



Venezia2021

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

Linea 1.3

***Modellazione numerica integrata del sistema
bacino scolante-laguna-mare***

Rapporto Finale

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

Marco Marani (DICEA-UNIPD)

02/10/2022

A handwritten signature in blue ink that reads "Marco Marani".

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

È stato calibrato e validato un modello operativo della laguna di Venezia, che prevede, con cadenza giornaliera, le variabili di livello, corrente, temperatura e salinità in tre dimensioni. 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. Il 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, fornendo dati misurati in tempo reale, l'assimilazione dati può migliorare in modo sensibile la qualità delle simulazioni modellistiche.

È stato sviluppato un modello integrato idrodinamico-biogeochimico basato sugli ultimi codici di SHYFEM e BFM presenti nelle repository. La struttura è stata sviluppata per facilitare l'integrazione dei successivi sviluppi dalle repository stesse. Sono stati inoltre sviluppati nuovi codici che consentano di descrivere 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, sugli scambi laguna-mare. Il modello permette di riprodurre l'evoluzione idrodinamica, della temperatura e della salinità del sistema e consente 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, 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 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. È così possibile rappresentare in maniera ancora più completa ed efficace le dinamiche del bacino per quanto concerne temperatura e salinità.

Il benchmark dei modelli sviluppati e validati nel presente progetto, con riferimento alla capacità di descrivere la dinamica della temperatura dell'acqua all'interno della laguna, è stato condotto. Esso ha evidenziato che tutti gli strumenti numerici messi a punto e utilizzati nell'ambito del progetto sono 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°C, con scostamenti leggermente maggiori durante i mesi invernali. Il confronto con la distribuzione spaziale rilevata da satellite mostra differenza tra risultati numerici e osservazioni sperimentali inferiori a 1°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.

Il modello biogeochimico SHYFEM-BFM è stato sviluppato con l'aggiornamento della batimetria e della griglia di calcolo alle più recenti informazioni disponibili, sono state inserite nuove funzionalità per rappresentare i processi di scambio all'interfaccia acqua/sedimento, sono state acquisite le osservazioni raccolte nel progetto per caratterizzare il sistema nell'anno di riferimento (2019), e per anni precedenti (2005 e 2008). In accordo con gli obiettivi, 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).

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

2.1 Interfaccia per la consultazione dei risultati del modello operativo

Le attività della Linea hanno prodotto 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 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 (Figura 1).



Figura 1. Visualizzazione del campo di velocità in tempo reale attraverso il sistema ISSOS (<https://issos.ve.ismar.cnr.it/>).

2.3 Benchmark dei modelli e analisi della dinamica della temperatura dell'acqua

Il confronto tra i modelli sviluppati e validati nella Linea ha consentito non solo di verificare la loro efficacia nel descrivere la dinamica delle principali variabili fisiche e biogeochimiche, ma anche di evidenziare come l'utilizzo combinato di misure in-situ, rilievi satellitari e risultati numerici consenta una descrizione dei processi che interessano gli ecosistemi lagunari altrimenti impossibile. Le misure in-situ forniscono infatti informazioni limitate alle aree in prossimità della stazione di misura. I rilievi satellitari mostrano la

distribuzione spaziale della temperatura, limitatamente però all'istante di acquisizione dell'immagine. I modelli numerici, opportunamente calibrati e verificati, integrano invece, nello spazio e nel tempo e sulla base dei processi fisici le grandezze di interesse. L'uso combinato di modelli, osservazioni puntuali e da satellite ha permesso per esempio di evidenziare il ruolo delle immissioni dovute alle attività produttive sulla temperatura nell'area prossima al polo industriale di Marghera (un esempio è riportato in Figura 2). Tale applicazione mostra come modelli che descrivono la dinamica della temperatura dell'acqua siano utili strumenti al fine di valutare e prevedere gli effetti delle attività antropiche sull'ecosistema lagunare.

2019-03-22 11:00

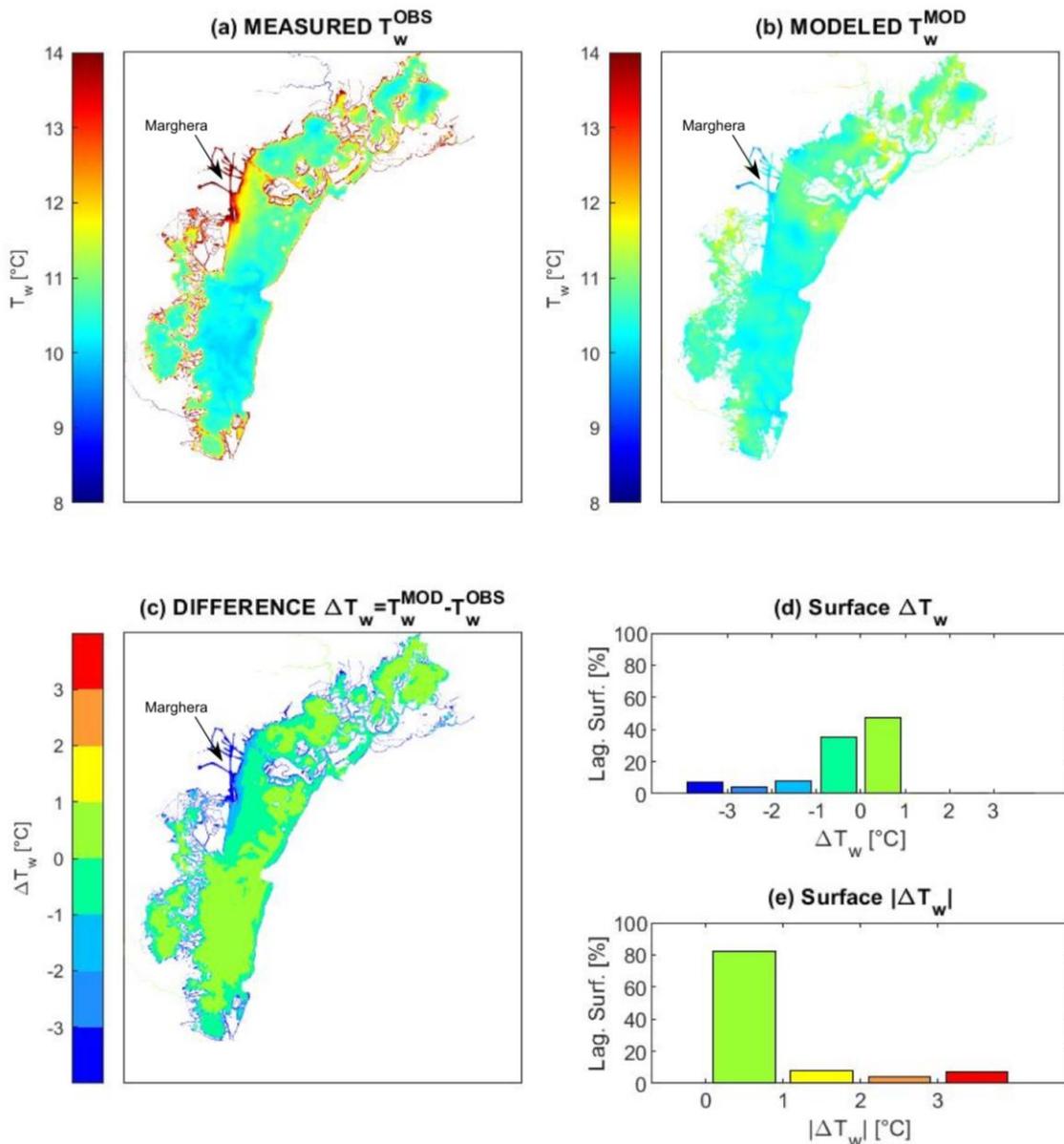


Figura 2. Confronto della distribuzione spaziale della temperatura dell'acqua rilevata da satellite (T_w^{OBS}) e modellata (T_w^{MOD}) utilizzando il modello UniPD alle 11:00 del 22/03/2019. A) mappa della temperatura rilevata da satellite; b) mappa della temperatura modellata; c) mappa della differenza ΔT_w tra temperatura modellata e rilevata da satellite; d) percentuale di superficie lagunare caratterizzata da diversi range di differenza ΔT_w ; e) percentuale di superficie lagunare caratterizzata da diversi range di differenza assoluta ΔT_w .

2.4 Evoluzione morfologica della Laguna e scambi di sedimenti con il mare

L'uso di modelli di circolazione idrodinamica e di risospensione e trasporto dei sedimenti infine permesso di definire, per mezzo di lunghe simulazioni numeriche, il bilancio di sedimenti per il bacino lagunare. Tali stime quantificano in circa 614.000 m³/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, Figura 3). Questa perdita potrebbe essere ridotta a 179.000 m³/anno con l'adozione delle misure previste dall'inattuato aggiornamento del Piano Morfologico per la laguna di Venezia.

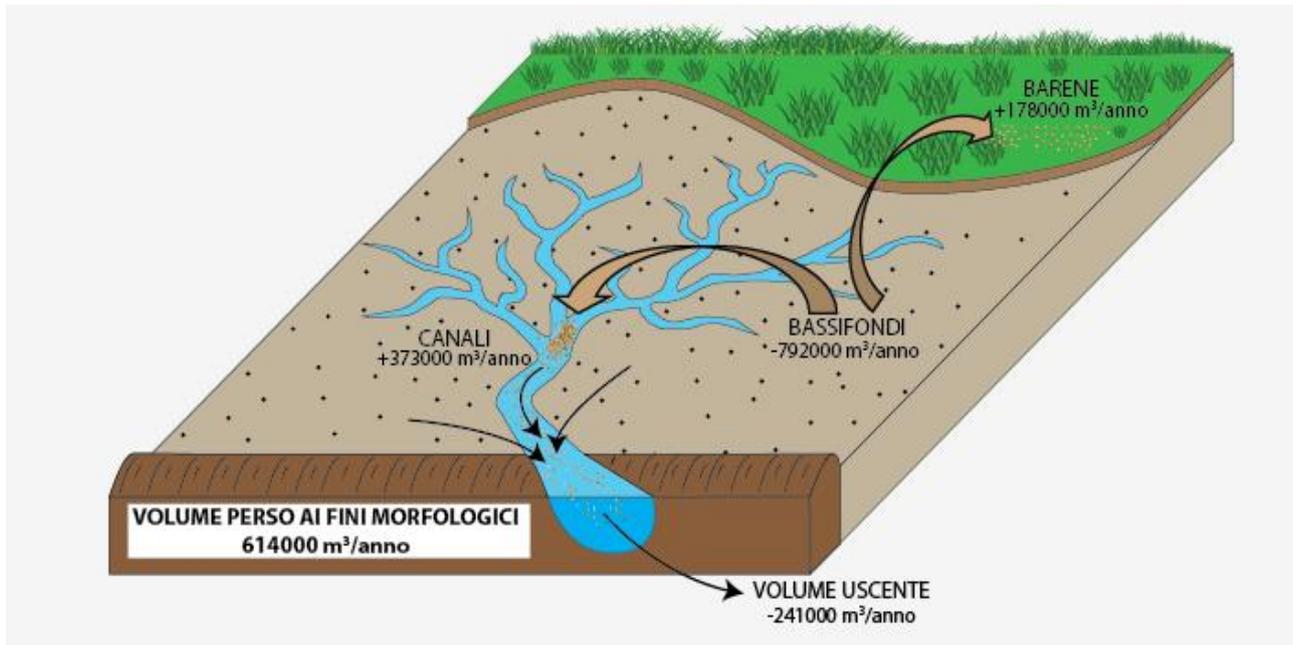


Figura 3. Bilancio dei sedimenti per la laguna di Venezia nelle condizioni attuali. Si nota come vi sia una significativa erosione dei bassifondali (circa 792.000 m³/anno), che produce un interrimento della rete di canali (con un apporto di circa 373.000 m³/anno), e una perdita netta verso il mare molto importante (circa 241.000 m³/anno).

3. Spunti per il futuro

Gli obiettivi della Linea riguardano 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, ha consentito di investigare il comportamento idro-morfodinamico del bacino lagunare e 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.

La necessità di potenziare la frequenza e la copertura spaziale della rete di misure, è particolarmente sentita per i parametri biogeochimici. Ad eccezione delle stazioni SAMANET, che misurano l'ossigeno, la temperatura e la clorofilla ad alta frequenza, le informazioni biogeochimiche relative agli input fluviali, alle acque marine, e lagunari sono disponibili ad una frequenza compresa tra uno e tre mesi, del tutto insufficiente per caratterizzare le condizioni al contorno. Le analisi condotte suggeriscono con forza di ripristinare dei monitoraggi ad alta frequenza alle bocche di porto e nelle stazioni marine adiacenti la

laguna. Risulta importante anche aumentare il numero dei parametri misurati, includendo anche un monitoraggio biologico di fitoplancton e zooplancton, sfruttando sistemi autonomi e sviluppando sistemi di assimilazione di dati nei modelli. L'assenza di queste informazioni limita notevolmente la capacità dei modelli di rappresentare lo stato di qualità delle acque della Laguna e la possibilità di verificarne il funzionamento.

In questo contesto la realizzazione di un modello integrato bacino scolante-laguna-mare, nella sua globalità, rappresenta un obiettivo centrale, che può capitalizzare i dati raccolti e potenziarne il valore e la fruibilità sia per studi dedicati alla complessità biogeochimica ed ecologica sia per l'implementazione e l'esercizio della modellistica idrodinamica operativa.

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività

Il WP 1.3.1 si è concentrato sull'operatività modellistica, con lo scopo di fornire uno strumento adatto alla gestione delle emergenze, sia naturali, quale l'acqua alta, sia di natura antropica, come lo sversamento di sostanze. La previsione, o lo studio a posteriori di tali fenomeni, richiede la previsione delle principali variabili fisiche ed ambientali della laguna. Per tal motivo, è stato calibrato e validato un modello idrodinamico della laguna di Venezia, che ora funziona in modalità operativa. Il modello è basato sul codice SHYFEM, utilizzato e descritto anche negli altri WP di questa linea. Il sistema è stato pensato per fornire la massima accuratezza della previsione per la laguna in un tempo operativamente accettabile. Per questo motivo ogni giorno una prima simulazione barotropica sul bacino mediterraneo prevede il contributo meteorologico nel nord Adriatico. Successivamente viene calcolato il livello totale, utilizzando la marea astronomica, nota con precisione dall'analisi armonica. Il livello totale così previsto viene utilizzato come condizione al contorno per una simulazione in laguna, tridimensionale e baroclina. A tal scopo si utilizzano come condizioni al contorno anche dati di temperatura e salinità provenienti dal modello del Mediterraneo del progetto Copernicus. Vengono inoltre prescritte le portate fluviali in laguna, note purtroppo solo con valori climatologici.

La seconda simulazione in laguna fornisce entro la mattinata una dettagliata descrizione delle variabili idrodinamiche in laguna.

La seconda attività del WP si è concentrata nella creazione di un'interfaccia web per la fruizione dei risultati del modello appena descritto. Si è individuata una ditta esterna, esperta in tecnologie informatiche, in grado di portare a termine il lavoro. Tramite varie riunioni bisettimanali si è riusciti a concordare e sviluppare i corretti formati per popolare un database (backend) da cui l'interfaccia vera e propria (frontend) attinge. Il codice è stato sviluppato principalmente in Javascript, con licenza open source. Inoltre, sono state utilizzate le librerie Leaflet. L'interfaccia risulta ora consultabile dalla pagina: <https://issos.ve.ismar.cnr.it/>, in modo agevole sia da PC che da smartphone. È stata seguita una logica essenziale, cercando di avere una visualizzazione pulita e dei comandi semplici ed intuitivi. La nomenclatura e le pagine di aiuto e di contatti sono interamente in italiano.

Infine, la terza attività seguita è stata quella di eseguire dei test di assimilazione dati in laguna. L'assimilazione dati è un insieme di tecniche e metodologie avente lo scopo di migliorare la qualità dei dati del modello e di ridurre l'errore, sfruttando le osservazioni effettuate nel periodo da simulare. La tecnica usata viene denominata Ensemble Squared Root Filter (EnSFR) e presenta analogie con l'Ensemble Kalman Filter.

Nell'ambito del WP 1.3.2, una prima attività (obiettivo 1) è stata dedicata al completamento e all'aggiornamento dell'accoppiamento dei codici SHYFEM e BFM utilizzando le ultime due versioni (v. 7_5_69 e V.5) disponibili nei relativi siti: <https://github.com/SHYFEM-model/shyfem> e <https://cmcc-foundation.github.io/www.bfm-community.eu/>. In relazione all'obiettivo 2 le routine del modello relative alla chiusura delle bocche di porto sono state implementate per lavorare in un dominio tridimensionale, che include quindi l'area di mare antistante le bocche stesse. Infine il codice lagrangiano è stato modificato nei formati di output, al fine di occupare meno spazio, e le routine di *processing* sono state aggiornate.

A latere di queste attività sul codice, sono state preparate le griglie di calcolo da usare nel progetto. Nello specifico sono state aggiornate la batimetria e la griglia degli elementi finiti, utilizzate per le simulazioni biogeochimiche. È stata aggiornata la griglia VenlagBio_20 (griglia di complessità intermedia, aggiornata rispetto alla precedente griglia VENLAG62 e SHEFLAG usata da CNR-ISMAR) con i nuovi dati batimetrici acquisiti nel 2013 in corrispondenza dei canali principali della Laguna di Venezia (Madrucardo et al., 2017). La nuova griglia è stata creata in due versioni: a) VenlagBio_206017 nodi e 10417 elementi, il cui dominio è delimitato dalla linea di conterminazione lagunare; e b) ShelflagBio_206688 nodi e 11525 elementi, che include nel dominio l'area del Mare Adriatico adiacente alla laguna di Venezia.

Contestualmente si è lavorato sulla griglia SHELFLAG di CNR, in cui sono stati aggiunti i tratti finali di tutti i tributari del bacino scolante. Sono state valutate diverse combinazioni ad alta risoluzione dei suddetti canali e della laguna, ottenendo una griglia che rappresenta un buon compromesso tra velocità di calcolo e capacità di rappresentare dettagliatamente le caratteristiche locali.

Una volta terminati questi aggiornamenti necessari, sono state prodotte le simulazioni di riferimento per la stima dei tempi di rinnovo ed età dell'acqua; le *performance* del modello sono state quindi confrontate con dati misurati di livello, temperatura e salinità, valutando come buona la capacità del modello di riprodurre le dinamiche in condizioni di laguna non regolata.

In accordo con l'obiettivo 3 del WP, è stato sviluppato un nuovo modello basato sulla distribuzione dei tempi di viaggio per la descrizione dei processi di trasporto solido nei bacini del Fiume Dese e del Canale Osellino. Il modello è in grado di riprodurre con ottima precisione la formazione ed il trasporto di eventi di piena, nonché il trasporto di nitrati (NO_3^-), stimandone il carico apportato all'interno della Laguna a scala temporale giornaliera sulla base delle distribuzioni di probabilità dei tempi di viaggio delle particelle d'acqua. Il modello è stato calibrato, sulla base dei dati disponibili in termini di concentrazioni di NO_3^- misurate utilizzando un approccio basato su tecniche di Machine Learning e Artificial Intelligence. Il modello accoppiato idrologico e di trasporto è stato quindi applicato ai diversi bacini e sottobacini idrografici del fiume Dese-Zero e del Canale Osellino. Le serie temporali simulate per l'anno 2019, scelto come anno di riferimento per le attività della Linea 1.3, sono state dunque fornite ai modelli idrodinamici in corrispondenza alle sezioni della rete principale cui le stesse fanno riferimento.

Si è quindi integrato il modello del bacino scolante sviluppato per i bacini di Dese e Osellino da UNIPD con il modello laguna-mare, la cui griglia appositamente si estende fino ai punti di chiusura dei bacini stessi. (Obiettivo 4). Su tale griglia, è stata quindi condotta una simulazione adottando come dati di input fluviale le portate modellate (Deliverable D1.3.2.2) al posto delle portate misurate, che caratterizzano invece la simulazione di riferimento, mantenendo invariato il restante setup.

In tal modo si è valutato l'effetto della diversa stima delle portate: i risultati ottenuti con stime di portata da modello sono stati confrontati con quelli generati utilizzando le osservazioni di portata disponibili.

Le simulazioni del modello idrodinamico sviluppato presso CNR sono state confrontate, nel WP 1.3.3, con i dati ottenuti dalle misurazioni in campo, per valutare la capacità di rappresentare le dinamiche del bacino. Per quanto riguarda le forzanti meteo-marine sono stati utilizzati i dati misurati in piattaforma Acqua Alta (<http://www.ismar.cnr.it/infrastrutture/piattaforma-acqua-alta>) e quelli misurati alle bocche di porto. Per quanto riguarda le portate fluviali sono stati utilizzati valori non mediati o, alternativamente, valori la cui componente mareale è stata attenuata per limitare il rischio di instabilità nel modello. I risultati sono stati confrontati sia con serie di temperatura e salinità misurate, sia con mappe di temperatura da satellite.

Il gruppo di ricerca dell'OGS ha condotto analisi di test e calibrazione modellistica biogeochimica per migliorare l'accordo del modello rispetto ai dati sperimentali. Sono state effettuate delle analisi delle simulazioni biogeochimiche ed effettuati dei test sulle informazioni più incerte, ovvero le condizioni al contorno marino e alcune parametrizzazioni. Sono state adottate diverse configurazioni delle condizioni al contorno marino, utilizzando la rianalisi CMEMS (MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008) e dati dei monitoraggi MELA (MAV-CVN 2006¹, 2006², 2009³). È stata effettuata un'analisi variando gli apporti urbani

¹ MAV - CVN, 2006a. Attività di monitoraggio ambientale della Laguna di Venezia, 3° fase (2003-2006) MELa 3 – OP/285. Rapporto tecnico finale sulle attività di monitoraggio della qualità delle acque Volume 1. Rapporto di sintesi

² MAV - CVN, 2006b. Attività di monitoraggio ambientale della Laguna di Venezia, 3° fase (2003-2006) MELa 3 – OP/285. Rapporto tecnico finale sulle attività di monitoraggio della qualità delle acque Volume 2. Rapporto di sintesi

³ MAV - CVN, 2009. Attività di monitoraggio ambientale della laguna di Venezia MELa4 (2007-2009) – OP/416 monitoraggio di mantenimento delle conoscenze sullo stato delle acque e del macrobenthos della qualità delle acque

delle isole lagunari di azoto e fosforo (calcolati sulla base delle statistiche della popolazione residente e non residente), sono state realizzate delle simulazioni per analizzare il ruolo della predazione dello zooplancton sui processi biogeochimici variando il parametro di predazione dello zooplancton. È stato inoltre inserito un modulo bentico per rappresentare i processi di scambio all'interfaccia acqua/sedimento.

Il gruppo di ricerca di UniPD ha implementato nel modello idro-morfodinamico WWTM un modulo di trasporto e scambio energetico che, combinato al modulo idrodinamico, consente di descrivere la dinamica della temperatura dell'acqua in Laguna. La capacità del modello di descrivere correttamente la dinamica della temperatura è stata testata confrontando i risultati numerici sia con misure in-situ della temperatura dell'acqua registrate presso le sonde della rete SAMANET presenti in Laguna, che con la distribuzione spaziale della temperatura rilevata da satellite. Le misure in-situ forniscono un'informazione continua nel tempo, ma limitata alla posizione in cui vengono effettuate; al contrario, dalle immagini satellitari è possibile ricavare un'informazione spazialmente distribuita, relativa però al singolo istante di acquisizione dell'immagine stessa. La combinazione delle due tipologie di osservazioni consente dunque un'analisi completa della dinamica della temperatura e, per confronto con i risultati numerici, un test robusto dell'efficacia del modello nella sua descrizione. Il modello è stato testato sia su scala temporale settimanale che annuale, verificando la sua capacità di descrivere la dinamica stagionale della temperatura. Inoltre al fine di sopperire ad eventuali lacune nella caratterizzazione dello stato iniziale del sistema, si è investigato il tempo di spin-up necessario al modello per perdere memoria delle condizioni iniziali imposte e portarsi ad una distribuzione spaziale della temperatura rappresentativa della condizione reale.

L'attività relativa al WP1.3.3 si è conclusa con il benchmark dei modelli sviluppati e testati nell'ambito del presente progetto. Il benchmarking dei modelli è stato eseguito sui risultati relativi alla temperatura dell'acqua, che rappresenta la principale variabile comune tra i modelli oltre alle variabili idrodinamiche quali livelli, velocità e portate liquide. La performance dei singoli modelli è stata valutata stimando la differenza/errore calcolato nel confronto tra risultati numerici e le misure/osservazioni disponibili relative alla temperatura dell'acqua in Laguna. In particolare, i diversi gruppi di ricerca coinvolti nell'attività di benchmarking dei suddetti modelli hanno eseguito, sulla base di un dataset comune di variabili meteorologiche registrate dalle stazioni di misura presenti in Laguna nel corso del 2019 ed utilizzate come condizioni al contorno, delle simulazioni della durata di un anno. Il benchmarking è stato eseguito utilizzando sia misure in-situ della temperatura (sonde della rete SAMANET) che rilievi satellitari della stessa (11 immagini LANDSAT), ottenendo un set di dati sperimentali che forniscono una descrizione completa della dinamica della temperatura sia dal punto di vista temporale che spaziale. Come già descritto ai punti 1 e 2 l'accordo tra i modelli e con le misure è stato più che soddisfacente e ha anche permesso di cogliere e quantificare il ruolo degli apporti termici alla laguna da parte del bacino scolante e degli utilizzi antropici del polo industriale di Marghera.

Nel quadro del WP 1.3.4 è stato creato un set-up di riferimento comune a tutta la linea per realizzare le simulazioni di benchmarking relative alle variabili. Il dataset include idealmente dati di batimetria, livelli alle bocche di porto, dati meteorologici (radiazione solare, temperatura e all'umidità dell'aria), biogeochimici, alle bocche di porto, e nei fiumi e dataset di confronto per le variabili comuni ai tre modelli (stazioni SAMANET). I dati sono stati acquisiti dai diversi enti che operano in Laguna di Venezia (ARPAV, ISPRA, Provveditorato), da portali esterni (CMEMS), dalla letteratura scientifica e internamente al progetto Venezia2021. Sono state realizzate tre simulazioni biogeochimiche, relative modello agli anni 2005, 2008 e 2019 (*sim_2005*, *sim_2008*, *sim_2019*) e sono stati prodotti i relativi indicatori di stato trofico.

Sono state inoltre realizzate due simulazioni di scenario biogeochimico con chiusura del MOSE: una simulazione relativa all'anno 2019, *scen_bio19*, e una più estrema, *Scen+25*, con un aumento del livello

in collaborazione con SAMA. Campagne periodiche di misura, negli anni 2007 e 2008, Volume 1 – Rapporto tecnico finale.

medio del mare di +25 (corrispondente allo scenario SSP5-8.5 per l'anno 2050). Entrambe le simulazioni sono state confrontate con il riferimento *sim_2019*. Nello scenario è stata applicata una procedura di chiusura per tutti gli eventi che superano 1.10 m di livello. Questo comporta, per lo scenario del 2019, la chiusura della Laguna per poco più di 6 giorni totali nell'anno che inducono delle lievi differenze nelle concentrazioni delle variabili biogeochimiche di Fosfato, Ammonio, Nitrato, Ossigeno disciolto (range +-10%) Fitoplancton (range +-20%) più marcati in concomitanza delle chiusure. Nello scenario *Scen+25* la chiusura del bacino si protrae per circa l'8% del tempo, (distribuita su 80 giornate nell'anno) e induce effetti più marcati sulla biogeochimica, ma riconducibili alla variabilità della biogeochimica lagunare. Emergono però degli sfasamenti della stagionalità con possibili ripercussioni sulla dinamica della rete trofica superiore.

Le scale di trasporto sono state indagate da parte di CNR, effettuando una simulazione di scenario di chiusura del MOSE con modalità cautelative per proteggere la basilica di San Marco. Tale simulazione è stata quindi confrontata con la simulazione di riferimento 2019. Sono state valutate le differenze nella distribuzione delle velocità, nella distribuzione della temperatura e della salinità. Sono stati inoltre calcolate le differenze che questo tipo di chiusura comporterebbe nei tempi di residenza e nell'età dell'acqua.

Gli strumenti modellistici messi a punto dall'unità operativa UNIPD sono stati utilizzati per approfondire diversi fenomeni che caratterizzano la laguna di Venezia. Il primo approfondimento riguarda l'analisi degli effetti causati dalle chiusure delle bocche di porto sui livelli all'interno del bacino lagunare e sul setup determinato da vento. Successivamente, sono state riprodotti gli eventi di "Acqua Alta" avvenuti tra la fine del 2020 e l'inizio del 2021, durante i quali è entrato in funzione il sistema MOSE, al fine di investigare gli effetti delle chiusure delle barriere mobili alle bocche di porto sull'idrodinamica e sulla dinamica dei sedimenti all'interno della laguna. Infine, un terzo approfondimento ha riguardato l'analisi degli scambi di sedimenti mare-laguna. A tal fine sono state condotte tre simulazioni di durata annuale e relative agli anni 2005, 2019 e 2020 volte a stimare la variabilità inter annuale degli scambi stessi e, in particolare, il contributo relativo legato ai periodi ordinari e a quelli caratterizzati da forzanti meteo particolarmente intense.

Opportune simulazioni eseguite utilizzando il modello WWTM sviluppato da UNIPD hanno permesso inoltre di stimare i benefici degli interventi strutturali proposti dal Piano Morfologico per la Laguna di Venezia (PMLV). In particolare, il PMLV prevede la realizzazione di strutture morfologiche adiacenti ai canali di maggiori dimensioni, realizzate al fine di ridurre la perdita di sedimenti verso mare e l'approfondimento dei fondali lagunari, barriere soffolte a protezione dei margini barenali, strutture morfologiche a velma che svolgono una funzione idromorfologica di protezione dei fondali e dei margini delle barene naturali esposti al moto ondoso da vento o da natante. Utilizzando le forzanti meteo-marine proprie dell'anno tipico come condizioni al contorno, sono state eseguite delle simulazioni considerando la configurazione attuale e quella proposta nel PMLV, quantificando dunque gli effetti degli interventi sulla base del confronto tra i risultati numerici ottenuti.

5. Risultati per attività

WP1.3.1 - Operatività

Il modello operativo è stato calibrato e validato in diversi periodi per le variabili di livello, temperatura e salinità. I risultati hanno evidenziato come l'accuratezza sia buona per il livello marino e la temperatura dell'acqua. Per quanto riguarda la salinità ci sono degli errori considerevoli, soprattutto nelle zone più interne della laguna, a causa della scarsa conoscenza delle portate dei fiumi, che sono imposte in modo climatologico. Questo causa un drift della salinità, che in genere risulta più bassa di quella misurata.

I risultati sono disponibili, fino alla previsione del giorno corrente, tramite l'interfaccia web, in cui è possibile consultare il valore orario in ogni punto di ogni variabile, selezionando la variabile e cliccando sul punto desiderato. È inoltre possibile visualizzare i valori degli strati inferiori, fino all'ultimo, vicino al fondo. Per le correnti si è utilizzata una visualizzazione tramite particelle animate che seguono le linee di flusso.

Tale metodo è molto utilizzato ultimamente sia in meteorologia che in oceanografia, in quanto riesce a rappresentare egregiamente il campo associato ad una variabile vettoriale. Anche in questo caso, il valore della corrente e la sua direzione nel punto in cui si trova il mouse, vengono mostrate in modo continuo in basso a sinistra.

Infine, si sono svolti alcuni test di assimilazione in alcuni mesi del 2019. Il periodo è stato scelto in accordo con gli altri WP della presente Linea, in quanto sono presenti una buona quantità di dati osservati, alcuni dei quali da utilizzare come forzanti, altri per l'assimilazione dati e per la validazione. I test eseguiti per i mesi di maggio e giugno 2019 hanno evidenziato come l'assimilazione dati sia in grado di correggere significativamente i risultati del modello, diminuendone l'errore. Talvolta, nonostante errori evidenti nelle forzanti, come le portate poco accurate dei fiumi, che possono provocare errori notevoli di salinità, l'assimilazione dati riesce comunque a sopperire se una stazione di misure non si trova troppo in lontananza. Ad ogni modo le stazioni disponibili, che forniscono dati di temperatura e salinità da assimilare, sono quelle delle centraline SAMAnet, disponibili in modo alterno e mai tutte insieme. Per poter impostare un sistema di assimilazione dati in modo operativo e che fornisca una correzione significativa dei dati modellati, bisognerebbe estendere la rete ad almeno il doppio delle stazioni attuali e poter reperire i dati in tempo quasi reale.

WP 1.3.2 - Modello Integrato

Nell'ambito del WP 1.3.2 è stata ottenuta una suite di griglie aggiornate e ottimizzate per diverse attività in studio. Queste griglie rappresentano - con diverse risoluzioni - la laguna, il mare antistante e possono includere o meno il tratto terminale dei fiumi. Per ciascuna griglia di OGS sono stati condotti i test relativi alle componenti idrodinamica, termalina e biogeochimica e il modello ha attestato un accordo molto buono con i dati di livello, di temperatura e di salinità e, un buon accordo con i dati biogeochimici. Anche per la griglia CNR sono stati condotti test relativi alla componenti idrodinamica e termalina ottenendo un accordo molto buono con i dati misurati. Si è effettuato inoltre l'accoppiamento tra l'ultima versione di SHYFEM disponibile e il codice biogeochimico BFM. il tool così messo a punto è stato testato con successo.

Sono stati effettuati alcuni aggiornamenti del codice impiegato nello studio. La routine di funzionamento delle barriere mobili con un settaggio fisso a un limite prestabilito è stata sviluppata in SHYFEM per lavorare non solo al bordo ma anche con un'area di mare antistante e per funzionare in un'applicazione tridimensionale. La routine è stata testata ed è stata inclusa nel codice di distribuzione del modello. Sono stati aggiornati sia il codice il calcolo dell'età dell'acqua sia le routines di post-processing del codice lagrangiano.

È stato sviluppato un nuovo modello idrologico atto alla simulazione delle dinamiche temporali dei deflussi nonché di un modello di trasporto di soluti reattivi basato sulle distribuzioni di probabilità dei tempi di viaggio delle particelle d'acqua nei bacini del fiume Dese e Canale Osellino. Tale impostazione si spiega dal momento che l'età dell'acqua costituente i deflussi in uscita da un bacino idrografico rappresenta il principale descrittore della composizione chimica dei deflussi stessi, esprimendo la memoria del sistema idrologico a input passati. I nitrati (NO_3^-) sono stati individuati come oggetto delle attività di simulazione, risultando fondamentali nella stima del contributo del bacino scolante al carico di nutrienti in laguna, con importanti ripercussioni sulla catena trofica e i servizi ecosistemici propri dell'ambiente lagunare stesso. Il modello riproduce fedelmente i volumi giornalieri ed annuali di acqua e di NO_3^- in ingresso dal bacino scolante in laguna.

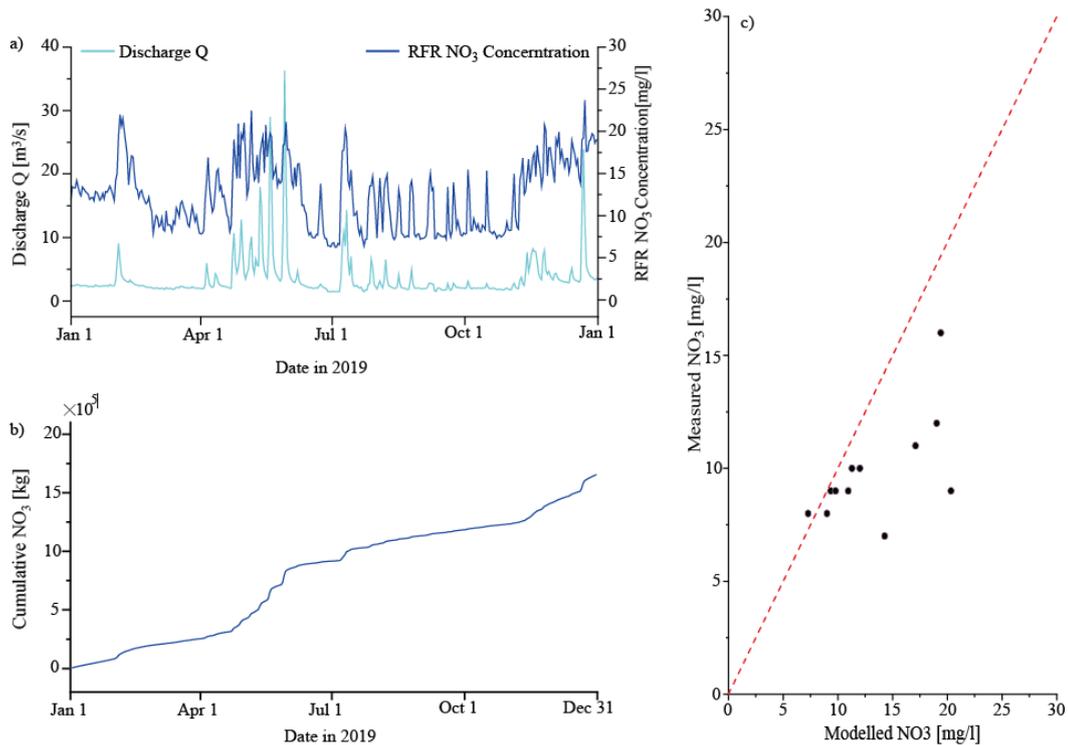


Figura 4. Applicazione del modello di trasporto dei nitrati all'anno 2019 al bacino del fiume Dese e confronto con dati sperimentali di campo. Il pannello "a" mostra i risultati modellistici relativi alle portate liquide ed alle concentrazioni di nitrati alla sezione di chiusura del bacino idrografico. Il pannello "b" mostra invece il carico totale cumulate di nitrati, in kilogrammi, modellato per l'intero anno 2019. Infine, il pannello "c" mostra il confronto tra i dati di concentrazione di NO_3 modellati e quelli misurati da ARPAV con cadenza mensile per il fiume Dese.

Infine è stato realizzato il modello integrato che copre il continuum bacino scolante - laguna - mare e che permette di trattare il sistema come un unicum. Il modello ha dimostrato di riprodurre bene le dinamiche del sistema e di poter dare un contributo rilevante soprattutto in caso di mancanza di serie temporali misurate relative alla portata liquida.

WP1.3.3 - Intercalibrazione e Validazione

Il confronto delle simulazioni con le serie temporali di misure sperimentali raccolte in diverse località della laguna ha permesso di valutare la capacità del modello implementato da CNR (si veda anche WP1.3.2) di descrivere l'idrodinamica nel bacino. Risulta soddisfacente la simulazione di livello e temperatura, mentre la simulazione di salinità appare molto legata alla qualità e frequenza dei dati di portata disponibili. Questa attività ha permesso di arrivare a un nuovo *setup* del file di configurazione del modello in grado di superare nella maggior parte dei casi eventuali instabilità legate all'alta risoluzione.

Confrontando risultati numerici e osservazioni sperimentali è stato possibile verificare l'efficacia del modello WWTM nel descrivere, mediante il modulo di trasporto e scambio energetico implementato, la dinamica della temperatura dell'acqua in Laguna. Il modello offre risultati affidabili sia su scale temporali settimanali (Deliverable D1.3.3.1) che su scale temporali annuali (D1.3.3.3), dimostrando di cogliere correttamente la variabilità sia diurna che stagionale del fenomeno. Si è verificato inoltre che, in assenza di una distribuzione spaziale nota della temperatura con cui inizializzare il sistema, con uno Spin-Up di 14 giorni il modello raggiunge comunque una distribuzione spaziale rappresentativa di quella reale (D1.3.3.2).

Misure in-situ e rilievi satellitare della temperatura dell'acqua in Laguna registrati nel corso del 2019 sono stati quindi utilizzati nel benchmark dei modelli sviluppati e testati nel presente progetto (Deliverable D1.3.3.3). L'analisi statistica della differenza ΔT_w tra risultati numerici e misure in-situ mostra che gli strumenti numerici utilizzati dai diversi gruppi di ricerca sono tutti in grado di descrivere in modo più che

soddisfacente la dinamica della temperatura dell'acqua in tutte le zone della Laguna (la distribuzione delle stazioni di misura SAMANET in Laguna rende ciascuna di esse rappresentativa di una diversa area del bacino), con valori di ΔT_w mediamente inferiori a $\pm 1^\circ\text{C}$ e variabilità contenuta. L'efficacia dei modelli nel descrivere la dinamica della temperatura verificata è confermata dal confronto spazialmente distribuito con la temperatura rilevata da satellite. La differenza ΔT_w tra temperatura modellata e rilevata da satellite inferiore a 1°C su almeno il 50% della superficie lagunare, ed inferiore a 2°C su circa l'80%. Sia il confronto con le misure locali che con la distribuzione spaziale della temperatura rilevata da satellite mostrano, per tutti i modelli testati, scostamenti sensibili nell'area in prossimità del polo industriale di Marghera. Tali scostamenti sono ragionevolmente da attribuire alle emissioni termiche legate alle attività produttive, le quali influenzano la dinamica della temperatura in quest'area e che non sono stati imposte come condizioni al contorno nelle simulazioni eseguite. Tale osservazione evidenzia come modelli che descrivono la dinamica della temperatura dell'acqua possono fornire importanti indicazioni circa l'impatto delle attività antropiche sull'ecosistema lagunare.

Le simulazioni di test del modello biogeochimico sono state realizzate utilizzando la simulazione relativa all'anno 2005, definendo quindi la configurazione iniziale, le condizioni al contorno, le forzanti relative ai monitoraggi realizzati nello stesso anno. Sono state fatte delle calibrazioni mirate, in relazione alle informazioni più incerte quali diverse ipotesi di condizioni al contorno e di input e la parametrizzazione di processi. Il modello, infatti, è stato costruito sulla base del migliore insieme di dati disponibili che, tuttavia, presenta diverse lacune e, di conseguenza, impone diverse approssimazioni. È stato necessario quindi, da un lato, effettuare degli scenari variando le informazioni al contorno (apporti dal bacino scolante, concentrazioni delle variabili biogeochimiche marine, apporti lagunari) e, dall'altro variare i parametri biogeochimici che stabiliscono i flussi di massa e di energia tra i diversi comparti del modello, e quindi tra le diverse variabili biogeochimiche.

Per l'anno di test, 2005, sono state realizzate 22 simulazioni biogeochimiche 3D variando gli input, le condizioni al contorno e la parametrizzazione del grazing e dei flussi bentici. Sono stati fatti dei confronti dato/modello nelle stazioni di misura, e calcolati gli indicatori statistici (deviazione standard, errore quadratico medio, coefficiente di correlazione di Pearson) per individuare la simulazione di riferimento che fornisce la rappresentazione della variabilità spaziale delle variabili di stato, coerentemente con i dati sperimentali.

WP1.3.4 - Valutazione integrata del sistema

Il modello biogeochimico è stato applicato agli anni 2005, 2008 e 2019 per produrre gli indicatori di stato trofico e su due simulazioni di scenario, *scen_2019* e *scen_+25*. I risultati del modello sono stati confrontati con le informazioni disponibili per valutare le capacità descrittive del sistema e per evidenziare limiti e necessità di sviluppo. I tre scenari sono caratterizzati da input di nutriente decrescenti nel tempo, risultato della riduzione dei carichi agricoli e urbani, e della deviazione dello scarico del depuratore di Fusina direttamente a mare. L'andamento mensile della produzione primaria dei tre anni evidenzia la risposta del sistema biogeochimico lagunare alla progressiva riduzione del carico, in particolare nel sottobacino centrale. La simulazione di scenario *scen_2019* non evidenzia variazioni statisticamente significative sulla biogeochimica lagunare e sulla produzione primaria. La simulazione *scen_+25cm* (Figura 5) invece evidenzia forti variazioni della stagionalità dei produttori primari che possono avere delle ripercussioni sulle dinamiche della rete trofica superiore.

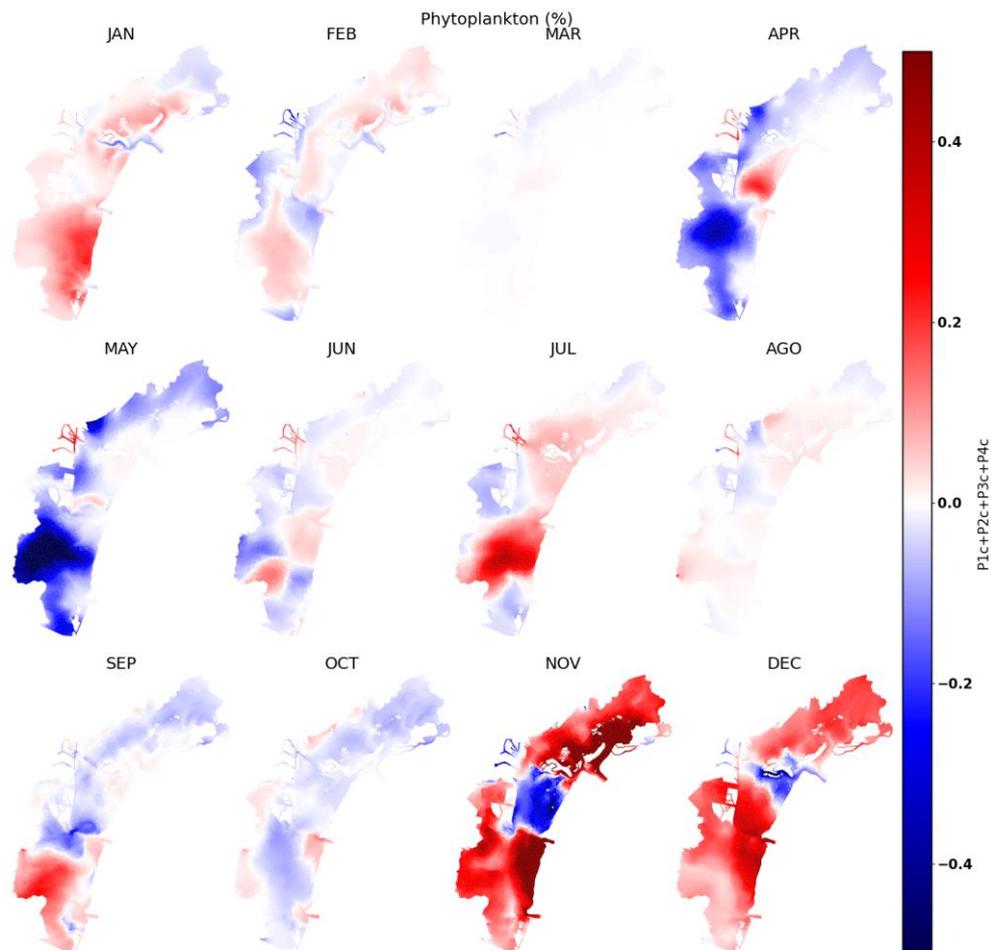


Figura 5. Evoluzione mensile dell'anomalia percentuale della variabile Fitoplancton delle due simulazioni Scen+25, che simulano un incremento del livello medio mare di 25 cm rispetto al riferimento del 2019, con e senza chiusure del MOSE.

L'attività ha permesso anche di evidenziare alcune criticità e la necessità di potenziare la rete di monitoraggio delle portate e delle concentrazioni di nutrienti in tutta la rete al fine di poter rappresentare correttamente le informazioni sul carico e di scambio con il mare. Il modello ad alta risoluzione è stato applicato per valutare la variazione di alcuni descrittori fisici e legati alle scale di trasporto, in uno scenario di laguna regolata. Lo scenario regolato è stato confrontato con uno scenario di riferimento precedente, in particolare con l'anno 2019. In un'ipotesi di funzionamento delle barriere molto cautelative per la città, si ottiene una diminuzione della temperatura media mensile di circa un grado e una riduzione massima di 5 PSU per la salinità, in condizioni di massima discrepanza. In uno scenario regolato, il tempo di residenza ed età, invece, manifesta un incremento che raggiunge i valori massimi nel periodo autunnale, quando il numero di chiusure è più elevato.

Simulazioni eseguite utilizzando il modello WWTM hanno evidenziato che la chiusura delle bocche di porto mediante il sistema MOSE determina un incremento del set-up interno alla Laguna, funzione di intensità e direzione del vento (Tabella 1, Deliverables D1.3.3.1, D1.3.3.2). Il modello ha permesso inoltre di investigare gli effetti delle chiusure del MOSE sulla sedimentazione e l'accrescimento verticale delle barene, fondamentale al fine di garantirne la sopravvivenza all'innalzamento del livello medio mare. I risultati evidenziano che le chiusure delle bocche di porto in occasione dei fenomeni di Acqua Alta comportano una riduzione dell'apporto di sedimenti alle barene, limitando in modo sostanziale la loro capacità di tenere il passo con l'innalzamento del medio mare (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, Deliverable D1.3.3.3). Entrambi i fenomeni dovranno essere tenuti in debita considerazione nella definizione di

protocolli di gestione e attivazione del sistema MOSE al fine di garantire sia che l'efficacia delle chiusure che la conservazione dell'ecosistema lagunare. Infine, mediante l'analisi di simulazioni a scala annuale è stato possibile evidenziare che metà almeno metà del volume di sedimenti perso dalla Laguna nel corso dell'anno è espulso attraverso le bocche di porto nel corso dei pochi giorni caratterizzati da eventi temporaleschi, evidenziando come gli eventi meteo intensi influenzino in modo decisivo l'evoluzione morfologica della Laguna.

Le simulazioni eseguite al fine di valutare i benefici prodotti dagli interventi proposti dal PMLV hanno evidenziato che, com'era noto, i fenomeni erosivi alla scala dell'intera laguna sono legati principalmente a cause naturali (onde da vento e correnti). I risultati della modellazione matematica mostrano come gli interventi prioritari siano efficienti nel contrastare il degrado morfologico dell'ambiente lagunare, con effetti benefici sulla riduzione del moto ondoso da vento all'interno del bacino lagunare (Deliverable D1.3.4.2). La realizzazione di strutture finalizzate a limitare il trasporto di sedimenti a lato dei principali canali lagunari permette di ridurre l'erosione dei bassifondi, limitandone l'approfondimento ed il conseguente degrado morfologico, l'energia delle onde causate dal vento nelle aree limitrofe alle opere stesse, e il trasporto dei sedimenti erosi verso la rete dei canali. La realizzazione di barriere soffolte in prossimità delle barene maggiormente esposte all'azione delle onde da vento in Laguna Sud permette di ridurre la potenza d'onda incidente sui margini di barena posti sottovento, riducendo significativamente l'erosione di bordo.

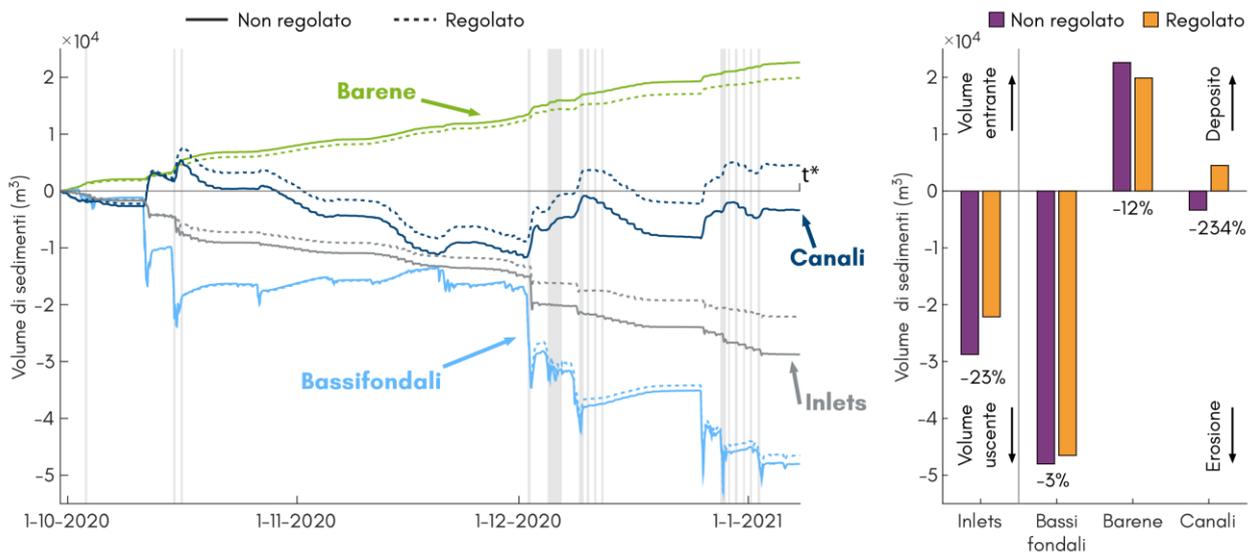


Figura 6. Effetti delle chiusure sul budget di sedimenti. Variazione del volume di sedimenti eroso/depositato per le diverse entità morfologiche (barene, bassifondali, canali) e del volume di sedimenti uscente dalle bocche (inlets) per effetto delle chiusure del sistema MOSE operate nel periodo che va da ottobre 2020 a gennaio 2021. Le cumulate illustrano l'andamento temporale del volume eroso/depositato in condizioni di laguna non regolata (linea continua) e regolata (linea tratteggiata), mentre gli istogrammi confrontano il volume eroso/depositato nel periodo in esame in condizioni non regolate (barre viola) e regolate (barre gialle).

Tabella 1 Livelli massimi relativi agli eventi di Acqua Alta per i quali è entrato in funzione il sistema MOSE nel periodo gennaio-febbraio 2021. In particolare, in tabella sono riportati i livelli massimi registrati (con sistema operativo, e dunque a bocche di porto chiuse) e modellati nell'ipotesi di Laguna non regolata (e dunque a bocche di porto aperte) presso le stazioni di Punta della Salute, Chioggia, Burano.

#	Max CNR [m ZMPS]	Max P.ta Salute [m ZMPS]		Max Chioggia [m ZMPS]		Max Burano [m ZMPS]	
		Con Mo.S.E.	No Mo.S.E.	Con Mo.S.E.	No Mo.S.E.	Con Mo.S.E.	No Mo.S.E.
23-gen	1.05	0.82	1.11	0.76	1.04	0.81	1.10
30-gen	1.09	0.75	1.06	0.78	1.10	0.64	0.97
09-feb	1.16	1.03	1.19	1.11	1.19	0.97	1.15
10-feb	1.27	0.79	1.26	0.82	1.28	0.76	1.21
11-feb	1.08	0.93	1.09	1.01	1.08	0.85	1.04

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

Le attività della Linea di Ricerca 1.3, in accordo con l'obiettivo prioritario 2 di Venezia2021, ossia lo sviluppo di modelli per fornire previsioni a breve, medio e lungo termine, hanno consentito lo sviluppo ed il perfezionamento di modelli matematici tali da garantire un'analisi multidisciplinare della Laguna e dei processi che ne influenzano l'evoluzione ambientale ed eco-sistemica.

In particolare, è stato affinato e testato un modello operativo 3D, destinato alla gestione delle emergenze di una laguna regolata, in grado di descrivere la dinamica di variabili di livello, temperatura e salinità. I risultati prodotti dal modello sono accessibili utilizzando l'interfaccia appositamente sviluppata ed accessibile alla pagina: <https://issos.ve.ismar.cnr.it/>, la quale fornisce la previsione del modello in modo aggiornato, non appena disponibile. Tale strumento può essere di grande utilità sia all'utente generico che a istituzioni che necessitino di tale previsioni, in accordo con l'obiettivo prioritario 1 del Programma, ossia la produzione di conoscenze integrate ed aggiornate utili per la gestione dell'ecosistema Laguna.

È stato anche sviluppato il modello accoppiato Shyferm-BFM, che consente la modellazione accoppiata dell'idrodinamica e della biogeochimica lagunare. Tale modello è stato integrato con una routine che consente la simulazione delle chiusure del sistema MOSE che lavora su applicazioni tridimensionali in cui il dominio include un'area di mare antistante. Lo strumento modellistico diventa un utile strumento di gestione nell'ambito di una Laguna regolata, obiettivo prioritario 3 del Programma, adatto all'analisi dei processi idrodinamici e biogeochimici che guidano l'evoluzione dell'ecosistema.

È stato inoltre sviluppato un nuovo modello in grado di ricostruire nel dettaglio i volumi liquidi e di inquinanti convogliati giornalmente dal bacino scolante in laguna sulla base dei dati meteorologici (i.e., pioggia, temperatura, umidità relativa, radiazione solare) misurati all'interno del bacino stesso, ed utilizzando un approccio semi-stocastico per ricostruire i contributi di inquinanti in ingresso nel sistema, ovvero gli input di fertilizzanti ad uso agricolo, sulla base delle mappe di occupazione del suolo ottenute mediante tecniche di remote sensing. L'integrazione di tale modello con i modelli idrodinamici ha consentito inoltre di fornire uno strumento capace di descrivere nella sua interezza l'insieme bacino scolante-laguna-mare, evidenziando come questa configurazione di continuum sia molto rilevante nella riproduzione di ambienti di transizione nei quali apporti da mare e da terra hanno pari rilevanza nel definire le dinamiche del sistema.

Il modello idro-morfodinamico WWTM è stato infine integrato mediante l'implementazione di un modulo che consente, accoppiato al modulo idrodinamico, di modellare la dinamica della temperatura dell'acqua in

Laguna. Il modello è stato opportunamente testato mediante confronto con misure in-situ e rilevazioni satellitari, verificandone l'efficacia e l'affidabilità. I test sono stati condotti sia a scale temporali brevi che estese (i.e. simulazioni annuali), validando un ipotetico utilizzo previsionale anche a lungo termine del modello e, in particolare, le potenzialità del modello stesso nell'analisi di scenari a lungo termine. Il confronto tra risultati numerici ed osservazioni della temperatura disponibili ha permesso di evidenziare l'alterazione consistente della temperatura dell'acqua prodotta dalle emissioni termiche dovute alle attività industriali nell'area antistante il polo di Marghera. Nell'ambito della gestione della Laguna, strumenti modellistici in grado di descrivere variabili, come la temperatura dell'acqua, che influenzano in modo sostanziale l'evoluzione dell'ecosistema diventano pertanto fondamentali.

Risultati numerici prodotti dal modello WWTM, supportati dalle misure effettuate durante le prime chiusure del MOSE, hanno permesso inoltre di analizzare sia gli effetti del setup prodotto dal vento all'interno della Laguna, che gli scambi di sedimenti tra mare e laguna e la redistribuzione dei sedimenti all'interno del bacino lagunare. In particolare, i risultati modellistici 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. In relazione agli scambi di sedimenti tra mare e laguna, invece, le analisi modellistiche condotte, supportate anche da misure in situ condotte in collaborazione con la Linea 3.2, hanno consentito di evidenziare come gran parte del volume di sedimenti perso dalla Laguna nel corso 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. Tali osservazioni sono fondamentali nell'ottica di una visione strategica, obiettivo prioritario 5 del Programma per la salvaguardia della Laguna, e devono essere tenute in debita considerazione nella definizione dei protocolli di funzionamento del sistema MOSE stesso.

Nell'ottica di sviluppo di una visione strategica avente come obiettivo la preservazione l'ecosistema lagunare, sono state condotte anche delle simulazioni volte a valutare gli effetti degli interventi proposti dal Piano Morfologico, il cui scopo è appunto quello di limitare la riduzione di diversità morfologica della Laguna ed il conseguente impoverimento dell'ecosistema. I risultati numerici hanno evidenziato come gli interventi proposti (conterminazione dei canali principali, protezione dei margini barenali, ...) potrebbero ridurre in modo sostanziale i principali processi che stanno alterando in modo sostanziale la morfologia lagunare.

Gli strumenti modellistici sviluppati e calibrati sono stati utilizzati per rappresentare i processi idrologico-idrodinamici, sedimentari-morfologici e biogeochimici del sistema bacino scolante-laguna-mare, e per produrre le analisi di scenario. A tale scopo sono stati individuati ed utilizzati degli indicatori dello stato trofico, idrologico e morfo-dinamico della laguna di Venezia. In particolare, sono stati individuati e analizzati gli indicatori di stato trofico (nutrienti, TRIX, ossigeno disciolto), gli indicatori di 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. Gli indicatori di stato trofico evidenziano una diminuzione del trofismo lagunare a partire dal 2005 al 2019 e una variazione trascurabile nello scenario di laguna regolata fatta su scenario relativo all'anno 2019. Si osservano invece delle variazioni, soprattutto riguardanti la stagionalità, nel trofismo relativo alla simulazione di scenario a +50 (*scen_+25cm*). Gli indicatori di tempo di rinnovo ed età dell'acqua mostrano che un regime di chiusure cautelativo può influenzare non solo valore e distribuzione di temperatura e salinità ma può anche allungare le scale di trasporto limitando la capacità di scambio della laguna e quindi rendendola potenzialmente più delicata rispetto ai suoi equilibri interni.

Infine, è stata eseguita una attività congiunta di benchmarking dei modelli utilizzando misure in-situ e rilievi satellitari collezionati nel 2019. Il benchmark è stato eseguito con riferimento alla variabile

temperatura dell'acqua, principale variabile comune ai tre modelli oltre le variabili idrodinamiche. Il confronto tra risultati numerici e osservazioni sperimentali mostra che tutti i modelli descrivono in modo accurato la dinamica della temperatura: si osservano differenze mediamente inferiori a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ rispetto alle misure in-situ, mentre nel confronto spazialmente distribuito con i rilievi satellitari le differenze risultano inferiori a 1°C su almeno il 50% della superficie lagunare, ed inferiore a 2°C su circa l'80%. Le simulazioni annuali sono state inoltre eseguite sia assegnando che escludendo dalle condizioni al contorno gli input fluviali di portata e temperatura. Il confronto tra i risultati ottenuti mostra che l'effetto di tali contributi, e dunque del bacino scolante, sulla dinamica della temperatura è limitato e confinato alle aree prossime alle foci dei corsi d'acqua che sfociano in Laguna. Ben più importante è invece il contributo termico dovuto al polo industriale di Marghera.

In generale, si può sostenere che la Linea di ricerca abbia raggiunto il proprio obiettivo, in quanto gli strumenti sviluppati dai diversi gruppi di ricerca, opportunamente validati e affiancati da un'appropriata rete di misura delle principali variabili di interesse, hanno consentito di investigare il comportamento idromorfodinamico del bacino lagunare e di fornire proiezioni secondo diversi scenari di cambiamento climatico e di gestione del MOSE. Gli stessi strumenti sono anche da ritenersi un utile supporto per le attività di gestione della Laguna nel prossimo futuro.