra ζ_v e la potenza delle onde da vento è molto meno sito-specifico di quanto ipotizzato in precedenza (Marani et al., 2011), con implicazioni dirette per la conservazione e il ripristino delle barene su scale temporali decennali o centenarie.

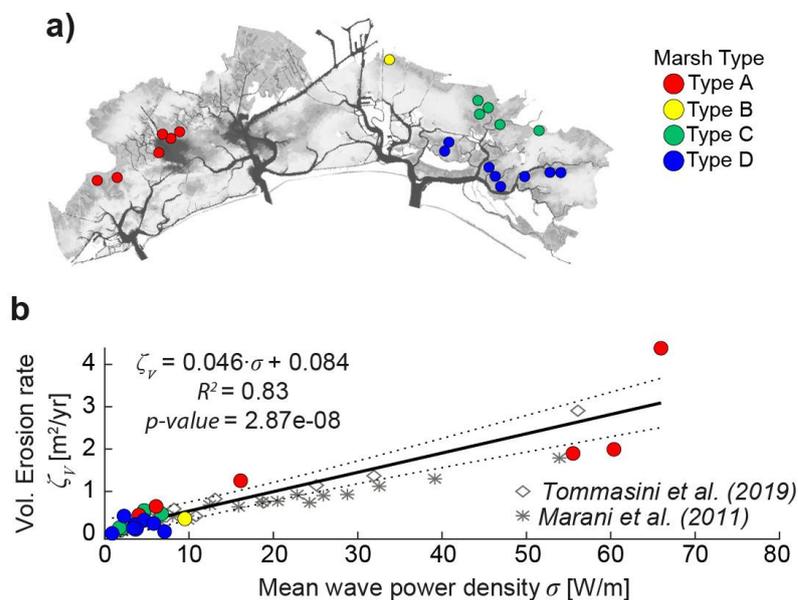


Figura 14. Dipendenza dell'arretramento laterale delle barene dalla potenza d'onda nelle 20 barene considerate (b). (a) Relazione tra il tasso di erosione volumetrica e la densità media di potenza d'onda. Sono riportati anche i dati medi di Marani et al. (2011) e Tommasini et al. (2019), entrambi relativi alla laguna di Venezia.

Analisi dei tassi di deposizione inorganica e organica annuale a scala di barena.

Dalle misure di sedimentazione è possibile comprendere i pattern temporali di sedimentazione (Figura 15). Il tasso di sedimentazione varia generalmente tra 0 e 150 g m⁻² d⁻¹ in tutte le aree di studio, con valori maggiori in laguna centrale a causa della maggiore potenza delle onde da veno. Si osserva che mediamente circa il

⁶ Marani, M., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., & Santalucia, M. (2011). Understanding and predicting wave erosion of marsh edges. *Geophysical Research Letters*, 38(21), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL048995>

⁷ Finotello, A., Marani, M., Carniello, L., Pivato, M., Roner, M., Tommasini, L., & D'Alpaos, A. (2020). Control of wind-wave power on morphological shape of salt marsh margins. *Water Science and Engineering*, 13(1), 45–56, **pubblicato all'interno del Progetto Venezia2021.**

70% della sedimentazione (sommata separatamente per le due classi, acqua alta e condizioni idrodinamiche ordinarie) avviene durante periodi di storm, che però rappresentano appena il 25% del periodo considerato. Si può concludere quindi che nella laguna di Venezia la sedimentazione sulle barene sia dovuta principalmente ad intensi eventi di storm surge piuttosto che all'azione della marea. La leggera variazione tra diversi periodi dell'anno, conferma che questo set di dati può spiegare le principali variazioni stagionali dei processi.

Inoltre, si è osservato che il tasso di sedimentazione è legato esponenzialmente al tirante medio sulle barene. Di conseguenza maggiore è il livello di marea, maggiore è l'apporto di sedimenti. L'effetto delle barriere del MOSE è quello di una riduzione dei livelli all'interno di tutta la laguna, e quindi anche di una variazione dei tiranti sulle barene e, di conseguenza, della sedimentazione. È interessante notare che la sedimentazione misurata nei periodi di ottobre e dicembre 2020, in cui sono avvenute le prime chiusure del sistema MOSE, è sensibilmente minore di quella misurata nei periodi dei due anni precedenti con analoghe condizioni idro-meteorologiche. Mentre i valori di sedimentazione non vengono modificati durante i periodi caratterizzati da condizioni idrodinamiche ordinarie, si ha una riduzione notevole della sedimentazione legata ai periodi di acqua alta quando viene utilizzato il sistema MOSE per la regolazione dei colmi di marea. In generale, si può stimare che la regolazione degli storm surge con il MOSE riduca la sedimentazione sulle barene di circa il 20%.

Il periodo autunnale (ottobre-dicembre) è solitamente caratterizzato da più frequenti eventi di acqua alta e, di conseguenza, maggiori attivazioni del sistema MOSE. Per questo motivo, si riporta in Figura 16 il confronto tra la sedimentazione misurata e quella nei due scenari (regolato e non regolato) per quattro periodi autunnali dal 2018 al 2021. Le misure effettuate negli ultimi due anni (2020 e 2021) con l'attivazione del sistema MOSE confermano una riduzione della sedimentazione nello scenario regolato. Fermo restando la necessità di difendere la città di Venezia e i centri abitati lagunari dalle acque alte, non sfugge alla nostra attenzione il fatto che l'uso del sistema Mo.S.E riduce la sedimentazione sulle barene non permettendo loro di tenere il passo con gli attuali tassi di incremento del medio mare.

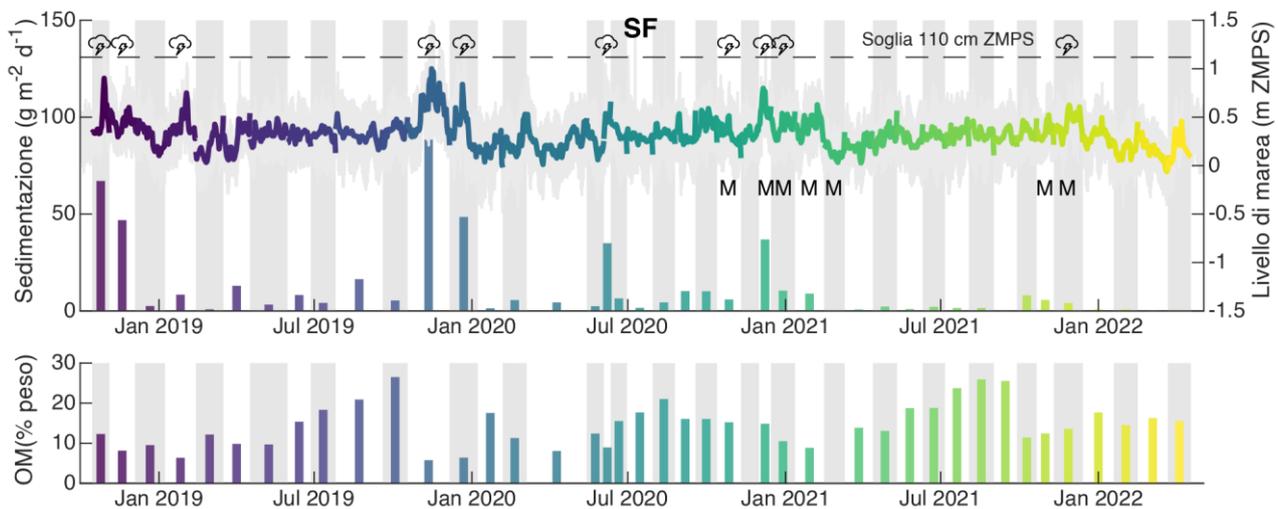


Figura 15. Livelli di marea, tasso di sedimentazione e contenuto di sostanza organica (OM) misurati nell'area di studio di San Felice (SF). Lo sfondo indica i diversi periodi di raccolta, il simbolo della nuvola indica i periodi di storm surge, la lettera M i periodi di attivazione del sistema MOSE, la linea tratteggiata la soglia di attivazione del sistema MOSE a 110 cm sullo zero mareografico di Punta della Salute.

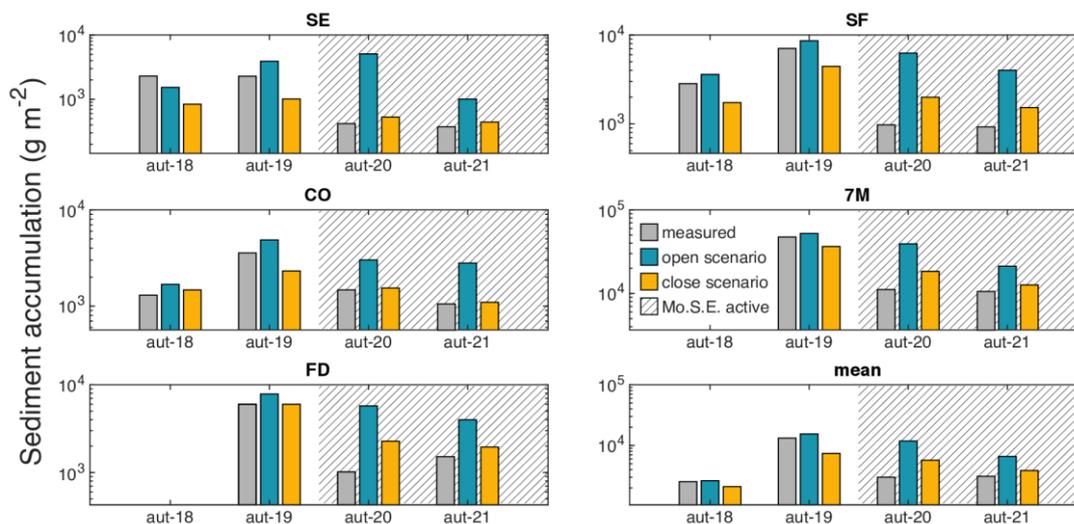


Figura 16. Modifiche alla sedimentazione durante il periodo autunnale. Confronto tra dati misurati e modellati nello scenario regolato e non per il dettaglio dei mesi autunnali per ogni periodo (Ottobre, Novembre e Dicembre), per ogni area di studio: SE, SF, CO, 7M, FD e la loro media. Nell'autunno 2020 e 2021 le barriere sono state utilizzate, quindi le misure (in grigio) si devono confrontare con lo scenario regolato (in giallo) e non con lo scenario non regolato (ottanio), come invece bisogna fare per l'autunno 2018 e 2019.

Analisi delle caratteristiche dei suoli e dei processi deposizionali con riferimento al contenuto organico.

Le analisi sul contenuto di materia organica nei suoli di barena analizzati mostrano come questo sia piuttosto variabile (tra 1 e 60%). I profili ottenuti (non riportati qui per brevità ma presenti nei rapporti intermedi e nel Deliverable 3.2.2.3) mostrano un generale decremento del contenuto di materia organica con la profondità presso Sant'Erasmus, San Felice e Saline. Tuttavia in altre aree si osservano livelli ricchi di materia organica a diverse profondità, a testimonianza dell'evoluzione degli ambienti deposizionali che nel tempo ha caratterizzato le aree d'indagine. I sedimenti ascrivibili ad ambienti di barena raggiungono infatti profondità diverse nelle diverse aree di studio ed il contenuto organico varia in base ai diversi contributi vegetali ed alla loro degradazione, rispecchiando le condizioni ambientali susseguite nel tempo. Il contenuto organico raggiunge valori maggiori nelle aree più prossime ai margini interni della laguna evidenziando l'importanza degli apporti d'acqua dolce.

L'analisi granulometrica condotta sui campioni sedimentari prelevati dalle carote, prevalentemente costituiti da silt, ha evidenziato valori di d_{50} compresi tra 6 e 44 μm , con una media di 15 μm . La granulometria tende ad aumentare debolmente con la profondità nelle aree di Sant'Erasmus, San Felice e Saline, probabilmente a causa del graduale passaggio a depositi di bassofondo. Si osserva inoltre una maggiore abbondanza della componente argillosa nei pressi dei margini interni della laguna, interessati da apporti fluviali. Il contenuto di materia organica, inoltre, mostra un trend decrescente significativo all'aumentare della granulometria dei sedimenti a cui è associato (Puppin et al., 2022b). Questo suggerisce che contenuti organici più elevati possano essere associati a granulometrie più fini grazie ad un ridotto tasso di decomposizione dovuto ad una minor circolazione dell'ossigeno tra i pori del sedimento e grazie alla capacità delle particelle più fini di adsorbire materiale organico particellato.

Il contenuto di materia organica, insieme ai dati di dry bulk density, ha permesso di stimare la quantità di carbonio organico stoccato nel primo metro di suolo nelle aree di studio, per determinare i pattern di accumulo e stoccaggio del carbonio organico nei suoli di barena. In accordo con la distribuzione del contenuto di materia organica precedentemente osservata, le stime degli stock di carbonio (Figura 17) presentano un'elevata variabilità tra le diverse aree d'indagine, con valori più elevati ai margini interni della laguna. Gli apporti di acqua dolce e la salinità ridotta, che caratterizzano o hanno caratterizzato in passato queste aree, favoriscono la crescita del canneto (*Phragmites australis*), la cui biomassa contribuisce abbondantemente all'accumulo di residui organici nel suolo. Lo stock di carbonio stimato per i suoli di barena della laguna di

Venezia, entro il primo metro, varia tra 9'800 e 24'700 ton C/km², mostrando valori confrontabili con quelli attribuiti ad alcuni ecosistemi forestali, a conferma rilevante della capacità degli ambienti di barena nello stoccare carbonio.

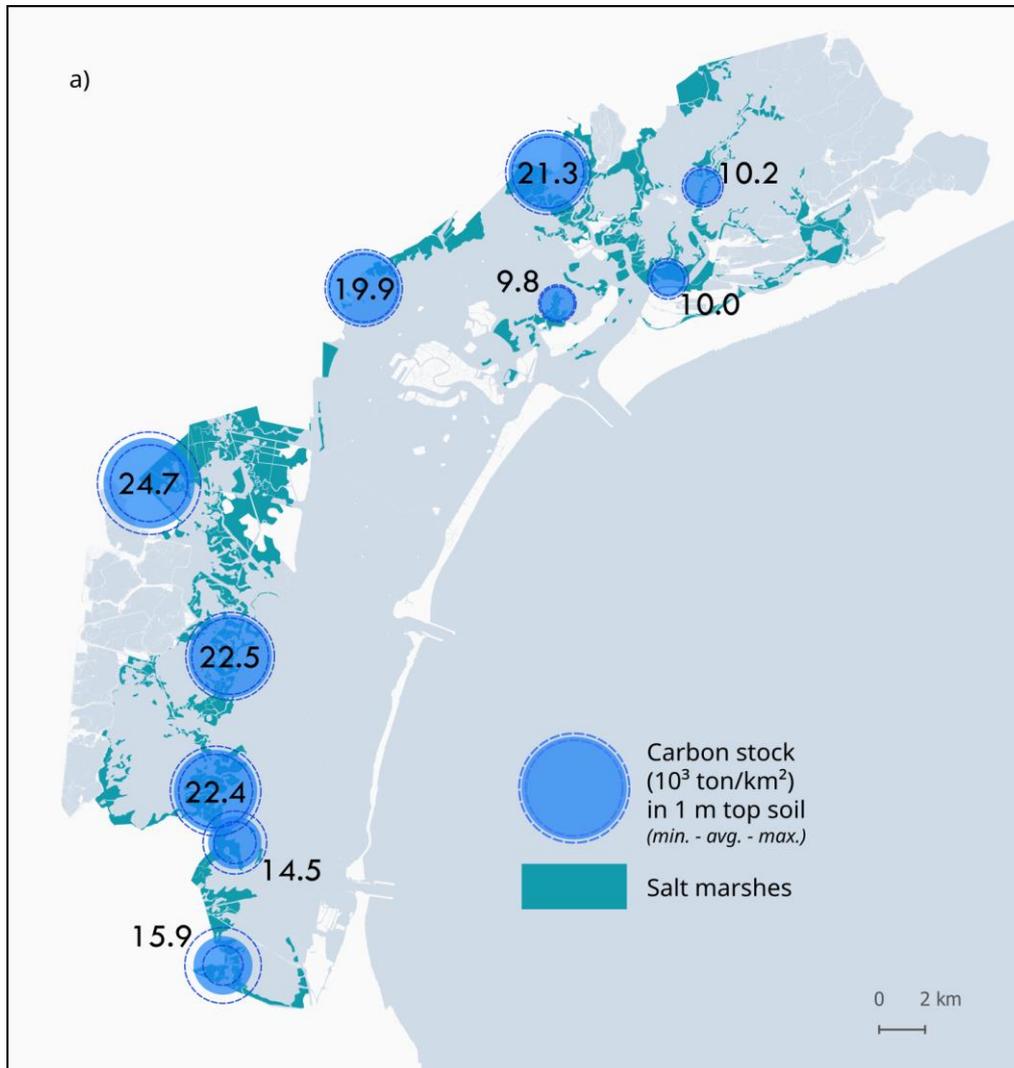


Figura 17. Stima dello stock di carbonio nei suoli di barena analizzati (ton C/km² nello strato superficiale di 1 m). La percentuale di materia organica ottenuta tramite LOI ha consentito di ricavare la percentuale di carbonio organico grazie alla formula di Craft et al. (1991). Questa a sua volta, moltiplicata per la dry bulk density, ha consentito di calcolare la densità di carbonio nel suolo all'interno dei diversi strati analizzati e sommarne i valori per ottenere il totale all'interno del metro di suolo considerato.

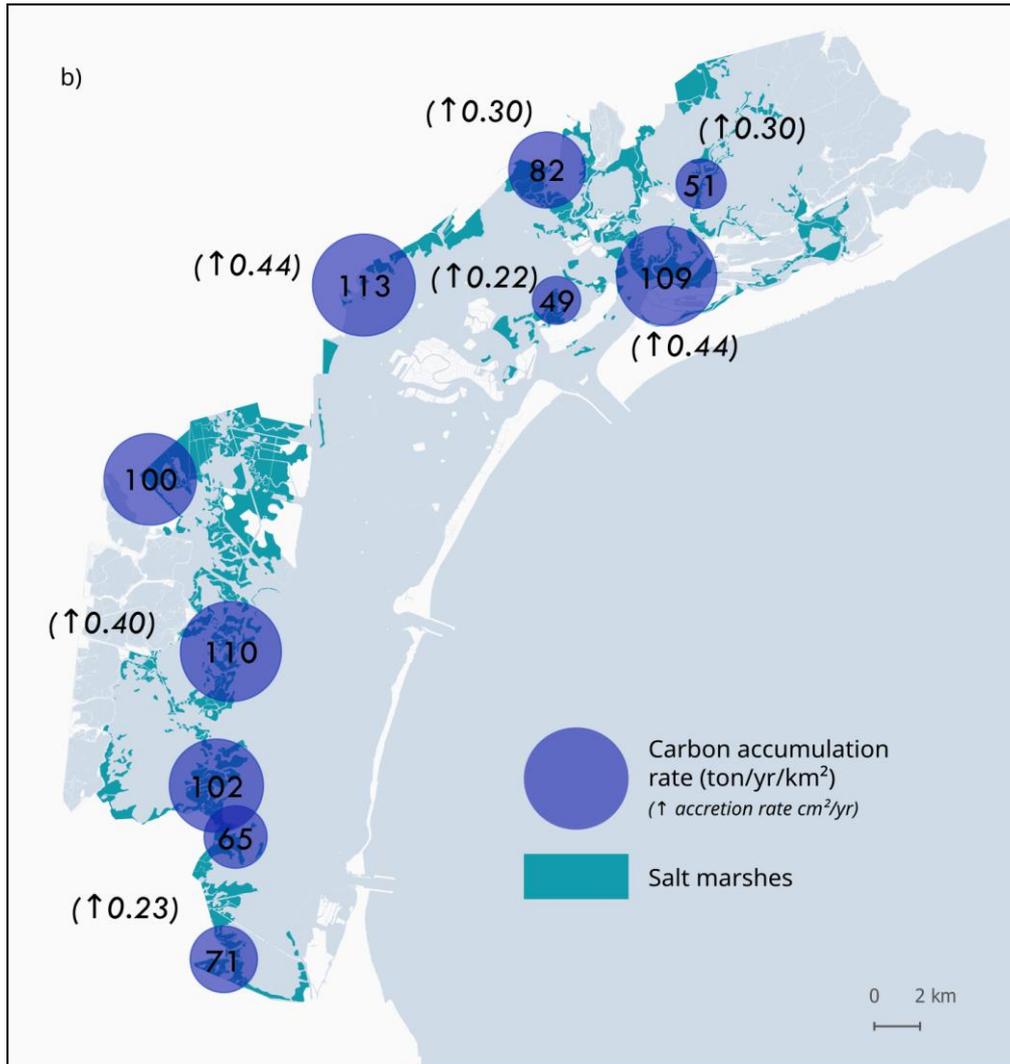


Figura 18. Stima del tasso di sequestro (accumulo) del carbonio nei suoli di barena analizzati (ton/anno/km²). Il tasso di sequestro di carbonio è dato dal prodotto tra la densità del carbonio nei 5 cm superiori di suolo e il tasso di accrescimento verticale locale derivato in base all'accumulo su marker di caolino (in un periodo di 2-20 anni).

Grazie alla loro produttività primaria associata alla sedimentazione, le barene possiedono infatti la capacità di accumulare notevoli quantità di materia organica (Chmura et al., 2003; Macreadie et al., 2019), che contribuisce all'accrescimento superficiale e consente a questi ecosistemi di sequestrare e stoccare nel suolo il carbonio atmosferico. Infatti, le stime dei tassi di accumulo di carbonio variano tra 49 e 113 ton di C per km² all'anno (Figura 18), con un valor medio che si assesta attorno a 85 + 25 ton di C per km² all'anno.

Moltiplicando il tasso medio di accumulo di C per l'estensione delle barene in Laguna (attualmente 43 km²), si stima che le barene Veneziane possano sequestrare circa 13'436 ton di CO₂ all'anno, pari a circa il 20% dell'emissione annua della navigazione nella città di Venezia (66'000 ton CO₂/anno) e circa il 17% della emissione annua del traffico nautico (77'000 ton CO₂/anno) (CIRIS - City Inventory Reporting and Information System - 2018). Ciò conferma la grande importanza degli ecosistemi di barena nel contribuire a mitigare gli effetti dei gas serra. Nello scenario regolato, per effetto della diminuzione del tasso di accrescimento verticale delle barene, si potrebbe osservare una riduzione dei tassi di accumulo di carbonio compresa tra il 25 e il 50%.

Analisi dei pattern di erosione e deposito e loro variazioni per effetto della regolazione delle maree alle bocche ad opera del sistema MOSE a scala di laguna.

I cambiamenti idrodinamici dovuti alle operazioni del MOSE possono influenzare sensibilmente il trasporto dei sedimenti nelle zone intertidali e subtidali, modificando localmente sforzo di tangenziale al fondo (τ_b) che è il principale responsabile della risospensione dei sedimenti. I ridotti livelli di marea dovuti alla chiusura delle bocche aumentano l'attrito al fondo sui bassofondali, favorendo il frangimento delle onde. Le simulazioni nel caso ipotetico di MOSE non attivo e di MOSE attivo, mostrano infatti che l'altezza significativa massima delle onde si riduce mediamente dell'8% il 3 ottobre e del 20% il 15 ottobre (Figura 19a,b).

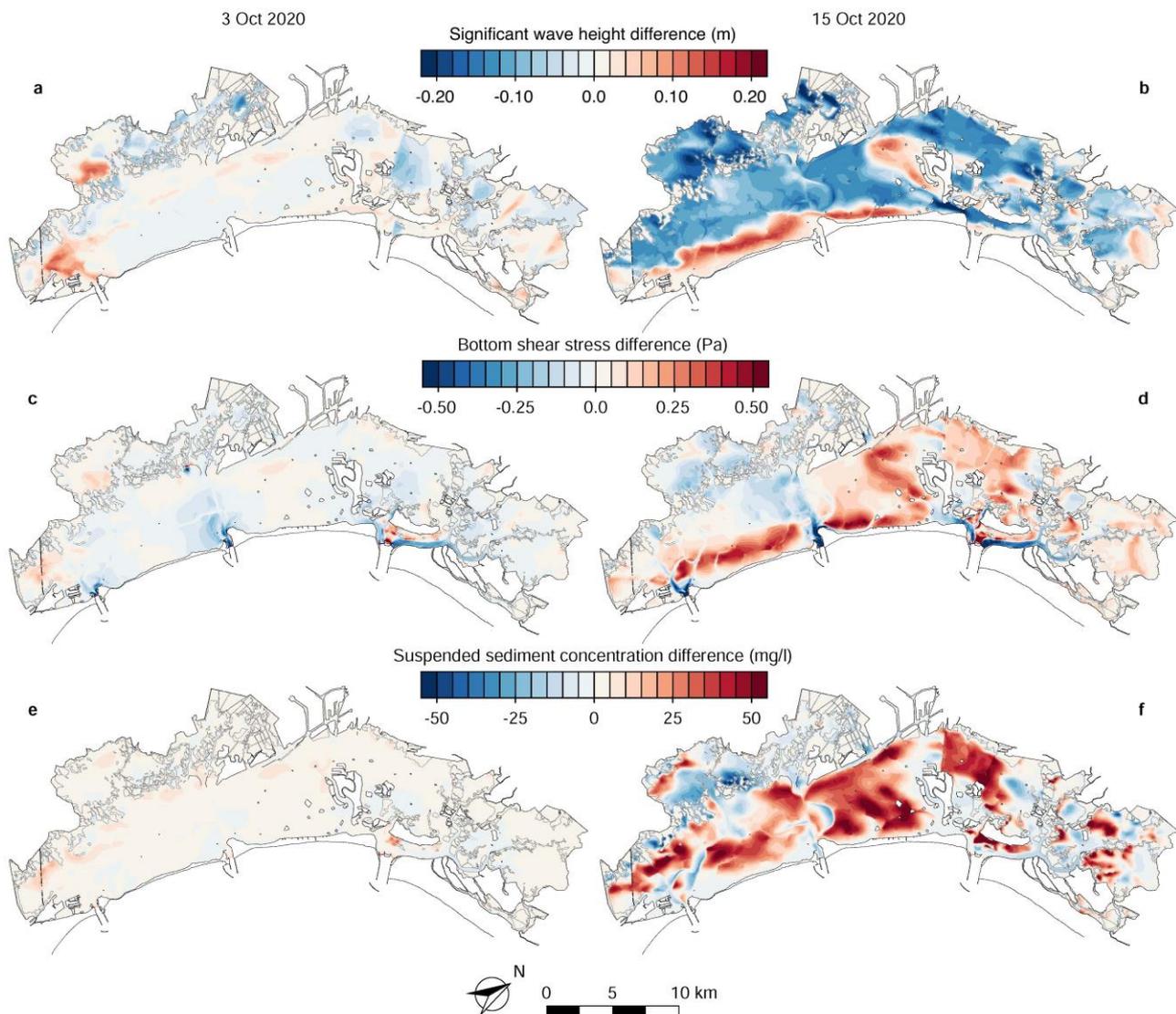


Figura 19. Effetto della chiusura delle paratoie sulla risospensione dei sedimenti nei bassofondali e nei canali lagunari. Differenza tra l'altezza d'onda significativa massima modellata negli scenari di barriere chiuse e aperte per gli eventi del 3 ottobre (a) e del 15 ottobre 2020 (b). Differenza tra il massimo sforzo di taglio del fondo modellato negli scenari di barriere chiuse e aperte per gli eventi del 3 ottobre (c) e del 15 ottobre 2020 (d). Differenza tra il massimo SSC modellato negli scenari di barriere chiuse e aperte per gli eventi del 3 ottobre (e) e del 15 ottobre 2020 (d). 3 ottobre (e) e 15 ottobre 2020 (f). Tutte queste mappe sono state ottenute sottraendo, per ciascuno dei parametri di interesse, i valori massimi osservati negli scenari di barriere chiuse e aperte sull'intero orizzonte di simulazione. Le barene sono evidenziate dalle linee grigie.

Tuttavia, sebbene l'altezza delle onde si riduca, la riduzione dei livelli di marea imposta dalla chiusura delle barriere determina valori maggiori di τ_b nelle aree di bassofondale. Pertanto, il risultato complessivo della riduzione dei livelli di marea durante la chiusura delle bocche di porto è un aumento del valore massimo di

τ_b di circa il 5% per l'evento del 3 ottobre e del 20% per l'evento del 15 ottobre (Figura 19c,d). Durante entrambi gli eventi, l'aumento di τ_b sui bassofondali porta a un aumento generalizzato della SSC, con picchi di 120 mg/l durante le chiusure ed un aumento medio dei massimi di SSC del 21% (15 ottobre, Figura 19f). La chiusura delle paratoie è quindi in grado di aumentare in modo potenzialmente significativo la quantità di sedimento risospeso dai fondali lagunari, soprattutto se combinato con i forti venti che si verificano tipicamente durante gli eventi di alta marea eccezionale. Questa circostanza potrebbe essere ulteriormente esacerbata dal fatto che le chiusure delle barriere sono più probabili nel tardo autunno e in inverno, quando la biomassa delle fanerogame e del biofilm bentonico è ridotta a causa delle dinamiche stagionali, offrendo così una protezione relativamente scarsa contro erosione dei sedimenti sul fondo della laguna.

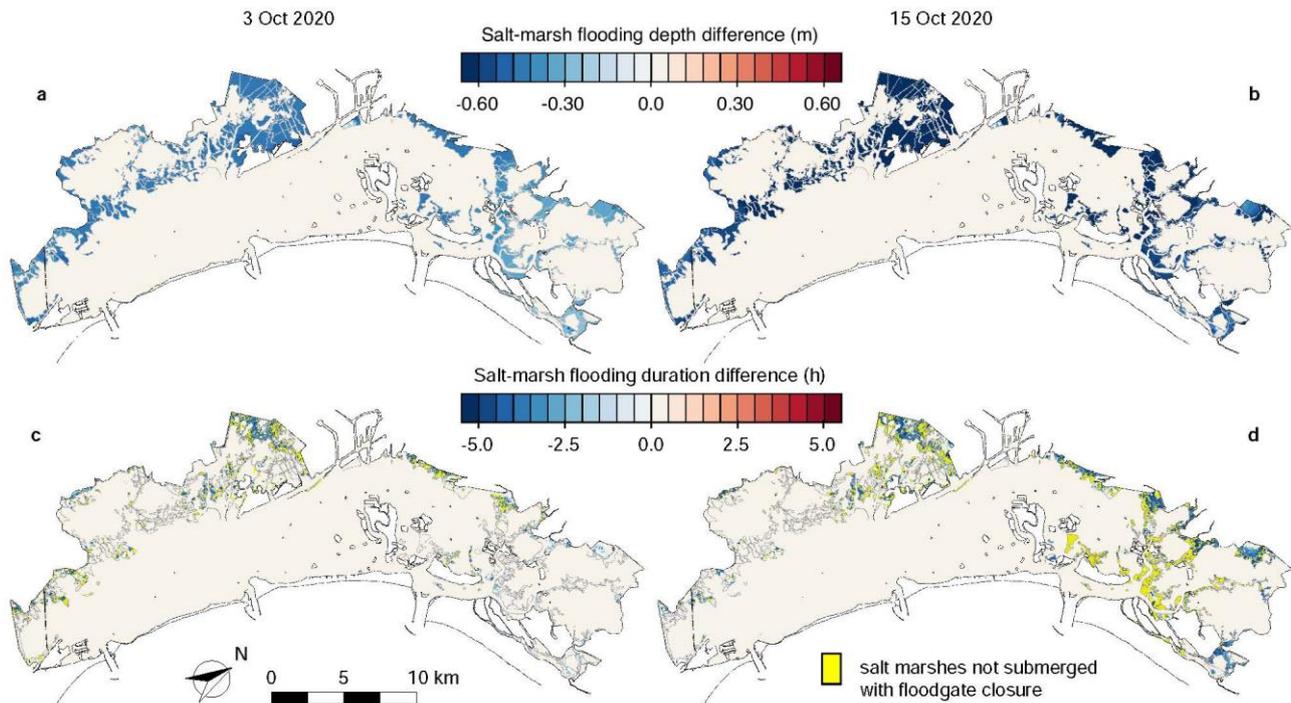


Figura 20. Effetto della chiusura delle paratoie sull'inondazione delle barene. Differenza tra la massima profondità di inondazione modellata nello scenario di barriere chiuse e aperte per gli eventi del 3 ottobre (a) e del 15 ottobre 2020 (b). Differenza tra la durata massima dell'inondazione nello scenario di barriere chiuse e aperte per gli eventi del 3 ottobre (c) e del 15 ottobre 2020 (d). (c) e 15 ottobre 2020 (d). Tutte le mappe sono state ottenute sottraendo, per ciascuno dei parametri di interesse, i valori massimi osservati negli scenari di barriere chiuse e aperte per l'intero orizzonte di simulazione. Le barene sono evidenziate dalle linee grigie.

I cambiamenti nella circolazione idrodinamica e nella dinamica dei sedimenti dovuti alla chiusura delle bocche hanno anche effetti importanti sull'evoluzione delle barene. Infatti, limitando le alte maree e le mareggiate, le chiusure del MOSE riducono significativamente sia l'intensità sia la durata delle inondazioni delle barene (Figura 20). In presenza di venti particolarmente intensi, i quali sono in grado di generare significative differenze di livello all'interno della laguna, alcune barene non vengono interessate da alcun fenomeno di allagamento, specialmente nella laguna settentrionale (Figura 20d).

La riduzione della durata e della profondità dell'inondazione delle barene causata dalla chiusura del sistema MOSE ha implicazioni importanti per l'ecomorfodinamica lagunare, poiché l'inondazione periodica è l'unico meccanismo attraverso il quale i sedimenti sospesi trasportati dalle maree possono raggiungere la superficie della barena e contribuire (insieme alla produzione di sedimenti organici da parte della vegetazione) all'accrescimento verticale delle barene e alla loro capacità di tenere il passo con l'aumento del livello del mare. Mentre le inondazioni giornaliere di marea possono contribuire solo marginalmente all'accrescimento verticale delle barene, a causa della ridotta durata dell'inondazione e della bassa SSC (Tognin et al., 2021),

durante eventi meteomarinari estremi, l'inondazione delle barene è tipicamente in fase con i picchi di SSC causati dall'intensa risospensione di sedimenti dai bassofondali ed è caratterizzata da maggiori profondità d'acqua e durate più lunghe, contribuendo così alla deposizione di maggiori volumi di sedimenti (Tognin et al., 2021). Pertanto, sebbene limitata nel tempo, la riduzione delle inondazioni legata alla chiusura delle paratoie influenza in modo critico la sostenibilità delle barene.

La riduzione della sedimentazione potrebbe portare ad un esteso annegamento delle barene che, unito all'erosione laterale, accelererà ulteriormente l'attuale scomparsa delle barene in Laguna.

Da un lato, le analisi evidenziano come l'effetto della regolazione delle maree sulla morfodinamica dipenda esclusivamente dalla riduzione dei livelli di marea all'interno della laguna, e non sia strettamente legato alla soluzione ingegneristica adottata per disconnettere temporaneamente la laguna dal mare. Dall'altro, le analisi suggeriscono come sia necessario trovare un compromesso tra la salvaguardia delle aree urbane dalle inondazioni, condizione imprescindibile, e la conservazione degli ecosistemi di barena, al fine di garantire un'adeguata resilienza dell'intero ecosistema lagunare contro i cambiamenti climatici. Tra gli interventi che potrebbero essere adottati per mitigare gli effetti morfodinamici dannosi dovuti alle ripetute chiusure delle bocche di porto, nessuno dei quali è sufficiente da solo a compensare la perdita di diversità geomorfologica, si possono ricordare: (i) l'innalzamento artificiale delle rive nei principali insediamenti urbani all'interno della laguna, finalizzato ad aumentare l'attuale livello di sicurezza delle acque e a ridurre la frequenza di chiusura delle paratoie; (ii) la reintroduzione di sedimenti fluviali per compensare la perdita di sedimenti inorganici; (iii) la costruzione e il ripristino delle barene esistenti, in particolare adottando tecniche ingegneria naturalistica; (iv) la protezione dei bassofondali e delle barene dall'erosione, preservando e migliorando le condizioni ecologiche che favoriscono la colonizzazione da parte della vegetazione bentonica, delle fanerogame e delle alofite, e attraverso la realizzazione di soluzioni eco-ingegneristiche per mitigare l'erosione dei sedimenti, quali barriere in grado di limitare il fetch del vento, di dissipare l'energia delle onde e di fungere da frangiflutti per i massimi livelli di marea. Questi interventi, insieme a un'attenta gestione del funzionamento delle paratoie e a un miglioramento degli strumenti di previsione meteorologica, consentirebbero di garantire la protezione dalle inondazioni di Venezia e degli altri insediamenti abitati lagunare, garantendo la preservazione dell'ecosistema lagunare.

Risultati del WP 3.2.3 - Modello ecogeomorfologico

L'applicazione del modello ecogeomorfologico a barene situate all'interno della laguna di Venezia ha permesso di evidenziare come, a parità di carico solido in sospensione (suspended sediment concentration, SSC), all'aumentare del tasso di incremento del medio mare (mean sea level rise rate, MSLRR) aumenti anche la percentuale di superficie di barena occupata da suolo nudo, suggerendo così un rischio crescente di perdita di superficie di barena in favore di piattaforme intertidali o subtidali non vegetate (e.g., Figura 3). Inoltre, a parità di SSC, all'aumentare del MSLRR si riduce progressivamente il tasso totale di sedimentazione (Figura 21). Tale effetto risulta particolarmente pronunciato nelle zone poste a maggiore distanza dal margine di barena, dove il tasso di sedimentazione totale arriva quasi ad annullarsi. Essendo il tasso di sedimentazione inorganico in tali zone pressoché nullo in generale, a causa delle ridotte velocità delle correnti di marea e, di conseguenza, del ridotto apporto di materiale sospeso, la riduzione del tasso di sedimentazione totale all'aumentare della distanza dal bordo è dovuta con ogni probabilità alla riduzione di habitat quality e, in ultima istanza, alla scomparsa della vegetazione nelle zone di barena più depresse e lontane dai margini. Tale ipotesi è supportata dal fatto che, per MSLRR e SSC ridotti, la deposizione totale presenti andamenti non monotonici al variare della quota (Figura 21a,b).

Le barene risultano in generale in grado di far fronte a tassi di incremento del medio mare nell'ordine di 5 mm/anno senza particolari difficoltà (Figura 21a,b,c). Solamente nel caso di SSC ridotto ($C_0=10$ mg/l, Figura 3a) l'incremento di superficie di suolo nudo sembra suggerire una particolare vulnerabilità della barena al protrarsi dell'innalzamento del medio mare. Negli altri casi, il deposito combinato di sedimentazione organica e inorganica risulta tale da garantire tassi di accrescimento verticale medi superiori al MSLRR imposto (Figura 21). In particolare, è interessante notare come alte concentrazioni di sedimento in sospensione ($C_0=40$ mg/l, Figura 21c) garantiscano la sopravvivenza della barena ma provochino una perdita di biodiversità significativa. Infatti, l'aumento di quota relativa avviene preferenzialmente nelle zone poste in prossimità dei

marginì (Figura 21c) e pertanto al termine della simulazione la maggior parte dei siti risultano occupati dalla Specie 4, che tipicamente occupa le porzioni di barena a quote più elevate, mentre la percentuale relativa di siti occupati dalle Specie 1,2, e 3 decade rapidamente. Maggior biodiversità è invece mantenuta da SSC più ridotte, garantendo comunque la sopravvivenza di buona parte delle superfici di barena.

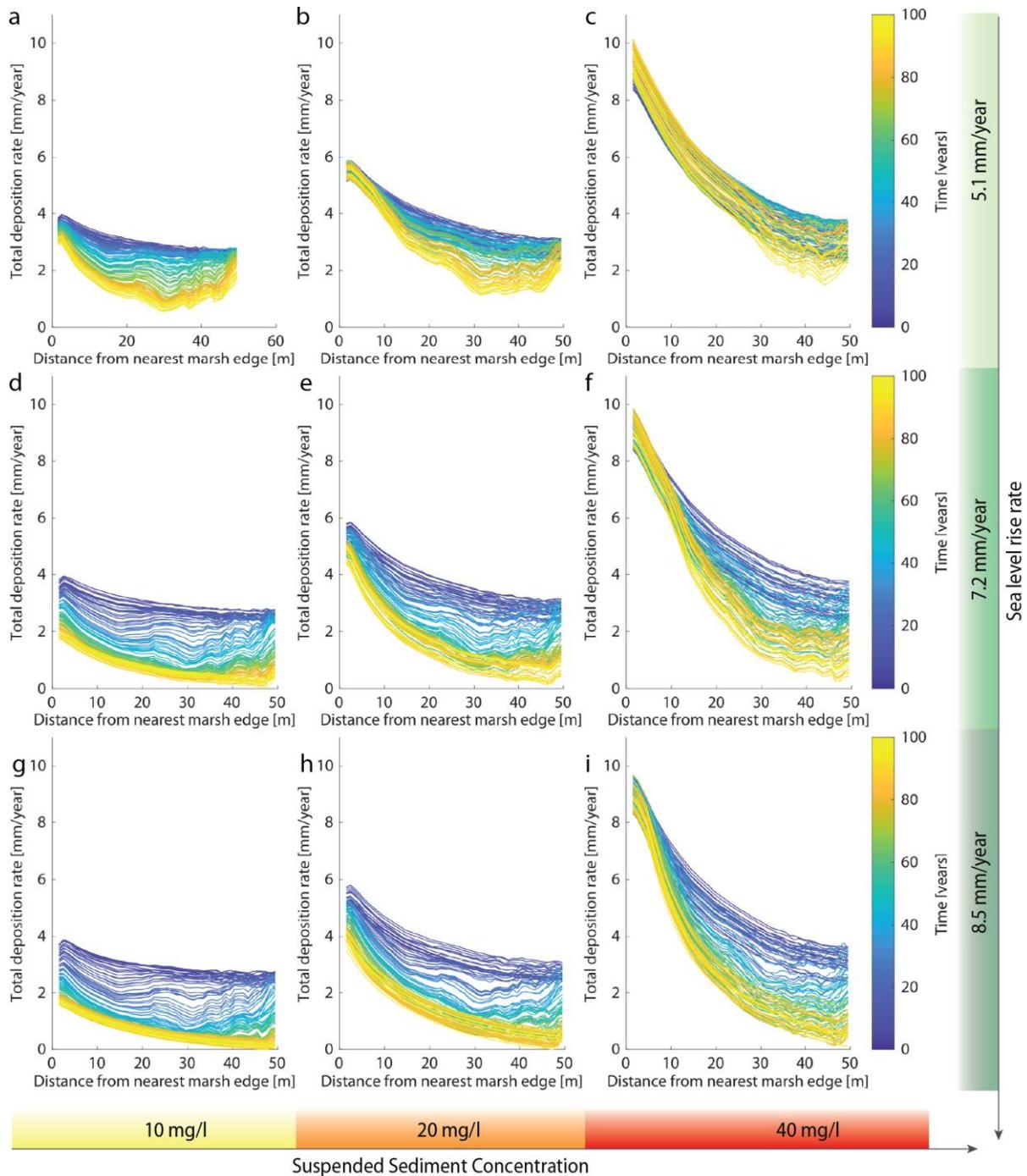


Figura 21: Risultati delle simulazioni condotte col modello ecogeomorfologico in termini di variazione nel tempo del tasso totale di sedimentazione in funzione della distanza dal margine di barena più vicino per la Barena San Felice, nei 9 scenario di cambiamento climatico analizzati. I diversi scenari sono caratterizzati da distinti tassi di innalzamento del medio mare (crescenti dall'alto verso il basso) e da diverse concentrazioni medie di sedimenti in sospensione (crescenti da sinistra a destra). I diversi colori dal blu al giallo rappresentano durate crescenti delle simulazioni numeriche.

Al contrario, tassi di incremento del livello medio mare pari a 7.2 mm/anno provocano il completo annegamento della barena nel caso di SSC ridotti ($C_0=10$ mg/l, Figura 21d) e perdita di superficie barenale significative (~80%) per SSC tipici della laguna di Venezia ($C_0=20$ mg/l, Figura 21e). Solamente per elevati SSC la barena è in grado di far fronte in modo accettabile al MSLRR imposto ($C_0=40$ mg/l, Figura 21f), pur osservandosi una perdita totale di area pari al 20%, concentrata in particolare nelle aree più distali rispetto alla rete di canali a causa del ridotto tasso di sedimentazione ivi osservato (Figura 21f). Nonostante ciò, la maggior parte dei siti si mantiene vegetata, indicando come la barena riesca a sopravvivere al MSLRR imposto, mantenendo inoltre una maggior diversificazione delle specie alofile rispetto a MSLRR inferiori.

Infine, tassi di incremento del medio mare pari a 8.5 mm/anno causano il totale annegamento della barena sia nel caso di SSC ridotti ($C_0=10$ mg/l, Figura 21g) che per SSC tipici della laguna di Venezia nella condizione attuale ($C_0=20$ mg/l, Figura 21h). La superficie di barena risulta in questo caso completamente priva di vegetazione al termine della simulazione e i tassi di sedimentazione non sono sufficienti a fronteggiare l'innalzamento del medio mare in nessuna zona del caso studio analizzato (Figura 21g,h). Solamente SSC nell'ordine di 40 mg/l riescono a garantire la sopravvivenza di una porzione di barena, la cui estensione risulta pari al 60% dell'estensione di barena iniziale (Figura 21i). A differenza di quanto osservato per MSLRR nell'ordine di 5.1 mm/anno, in questo caso la Specie 1 risulta essere dominante, garantendo così un limitato ma ad ogni modo fondamentale apporto organico alla sedimentazione totale che aumenta la resilienza della barena rispetto all'innalzamento del medio mare imposto. Anche in questo caso, tuttavia, si osserva una più marcata riduzione del tasso di deposizione totale nelle zone poste a maggiore distanza dai margini di barena (Figura 21i), ad indicare una ridotta performance della vegetazione o, nel caso limite, la sua definitiva scomparsa.

Questi risultati suggeriscono tre conclusioni fondamentali:

1) i processi biotici sono di fondamentale importanza per garantire la sopravvivenza delle barene soggette ad innalzamenti del livello medio del mare. Tuttavia, la componente organica non può riuscire, da sola, a far fronte a tassi di incremento del medio mare previsti, nemmeno nell'ipotesi relativamente ottimistica di un tasso di incremento del medio mare pari a 5.1 mm/anno nei prossimi 100 anni;

2) è necessario quindi garantire la presenza di un'adeguata concentrazione di sedimenti trasportati in sospensione dalle correnti di marea - e se possibile aumentarla (ad esempio reintroducendo acque dolci fluviali in corrispondenza ai maggiori eventi di piena) - al fine di assicurare una maggiore resilienza delle barene rispetto al previsto innalzamento del medio mare. Con particolare riferimento alla laguna di Venezia, tale osservazione risulta ancora più importante in virtù dei previsti effetti di riduzione dei tassi di sedimentazione annuali dovuti all'entrata in funzione delle barriere mobili alle bocche le quali hanno, come dimostrato, la capacità di ridurre significativamente l'apporto di materiale solido minerale a causa della riduzione di idroperiodo imposta quando le concentrazioni di sedimento sospeso sono più pronunciate, ovvero durante le acque alte e le mareggiate;

3) la scomparsa delle barene per progressivo annegamento dovuto all'innalzamento del livello medio del mare avviene preferenzialmente nei siti a maggiore distanza dai canali, caratterizzati da quote topografiche ridotte a causa del ridotto apporto di sedimento inorganico da parte delle correnti di marea. Questa osservazione è importante per tutte le iniziative di salvaguarda e ripristino delle barene mediante apporto di artificiale di materiale solido, e suggerisce che tale materiale debba essere preferenzialmente apportato nelle zone più distali rispetto alla rete di canali che tipicamente innerva le aree umide a marea.

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

L'obiettivo principale della Linea 3.2 è stato quello di analizzare l'evoluzione dei pattern bio-geomorfologici che caratterizzano le tipiche morfologie lagunari (barene, bassofondali e reti di canali) sulla base di un approccio innovativo ed interdisciplinare, capace di integrare osservazioni in campo, ottenute tramite analisi di dati telerilevati e raccolti in situ, con i risultati della modellazione matematica. Per quanto descritto nelle

pagine precedenti, che devono essere intese come un breve riassunto di alcuni dei risultati principali e non di tutti i risultati della Linea, vista la vastità delle analisi condotte non riassumibili in un report di questo tipo, l'obiettivo della Linea è stato pienamente raggiunto. Con riferimento agli obiettivi della Tematica 3, infatti, le analisi condotte hanno permesso di valutare le dinamiche legate ai cambiamenti morfologici ed ecologici legati ai processi erosivi e deposizionali, alle variazioni dei flussi d'acqua attraverso le bocche e all'interno della laguna per effetto della regolazione del sistema MOSE e di sviluppare modelli predittivi di queste dinamiche.

In particolare, per quanto riguarda le attività del WP 3.2.1 *Analisi di dettaglio dei processi erosivi in zone critiche tramite remote sensing*, l'obiettivo della ricerca era quello di eseguire rilievi morfobatimetrici in aree particolarmente dinamiche della laguna di Venezia (Barena e Canale San Felice- Casse di colmata e Canale Malamocco Marghera) per valutare la loro evoluzione nel tempo. Tali analisi hanno quindi permesso di descrivere in modo accurato lo stato dell'ambiente lagunare antecedente all'operatività del MOSE, elemento fondamentale per valutare accuratamente le variazioni future eventualmente indotte dalla regolazione. Nell'arco del progetto, infatti, sono stati eseguiti monitoraggi ad alta risoluzione di tali aree negli anni 2019, 2020 e 2021 che hanno consentito di ottenere una stima dei processi erosivi e deposizionali in atto in prossimità di barene naturali e artificiali e nei canali a marea su scala temporale annuale e pluriennale. Le analisi sui dati acquisiti si sono basate su un confronto dei dati acquisiti nei diversi anni del progetto evidenziando i cambiamenti legati a processi naturali e antropici, grazie anche al confronto con i dati da precedenti monitoraggi, e al calcolo dei residui batimetrici. È stato inoltre raggiunto l'obiettivo di integrare i dati da *remote sensing* subaereo (UAV) e subacqueo (MBES) su più anni (2020 e 2021) producendo per la prima volta nella laguna di Venezia una cartografia comparativa integrata del sistema barena-canale che ha permesso di illustrare le variazioni delle morfologie emerse e sommerse conseguendo tutti gli obiettivi che ci si era prefissi di raggiungere in termini di descrizione dello stato del sistema prima e a cavallo della regolazione delle bocche ad opera del sistema MOSE.

Per quanto riguarda le attività del WP 3.2.2 *Analisi in situ per la stima delle caratteristiche del suolo della vegetazione e dei processi erosivi-deposizionali*, gli obiettivi principali della ricerca erano 1) di raccogliere dei campioni di suolo superficiali e carotaggi per analizzare le caratteristiche dei suoli e delle facies, assieme a dati relativi alla distribuzione delle diverse specie alofile in funzione della quota e a dati relativi al trasporto solido; 2) determinare le caratteristiche dei sedimenti (distribuzione granulometrica, densità ad umido e a secco, porosità, contenuto di materia organica) tramite analisi di laboratorio e ricostruzione l'architettura deposizionale lungo specifici transekti sulla base di analisi di facies; 3) condurre analisi in situ per determinare i processi erosivi e deposizionali sulle superfici di barena e nei canali. Tali obiettivi risultano obiettivi specifici del più ampio obiettivo di fornire conoscenze integrate ed aggiornate utili per la gestione sostenibile dell'ecosistema lagunare Veneziano in seguito all'entrata in funzione del MOSE. Tutti questi obiettivi sono stati pienamente raggiunti. Inoltre, è stato possibile caratterizzare, sulla base di misure in campo e modellazione matematica, gli effetti delle chiusure del sistema MOSE sull'evoluzione degli ecosistemi di barena (rispondendo alla "sfida 1" del progetto Venezia2021 di comprendere le tendenze in atto e gli effetti delle strategie di gestione del MOSE) e dei servizi ecosistemici da essi forniti, come ad esempio il sequestro di carbonio organico (rispondendo alla "sfida 5" di migliorare le conoscenze sui servizi ecosistemici che la laguna offre all'uomo e sul come mantenerli). L'insieme di dati raccolti sulla base di osservazioni in situ hanno permesso di caratterizzare in modo efficace i processi di trasporto erosione e deposizione dei sedimenti sulle superfici di barena e nei canali a marea da una parte e le caratteristiche dei suoli di barena e di bassofondale dall'altra (affrontando la "sfida 4" di fotografare lo stato di salute dell'ecosistema lagunare proponendo strategie per migliorarlo).

Per quanto riguarda le attività del WP 3.2.3 *Modello ecogeomorfologico*, l'obiettivo principali della ricerca era lo sviluppo di un modello ecogeomorfologico spazialmente esplicito a metacomunità (i.e., basato su meccanismi espliciti di competizione e dispersione tra le diverse specie alofite) per simulare l'evoluzione accoppiata delle barene e della loro vegetazione al variare delle forzanti esterne. Tale obiettivo sposa l'obiettivo generale del progetto di affinare gli strumenti modellistici in grado di fornire previsioni a breve, medio e lungo termine. Inoltre, il WP si poneva l'obiettivo di calibrare e testare il modello sulla base delle

osservazioni in campo relative ai processi biogeomorfologici ed in particolare quelle relative ai rilievi topografici e morfologici delle barene, ai pattern di accrescimento ed erosione, e alla zonazione della vegetazione alofila. Nel complesso, l'analisi di sensibilità ha dimostrato come il modello sia robusto e in grado di riprodurre fedelmente i pattern di zonazione della vegetazione osservati sulla base di misure dirette di campo al variare dei gradienti topografici della barena. Poiché il modello presuppone nicchie teoriche descritte da funzioni di qualità dell'habitat che aumentano monotonicamente con l'elevazione della barena, i risultati delle simulazioni numeriche hanno fornito una prova concettuale che il limite superiore delle distribuzioni di vegetazione realizzate nelle barene è fissato da meccanismi spazialmente espliciti di competizione interspecifica e dispersione. Tale osservazione ha permesso di dimostrare come le distribuzioni di vegetazione di barena realizzate che esibiscono una maggiore produttività all'interno di un ristretto intervallo di elevazione non rispecchino necessariamente le nicchie fondamentali delle singole alofite di barena.

Tutti gli obiettivi prefissati e raggiunti dall'attività di ricerca della Linea, sposano gli obiettivi della Tematica 3, assieme agli obiettivi prioritari dell'intero Programma di ricerca. Il Programma intendeva sviluppare metodi e applicazioni per un monitoraggio in grado di valutare i cambiamenti simultaneamente in atto in termini di morfologia e comunità biotiche conseguenti l'esercizio del sistema MOSE, obiettivo efficacemente raggiunto dalle Linea 3.2. Anche gli obiettivi della Tematica 3, che si proponeva di sviluppare attività e ricerche volte a valutare i cambiamenti legati ai fenomeni di subsidenza ai processi erosivi e deposizionali alle variazioni dei flussi d'acqua e le conseguenze a livello di habitat e di comunità acquatiche, si sposano con gli obiettivi perseguiti e ottenuti dalle Linea 3.2.

L'approccio proposto e brevemente descritto in questo Report, assieme ad alcuni dei risultati ottenuti, permetterà di stimare in modo quantitativo i processi erosivi e deposizionali che caratterizzano le morfologie lagunari, grazie al monitoraggio dello stato "attuale" della laguna fondamentale nell'ottica di un'analisi della sua evoluzione, per la quale i modelli biomorfodinamici sviluppati, saranno in grado fornire previsioni in risposta alle variazioni delle forzanti naturali ed antropiche.

Una gestione sostenibile del sistema lagunare veneziano e delle attività ad esso legate richiede di osservare descrivere e predire attraverso un approccio integrato i processi erosivi e deposizionali che determinano l'evoluzione delle morfologie lagunari e degli ecosistemi ad esse legati.

I risultati dell'attività di ricerca risultano fondamentali nell'ottica di una gestione sostenibile della Laguna e delle attività ad essa legate, alla luce del degrado morfologico che l'ha caratterizzata nell'ultimo secolo e che potrebbe essere fortemente influenzato dalle attività legate all'utilizzo e alla gestione del sistema MOSE