



# Venezia 2021

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

CORILA. Consorzio per  
il coordinamento delle  
ricerche inerenti al sistema  
lagunare di Venezia



Provveditorato Interregionale per  
le Opere Pubbliche per il Veneto,  
Trentino Alto Adige,  
Friuli Venezia Giulia



## Sintesi finale dei risultati

2018-2022



Università Ca'  
Foscari di Venezia

I  
-  
U  
-  
A  
-  
V

Istituto  
Universitario di  
Architettura di  
Venezia



Università di  
Padova



Consiglio  
Nazionale delle  
Ricerche



Istituto Nazionale  
di Oceanografia e  
Geofisica Sperimentale

**Edito da**

CORILA

Pierpaolo Campostrini, Caterina Dabalà

Tutte le figure, salvo quelle di cui è indicata esplicitamente la fonte, sono di proprietà di CORILA e degli autori.

© Copyright CORILA. 2022

Consorzio per il coordinamento delle ricerche inerenti al sistema lagunare di Venezia

Palazzo X Savii. S. Polo 19. 30125 Venezia

Tel. +39.041.2402511. pec: corila@pec.it

direzione@corila.it

www.corila.it

# Indice

I numeri di Venezia2021	4
Il Programma Venezia2021	5
Missione e obiettivi	6
Le tematiche di ricerca	7
Tematica 1. Le interfacce della laguna: scambi con mare e bacino scolante	9
Tematica 2. Sedimenti, inquinamento chimico e interazione con gli organismi lagunari	25
Tematica 3. Forme, habitat e comunità acquatiche lagunari.	31
Tematica 4. Connessioni ecologiche e servizi ecosistemici.	39
Tematica 5. Cambiamento climatico e strategie di adattamento per la salvaguardia del patrimonio culturale di Venezia e la sua laguna	43
Le tematiche e i Gruppi di ricerca	51

# I numeri di Venezia2021

**5** Tematiche

**9** Enti internazionali partecipanti

**15** Linee di ricerca

**40** Video pubblicati

**99** Articoli pubblicati

**150** partecipazioni a convegni internazionali

**176** Deliverables

**186** Milestones

**300** Partecipanti alle ricerche

**685** Follower su facebook

**18.224** Persone che hanno visto almeno un contenuto di Venezia2021

**10 M di Euro** di finanziamento da parte del Provveditorato alle OO.PP. del Veneto, Trentino Alto Adige e Friuli Venezia Giulia

# Il Programma Venezia2021

In questo momento cruciale per le scelte sul destino di Venezia e della sua laguna, la ricerca scientifica è chiamata a fornire gli elementi essenziali per permettere ai decisori politici scelte basate sulla conoscenza. Un'amministrazione lungimirante dipende infatti da un flusso continuo di informazioni per la comprensione, l'anticipazione delle sfide ambientali e socio-economiche e l'adattamento ai cambiamenti futuri, inclusi quelli climatici.

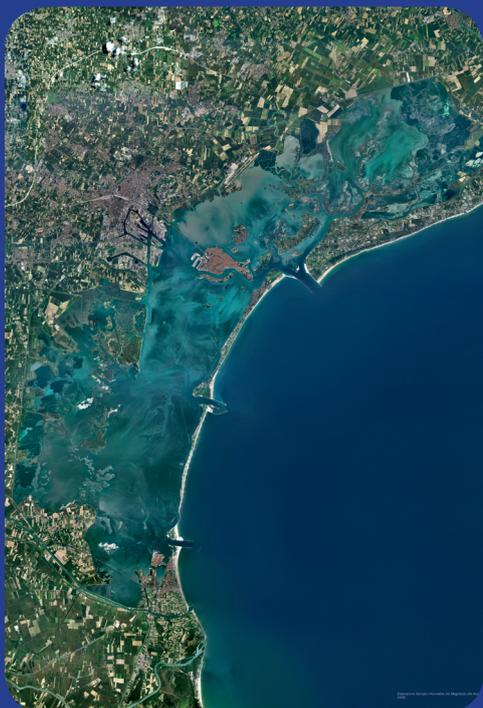
Venezia2021 è un programma di ricerca scientifica coordinato da CORILA, che prevede un complesso integrato di strumenti osservativi e di elaborazione dei dati raccolti, allo stato dell'arte delle conoscenze, al fine di contribuire al corretto equilibrio dell'ecosistema lagunare. In questo modo sarà possibile anche salvaguardare i benefici per la società (servizi ecosistemici) forniti dalla laguna.

Inoltre, nella presente fase di messa in funzione del Sistema MOSE, operativo a difesa dalle acque alte da ottobre 2020, Venezia2021 contribuirà all'elaborazione di nuovi "scenari", a supporto delle strategie di difesa.

Il programma di ricerca è stato avviato il 1 novembre 2018, terminerà il 30 giugno 2022 ed è finanziato dal Provveditorato Interregionale per il Veneto, TrentinoAlto Adige, Friuli Venezia Giulia del Ministero Infrastrutture e Mobilità sostenibili, nell'ambito delle opere per la salvaguardia di Venezia e della sua laguna e si coordina anche in senso operativo con esse.

Venezia2021 coinvolge più di 200 ricercatori afferenti agli Enti soci di CORILA: Università Ca' Foscari di Venezia, Istituto Universitario di Architettura di Venezia, Università di Padova, Consiglio Nazionale delle Ricerche e Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale.

Un meccanismo esterno ed indipendente di valutazione (ex ante, in itinere ed ex post) è costituito nel Comitato Tecnico Scientifico di CORILA, composto da scienziati di riconosciuto valore internazionale, non coinvolti nell'esecuzione delle ricerche e in posizione di assenza di conflitto di interesse.



## Le sfide di Venezia2021

*Scambi laguna-mare di acqua e sedimenti: comprendere le tendenze in atto e gli effetti delle strategie di gestione del MOSE*

- *Come contrastare la marinizzazione della laguna?*
- *La problematica del riutilizzo dei sedimenti lagunari*
- *Lo stato di salute dell'ecosistema lagunare e le strategie per migliorarlo*
- *I servizi ecosistemici che la laguna offre all'uomo: quanto "valgono" e come mantenerli per le generazioni future*
- *Il cambiamento climatico e la laguna regolata*
- *Il patrimonio artistico e paesaggistico della laguna*

# Visione, missione e obiettivi

Il sistema di difesa di Venezia e della sua laguna, sinteticamente conosciuto come MOSE, manterrà all'asciutto i percorsi pedonali della città storica e limiterà drasticamente l'avanzamento del degrado degli edifici. Nello stesso tempo, verranno mantenute le funzioni ecologiche della laguna. Questo avverrà sia attraverso una attenta modulazione delle chiusure delle barriere alle bocche di porto, sia attraverso un complesso di azioni di regolazione degli usi antropici, di mitigazione di effetti negativi, di miglioramento delle condizioni ambientali.

Queste azioni, che avverranno anche a contorno dell'operatività del MOSE, saranno "basate sulla conoscenza", ovvero sulla base di conoscenze scientificamente basate e mantenute aggiornate, anche attraverso osservazioni dirette.

La missione di Venezia2021 è quella di 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.

Una migliore comprensione scientifica del funzionamento degli ecosistemi lagunari ne faciliterà la gestione. Venezia2021 intende accompagnare la fase di messa in servizio delle opere di regolazione della marea, valutandone le ricadute, ambientali, sociali ed economiche in un'ottica di sostenibilità.

In particolare, sono oggetto di approfondimento in Venezia2021 i sistemi osservativi e gli strumenti modellistici/previsionali, in modo da fornire ulteriori e più precisi strumenti nel quadro dei cambiamenti climatici e dei loro effetti a scala locale.

Verrà inoltre completata la descrizione, al livello adeguato di dettaglio, dello stato dell'ambiente antecedente all'operatività del MOSE, in modo da poter valutare in futuro con precisione le variazioni eventualmente indotte.

## Gli obiettivi prioritari di Venezia2021



### QUADRO CONOSCITIVO

Fornire conoscenze integrate ed aggiornate, utili per la gestione sostenibile dell'ecosistema laguna di Venezia, che dall'entrata in funzione del MOSE è la prima laguna regolata del mondo.



### MODELLI MATEMATICI

Affinare gli strumenti modellistici in grado di fornire previsioni a breve, medio e lungo termine.



### STRUMENTI DI GESTIONE

Provvedere a collaudare, assieme alle chiusure mobili, i mezzi atti a garantire le risposte gestionali ad una serie ampia di problematiche, per ridurre quanto possibile ogni tipo di rischio.



### INDICATORI

Sviluppare indicatori misurabili dei possibili cambiamenti, inclusi gli attesi miglioramenti al patrimonio urbano ed architettonico, al contesto economico e sociale della città storica e del contesto metropolitano.



### VISIONE STRATEGICA

Contribuire a sviluppare in tempi brevi una visione strategica, accurata e condivisa, rispetto alle sfide attese, considerando anche gli scenari di cambiamento climatico.

# Le tematiche e le linee di ricerca

Venezia2021 è strutturato in **5 tematiche omogenee**, ognuna delle quali è suddivisa in Linee, per un totale di 15 Linee di ricerca. In ogni singola tematica si è mirato ad ottenere una effettiva integrazione di competenze e conoscenze, con contributi da parte dei diversi gruppi di ricerca appartenenti ad enti diversi.

Le attività di ricerca sono molte e diverse tra loro. Esse sono svolte dai gruppi di ricerca degli Enti soci di CORILA, in alcuni casi con la collaborazione di altri Gruppi di ricerca e di altre PPAA interessate. Le attività spaziano dalla raccolta di dati ambientali e campioni, analisi chimiche di laboratorio, implementazione ed integrazione di modelli matematici, realizzazione di scenari di breve-medio e lungo termine, formulazione di linee guida per la gestione della futura Laguna regolata dal MOSE, così come metodiche per la salvaguardia del patrimonio architettonico.

Il coordinamento offerto dalla struttura operativa di CORILA affianca e supporta i ricercatori nei rapporti tra loro e con le Amministrazioni e mette a disposizione strumenti per la gestione di dati ed informazioni.

## 1. Le interfacce della laguna: scambi con mare e bacino scolante

Studia i processi idrodinamici, biogeochimici e morfologici della laguna e connessi agli scambi con bacino scolante e mare. L'approccio integra misure in situ, strumenti di modellazione e previsione, e osservazioni da satellite con le informazioni da reti di monitoraggio esistenti per consentire una migliore comprensione delle tendenze in atto e degli effetti delle strategie di gestione del MOSE.



### Linee di ricerca

- 1.1 Scambi laguna-mare di acqua, materiale particolato e organismi e processi erosivi.
- 1.2 Apporto in laguna di acqua e materiale solido da due tributari del bacino scolante
- 1.3 Modellazione numerica integrata del sistema bacino scolante-laguna-mare
- 1.4 Rilevazione e previsione di eventi anossici con metodologie di remote sensing

## 2. Sedimenti, inquinamento chimico e interazione con gli organismi lagunari

Approfondisce la conoscenza relativa alla contaminazione del sedimento lagunare e alle dinamiche che la influenzano, anche in relazione all'entrata in funzione del MOSE, attraverso l'integrazione di approcci sperimentali e modellistici, che permettano di indagare specifiche problematiche finora poco o nulla studiate.



### Linee di ricerca

- 2.1 Qualità del sedimento lagunare a supporto della sua gestione sostenibile.
- 2.2 Inquinanti prioritari e rilascio di sostanze pericolose del sedimento
- 2.3 Contaminanti emergenti in laguna, esposizione ed effetti

## 3. Forme, habitat e comunità acquatiche lagunari

Valuta i cambiamenti morfologici 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 (microbiche, bentoniche, planctoniche e nectoniche) e produce modelli predittivi di queste dinamiche.



### Linee di ricerca

- 3.1 Subsidenza della laguna di Venezia ed evoluzione morfologica connessa a processi erosivi deposizionali combinati a Relative Sea Level Rise
- 3.2 Dinamiche erosive e morfosedimentarie in laguna di Venezia
- 3.3 Produzione primaria, comunità microbica, bentonica, planctonica e nectonica lagunare



#### **4. Connessioni ecologiche e servizi ecosistemici**

In un'ottica di confronto tra prima e dopo l'entrata in esercizio del MOSE, quantifica i servizi ecosistemici forniti dalla laguna di Venezia, valutandone la consistenza anche in termini monetari attraverso la percezione dei residenti, stimandone le variazioni dovute al funzionamento delle barriere ed ai cambiamenti climatici.

##### ***Linee di ricerca***

4.1 Modellistica della catena trofica

4.2 Servizi ecosistemici e gestione dell'ambiente lagunare



#### **5. Cambiamento climatico e strategie di adattamento per la salvaguardia del patrimonio culturale di Venezia e la sua laguna**

Si sviluppa un sistema integrato di analisi, valutazione, pianificazione, gestione e monitoraggio dell'area veneziana e del suo patrimonio storico, artistico e culturale, in grado di supportare la città e le attività che in essa operano, attraverso azioni coordinate di adattamento che mirino ad accrescere la sostenibilità e la resilienza ai cambiamenti climatici.

##### ***Linee di ricerca***

5.1 Scenari di cambiamento climatico per Venezia e la sua laguna

5.2 Impatti, vulnerabilità e rischi indotti dal cambiamento del clima

5.3 Piano di adattamento al cambiamento climatico e implementazione di strategie di intervento per la salvaguardia del patrimonio architettonico

---

#### **Gestione dati e informazioni (CORILA)**

Il coordinamento offerto dalla struttura operativa di CORILA affianca e supporta i ricercatori nei rapporti tra loro e con le Amministrazioni e mette a disposizione strumenti per la gestione di dati ed informazioni.

##### ***Attività***

1 Strumenti di gestione (Wrike), riunioni ed incontri

2 Data catalog Webgis

3 Rapporti con gli enti

4. Sito web e social. Riunioni e incontri

# Tematica 1.

## Le interfacce della laguna: scambi con mare e bacino scolante

Federica Braga (CNR-ISMAR)

### 1. Risultati della tematica

La laguna di Venezia è un ambiente di transizione complesso, frutto dell'interazione fra terra e mare, e la sua gestione non può prescindere dalla conoscenza dei processi che accadono alle interfacce terra-laguna e laguna-mare, i cui effetti coinvolgono l'intero sistema. Negli ultimi anni, gli studi e le ricerche sull'ambiente lagunare hanno consentito di superare definitivamente l'approccio, troppo semplificato, secondo il quale il principale fattore per la salvaguardia ambientale era rappresentato dalla mera eguaglianza fra volumi sottratti da forzanti erosive (naturali ed artificiali) e volumi ricreati con l'imbonimento di aree naturali. Un approccio più completo per indicare l'appropriatezza delle misure di salvaguardia prevede lo studio integrato e multidisciplinare dell'intero ecosistema lagunare.

In linea con la missione e gli obiettivi prioritari del programma di ricerca Venezia2021, la Tematica 1 ha prodotto conoscenze aggiornate ed integrate sui processi idrodinamici, biogeochimici e morfologici nell'ecosistema lagunare e connessi agli scambi con il bacino scolante e il mare Adriatico. Le 4 Linee di ricerca, che fanno parte della Tematica 1, hanno combinato la raccolta di dati in situ e da reti di monitoraggio in continuo, lo sviluppo di modelli numerici dei flussi d'acqua e del trasporto in soluzione e sospensione, nonché l'acquisizione ed elaborazione di prodotti da satellite per migliorare la comprensione dei processi e delle tendenze in atto nella laguna di Venezia.

I sistemi osservativi e gli **strumenti modellistici** realizzati dalle Linee, associati alle metodologie di analisi ed elaborazione dei dati prodotti, hanno consentito di approfondire il **quadro conoscitivo dello stato dell'ambiente lagunare** prima dell'operatività del MOSE e di valutare in modo preliminare gli effetti delle chiusure mobili sull'idrodinamica e sulla morfologia lagunare, anche in relazione agli scenari futuri di cambiamento climatico. In un contesto di laguna regolata, che prevede il controllo dei flussi laguna-mare e interventi di riduzione del degrado morfologico, questo approccio multidisciplinare in grado di osservare, descrivere e predire, **rappresenta uno strumento importante per la gestione dell'ecosistema e la valutazione delle variazioni indotte e degli effetti a breve e medio termine dell'operatività del MOSE.**

La Tematica 1 "Le interfacce della laguna: scambi con mare e bacino scolante" è suddivisa in 4 Linee:

- Linea 1.1. Scambi laguna-mare di acqua, materiale particolato e organismi e processi erosivi.
- Linea 1.2. Apporto in laguna di acque e materiale solido da due tributari del bacino scolante.
- Linea 1.3. Modellazione numerica integrata del sistema bacino scolante-laguna-mare.
- Linea 1.4. Rilevazione e previsione di eventi anossici con metodologie di remote sensing.

La regolazione dei flussi tra mare e laguna influisce certamente sugli scambi di materiale biotico e sedimenti. L'analisi delle evidenti modificazioni nel trasporto di-

menti lungo il litorale e delle interazioni con i flussi laguna-mare monitorate durante la fase di realizzazione del MOSE è stata aggiornata con nuove indagini per valutare le tendenze in atto e fornire un supporto alle scelte gestionali di regolazione dei flussi alle bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia).

Nell'ambito della **Linea 1.1**, è stato realizzato un sistema osservativo alle tre bocche di porto che integra misure in situ, osservazioni da satellite e dati da reti di monitoraggio, sia pre-esistenti sia di nuova installazione. Sono state installate 4 stazioni torbidimetriche alle bocche di porto in prossimità delle sezioni MOSE per il monitoraggio dell'evoluzione degli scambi di particellato fra laguna e mare e la caratterizzazione del trasporto in sospensione. I dati di torbidità misurati, associati a quelli registrati dalle stazioni correntometriche CVN già presenti, sono stati utilizzati per verificare la metodologia per la stima del flusso solido. Previa l'adozione di un protocollo operativo per le stazioni correntometriche CVN, sarà possibile consolidare la procedura e acquisire serie temporali del flusso solido alle bocche, che è un'informazione di grande utilità per la valutazione dei processi di trasporto di sedimenti e della loro evoluzione durante l'operatività del MOSE.

I dati, raccolti in maniera continuativa durante il progetto Venezia2021 e, in particolare, nei periodi in cui è stato collaudato il sistema di barriere mobili in diverse modalità operative, hanno consentito di studiare attentamente i processi idrodinamici e di trasporto a diverse scale spazio-temporali. La validazione delle mappe di torbidità ottenute dalle immagini da satellite ha permesso di stimare in maniera sinottica i pattern del trasporto di sedimenti in sospensione lungo la costa, nelle bocche di porto e all'interno della laguna, in un ampio spettro di condizioni meteomarine e idrodinamiche. L'analisi delle mappe di torbidità ha fornito nuove informazioni nel quadro conoscitivo dei processi di trasporto di sedimenti, quali ad esempio i flussi di particellato da mare verso laguna e l'interazione fra i flussi uscenti dalle bocche di porto e la corrente litoranea; questi dati sono di sicura utilità anche per le valutazioni modellistiche sulla circolazione e sulla morfodinamica lagunare.

I rilievi morfobatimetrici ad alta risoluzione hanno consentito di mappare con grande dettaglio i fondali e le forme di fondo nelle tre bocche di porto. È stato possibile evidenziare le aree dove si è verificata una maggiore dinamicità, avvalendosi anche del confronto con dati acquisiti in precedenti monitoraggi. Nella bocca di porto di Lido negli ultimi anni si è riscontrata una condizione di stabilità del fondale, con le variazioni più significative rilevate rispetto al 2011. Rispetto al 2013, l'area monitorata alla bocca di porto di Malamocco non ha subito importanti modificazioni mentre nella bocca di porto di Chioggia nel corso degli anni è prevalso un processo di accumulo di sedimenti nella maggior parte dell'area monitorata. I monitoraggi effettuati restituiscono una fotografia dello stato attuale della morfologia delle bocche di porto, che è un punto di riferimento per studiarne l'evoluzione mediante futuri auspicabili monitoraggi. I processi erosivi nei canali di grande navigazione sono stati investigati nel dettaglio, a partire dal fenomeno fisico fino alle valutazioni sui volumi erosi combinando dati batimetrici ad alta risoluzione e aerofotogrammetria da drone, ottenendo dati importanti per la stima degli impatti del traffico navale. Le indagini sul canale Malamocco-Marghera hanno rivelato che l'area è altamente sensibile allo stress del traffico marittimo, con approfondimenti delle piane subtidali adiacenti al canale e un forte arretramento dei margini sommersi e delle aree emerse adiacenti.

La laguna ha un'importanza fondamentale nel ciclo vitale di molte specie marine; risulta quindi necessario comprendere gli effetti delle regolazioni dei flussi sui movimenti di organismi chiave/indice per l'ecosistema. Attraverso un'indagine con strumentazione acustica, mediante le tecniche di campionamento impiegate e le successive analisi geo statistiche, è stato possibile stimare le biomasse di organismi nectonici presenti nelle tre bocche di porto ed evidenziarne le differenze in termini di densità, anche in relazione alle diversità morfologiche che sussistono tra i tre siti esa-

minati. Il metodo è applicabile anche in condizioni di traffico navale, nelle ore notturne e con situazioni meteorologiche non favorevoli, si tratta inoltre di una metodologia ripetibile e quantitativa che permette di ottenere una serie storica di dati, che possono anche essere messi in relazione a parametri chimico-fisici o morfologici del sito. Alla luce di queste considerazioni i risultati emersi sono importanti anche in ottica gestionale, in quanto un utilizzo del MOSE sempre più frequente (poiché è atteso che aumentino in frequenza ed intensità i fenomeni di acqua alta) è possibile determini un maggiore impatto sulle risorse monitorate.

La messa a punto di metodiche di barcoding per l'identificazione di specie da uova e larve e di metodiche di analisi del DNA ambientale nella colonna d'acqua mediante metabarcoding ha fornito un primo dataset sulla caratterizzazione della comunità ittica e di invertebrati della laguna. Questo dataset costituisce un benchmark di riferimento rispetto a cui valutare i potenziali impatti del sistema MOSE durante la piena operatività. Le analisi bioinformatiche di confronto delle sequenze campionate con un database di riferimento hanno permesso il riconoscimento delle specie in diversi siti della laguna. I risultati ottenuti su pesci e invertebrati hanno permesso di caratterizzare la comunità biologica lagunare, di identificarne i cambiamenti nel tempo e nello spazio e di rilevare specie invasive. Inoltre, è stata identificata la presenza di variazione genetica temporale in due specie ittiche e in due specie di invertebrati in relazione ai pool genetici dei popolamenti delle lagune adiacenti.

I dati genetici raccolti indicano che i popolamenti delle singole specie differiscono geneticamente principalmente rispetto all'anno o alla stagione di prelievo; questa informazione non era mai stata ottenuta per organismi della laguna di Venezia, ed indica che i popolamenti di queste specie, che sembrerebbero di grandi dimensioni considerando l'abbondanza locale, sono invece piccoli dal punto di vista genetico e soggetti a variazioni locali, cambiamenti della diversità genetica e del livello di inbreeding nel tempo. Il risultato aggiunge un elemento di attenzione rispetto al potenziale effetto futuro di una riduzione degli scambi tra laguna e mare, che potrebbe determinare variazioni nel reclutamento o riduzione complessiva della dimensione delle popolazioni lagunari, con effetti a livello di biodiversità intraspecifica. I dati raccolti permetteranno di valutare l'entità della variazione temporale nel futuro prossimo e di testare l'ipotesi che l'eventuale riduzione degli scambi laguna-mare legata all'attivazione del sistema MOSE possa condurre ad un incremento delle variazioni temporali, sia attraverso una riduzione del reclutamento, sia attraverso la riduzione complessiva della dimensione delle popolazioni lagunari.

L'attività di ricerca della **Linea 1.2** si è focalizzata sull'obiettivo di migliorare il quadro conoscitivo dello stato e del funzionamento dei sistemi all'interfaccia terra-laguna nel settore di foce di due tributari di acqua dolce in laguna nord - il Canale Osellino e il Fiume Dese - che sono due corsi idrici importanti del bacino scolante, con caratteristiche del deflusso parzialmente naturali. I processi che avvengono all'interfaccia terra-laguna (così come quelli all'interfaccia laguna-mare) influiscono sul comportamento generale della laguna, quindi la loro conoscenza è importante per la gestione dell'intero sistema. Le prime stime della portata media annua da bacino scolante e del carico solido ad essa associato risalgono al 1998-2001 (progetto DRAIN).

La Linea ha prodotto nuove osservazioni e misurazioni, grazie all'installazione di nuove stazioni con strumentazione autoregistrante e all'esecuzione di campagne di misura. In una sezione principale di ciascun tributario sono stati acquisiti in continuo i valori di portata (Q), di livello idrico e di concentrazione di particolato sospeso (SPM, mg L<sup>-1</sup>) e prodotte le stime dei valori medi annuali di Q e di carico solido (L<sup>SPM</sup>). Per la misura dei valori di SPM (e quindi di L<sup>SPM</sup>) in continuo, è stata messa a punto una metodologia basata sull'elaborazione di dati di backscatter acustico, acquisiti dalla strumentazione autoregistrante. La metodologia è potenzialmente estendibile alla rete flussometrica di acquisizione delle portate del Provveditorato OO.PP. La disponibilità

di serie temporali di Q e SPM in una stazione di misura principale, con il corredo di misure puntuali effettuate in altre sezioni, ha anche permesso di investigare la circolazione idrica nei due sistemi di foce. Inoltre, ha consentito di studiare dettagliatamente gli eventi di piena occorsi nel periodo di studio, così come gli effetti delle chiusure del MOSE sull'idrodinamica dei due tributari nella sezione di misura. Lo studio è stato corredato da un'analisi delle precipitazioni, utile per contestualizzare il periodo di misura rispetto gli anni precedenti (dal 1995) e di valutazione della relazione afflussi - deflussi, che consente di ricavare informazioni sul comportamento dei sottobacini scolanti e sulla gestione del loro deflusso da parte degli Enti preposti. Il dataset acquisito può essere utile per la gestione e la protezione di queste aree all'interfaccia terraferma-laguna e descrive uno stato di riferimento per valutare variazioni che eventualmente intercorreranno, in un prossimo futuro, sia come conseguenza dei cambiamenti climatici sia per la regolazione dei flussi alle bocche di porto, grazie al sistema MOSE.

Un secondo obiettivo generale della Linea 1.2 è stato quello di ottenere informazioni sulle dinamiche del trasporto e della sedimentazione all'interno dei sistemi di foce dei due tributari. Questa tipologia di informazioni è basilare per la protezione del naturale funzionamento della laguna, soprattutto per quanto attiene la perdita dei sedimenti fini e delle tipiche morfologie lagunari all'interfaccia con la terraferma. La laguna è soggetta ad un trend erosivo e il particolato veicolato dal bacino scolante costituisce un materiale potenzialmente importante per contrastare l'approfondimento dei fondali e l'impovertimento della morfodiversità e di habitat caratteristici nelle zone di recapito. Allo stesso tempo, laddove questo materiale si deposita in eccesso nelle aree di foce, possono verificarsi situazioni di interrimento di ghebi e canali secondari, stagnazione delle acque, difficoltà per la navigazione e - più in generale - una riduzione della possibilità di utilizzo dell'ambiente lagunare all'interfaccia con la terraferma.

L'attività di studio è stata basata sulla misura della batimetria in sezioni di riferimento e in settori a basso fondale, sull'uso di trappole per sedimento per la determinazione dei flussi di sedimentazione (apparente) e sull'analisi di carote di sedimento. In entrambi i sistemi di foce sono state osservate e studiate delle "distorsioni" morfologiche. Nell'Osellino, il sedimento si accumula in alveo - per l'intero tratto dalla foce verso la laguna più aperta - e nell'area laterale a sinistra della foce. Nell'alveo principale del Dese si è osservata una progressiva perdita di sezione liquida; per lunghi tratti, inoltre, le sezioni risultano fortemente asimmetriche. Nella prospettiva di un'attività di dragaggio, i sedimenti accumulati sono stati classificati secondo il protocollo del Ministero dell'Ambiente (8/4/93) e sulla base di linee guida internazionali (SQGs). Le "distorsioni" morfologiche evidenziano la necessità di proseguire nel tempo l'osservazione di questi sistemi e costituiscono un'occasione per ragionare su una pianificazione di interventi di ricalibrazione degli alvei e di risanamento di bassi fondali.

Gli obiettivi della **Linea 1.3** hanno riguardato lo sviluppo di strumenti modellistici che consentano un'analisi multidisciplinare della laguna e del suo bacino scolante, al fine di consentire una descrizione dei principali processi che ne influenzano l'evoluzione ambientale ed eco-sistemica. Tale suite di modelli, opportunamente validata ed affiancata da un'appropriata rete di misura delle principali variabili di interesse, consente, da un lato di descrivere in tempo reale la circolazione lagunare (<https://issos.ve.ismar.cnr.it/>) e, dall'altro, di investigare il comportamento idro-morfodinamico e biogeochimico del bacino lagunare su scale temporali comprese tra le ore e alcuni anni. In particolare, gli strumenti modellistici focalizzati sul medio e lungo periodo permettono di fornire proiezioni secondo diversi scenari di cambiamento climatico e di gestione del MOSE. I risultati conseguiti aprono nuove possibilità per attività di ricerca future ed evidenziano l'importanza della manutenzione e dell'ulteriore sviluppo delle infrastrutture esistenti. I modelli sviluppati, operativi e di rianalisi dei processi, mostrano l'importanza di disporre di una rete di misure in tempo reale delle variabili interne alla laguna, degli scambi col mare e dei flussi provenienti dal bacino scolante. Tali osservazioni possono infatti essere assimilate nei modelli operativi e utilizzate

per migliorare notevolmente la nostra capacità di descrivere i processi fisici e biogeochimici che avvengono nel sistema lagunare veneziano.

È stato calibrato e validato un modello operativo della laguna, che calcola le variabili livello, corrente, temperatura e salinità. Tale modello fornisce informazioni essenziali per la valutazione dello stato attuale e della evoluzione dell'ambiente lagunare ed è pertanto uno strumento di grande utilità per la gestione delle emergenze di carattere ambientale. La configurazione attuale del modello fornisce una previsione di tre giorni, in cui le variabili sopra elencate vengono calcolate su tutto il dominio lagunare con elevata risoluzione. Il modello è stato validato con dati di livello, temperatura e salinità in diversi periodi osservati. Inoltre, si sono svolti test di assimilazione dati che hanno evidenziato come l'assimilazione di dati misurati in tempo reale può migliorare in modo sensibile la qualità delle simulazioni modellistiche.

La Linea 1.3 ha prodotto inoltre un significativo aggiornamento e l'integrazione di strumenti numerici per la descrizione dei processi idrodinamici e biogeochimici. Sono stati inoltre sviluppati nuovi codici che consentono di quantificare i cambiamenti della dinamica del sistema lagunare in condizioni regolate. È stato messo a punto un modello ad alta risoluzione per stimare quanto l'utilizzo delle barriere mobili possa modificare le condizioni idrodinamiche del bacino e, soprattutto, gli scambi laguna-mare. Il modello permette di riprodurre l'evoluzione idrodinamica, della temperatura e della salinità del sistema e di valutare il tempo di rinnovo e l'età dell'acqua; a sua volta ciò permette di stimare eventuali conseguenze cumulate dovute a chiusure ricorrenti secondo possibili scenari. È stato inoltre implementato un modello per la stima della portata liquida e solida e dei nutrienti provenienti dal bacino scolante in laguna per i fiumi Dese e Osellino. Il modello permette di ricostruire e simulare, sulla base dei dati meteo-climatici rilevati all'interno dei bacini idrografici di interesse, i flussi di acqua e inquinanti (nello specifico i nitrati  $\text{NO}_3^-$ , derivati dalla fertilizzazione artificiale di suoli agricoli) verso la laguna sulla base delle distribuzioni di probabilità dei tempi di viaggio e dell'età dell'acqua all'interno dei bacini stessi. È stato infine implementato un modello integrato che connette senza soluzione di continuità i modelli del bacino scolante sviluppati e i modelli idrodinamici disponibili. E' così possibile rappresentare in maniera ancora più completa ed efficace le dinamiche del bacino per quanto concerne flussi, temperatura e salinità.

Il benchmarking dei modelli sviluppati e validati nel progetto, con riferimento alla capacità di descrivere la dinamica della temperatura dell'acqua all'interno della laguna, ha evidenziato come tutti gli strumenti numerici messi a punto e utilizzati nell'ambito del progetto siano in grado di riprodurre in modo soddisfacente gli scambi e il trasporto di energia. Il confronto dei risultati numerici ottenuti da simulazioni della durata di un anno, eseguite utilizzando come condizioni al contorno le forzanti meteo-marine registrate nel corso del 2019, con misure in-situ e rilievi satellitari della temperatura ha verificato la capacità dei modelli di descrivere la dinamica stagionale della temperatura nelle diverse aree del bacino lagunare. La differenza tra risultati numerici e misure in-situ risulta in genere inferiore a  $1^\circ\text{C}$ , con scostamenti leggermente maggiori durante i mesi invernali. Il confronto con la distribuzione spaziale rilevata da satellite mostra differenze tra risultati numerici e osservazioni sperimentali inferiori a  $1^\circ\text{C}$  su almeno il 50% della superficie lagunare. I confronti hanno permesso di valutare l'effetto circoscritto alle zone di immissione degli apporti idrici dal bacino scolante, concentrati in laguna nord, e il contributo non trascurabile dell'apporto termico di origine antropica dovuto agli utilizzi del polo industriale di Marghera.

Le attività di sviluppo del modello biogeochimico SHYFEM-BFM hanno incluso: l'aggiornamento di batimetria e griglia di calcolo con le informazioni disponibili più recenti; l'inserimento di nuove funzionalità per rappresentare i processi di scambio all'interfaccia acqua/sedimento; L'acquisizione delle osservazioni raccolte nel progetto per caratterizzare il sistema sia nell'anno di riferimento (2019), sia per anni precedenti (2005 e 2008). In accordo con gli obiettivi di progetto, questo ha consentito di verificare la capacità del modello biogeochimico di rappresentare il funzionamento

del sistema in diverse condizioni e di evidenziare l'importanza del continuum bacino scolante-laguna-mare. Tali verifiche sono state condotte attraverso il confronto tra diversi anni di simulazione in due scenari di laguna regolata, attuale e futuro (+50).

L'uso di modelli di circolazione idrodinamica e di risospensione e trasporto dei sedimenti ha permesso di definire, per mezzo di lunghe simulazioni numeriche, il bilancio di sedimenti per il bacino lagunare. Tali stime quantificano in circa 614.000 m<sup>3</sup>/anno la perdita di sedimento per le morfologie lagunari (sedimento eroso dai bassifondali e depositato sul fondo della rete di canali o perso verso il mare). Questa perdita potrebbe essere ridotta a 179.000 m<sup>3</sup>/anno con l'adozione delle misure previste dal non ancora attuato aggiornamento del Piano Morfologico per la laguna di Venezia. Le indagini modellistiche evidenziano inoltre, in linea con risultati sperimentali, come le chiusure delle bocche di porto in occasione dei fenomeni di Acqua Alta riducano significativamente l'apporto di sedimenti alle barene, limitandone la capacità di tenere il passo con l'innalzamento del medio mare. È dunque importante definire protocolli di gestione del sistema MOSE che ottimizzino l'efficacia delle chiusure, minimizzando gli impatti sull'ecosistema lagunare.

La presenza di acque biancastre dovute alla formazione di zolfo colloidale nella colonna d'acqua della laguna, in condizioni ipo-anossiche, è un fenomeno noto ma non ancora monitorato in modo estensivo, nonostante abbia un impatto significativo sull'ecosistema, sull'acquacoltura e sul turismo. L'obiettivo generale della **Linea 1.4** è stato l'implementazione di una metodologia, basata su tecniche di remote sensing, per individuare le zone interessate dalla presenza di acque biancastre nelle immagini satellitari di archivio e per identificare eventi in near real time. Nel corso del progetto, la metodologia implementata è stata applicata alle immagini Landsat 8 e Sentinel-2 e le aree critiche caratterizzate dalla presenza di eventi di acque biancastre sono state mappate in modo sinottico. L'analisi spaziale e temporale delle mappe ottenute dalle immagini satellitari ha rivelato che eventi multipli di acque biancastre sono stati registrati durante la maggior parte degli anni nel periodo 2013-2021. Il manifestarsi di questi eventi è limitato al periodo giugno-agosto, con una durata da uno o pochi giorni (nel 2018 e nel 2021) a più settimane consecutive. Gli anni con un numero maggiore di eventi sono il 2013 e il periodo 2015-2017, durante i quali sono stati identificati sia eventi ricorrenti nella stessa area, sia eventi in zone diverse della laguna. Nel periodo successivo (2018-2021) ci sono stati pochi eventi con estensione limitata e di breve durata.

Sulla base degli eventi osservati, è stato possibile distinguere un trend nella distribuzione spaziale delle acque biancastre: nel periodo giugno-prima metà di luglio, gli eventi si verificano principalmente nell'area più a nord-ovest, tra San Giuliano e il canale di Tesserà, mentre tra luglio e agosto le acque biancastre sono presenti soprattutto nella laguna centrale. La comprensione delle variazioni annuali e stagionali della presenza delle acque biancastre all'interno dell'ecosistema lagunare è una questione complessa che coinvolge molteplici fattori che interagiscono su diverse scale spaziali e temporali. È stato osservato che questi eventi si verificano soprattutto nelle aree in cui la copertura di macrofite è più densa (maggiore del 75%), in particolare dove sono abbondanti le macroalghe appartenenti alle specie *Ulva* spp. Infatti, l'eccessiva biomassa macroalgale, che viene rapidamente degradata da batteri aerobici eterotrofi, porta a condizioni anossiche che favoriscono il metabolismo dei batteri solfato-riduttori con produzione di solfuri, causando crisi distrofiche. Di conseguenza, la gestione e il monitoraggio della biomassa macroalgale nel periodo tardo primaverile è un aspetto chiave per evitare il verificarsi di crisi ipossiche/anossiche e quindi l'insorgere di condizioni critiche per l'ecosistema.

La mappatura delle acque biancastre derivata dalle immagini da satellite e con un'elevata risoluzione temporale e spaziale è un metodo particolarmente utile e con costi contenuti per identificare in modo sinottico le aree interessate da questi eventi

e/o per monitorarne l'evoluzione spaziale e temporale. Inoltre, la possibilità di identificare gli eventi quasi in tempo reale consente di individuare le aree critiche e attivare tempestivamente campagne di misura per la caratterizzazione dello stato ecologico delle zone interessate. Le informazioni prodotte costituiscono un nuovo dato di riferimento nel quadro conoscitivo dei processi ecologici lagunari e nella salvaguardia dei servizi ecosistemici, soprattutto considerando il possibile impatto delle acque biancastre sulla fauna acquatica. Alla luce di queste considerazioni, i risultati emersi potranno supportare gli strumenti di gestione, in quanto l'operatività del MOSE potrebbe favorire le condizioni che portano alla formazione delle acque biancastre. Per valutare i possibili scenari e le relazioni tra eventi di acque biancastre e chiusura delle barriere mobili, le mutate condizioni idrodinamiche dovute alla regolazione dei flussi alle bocche di porto dovranno essere prese in considerazione non solo per i mesi estivi (che è il periodo in cui si verificano gli eventi), ma anche per il periodo primaverile, durante il quale si ha lo sviluppo e l'espansione della biomassa macroalgale.

## 2. Risultati per la gestione della laguna di Venezia

I risultati della Tematica 1 hanno consentito di approfondire la conoscenza delle interazioni che accadono alle interfacce terra-laguna e laguna-mare e di investigare i processi idrodinamici, biogeochimici e morfologici della laguna. Le informazioni ora disponibili grazie all'implementazione dei sistemi osservativi e degli strumenti modellistici rappresentano un supporto fondamentale per la gestione dell'ecosistema lagunare e per la pianificazione di interventi morfologici, anche nel quadro dei cambiamenti climatici in atto.

È stato realizzato un **sistema osservativo che integra misure in situ, osservazioni da satellite e le informazioni da reti di monitoraggio esistenti e realizzate ad hoc** (Figura 1) per consentire una migliore comprensione delle tendenze in atto e degli effetti della gestione delle barriere mobili del sistema MOSE contribuendo al miglioramento del quadro conoscitivo sullo stato dell'ambiente lagunare. In un sistema che prevede il controllo dei flussi laguna-mare e gli interventi che influiscono sulla morfodinamica del bacino lagunare, e che quindi si configura sempre più come una laguna regolata, questo approccio integrato è in grado di osservare e descrivere i pattern del trasporto, e rappresenta uno strumento fondamentale per la gestione dell'ecosistema e la valutazione delle variazioni indotte e degli effetti a breve e medio termine degli interventi. I dati delle osservazioni sperimentali sono funzionali alla messa a punto dei modelli in grado di descrivere i processi idrodinamici, l'erosione, la deposizione e il trasporto di sedimenti e i processi biologici ad essi accoppiati, **permettendo valutazioni preliminari degli effetti sulla morfodinamica e l'ecosistema lagunare legati all'utilizzo del MOSE**. Tali valutazioni indicano come la chiusura delle bocche durante gli eventi di acqua alta riduca in modo significativo l'apporto di sedimenti alle barene (Figura 2), riducendone la stabilità rispetto ad aumenti del tasso di innalzamento del livello medio del mare. L'approccio integrato sperimentato durante il progetto per lo studio degli effetti idrodinamici legati alla chiusura delle bocche permette anche di investigare la ricaduta di strategie alternative per la ge-

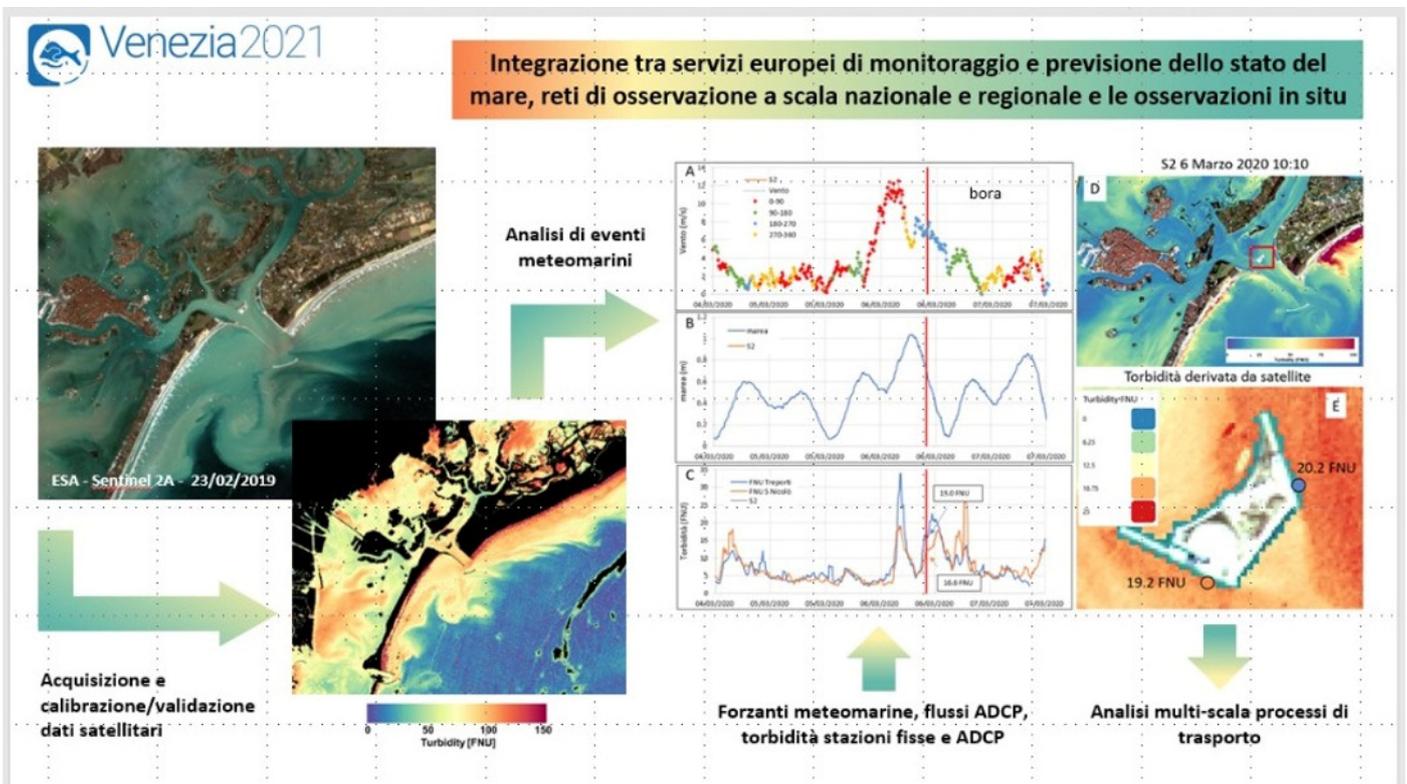


Figura 1. Schematizzazione dell'approccio integrato per lo studio del trasporto solido alle bocche di porto della laguna di Venezia. Da sinistra verso destra: selezione delle immagini da satellite, produzione e validazione delle mappe di torbidità con dati in situ da rete osservativa fissa e campagne ad hoc; acquisizione delle serie temporali delle forzanti meteomarine; analisi dei pattern di sedimenti in sospensione e studio dei processi di trasporto.

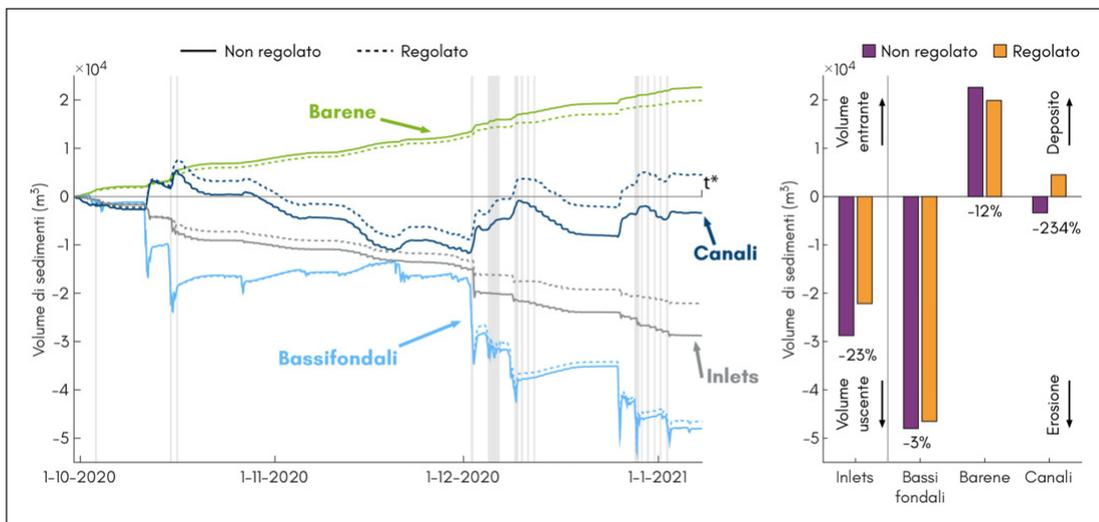


Figura 2. Effetti delle chiusure del sistema MOSE nel periodo che va da ottobre 2020 a gennaio 2021 sul bilancio dei sedimenti della laguna di Venezia. Le simulazioni, sostenute dalle osservazioni svolte in campo, mostrano riduzioni significative della deposizione di sedimento sulle barene (12% circa) e un aumento della deposizione nei canali (interrimento), a fronte di una modesta riduzione dell'erosione dei bassi fondali e un più marcata riduzione dell'erosione in prossimità delle bocche (inlets).

stione del sistema MOSE, ai fini di salvaguardare la città di Venezia e il sistema lagunare.

Per quanto riguarda l'indagine acustica sulle biomasse, è stato possibile stimare le **biomasse di organismi nectonici presenti nelle tre bocche di porto** ed evidenziarne le differenze in termini di densità, anche in relazione alle diversità morfologiche che sussistono tra i tre siti esaminati. Alla luce di queste considerazioni i risultati emersi sono importanti anche in ottica gestionale, in quanto l'utilizzo del MOSE, la sua entrata in funzione probabilmente sempre più frequente (poiché è atteso che aumentino in frequenza ed intensità i fenomeni di acqua alta) probabilmente creeranno un impatto sulle risorse monitorate.

La messa a punto di metodiche di barcoding per l'identificazione di specie da uova e larve e di metodiche di analisi del DNA ambientale nella colonna d'acqua mediante metabarcoding ha fornito un primo dataset sulla caratterizzazione della comunità ittica e di invertebrati che costituisce un **benchmark di riferimento rispetto a cui valutare i potenziali impatti del sistema MOSE durante la piena operatività**. La metodologia sviluppata permetterà di valutare l'entità della variazione temporale nel futuro prossimo e di testare l'ipotesi che l'eventuale riduzione degli scambi laguna-mare legata all'attivazione del sistema MOSE possa condurre ad un incremento delle variazioni temporali, sia attraverso una riduzione del reclutamento sia attraverso la riduzione complessiva della dimensione delle popolazioni lagunari.

La conoscenza dei processi che avvengono nelle aree all'interfaccia con la terraferma è importante per la gestione dell'intero sistema lagunare. In un'ottica di salvaguardia della morfodiversità e della funzionalità di queste aree, la **misura in continuo del deflusso e del trasporto solido da due tributari di acqua dolce** costituisce un punto chiave per quanto riguarda l'influenza del bacino scolante sullo stato e sul funzionamento della laguna. Il dataset acquisito descrive uno stato di riferimento per valutare le variazioni che eventualmente intercorreranno, in un prossimo futuro, sia come conseguenza dei cambiamenti climatici sia per la regolazione dei flussi alle bocche di porto della laguna, grazie al sistema MOSE. La metodologia per la misura della concentrazione di particolato - che è stata messa a punto utilizzando dati di backscatter acustico - può essere estesa ad altri tributari della laguna per ottenere in tempo reale i valori di deflusso e trasporto solido da una vasta percentuale della superficie del bacino scolante.

Inoltre, le informazioni raccolte sulle **dinamiche del trasporto e della sedimentazione all'interno dei sistemi di foce dei due tributari** sono importanti per la protezione

del naturale funzionamento della laguna, soprattutto per quanto attiene la perdita dei sedimenti fini e la progressiva scomparsa delle tipiche morfologie lagunari all'interfaccia con la terraferma. Alcune "distorsioni" morfologiche osservate in entrambi i sistemi di foce costituiscono un'occasione per ragionare su una pianificazione di interventi di ricalibrazione degli alvei e di risanamento di bassi fondali ed evidenziano la necessità di seguire nel tempo l'osservazione di questi sistemi (Figura 3).

Gli strumenti modellistici sono stati sviluppati, aggiornati e integrati per l'analisi multidisciplinare della Laguna e del suo bacino scolante, al fine di consentire una descrizione

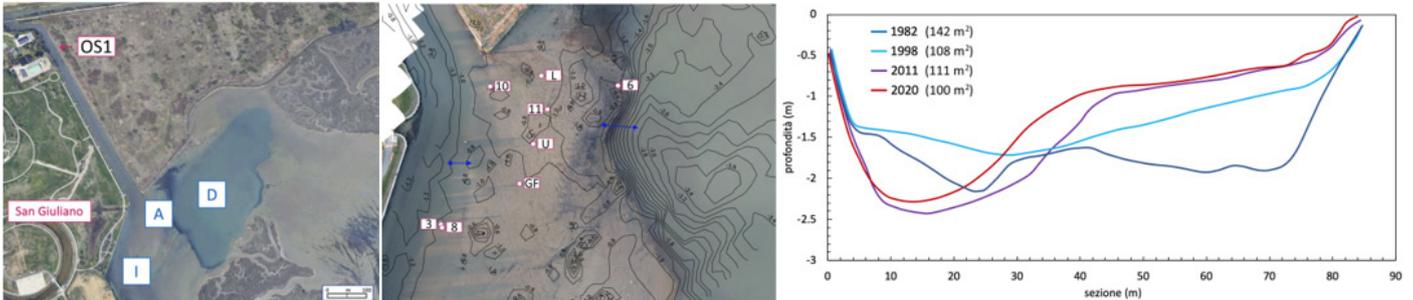


Figura 3. sinistra) Area di foce dell'Osellino: alveo interrato (I), accumulo laterale di sedimento (A), depressione del fondo (D); centro) dettaglio dell'accumulo laterale (A), con sovrapposte le linee batimetriche; destra) diminuzione nel tempo della sezione liquida nella stazione DE2 sul fiume Dese, nel periodo 1982 - 2020.

dei principali processi che ne influenzano l'evoluzione ambientale ed ecosistemica. Tale suite di modelli, opportunamente validata ed affiancata da un'appropriata rete di misura delle principali variabili di interesse, ha consentito di investigare il comportamento idromorfodinamico del bacino lagunare e di fornire proiezioni secondo **diversi scenari di cambiamento climatico e di gestione del MOSE**. Ad esempio, il modello operativo della laguna di Venezia, con previsione a tre giorni di livello, corrente, temperatura e salinità in tre dimensioni e visibile al link <https://issos.ve.ismar.cnr.it>, fornisce informazioni essenziali per la valutazione dello stato attuale e della evoluzione dell'ambiente lagunare ed è pertanto uno **strumento di grande utilità per la gestione delle emergenze** di carattere ambientale (Figura 4).

Il modello integrato, che ha accoppiato la parte idrodinamica e biogeochimica, ha consentito di **descrivere i cambiamenti della dinamica del sistema lagunare in condizioni regolate permettendo di stimare eventuali conseguenze cumulate dovute a chiusure ricorrenti secondo possibili scenari**. I modelli sono stati utilizzati per produrre degli indicatori dello stato trofico (nutrienti, TRIX, ossigeno disciolto), gli indicatori di

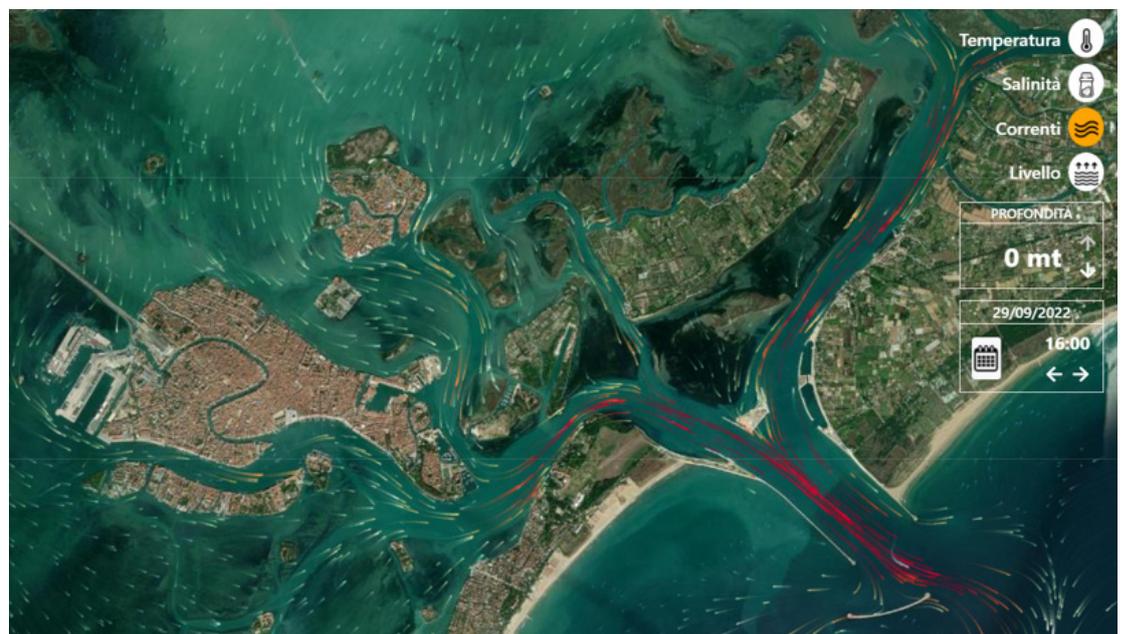


Figura 4. Visualizzazione del campo di velocità in tempo reale attraverso il sistema ISSOS (<https://issos.ve.ismar.cnr.it>).

livello (per valutare gli effetti del setup da vento) e di bilancio netto di sedimenti e gli indicatori di tempo di rinnovo ed età dell'acqua per l'anno di riferimento 2019 e per alcuni scenari di laguna regolata.

Se si considerano gli effetti del setup prodotto dal vento, i risultati modellistici, supportati dalle misure effettuate durante le prime chiusure del MOSE, hanno evidenziato come la chiusura delle bocche di porto incrementi in modo sensibile rispetto allo scenario non regolato i dislivelli interni alla laguna in condizioni di vento intenso; tale fenomeno dovrà essere preso in debita considerazione della definizione dei protocolli di gestione del sistema MOSE stesso. In relazione agli scambi di sedimenti tra mare e laguna, infine, le analisi modellistiche condotte, supportate anche da misure in situ condotte in collaborazione con la Tematica 3, hanno consentito di evidenziare come gran parte del volume di sedimenti perso dalla Laguna è espulso attraverso le bocche di porto nel corso dei pochi giorni caratterizzati da condizioni meteomarine intense. L'entrata in funzione del sistema MOSE pur riducendo, a scala di evento, la perdita istantanea netta di sedimenti verso il mare, non produrrà un beneficio diretto per la laguna avendo riscontrato come i sedimenti risospesi contribuiranno ad un accentuato interrimento dei canali lagunare e, a causa dei livelli interni ridotto proprio dall'entrata in funzione del MOSE, tali sedimenti non potranno contribuire in modo sostanziale all'accrescimento delle barene. Al netto, lo scenario di laguna regolata, potrebbe portare ad una perdita di diversità morfologica del bacino lagunare stesso.

Le potenzialità delle immagini satellitari Landsat 8 e Sentinel-2 sono state testate per **identificare, mappare e monitorare le acque biancastre, dovute alla formazione di zolfo colloidale in condizioni ipo-anossiche, in laguna di Venezia nel periodo 2013-2021**. La metodologia implementata è stata applicata sia ad immagini di archivio, sia in near real time per individuare in modo sinottico le aree critiche caratterizzate dalla presenza di eventi di acque biancastre e attivare rapidamente e tempestivamente eventuali campagne di misura per la caratterizzazione dello stato ecologico delle zone interessate. L'analisi spaziale e temporale delle mappe di acque biancastre ha rivelato che eventi multipli sono stati registrati nella laguna di Venezia durante la maggior parte degli anni nel periodo 2013-2021 (Figura 5).

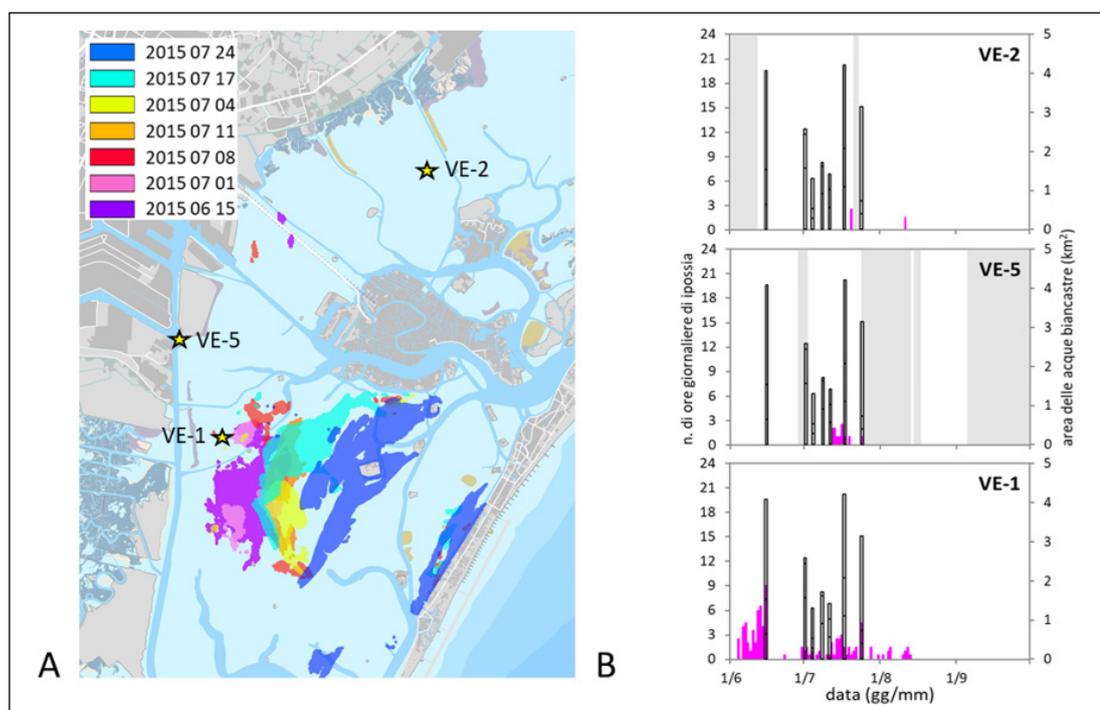


Figura 5. Eventi di acque biancastre riferiti all'anno 2015. A) Mappa della laguna di Venezia in cui sono riportate le aree interessate dalla presenza di acque biancastre; B) Eventi di ipossia misurati in 3 stazioni della rete SAMANET (in magenta numero di ore giornaliere con valori di ossigeno disciolto minori di 3 mg/l) e aree interessate dalla presenza di acque biancastre (in nero). Le aree in grigio indicano i periodi in cui non sono disponibili i dati in situ.

È stato osservato che gli eventi di acque biancastre si verificano soprattutto nelle aree in cui la copertura di macrofite è più densa (cioè con copertura maggiore del 75%), in particolare dove sono abbondanti le macroalghe appartenenti alle specie *Ulva* spp. Nel quadro dei cambiamenti climatici globali e dei loro effetti a scala locale, l'utilizzo del MOSE sarà sempre più frequente, con possibili conseguenze sullo stato ecologico dell'ecosistema lagunare. Di conseguenza, la gestione e il monitoraggio della biomassa macroalgale nel periodo tardo primaverile è un aspetto chiave per evitare il verificarsi di crisi ipossiche/anossiche e quindi l'insorgere di condizioni critiche per l'ecosistema.

Alla luce di queste considerazioni, i risultati emersi possono supportare gli strumenti di gestione, in quanto l'operatività del MOSE potrebbe favorire le condizioni che portano alla formazione delle acque biancastre.

### 3. Sistema osservativo

Nell'ambito delle attività della Tematica 1 c'è stato un notevole investimento di risorse economiche e di personale per contribuire allo sviluppo di un sistema osservativo integrato per lo studio e il monitoraggio di parametri idrodinamici, biogeochimici e morfologici dell'ecosistema lagunare e degli scambi con il bacino scolante e il mare Adriatico. Ad esempio, i dati raccolti durante campagne di misura, forniti da reti automatiche di monitoraggio in continuo, output di modelli operativi e prodotti da satellite rappresentano le diverse tipologie di informazioni derivate dalle 4 Linee di ricerca della Tematica 1, che potrebbero essere incluse in un sistema osservativo integrato della laguna di Venezia.

Le attività hanno incluso la progettazione, l'installazione e il funzionamento delle reti automatiche di acquisizioni di dati in situ, a cui si è aggiunto un ulteriore contributo in termini di mesi/uomo per fornire misure di parametri geofisici calibrati e validati, con controllo sulla qualità dei dati. I risultati ottenuti hanno dimostrato l'utilità delle reti in continuo per lo studio dei processi di trasporto di sedimenti e delle interazioni dei flussi alle interfacce della laguna con il bacino scolante e il mare Adriatico. Per consentire il monitoraggio dell'evoluzione degli scambi di particellato fra laguna e mare e la caratterizzazione del trasporto in sospensione si ritiene necessario mantenere in esercizio le 4 stazioni torbidimetriche installate alle bocche di porto in corrispondenza di ciascuna delle sezioni MOSE nell'ambito della Linea 1.1. Inoltre, per ottenere delle serie temporali continue e rappresentative della portata, del carico in sospensione e del flusso di particellato a partire dai dati dei profilatori acustici ADCP presenti alle bocche di porto e gestiti dal CVN-Provveditorato è fondamentale applicare un protocollo di misura per il monitoraggio del flusso identificato, al momento non adottato dal gestore.

Anche le attività di misura in continuo della portata e del carico solido con la strumentazione autoregistrante tuttora installata nel canale Osellino e nel fiume Dese dovrebbero proseguire, per dare continuità alle serie temporali acquisite nell'ambito della Linea 1.2. Per quanto riguarda il Canale Osellino, si ricorda che questo tributario non rientra fra quelli monitorati con la rete flussometrica del Provveditorato OO.PP. per la misura della portata dei tributari del bacino scolante. Inoltre, dal centro di Mestre alla foce (ed incluso il Canale San Giuliano - Tessera), l'Osellino è attualmente oggetto di un rilevante intervento morfologico e continuare l'acquisizione di dati in continuo alla foce sarebbe utile per valutare gli effetti dell'intervento nel quadro ambientale generale. La sezione sul Fiume Dese, invece, è ubicata a valle di due stazioni di misura della rete flussometrica, rispettivamente sul Fiume Zero e sullo stesso Dese. Tuttavia - a differenza delle sezioni a monte - la strumentazione installata permette la misura del trasporto solido, che è un dato importante per la conoscenza e la gestione della laguna. A tale proposito, si auspica che anche la rete flussometrica del Provveditorato OO.PP. possa iniziare ad acquisire questa tipologia di dati.

Risulta quindi strategico capitalizzare le risorse investite e mantenere operative le reti strumentali sia alle bocche di porto, sia nei tratti terminali del canale Osellino e del fiume Dese, per ottenere serie temporali continuative in modo da identificare eventuali alterazioni significative dovute alle chiusure del sistema MOSE, alle modificazioni morfologiche e ai cambiamenti climatici.

Nell'ambito della Linea 1.3 è stata prodotta un'interfaccia per la consultazione dei risultati del modello operativo che descrive l'evoluzione del sistema lagunare Veneziano. L'interfaccia, visualizzabile al link <https://issos.ve.ismar.cnr.it/> e raggiungibile sia dal sito ufficiale del progetto Venezia2021 che dal sito di CNR - ISMAR, consente di consultare tutte le variabili descritte dal modello, con aggiornamenti giornalieri. È possibile visualizzare sia la previsione per tre giorni sia lo storico di periodi precedente. L'interfaccia è fruibile sia da PC che da smartphone e consente di visualizzare i valori locali di una variabile cliccando nel punto di interesse, di ingrandire o restringere la visuale e di selezionare vari livelli verticali. Questo è uno strumento che fornisce informazioni essenziali per la valutazione dello stato attuale e della evoluzione dell'ambiente lagunare ed è pertanto di grande utilità per la gestione delle emergenze di carattere ambientale.

Nelle 4 Linee di ricerca della Tematica 1 sono state prodotte e utilizzate le immagini satellitari per validare gli output dei modelli, per identificare la presenza di acque biancastre dovute ad eventi di anossia e come supporto per descrivere le condizioni ambientali, lo stato ecologico e i processi idrodinamici e biogeofisici, anche in corrispondenza di eventi meteomarinari, come ad esempio mappe di torbidità, mappe di temperatura superficiale dell'acqua, mappe di acque biancastre, mappe di copertura di vegetazione sommersa. Questi prodotti derivati da satellite potrebbero essere aggiornati annualmente e/o stagionalmente o mensilmente, oppure in near real time per il periodo estivo (nel caso delle mappe di acque biancastre) o anche nel caso di eventi eccezionali. L'analisi delle mappe di torbidità, ad esempio, ha fornito nuove informazioni nel quadro conoscitivo dei processi di trasporto di sedimenti, quali ad esempio i flussi di particolato da mare verso laguna e l'interazione fra i getti uscenti dalle bocche di porto e la corrente litoranea, dati di sicura utilità anche per le valutazioni modellistiche sulla circolazione e morfodinamica lagunare. La mappatura delle acque biancastre e la loro identificazione in near real time nell'ambito della Linea 1.4, per attivare rapidamente le campagne di misura nelle aree interessate, ha dimostrato di essere un metodo utile e con costi contenuti per individuare le aree interessate da questi eventi e/o per monitorarne l'evoluzione spaziale e temporale.

Anche per quanto riguarda i dati raccolti durante campagne di misura sarebbe importante dare continuità sia ai test effettuati, sia ai monitoraggi. Per la morfodinamica delle bocche di porto e dei canali di grande navigazione è importante dare continuità ai monitoraggi delle batimetrie ad alta risoluzione per valutare l'evoluzione nel tempo nella fase operativa del sistema MOSE. Ulteriori indagini potrebbero essere volte a studiare i flussi di organismi transitanti per le bocche di porto con un echosounder fisso orizzontale in una o possibilmente in più bocche di porto, al fine di valutare gli ingressi e le uscite dei target per lunghi intervalli temporali. L'analisi del DNA ambientale rappresenta un metodo innovativo per la stima ed il monitoraggio della diversità biologica e si presta al monitoraggio sistematico mediante stazioni fisse con risultati promettenti e semplicità di utilizzo. È importante monitorare il cambiamento genetico nel tempo rispetto alle modificazioni degli scambi laguna/mare attese in particolare negli scenari futuri di frequente e prolungata chiusura del sistema MOSE, che potrebbe aumentare l'isolamento delle popolazioni lagunari e ridurre il reclutamento a livello locale.

## 4. Ulteriori approfondimenti

Lo studio dei pattern di torbidità ottenuti dalle immagini satellitari hanno rivelato come le condizioni di moto ondoso movimentino grandi quantità di sedimenti lungo i litorali e la spiaggia sommersa che includono sabbie, ma anche una importante frazione di materiale fine in sospensione. Questo particolato, in movimento lungo la costa per azione della corrente litoranea generata dal vento, può entrare in laguna seguendo il flusso di marea crescente e la frazione fine può essere trasportata a maggiore distanza contribuendo al ripascimento delle aree più interne. Questo fenomeno si osserva frequentemente alla bocca di porto di Lido, dove la spiaggia sommersa di Punta Sabbioni ha già oltrepassato la testata del molo nord e quindi non rappresenta più un ostacolo al trasporto litoraneo. Nelle altre bocche il trasporto verso l'interno della laguna risulta invece inibito dall'azione dei moli guardiani che deviano la corrente costiera verso il largo. È importante investigare il ruolo di questo mancato apporto nell'evoluzione morfologica dei bacini centrale e meridionale della laguna, dove si è osservato un forte approfondimento nel periodo storico più recente.

A questo proposito è auspicabile integrare alle attività di campo un'indagine modellistica che integri queste informazioni simulando gli effetti della presenza dei moli nel trasporto verso la laguna dei sedimenti durante gli eventi meteomarinari considerando il mare come una potenziale sorgente di materiale fine, diversamente da quanto fatto nelle valutazioni del passato. È necessario anche comprendere l'evoluzione storica dei flussi e della sedimentazione/erosione simulando le condizioni del trasporto nell'epoca precedente alla realizzazione dei moli guardiani: una miglior conoscenza delle relazioni fra il trasporto litoraneo e il flusso di marea in condizioni naturali potrà fornire conoscenze fondamentali, per individuare misure correttive per lo scenario attuale, considerando anche gli effetti della gestione del flusso dovuti all'operatività delle barriere mobili.

Riguardo la fase operativa del sistema di barriere mobili è importante e auspicabile anche la prosecuzione delle indagini sul trasporto in condizioni di chiusura del sistema MOSE con la metodologia già consolidata durante il progetto.

Nell'ambito dello studio dei processi erosivi innescati dal traffico navale è risultato particolarmente interessante il rinvenimento delle barene preesistenti la realizzazione delle casse di colmata e del canale Malamocco-Marghera, esumate dai processi erosivi. Per la loro particolare collocazione altimetrica queste strutture morfologiche rappresentano un elemento da considerare con particolare attenzione nel contesto dello studio della dinamica dei sistemi di barena ed è opportuno procedere, prima del loro completo smantellamento per erosione, ad indagini geologiche e geo-stratigrafiche di dettaglio. Queste informazioni, integrate da studi sulla compattazione e sull'erosione delle strutture, potranno fornire conoscenze utili alla comprensione della morfodinamica di questi sistemi.

Nelle premesse di disporre dei valori di  $Q$  e concentrazione SPM registrati in continuo nelle sezioni di misura sull'Osellino e sul Dese - e possibilmente di altri tributari - le immagini satellitari potrebbero essere più concretamente utilizzate per valutare la dispersione in laguna del particolato originato dal bacino scolante, con particolare attenzione agli eventi di piena. Allo scopo, sarebbe necessaria un'attività di confronto e calibrazione fra i dati di SPM e i valori di torbidità misurabili da satellite.

Un altro tema incentrato sulla salvaguardia dei sistemi di foce lagunari è quello del controllo delle batimetrie in sezioni di riferimento, che andrebbe programmata con periodicità prestabilita e/o in seguito ad eventi di piena rilevanti. Grazie alla strumentazione single beam installata su supporti autonomi (Autonomous Surface Vehicles, ASVs), questa tipologia di misure può essere effettuata in tempi relativamente brevi sia in alveo che nei bassi fondali lagunari. L'attività consentirebbe di mantenere aggiornate le mappe batimetriche nelle zone di immissione di acque dolci in laguna - un aspetto utile anche per i modelli morfodinamici - e può essere accompagnata dal prelievo ad hoc di

carote di sedimento, per indagini strutturali e di proxy della contaminazione.

L'individuazione delle acque biancastre da immagini satellitari rappresenta una tecnica innovativa e a costo contenuto per la mappatura e il monitoraggio delle aree affette dalla formazione e presenza di zolfo colloidale. La metodologia può supportare i dati forniti dalle reti di monitoraggio in continuo e dalle campagne di misura, perché offre un quadro sinottico e quasi in tempo reale, con un'elevata risoluzione spaziale e temporale. L'analisi spaziale e temporale degli eventi di presenza delle acque biancastre dovrebbe considerare ulteriori variabili ambientali e forzanti meteomarine, quali ad esempio tempo di rinnovo ed età dell'acqua, input di nutrienti, misure di H<sub>2</sub>S e di ossigeno disciolto nei sedimenti superficiali e nella colonna d'acqua, che possono derivare sia da test e misure sperimentali, sia dagli output di modelli idrodinamici ed ecologici, per investigare le condizioni della colonna d'acqua e del sedimento e gli scambi alle interfacce (acqua/sedimento e aria/acqua) e per comprendere i fattori che influenzano lo sviluppo macroalgale, in particolare delle Ulvacee. Ciò permetterà anche di evidenziare i possibili



## Tematica 2.

# Sedimenti, inquinamento chimico e interazione con gli organismi lagunari

Elena Semenzin (UNIVE-DAIS)

## 1. Risultati della tematica

L'obiettivo generale della Tematica 2 è stato quello di approfondire la conoscenza relativa alla contaminazione del sedimento lagunare e alle dinamiche che la influenzano, anche in relazione all'entrata in funzione del MOSE, attraverso l'integrazione mirata di approcci sperimentali e modellistici che permettano di indagare specifiche problematiche finora poco o nulla studiate. Le indagini proposte includevano inoltre le attività produttive legate all'allevamento della vongola *Ruditapes philippinarum*.

Le attività di ricerca sono state sviluppate secondo le seguenti tre Linee:

- Linea 2.1. Qualità del sedimento lagunare a supporto della sua gestione sostenibile.
- Linea 2.2. Inquinanti prioritari e rilascio di sostanze pericolose dal sedimento.
- Linea 2.3. Contaminanti emergenti in laguna, esposizione ed effetti.

Molti dei risultati raggiunti nelle tre Linee hanno contribuito a migliorare il "Quadro conoscitivo" (OP1) sull'ecosistema lagunare. Si possono citare: per la Linea 2.1, la stima delle "Concentrazioni pre-industriali" di otto elementi in tracce (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) nei sedimenti lagunari, la valutazione degli effetti cronici legati alla presenza di miscele di contaminanti nei sedimenti dei canali navigabili, la mappatura dei sedimenti superficiali basata sul potenziale metabolico dei microorganismi per geni legati ai metalli pesanti e agli inquinanti in generale, e lo studio del contributo della frazione ultrafine del sedimento risospeso nell'indurre effetti avversi in organismi acquatici target; per la Linea 2.2, la misurazione della domanda di ossigeno del sedimento (SOD) e la misura del tasso di metilazione dell'Hg effettuate per la prima volta nella laguna di Venezia e lo studio sul tasso di produzione di metilmercurio nel sedimento; per la Linea 2.3, la caratterizzazione chimica ed ecotossicologica di acque superficiali e sedimenti della laguna di Venezia per contaminanti emergenti quali composti farmaceutici, fragranze, pesticidi e prodotti legati all'agricoltura, prodotti industriali, e microplastiche.

Per quanto riguarda lo sviluppo di "Modelli matematici" (OP2), nell'ambito della Linea 2.2 è stato sviluppato un modello che ha permesso di ricostruire le dinamiche passate dei processi di trasformazione del mercurio e di elaborare scenari futuri in un contesto di cambiamento climatico.

Per l'obiettivo prioritario "Strumenti di gestione" (OP3) vanno citati: per la Linea 2.2, la misurazione della SOD che fornisce una base conoscitiva sui processi che portano al verificarsi di crisi anossiche nello specchio lagunare; per la Linea 2.3, la definizione di una Watch List lagunare, costruita attraverso un'analisi di rischio ecologico di screening basata sul metodo degli Hazard Quotient (HQ) (ovvero sull'integrazione di dati di esposizione e di effetto relativi ai contaminanti emergenti considerati), oltre che utilizzando ulteriori criteri, organizzati in un diagramma di flusso, per definire la "priorità" di inserimento di ciascuna sostanza nella Watch List. Tale diagramma si presta ad essere usato anche in futuro, qualora diventassero disponibili ulteriori dati sui contaminanti studiati o su ulteriori composti, in quanto copre tutte le casiste possibili in termini di disponibilità dei dati e di loro valori.

"Indicatori" (OP4) sono stati sviluppati sia nella Linea 2.1, dove una nuova Linea di Evidenza basata sui risultati di analisi genomiche (LoE Trascrittomica) in specie sentinella (R.

*philippinarum*) è stata costruita ed inserita in un approccio Weight of Evidence (WoE) per l'analisi di rischio ecologico dei sedimenti, sia nella Linea 2.3, dove sono stati definiti dei criteri specifici per l'identificazione delle sostanze da inserire nella Watch List lagunare.

Infine, per quanto riguarda l'obiettivo "Visione Strategica" (OP5), la Linea 2.1 ha condotto una prima applicazione di un modello WoE (comprensivo della nuova LoE Trascrittomico) che, in un'ottica di revisione dei criteri di classificazione del sedimento della laguna di Venezia, ha dimostrato come l'integrazione delle evidenze di effetto e di esposizione degli organismi possa aiutare a ottenere un quadro complessivo più accurato e, quindi, una gestione più informata dei sedimenti lagunari. Sempre nella Linea 2.1, le attività di analisi e valutazione condotte in diverse aree di molluschicoltura in prossimità di Chioggia hanno permesso di evidenziare un quadro di notevole complessità, nell'ambito del quale l'applicazione della metodologia WoE, da un lato, e la raccolta di parametri chimico-fisici, di informazioni biometriche e sulla mortalità, anche mediante l'impiego di sonde multiparametriche e biosensori dall'altro, ha dimostrato l'importanza dell'utilizzo di approcci complementari e la necessità di continuare ad effettuare campagne di monitoraggio nelle aree di allevamento di molluschi bivalvi. Infine, l'insieme delle informazioni e degli strumenti sviluppati nella Linea 2.2 ha arricchito il quadro conoscitivo in relazione ai potenziali impatti sulla colonna d'acqua e sugli organismi acquatici lagunari, anche in considerazione degli scenari di cambiamento climatico, contribuendo alla visione strategica generale ed integrata del sistema lagunare.

## 2. Risultati per la gestione della laguna di Venezia

La Linea 2.1 si è maggiormente focalizzata sulla valutazione della qualità dei sedimenti ed ha prodotto due principali risultati di interesse. Il primo riguarda la metodologia WoE applicata ai sedimenti dei canali navigabili al fine di ottenere una più completa caratterizzazione di tali materiali e indirizzarne una corretta gestione a seguito di attività di dragaggio. Il secondo è la mappatura dei sedimenti superficiali basata sul potenziale metabolico dei microorganismi, che ha evidenziato come le aree cronicamente inquinate siano da considerarsi hotspot per i geni di resistenza ad antibiotici e metalli pesanti, con implicazioni anche in questo caso sulla gestione dei sedimenti in laguna.

Nella Linea 2.2, è stato messo in evidenza che, se le chiusure del MOSE inizieranno ad avvenire a temperature più elevate rispetto a quelle tipiche del periodo autunno-invernale (per effetto del cambiamento climatico), il sedimento eserciterà un ruolo negativo importante sul bilancio dell'ossigeno disciolto (DO), soprattutto nei siti lagunari più

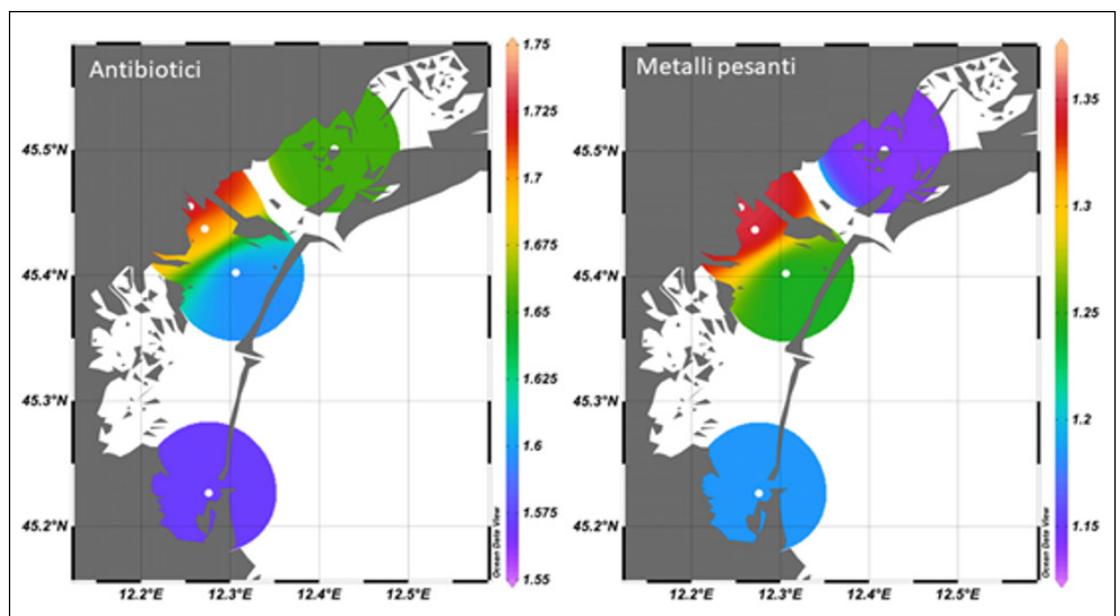


Figura 1.  
Abbondanza relativa  
media dei geni che  
codificano per tratti  
di resistenza.

confinati (cioè con scarso ricambio idrico, sedimenti più fini e più ricchi di materia organica). Inoltre, la stagnazione delle acque e l'aumento della temperatura sono fattori che incidono anche sul rilascio dal sedimento all'acqua lagunare del metilmercurio (MeHg), una specie neurotossica particolarmente pericolosa in quanto rapidamente assimilabile dagli organismi acquatici. Inoltre, poiché il MeHg viene biomagnificato nella catena alimentare, cioè tende ad accumularsi con maggiore concentrazione attraverso la catena alimentare, dalle piante, ai produttori primari, fino ai livelli superiori, si concentra in particolare nei tessuti delle specie ittiche delle quali ci nutriamo.

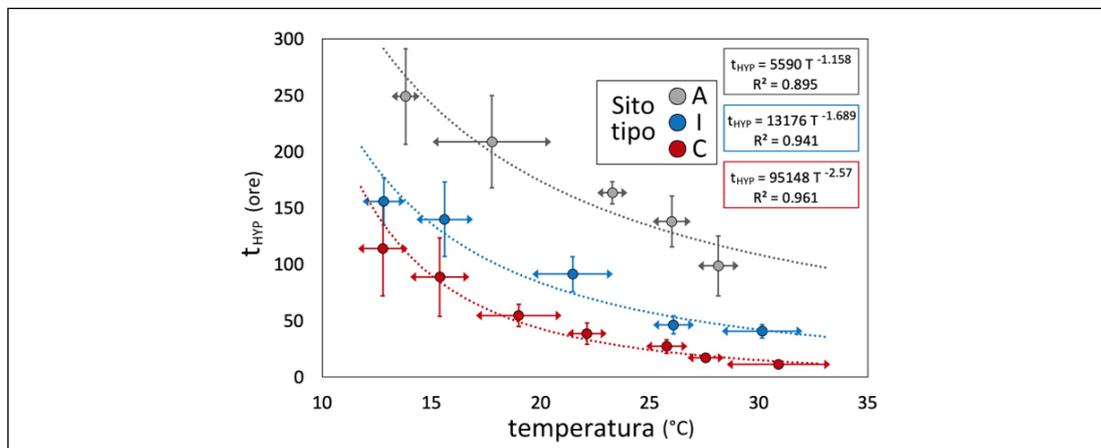
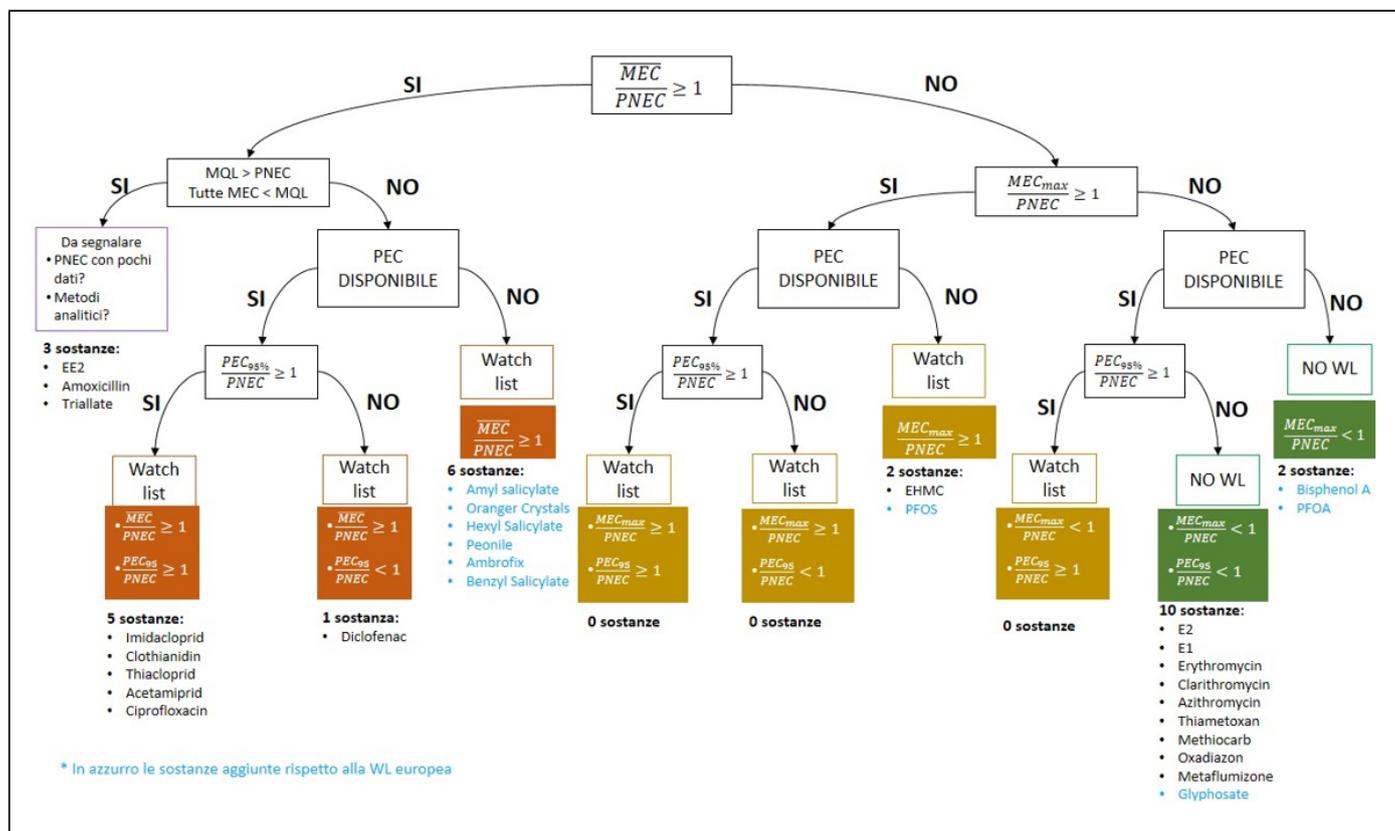


Figura 2. Consumo di ossigeno disciolto nella colonna d'acqua per effetto del sedimento alla chiusura del sistema MOSE, in 3 tipologie di siti lagunari (A = laguna aperta, I = intermedi, C = marginali). Tempo ( $t_{HYP}$ ) stimato per il raggiungimento delle condizioni di ipossia ( $2.80 \text{ mg L}^{-1}$ ) a partire dalla saturazione ( $9.17 \text{ mg L}^{-1}$ ).

Infine, la Watch List sviluppata nella Linea 2.3 è immediatamente applicabile ai fini di una gestione dell'ecosistema che necessita, per essere completa ed accurata, di prendere in considerazione, oltre alle sostanze prioritarie, anche i contaminanti emergenti e le microplastiche. La Watch List lagunare relativa al comparto acqua che è stata ottenuta risulta composta da quattro prodotti fitosanitari (Imidacloprid, Clothianidin,

Figura 3. Diagramma a flusso per la definizione della Watch List lagunare con la definizione delle sostanze da inserire.



Thiacloprid, Acetamiprid, tutti appartenenti alla classe dei neonicotinoidi), un farmaco (Diclofenac), un antibiotico (Ciprofloxacina), un prodotto industriale (EHMC), un PFAS (PFOS), e tutte le fragranze considerate (Amyl salicylate, Oranger Crystals, Hexyl Salicylate, Peonile, Ambrofix, Benzyl Salicylate), e rappresenta un primo passo per supportare una migliore comprensione e gestione dei processi di contaminazione chimica dell'ambiente lagunare.

### 3. Sistema osservativo

Le attività di ricerca della Tematica 2 non hanno previsto l'installazione di strumenti di misurazione. Si ritiene comunque importante suggerire la continuazione degli studi relativi a:

- Monitoraggio degli effetti cronici da esposizione a contaminanti (organici ed inorganici) in organismi acquatici al fine di predisporre dei piani di gestione a lungo termine dell'ambiente lagunare.
- Mappatura dei sedimenti superficiali basata sul potenziale metabolico dei microrganismi per geni legati ai metalli pesanti e agli inquinanti in generale. I dati prodotti consentiranno di produrre Metagenome-Assembled Genomes (MAGs), ossia dei genomi individuali ricostruiti dai dati metagenomici. I MAGs, combinando tassonomia, filogenesi e funzioni, consentiranno il rilevamento e la stima dell'abbondanza di specifici taxa e dei loro potenziali metabolici, migliorando la comprensione dei membri della comunità procariotica dei sedimenti della laguna di Venezia.
- Monitoraggio nelle aree di allevamento di molluschi bivalvi. Negli ultimi vent'anni si è infatti assistito ad una drastica riduzione degli stock naturali e di allevamento di vongole filippine, con importanti ricadute economiche per l'intero settore. I motivi di questo declino non sono tutt'ora chiari pur avendo importanti indicazioni, anche dalle campagne effettuate durante il progetto, sul ruolo del cambiamento climatico in atto ed in particolare sulle sempre più frequenti ondate di calore e l'aumento della salinità. L'attivazione sempre più frequente delle barriere potrebbe comportare modificazioni importanti nei parametri chimico-fisici di queste aree con importanti ripercussioni sugli animali, con la necessità di fornire nuove linee guida sito-specifiche rivolte ai diversi processi di semina e ingrasso degli animali.
- Approfondimento sulla dipendenza della domanda di ossigeno del sedimento (SOD) da altri fattori, oltre alla temperatura della colonna d'acqua, ovvero dalla disponibilità e dalle caratteristiche della materia organica e dalla struttura e dalla dinamica delle comunità bentoniche e microbiche. Tale analisi potrebbe essere condotta in siti opportuni, utilizzando le camere bentiche già predisposte.

### 4. Ulteriori approfondimenti

Si evidenzia la necessità di:

- ulteriori applicazioni per testare l'affidabilità del metodo WoE col fine di tradurre le classi di pericolo in concrete azioni di movimentazione e gestione dei sedimenti. In un'ottica più generale di sviluppo futuro, nelle applicazioni in situ del WoE è auspicabile l'elaborazione di un metodo per la valutazione della qualità del sito di controllo, un aspetto che faciliterebbe una più robusta inclusione della linea di evidenza trascrittomica nel ventaglio di indagini il cui utilizzo è già consolidato. Si ritiene inoltre utile, al fine di una migliore caratterizzazione del rischio, un approfondimento sull'influenza che i processi idrodinamici e di trasporto dei sedimenti esercitano sulla qua-

lità chimica dei sedimenti e sulla biodisponibilità dei contaminanti, sia nei canali navigabili che nelle zone di basso fondale (ad esempio le aree di allevamento di bivalvi) soggetti a diverse dinamiche di deposizione e risospensione;

- ulteriori studi con altri organismi bersaglio per supportare le conclusioni relative al ruolo della frazione ultrafine come carrier di inquinanti. È tuttavia importante sottolineare che lo sviluppo di protocolli per condurre saggi di tossicità con questo tipo di matrici ambientali è particolarmente complesso, come è stato osservato per i saggi di embriotossicità con *Mytilus galloprovincialis*;
- approfondire l'impatto dell'aumento di metilmercurio dal sedimento sull'intera catena alimentare;
- sviluppare ulteriormente il modello del mercurio ad alta risoluzione implementato in SHYFEM, al fine di rappresentare la dinamica di altre classi di inquinanti;
- calibrare il modello di bioaccumulo per *Ruditapes philippinarum*, su dati sperimentali di bioaccumulo, specifici per la Laguna, in modo da poterlo utilizzare come strumento gestionale;
- ulteriori approfondimenti relativi ai possibili effetti ecotossicologici su specie estuarine di contaminanti emergenti (in particolare EE2, Amoxicillina e Triallato), e miglioramenti nei metodi analitici utilizzabili;
- approfondire la presenza in acque e sedimenti di additivi utilizzati nelle plastiche e di plasticizzanti. Questi composti possono essere dei proxies della presenza di polimeri specifici in ambiente, permettendo di approfondire lo studio delle loro sorgenti e dei loro percorsi;
- studiare i possibili rischi per la salute umana associati alla presenza di contaminanti emergenti nella laguna di Venezia, ad esempio valutando l'importanza dell'accumulo lungo la rete trofica per i composti maggiormente bioaccumulabili.



# Tematica 3.

## Forme, habitat e comunità acquatiche lagunari

Carlotta Mazzoldi (BIO-UNIPD)

### 1. Risultati della tematica

La Tematica 3 “Forme, habitat e comunità acquatiche lagunari” si inserisce negli obiettivi prioritari del Programma di contribuire al quadro conoscitivo dello stato attuale della laguna di Venezia come base per la valutazione dell’effetto degli eventi di chiusura del sistema MOSE, anche grazie all’utilizzo di indicatori di qualità ambientale, e, attraverso un approccio sperimentale e modellistico, contribuire alla previsione degli effetti della chiusura del sistema MOSE sull’ecosistema lagunare tenendo conto anche dei cambiamenti climatici.

Nell’ambito della comprensione degli effetti degli eventi di chiusura del sistema MOSE sul sistema lagunare veneziano, questa Tematica si è concentrata sulla valutazione dei cambiamenti legati ai fenomeni di subsidenza, ai processi erosivi e deposizionali, alle variazioni dei flussi d’acqua, e sulle conseguenze a livello di habitat e di comunità acquatiche, attraverso una combinazione di osservazioni di campo e campionamenti delle diverse componenti e di specie modello, rilevamenti batimetrici con strumenti multibeam ad altissima risoluzione, osservazioni telerilevate da veicoli aerei autonomi e da satellite, sperimentazione in mesocosmi, modellazione matematica e prove di carico.

L’integrazione dei risultati ottenuti all’interno delle tre Linee di questa Tematica ha permesso di evidenziare la forte eterogeneità del sistema lagunare in tutte le sue componenti, abiotiche e biotiche.

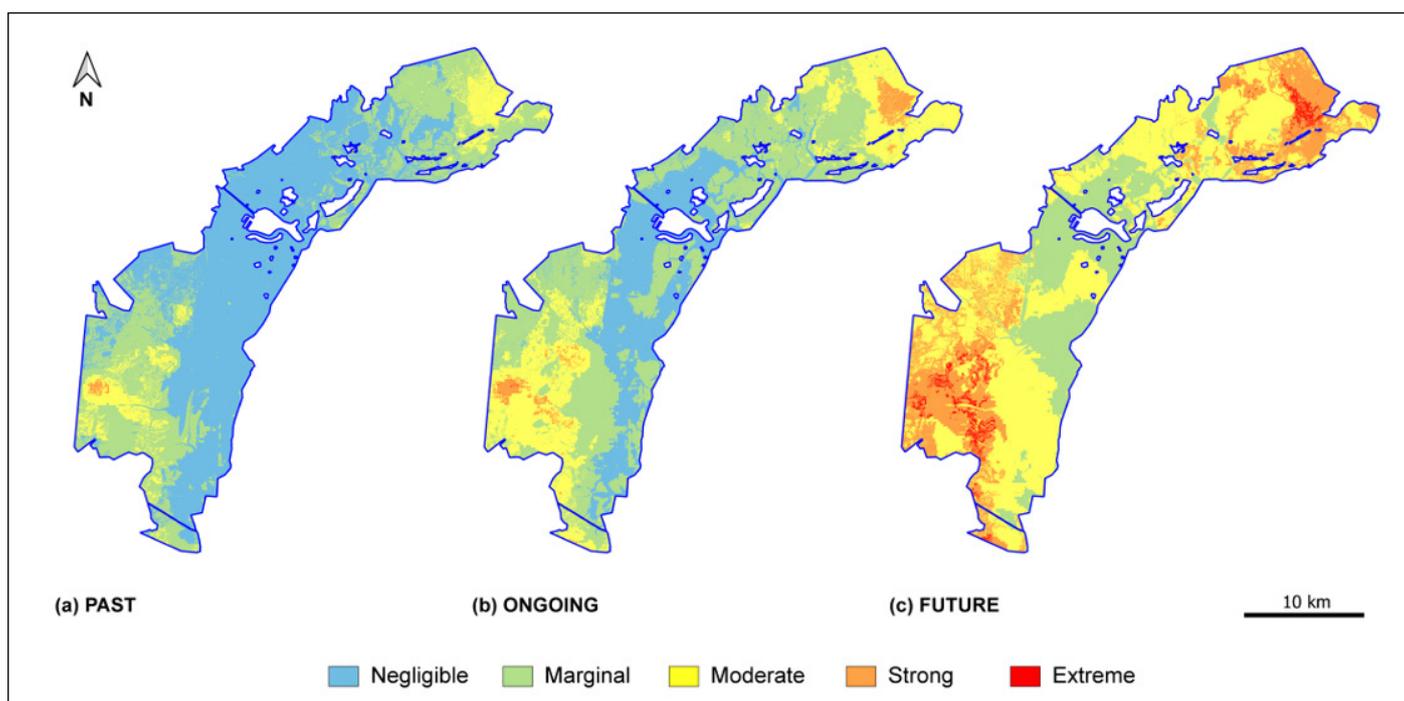
Il sistema barenale, che costituisce un importante ambiente lagunare capace di fornire una serie di servizi ecosistemici, dal sequestro di carbonio ad habitat importante per la fauna acquatica e l’avifauna, ha mostrato una elevata variabilità geologica e geomeccanica del sottosuolo accompagnata da una altrettanto elevata variabilità nella sedimentazione. Se si considerano i diversi fattori (subsidenza, erosione e sedimentazione), si evidenzia come vi siano 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. Inoltre 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 risultano molto diversi nelle varie barene analizzate. Grazie alla disponibilità di dati pregressi, le analisi condotte a scala di bacino hanno evidenziato una situazione di sostanziale stabilità batimetrica nella laguna Nord (canale San Felice), dove il 99% dell’area studiata del canale è rimasta stabile dal 2013 al 2021, con alcune aree in deposizione, mentre, per quanto riguarda la laguna centrale (canale Malamocco-Marghera), il 29% dell’area studiata ha subito erosione durante lo stesso periodo.

Le barene hanno una straordinaria capacità di sequestrare ed immagazzinare il carbonio organico, che varia tra 49 e 113 ton di C per km<sup>2</sup> l’anno (con valor medio 85 + 25 ton C /km<sup>2</sup> /anno), contribuendo a limitare l’effetto serra. Tuttavia questa capacità di sequestrare ed immagazzinare il carbonio risulta molto variabile a seconda delle barene analizzate.

Anche i risultati relativi alla componente biologica rispecchiano tale eterogeneità. Questo progetto, in particolare, ha analizzato la componente nectonica, della quale fanno parte anche diverse specie di valore commerciale per la pesca tradizionale lagunare. Anche per quanto riguarda la componente nectonica, gli habitat di basso fondale del sottobacino centrale sembrano avere un ruolo minore rispetto alla Laguna settentrio-

nale e meridionale, in particolare come aree di nursery per le specie di migratori marini. Eterogeneità a scala lagunare si evidenzia anche a livello intraspecifico nelle specie ittiche modello lagunari studiate in questo progetto, il go *Zosterisessor ophiocephalus* e il latterino *Atherina boyeri*, con differenze nella struttura delle popolazioni nelle diverse aree, probabilmente per effetto delle differenze nei fattori ambientali. Questi risultati indicano come la gestione dell'ecosistema lagunare debba necessariamente tenere conto di questa variabilità, per garantire il mantenimento delle diverse funzioni ecologiche, quali per esempio quella di nursery per specie che rivestono anche un ruolo importante da un punto di vista commerciale.

I dati raccolti hanno permesso di effettuare un'analisi della vulnerabilità delle morfologie lagunari al relative sea-level rise (RSLR). Il confronto fra diversi periodi (passato, presente e previsione futura) mostra un peggioramento generale della vulnerabilità. In particolare, tenendo come anno di riferimento il 1990, oltre il 50% dell'area investigata era in condizioni trascurabili, poco più del 35% marginali e circa 15% moderate. Nello scenario presente, riferito 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%. La simulazione di uno scenario futuro (2050) mostra la scomparsa della classe trascurabile, la comparsa di 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. Anche in questa valutazione, in tutti gli scenari emerge una elevata 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. 1).



**Figura 1.** Mappe di vulnerabilità al RSLR della laguna di Venezia negli scenari passato, presente e futuro.

Per quanto riguarda la componente biotica, i risultati ottenuti hanno evidenziato un recupero, rispetto al passato, di alcuni ambienti lagunari di elevata importanza a diversi livelli, dalla filtrazione dell'acqua, al sequestro di carbonio, alla costituzione di habitat fondamentali per la biodiversità lagunare. In particolare, la disponibilità di serie storiche di dati ha permesso di evidenziare a partire dal 2003, un graduale incremento dell'estensione delle praterie di fanerogame marine (Fig. 2), con un incremento totale tra il 2003 e il 2021 del 111%. Le praterie di fanerogame marine costituiscono ambienti molto importanti, essi infatti vengono utilizzati come nursery da diverse specie ittiche e come sito riproduttivo per una delle specie ittiche modello studiate, il go, che costruisce nidi in grado di mantenere quasi costanti parametri come temperatura e concentrazione di ossigeno importanti per lo sviluppo delle uova. I dati raccolti hanno anche evidenziato un

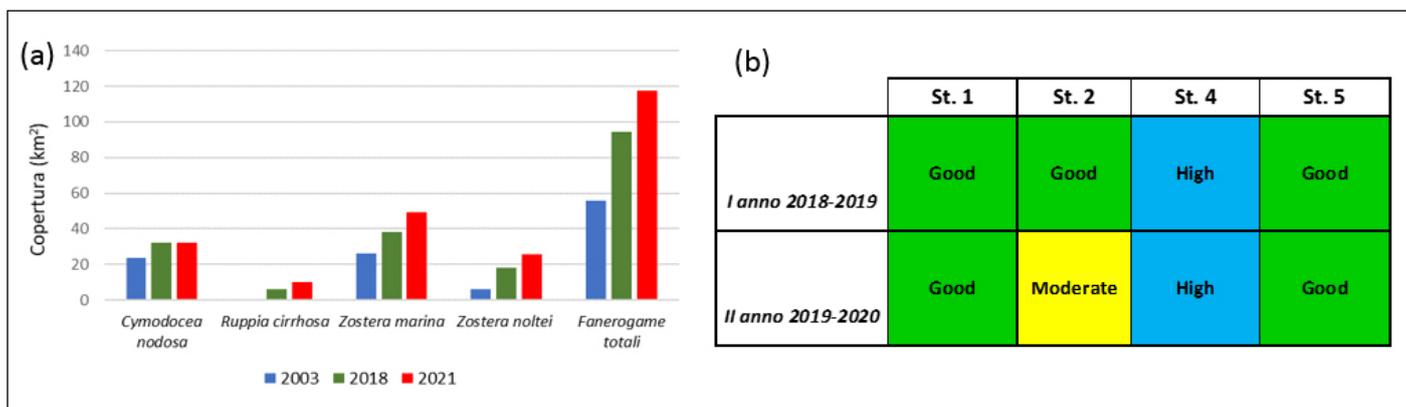


Figura 2. (a) Copertura delle diverse fanerogame marine nel 2003, 2018, 2021 in Laguna di Venezia; (b) Indice MPI (Multimetric Phytoplankton Index) nei due periodi di campionamento e nelle diverse stazioni (1: S. Giuliano, 2: Marghera, 4: Lido, 5: Palude della Rosa).

incremento dei reef di ostriche (Fig. 3), quest'ultime anche di elevato potenziale valore commerciale. Inoltre, per quanto riguarda la componente algale, si osserva nell'ultimo triennio una diminuzione delle Ulvacee a favore di macroalghe di maggior qualità ambientale. L'utilizzo di indicatori, quali l'indice di qualità MPI (Multimetric Phytoplankton Index), basato sul fitoplancton, ha evidenziato una qualità delle acque lagunari variabile tra "buona" e "alta" nei due anni di indagine, tranne che per la stazione di Marghera in cui nei due anni di indagine, la qualità è passata da "buona" a "moderata". I risultati ottenuti mostrano, in generale, un miglioramento dello stato ecologico della laguna. Inoltre, sul-



Figura 3. Immagine di reef di ostriche (a) e distribuzione (b) dei reef mappati (punti rossi) in Laguna di Venezia.

la base dei dati raccolti, i lavori ingegneristici di costruzione del MOSE non sembrano aver provocato per ora effetti o modificazioni importanti sull'assetto delle comunità planctoniche né sulla vegetazione acquatica né sullo stato trofico.

L'approccio sperimentale attraverso l'utilizzo di mesocosmi per simulare gli effetti degli eventi di chiusura del sistema MOSE (esperimenti in enclosure; Fig. 4) ha evidenziato come il minore idrodinamismo (assimilabile alla chiusura del MOSE) porti ad una maggiore deposizione del materiale in sospensione in colonna. Si è osservato, inoltre, un decremento, rispetto all'esterno dei mesocosmi, della concentrazione di O<sub>2</sub> e nel tempo, della concentrazione dei nitriti, nitrati e delle componenti e funzioni fotoautotrofe del plancton in colonna d'acqua (chl-a, feopigmenti, piceocarioti, produzione primaria). In concomitanza si è notato un aumento significativo del rapporto TOC/TN nei sedimenti superficiali dovuto alla graduale sedimentazione del particolato organico sospeso in acqua che è andato ad arricchire lo strato superficiale del sedimento. La presenza di materiale organico fresco ha stimolato alcuni processi microbici eterotrofi, come ad es. la produzione procariotica secondaria, sia in acqua che nei sedimenti, ma

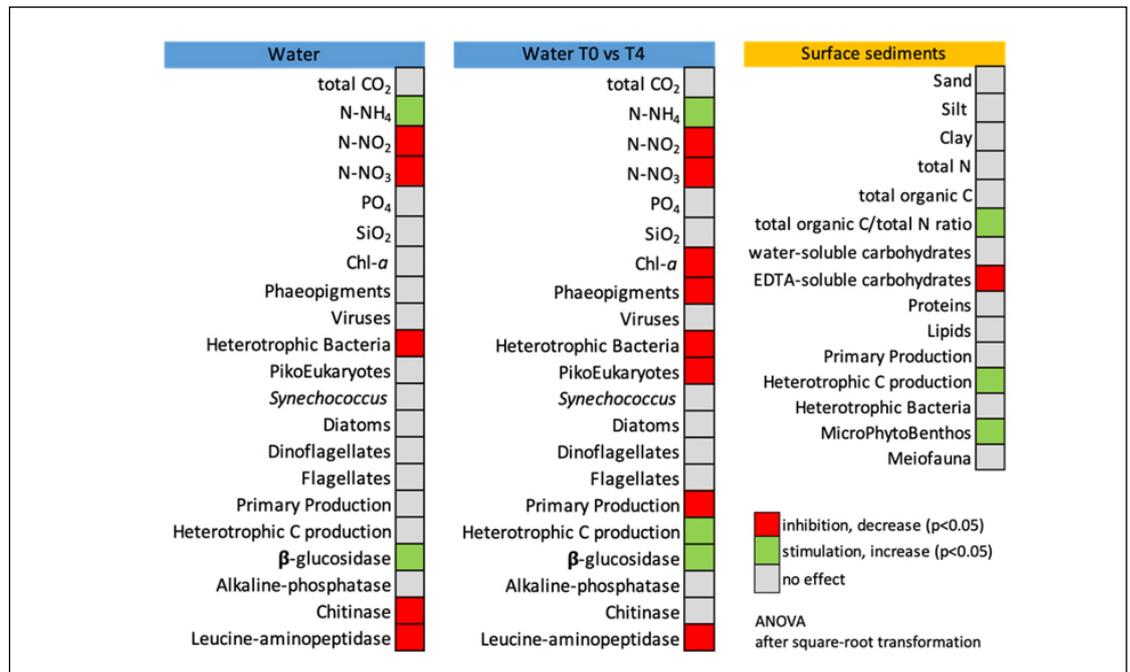


Figura 4. Esperimenti in enclosure per simulare gli effetti degli eventi di chiusura del MO.S.E, con la variazione di tutti i parametri indagati tra i diversi tempi sperimentali in acqua e nei sedimenti e tra il tempo iniziale e finale in acqua (i risultati si riferiscono al primo esperimento condotto in luglio).

anche la degradazione dei carboidrati. Di conseguenza è stato osservato un aumento nella concentrazione di ammonio, legato alla diretta degradazione enzimatica in acqua e al concomitante efflusso di questo nutriente inorganico dai sedimenti verso la colonna d'acqua, ascrivibile ai processi microbici degradativi sul particolato sedimentato al fondo. Infine, chiudendo il ciclo, la maggior disponibilità di ammonio ha a sua volta stimolato la comunità microalgale bentonica.

All'interno di questa Tematica sono stati presi in considerazione anche i canali portuali che costituiscono l'area di azione del MOSE sia per valutare la connettività mare-laguna che per studiare gli effetti del rumore. Le registrazioni hanno evidenziato la presenza di elevati livelli di rumore associati prevalentemente al passaggio di imbarcazioni. Anche la movimentazione del MOSE ha come conseguenza un aumento del rumore alle bocche di porto; questo rumore non sembra però influenzare la presenza della corvina, specie sonifera utilizzata come modello, per la quale è stata messa in evidenza una eterogeneità di distribuzione non legata al rumore stesso.

I risultati hanno infine evidenziato una articolata e complessa connettività mare-laguna. In diverse specie di migratori marini, i primi stadi del ciclo vitale (larve, post-larve e avannotti) si accumulano nelle aree di spiaggia in prossimità delle dighe foranee prima di entrare in laguna. I maggiori ingressi in laguna avvengono nel periodo dal tardo autunno all'inizio della primavera e sono risultati maggiori nei sottobacini nord e sud.

## 2. Risultati per la gestione della laguna di Venezia

I risultati ottenuti durante questo progetto presentano una serie di ricadute dirette per la gestione lagunare. Il miglioramento della qualità ecologica dell'ecosistema lagunare che appare evidente in questi ultimi 3 anni è un risultato molto promettente; tuttavia il mantenimento di questa qualità richiede un'attenzione particolare soprattutto per quanto riguarda gli habitat fondamentali per l'ecosistema lagunare e i suoi servizi ecosistemici.

L'eterogeneità ambientale evidenziata a tutti i livelli implica che la gestione lagunare debba necessariamente essere modulata e calata nei diversi contesti. I risultati ottenuti suggeriscono di definire piani di ripristino o gestione delle porzioni di laguna più degradate al fine di garantire il mantenimento dell'ecosistema lagunare, con particolare attenzione alla laguna centrale, che è risultata diversa dalle altre aree lagunari sotto diversi punti di vista, sia morfologici che biotici. D'altra parte, le mappe di vulnerabilità

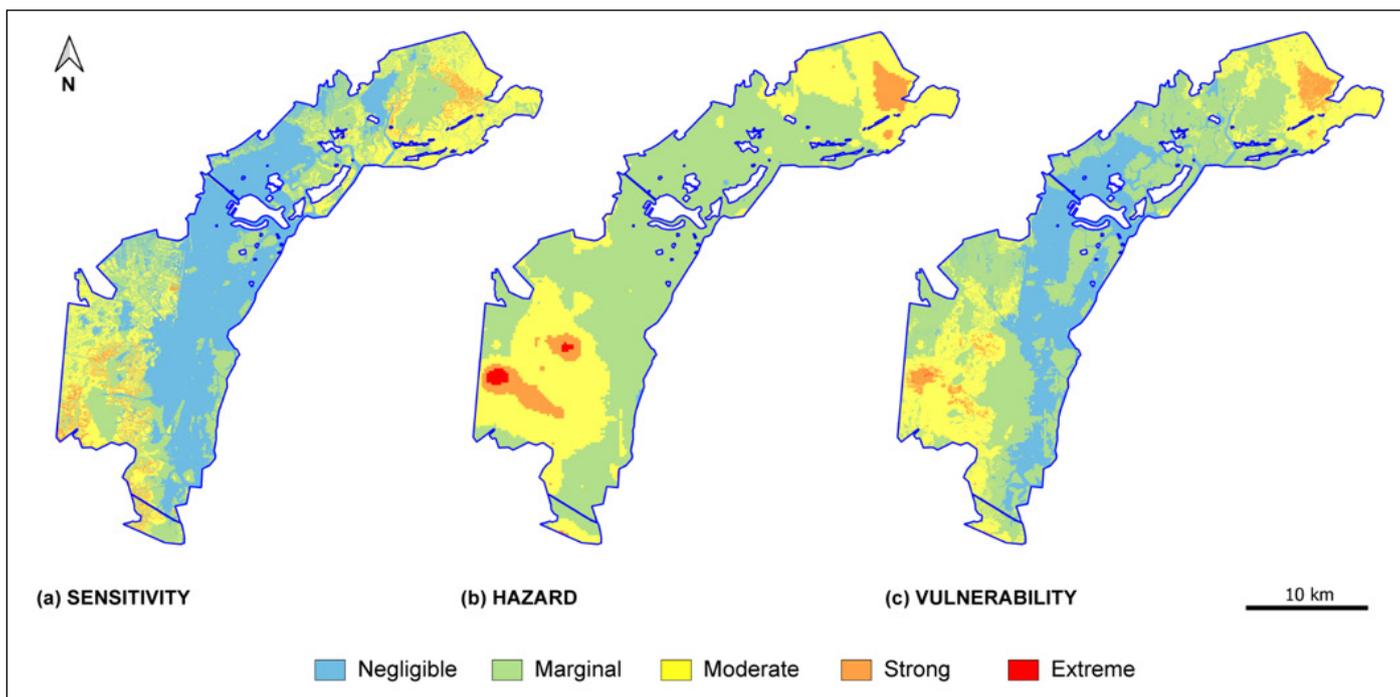


Figura 5. Mappe di sensibilità e di pericolo e di vulnerabilità utilizzate per l'analisi di vulnerabilità delle morfologie lagunari all'incremento relativo del medio mare. L'analisi è basata su un nuovo modello concettuale e segue un approccio indice-basato che combina indicatori di sensibilità fisico-ambientali e idro-geo-morfologici (sensitivity) a indicatori di pericolo (hazard).

delle morfologie lagunari indicano come siano le aree della laguna nord e sud a mostrare maggiore vulnerabilità all'innalzamento del livello del mare (Fig. 5).

Diversi risultati di questa Tematica danno alcune indicazioni rilevanti sui possibili effetti di chiusure prolungate delle paratoie del MOSE. In particolare, i dati relativi ai tassi di erosione e sedimentazione dell'ambiente delle barene hanno messo in evidenza come i maggiori tassi di sedimentazione siano ricollegabili ad eventi di acqua alta; la regolazione delle acque alte attraverso il sollevamento delle paratoie del MOSE modifica il trasporto di sedimenti all'interno della laguna, riducendo mediamente del 30% (Fig. 6) la sedimentazione sulle barene, aumentando l'erosione dei bassifondali e favorendo la sedimentazione nei canali, con la conseguente necessità di dragarli. La ridotta sedimentazione sulle barene ha conseguenze negative anche sulla loro capacità di sequestro e stoccaggio di carbonio organico.

In un contesto di *sea-level rise*, risulta essenziale mantenere i tassi di sedimentazione necessari affinché l'elevazione delle barene rimanga invariata rispetto al livello del

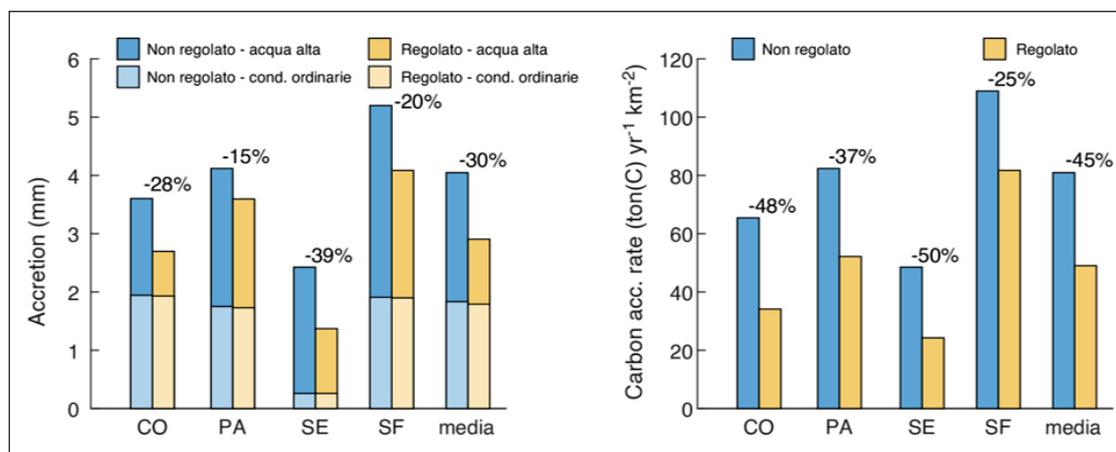


Figura 6. (a) Accrescimento verticale e (b) tasso di sequestro di carbonio nello scenario di laguna non regolato (blu) e laguna regolata (giallo) con il sistema MOSE. Per l'accrescimento si distingue ulteriormente in contributo degli eventi di acqua alta (tonalità scura) e delle condizioni ordinarie (tonalità chiara). Le categorie si riferiscono ad alcune aree di studio (CO: Conche, PA: Pagliaga, SE: Sant'Erasmus, SF: San Felice) e alla loro media.

del mare. L'applicazione di un modello ecogeomorfologico a siti della laguna di Venezia ha evidenziato come i processi biotici, pur contribuendo consistentemente a sostenere l'accrescimento verticale delle barene, non siano sufficienti da soli a far fronte ai tassi di incremento del medio mare previsti; risulta quindi fondamentale 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.

Inoltre, i dati registrati alle bocche di porto evidenziano una sovrapposizione temporale fra i periodi di maggior ingresso in laguna di diverse specie ittiche e i periodi di maggiori eventi potenziali di chiusura del MO.S.E. (tardo autunno-inverno).

Infine gli esperimenti in enclosure hanno evidenziato gli effetti del minore idrodinamismo (simulazione degli eventi di chiusura del MO.S.E.) sui processi biologici sia in colonna d'acqua che nei sedimenti superficiali.

Considerati nel loro complesso, questi risultati suggeriscono di porre particolare attenzione al sollevamento delle paratoie per periodi molto prolungati che potrebbero sia influire negativamente sui fenomeni di sedimentazione delle barene sia avere ripercussioni importanti sulle comunità lagunari

### 3. Sistema osservativo

I risultati di questa Tematica hanno beneficiato di una solida base di dati pregressi. Il quadro dello stato attuale della laguna di Venezia, nei suoi diversi aspetti considerati in questo progetto, costituisce senz'altro una base per capire l'evoluzione futura dell'ambiente lagunare e gli effetti del funzionamento del MOSE. Tuttavia è grazie alla disponibilità di serie storiche, derivanti da campionamenti condotti all'interno di diversi progetti di ricerca, che è possibile comprendere i cambiamenti in atto e costruire modelli previsionali più affidabili. In sistemi complessi, quali l'ecosistema lagunare veneziano, la comprensione del ruolo dei diversi fattori risulta fondamentale e solo dati su lunghe scale temporali permettono un'analisi accurata.

I risultati ottenuti durante questo progetto suggeriscono diverse linee di monitoraggio per il futuro. L'ambiente di barena, con la sua eterogeneità nell'equilibrio fra erosione, subsidenza e sedimentazione, richiede attività di monitoraggio continuo per comprenderne l'evoluzione anche in risposta agli eventi di chiusura del MOSE; i risultati indicano, infatti, come i processi di sedimentazione, fondamentali per il mantenimento di questi ambienti, siano legati non solo alle caratteristiche biotiche, ma anche agli eventi di alte maree, eventi sui quali le chiusure del MOSE agiranno. Le analisi batimetriche e topografiche, condotte sia con tecniche di remote sensing sia con rilievi e indagini in campo (Fig. 7), su lunghe scale temporali permetterebbero una valutazione precisa dei cambiamenti di questi ambienti.

Una seconda linea di monitoraggio è costituita da quello biologico. La sinergia delle variazioni della morfologia lagunare con i cambiamenti climatici sempre più marcati possono avere effetti importanti sulle componenti biotiche. Le complesse interazioni

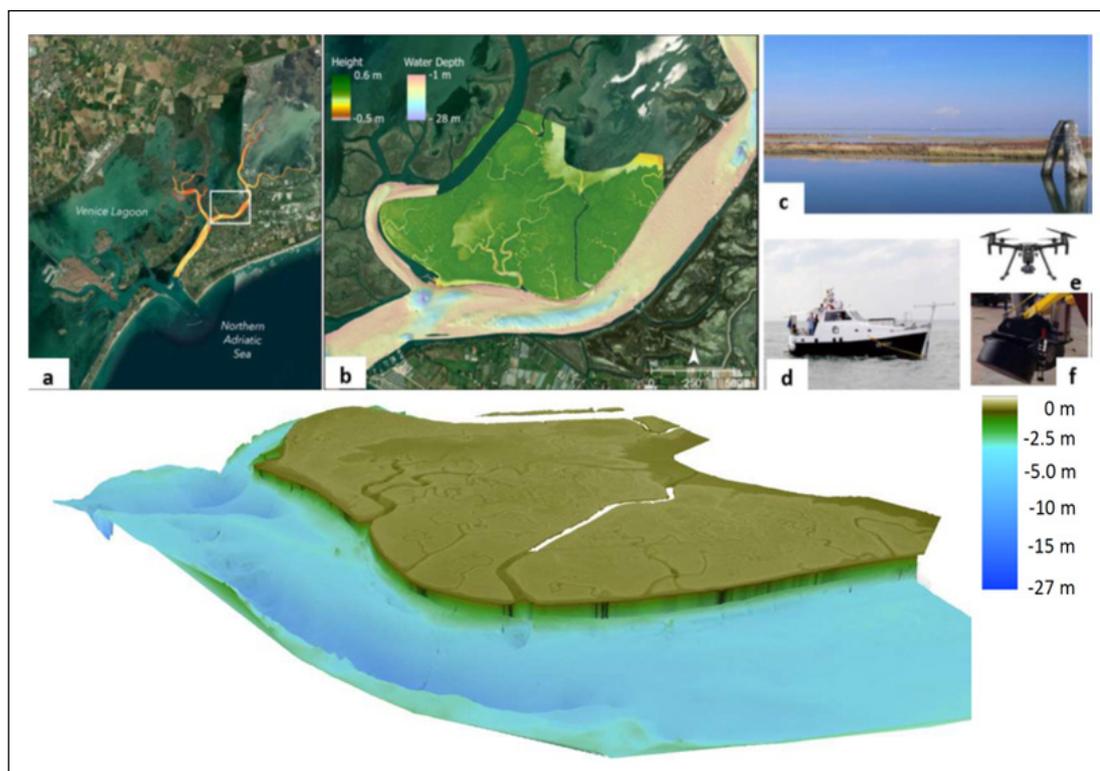


Figura 6. (a) Area di studio nella Laguna Nord con in arancione l'area mappata con il MBES; (b) dati di quota della barena S. Felice e di batimetria del Canale S. Felice acquisiti nel 2021; (c) foto della barena S. Felice; (d) imbarcazione Litus del CNR-ISMAR con la strumentazione MBES utilizzata per 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.

## 4. Ulteriori approfondimenti

L'avvio della fase di sperimentazione della chiusura delle paratoie del MOSE è coincisa con le ultime fasi del progetto, di conseguenza è stato possibile raccogliere pochi dati e su piccola scala temporale. Tuttavia è risultato evidente come, in determinate condizioni, la chiusura del MOSE possa prolungarsi su un arco temporale piuttosto lungo, rispetto alle precedenti previsioni di chiusura per poche ore, con conseguenti effetti negativi prevedibili sulla base dei risultati ottenuti in questo progetto. La frequenza e la durata delle chiusure dovranno necessariamente aumentare in futuro alla luce del previsto incremento del livello medio del mare, con conseguenti effetti peggiori rispetto allo scenario attuale. Questa osservazione implica la necessità di pianificare attività sperimentali (esperimenti in enclosure), di monitoraggio delle diverse componenti biotiche ed abiotiche e modellistiche su una più ampia scala temporale.

Gli effetti negativi di eventi prolungati di chiusura delle paratoie dovranno essere contrastati con interventi diversificati. In particolare i risultati sin qui ottenuti suggeriscono di considerare come misure gestionali un aumento dell'apporto di sedimenti di origine fluviale, per il mantenimento di adeguati tassi di sedimentazione, la conservazione ed il ripristino delle barene e la protezione dei bassofondali con soluzioni a basso impatto ambientale (nature based solutions) ed una attenta valutazione dei tempi complessivi di chiusura del MOSE. Tali misure dovranno essere accompagnate dalla valutazione del loro impatto e della loro efficacia sull'ecosistema lagunare nelle sue diverse componenti, anche in relazione alle importanti attività di pesca che qui vengono svolte.

Proprio le conseguenze del sollevamento delle paratoie del MOSE sulle attività di pesca necessitano di un approfondimento che permetta di valutare eventuali effetti sia attraverso attività di monitoraggio diretto del pescato che attraverso la raccolta di dati sulla percezione dei pescatori.

Infine, i risultati della caratterizzazione geomeccanica delle barene e delle analisi modellistiche lasciano aperte due domande di notevole interesse scientifico, con importanti 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.

# Tematica 4.

## Connessioni ecologiche e servizi ecosistemici

Cosimo Solidoro (OGS)

### 1. Risultati della tematica

Le attività di ricerca della Tematica 4 si prefiggevano l'obiettivo di sviluppare, approfondire ed integrare in un contesto unitario elementi conoscitivi utili alla concettualizzazione, identificazione, mappatura spaziale e valutazione economica dei servizi ecosistemici legati all'ecosistema lagunare, ed alla loro gestione in un contesto di sistemi ecologici socio economici, anche con attenzione agli aspetti di governance.

Le attività inizialmente previste prevedevano l'approfondimento di una serie di temi, legati alla definizione e quantificazione dei flussi di massa ed energia fra i diversi comparti trofici dell'ecosistema veneziano sotto diversi scenari climatici e di gestione, il censimento dei principali servizi ecosistemici, la analisi delle loro relazioni con il funzionamento dell'ecosistema lagunare, la valutazione economica dei servizi ecosistemici, la stima del tasso di sconto, l'analisi di possibili politiche di pianificazione e gestione capaci di considerare gli elementi emersi dallo studio.

La ricerca si proponeva quindi di avanzare in modo significativo il quadro delle conoscenze esistenti, espandendo il livello esistente di studio integrato dei sistemi ecologico-socio-economico e fornendo un importante contributo quantitativo alla comprensione e quantificazione delle dinamiche ecosistemiche e dei servizi ecosistemici, anche in risposta alle attività antropiche.

Queste conoscenze mantengono la ricerca lagunare alla frontiera della conoscenza e della sperimentazione in questo ambito disciplinare, confermando il ruolo della Laguna di Venezia come laboratorio naturale privilegiato, e particolarmente avanzato, per lo studio di questi fenomeni.

Le attività hanno raggiunto almeno parzialmente gran parte degli obiettivi prefissi. In particolare :

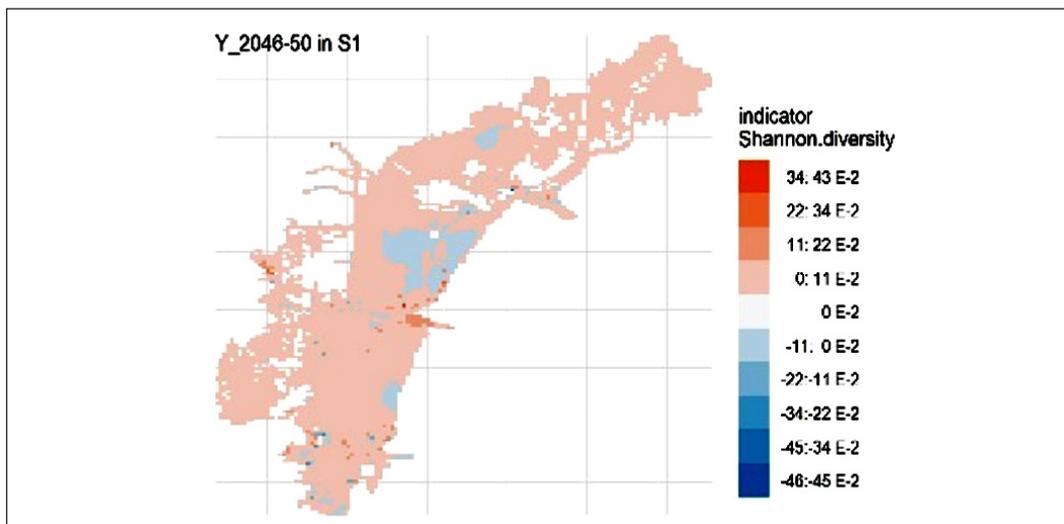
- È stato realizzato un modello dell'ecosistema lagunare Veneziano che integra (off-line) le dinamiche delle componenti fisiche, biogeochimiche ed ecologiche (rete trofica) e stima le risposte del sistema lagunare a scenari di cambiamento climatico e di gestione, incluse le attività di pesca e venericoltura e le attività di regolazione delle acque con il MOSE.

I risultati mostrano buone capacità del modello di rappresentare dinamiche spazio-temporali di dettaglio. Le proiezioni future a medio termine (2050) indicano che le variazioni delle biomasse delle componenti biologiche sono spesso influenzate dal cambiamento climatico.

L'implementazione di scenari alternativi di pesca ed acquacultura possono modificare le biomasse attese di alcune specie target, ed i rapporti fra le componenti, ma solitamente presentano impatti attesi minori a quelli prodotti dai cambiamenti climatici considerati.

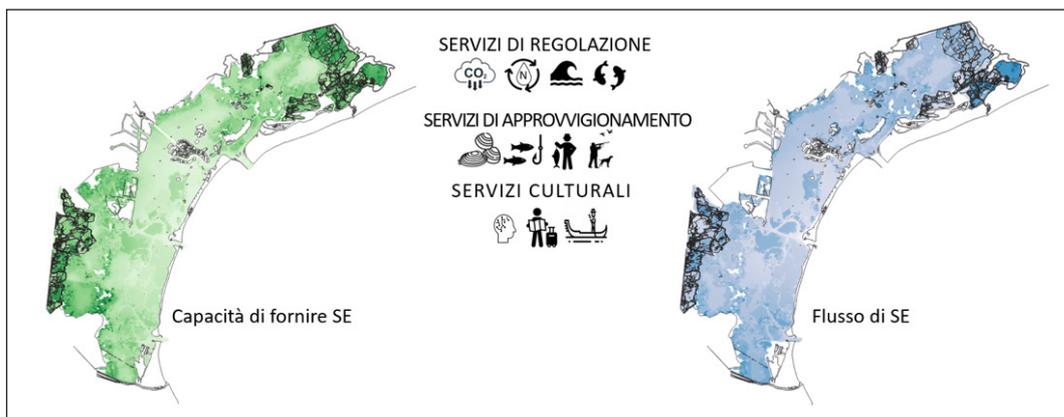
Più rilevanti risultano gli impatti su alcuni indicatori aggregati di funzionamento del sistema. Gli impatti delle attività di regolazione del MOSE sono stati valutati solo rispetto al potenziale effetto su alcuni parametri (quali salinità e temperatura) e non comprendo quindi effetti potenzialmente rilevanti, quali potenziali modificazione alle concentrazioni di ossigeno. Sotto queste assunzione gli effetti sembrano essere modesti.

Figura 1. Anomalie degli indicatori ecologici tra lo scenario di regolazione della laguna (climatico con scenario IPCC RCP 8.5) e lo scenario di riferimento (2015): indice di Diversità di Shannon calcolato con il modello End-to-End per il periodo 2046-2050.



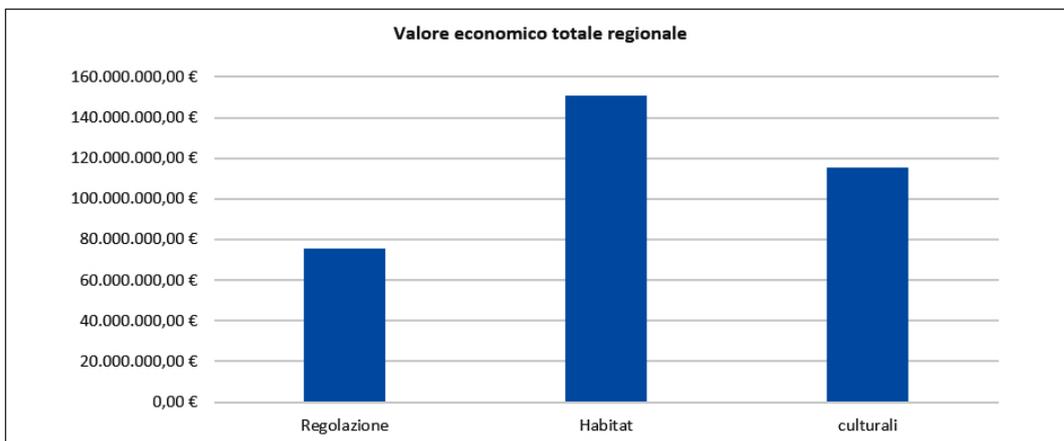
- Sono stati censiti 12 indicatori di servizi ecosistemici rilevanti per la laguna in ognuna delle classi di servizi ecosistemici, e sono state prodotte delle mappe spaziali della capacità della laguna di fornire tali servizi. Questo risultato, ancorché limitato, ha l'enorme valenza -anche epistemologica- di fornire esempi concreti e facilmente veicolabili che dimostrano la possibilità e l'importanza di quantificare i flussi di servizi ecosistemici e la necessità di tenerne conto in ambito di pianificazione.

Figura 2. Mappa relativa alla capacità complessiva della laguna di Venezia di fornire SE (a sx) e al flusso complessivo degli stessi (a dx).



- Sono stati prodotti elementi utili alla valutazione economica dei Servizi Ecosistemici: in particolare sono stati utilizzati modelli economici e questionari mirati per la valutazione dei servizi di regolazione, habitat e culturali, ed è stato stimato un valore del tasso di sconto da utilizzare nella definizione di politiche ambientali, che è risultato essere significativamente minore (25% anziché 36%) di quello utilizzato correntemente nei mercati finanziari. Queste attività, oltre a produrre risultati che hanno una valenza propria, hanno anche aumentato il livello di conoscenza e consapevolezza ambientale nelle persone coinvolte nei questionari.

Figura 3. Valore economico dato dalla popolazione a tre servizi ecosistemici.



- È stato prodotto un quadro concettuale e numerico che integra i servizi ecosistemi e le componenti sociologiche e definiti elementi utili alla gestione territoriale basata anche su meccanismi di regolamentazione della domanda di fornitura di servizi ecosistemici, ed è stato definito un quadro di caso studio dimostrativo sulla gestione di un servizio ecosistemico in una area particolare.

I risultati raggiunti esauriscono non completamente gli ambiziosi obiettivi iniziali. In particolare restano da implementare una miglior integrazione dei risultati raggiunti nelle diverse Linee della Tematica 4 e fra questi e quelli raggiunti in altre Tematiche. A solo titolo di esempio, il modello di ecosistema non integra completamente i risultati dei modelli morfologici, né quelli biogeochimici. Inoltre, va continuata e migliorata la fase di implementazione reale dei risultati raggiunti nel processo di pianificazione, così da individuare, e auspicabilmente affrontare, le criticità inevitabilmente poste nel passaggio fra teoria e pratica.

## 2. Risultati per la gestione della laguna di Venezia

I risultati raggiunti hanno ricadute significative sulla gestione della laguna di Venezia.

I risultati evidenziano l'esistenza di una serie di relazioni fra attività antropiche, funzionamento ecosistemico, stato di qualità dell'ecosistema e capacità del sistema di continuare a fornire Servizi Ecosistemici, e la necessità quindi di tenere conto di questi elementi nelle attività di pianificazione della gestione della laguna. Ne discende la necessità di estendere e potenziare le attività di osservazione e monitoraggio alle componenti biologiche e più propriamente ecologiche, fino a ricomprendere la capacità di fornire Servizi Ecosistemici. I risultati evidenziano la necessità di considerare la laguna come sistema ecologico-socio-economico, aperto e panarchico, e di meglio comprendere e quantificare le relazioni funzionali fra le diverse componenti di tale sistema, anche in vista della costruzione di un sistema di supporto alle decisioni. I risultati possono essere di supporto alla valutazione dei costi ambientali di interventi di gestione, ed uno stimolo per una miglior parametrizzazione degli stessi.

I risultati forniscono uno strumento che mette in relazione quantitativa le componenti ambientali e biogeochimiche con quelle biologiche ed ecologiche (meno frequentemente osservate e peggio modellizzate) e permette quindi, note o assunti alcuni cambiamenti di componenti ambientali (per es. temperatura o salinità), di derivare prime estrapolazioni sui conseguenti effetti biologici (per esempio distribuzione specie ittiche di interesse commerciali) o ecosistemici (per es. rapporto fra gruppi di specie). Questa possibilità estende e valorizza gli sforzi osservativi, visto che nei programmi di monitoraggio le variabili fisiche e biogeochimiche sono osservate più frequentemente di quelle biologiche ed ecologiche.

## 3. Sistema osservativo

Le attività della Tematica 4 non sono direttamente legati al sistema di misurazioni installate durante il progetto Venezia2021, ma i risultati prodotti necessiterebbero di essere rivisti ed affinati alla luce dei risultati del progetto che non è stato possibile integrare, e forse anche di altri risultati esistenti ma non considerati completamente, al fine di avere degli strumenti più integrati ed aggiornati allo stato dell'arte delle conoscenze attuali.

I modelli costruiti costituiscono comunque un componente essenziale in un sistema osservativo moderno, per la capacità di interpolare le variabili osservate a siti o momenti non coperti dal monitoraggio, ed in qualche misura anche di estrapolare le stesse, fino a costituire la ossatura per un sistema previsionale a breve termine.

I modelli forniscono inoltre una rappresentazione astratta del comportamento ideale di un sistema, al netto quindi delle fluttuazioni casuali, e quindi un utilissimo termine di paragone rispetto al quale identificare la presenza di situazioni anomale.

## 4. Ulteriori approfondimenti

Nel presente progetto non è stato possibile integrare tutte le conoscenze esistenti sull'ecosistema lagunare, così che alcune interdipendenze, anche importanti, non sono state considerate.

A titolo di esempio, non sono stati considerati i potenziali effetti indiretti di scenari di chiusure ripetute del MOSE sui livelli di Ossigeno Disciolto e le conseguenti effetti a cascata su componenti biologiche e biogeochimiche. In modo analogo, ma su scale temporali diverse, non sono stati considerati gli effetti sui tempi di confinamento, o gli effetti sinergici di mobilizzazione del sedimento e rimobilizzazione dei contaminanti.

I modelli integrati socio-ecologici-economici sono stati sviluppati, ma non sufficientemente calibrati né -soprattutto- validati dal confronto con dati sperimentali. Tali fasi, unitamente ad una stima delle incertezze, sono sicuramente opportune per poter considerare lo strumento sviluppato come un reale supporto alle decisioni.

Infine, i risultati della Tematica 4, insieme a quelli delle altre Tematiche, evidenziano come il livello di conoscenze su questo sito sia tale da rendere la laguna un sito studio ideale per l'implementazione di un gemello digitale di ecosistema costiero di particolare pregio ed interesse.

Uno strumento di questo tipo sarebbe un preziosissimo elemento al supporto della pianificazione sia per operazioni di breve termine (chiusura barriere mobili), sia di medio termine (chiusure ripetute), che per analisi di scenario (what-if).

## Tematica 5.

# Cambiamento climatico e strategie di adattamento per la salvaguardia del patrimonio culturale di Venezia e la sua laguna

Anna Saetta (IUAV)

## 1. Risultati della tematica

La Tematica 5 “Cambiamento climatico e strategie di adattamento per la salvaguardia del patrimonio culturale di Venezia e la sua laguna” attraverso le sue 3 Linee di ricerca:

- 5.1 “Scenari di cambiamento climatico per Venezia e la sua laguna”;
- 5.2 “Impatti vulnerabilità e rischi indotti dal cambiamento del clima”;
- 5.3 “Piano di adattamento al cambiamento climatico e implementazione di strategie di intervento per la salvaguardia del patrimonio architettonico”

aveva come obiettivo generale quello di sviluppare un sistema integrato di analisi, valutazione, pianificazione, gestione e monitoraggio dell’area veneziana e del suo patrimonio storico, artistico e culturale, in grado di supportare la città e le attività che in essa operano, attraverso azioni coordinate di adattamento, volte ad accrescere la sostenibilità e la resilienza ai cambiamenti climatici nel suo complesso. In riferimento a questo macro-obiettivo i risultati sono stati molteplici, i principali possono essere riassunti in:

- Definizione dell’evoluzione più probabile, e l’incertezza associata, dei parametri meteo-climatici rilevanti per la valutazione di rischio ambientale nell’area veneziana nei prossimi decenni. La ricerca ha permesso di confermare che l’innalzamento del livello relativo medio del mare, dovuto in parti quasi uguali all’innalzamento dei mari a causa del cambiamento climatico e alla subsidenza in gran parte antropica, è la causa primaria dell’aumento della frequenza di eventi di mareggiata a Venezia negli ultimi 150 anni ed ha stabilito che si ha un sostanziale aumento dei tempi di ritorno degli eventi più estremi: si stima che per lo scenario RCP8.5 (pessimistico in termini di emissione antropica di CO<sub>2</sub> in atmosfera) l’evento di mareggiata del secolo (che avviene una volta ogni 100 anni) potrebbe aumentare di 26–35 cm entro metà secolo e di 53–171 cm a fine secolo, rispetto al valore attuale. Per quanto attiene il clima ondosso in prossimità delle bocche di porto, l’intensità delle mareggiate nel periodo 2021-2050 è prevista in riduzione rispetto al periodo 1981-2010 di circa l’8-9% per lo scenario RCP 8.5, con un aumento dei tempi di ritorno degli eventi più estremi pari a tre volte.
- Sviluppo di specifiche metodologie di analisi di supporto alla valutazione della vulnerabilità territoriale e del rischio come esito di impatti generati dai cambiamenti climatici. Nello specifico: (i) è stato realizzato un modello digitale in 3D del sistema terra-acqua della gronda lagunare e della Città Metropolitana di Venezia, che ha supportato la valutazione della vulnerabilità territoriale come esito di impatti generati dall’aumento di frequenza degli eventi estremi: ondate di calore, precipitazioni e mareggiate intense; (ii) è stato stimato l’impatto sulle due principali specie di molluschi allevate in laguna, la vongola verace (*Ruditapes philippinarum*) e il mitilo (*Mytilus galloprovincialis*): le stime prospettano una progressiva tendenza all’aumento della mortalità di queste due specie a causa delle ondate di calore (con stimate temperature dell’acqua sopra ai valori critici per gli organismi) soprattutto per il decennio 2060-2070; (iii) sono state eseguite simulazioni di scenario climatico fisico e biogeochimico della laguna di Venezia per gli scenari di medio (2050) e lungo (2100)

termine; (iv) sono state identificate e priorizzate le aree e le relative vulnerabilità fisico-ambientali e sociali che maggiormente potrebbero essere influenzate da eventi pericolosi legati a scenari di cambiamento climatico, tramite la selezione di un pool di indicatori chiave e l'elaborazione di un framework concettuale di multi rischio e la sua implementazione tramite metodi di Intelligenza Artificiale (IA); (v) sono stati stimati gli impatti economici associati agli eventi alluvionali a Venezia, stimando che il danno annuale totale diretto e indiretto, dovuto alle inondazioni, aumenterà di oltre tre volte rispetto ai livelli attuali.

- Costruzione del “Piano di adattamento territoriale della Laguna di Venezia e della Città Metropolitana” e in un’ottica di riduzione di scala (dalla scala territoriale alla scala architettonica e costruttiva), definizione di specifiche strategie di intervento e monitoraggio interdisciplinari per la conservazione del patrimonio paesaggistico, architettonico e culturale della Laguna.

Tutti questi risultati hanno portato ad aumentare lo stato di conoscenza della laguna e della sua Città Metropolitana, soprattutto in relazione ai rischi, alle vulnerabilità e agli impatti che si potranno manifestare nel medio e lontano futuro e a sviluppare e mettere a punto modelli, metodologie, e strumenti utili a tale scopo. Questi, per la prima volta, spaziano dalla scala vasta metropolitana a quella locale e puntuale dei singoli edifici, con un approccio interdisciplinare e multi-scala.

## 2. Risultati per la gestione della laguna di Venezia

Tra i risultati più concreti ed utili al decisore pubblico nella gestione della laguna di Venezia si possono indicare:

1. **Scenari di innalzamento del livello relativo del mare a Venezia.** Gli scenari di innalzamento del livello relativo del mare a Venezia, basati su proiezioni climatiche, indicano, per lo scenario RCP8.5, un aumento del livello medio del mare a fine secolo compreso tra 58 cm e 110 cm rispetto alla media del ventennio 1986-2005. Le proiezioni sono comunque caratterizzate da una forte incertezza (Figura 1), dovuta alle incognite circa le emissioni antropiche future di CO<sub>2</sub> in atmosfera e alle limitazioni degli strumenti predittivi utilizzati (i modelli climatici). A queste variazioni nel livello medio corrispondono variazioni nelle statistiche degli eventi di acqua alta: per lo scenario RCP8.5, l'evento di mareggiata del secolo (ovvero quello che avviene una volta ogni 100 anni) potrebbe aumentare di 26–35 cm entro metà secolo e di 53–171 cm a fine secolo, rispetto al valore attuale.
2. **Scenari di intensità delle mareggiate in Adriatico.** Nel prossimo trentennio 2021-2050, è previsto che l'intensità delle mareggiate (valore dell'altezza significativa H<sub>s</sub>) nel Mare Adriatico diminuisca, soprattutto durante gli eventi più estremi. Questo risulta per entrambi gli scenari IPCC di emissione RCP4.5 e RCP8.5, come si può notare in Figura 2.
3. **Scenari di previsione degli eventi piovosi.** L'analisi di simulazioni storiche e di scenario futuro effettuate con modelli climatici regionali ad alta e altissima risoluzione hanno permesso di fornire indicazioni circa le variazioni attese nella precipitazione sull'area della provincia di Venezia. Il segnale climatico delle precipitazioni giornaliere che risulta dalle analisi stagionali dei modelli sul dominio della provincia di Venezia indica una diminuzione in estate, piuttosto uniforme su tutto il dominio, ed un aumento delle precipitazioni giornaliere in autunno.
4. **Modello 3D del sistema lagunare.** Tale modello consente differenti ed ulteriori elaborazioni (aperte ed aggiornabili nel continuo) in campo morfologico e geo-statistico. Diverse **simulazioni sono state eseguite per alcuni impatti del cambiamento climatico (CC)** (simulazione degli impatti da isole di calore urbane (UHI), inondazioni urbane (Urban runoff) e acqua alta (High Tide)). È stata inoltre eseguita una

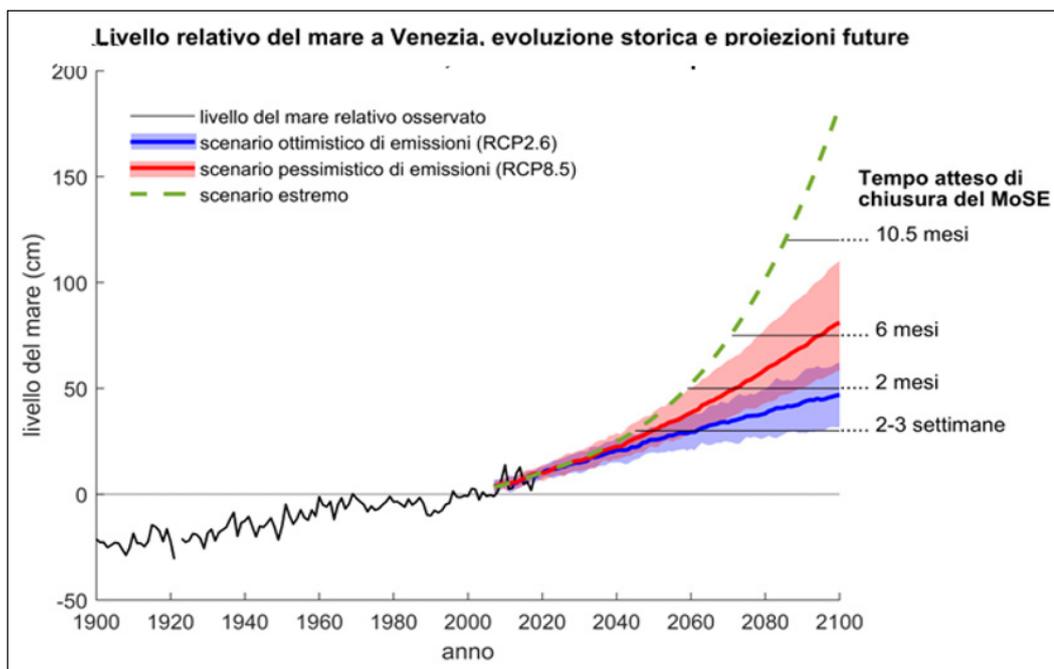


Figura 1. Evoluzione storica e proiezioni future del livello del mare a Venezia con indicati i tempi attesi di chiusura del MoSE (dati da Lionello et al., 2021<sup>1</sup>, e Zanchettin et al., 2021<sup>2</sup>). Gli scenari si riferiscono a due diverse ipotesi di emissioni antropiche di gas climalteranti e ad una ipotesi (scenario estremo) in cui ad emissioni elevate e ad un forte riscaldamento globale si associa uno scioglimento spinto delle calotte polari. Per i due scenari di emissioni considerati, le proiezioni sono illustrate come variazione media fornita dai modelli climatici (linea) e incertezza legata alle specificità dei modelli (ombreggiatura)

**valutazione preliminare delle vulnerabilità di area vasta**, tramite una caratterizzazione geografica degli impatti orientata ad evidenziare le aree territoriali predisposte a subire gli effetti negativi dei CC, fra cui ad esempio quella relativa ad UHI che evidenzia la correlazione spaziale tra lo stato termico della superficie terrestre e le caratteristiche di uso del suolo (Figura 3).

- Modelli per la previsione della sopravvivenza e l'accrescimento di vongole veraci** (*Ruditapes philippinarum*) e mitili (*Mytilus galloprovincialis*) e nuovi modelli di accrescimento in grado di prevedere anche le quantità di CO<sub>2</sub> emesse dai processi fisiologici e inglobate nella conchiglia: questi modelli potrebbero essere di estremo interesse per un eventuale inserimento della molluschicoltura nel mercato dei crediti carbonio.

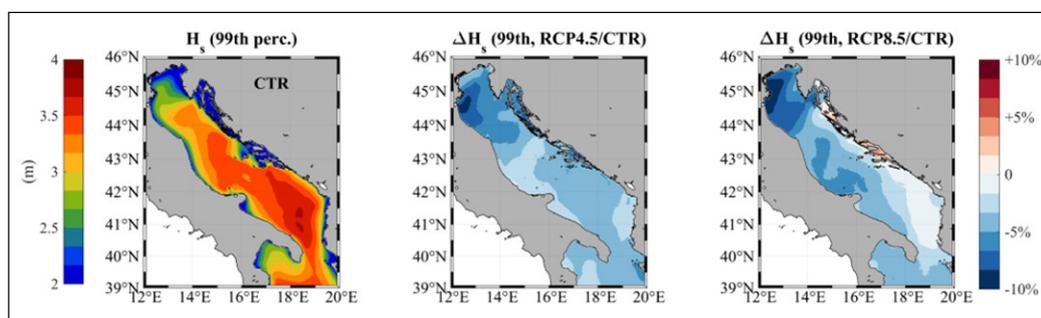
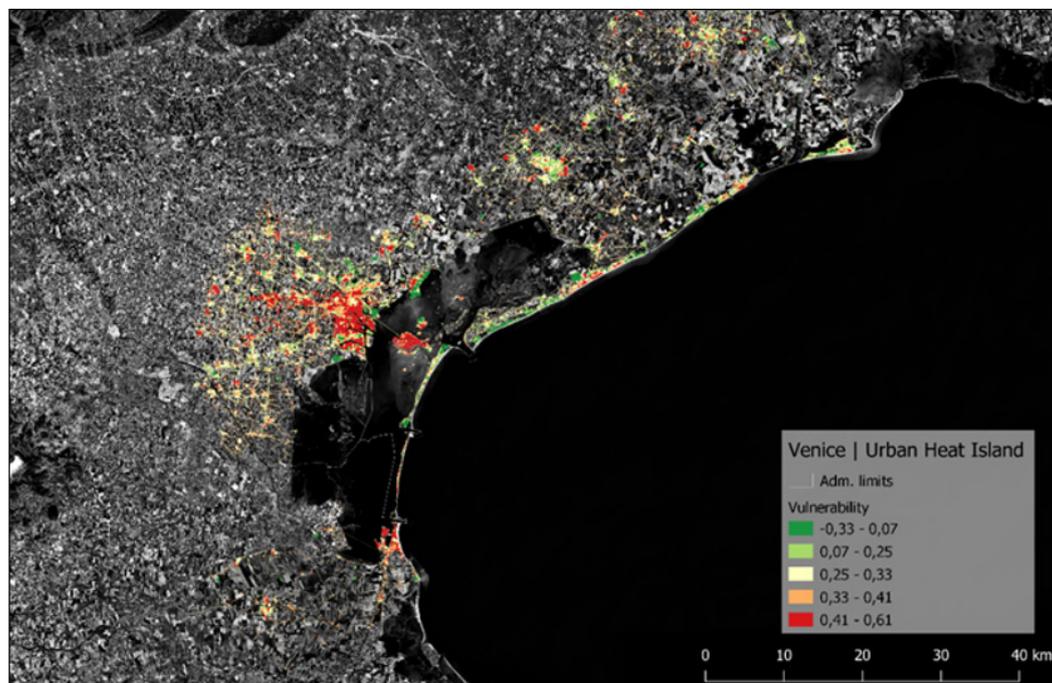


Figura 2. Intensità delle mareggiate estreme (99° percentile) e proiezioni future della sua variazione agli scenari IPCC di emissione RCP4.5 e RCP8.5.

- Zanchettin Davide, Sara Bruni, Fabio Raicich, Piero Lionello, Fanny Adloff, Alexey Androsov, Fabrizio Antonioli, Vincenzo Artale, Eugenio Carminati, Christian Ferrarin, Vera Fofonova, Robert J. Nicholls, Sara Rubineti, Angelo Rubino, Gianmaria Sannino, Giorgio Spada, Rémi Thiéblemont, Michael Tsimplis, Georg Umgiesser, Stefano Vignudelli, Guy Wöppelmann, and Susanna Zerbini: Sea-level rise in Venice: historic and future trends (review article). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2643–2678, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2643-2021>, 2021.
- Lionello Piero, Robert J. Nicholls, Georg Umgiesser, and Davide Zanchettin: Venice flooding and sea level: past evolution, present issues, and future projections (introduction to the special issue). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2633–2641, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2633-2021>, 2021

Figura 3: Città Metropolitana di Venezia: vulnerabilità urbana a ondate di calore.



6. **Modelli statistici per la previsione sito-specifica a breve termine della temperatura e della concentrazione di ossigeno disciolto nelle acque lagunari**, utilizzabili per il monitoraggio e la gestione delle risorse alieutiche lagunari.
7. **Simulazioni di scenari climatici delle acque della laguna di Venezia.** I principali risultati riguardano l'evoluzione temporale di: (i) (media mensile) temperatura, livello e salinità delle acque della laguna di Venezia fino al 2100, per gli scenari RCP 4.5 e 8.5; (ii) (media giornaliera) nutrienti, ossigeno disciolto, clorofilla, temperatura, livello, acidificazione, salinità delle acque della laguna di Venezia, a medio (2049-50) e lungo termine (2090, 2099) per lo scenario RCP 8.5; (iii) (media giornaliera) degli accrescimenti di *Ruditapes philippinarum* nelle aree lagunari di concessione per la molluschicoltura, a medio (2049) e lungo termine (2090), per lo scenario RCP 8.5.
8. **Simulazione mediante modelli di Intelligenza Artificiale di scenari di rischio dei cambiamenti climatici** sui processi di eutrofizzazione della laguna di Venezia (caratterizzati da un trend crescente per i valori di clorofilla più alti), di erosione delle coste e di inondazioni pluviali sulla Città Metropolitana di Venezia (caratterizzati da un aumento consistente di eventi estremi per i decenni futuri rispetto allo scenario di baseline).
9. **Stima dell'impatto economico associato agli eventi alluvionali a Venezia** in base al clima storico ed utilizzando un modello di profondità-danno (stage-damage) da alluvione calibrato per questo progetto. Entro 30 anni, in uno scenario di cambiamento climatico ad alte emissioni, senza l'attivazione del MoSE i danni annuali dovuti agli eventi di acqua alta aumenteranno di oltre tre volte rispetto ai livelli attuali. Laddove il MoSE fosse attivato a livelli d'acqua superiori a 130 cm, si prevede che l'aumento dei danni annuali sarebbe ridotto di oltre il 90% (Figura 4).
10. **Piano di adattamento territoriale**, che indica misure, azioni e politiche che possono e devono essere messe in atto per mitigare gli impatti del cambiamento climatico come l'eccesso d'acqua (inondazioni, allagamenti, bombe d'acqua, ecc.) e le possibili ondate di calore. In questo modo il territorio potrà dirsi adattato alle diverse condizioni climatiche future (Figura 5).
11. **Quadro conoscitivo aggiornato delle progettualità passate e future e delle forme di resilienza per la laguna di Venezia**, che costituisce la base di partenza per una riflessione su auspicabili scenari futuri. La capacità di resilienza di Venezia, se gestita in modo appropriato, può invertire il trend che la città sta attraversando in questi ultimi anni.

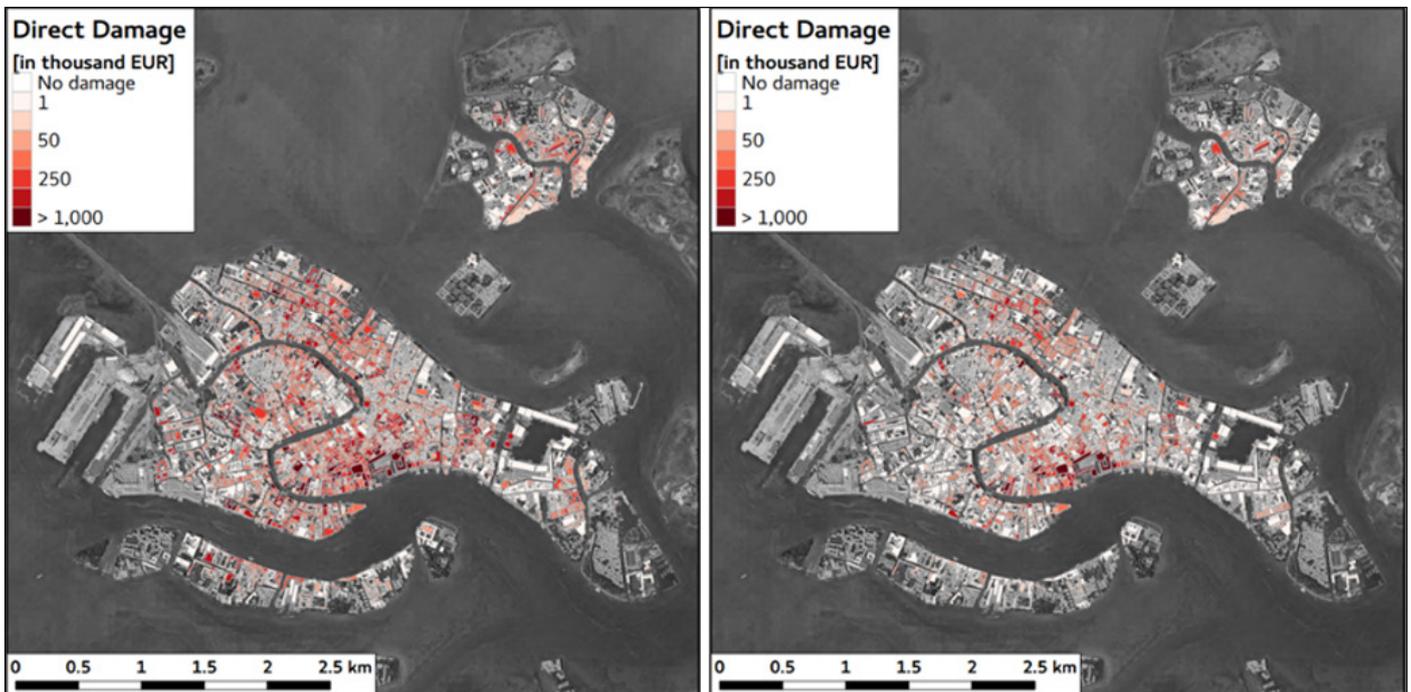


Figura 4. Danni diretti totali agli edifici in migliaia di EUR per eventi con periodo di ritorno pari a 100 anni per il periodo storico (2000-2019) (pannello di sinistra) e la proiezione delle alte emissioni per gli anni 2040 (pannello di destra).

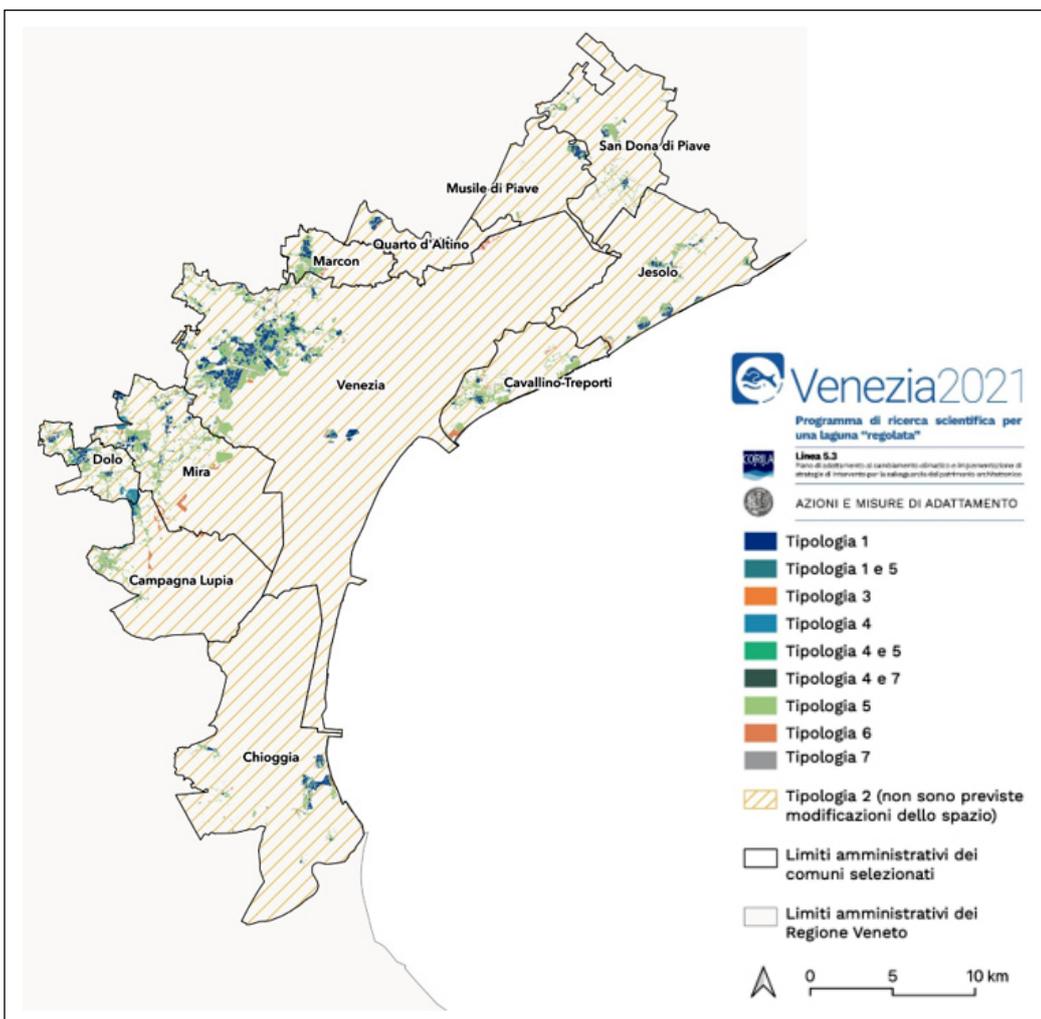


Figura 5. Carta Azioni e Misure del Piano di adattamento territoriale. (Tipologia 1: arredo urbano; Tipologia 2: comunicazione e sensibilizzazione; Tipologia 3: gestione dei rischi; Tipologia 4: gestione delle acque; Tipologia 5: greening urbano; Tipologia 6: protezione della costa; Tipologia 7: superfici fredde).

12. **Metodologia innovativa di monitoraggio dello stato di conservazione del costruito**, multi analitica, a vari livelli di approfondimento in relazione alle risorse impiegabili, per una valutazione sintetica ed efficace degli effetti delle acque e di altre forzanti ambientali. Proposta di una metodologia di valutazione degli interventi basata su indicatori multidisciplinari condivisi quali compatibilità, efficacia e sostenibilità (Figura 6).



Figura 6. (a sinistra) Monitoraggio dell'evoluzione del fenomeno di risalita capillare a scala urbana negli ultimi 15 anni (basato sul confronto con immagini dell'archivio Pasqucci) e localizzazione dei casi studio e dei cantieri pilota di approfondimento considerati per il progetto Venezia 2021. (a destra) Indicatori multidisciplinari condivisi per il monitoraggio dello stato di conservazione del costruito e degli interventi.

### 3. Sistema osservativo

Le attività della Tematica 5 hanno contribuito notevolmente al sistema osservativo della laguna di Venezia, sia da un punto di vista macro sulle dinamiche lagunari, sia da un punto di vista micro relativamente al comportamento degli edifici.

Nello specifico nella tabella in figura 7 sono sinteticamente indicate le attività che hanno contribuito al sistema osservativo e la loro eventuale prosecuzione.

### 4. Ulteriori approfondimenti

Per quanto riguarda la Tematica 5, gli approfondimenti che possono essere eseguiti e le attività che possono ulteriormente essere sviluppate riguardano diversi aspetti:

1. Sul tema delle previsioni e proiezioni del cambiamento del livello del mare a Venezia: (i) utilizzo di un modello idrodinamico che copra l'intero Mare Mediterraneo e parte dell'Oceano Atlantico orientale per consentire un downscaling ottimale delle informazioni ottenute da modelli climatici globali al caso della laguna di Venezia; (ii) integrazione degli scenari di cambiamento climatico con scenari di subsidenza per la laguna di Venezia.
2. Sul tema delle previsioni e proiezioni degli effetti del cambiamento climatico sul moto ondoso: (i) estensione delle proiezioni climatiche verso la fine del secolo attuale, al fine di coprire il periodo di vita utile del MoSE (per questa ricerca ci si è fermati al 2050); (ii) indagine dell'impatto del climate change sulla stabilità e mobilitazione dei litorali del Nord Adriatico; (iii) uso di modelli climatici per stimare l'incertezza delle previsioni future.
3. Sul tema della gestione della vulnerabilità del contesto urbano ai cambiamenti clima-

ATTIVITÀ	MISURAZIONE ED EVENTUALE STRUMENTAZIONE INSTALLATA	POSSIBILE CONTINUAZIONE DELLE MISURAZIONI
Sperimentazione avviata da luav (WP 5.2)	Analisi e mappatura della vulnerabilità dei contesti urbani alle ondate di calore (UHI) e agli eventi meteorici estremi (urban flooding)	Aggiornamento non invasivo del dataset tramite applicazioni open source per l'acquisizione e il processamento nel continuo di immagini satellitari multi-spettrali
Sperimentazione avviata da Ca' Foscari DAIS (WP 5.2)	Previsioni di medio e lungo termine di eventi eutrofici e anossici con tecniche di intelligenza artificiale tramite analisi dei dati monitorati da Rete SAMANET	Integrazione nella Rete SAMANET di sonde in continuo per la misurazione di Nutrienti (azoto e fosforo) e pH
Sperimentazione in laboratorio FisTec luav (WP 5.3)	Mock-up in muratura per valutazione risalita capillare	Monitoraggi non invasivi in continuo: - impedenza elettrica - differenza di potenziale Monitoraggi non invasivi discontinui: - resistivo - capacitivo - termografia IR
Sperimentazione in laboratorio FisTec luav (WP 5.3)	Mock-up in muratura per valutazione efficacia sistemi di trattamento della risalita capillare	Installazione sistemi di trattamento: - Sistema ad elettrosmosi passiva - Sistema a neutralizzazione di carica
Sperimentazione intonaci della tradizione veneziana avviata da luav c/o Scuola Edile Padova (WP 5.3)	Osservazioni qualitative relativamente a: - altezza e distribuzione della risalita; - eventuale sviluppo di fenomeni macroscopici di incompatibilità fisico-chimica fra i diversi strati degli intonaci e rispetto alla muratura; - fenomeni e forme di degrado prevalenti; - confronto del comportamento nel tempo della muratura rifinita a vista con quello della muratura intonacata.	- Continuazione delle osservazioni dirette del comportamento dei campioni (posti tuttora all'aperto) rispetto alle condizioni atmosferiche naturali; - osservazioni di eventuali sviluppi dei fenomeni di degrado in atto o di nuove forme; - possibili confronti con gli esiti di altre sperimentazioni.
Sperimentazione in laboratorio LAMA-LabCoMac luav (WP 5.3)	Caratterizzazione dei materiali lapidei e delle forme di degrado sottoposti ad invecchiamento naturale con strumentazione già in dotazione	Monitoraggi non invasivi in situ e in laboratorio allo scopo di controllare i cambiamenti del fenomeno di deterioramento in relazione alle condizioni meteorologiche a cui le superfici sono sottoposte
Sperimentazione in laboratorio LAMA-LabCoMac, luav (WP 5.3)	Caratterizzazione dei materiali lapidei e dello stato di conservazione di provini sottoposti a test di invecchiamento accelerato in camera climatica (con strumentazione già in dotazione integrata per Venezia2021)	Possibilità di testare: - materiali di diversa natura sottoposti a condizioni di stress; - qualità di prodotti utilizzati come trattamenti conservativi sottoposti ad invecchiamento artificiale accelerato.

*Figura 7. Attività che hanno contribuito al sistema osservativo e la loro eventuale prosecuzione*

tici: integrazione del comportamento morfologico del territorio con il trend climatico.

- Sul tema della valutazione degli impatti acuti dei cambiamenti climatici sulle risorse alieutiche lagunari: (i) estensione ed utilizzo di modelli di "tolerance landscape" anche per altre specie di interesse e considerando altri potenziali co-stressori; (ii) sviluppo di scenari di produttività della molluschicoltura lagunare; (iii) approfondimento

- del ruolo della molluschicoltura nel ciclo del carbonio lagunare, anche in prospettiva del mercato dei crediti di carbonio; (iv) integrazione di modelli statistici per la previsione a breve termine in un sistema osservativo dell'ecosistema lagunare veneziano.
5. Sul tema della biogeochimica lagunare: (i) miglioramento e affinamento del modello biogeochimico sviluppato; (ii) integrazione del modello di accrescimento della vongola *R. philippinarum* con il modello SHYFEM-BFM, considerando anche le dinamiche di popolazione.
  6. Sul tema degli scenari di rischio legati al cambiamento climatico: (i) miglioramento modellistico attraverso l'uso dell'Intelligenza Artificiale con algoritmi e tecniche (es. deep learning, transfer learning, graph neural networks e physics-informed machine learning) che possano aumentare l'accuratezza dei modelli e quindi diminuire l'incertezza degli scenari; (ii) estensione dell'analisi modellistica attraverso l'inclusione dei cinque scenari futuri aggiornati all'ultimo report IPCC – AR6; (iii) elaborazione di nuovi scenari di rischio in accordo agli scenari futuri di uso del suolo (es. LUISA (Land Use-based Integrated Sustainability Assessment) e LUC@CMCC (land use change model)).
  7. Sul tema degli impatti economici: (i) sviluppo di un modello idrodinamico dipendente dall'aspetto meteorologico del centro di Venezia, del Lido, delle comunità basse sulla terraferma che includa l'allagamento diretto dalla laguna ed i flussi fognari inversi; (ii) simulazioni che ottimizzino l'attivazione del MOSE a diversi livelli d'acqua per comprendere i costi/benefici economici di ogni possibile scenario; (iii) estensione dell'analisi dei costi indiretti alla stima dei costi del turismo venuto a mancare durante i grandi eventi di acqua alta.
  8. Sul tema del Piano di Adattamento climatico: (i) studio per l'integrazione delle misure identificate nel Piano di adattamento negli strumenti di pianificazione territoriale ed urbanistica ordinari e cogenti, attraverso proposte concordate con le amministrazioni della laguna (in special modo contermini); (ii) studio e approfondimento sulle implicazioni economiche di eventi siccitosi dovuti al cambiamento climatico sull'agricoltura/itticoltura dell'area; (iii) affinamento della mappatura degli stakeholder e dei relativi progetti di trasformazione della laguna o sue porzioni, con l'obiettivo di metterli a sistema con scenari complessivi attraverso l'organizzazione di occasioni di confronto e collaborazione.
  9. Sul tema della conservazione del patrimonio architettonico e culturale della Laguna: (i) proseguimento e approfondimento nella caratterizzazione dei materiali da costruzione veneziani e di quelli impiegati negli interventi di restauro, mediante campionamenti (prove di tipo chimico-fisico-meccanico), al fine di valutarne il comportamento nel lungo periodo; (ii) validazione delle metodologie di analisi, intervento e manutenzione del costruito. Prosecuzione della sperimentazione a scala edilizia, su edifici di differenti periodi storici; (iii) validazione del piano di monitoraggio (sistemi non invasivi) con applicazione estesa a scala urbana per architetture storiche (con particolare attenzione alle murature) e architetture appartenenti al XX secolo (con particolare attenzione a strutture in calcestruzzo armato); (iv) studio dell'impatto degli interventi di conservazione e manutenzione ipotizzati o realizzati sull'immagine urbana della città.

# Le Tematiche e i Gruppi di ricerca

## **Tematica 1.**

### **Le interfacce della laguna: scambi con mare e bacino scolante**

Responsabile scientifico: Federica Braga (CNR-ISMAR)

Responsabili di Linea: Marco Marani (UNIPD), Mauro Sclavo (CNR-ISP), Luca Zaggia (CNR-IGG), Roberto Zonta (CNR-ISMAR).

## **Tematica 2.**

### **Sedimenti, inquinamento chimico e interazione con gli organismi lagunari**

Responsabile scientifico: Elena Semenzin (UNIVE-DAIS)

Responsabili di Linea: Elena Semenzin (UNIVE-DAIS), Donata Melaku Canu (OGS), Andrea Gambaro (DAIS-UNIVE).

## **Tematica 3.**

### **Forme, habitat e comunità acquatiche lagunari**

Responsabile scientifico: Carlotta Mazzoldi (BIO-UNIPD)

Responsabili di Linea: Luigi Tosi (CNR-IGG), Andrea D'Alpaos (GEOSCIENZE-UNIPD), Carlotta Mazzoldi (BIO-UNIPD), Adriano Sfriso (DAIS-UNIVE)

## **Tematica 4.**

### **Connessioni ecologiche e servizi ecosistemici**

Responsabile scientifico: Cosimo Solidoro (OGS)

Responsabili di Linea: Simone Libralato (OGS), Fabio Pranovi (UNIVE).

## **Tematica 5.**

### **Cambiamento climatico e strategie di adattamento per la salvaguardia del patrimonio culturale di Venezia e la sua laguna**

Responsabile scientifico: Anna Saetta (IUAV)

Responsabili di Linea: Davide Zanchettin (DAIS-UNIVE), Andrea Critto (UNIVE), Anna Saetta (IUAV).

