



Venezia2021

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

Linea 3.1

*Subsidenza della laguna di Venezia e
evoluzione morfologica connessa a processi
erosivi e deposizionali combinati a Relative
Sea Level Rise*

Rapporto Finale

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

Luigi Tosi (CNR-IGG)

30/09/2022

A handwritten signature in black ink that reads "Luigi Tosi".

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

Negli ambienti tidali, in particolare nelle barene, le morfologie vegetate per lo più emerse dalle maree, la quantificazione della subsidenza del terreno è sempre stata una sfida. Le misure da remoto, per esempio l'interferometria SAR, hanno consentito di superare le difficoltà di accesso tipiche dei rilievi in situ e mappare i movimenti del suolo con precisione millimetrica e risoluzione spaziale metrica. Nelle barene della laguna di Venezia emerge un'immagine di grande eterogeneità correlata alla variabilità geologica e geomeccanica del sottosuolo. Un altro fattore che influenza la variabilità delle velocità è il livello di riferimento del punto misurato. Ad esempio, strutture come pali, bricole e palancole poggiano su unità di sottosuolo alla profondità di 3-4 metri, per cui viene escluso il contributo dei depositi soprastanti; i riflettori relativi a burghie e arginature invece sono ragionevolmente rappresentativi del movimento della superficie del suolo in quanto queste strutture poggiano sul terreno. Questo fattore, debitamente considerato, fornisce informazioni ulteriori sulla compattazione differenziale rispetto la profondità. Le barene naturali sono caratterizzate da un range piuttosto ampio di velocità medie, che variano da una sostanziale stabilità, meno di 1 mm/anno, fino a 3-4 mm/anno di abbassamento nella zone con sottosuolo superficiale ricco di sostanza organica. Le barene artificiali presentano cedimenti generalmente maggiori che possono superare 6 mm/anno, specialmente nel periodo più prossimo alla fase di fine costruzione. Una particolarità sono invece i movimenti positivi dei riflettori in quanto difficilmente spiegabili assumendo la presenza di processi di geodinamica a scala locale. Si ipotizza che questi riflettori siano relativi alla superficie della barena e che misurino degli accrescimenti dovuti a processi deposizionali.

L'esecuzione di un'originale prova di carico sulla superficie di tre barene rappresentative di diversi ambienti deposizionali tipici della laguna veneta (barena Lazzaretto Nuovo in laguna centrale di fronte alla bocca di Lido, barena La Grisa in laguna sud, e barena Campalto sul margine lagunare in laguna centrale) ha evidenziato come queste forme morfologiche siano caratterizzate da proprietà geomeccaniche molto variabili. Tale eterogeneità, evidenziata per la prima volta in questa ricerca, si riflette in una significativa variabilità della subsidenza olocenica, ovvero della subsidenza naturale prodotta dall'auto-compattazione dei depositi recenti che formano le barene. Nel dettaglio quantitativo si è osservato come i depositi superficiali, primi 50 cm, a La Grisa siano due volte più compressibili di quelli di Campalto e cinque volte più compressibili di quelli a Lazzaretto Nuovo. Inoltre, i depositi a Campalto risultano significativamente più sovra-consolidati di quelli delle altre due barene prese in considerazione; più del doppio rispetto a La Grisa e una volta e mezzo rispetto a Lazzaretto Nuovo. Infine, il monitoraggio della risposta delle barene durante le fasi di scarico ha evidenziato come gli strati più superficiali di queste forme lagunari siano caratterizzati da un comportamento fino a cinque volte più elastico dei terreni "normali". L'ipotesi in fase di analisi è che questa elasticità sia favorita dalla presenza dell'apparato radicale della vegetazione alofila che ricopre le barene: le radici rappresenterebbero una sorta di "armatura" naturale in grado di irrigidire il terreno della barena. Tali evidenze risultano di notevole importanza non solo in merito alla quantificazione dell'eterogeneità spaziale della subsidenza naturale del bacino lagunare ma anche in merito alla resilienza di tali forme all'atteso sea-level rise: i tassi di sedimentazione necessari ad una barena per mantenere la sua velocità di accrescimento al passo con la velocità di innalzamento del medio mare sarebbero molto diversi nelle varie barene analizzate nella ricerca.

L'analisi di vulnerabilità delle morfologie lagunari al relative sea-level rise (RSLR) ha consentito di classificare le aree lagunari secondo una scala a vulnerabilità crescente. Tale classificazione consente di leggere secondo una "scala di importanza" l'effetto complessivo che gli indicatori fisico-ambientali selezionati nell'analisi producono in termini di vulnerabilità. Nello scenario passato, anno di riferimento 1990, emerge che oltre il 50% dell'area investigata era in condizioni trascurabili, poco più del 35% marginali e circa 15% moderate. Nello scenario presente al 2020 le aree a vulnerabilità trascurabile si riducono a circa 25% dell'area, mentre aumentano a circa 45% e 25% quelle a vulnerabilità marginale e moderata, e appare la condizione forte per circa il 3%. Nello scenario futuro simulato al 2050, la classe trascurabile scompare, compare quella estrema, che copre circa il 5% dell'area studio, e la totalità della laguna si suddivide fra 20% di area a vulnerabilità

marginale, a 50% moderata e 25% forte. Da notare in tutti gli scenari la grande eterogeneità spaziale della vulnerabilità conseguenza dell'eterogeneità di tutti gli indicatori selezionati, dalla subsidenza all'elevazione del suolo fino agli spessori delle diverse unità deposizionali.

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

2.1 Mappa di vulnerabilità della laguna di Venezia

La mappa deriva dall'analisi di vulnerabilità degli ambienti e delle varie morfologie lagunari all'incremento relativo del medio mare basata su un nuovo modello concettuale e seguendo un approccio indice-basato che consiste nel selezionare e combinare fra loro indicatori di sensibilità fisico-ambientali e idro-geo-morfologici (sensitivity) a indicatori di pericolo (hazard). Dalla mappa di vulnerabilità (Fig. 1) emergono le aree più vulnerabili che si trovano nei settori nord-orientale e sud-occidentale della laguna.

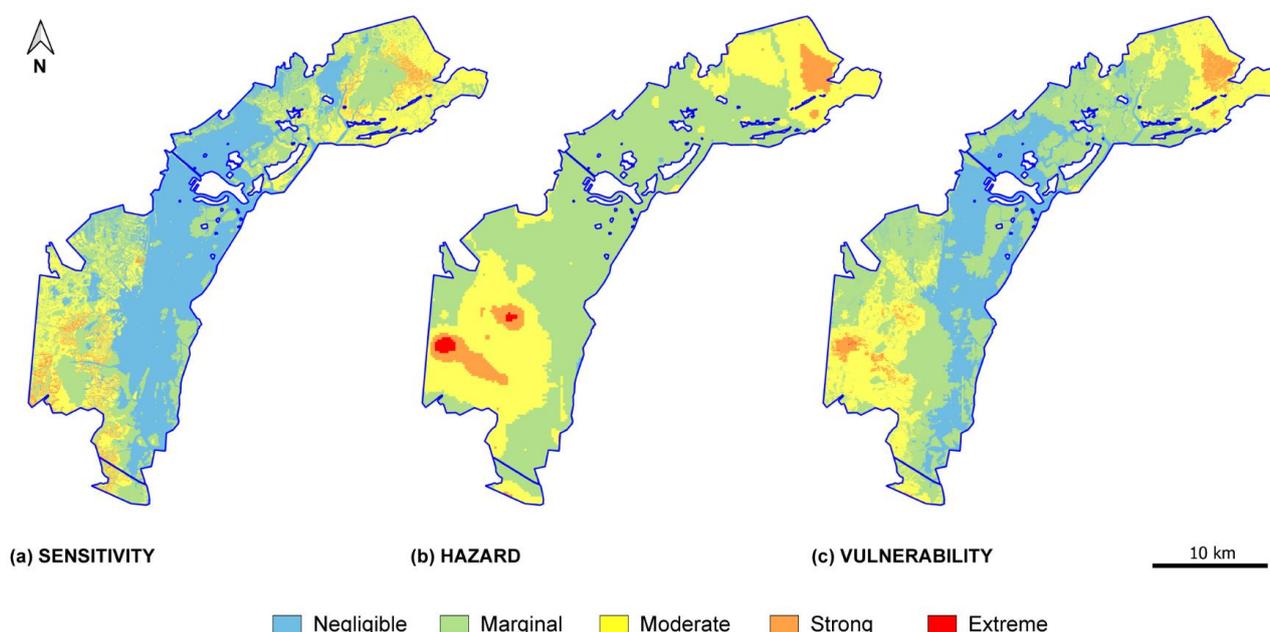


Fig. 1. Mappe di sensibilità e di pericolo utilizzate per l'analisi di vulnerabilità delle morfologie lagunari.

2.2 Mappa del limite Olocene-Pleistocene in Laguna

La mappa dell'assetto del limite Olocene-Pleistocene (Fig. 2) corrisponde alla profondità del livello di argilla sovra-consolidata nota come caranto, ove presente; il limite Pleistocene-Olocene è infatti costituito da tratti sub-orizzontali spesso costituiti da un livello pedogenizzato e da tratti corrispondenti alla base dei canali tidali che hanno inciso l'orizzonte stesso. Per questo motivo, la mappa del limite Olocene-Pleistocene, che rappresenta la base dei depositi olocenici, non necessariamente identifica la presenza del caranto. Il caranto è un particolarmente importante per le sue caratteristiche geotecniche; esso infatti presenta un elevato grado di consolidazione naturale che può contribuire alla portanza delle fondazioni di manufatti, opere marittime e altre strutture minori, e può fungere da confinamento idraulico nel sistema acquifero superficiale.

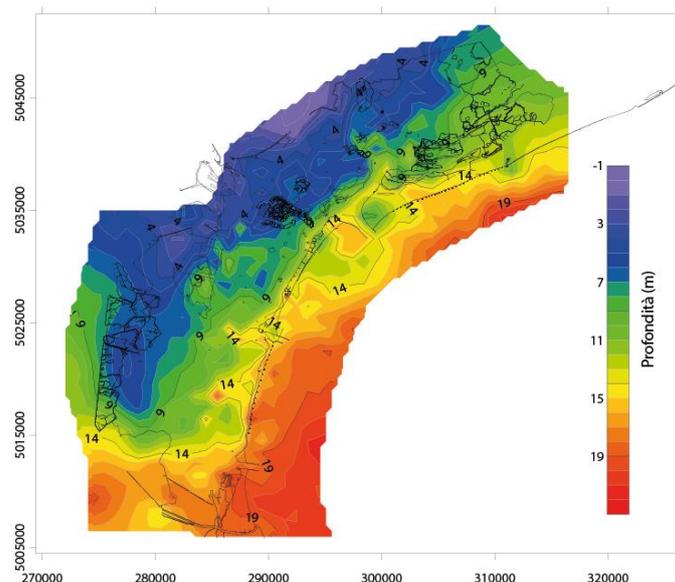


Fig. 2. Mappa dell'assetto del limite Olocene-Pleistocene. Valori positivi identificano profondità al di sotto del livello medio mare.

2.3 Modello dell'evoluzione altimetrica delle barene

Infine, è a disposizione della comunità scientifica e tecnica degli enti di gestione e salvaguardia ambientale uno strumento modellistico nuovo (NATSUB3D) che, date le caratteristiche dei depositi che formano il sottosuolo lagunare e le barene in una zona di interesse, permette di prevedere la loro evoluzione altimetrica connessa a subsidenza profonda, auto-compattazione, sedimentazione e sea-level rise. NATSUB3D permette di quantificare il tasso di subsidenza previsto in modo sufficientemente accurato utilizzando in modo integrato i risultati delle prove di carico e delle analisi stratigrafiche condotte su alcune barene rappresentative della laguna di Venezia (Fig. 3) e la loro interpretazione mediante apposite simulazioni numeriche. Il risvolto pratico è di grande importanza in quanto si è ora in grado di rispondere al quesito legato alla resilienza a breve e lungo termine di tali strutture morfologiche sottoposte all'azione combinata di subsidenza profonda, compattazione e innalzamento del livello del medio mare.

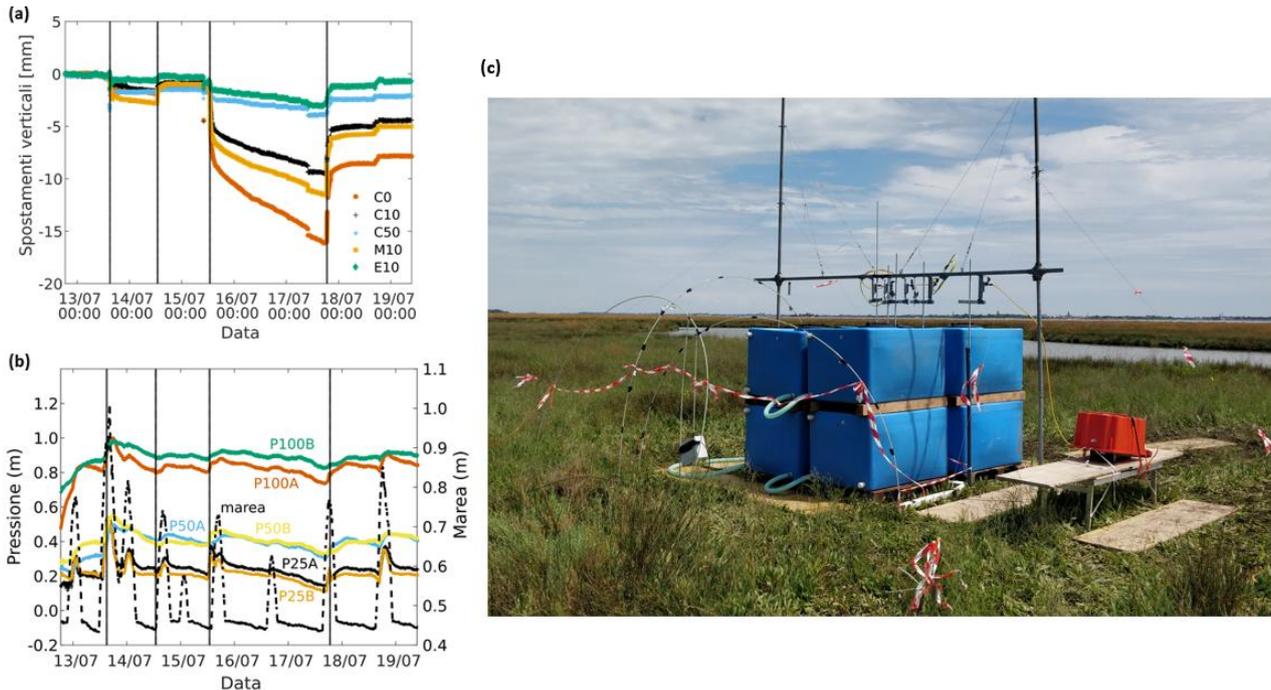


Fig. 3. Prova di carico sulla barena Campalto: risultati delle misure in termini di (a) spostamenti e (b) sovrappressione. Una foto della prova è riportata in (c).

3. Spunti per il futuro

Il modello geologico della laguna di Venezia richiede certamente un ulteriore affinamento per migliorare sia l'aspetto sedimentologico-stratigrafico sia per quello geo-meccanico e di sintesi necessario per le simulazioni numeriche e dei processi. Malgrado gli sforzi dedicati da Venezia2021 e altri precedenti ricerche, per la vastità dell'area lagunare e la forte variabilità delle unità deposizionali rimane ancora una sfida la modellazione 3D.

I risultati della caratterizzazione geomeccanica delle barene e delle analisi modellistiche condotte a partire dai dati sperimentali raccolti in campo lasciano aperte due domande di notevole interesse scientifico, con notevoli implicazioni nel contesto della resilienza di tali forme morfologiche al sea-level rise: i) la quantificazione dello spessore di nuovo sedimento necessario perché una (specifica) barena riesca a mantenere la propria elevazione rispetto al medio mare; ii) il ruolo esercitato dall'apparato radicale delle diverse specie che compongono la vegetazione alofila sull'auto-compattazione dei depositi che formano le barene.

Analogamente alle morfologie naturali, particolare attenzione si dovrà dedicare alle barene artificiali. Una questione ancora aperta è comprendere quanto la modalità di refluento, la tipologia di sedimento, e il substrato naturale pesino nel mantenimento delle strutture artificiali.

Infine, molte incertezze permangono nell'analisi di vulnerabilità per le inevitabili assunzioni relative ai processi deposizionali e alla qualità dei dataset tematici. Ad esempio, le altimetrie delle barene e dei bassi fondali allo stato attuale presentano scarsa precisione e nuove tecniche di rilievo dovranno essere sviluppate.

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività

Le attività della Linea 3.1 sono strutturate in WP1 (CNR-IGG) “Analisi della subsidenza e della vulnerabilità al Relative Sea Level Rise”, WP2 (OGS) “Architettura dei depositi tardo-pleistocenici ed olocenici”, e WP3 (UNIPD-ICEA) “Comportamento geo-meccanico dei depositi lagunari, modellazione e sviluppo di scenari previsionali della subsidenza naturale olocenica”. Le attività svolte nell’ambito dei tre WP sono strettamente interconnesse, complementari e molto spesso hanno visto la compartecipazione del personale dei tre gruppi. Le attività vengono così raggruppate: modellizzazione geologica e geo-meccanica, mappatura dei movimenti del suolo attuali, quantificazione delle vulnerabilità e simulazioni numeriche delle subsidenza olocenica.

Attività propedeutica alla modellizzazione geologica

Per la modellizzazione geologica si è adottato un approccio multidisciplinare che ha integrato analisi geofisiche, acquisizioni sismiche ad alta risoluzione, con analisi sedimentologiche-stratigrafiche, fatte su carote sedimentarie. La prospezione sismica marina VHRS (Very High Resolution Seismic) è avvenuta con BOOMER in bassissimi fondali e i dati acquisiti sono stati poi elaborati per ripulire il segnale dal rumore. L’interpretazione dei dati VHRS ha permesso di tracciare i principali riflettori, che suddividono le diverse unità sismo-stratigrafiche (Fig. 4). Le carote sono state descritte e correlate tra loro seguendo i principi base dell’analisi di facies, analizzando le diverse strutture sedimentarie, trend granulometrici, colorazioni, presenza di bioturbazioni, resti vegetali, radici e bioclasti, producendo sezioni stratigrafiche (Fig. 4). Queste analisi insieme ai dati sismici interpretati hanno permesso la creazione del modello geologico dell’evoluzione olocenica della laguna di Venezia, con la definizione delle principali unità deposizionali oloceniche. Il modello geologico è stato utilizzato come input dell’analisi di vulnerabilità e della simulazione numerica della subsidenza olocenica.

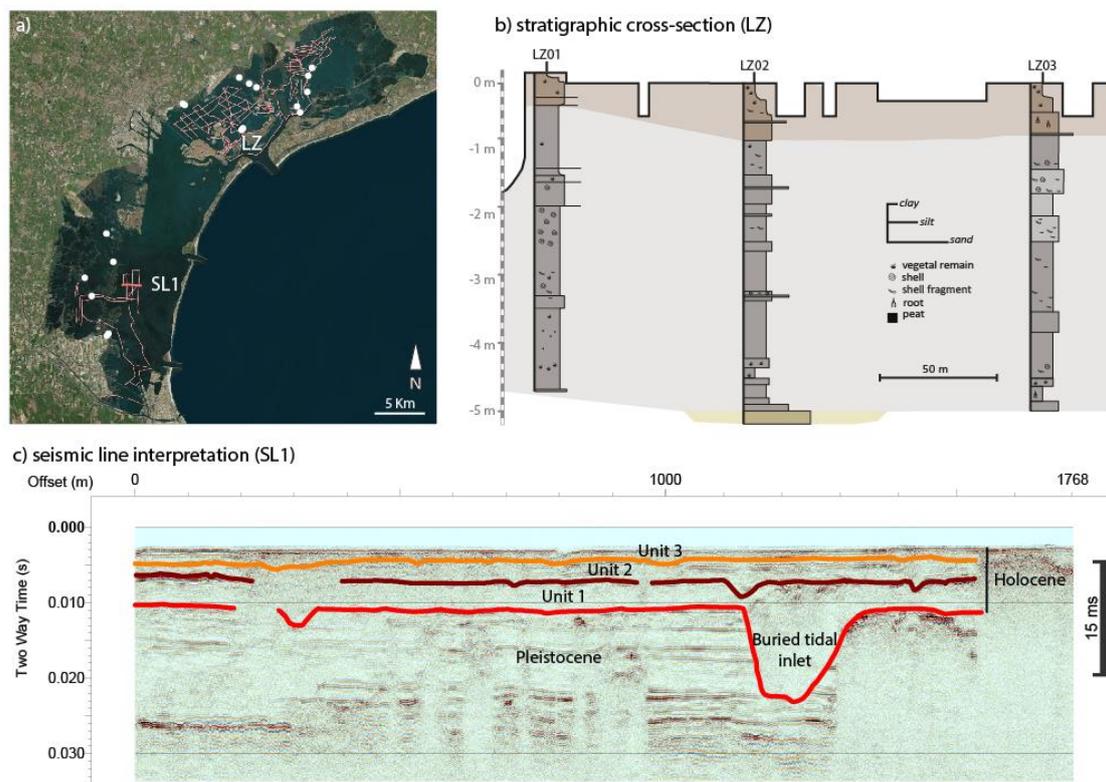


Fig. 4 a) Dati raccolti per la modellazione geologica: linee sismiche ad alta risoluzione (linee rosa) e carote sedimentarie (pallini bianchi); b) esempio di correlazione stratigrafica delle carote raccolte a Lazzaretto Nuovo (LZ); c) esempio di interpretazione sismica di una linea acquisita in laguna sud (SL1).

Attività propedeutica alla modellizzazione geo-meccanica

L'innalzamento o la perdita di quota rispetto al livello del medio mare (lmm) delle forme morfologiche lagunari, in particolare le barene, è controllato principalmente dalla sedimentazione di materiale organico/inorganico, la compattazione per peso proprio dei terreni depositati (auto-compattazione), i processi erosivi innescati da onde e correnti, nonché da fattori esterni quali l'innalzamento del lmm e la subsidenza profonda. Il destino di queste morfologie nei prossimi decenni sarà strettamente collegato alla loro capacità di mantenere la propria altezza rispetto all'innalzamento del livello medio del mare. Il RSLR causato dalla combinazione di subsidenza, erosione, diminuzione della sedimentazione e/o innalzamento del livello del mare può causare la perdita di ampie porzioni di questi ambienti o la transizione di forme quali le barene in forme morfologiche di minor valore, come ad esempio i bassi fondali. A seconda delle proprietà idro-geomeccaniche dei depositi più recenti, l'auto-compattazione può rappresentare il contributo principale della subsidenza con un feedback non lineare tra sedimentazione, compattazione e accrescimento. La caratterizzazione delle proprietà geomeccaniche dei terreni più superficiali lagunari è stata condotta attraverso la progettazione ed esecuzione di innovative prove di carico in-situ per quantificare la compressibilità dei terreni superficiali e valutarne l'andamento con la tensione efficace. Le prove sono state condotte su barene caratterizzate da litologie diverse, ovvero con diverso contenuto di materiale organico, nei siti di Lazzaretto Nuovo, La Grisa e Campalto rispettivamente nell'estate/autunno del 2019, 2020 e 2021 (Fig. 5 a-d).

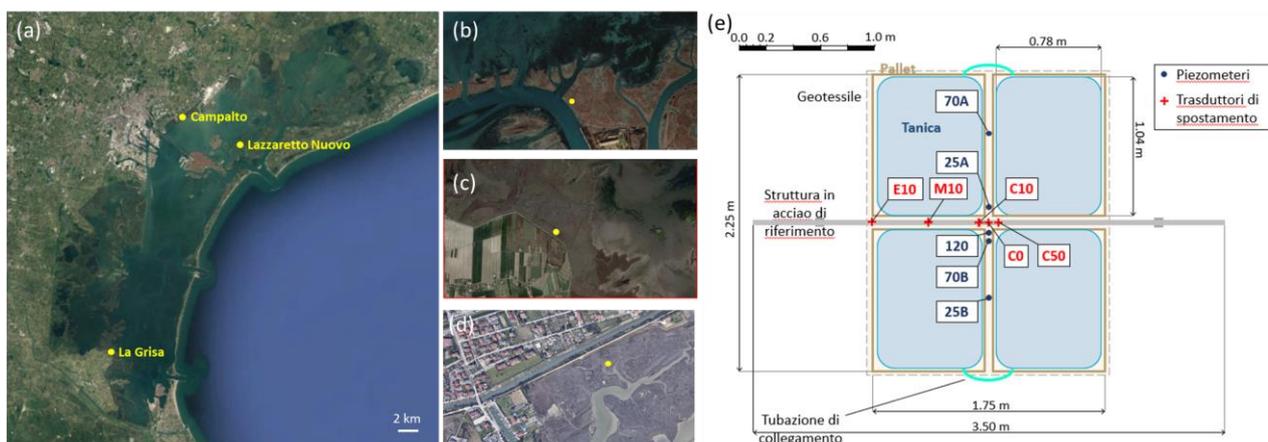


Fig. 5 a) Posizione delle prove di carico sperimentali condotte in laguna di Venezia. b)-d) Immagini da satellite con posizione della prova di carico nei siti di Lazzaretto Nuovo, La Grisa e Campalto. e) Schema del posizionamento dei sensori di misurazione di spostamento e pressione rispetto alle taniche e alla struttura di riferimento.

La soluzione adottata per realizzare il carico è costituita da otto serbatoi di polietilene riempiti con acqua salmastra. Le dimensioni del serbatoi sono $78 \times 69 \times 104 \text{ cm}^3$ e possono contenere 500 litri. I serbatoi sono stati disposti in due file, ciascuna costituita da quattro serbatoi per un carico massimo di circa 11 KPa. I parametri monitorati durante la prova sono spostamenti verticali e sovrappressioni misurati secondo lo schema in Fig. 5e mediante trasduttori di spostamento e pressione. Gli spostamenti sono misurati in corrispondenza alla superficie della barena (C0), dello strato a 10 cm (C10) e a 50 cm di profondità (C50) al centro del carico, nonché lo spostamento a 10 cm di profondità in corrispondenza alla mezzera delle taniche (M10) e subito all'esterno delle stesse (E10). Le misurazioni di pressione interstiziale sono state eseguite direttamente sotto il centro del carico a profondità variabili tra i 25 cm e i 100 cm (25A-B,70A-B,120).

Predisposizione dei dataset interferometrici

Per mappare l'attuale subsidenza sono stati utilizzati i movimenti del suolo ottenuti attraverso l'analisi interferometrica di immagini satellitari acquisite dai sensori radar ad apertura sintetica (SAR). Nello specifico, per l'analisi alla scala di bacino è stato analizzato un dataset a risoluzione spaziale di 20 m prodotto con Sentinel 1 relativo al periodo 2014-2019, mentre per quella alla scala locale (ad es. barene) è stato possibile

utilizzare un dataset a maggior risoluzione spaziale, 3 m, ottenuto da immagini TerraSAR-X 2008-2013. In mancanza di copertura di quest'ultimo, si è usato un secondo dataset Sentinel 1 la cui serie temporale è estesa fino al 2021. Il dataset TerraSAR-X, già utilizzato in passato, presenta una calibrazione ben consolidata alla scala lagunare. Per questo motivo lo si è usato come riferimento per la calibrazione delle velocità ottenute da Sentinel-1.

L'attività propedeutica ha visto la calibrazione con la proiezione delle velocità acquisite lungo la vista inclinata dei satelliti (LOS) dei dati interferometrici attraverso le serie temporali di movimenti del suolo registrate dal sistema satellitare globale di navigazione (GNSS) con le stazioni permanenti disponibili. Considerando la scarsità di target riflettenti il segnale SAR idonei alla elaborazione dei movimenti del suolo presenti nel bacino lagunare, per non ridurre le informazioni disponibili, si è optato di non combinare i dataset acquisiti in orbita ascendente e discendente, e di analizzare i dataset interferometrici di una sola orbita. Trascurando quindi la componente indotta da eventuali movimenti lungo la direzione est-ovest si assume di un errore di circa il 25% nei valori delle velocità verticali.

La validazione dei due dataset è stata effettuata confrontando settori lagunari che si assume abbiano mantenuto gli stessi tassi di movimenti del suolo nel tempo di osservazione. La Fig. 6 riporta un esempio di validazione dei dati satellitari in corrispondenza di un riflettore artificiale il cui livello di riferimento dei movimenti del suolo è a circa 6 metri di profondità. Il rate di subsidenza per il periodo 2007-2018 per entrambi i dataset è di 1.35 mm/anno.

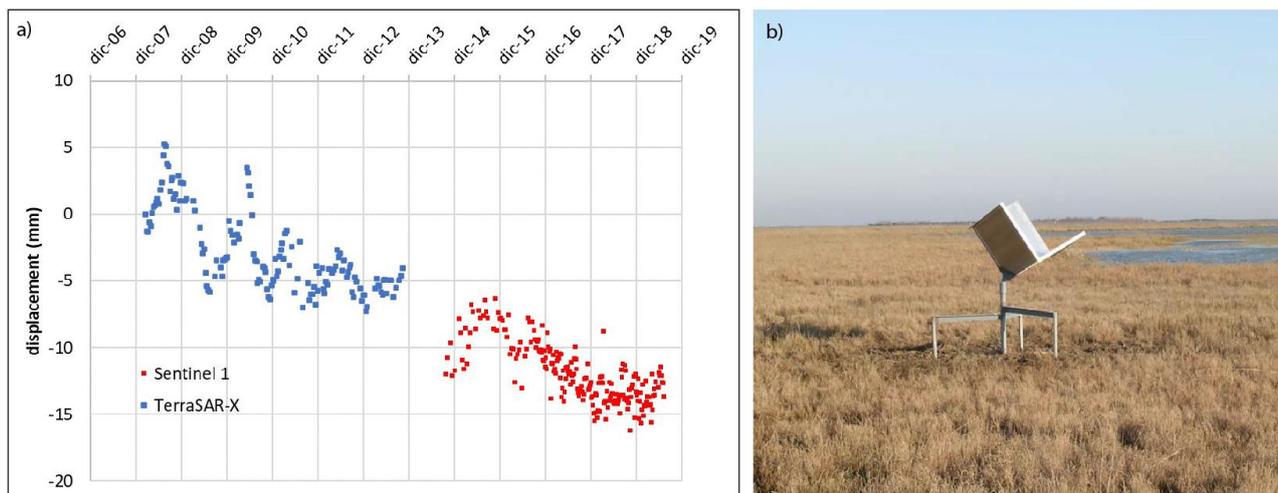


Fig. 6 Serie temporale di movimenti del suolo (a) in corrispondenza di un riflettore artificiale (b) utilizzato per la validazione dei dataset interferometrici.

Attività propedeutica alla quantificazione delle vulnerabilità

Con il termine vulnerabilità, in questa analisi si intende la propensione di un dato sistema ad essere affetto negativamente da un dato stato di pericolo. L'analisi di vulnerabilità al RSLR dell'area lagunare veneziana si è basata sulla combinazione di indicatori fisico-ambientali che descrivono sia la sensibilità del sistema (che denota la relazione dose-risposta del sistema fra lo stato di pericolo ed il potenziale danno sul sistema) che lo stato di pericolo al quale è sottoposto (il RSLR). Come indicatore di stato di pericolo sono stati considerati diversi scenari di SLR, di breve o lungo periodo, di epoca passata, in condizioni presenti e previsti per il prossimo futuro.

L'analisi di vulnerabilità al RSLR è stata sviluppata in un primo step che ha interessato parte del bacino scolante, la laguna e i litorali con l'ottica di evidenziare l'eterogeneità del RSLR causata dalla variabilità della subsidenza. Fra gli indicatori selezionati troviamo l'elevazione del terreno sia emerso che sommerso, la distanza delle terre emerse da potenziali vie di inondazione dovuti a RSLR (costa, corsi d'acqua, lagune e zone umide), la subsidenza ad alta risoluzione spaziale e l'incremento del medio mare. Tali indicatori, selezionati

perché ritenuti rilevanti nell'analisi a grande scala, sono stati combinati secondo un approccio indice-basato. Dal punto di vista metodologico ciascun dataset degli indicatori scelti è stato classificato secondo una scala di importanza e successivamente le classificazioni sono state pesate ed aggregate fra loro.

Successivamente, è stato eseguito un down-scaling alla scala della laguna (Fig. 7) ad una maggiore risoluzione spaziale che ha permesso di stimare la vulnerabilità delle morfologie lagunari e considerare gli aspetti di sottosuolo olocenico. Gli indicatori selezionati sono stati suddivisi fra quelli che descrivono le caratteristiche intrinseche delle morfologie stesse in relazione allo stato di pericolo (indicatori di sensibilità) e quelli che descrivono lo stato di pericolo al quale il sistema è sottoposto. Fra i primi oltre all'elevazione altimetrica delle aree emerse e sommerse, indicatore già utilizzato nella precedente analisi, vengono ora considerati lo spessore e la tessitura dei sedimenti relativi alle unità deposizionali oloceniche, riconosciute essere quelle che per le loro caratteristiche geo-meccaniche contribuiscono maggiormente al processo di subsidenza per compattazione. Nei secondi sono stati considerati l'eterogeneità spaziale della subsidenza e l'incremento del medio mare. Dal punto di vista metodologico i dataset relativi gli indicatori di sensibilità opportunamente classificati (Fig. 7) sono stati pesati e aggregati al fine di ottenere una mappa di sensibilità del sistema barena-bassofondo. Successivamente tale mappa di sensibilità è stata combinata con quella che descrive lo stato di pericolo al RSLR ottenendo la quantificazione della vulnerabilità.

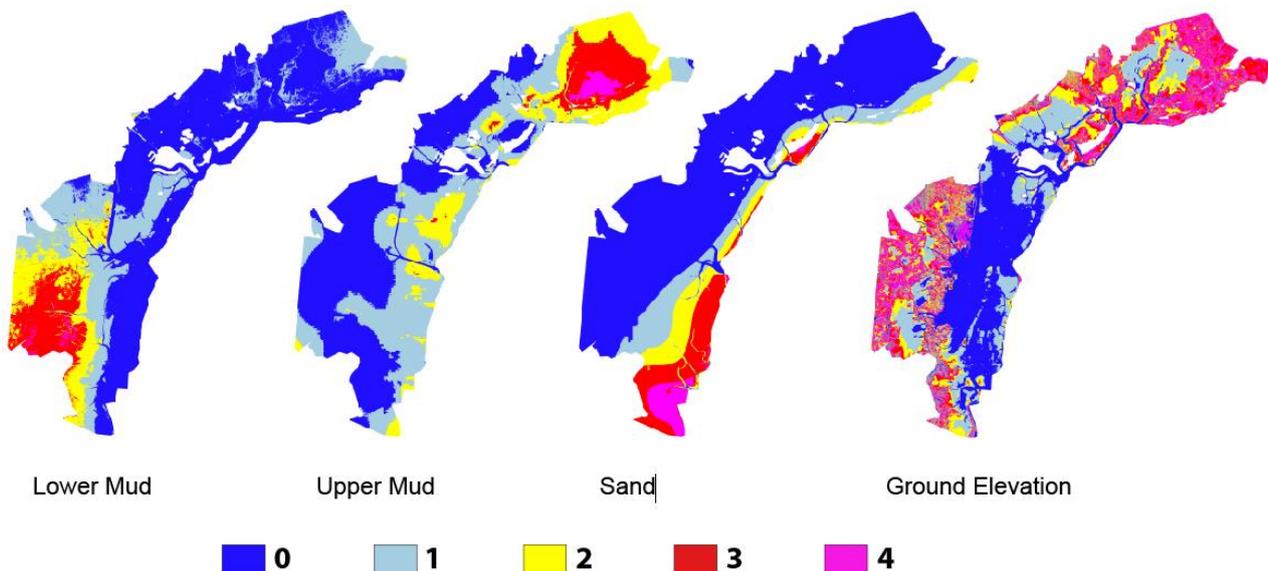


Fig. 7. Classificazione degli indicatori di sensibilità nello scenario presente alla scala della laguna. I valori da 0 a 4 identificano contributi crescenti alla vulnerabilità.

Attività propedeutica alle simulazioni numeriche delle subsidenza olocenica

Modellistica a scala della prova di carico.

I dati raccolti ed elaborati durante la sperimentazione in campo sono stati impiegati per sviluppare e caratterizzare appropriate legge costitutive in grado di descrivere il comportamento meccanico dei suoli barenicoli. In particolare, si è utilizzato un modello accoppiato flusso-deformazioni agli elementi finiti misti per riprodurre le prove di carico sperimentali effettuate presso il sito di Lazzaretto Nuovo. Il modello utilizzato è stato aggiornato per poter considerare relazioni costitutive non lineari tra compressibilità dei sedimenti e tensione intergranulare efficace. È stata utilizzata una legge di tipo parabolico con tre parametri di calibrazione che, inizialmente derivati da prove geotecniche di laboratorio, sono stati utilizzati per riprodurre le prove in sito. Il modello è stato impostato per ricostruire la sequenza litologica disponibile dall'analisi dei carotaggi effettuati presso il sito di interesse. Per la calibrazione sono stati confrontati i risultati del modello in termini di spostamento verticale e sovra-pressione con le misure di campo durante la fase di carico e scarico a 11 kPa.

Modellistica a scala di barena

Appare evidente come la subsidenza naturale attuale degli ambienti di transizione sia intrinsecamente correlata alla loro storia evolutiva recente durante l'olocene e alle proprietà idro-geomeccaniche dei depositi sedimentati durante tale periodo. Utilizzando la caratterizzazione ottenuta a scala della singola prova di carico, si è sviluppato un approccio numerico in grado di riprodurre l'evoluzione di lungo periodo delle forme morfologiche quali le barene. Il modello, opportunamente calibrato sui dati precedentemente elaborati, è quindi applicato in fase previsionale per valutare la resilienza delle forme morfologiche lagunari. L'approccio modellistico ha interessato lo sviluppo di un modello biomorfo-geomeccanico bidimensionale tramite l'accoppiamento di modello 1D bio-morfologico e un modello 2D geomeccanico. Il modello biomorfo-geomeccanico rappresenta un primo tentativo di studiare l'evoluzione di una barena lagunare considerata nel suo insieme come corpo tridimensionale con un boundary che corrisponde all'attuale superficie. La sua forma (elevazione) dipende dalle intrinseche proprietà idro-geomeccaniche del corpo poroso e dai processi fisici e biologici che si verificano sulla sua superficie. Uno degli aspetti peculiari del modello biomorfo-geomeccanico consiste nell'accoppiamento di processi che agiscono su varie scale temporali, in modo tale da descrivere i processi fisici alla scala caratteristica associata. Le equazioni di continuità e di trasporto-avvezione vengono risolte alla scala temporale tipica di un ciclo mareale e sono disaccoppiate dalla scala a cui avviene l'evoluzione morfologica della barena (tipicamente da uno a qualche anno). Questo accoppiamento viene poi replicato per tutta la durata della simulazione che copre una scala dei secoli o millenni, nella quale diventa fondamentale tener conto degli effetti geomeccanici.

Modellistica a scala della laguna

In relazione a scenari previsionali di "laguna regolata" e in vista dei cambiamenti climatici responsabili di possibili variazioni della velocità di innalzamento del livello medio mare, si è sviluppato in modello in grado di stimare l'attuale subsidenza naturale del bacino lagunare causata dalla compattazione dei depositi olocenici. Le attività hanno interessato lo sviluppo di un simulatore geomeccanico 3D (NATSUB3D) per la simulazione della subsidenza olocenica del bacino lagunare. NATSUB3D permette la modellazione dell'evoluzione di corpi sedimentari in relazione ai processi di sedimentazione e consolidazione naturale (i.e., per il peso proprio di sedimenti). Il simulatore consente l'analisi di forme sedimentarie in ambito tridimensionale, con un approccio agli elementi finiti nel contesto delle grandi deformazioni, ovvero con griglie adattative in cui il numero di elementi aumenta con il trascorrere del tempo per modellare il risultato della deposizione e i nodi della griglia si spostano per seguire il movimento (non infinitesimo) dei grani durante il processo di compattazione. Il simulatore NATSUB3D è stato applicato per ricostruire l'evoluzione olocenica dell'attuale laguna di Venezia. L'applicazione modellistica alla scala dell'intera laguna ha ovviamente comportato l'introduzione di un certo numero di semplificazioni, principalmente connesse alla mappatura dei diversi tipi di sedimenti e all'evoluzione temporale della loro deposizione. Il modello consente per la prima volta di caratterizzare in modo coerente le proprietà litostratigrafiche e geomeccaniche del sottosuolo lagunare olocenico potendone stimare l'attuale auto-compattazione residua (e quindi la subsidenza naturale) e prevedendone la possibile evoluzione nei prossimi decenni in relazione a diversi scenari di sedimentazione.

5. Risultati per attività

Modello geologico

Il modello geologico (Fig. 8) creato come input adatto all'analisi di vulnerabilità e alle simulazioni dell'evoluzione olocenica della laguna include tre unità litologiche, che presentano caratteristiche geomeccaniche diverse. Inoltre, sono state modellate le età dei depositi olocenici alle diverse profondità necessarie per calcolare i tassi di deposizione utili alle simulazioni numeriche.

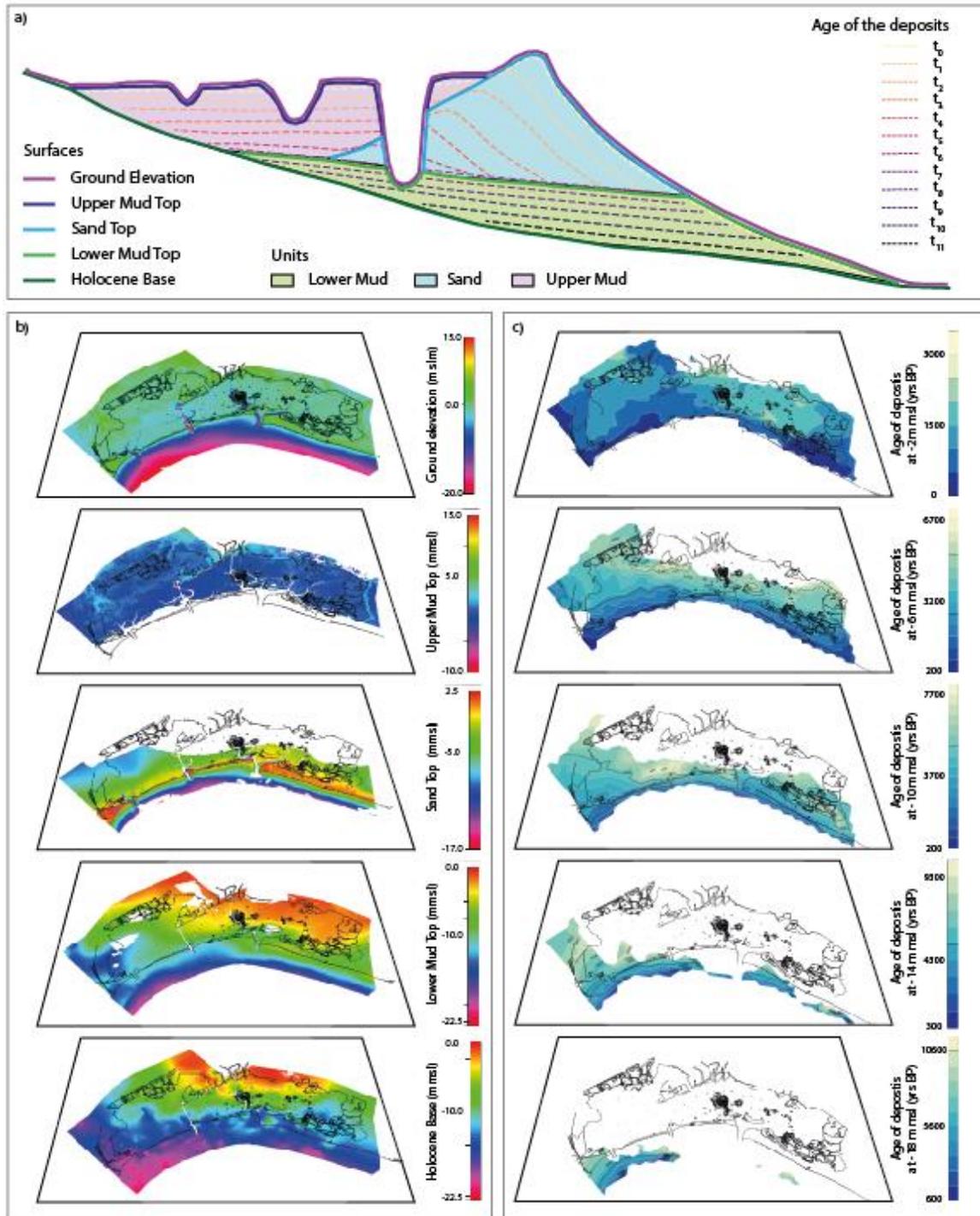


Fig. 8. Modello geologico della Laguna di Venezia: a) modello concettuale che evidenzia le principali unità deposizionali oloceniche presenti in laguna e le età dei depositi olocenici; b) superfici di base e di tetto delle unità del modello; c) età dei depositi olocenici a diverse profondità dal livello del medio mare.

Le unità riconosciute sono: (i) unità “lower mud” che si trova alla base della successione olocenica al di sopra del caranto ed è costituita da depositi pelitici (limi e argille) legati ad ambienti marino-marginali e di back-barrier, (ii) unità “sand” che si trova al di sopra dell’unità (i) in transizione laterale con l’unità (iii) ed è costituita da depositi sabbiosi legati allo sviluppo delle barriere litoranee che nel corso dell’evoluzione della laguna hanno limitato il dominio lagunare da quello marino, (iii) unità “upper mud” che si trova al di sopra

dell'unità (i) in transizione laterale con l'unità (ii) ed è principalmente costituita da depositi pelitici legati all'ambiente lagunare.

Caratterizzazione geomeccanica delle barene

L'applicazione di una medesima storia di carico sulla superficie delle tre barene selezionate, Lazzaretto Nuovo, La Grisa e Campalto, ha evidenziato una risposta assai diversa. I risultati di un confronto quali-quantitativo in merito alle peculiarità della risposta geomeccanica dimostrano che la compattazione massima si attesta su un valore medio di 16 mm a Campalto, rispetto a 32 mm misurati a La Grisa e 7 mm misurati a Lazzaretto Nuovo. Inoltre, il rapporto tra compattazione massima misurata al termine della fase di carico con 11.3 kPa e al termine di quella con 5.6 kPa è pari a 2.5 a Lazzaretto Nuovo, 3 a La Grisa e 6 a Campalto. Il sedimento che compone la barena Campalto risulta quindi essere significativamente più sovra-consolidato di quello delle altre due barene. Dalle prove si evince che il rapporto tra compattazione ed espansione massima, rispettivamente al termine delle fasi di carico e scarico, è circa pari a 2. Tale valore è assolutamente inatteso in quanto, in genere, nei terreni superficiali la compressibilità in fase di carico è almeno 10 volte quella in fase di scarico. Il suolo superficiale che compone le barene sembra avere un comportamento assai più elastico dei terreni "normali". L'ipotesi in fase di analisi è che questa elasticità sia favorita dalla presenza dell'apparato radicale della vegetazione alofila che ricopre le barene.

L'interpretazione dei dati ottenuti mediante le prove di carico con il modello numerico ha permesso di caratterizzare in modo soddisfacente le proprietà geomeccaniche dei terreni superficiali della barena di Lazzaretto Nuovo. Sono stati calibrati i parametri geomeccanici degli strati presenti nella sequenza litologica. In particolare, è stato individuato un primo strato di sedimento limo-torboso con la presenza di apparati radicali, uno strato intermedio caratterizzato da sedimento limo-argilloso e uno strato più profondo assunto più rigido del sedimento sovrastante. In Fig. 9 viene riportato il risultato modellistico e il confronto con i dati di campo in termini di spostamenti verticali e sovra-pressioni.

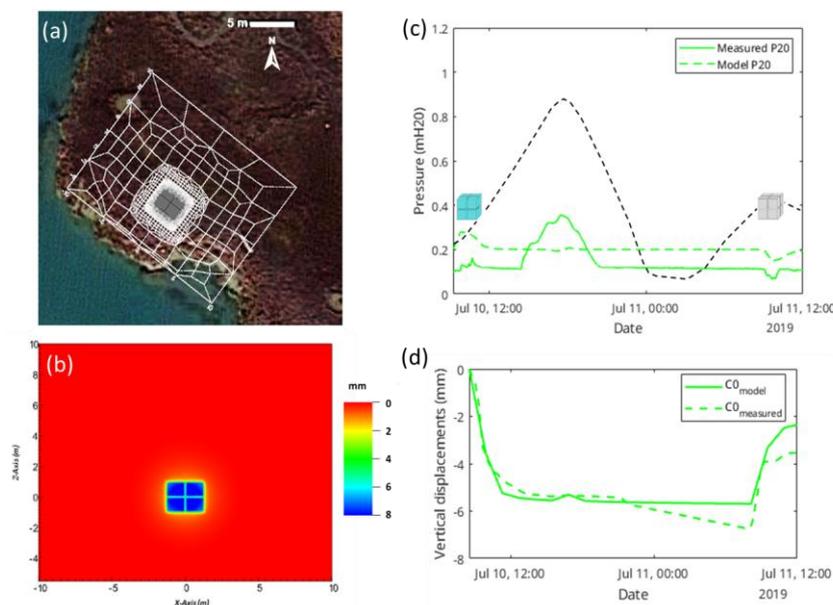


Fig. 9. a) Vista planimetrica della griglia di calcolo sovrapposta alla barena. b) Mappa degli spostamenti verticali sulla superficie della barena nell'istante finale di applicazione del carico di 11kPa ottenuti con il modello numerico calibrato. c) Confronto tra la sovra-pressione misurata e modellata in una fase di carico e scarico di circa 11 kPa con andamento della marea. d) Confronto tra andamento dello spostamento verticale modellato e misurato dal sensore superficiale installato al di sotto dell'impronta di carico (C0).

I risultati dimostrano che la calibrazione del modello numerico permette di ottenere una buona stima degli andamenti di spostamento misurati dall'esperienza di carico. Tuttavia, si nota che il sensore C0 viene sottostimato di circa 1.5 mm su un massimo misurato di circa 7 mm. La fase di scarico è ben modellata con

un fattore di isteresi pari a 3 per il sedimento superficiale (Fig. 9d). L'effetto del carico di 11 kPa e del successivo scarico è quantificabile in 3-4 cm (rispettivamente di sovra-pressione o depressurizzazione rispetto al trend di base). Il modello ricostruisce in modo soddisfacente la variazione di pressione nello strato più superficiale ma sovrastima di un fattore circa 3 i dati registrati a 0.5 m e 1.0 m di profondità.

Dinamica recente del suolo

I risultati della quantificazione della subsidenza recente del bacino lagunare sono sintetizzati in Fig. 10.

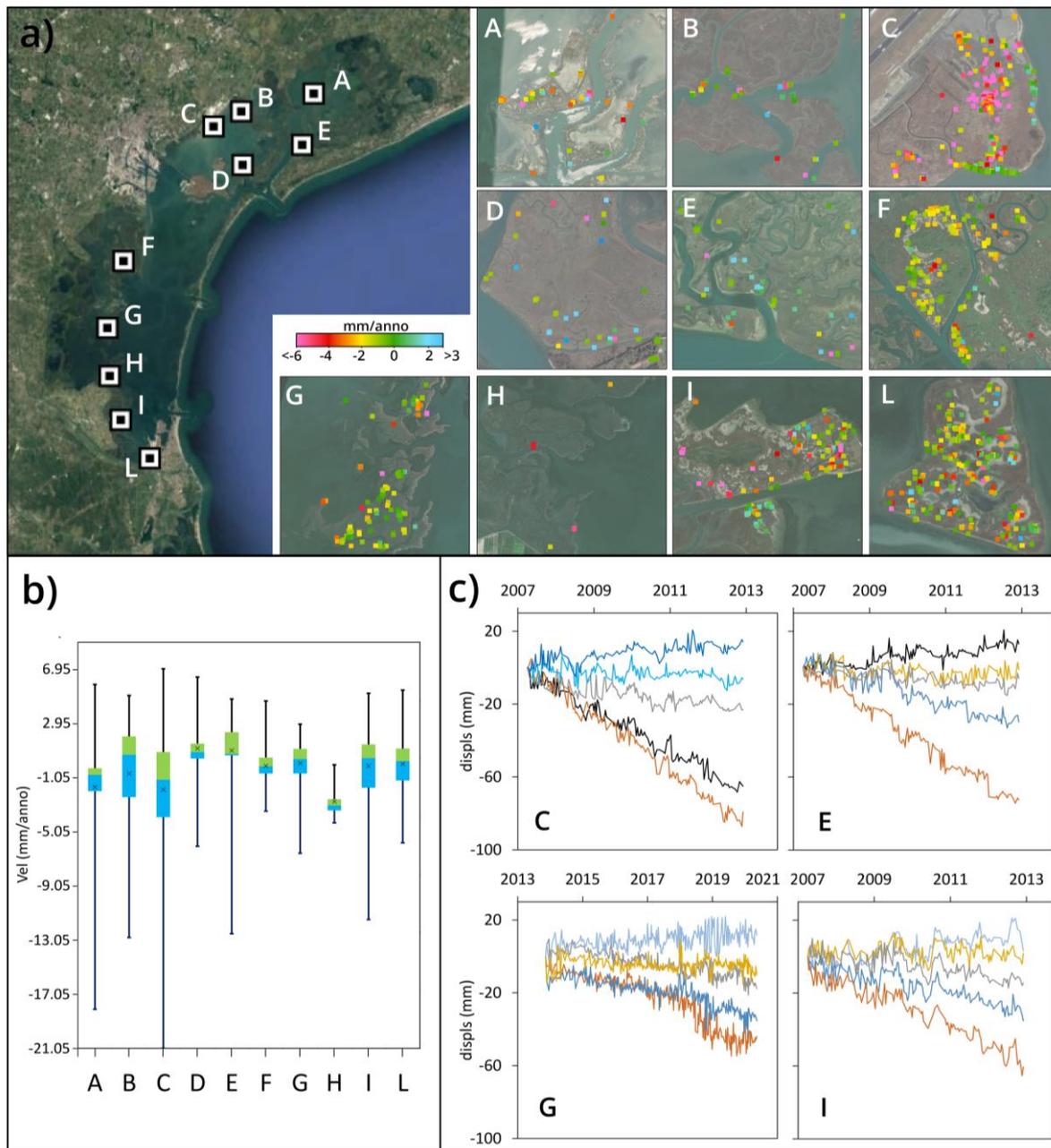


Fig. 10. a) velocità del suolo in diverse aree della laguna (A-L); b) grafici box plot delle aree analizzate (A-L) che evidenziano la variabilità delle velocità nell'area lagunare; c) serie temporale di alcuni target nelle aree C, E, G, e I.

Complessivamente, appare evidente l'elevata variabilità spaziale dei movimenti misurati, con differenze significative tra riflettori anche spazialmente molto ravvicinati, dovute a più fattori anche concomitanti. Tra questi, ci sono le caratteristiche geotecniche del terreno, quindi un ruolo importante è giocato dalla tipologia e dall'assetto delle unità che formano il sottosuolo olocenico e dalla natura dei depositi, ad esempio barene

naturali o refluite. Altro fattore che influenza la variabilità è il livello di riferimento del punto misurato, ad esempio, strutture come pali, bricole e palancole poggiano su unità di sottosuolo alla profondità di 3-4 metri, per cui viene escluso il contributo dei depositi soprastanti. I riflettori riferiti alle burghie e arginature invece sono ragionevolmente rappresentativi del movimento della superficie del suolo in quanto queste strutture poggiano sul terreno. Una particolarità osservata è la presenza di movimenti positivi relativi alla superficie delle barene, difficilmente spiegabili assumendo la presenza di processi di uplift geodinamico a scala locale. Benché in corso di verifica, è ragionevole ipotizzare che alcune misure positive siano rappresentative di accrescimenti dovuti a processi deposizionali. Poiché l'analisi statistica della media delle velocità misurate (Fig. 10b) per l'intero periodo di osservazione non completa la caratterizzazione della dinamica del suolo di una barena, ci si è avvalsi anche dell'analisi delle serie temporali (Fig. 10c) degli spostamenti al fine di evidenziarne il comportamento nel tempo.

Quantificazione della vulnerabilità delle morfologie lagunari al RSLR

La Fig. 11 mostra la vulnerabilità a scala lagunare delle morfologie della laguna di Venezia evidenziando che nello scenario passato (1990) la loro vulnerabilità al RSLR variava da trascurabile (55% dell'area studio) a marginale (36% dell'area studio) con poche zone per lo più localizzate in condizioni moderate. Nello scenario presente (2020) le aree a vulnerabilità trascurabile si riducono (25% dell'area) mentre aumentano quelle a vulnerabilità marginale/moderata (rispettivamente 48% e 24%) fino a forte in alcune zone localizzate (3% dell'area studio). Nello scenario futuro simulato al 2050 emerge che la classe trascurabile scompare, mentre compare quella estrema, che copre il 2% dell'area studio, e la totalità della laguna si suddivide fra aree a vulnerabilità da marginale (23%), a moderata (50%) e forte (25%). Da notare in tutti gli scenari la grande eterogeneità spaziale della vulnerabilità conseguenza dell'eterogeneità di tutti gli indicatori selezionati, dalla subsidenza all'elevazione del suolo fino agli spessori delle diverse unità deposizionali.

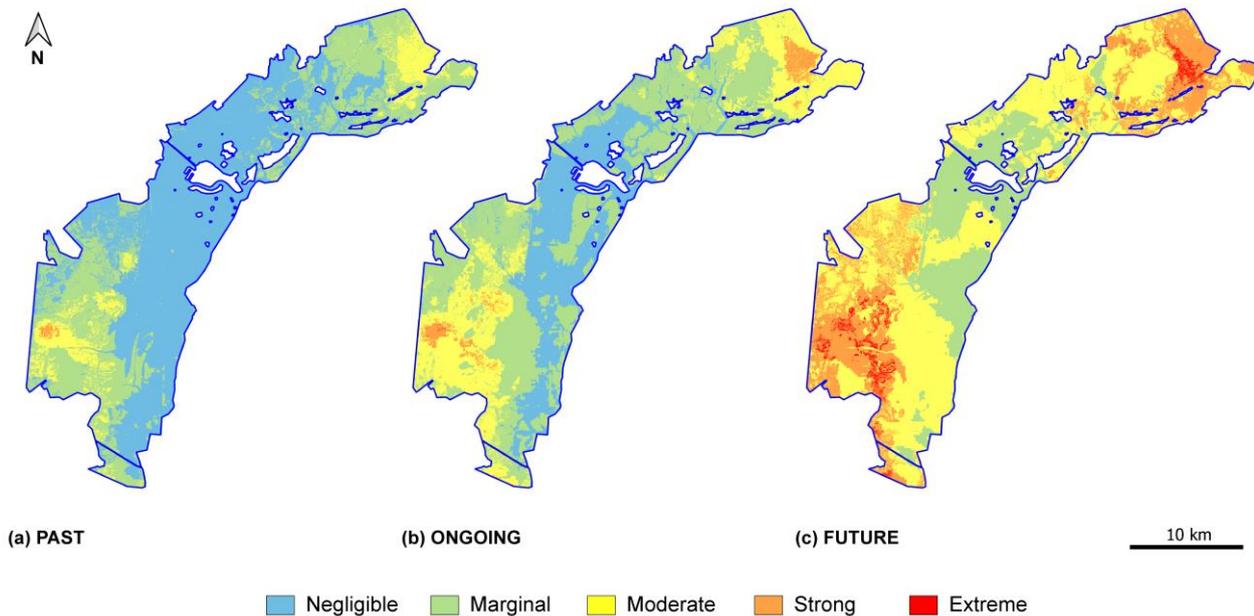


Fig. 11. Mappe di vulnerabilità al RSLR della laguna di Venezia negli scenari passato, presente e futuro.

Simulazione numeriche subsidenza olocenica

Il modello per la simulazione della subsidenza olocenica a scala di barena si estende su dominio di 10x10 m nel piano orizzontale, con una discretizzazione spaziale regolare sia in orizzontale che in verticale pari a 0.1 m. La simulazione copre un intervallo di tempo pari a 3000 anni, con la deposizione dei sedimenti caratterizzata da tre fasi successive con terreno torboso da 0 a 1000 anni, deposizione di depositi limosi con sedimentazione costante (nello spazio) tra 1000 a 1500 anni e variabile tra 1500 a 2000 anni con valore massimo lungo la sponda del canale e minimo nella zona interna della barena; deposizione di materiale

argilloso/organico, per simulare il passaggio a un ambiente meno energetico tra 2000 e 3000 anni. I risultati modellistici sono riportati in Fig. 12, in cui si fornisce l'evoluzione del corpo della barena in corrispondenza agli istanti 250, 1250, 2250 e 3000 anni per mezzo di una rappresentazione assometrica 3D. Una compattazione pari a circa il 30% caratterizza lo strato organico alla base della barena.

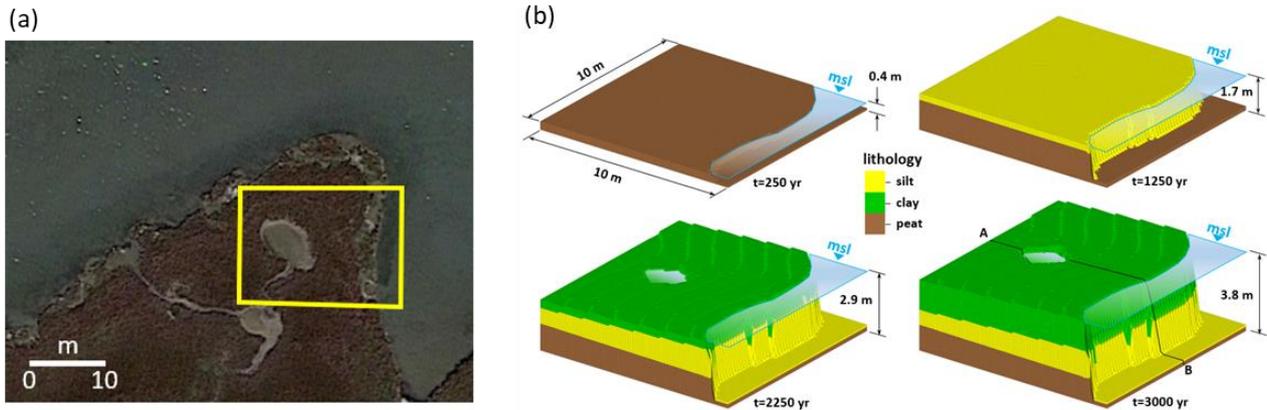


Fig. 12. (a) Applicazione di NATSUB3D per simulare la subsidenza olocenica di una porzione di barena tidale (b) Evoluzione della barena in corrispondenza agli istanti 250, 1250, 2250 e 3000 anni. La barena confina da un lato con un canale mareale. I colori rappresentano i diversi tipi di sedimenti.

Per quanto riguarda la simulazione della subsidenza a scala dell'intero bacino lagunare, i risultati sono riportati in Fig. 13. Il bottom del modello è rappresentato dalla mappa di profondità del limite Olocene-Pleistocene sviluppata nella presente ricerca. La simulazione si sviluppa su 11000 anni e permette di ricostruire in modo soddisfacente il corpo olocenico dell'area di studio. Le proprietà geomeccaniche sono ottenute dall'interpretazione delle prove di carico eseguite durante la ricerca e da dati reperiti in bibliografia. NATSUB3D consente la caratterizzazione all'interno del dominio di calcolo di parametri quali tensione, deformazione, compattazione, porosità, compressibilità, età e tipologia dei sedimenti. La massima deformazione, che si ottiene in corrispondenza degli strati più profondi, raggiunge un valore del 30%. La subsidenza attesa nei prossimi decenni in assenza di ulteriore sedimentazione varia in modo significativo in relazione al punto di interesse (Fig. 13d).

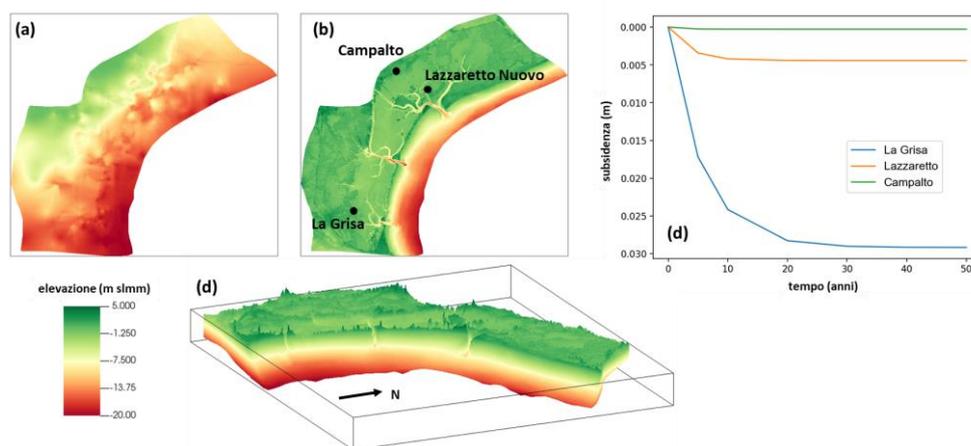


Fig. 13. Modellazione della subsidenza naturale olocenica della laguna di Venezia: a) elevazione (m sul medio mare) della base dell'olocene (bottom del modello); b) elevazione (m sul medio mare) dell'attuale DTM che costituisce il top del modello; (c) proiezione assometrica del corpo olocenico così come ottenuto dall'applicazione modellistica; (d) subsidenza prevista in corrispondenza dei siti delle prove di carico in assenza di nuova sedimentazione.

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

Lo scopo della Linea 3.1 è quantificare la subsidenza della laguna di Venezia, caratterizzarne le forzanti per simulare l'evoluzione degli ambienti lagunari in considerazione dei processi deposizionali e geo-meccanici combinati all'aumento del livello del mare relativo (RSLR - Relative Sea Level Rise).

La ricerca si è quindi prefissata i seguenti obiettivi: analisi della subsidenza, caratterizzazione dell'assetto e del comportamento geo-meccanico del sottosuolo tardo-pleistocenico ed olocenico, simulazione della subsidenza naturale olocenica e valutazione della vulnerabilità all'innalzamento del livello marino relativo.

Tutti gli obiettivi della Linea 3.1 sono stati raggiunti e hanno contribuito agli Obiettivi prioritari e alle sfide del Progetto Venezia2021.

Nello specifico, in riferimento all'Obiettivo prioritario 1 "Quadro conoscitivo: fornire conoscenze integrate ed aggiornate, utili per la gestione sostenibile dell'ecosistema laguna di Venezia, che dall'entrata in funzione del MOSE sarà la prima laguna regolata del mondo", il contributo della Linea è stato il seguente:

- a) concettualizzazione di un modello dell'assetto stratigrafico olocenico nell'area lagunare e nella zona offshore alla laguna. Tale lavoro ha visto un'importante capitalizzazione di quanto prodotto da progetti precedenti, con una revisione critica della letteratura e l'integrazione dei dati disponibili (sismica, carotaggi, etc.) sia in laguna che nelle aree limitrofe. In parallelo, sono state realizzate numerose campagne di raccolta dati che hanno permesso di arricchire ulteriormente le informazioni disponibili evidenziando un'alta variabilità verticale e laterale dei depositi olocenici presenti in laguna che di conseguenza influenza in maniera importante le proprietà geo-meccaniche del sottosuolo. Tale modello è stato poi semplificato al fine di poterlo utilizzare nelle simulazioni numeriche geomeccaniche e nell'analisi di vulnerabilità individuando tre principali unità deposizionali: (i) unità "lower mud" che si trova alla base della successione olocenica al di sopra del caranto ed è costituita da depositi pelitici (limi e argille) legati ad ambienti marino-marginali e di back-barrier, (ii) unità "sand" che si trova al di sopra dell'unità (i) in transizione laterale con l'unità (iii) ed è costituita da depositi sabbiosi legati allo sviluppo delle barriere litoranee che nel corso dell'evoluzione della laguna hanno limitato il dominio lagunare da quello marino, (iii) unità "upper mud" che si trova al di sopra dell'unità (i) in transizione laterale con l'unità (ii) ed è principalmente costituita da depositi pelitici legati all'ambiente lagunare. Parallelamente allo sviluppo modello concettuale dell'assetto stratigrafico olocenico dell'area lagunare si è sviluppato anche un modello delle età dei depositi olocenici.
- b) analisi della subsidenza recente del bacino lagunare comprensivo di zone barenali. È stata eseguita l'analisi del movimento del suolo da immagini SAR acquisite dai satelliti TerraSAR-X e Sentinel-1, rispettivamente nei periodi 2008-2013 e 2014-2021. Il quadro che emerge evidenzia che a scala lagunare le velocità di abbassamento del suolo hanno una distribuzione estremamente eterogenea. Questo riflette il diverso assetto e la variabilità litologica dei depositi. Tali prodotti scientifici aggiornano ed integrano il quadro conoscitivo pregresso dell'assetto profondo del sottosuolo della laguna di Venezia e delle sue dinamiche andando a rispondere alla Sfida 4 proposta dal Progetto Venezia2021: "Lo stato di salute dell'ecosistema lagunare e le strategie per migliorarlo".

Il contributo della Linea all'Obiettivo prioritario 2 "Sviluppo di strumenti modellistici in grado di fornire previsioni a breve, medio e lungo termine" è stato il seguente:

- a. caratterizzazione delle proprietà geomeccaniche dei terreni più superficiali lagunari attraverso l'esecuzione di innovative prove di carico in-situ e l'interpretazione delle misure di spostamento - sovrappressione per mezzo di un modello idrologico-geomeccanico 3D accoppiato. Per la prima volta (non solo nel contesto della laguna di Venezia ma a scala globale) si è riusciti a caratterizzare il comportamento geomeccanico di una barena nel suo complesso (suolo + vegetazione) ad una scala spaziale che è rappresentativa dei processi di auto-compattazione e subsidenza.
- b. sviluppo di un simulatore innovativo (NATSUB3D) del processo di sedimentazione e auto-compattazione, e della conseguente subsidenza naturale, in ipotesi di grandi deformazioni e la sua applicazione per ricostruire l'evoluzione Olocenica di forme morfologiche lagunari e dell'intero bacino

lagunare veneziano. Il simulatore è applicato per sviluppare degli scenari di subsidenza naturale di medio – lungo termine al variare delle forzanti esterne locali/regionali (nell'ipotesi "laguna regolata", o altri scenari di gestione, che contribuiscano a modificare la concentrazione di sedimenti nelle acque lagunari) e in vista dei cambiamenti climatici responsabili di possibili variazioni della velocità di innalzamento del livello medio mare.

- c. analizzare l'efficacia della gestione dei sedimenti in ambito lagunare tramite NATSUB3D, con particolare riferimento alla progettazione di interventi di ripascimento di barene naturali e di realizzazione di barene artificiali. Il simulatore, supportato da un'appropriata conoscenza del sottosuolo lagunare, consente di quantificare l'evoluzione della quota delle strutture morfologiche lagunari a valle del refluito di nuovi sedimenti, quantificandone l'eventuale perdita di elevazione nel breve-medio termine rispetto al medio mare.

Infine, per quanto riguarda l'Obiettivo prioritario 3 "Provvedere a collaudare, assieme alle chiusure mobili, i mezzi atti a garantire le risposte gestionali ad una serie ampie di problematiche, per ridurre quanto possibile ogni tipo di rischio", la Linea 3.1 ha contribuito sviluppando dapprima un modello concettuale di vulnerabilità delle morfologie lagunari all'incremento del mare relativo (RSLR) e successivamente applicandolo secondo lo scenario passato, presente e futuro. In questo modo la Linea 3.1 ha contribuito alla Sfida 4 del Progetto Venezia 2021 "Lo stato di salute dell'ecosistema lagunare e le strategie per migliorarlo" e "Sfida 6: il cambiamento climatico e la laguna regolata". Infatti, le analisi si sono concretizzate in una mappatura del territorio in classi a grado crescente di vulnerabilità a diversi scenari di RSLR che identificano lo stato di criticità dell'ecosistema lagunare. Conoscere la vulnerabilità al RSLR è un'informazione basilare e propedeutica per pianificare appropriate misure gestionali strategiche per la conservazione delle aree costiere e lagunari nell'ottica dei cambiamenti climatici in atto. Il RSLR, previsto crescente nel prossimo futuro, affligge infatti le aree costiere aumentando per esempio il rischio di intrusione salina negli acquiferi superficiali e profondi o la perdita di morfologie lagunari di pregio con conseguenti danni biologici a specie animali e vegetali che attivamente le popolano.