



Venezia2021

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

Linea 3.3

*Produzione primaria, comunità microbica,
bentonica, planctonica e nectonica lagunare*

Rapporto Finale

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

Responsabile (ENTE)

Carlotta Mazzoldi (BIO-UNIPD)

Adriano Sfriso (DAIS-UNIVE)

30/09/2022

Carlotta Mazzoldi

EXECUTIVE SUMMARY

1. Principali risultati emersi dalla Linea riferiti agli obiettivi iniziali

La Linea 3.3 si prefiggeva di studiare le componenti biologiche e i fattori (trofia, tassi di sedimentazione, etc.) che possono influire sul loro stato di salute per comprendere le condizioni ecologiche che attualmente caratterizzano la laguna e confrontarle, ove possibile, con dati pregressi al fine di valutare l'evoluzione dell'ecosistema lagunare nell'ottica dei cambiamenti in atto legati alle opere e al funzionamento del MOSE. La Linea ha preso in considerazione le componenti microbica, vegetale e animale ed ha capitalizzato campagne di monitoraggio e dati pregressi.

Confrontando con i dati pregressi, i risultati hanno evidenziato un forte incremento, rispetto agli ultimi 40 anni, della distribuzione e produzione di fanerogame acquatiche, il cui areale è più che raddoppiato, e il ritorno di *Ruppia cirrhosa*, specie che era scomparsa dalla laguna alla fine degli anni '90. Le fanerogame marine costituiscono un habitat importante per molte specie, anche di valore commerciale, e in generale per l'ecosistema lagunare e per la cattura permanente del carbonio. Questo habitat è utilizzato anche per la nidificazione di una specie ittica commerciale, *Zosterisessor ophiocephalus*, e i dati raccolti durante questo progetto hanno evidenziato come la costruzione dei nidi sotto queste praterie consenta lo sviluppo delle uova in un ambiente ottimale caratterizzato da scarse variazioni dei parametri ambientali. La tipologia delle macroalghe dominanti è cambiata a favore di molte specie di elevato valore ecologico.

Contemporaneamente, le concentrazioni di nutrienti sono diminuite sia nelle acque che nei sedimenti superficiali e i tassi di sedimentazione sono tornati ai valori rilevati prima del periodo della pesca alle vongole filippine. I cambiamenti lagunari in corso includono anche un'importante estensione dei reef dell'ostrica *Crassostrea gigas*. La specie, alloctona ma naturalizzata da tempo, trova nell'ambiente estuarino e lagunare veneziano, caratterizzato dalla presenza di maree, un ambiente particolarmente idoneo alla crescita. Si genera quindi un habitat di substrato duro importante per la fauna locale che fornisce servizi ecosistemici fondamentali, come la filtrazione delle acque e il sequestro della anidride carbonica, e che rappresenta una risorsa economica sinora sottovalutata. Questi risultati indicano, nel loro complesso, un miglioramento dello stato ecologico lagunare al quale dovrà essere prestata attenzione anche nel futuro per garantirne il mantenimento malgrado i profondi cambiamenti in atto.

I risultati degli studi condotti sulla componente neotonica hanno messo in evidenza l'eterogeneità della laguna di Venezia sia a livello di comunità che a livello intraspecifico in specie ittiche modello. In particolare, gli habitat di basso fondale del sottobacino centrale sembrano avere un ruolo minore, come aree di nursery, per le specie di migratori marini (specie a riproduzione marina che entrano negli ambienti lagunari nelle fasi iniziali di vita) rispetto agli habitat analoghi presenti negli altri due sottobacini, probabilmente per la diversa morfologia delle barene nei tre sottobacini. Tali differenze devono essere tenute attentamente in considerazione nei piani di gestione lagunare, in modo da preservare le potenzialità di ciascuna area ed eventualmente intervenire per recuperare quelle zone che sembrano meno vocate per la fauna neotonica. Lo studio ha permesso di evidenziare anche una articolata e complessa connettività mare-laguna, caratterizzata dall'ingresso in laguna di larve e, soprattutto, di postlarve e avannotti delle specie ittiche di migratori marini, che si accumulano nelle aree di spiaggia in prossimità delle dighe foranee prima di entrare in laguna, un fenomeno che potrebbe essere dovuto alla natura artificiale delle bocche di porto lagunari. Gli ingressi in laguna sono risultati concentrati in particolare dal tardo autunno all'inizio della primavera e sono risultati maggiori nei sottobacini nord e sud. Questo dato risulta importante per comprendere gli eventuali impatti di lunghi eventi di chiusura del MOSE nel periodo indicato. I dati raccolti proprio alle bocche di porto sulla specie ittica *Sciaena umbra*, utilizzata come modello per valutare l'impatto del rumore, hanno evidenziato come le bocche di porto siano importanti aree riproduttive, malgrado il forte rumore antropico qui registrato.

Infine, la caratterizzazione delle comunità planctoniche e bentoniche lagunari ha permesso di costruire un'importante base di dati per lo sviluppo di modelli concettuali e quantitativi sulla struttura e dinamica dell'ecosistema lagunare e di modelli idrodinamici e di modellistica ecologica a supporto dello sviluppo di

corrette gestioni da parte degli stakeholder e decisori politici. Gli esperimenti condotti hanno evidenziato come l'effetto di un minore idrodinamismo (assimilabile alla chiusura del MOSE) sulla deposizione del materiale in sospensione nella colonna d'acqua sembri avere ripercussioni sia sui principali processi biologici in colonna d'acqua che nei sedimenti superficiali, risultando in una complessiva modificazione dell'ordinario *benthic-pelagic coupling* della laguna. Gli effetti risultano comunque più attenuati quando le condizioni sperimentali si avvicinano maggiormente a quelle in cui il MOSE dovrebbe operare.

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

2.1 Stato ecologico della laguna

Le azioni di monitoraggio messe in atto durante questo progetto e il confronto con dati pregressi hanno permesso di evidenziare la riduzione dello stato trofico e dei tassi di sedimentazione. Di conseguenza, **lo stato ecologico dell'ambiente lagunare è risultato migliorato**, con una importante ricolonizzazione da parte delle fanerogame acquatiche (Fig. 1°b), una diminuzione delle Ulvacee a favore di macroalghe di maggior qualità ambientale. Rispetto al passato, i dati hanno anche evidenziato l'occorrenza di estesi *reef* di ostriche che costituiscono ambienti ecologicamente importanti sia per le comunità animale sia per una cattura permanente di carbonio. 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" (Fig. 1c).

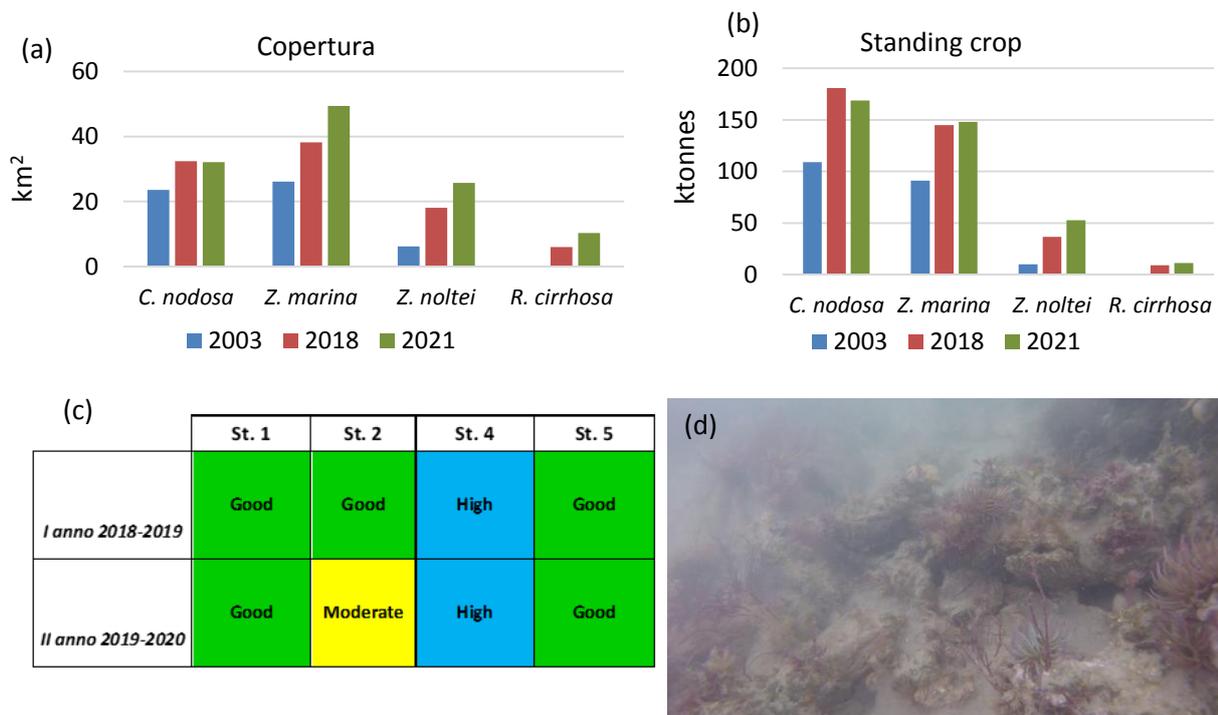


Figura 1. Confronto dei valori di copertura (a) e di standing crop (b) delle diverse specie di fanerogame marine in Laguna di Venezia nel 2003, 2018 e 2021. (c) Indice MPI (Multimetric Phytoplankton Index) nei due periodi di campionamento e nelle diverse stazioni (1: S. Giuliano, 2: Marghera, 4: Lido, 5: Palude della Rosa). (d) *reef* di ostriche.

2.2 Popolamenti lagunari

I campionamenti sulle diverse componenti biologiche condotti durante questo progetto (Fig. 2a) hanno permesso di costruire un quadro completo dei popolamenti lagunari, sia in colonna d'acqua che sui fondali,

e di evidenziare habitat essenziali per l'ecosistema lagunare. I risultati hanno messo in evidenza **una elevata variabilità spaziale a diversi livelli** (Fig. 2b). In particolare, gli habitat di basso fondale del sottobacino centrale sembrano avere un ruolo minore, come aree di nursery, per le specie di migratori marini rispetto agli habitat analoghi presenti negli altri due sottobacini. Le barene, tra gli habitat lagunari, sembrano essere importanti aree elettive di nursery per molte specie di migratori marini e queste, infatti, si presentano più frammentate ed artificiali nel sottobacino centrale, ed invece ricche di canali intertidali, stretti e sinuosi, nel sottobacino nord. Differenze tra sottobacini si osservano anche durante lo studio della struttura tassonomica e funzionale dell'intero popolamento nectonico, durante la valutazione ecologica-funzionale degli habitat utilizzando la comunità nectonica come bioindicatore, e a livello intraspecifico studiando la struttura delle popolazioni di specie ittiche commerciali lagunari.

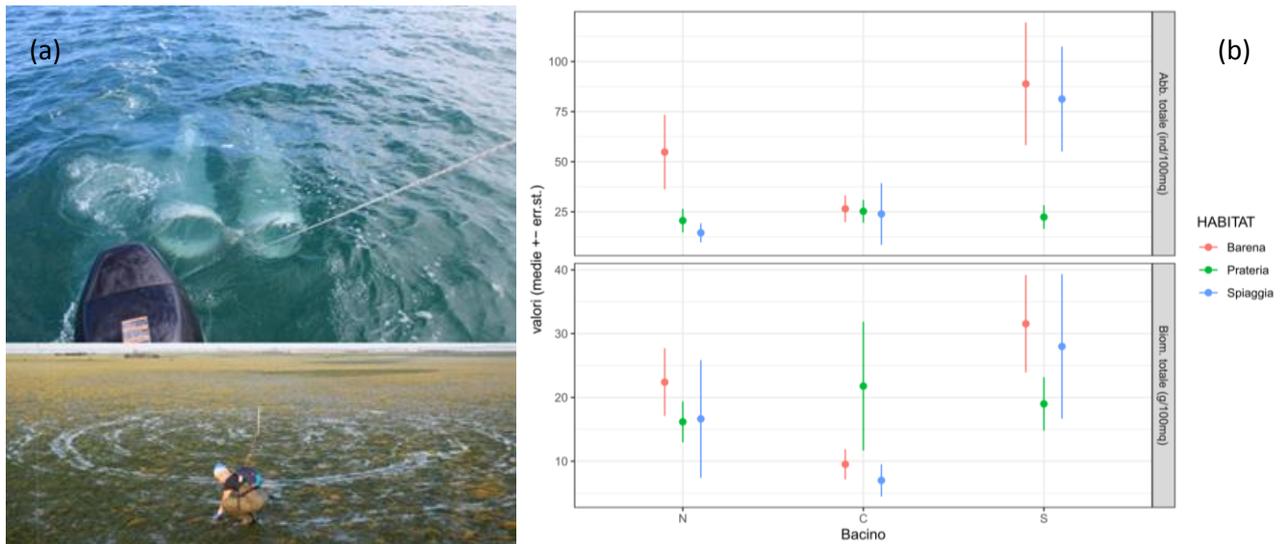


Figura 2. (a) campionamenti di uova e larve con bongo (in alto) e dei nidi di go su prateria di fanerogame (in basso). (b) Abbondanze (individui 100 m^{-2}) e biomasse (grammi 100 m^{-2}) (medie ed errori standard) per sottobacino e habitat. Le barre di errore rappresentano la variabilità tra stazioni.

2.3 Effetti del MOSE

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 né sullo stato trofico. La movimentazione delle paratoie ha come conseguenza un aumento del rumore alle bocche di porto, ma anch'esso non sembra aver influito sulle specie sonifere. Si suppone che chiusure tardo autunnali e di breve durata (nell'ordine di alcune ore) del MOSE non possano impattare sulle dinamiche delle comunità residenti o quanto meno non sono state riscontrate evidenze significative. I dati sperimentali che hanno invece simulato le chiusure delle paratoie per la durata di alcuni giorni mediante *enclosures* hanno fatto emergere come il confinamento di acqua e sedimenti conseguenti alla chiusura del MOSE possa indurre un minore idrodinamismo ed una conseguente maggiore deposizione del materiale in sospensione in colonna risultando in una complessiva modificazione dell'ordinario benthic-pelagic coupling della laguna. I risultati di quest'indagine insieme ai campionamenti e alle misure lagunari a lungo termine (LTER) cominciati nel 1997 e tuttora in corso, rappresentano una solida linea di base per intercettare ed interpretare eventuali cambiamenti ecologici indotti dalla messa in funzione delle dighe mobili.

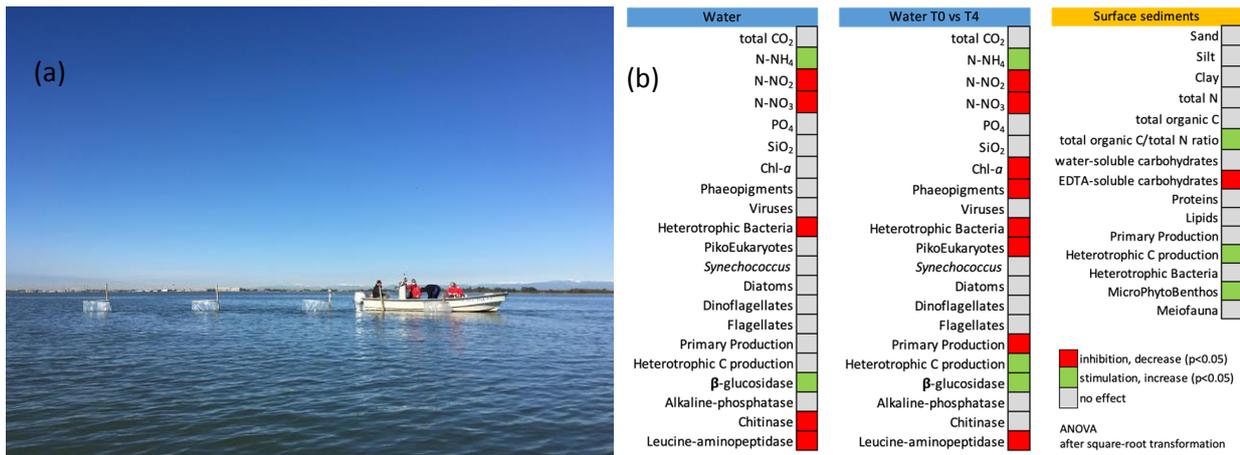


Figura 3. (a) Esperimenti in *enclosure*. (b) Variabilità di tutti i parametri indagati tra i diversi tempi sperimentali in acqua e nei sedimenti e tra il tempo iniziale e finale in acqua del primo esperimento in *enclosure*.

3. Spunti per il futuro

Il MOSE è diventato realmente operativo quando la maggior parte delle attività della Linea erano già concluse o vicine alla conclusione. In generale, quindi, risulterà fondamentale proseguire gli approfondimenti sulle comunità bentoniche, planctoniche e nectoniche soprattutto nei prossimi anni. Di particolare rilevanza appare monitorare l'evoluzione della componente biologica, focalizzandosi soprattutto su quegli elementi che fungono da indicatori della qualità ambientale. L'entrata in funzione a pieno regime del MOSE richiederà un monitoraggio attento in modo da valutare eventuali trend o modifiche nel lungo periodo della connettività fra l'ecosistema marino e quello lagunare, così come su quelle componenti biologiche che vanno a costituire habitat essenziali per l'ecosistema lagunare, quali fanerogame marine e reef di ostriche, questi ultimi di interesse anche per un possibile utilizzo a livello commerciale. I risultati ottenuti in questo progetto, che ha beneficiato della disponibilità di dati pregressi, mettono anche in evidenza di mantenere continuità nella raccolta sistematica di dati per poter evidenziare e comprendere i cambiamenti in atto.

La variabilità della componente biologica fra i diversi sottobacini lagunari supporta la necessità di studiare l'evoluzione delle diverse aree e definire piani di ripristino o gestione delle porzioni di laguna più degradate al fine di garantire il mantenimento dell'ecosistema lagunare anche in relazione alle importanti attività di pesca che qui vengono svolte. In quest'ottica, risulta rilevante il monitoraggio dei cambiamenti nelle abbondanze e/o nella struttura di popolazione di specie ittiche commerciali come risposta ai cambiamenti in corso a livello lagunare sia in relazione alla circolazione delle acque sia come effetto dei cambiamenti climatici. La sinergia fra periodi di chiusura delle paratoie del MOSE anche in periodi più caldi e/o per periodi più prolungati potrebbero favorire le presenze di specie "opportuniste" (ad. esempio lo ctenoforo invasivo *Mnemiopsis leidy*, potenzialmente dannoso per la produzione ittica, o specie fitoplanctoniche potenzialmente tossiche) o potrebbero portare a risposte in termini di modifica delle dinamiche interspecifiche, limitando drasticamente la diversità all'interno delle comunità planctoniche con ripercussioni a diversi livelli ecologico-ambientali e quindi anche socio-economici. In quest'ottica approfondire la sperimentazione in mesocosmi utilizzando *enclosures* di maggiori dimensioni e in altri periodi e/o aree lagunari potrebbe contribuire in modo importante alla comprensione degli effetti delle chiusure sulle diverse componenti incluse le comunità microbiche di sedimento in modo da evidenziare eventuali variazioni del normale benthic-pelagic coupling della laguna, causate dall'attività del MOSE.

Spostandosi a livello di bocche di porto, appare utile comprendere gli effetti a lungo termine del rumore associato alla movimentazione del MOSE sull'attività riproduttiva della specie modello utilizzata.

DESCRIZIONE ESTESA

4. Descrizione delle attività

WP 3.3.1: Sono stati fatti studi globali dello stato trofico, dei tassi di sedimentazione e della vegetazione prima e durante le chiusure del Mose confrontando i dati con quelli raccolti negli ultimi 30-40 anni. Il lavoro si basa su due anni di campionamenti bimensili, prima e durante le chiusure del MOSE, in 6 stazioni in cui erano presenti dati pregressi. Sono state campionate i parametri fisico-chimici, le concentrazioni di nutrienti della colonna d'acqua, dei sedimenti superficiali e del particolato raccolto mensilmente con trappole di sedimentazione. Queste hanno permesso di determinare anche i tassi di sedimentazione su base giornaliera, mensile, annuale o su qualsiasi estensione temporale e studiare la diffusione del particolato e dei nutrienti. La tendenza all'erosione o sedimentazione nelle singole stazioni è stata invece studiata mediante dischi infissi sulla superficie dei sedimenti. Bimensilmente sono state campionate le macroalghe e le fanerogame marine producendo liste tassonomiche mensili e globali, determinando la produzione primaria delle macroalghe, di *Cymodocea nodosa*, *Zostera marina* e *Zostera noltei* e lo stato ecologico applicando l'indice MaQI. Contemporaneamente, utilizzando i dati raccolti anche in altri progetti, sono state fatte le mappe estive della distribuzione delle macroalghe e delle singole specie di fanerogame acquatiche, compresa *Ruppia cirrhosa*, ora presente anche in laguna aperta alle espansioni mareali, e determinate la biomassa totale e la produzione primaria delle macroalghe e delle singole specie di fanerogame acquatiche. Tutti i dati sono stati poi confrontati con quelli raccolti negli ultimi 40 anni. Infine sono stati proposti degli indicatori per una rapida determinazione dello stato trofico e della qualità ambientale. Tra questi il più semplice, rapido e sicuro riguarda la presenza/assenza delle piccole macroalghe calcarizzate dei generi *Hydrolithon*, *Pneophyllum* e *Melobesia*.

WP3.3.2: Sono stati effettuati campionamenti di ittioplancton e di fauna neotonica in differenti sottobacini lagunari, lungo tre transetti dal mare alla gronda lagunare al fine di: i) studiare la connettività mare-laguna; ii) analizzare le variazioni nella struttura tassonomica, funzionale e trofica della fauna neotonica di basso fondale; iii) valutare lo stato ecologico del popolamento ittico degli habitat di basso fondale (praterie e barene) della laguna di Venezia mediante l'applicazione dell'indice multimetrico HFBI; iv) valutare le differenze nella funzionalità di nursery delle aree lagunari afferenti ai diversi sottobacini. I campionamenti di fauna neotonica nelle barene del sottobacino nord, habitat risultati di elevata importanza per la fauna ittica allo stadio giovanile, hanno inoltre permesso di approfondire le relazioni trofiche presenti in questi ambienti.

I dati ottenuti sono stati integrati con dati analoghi relativi a studi pregressi condotti in laguna su queste componenti biologiche, permettendo di evidenziare le principali dinamiche evolutive nel tempo e nello spazio e, soprattutto, di acquisire uno "stato zero" sufficientemente accurato sulla connettività mare-laguna sul popolamento neotonico di basso fondale, fondamentale per documentare eventuali variazioni future nel medio e lungo termine.

WP 3.3.3: Le attività condotte nel WP 3.3.3 hanno incluso attività di campo, per la raccolta di dati e di campioni, attività di laboratorio di processamento e analisi dei campioni, attività di analisi dei dati.

Le attività sulle specie ittiche lagunari sono state condotte sia attraverso campionamenti con i pescatori delle diverse aree della laguna, sia attraverso campionamenti diretti e raccolta di dati nei siti riproduttivi. In particolare, per quanto riguarda lo studio della struttura di popolazione delle due specie modello per la laguna, il go *Zosterisessor ophiocephalus* e il latterino *Atherina boyeri*, nei tre anni di progetto sono stati condotti campionamenti mensili o ogni due mesi del pescato di diversi pescatori lagunari che operano con i cogolli in diverse aree. Le attività hanno quindi incluso uscite con i pescatori, la raccolta e le analisi di laboratorio successive. In entrambe le specie sono state condotte analisi degli otoliti per la stima dell'età ed analisi delle gonadi, sia macroscopiche che microscopiche, per la valutazione dello stadio di maturità gonadica e l'attribuzione del sesso nei giovanili. Le attività focalizzate sullo studio della riproduzione di queste specie sono state condotte durante i periodi riproduttivi e hanno incluso raccolta dati sul campo e analisi di laboratorio. Per quanto riguarda lo studio sul go, la caratterizzazione degli areali riproduttivi e dei

nidi, che vengono scavati sotto le praterie di fanerogame marine, ha incluso la raccolta di dati ambientali (temperatura, ossigeno disciolto) in relazione alle caratteristiche dei nidi (dimensioni, profondità), dei riproduttori (dimensioni del maschio parentale), delle caratteristiche biotiche ed abiotiche esterne (substrato, densità di fanerogame, parametri dell'acqua, altezza rispetto al livello medio di marea). Campioni di uova sono stati prelevati e fatti schiudere in laboratorio per l'analisi delle caratteristiche delle larve (dimensioni, quantità di tuorlo) provenienti da diverse aree lagunari. Per quanto riguarda il latterino, sono stati campionati diversi siti riproduttivi per la raccolta delle uova. Sono stati inoltre campionati con reti giovanili di piccole dimensioni per analizzare se nei diversi periodi o aree, caratterizzati da diversa temperatura, si sviluppano larve con sessi proporzionalmente diversi.

Lo studio della specie *Sciaena umbra*, modello per comprendere l'impatto del rumore, è stato svolto attraverso l'applicazione del metodo del *passive listening*, ovvero monitoraggio acustico passivo mediante idrofono. In particolare, sono stati registrati i suoni in numerose stazioni delle tre bocche di porto per avere un quadro del paesaggio sonoro naturale e antropico. I dati sono stati raccolti durante l'estate che coincide con il periodo riproduttivo della specie e nelle ore crepuscolari e notturne, coincidente con il picco delle attività riproduttive. Contemporaneamente sono stati monitorati e analizzati i livelli di rumore ambientale, generati soprattutto dal traffico marittimo e, in un'occasione, è stato registrato il paesaggio sonoro durante le attività di movimentazione delle paratoie del MOSE. Questi dati sono stati poi elaborati congiuntamente con i dati ambientali per individuare le aree a maggior vocazione della specie.

WP3.3.4: Nel sistema acquatico, il plancton domina le reti alimentari pelagiche e attraverso i collegamenti trofici tra produttori primari (il fitoplancton) e livelli trofici superiori, svolge un ruolo importante nei cicli biogeochimici. La caratterizzazione e il monitoraggio delle diverse comunità planctoniche e bentoniche, e dei relativi processi funzionali sono stati esaminati attraverso diversi approcci metodologici che hanno previsto simulazioni all'interno di *enclosures*, ricerche sulle modifiche dell'espressione di funzioni geniche proiettabili in contesti di chiusura delle bocche di porto, fino ad arrivare al monitoraggio e alla caratterizzazione delle comunità in siti LTER già oggetto di studio dal 1997. Obiettivi del WP 3.3.4 sono stati l'analisi dei principali driver di cambiamento innescati dalla chiusura delle tre bocche di porto della laguna di Venezia correlati agli effetti sulle principali componenti biologiche lagunari. Allo scopo, sono stati studiati i processi funzionali delle comunità utilizzando diversi approcci metodologici tra cui attività all'interno di *enclosures*, le cui evidenze potranno essere in seguito estese all'intera laguna. Nell'ipotesi di scenari di chiusura del MOSE associati ai cambiamenti climatici in atto con conseguenti modifiche dell'idrodinamismo, l'attività ha previsto collegamenti con la Linea 1.3 -Modellazione numerica integrata del sistema bacino scolante-laguna-mare per testare modelli di dispersione di specie invasive. A tal fine è stata resa disponibile la serie di dati raccolti nelle stazioni LTER campionate durante il progetto, come contributo di dati sperimentali per lo sviluppo di modelli concettuali e quantitativi sulla struttura della comunità planctonica, di modelli di dispersione lagrangiana di specie invasive e di modellistica ecologica (Linee 1.3 e 4.1 - Modellistica della catena trofica). L'andamento delle dinamiche evolutive, nello spazio e nel tempo, delle comunità procariotiche ed eucariotiche ha previsto inoltre l'implementazione con le classi dimensionali planctoniche di minori dimensioni. Ad integrazione dei dati ecologici, sono state applicate metodologie di biologia molecolare, da integrarsi con le attività della Linea 2.2 (Inquinanti prioritari e rilascio di sostanze pericolose dal sedimento), per la determinazione dei livelli di trascrizione di geni bersaglio coinvolti nelle funzioni e nei percorsi cellulari essenziali di organismi target zooplanctonici; questo per fornire una panoramica più completa di come i popolamenti planctonici rispondano a specifici fattori di stress in condizioni di laboratorio. Allo stesso modo, mediante esperimenti di sequenziamento di librerie di ampliconi di 16S rDNA ed esperimenti di RNASeq, è stata analizzata la variazione stagionale della composizione delle comunità dei procarioti, nonché la variazione del profilo trascrizionale, in modo da individuare quali specie siano i driver principali per la stabilità dell'ambiente, e quale sia la risposta degli organismi al variare dei parametri ambientali. Le simulazioni di *enclosure* e quelle sperimentali in laboratorio hanno previsto: i) lo studio delle variazioni strutturali delle comunità microbiche responsabili della produzione e degradazione della sostanza organica in diverse condizioni di ricambio idrico, con un *focus* sulla possibile migrazione degli organismi meiofaunali verso gli strati ossici superficiali durante l'indotta ipossia ii) la valutazione della variazione della composizione della sostanza organica totale e della

sua frazione labile nei sedimenti, l'arricchimento in nutrienti inorganici in colonna d'acqua e le attività enzimatiche degradative durante l'indotta ipossia/anossia stimando in parallelo i processi di produzione, primaria e procariotica secondaria, sia nei sedimenti superficiali che nell'acqua sovrastante durante il protrarsi della fase ipossica/anossica iii) la stima di alcuni parametri funzionali delle comunità affiancando a tecniche classiche, tecniche di biologia molecolare mirate all'identificazione di geni (e funzioni) la cui espressione cambia nelle differenti condizioni, andando quindi ad individuare eventuali cambiamenti nella composizione della comunità o nei profili trascrizionali delle stesse. I dati derivanti dalle serie storiche (LTER) e quelli relativi ai campionamenti *pre* e *post* MOSE sono stati analizzati ed integrati con le variabili ambientali in funzione degli scenari attesi in seguito alla messa in funzione del MOSE.

WP 3.3.5: Dopo una prima fase di analisi dello stato delle conoscenze sui *reef* di ostriche, si sono caratterizzati i diversi tipi di *reef*, mappandoli e quantificandoli. Si sono valutati i limiti di crescita lungo i substrati verticali su scala lagunare, i periodi insediativi e la crescita. Si è indagato un gradiente salino per verificare il limite di distribuzione delle ostriche. Oltre alle osservazioni dirette per mappare gli ostricheti, ci siamo avvalsi delle tecniche di *remote sensing* (MBES, collaborando con la linea 1.1, e immagini satellitari) come strumenti per identificare queste biocostruzioni e per quantificarne lo sviluppo in superficie ad integrazione dei dati raccolti in campo. Si è proposto un sistema di classificazione che meglio descrivesse gli ostricheti in laguna di Venezia, basato sui sistemi di classificazione Nordamericani raccogliendo informazioni sia sulla caratterizzazione fisica che biologica. La caratterizzazione biologica è da intendersi non solo come la determinazione su base morfologica e genetica delle ostriche, ma anche della comunità associata tramite acquisizione di immagini subacquee ad alta risoluzione affiancate a campionamenti mirati per la validazione delle identificazioni effettuate. I dati raccolti e gli esperimenti condotti hanno permesso di fare delle stime sui tassi di filtrazione ed il sequestro di anidride carbonica, importanti servizi economici che ci vengono offerti da queste biocostruzioni.

5. Risultati per attività

WP 3.3.1 - Il lavoro proposto, oltre che valutare gli impatti delle chiusure del MOSE, ha voluto fare una sintesi dei dati raccolti negli ultimi 40 anni evidenziando i cambiamenti dello stato trofico delle acque e dei sedimenti superficiali, nonché dei tassi di sedimentazione in 6 stazioni (tre localizzate presso la gronda lagunare e tre presso le bocche di comunicazione col mare) monitorate mensilmente per due anni (prima e durante le chiusure del MOSE) e nell'intera laguna nell'ambito di vari progetti come il MOVECO 3, il MOVECO IV e i Life Seresto (LIFE12 NAT/IT/000331 e Lagoon Refresh (LIFE16 NAT/IT/000663)). Inoltre, con campionamenti bimensili nelle 6 stazioni ed estesi in tutta la laguna nell'ambito dei progetti citati sono state valutate i cambiamenti della tipologia e distribuzione delle macroalghe e fanerogame marine fornendo mappature di distribuzione e valutazioni della produzione primaria. L'analisi dei dati ha permesso anche di fare previsioni evolutive per i prossimi anni e di fornire indicatori semplici e di facile rilevazione che possano dare una rapida comprensione sia dello stato attuale e futuro per i prossimi 5-10 anni, salvo nuovi imprevedibili impatti antropici o cambiamenti climatici. I parametri ambientali che più riflettono questi cambiamenti sono la limpidezza delle acque e il pH dell'acqua e tra i nutrienti le concentrazioni dei nitriti. Tuttavia assolutamente più importante è valutare la distribuzione delle praterie di fanerogame acquatiche e soprattutto la presenza/assenza di alcune piccole macroalghe calcarizzate come quelle dei generi *Hydrolithon*, *Pneophyllum* e *Melobesia* che vivono epifite su specie di maggiori dimensioni. Queste sono di gran lunga molto più sensibili delle fanerogame acquatiche nel registrare le tendenze evolutive dello stato trofico e nel caso di cambiamenti ambientali rispondono nell'arco di 2-3 mesi.

I principali risultati evidenziano una significativa diminuzione delle concentrazioni di nutrienti sia nella colonna d'acqua che nei sedimenti superficiali evidenziabili confrontando i dati raccolti in differenti annate nelle 6 stazioni monitorate nel 2019 e 2020-21. La stessa diminuzione si è registrata per i tassi di sedimentazione che hanno raggiunto i massimi livelli nel periodo di massima pesca alle vongole tra la fine degli anni '90 e l'inizio degli anni 2000.

Per quanto riguarda le fanerogame acquatiche, dalla valutazione fatta nel 2003 tutte hanno registrato un netto incremento e in taluni casi hanno quadruplicato (*Zostera noltei*) o raddoppiato (*Z. marina*) i loro areali e produzione primaria. Inoltre è ritornata *Ruppia cirrhosa* ricoprendo più di 10 Km² di fondali nella parte più settentrionale della laguna Nord. Infine le macroalghe, dopo la significativa riduzione osservata all'inizio degli anni '90 si è stabilizzata su valori medi compresi tra 0.5 e 0.9 kg m⁻². Tuttavia è cambiata la tipologia delle specie dominanti che non sono più le Ulvacee ma specie appartenenti alle alghe rosse che evitano il verificarsi di crisi anossiche come accadeva annualmente negli anni '80. Nei bassofondali lagunari è aumentata notevolmente anche la presenza di alghe di elevato valore ecologico prima assenti o molto rare.

WP3.3.2: Gli studi condotti nell'ambito del progetto hanno permesso di approfondire le conoscenze sulle peculiarità degli habitat lagunari di basso fondale, evidenziandone la complessità e il ruolo nel determinare la distribuzione della fauna neotonica. La distribuzione del popolamento neotonico è risultata molto eterogenea, con una significativa variabilità non solo tra habitat, con valori di densità spesso maggiori nelle barene, ma anche tra sottobacini. È risultato che nella laguna centrale l'abbondanza e la diversità del popolamento neotonico sono risultate più basse che negli altri sottobacini, senza evidenziare peraltro differenze fra tipo di habitat. Al contrario, nei sottobacini sud e nord, le barene hanno ospitato abbondanze significativamente maggiori che nelle praterie. Verificando nel dettaglio la composizione tassonomica, è stato possibile notare che gli habitat di barena ospitano proporzioni maggiori di specie marine migratrici dipendenti e che l'abbondanza delle specie varia tra sottobacini: le barene del sottobacino nord supportano abbondanze medie maggiori di *Chelon labrosus*, *C. ramada* e *Sparus aurata*, mentre quelle del sottobacino sud mostrano abbondanze medie più elevate di *Chelon auratus* e *C. saliens*. Si può ipotizzare che queste differenze siano legate anche alla diversa morfologia delle barene nei tre sottobacini: le barene della laguna centrale sono caratterizzate da pochi canali di marea, mediamente più ampi e di forma semplificata rispetto a quelli delle barene degli altri sottobacini, nonché da barene più frammentate e da una maggior superficie occupata da habitat artificiali. Le barene del sottobacino nord si presentano, invece, ricche di canali intertidali, stretti e sinuosi, e da una maggiore distanza dai canali profondi. L'applicazione dell'indice l'Habitat Fish Bio-Indicator (HFBI), indice validato per l'implementazione della Direttiva sulle Acque (WFD 2000/60/CE), ai dati raccolti nel 2019 e 2020 ha valutato lo stato ecologico dei tre sottobacini "buono", sia nelle barene che nelle praterie, con l'eccezione delle barene del bacino centrale nel 2019, che risultano in stato "sufficiente". Nel complesso, quindi, si evidenzia una maggior fragilità e particolare sensibilità delle barene dell'area centrale e dei popolamenti neotonici ad esse associate. Un particolare focus è stato dedicato alle barene del sottobacino nord, che sembrano rappresentare l'habitat preferenziale per i migratori marini dipendenti e quindi un caso di studio interessante per studiare la struttura della rete trofica che supporta le maggiori abbondanze. Nella complessità della struttura di barena, è stato anche confrontato quanto possano essere importanti le risorse all'interno dei canali intertidali rispetto all'area di bordo barena esterna, con evidenze di maggiori abbondanze soprattutto per la componente microalgale bentonica che rappresenta una fonte di cibo importante per i giovanili dei cefali.

Questo progetto ha permesso inoltre di analizzare le dinamiche spazio-temporali nella connettività mare-laguna attraverso lo studio della componente ittioplanctonica ed un focus sulla componente neotonica migratrice marina giovanile. L'analisi dei campioni di ittioplancton ha portato, nel complesso, all'identificazione di 17 taxa riconducibili a 13 famiglie di teleostei ed in alcuni casi è stato possibile approfondire l'analisi tassonomica fino al livello di genere o specie. Per quanto riguarda le uova, le densità maggiori sono state osservate durante i campionamenti invernali e nelle stazioni marine rispetto a quelle lagunari. Nel caso delle larve, differenze significative nei valori di densità sono state osservate soltanto tra anni e non sono risultate invece significative le differenze fra stazioni marine e stazioni lagunari. Le maggiori densità di larve di migratori marini sono state riscontrate a fine autunno e in inverno e le specie più rappresentate sono risultate quelle dei clupeidi *Sardina pilchardus* e *Sprattus sprattus*. In generale i dati raccolti hanno inoltre permesso di evidenziare come postlarve ed avannotti si accumulino nelle aree di spiaggia in prossimità delle dighe foranee prima di entrare in laguna e questo potrebbe essere dovuto alla natura artificiale delle bocche di porto lagunari. Nel complesso, lo studio ha evidenziato un'articolata e complessa connettività mare laguna caratterizzata dall'ingresso in laguna sia di larve sia, soprattutto, di postlarve e avannotti delle specie ittiche di migratori marini. Questi ingressi risultano concentrati in

particolare dal tardo autunno all'inizio della primavera e risultano maggiori nei sottobacini nord e sud. Gli habitat di basso fondale del sottobacino centrale, infatti, sembrano avere un ruolo minore, come aree di nursery, per le specie di migratori marini rispetto agli habitat analoghi presenti negli altri due sottobacini.

WP 3.3.3: Gli studi hanno portato all'approfondimento delle conoscenze su tre specie ittiche lagunari e caratteristiche delle bocche di porto in relazione alla variabilità ambientale e ai lavori del MOSE.

In particolare, per quanto riguarda l'ambiente lagunare sono state studiate le specie *Zosterisessor ophiocephalus* e *Atherina boyeri*, entrambe di importante valore commerciale per la pesca tradizionale lagunare. Lo studio della dinamica di popolazione di entrambe le specie ha messo in evidenza una variabilità spaziale a livello intraspecifico, con differenze fra i diversi sottobacini idrografici identificati all'interno di questo progetto dalla Linea 1, WP 1.3.3, che fra aree più interne ed esterne. In particolare, in *Z. ophiocephalus*, fra le diverse aree vi sono sia differenze di taglia e accrescimento fra le aree che differenze nello sviluppo gonadico, ad indicare possibile variabilità nel periodo riproduttivo, probabilmente in relazione alle diverse temperature che caratterizzano le diverse aree lagunari. L'analisi dei siti riproduttivi di questa specie in laguna sud ha evidenziato dei risultati molto importanti per quanto riguarda i nidi, collocati nelle praterie di fanerogame in aree che rimangono esposte durante la bassa marea. I nidi, infatti, sono risultati caratterizzati da basse fluttuazioni dei parametri ambientali, in particolare della temperatura, rispetto alle fluttuazioni all'esterno dei nidi stessi indicando come questo costituiscono ambienti dove le uova in sviluppo possono trovare condizioni più costanti favorevoli allo sviluppo. I dati di ossigeno disciolto nei nidi indicano come, pur con fluttuazioni e valori bassi che seguono le variazioni giornaliere riscontrate nell'acqua all'esterno dei nidi, anche nel periodo estivo siano presenti valori vicini al 100%, indicando un efficace ricambio di acqua da parte del maschio parentale e favorito dalla struttura del nido stesso. Questi dati indicano come i nidi costituiscano degli ambienti controllati, in grado probabilmente di tamponare anche variazioni, almeno su piccola scala, della circolazione delle acque. L'analisi delle dimensioni delle larve alla schiusa ha messo in evidenza una variabilità fra nidi che rimangono più o meno esposti all'aria per effetto delle condizioni di maree. Per quanto riguarda *A. boyeri*, in questa specie è emersa una minore variabilità spaziale in termini di taglia o attività riproduttiva. Sono emerse invece differenze nei rapporti sessi dei giovanili sia fra periodi che fra aree. Anche se i risultati non sono definitivi, tuttavia questi supportano l'ipotesi di una determinazione del sesso temperatura dipendente, con il differenziamento di un maggior numero di maschi con l'avanzare della stagione soprattutto nelle aree più interne, soggette a maggiori temperature. L'aumento di temperatura legato ai cambiamenti climatici potrebbe quindi causare in questa specie degli sbilanciamenti importanti nel rapporto sessi.

Il metodo del passive listening ha consentito di utilizzare una specie ittica appartenente alla famiglia degli scienidi, la corvina *Sciaena umbra*, quale modello per lo studio delle relazioni fra la presenza, distribuzione e riproduzione di questa specie e le caratteristiche ambientali delle bocche di porto, con particolare riferimento ai livelli di rumore ambientale. Nonostante gli alti livelli di rumore dovuti al traffico nautico, la specie è presente in tutte e tre le bocche di porto e le sue aree riproduttive sono localizzate nelle zone più profonde dei canali delle bocche, principalmente quelle di Malamocco e Lido. Lo stesso metodo ha inoltre consentito di rilevare la presenza di un altro scienide, l'ombrina (*Umbrina cirrosa*), e altre specie acusticamente attive ("sonifere"). Le bocche di porto ospitano dunque una comunità nectonica legata all'habitat roccioso artificiale, comprendente specie di interesse per la conservazione e per la pesca, le quali appaiono in grado di adattarsi alle intense pressioni antropiche, tipiche di questi ambienti. Un monitoraggio di medio-lungo termine potrebbe permettere di comprendere in dettaglio l'evoluzione di tali adattamenti, e di evidenziare possibili impatti delle pressioni antropiche, includendo tra queste anche il rumore generato dalla movimentazione delle paratoie del sistema Mose, sulla vitalità delle popolazioni.

WP3.3.4: I lavori ingegneristici di costruzione del MOSE eseguiti in corrispondenza delle tre bocche di porto della laguna di Venezia non sembrano aver provocato alcun effetto evidente sulla comunità planctonica. Durante il biennio interessato dalle indagini non sono state riscontrate particolari evidenze o anomalie relative alle abbondanze dei principali gruppi planctonici e delle relative specie rispetto agli andamenti noti. Mettendo a confronto i risultati dei tre anni di ricerca si evidenzia come le abbondanze medie mensili delle diverse comunità indagate varino di anno in anno in funzione soprattutto delle particolari condizioni

climatiche del periodo e all'influenza di acque dolci dalla gronda con conseguente apporto di nutrienti, in grado di innescare eventuali fioriture fitoplanctoniche soprattutto nelle stazioni più interne alla laguna. La variazione stagionale sia delle specie che delle abbondanze totali non ha evidenziato differenze significative, seguendo un andamento già osservato in laguna di Venezia con minimi autunno-invernali e ripresa tardo invernale-primaverile con massimi primaverili-estivi. Il ciclo stagionale delle comunità è guidato dalla temperatura e dalla lunghezza del fotoperiodo durante tutto l'anno. Le maggiori abbondanze nelle stazioni più interne alla laguna di Venezia sono confermate e sono ascrivibili alla maggior disponibilità di nutrienti nelle stazioni di gronda maggiormente influenzate dalla terraferma, piuttosto che nelle stazioni posizionate nei pressi delle bocche di porto. Le caratteristiche ecologiche della laguna di Venezia favoriscono quindi la presenza di specie planctoniche in grado di adattarsi a condizioni ambientali altamente variabili nello spazio e nel tempo. Il segnale di decremento delle abbondanze dell'ultimo periodo (2020) allo stato attuale è da considerarsi da monitorare per valutarne la permanenza o meno e le possibili cause tra cui non si esclude un possibile impatto dello ctenoforo *Mnemiopsis leidyi*, presenza costante in laguna dal 2016 e su cui l'UO ISMAR Venezia sta proseguendo le indagini. In termini di modifiche nella struttura delle comunità si conferma quanto già osservato e riportato negli ultimi anni ossia la dominanza del copepode *Acartia tonsa* particolarmente nelle aree di gronda, caratterizzate da condizioni di maggiore trofia degli habitat, la presenza delle due nuove specie di copepodi non indigene, *Pseudodiaptomus marinus* ed *Oithona davisae* e quella dello ctenoforo *M. leidyi*. Tutte queste specie sono attualmente oggetto di monitoraggio e di studio da parte dell'UO dell'ISMAR CNR. Nei due anni di campionamento e misura, la qualità media delle acque, secondo l'indice di qualità MPI (*Multimetric Phytoplankton Index*) è stata "buona".

A riguardo degli approcci biomolecolari, l'esposizione del copepode *Acartia tonsa* a diversi tipologie di neonicotinoidi, pesticidi rilevati in laguna, ha comportato l'aumento dell'espressione dei geni deputati alla detossificazione di sostanze xenobiotiche, cosa preventivabile, ma anche di geni coinvolti nella spermatogenesi e oogenesi, con possibili effetti nel successo del processo riproduttivo.

È stato inoltre generato un dataset che descrive la struttura delle comunità procariotiche planctoniche e bentoniche di 5 differenti siti lagunari, in 11 stagioni consecutive. Lo sforzo di sequenziamento è stato tale da assicurare una rappresentazione reale della struttura delle comunità in analisi. Inoltre, l'estensione dello studio ha consentito di evidenziare alcuni trend, in particolare una sostanziale stabilità negli anni delle comunità procariotiche, una variabilità principalmente stagionale per quanto riguarda le comunità planctoniche e una corrispondente variabilità spaziale per quanto riguarda quelle bentoniche. Il dataset prodotto risulta essere un valido elemento di comparazione per futuri studi in cui si volessero identificare eventuali perturbazioni nella componente procariotica dell'ecosistema lagunare, tra cui un utilizzo esteso delle barriere mobili a seguito di eventi prolungati di alta marea.

I risultati degli enclosure sembrano suggerire che l'isolamento dell'acqua all'interno dei mesocosmi (assimilabile alla chiusura del MOSE) può indurre principalmente un minore idrodinamismo e di conseguenza facilitare la deposizione del materiale in sospensione in colonna. Quest'alterazione sembra avere ripercussioni sia sui principali processi biologici in colonna d'acqua che nei sedimenti superficiali, risultando in una complessiva modificazione dell'ordinario benthic-pelagic coupling della laguna. In generale, le comunità ed i processi nella colonna d'acqua sono risultati inibiti dal confinamento, probabilmente a causa di un graduale affondamento del particolato organico che ha invece stimolato le attività a carico delle comunità bentoniche nel sedimento. Gli effetti risultano comunque più attenuati quando le simulazioni si avvicinano maggiormente alle condizioni in cui ci si aspetta che il MOSE opererà almeno nei primi anni di attività.

WP 3.3.5: La sottolinea ha descritto un habitat lagunare, gli ostricheto o "oyster reef" a *Crassostrea gigas*. Assolutamente trascurato a livello nazionale e non adeguatamente considerato a livello Europeo. Abbiamo quindi approntato un primo sistema classificatorio strutturato in maniera simile a quelli nordamericani. I reef sono stati caratterizzati trovandone le quote di crescita nei diversi ambiti lagunari e ne è stata descritta l'epifauna. Abbiamo stimato in circa 25 ettari l'estensione dei reef in laguna dei quali circa metà sono rappresentati dai reef che si ergono dai fondali lagunari (i, di questi ben 5 ha si collocano sotto il Ponte della

Libertà e 2 ai suoi lati,) e l'altra metà formata dai seawall reef, ossia la banda di ostriche situata sui muri verticali delle isole e delle altre strutture (13 ha). La superficie effettiva dei gusci aumenta di circa un fattore 6 la superficie topografica aumentando di molto l'azione metabolica e depurativa del biofilm adesivo.

I vari tipi di reef investigati, con l'esclusione quindi dei banchi sciolti, con una biomassa media di 10 Kg/m² di ostriche vive, con uno standing stock di oltre 2500 tonnellate. Per cui possiamo stimare in circa 200-300 tonnellate di CO₂ all'anno l'azione sequestrante delle sole ostriche dei reef tramite immobilizzazione nel guscio. Abbiamo stimato che le sole ostriche della laguna di Venezia sono in grado di filtrare in condizioni ottimali circa 4 milioni di metri cubi di acqua al giorno, anche considerando il periodo esposizione all'aria, ossia un centesimo del volume medio giornaliero di acqua scambiata tra laguna e mare. *Crassostrea gigas* raggiunge in due-tre anni la taglia commerciale rappresentando una risorsa economica ancora sottovalutata.

6. Obiettivi prefissati e raggiunti

Questa Linea di ricerca si era prefissata di studiare le diverse componenti biologiche nell'ottica di comprendere i cambiamenti in atto anche in relazione ai cambiamenti lagunari. I cinque WP nei quali è suddivisa la Linea hanno raggiunto gli obiettivi prefissati contribuendo non solo ad un ampliamento delle conoscenze, grazie anche al confronto con dati pregressi, ma anche alla costruzione di una base integrata di informazioni utile per la valutazione anche futura dell'evoluzione dell'ecosistema lagunare. L'analisi dei dati raccolti in relazione alla scala spaziale e temporale ha permesso, inoltre, di studiare queste componenti in relazione alle diverse variabili ambientali e morfologiche, base importante per la comprensione degli effetti dei cambiamenti lagunari.

Al di là degli obiettivi specifici della Linea e dei diversi WPs, questa linea ha contribuito direttamente o indirettamente, costruendo la base di dati necessaria per il loro raggiungimento, ai cinque obiettivi generali del programma di ricerca. Nello specifico:

- 1) Quadro conoscitivo: questa Linea di ricerca ha costruito un quadro complessivo ed integrato dello stato attuale della componente biologica della laguna di Venezia in tutte le sue diverse componenti, microbica, vegetale e animale (micro e macro), sia della colonna d'acqua che dei fondali e di habitat essenziali per l'ecosistema lagunare, includendo l'intera laguna di Venezia e le bocche di porto. Un quadro così completo non era mai stato realizzato in passato e costituisce una base di informazioni essenziale per gli studi futuri e per la comprensione dell'ambiente lagunare in generale. Attraverso campionamenti delle intere comunità o focalizzati su specie modello, la Linea di ricerca ha analizzato variazioni spaziali e temporali delle diverse componenti biologiche lagunari e della connettività fra mare e laguna per la componente nectonica. I dati prodotti costituiscono la necessaria *baseline* per la valutazione degli effetti degli eventi di chiusura delle paratoie del MOSE. Le attività sperimentali condotte, inoltre, hanno permesso di svolgere una prima simulazione di questi effetti su piccola scala, punto di partenza per la comprensione delle dinamiche su scala spaziale e temporale maggiore. Grazie all'utilizzo di dati pregressi disponibili presso i diversi gruppi di ricerca, il quadro attuale dello stato della laguna da un punto di vista biologico è stato integrato per mettere in evidenza anche l'evoluzione del sistema lagunare veneziano.
- 2) Modelli matematici: questa linea di ricerca ha costruito il database biologico necessario per lo sviluppo di modelli matematici che tengano conto di tutte le componenti. La capacità dei modelli di fornire previsioni affidabili e realistiche dipende, infatti, anche dai dati a disposizione per la costruzione dei modelli stessi. La completezza dei dati raccolti, che includono tutte le componenti biologiche e l'intero bacino lagunare, incluse le bocche di porto e le relazioni con il mare, costituirà il punto di forza per lo sviluppo modellistico.
- 3) Strumenti di gestione: questa Linea di ricerca, anche se non si è occupata direttamente di sviluppo di strumenti di gestione, ha fornito le basi utili alla riflessione sulla gestione della chiusura delle paratoie,

grazie alla sperimentazione su piccola scala degli impatti delle chiusure del MOSE e i risultati relativi alla connettività mare-laguna. Inoltre, i risultati relativi alla variabilità spaziale dei popolamenti anche in relazione alla struttura morfologica della laguna supportano la necessità di una gestione che favorisca il ripristino di ambienti degradati per il mantenimento dell'ecosistema lagunare e dei suoi servizi.

- 4) Indicatori: la Linea di ricerca non solo ha applicato indici di qualità ambientale per la valutazione dello stato lagunare, ma ha anche verificato l'utilizzo di specie modello ittiche e organismi sentinella planctonici per monitorare gli effetti dei cambiamenti a livello lagunare. Questi organismi modello potranno essere utilizzati anche nei futuri studi sui cambiamenti dell'ambiente lagunare.
- 5) Visione strategica: la Linea di ricerca, attraverso i risultati ottenuti, ha sviluppato un quadro complessivo che permette di valutare l'evoluzione di componenti biologiche dell'ecosistema lagunare tenendo conto non solo dei cambiamenti morfologici in atto, ma anche dei cambiamenti climatici in corso. Il miglioramento, da un punto di vista ecologico, dell'ambiente lagunare veneziano, con il recupero di habitat essenziali quali le praterie di fanerogame e i reef di ostriche, rivela delle condizioni favorevoli all'intero ecosistema lagunare e, generalmente, ecosistemi in migliore salute sono anche più resistenti e resilienti. D'altra parte, i cambiamenti climatici in atto e l'aumento, da questi favorito, di specie invasive indica come sia necessario mantenere o, quando degradati, ripristinare alcuni ambienti che favoriscano il mantenimento della biodiversità autoctona lagunare, quali per esempio le barene. D'altra parte, la componente biologica lagunare ha strette connessioni con quella marina e questo indica come sia necessario mantenere l'importante scambio laguna/mare.