



Università  
Ca' Foscari  
Venezia

Corso di Laurea Magistrale  
in Scienze Ambientali

Classe LM75 – Scienze e tecnologie per l'ambiente e il territorio  
Curriculum – Capitale Naturale e Servizi Ecosistemici

Tesi di Laurea Magistrale

**Possibili variazioni nella fornitura di SE in laguna di Venezia a  
seguito di variazioni ambientali e diverse strategie gestionali**

**Relatore**

Ch. Prof. Fabio Pranovi

**Correlatrice**

Dott.ssa Alice Stocco

**Laureando**

Francesco Moda

matr. 887968

Anno Accademico

2021 / 2022



# Sommario

Introduzione.....	1
Gli ambienti costieri di transizione e il quadro normativo europeo.....	1
Servizi Ecosistemici.....	2
Strumenti di modellazione dei SE .....	5
Obiettivi della tesi.....	5
Materiali e Metodi .....	7
Area di studio .....	7
Modellazione in laguna di Venezia.....	8
Descrizione del modello EST .....	11
Razionale.....	11
Modello concettuale e descrizione matematica .....	13
Implementazione del modello in SIMILE.....	17
Parametrizzazione del modello.....	28
Risultati .....	40
Generazione degli scenari e simulazioni .....	40
Scenario BAU.....	41
Scenario CC+MOSE.....	43
Scenario GOV.....	46
Scenario TUR .....	48
Scenario RES.....	51
Analisi di sensitività .....	53
Numero di cacciatori ed effetto sull'avifauna .....	53
Diportisti con plot su elementi della morfologia lagunare e sui SE .....	54
Discussione e conclusioni.....	56
Bibliografia .....	59
Appendice – Equazioni del modello.....	66

# Introduzione

## Gli ambienti costieri di transizione e il quadro normativo europeo

Le zone costiere sono aree di notevole interesse ambientale, economico e sociale. Queste aree, dal punto di vista ecologico, fanno parte dei cosiddetti ambienti di transizione, ovvero zone di confine tra l'ambiente marino e l'ambiente continentale, ossia zone dove si ha l'interazione di diversi processi: i fiumi, il moto ondoso e le maree.

Queste interazioni danno luogo alla creazione di baie, lagune salmastre, zone umide, estuari e delta, variabilmente combinati tra loro.

Nel corso del tempo sono state proposte diverse definizioni per le lagune costiere, tra cui quella proposta da Kjerfve e Magil (1989): corpi d'acqua poco profondi, formati a seguito dell'innalzamento del livello del mare durante l'Olocene, vicini alla costa e disposti parallelamente ad essa, separati dall'oceano da una barriera, ma connessi all'oceano da una o più bocche di porto.

Secondo Kjerfve (1994), le lagune si possono suddividere in 3 tipologie principali:

1. "Choked": le lagune di questa tipologia sono lagune generalmente connesse al mare da un singolo canale tidale lungo e stretto, che può essere periodicamente chiuso o aperto a causa della sedimentazione, del volume d'acqua dolce in arrivo dai fiumi o in base all'escursione di marea (Haines et al., 2006);
2. "Restricted": queste lagune sono formate da corpi idrici estesi separati dal mare da due o più canali tidali che connettono la laguna al mare interrompendo le isole barriera;
3. "Leaky": le lagune di questo tipo sono spesso allungate parallelamente alla costa e presentano molte aperture di connessione con il mare. Per questo motivo le lagune di tipo leaky tendono ad avere uno scambio molto ampio con il mare e pertanto risultano avere salinità simili a quella marina.

Questi ambienti di transizione sono mutevoli e dinamici, e dipendono dall'azione e dalle caratteristiche di molti fattori come il vento, la batimetria, le maree, le onde, l'apporto di acqua dolce, la tipologia e l'apporto di sedimenti, lo scambio con il mare, ecc... Tutte queste variabili sono in grado di modificare, anche rapidamente, i parametri fisici e chimici come la temperatura, la salinità, la torbidità e la percentuale di ossigeno disciolto.

Grazie alla particolarità di queste condizioni, le lagune sono da sempre state oggetto di attività antropiche di varia natura, basate sullo sfruttamento dei numerosi beni e servizi che questi ambienti forniscono all'umanità e che oggi chiamiamo "servizi ecosistemici". A causa della loro dinamicità e fragilità, contrapposta all'enorme importanza che rivestono sia per le popolazioni vegetali e animali, sia per la società umana, si è provveduto a varia scala, alla promulgazione di convenzioni e direttive per proteggere gli ecosistemi delle lagune.

La normativa centrale nella gestione e protezione degli ambienti di transizione lagunari è attualmente la "Direttiva Quadro sulle Acque" (Water Framework Directive - 2000/60/CEE) che ha lo scopo di istituire un framework per la protezione delle acque superficiali interne, delle acque di transizione, delle acque costiere e sotterranee. In particolare, lo scopo di questo framework intende:

- Impedire ulteriori deterioramenti, proteggere e migliorare lo stato degli ecosistemi acquatici e terrestri e delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico;
- Incentivare un utilizzo sostenibile delle risorse idriche basato sulla protezione a lungo termine delle risorse disponibili;
- Migliorare la protezione e l'ambiente acquatico, anche tramite misure specifiche per la riduzione graduale degli scarichi, delle emissioni e delle perdite di sostanze prioritarie e l'arresto o la graduale eliminazione degli scarichi, delle emissioni e delle perdite di sostanze pericolose prioritarie;
- Assicurare la riduzione graduale dell'inquinamento delle acque sotterranee e impedirne l'aumento;
- Contribuire a mitigare gli effetti di fenomeni estremi come inondazioni e siccità.

Un'altra direttiva importante per gli ambienti di transizione è la "Direttiva Habitat" (92/43/CEE) del 1992, la quale prevede l'istituzione della cosiddetta Rete Natura 2000, una rete ecologica formata da Siti di Interesse Comunitario (SIC) che diventeranno poi Zone Speciali di Conservazione (ZSC). La rete comprende le Zone di Protezione Speciale (ZPS) previste dalla precedente "Direttiva Uccelli" (79/409/CE) del 1979.

Tra le altre misure normative importanti, sebbene meno recenti, si deve ricordare anche la Convenzione di Ramsar del 1971. Secondo questa convenzione, gli Stati contraenti si devono impegnare a designare le zone umide del proprio territorio in modo che possano essere inserite nell'elenco delle zone umide di importanza internazionale. La scelta di queste zone dovrebbe essere effettuata sulla base dell'importanza ecologica, botanica, zoologica, idrologica e di altre caratteristiche. Ogni area riconosciuta, deve essere tutelata e sorvegliata al fine di mantenere preservati questi ambienti. Le zone umide, infatti, costituiscono una risorsa di grande valore economico, culturale, scientifico e ricreativo, la cui perdita sarebbe irreparabile (Homepage | Convention on Wetlands).

## Servizi Ecosistemici

Per quanto riguarda la definizione di ecosistemi, si fa riferimento al CBD (Convention on Biological Diversity) del 1992 che definisce gli ecosistemi come "una interazione dinamica complessa di comunità vegetali, animali e di microrganismi e dell'ambiente abiotico, che interagiscono insieme come un'unità funzionale" (Convention On Biological Diversity United Nations, 1992). Anche in altre definizioni di ecosistema si ritrovano le parole "dinamicità" e "interazioni" a dimostrazione del fatto che queste parole sono alla base di ogni ecosistema. Queste due caratteristiche sono importanti in molti ambiti di studio perché rendono maggiormente complessa la comprensione e l'analisi dell'oggetto di studio. In un contesto statico infatti, una volta che sono stati studiati i nessi di causalità tra gli elementi, è relativamente facile prevedere gli effetti della variazione di una delle componenti, ma nello studio di sistemi complessi come i sistemi dinamici bisogna considerare che le parti costituenti sono tra loro interdipendenti e spesso si vengono a creare delle retroazioni e delle connessioni molto strette tra gli elementi per cui è molto difficile poter variare solo un elemento lasciando tutto il resto inalterato. Affrontando lo studio di un problema legato agli ecosistemi, è importante definire i confini dell'ecosistema in oggetto in ragione del problema indagato. La motivazione principale risiede nel fatto che un ecosistema ben definito presenta interazioni forti tra le sue componenti e interazioni deboli con le componenti esterne ai confini dell'ecosistema oggetto di studio. I confini sono quindi quei luoghi in cui coincidono una serie di

discontinuità, per esempio nella distribuzione degli organismi e nell'ambiente biofisico (Millennium Ecosystem Assessment).

Dalle interazioni tra sistemi ecologici e sociali, emergono i servizi ecosistemici (SE), ossia tutti i benefici, tangibili e non tangibili, che la società umana riceve dalla Natura e dai processi ecologici (Costanza et al., 1997). Sul concetto di SE si apre un campo di ricerca abbastanza recente e in continua crescita. Tuttavia, ad oggi molti studi continuano ad essere solo concettuali e non sempre trovano applicazioni pratiche o gestionali. Ci sono però degli studi che mirano a creare strategie di valutazione sia qualitative che quantitative (Ioana et al., 2013). Per comprendere meglio l'importanza e la dinamicità dei SE, tuttavia, occorre definire le funzioni ecosistemiche e il capitale naturale. Con funzioni ecosistemiche ci si riferisce alle proprietà e ai processi degli ecosistemi. Queste possono generare benefici diretti o indiretti all'uomo. Il capitale naturale invece è in genere definito come uno stock naturale di materiali e informazioni che esistono in un determinato punto di un ecosistema in un determinato momento. Ogni forma di stock di capitale può generare, sia autonomamente che assieme ad altri stock di altri capitali, dei flussi di servizi che possono essere usati per il benessere umano. L'utilizzo da parte dell'essere umano di parte di questo flusso potrebbe non mantenere intatto questo stock. Lo stock di capitale è identificabile con unità fisiche (ad esempio capitale naturale come alberi, minerali, ecosistemi, atmosfera, ecc...). A volte invece può essere rappresentato da unità non tangibili (ad esempio se si tratta di informazioni o di valori morali, estetici e culturali) (Costanza et al., 1997). Poiché il capitale naturale e la sua permanenza sono indissolubilmente legati alla costanza delle funzioni ecosistemiche, i flussi di SE si basano sulla presenza del capitale naturale e di conseguenza dipendono dalle funzioni ecosistemiche. Questi concetti di dipendenza della società umana dalla Natura erano già presenti in alcuni studi e saggi dei secoli scorsi (Marsh & Lowenthal), ma il riferimento più attuale diventa il Millennium Ecosystem Assessment (MEA) del 2005, che fissa e integra alcune definizioni pregresse.

I servizi ecosistemici vengono classificati dal Millennium Ecosystem Assessment in quattro categorie principali:

- Servizi di supporto: rappresentano quei servizi che sostengono e permettono la fornitura di tutti gli altri tipi di servizi, come per esempio la formazione del suolo e il ciclo dei nutrienti, cioè elementi indispensabili per la crescita e lo sviluppo degli organismi;
- Servizi di approvvigionamento: sono tutti i beni che derivano dagli ecosistemi e di cui l'uomo si serve per soddisfare determinati bisogni. Alcuni esempi possono essere il cibo, sia derivante da sistemi organizzati come agricoltura, allevamento e acquacoltura, sia da fonti selvatiche come la raccolta di frutti selvatici e la selvaggina. Altri esempi sono il legname, utilizzato come materiale per l'edilizia ma anche come combustibile e le fibre in genere, sia quelle ottenute tramite l'agricoltura (cotone, lino, canapa, iuta) sia quelle ottenute con l'utilizzo di animali (bachi da seta per la produzione della seta, pecore e capre per la lana);
- Servizi di regolazione: rappresentano i benefici che si ottengono dalla regolazione dei processi ecosistemici, come la regolazione climatica, la gestione dei rischi naturali e lo smaltimento di reflui e rifiuti. Gli ecosistemi possono influenzare il clima in diversi modi: riscaldamento e raffreddamento tramite produzione ed assorbimento di gas serra o effetti sulla distribuzione delle precipitazioni. Anche alcuni effetti che derivano da fenomeni naturali estremi possono essere mitigati dagli ecosistemi che attraverso suolo, zone umide, bacini, fiumi e laghi riescono, per esempio, ad assorbire picchi di portata dei fiumi e mareggiate;

- Servizi culturali: identificano una serie di servizi principalmente caratterizzati da intangibilità, come ad esempio identità e diversità culturale, valori del patrimonio culturale e paesaggistico, servizi spirituali, religiosi e di ispirazione, divertimento e turismo.

La laguna di Venezia risulta essere un paesaggio peculiare e unico formato da un insieme di ecosistemi, nei quali convivono componenti biotiche e abiotiche e processi antropici. I suoi elementi ambientali, economici e sociali, insieme con le loro molteplici interazioni dinamiche, rappresentano un socio-ecosistema (SES). L'intrinseca complessità di questo sistema può essere evidenziata grazie alle interconnessioni e ai feedback che si creano tra i diversi sottosistemi. I sistemi sociale ed ambientale, infatti, non sono indipendenti e isolati: la società dipende dagli ecosistemi e gli ecosistemi sono modificati dalla società. I processi, i feedback e gli equilibri che caratterizzano un SES non possono essere efficacemente descritti se i sistemi sociale ed ecologico vengono studiati separatamente (Levin et al., 2013; Liu et al., 2007).

Nel SES framework proposto da Ostrom (McGinnis & Ostrom, 2014b; Ostrom, 2009b), i SE sono generati a livello del sistema di risorse (resource system) e dipendono dalle unità di risorse (resource units). Secondo questa struttura, rappresentata con lo schema in figura 1, i SE forniscono benefici agli attori e la loro gestione è affidata al sistema di governance.

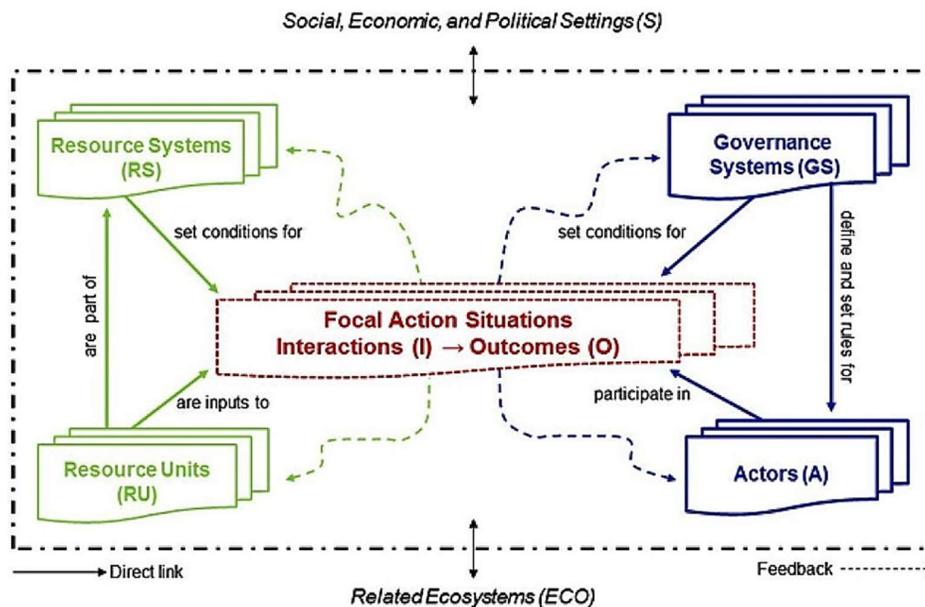


Figura 1 – Schema del framework proposto da Ostrom per il SES (Social-Ecological System) (McGinnis & Ostrom, 2014c)

Dall'incontro tra domanda e offerta si sviluppa il flusso di SE. Questo flusso può essere suddiviso in due tipologie: flusso diretto e flusso mediato.

- Nel flusso diretto, il sistema genera una funzione ecologica (processo) che è potenzialmente utile per gli attori;
- Nel flusso mediato, c'è un'attività attraverso la quale la risorsa viene usata dagli attori ed è necessaria quindi un'interazione.

Quindi, sulla base della distinzione del flusso, possiamo distinguere i SE in SE diretti (che non necessitano di interventi antropici per essere fruiti) e SE mediati (necessitano di attività da parte dell'uomo per poter essere sfruttati). L'attività svolta per fruire dei SE mediati può anche avere dei

feedback (come, ad esempio, effetti negativi) direttamente nel sistema di risorse che si ripercuotono nel SE stesso o nel flusso. Il risultato delle interazioni è un sistema di SE multipli forniti dal SES. Inoltre, il modello di Ostrom permette di capire il ruolo della governance sulla fornitura dei SE e può essere di due tipi: nel flusso diretto, la governance è responsabile delle misure per la protezione, il mantenimento o il ripristino delle unità di risorse del sistema. In quello mediato invece la governance rilascia direttive per regolare l'attività degli attori per lo sfruttamento dei SE, in modo da minimizzare gli effetti negativi (Rova et al., 2022).

## **Strumenti di modellazione dei SE**

Gli attuali approcci di modellazione dei SE spesso trattano SE singoli ed in modo separato, non considerando quindi le interazioni tra SE. Molti studi infatti sono relativi a modelli che trattano una o due categorie di SE (Ochoa & Urbina-Cardona, 2017). Sebbene questi strumenti di modellazione rappresentino una risorsa preziosa per la valutazione dei SE, oltre che per esplorare i cambiamenti nella fornitura dei SE causati dai cambiamenti nel paesaggio essi sono generalmente concepiti come modelli statici che stimano piccole variazioni dei SE nel tempo, senza tener conto delle dinamiche complesse della fornitura di SE (Rieb et al., 2017). Si è potuto osservare che nella maggior parte degli strumenti di modellazione in genere mancano i collegamenti tra i principali driver di cambiamento e il SE studiato (ibidem). Gli approcci attuali, inoltre, spesso utilizzano strumenti specifici e settorializzati su determinate discipline per simulare vari effetti sulle variabili, come ad esempio l'uso del suolo, che vengono quindi utilizzati direttamente per stimare i singoli SE (Hallouin et al., 2018), o utilizzati come input per altri modelli. Sebbene questi modelli possano comunque contribuire significativamente alla comprensione dei fenomeni studiati, essi sono limitati da una prospettiva settoriale e non olistica, che non considera gli effetti delle interazioni multiple tra SE diversi. Pertanto, sono necessari nuovi approcci di modellazione dinamica, che siano in grado di simulare congiuntamente gli effetti del cambiamento climatico (e altri importanti driver di cambiamento) sulla fornitura di SE multipli interagenti (Rieb et al., 2017).

## **Obiettivi della tesi**

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel contesto del progetto di ricerca Venezia2021 - programma di ricerca scientifica per una laguna "regolata", coordinato da CORILA (Consorzio per il coordinamento delle ricerche inerenti al sistema lagunare di Venezia). Esso nasce dall'esigenza di fornire un supporto scientifico ai decisori delle azioni di governance dell'ambito lagunare, a seguito anche dell'entrata in funzione del sistema MOSE (MOdulo Sperimentale Elettromeccanico). Si vuole, infatti, affiancare la gestione ed il collaudo delle opere a difesa della laguna per valutarne gli effetti sia in ambito ambientale, che sociale ed economico. In particolare, la tesi si inserisce all'interno della tematica 4 (Connessioni ecologiche e servizi ecosistemici) e più precisamente nella linea 4.2 (Servizi ecosistemici e gestione dell'ambiente lagunare). In tale contesto, il Laboratorio di Ecologia Marina afferente al DAIS, si è focalizzato sulla valutazione dei SE in laguna di Venezia e sulla messa a punto (in collaborazione con il dr. Brigolin, IUAV) di un modello che consentisse l'esplorazione di scenari 'what if'. Il progetto Venezia2021 è strutturato in 5 tematiche omogenee a loro volta suddivise in linee di ricerca, affrontate da vari gruppi ed enti di ricerca.

Gli obiettivi della tesi sono:

- la parametrizzazione del modello esplorativo, per cercare di stimare il valore o il range di valori più verosimili relativi alle variabili e ai parametri che lo compongono;
- la definizione e l'esplorazione di scenari di tipo climatico o gestionale;
- l'esecuzione di un'analisi di sensitività dimostrativa per due parametri per i quali è risultata difficoltosa ed incerta la stima del valore a causa della mancanza di dati affidabili o di fonti recenti.

# Materiali e Metodi

## Area di studio

L'area di studio su cui si concentra questo lavoro di tesi è la laguna di Venezia, la laguna costiera più grande dell'area mediterranea (Molinaroli et al., 2009). Questa laguna si trova nel Nord Est dell'Italia, in Veneto, e si affaccia al mare Adriatico (fig. 2). Essa presenta una morfologia allungata e arcuata, con una lunghezza di 50 km e una larghezza di circa 15 km (fig. 2). La sua superficie è di circa 550 km<sup>2</sup> e comunica con il mare Adriatico attraverso tre bocche tidali.



Figura 2 – Immagini satellitari della laguna di Venezia a scala diversa per l'inquadramento geografico del sito oggetto di studio (Fonte: Sentinel 2-A tiles, 19 luglio 2019)

Presenta una profondità media molto limitata in quanto il 75% della sua estensione ha una profondità massima di 2 metri, mentre solo il 5% dell'area lagunare risulta essere più profonda di 5 m (Umgiesser et al., 2014). In alcuni punti di queste aree più profonde sono localizzate delle buche di raschiamento nelle quali si possono raggiungere profondità tra i venti e addirittura i quaranta metri (Ferrarin et al., 2018). La sua morfologia è costituita da vari elementi del paesaggio come canali navigabili, barene, ghebi, velme, isole, valli da pesca e aree bonificate (Tosi et al., 2009). Queste componenti paesaggistiche hanno caratteristiche diverse in virtù della loro esposizione agli agenti meteorologici e alle forzanti geomorfologiche. Isole, cordoni litorali e costa interna della laguna, per esempio, sono generalmente sopra il livello medio delle alte maree. Elementi come le barene, le velme, i ghebi e i canali secondari, sono morfologie proprie delle aree intertidali e si trovano tra il livello medio delle basse maree e quello delle alte maree.

La laguna di Venezia non è sempre rimasta tale a come la vediamo oggi, ma è cambiata nel corso della storia. Fin dall'epoca romana, la laguna è stata considerata una protezione fisica contro i nemici proprio per le sue caratteristiche ambientali (fondali bassi e difficile navigabilità), e diversi progetti idraulici sono stati realizzati nel corso dei secoli con l'obiettivo di preservarne il corpo idrico principale o renderla adatta agli usi commerciali prima e industriali poi. La laguna di Venezia, infatti, ha subito impatti antropici significativi fin dal XIV secolo (Gatto & Carbognin, 2009). Tra le maggiori modifiche antropiche ricordiamo la deviazione verso il mare dei principali fiumi che vi sfociavano, per evitare l'ingresso di sedimenti in laguna e il conseguente rischio di interrimento. Ciò ha innescato un'inversione nella naturale evoluzione della laguna, con conseguente approfondimento del bacino e salinizzazione della laguna (Tosi et al., 2009). A partire dall'800, poi, si sono verificate le principali trasformazioni indotte dall'uomo. Tra queste possiamo citare le modifiche alle bocche di porto, il dragaggio dei canali a supporto dell'attività portuale, la pesca estensiva dei molluschi come la vongola *Tapes philippinarum*, l'aumento del traffico navale industriale e della navigazione ricreativa, l'aumento degli afflussi turistici, ecc... Tutti questi fenomeni hanno portato ad un aumento dei processi erosivi, che di conseguenza hanno causato modificazioni della morfologia e degli equilibri lagunari (Sarretta et al., 2010). Inoltre, l'attività di emungimento di acqua dolce dalle falde acquifere sotterranee in relazione all'attività del petrolchimico di Porto Marghera, costruito nei primi del '900 sul margine della laguna centrale, ha contribuito ad aumentare la subsidenza del bacino lagunare (Molinaroli et al., 2009).

## **Modellazione in laguna di Venezia**

In laguna di Venezia, è stato utilizzato un primo approccio modellistico basato sul Social-Ecological System (SES) framework. Nello studio pubblicato da Rova et al. nel 2019, si può notare che il primo modello è stato applicato tenendo conto delle differenze tra SE diretti e SE mediati (Rova et al., 2019a). Pur esistendo già modelli basati sulla dinamica dei sistemi (System Dynamics) applicati ad altri contesti, come per esempio i modelli GUMBO (Global Unified Metamodel of the Biosphere) e MIMES (Multiscale Integrated Models of Ecosystem Services) (Boumans et al., 2002, 2015) in questo caso è stato sviluppato un modello basato sulle reti di Petri. Questo tipo di approccio ha permesso di sfruttare un'applicazione esplorativa in laguna di Venezia con una visione integrata per comprendere le interazioni tra i vari SE. Le reti di Petri sono strumenti modellistici grafici e matematici. Possono avere due tipi di nodi: "places" generalmente rappresentati con cerchi (che indicano le condizioni, gli oggetti e le risorse) e "transitions" (rappresentate con quadrati) che rappresentano eventi, azioni e reazioni. In questo modello i places rappresentano i SE, le resource

systems, gli attori e la governance. Le transitions invece rappresentano le interazioni tra gli elementi. Le frecce collegano nodi di tipo diverso, quindi le transitions hanno un certo numero di places (condizioni preliminari) come input e output (condizioni post cioè oggetti prodotti). Nel modello proposto sono usati archi di diverso tipo: le frecce rettilinee indicano che la transition consuma la risorsa di input; le frecce che terminano con un cerchio indicano che la risorsa in input è necessaria ma non viene consumata; Le frecce tratteggiate indicano che gli input non sono necessari per la transition, ma può essere modificato il valore. Le esternalità negative sono indicate con frecce in grassetto. Il peso assegnato quantifica l'importanza dell'effetto. Nelle reti di Petri, viene specificato un numero reale non negativo (mark) per ogni variabile a rappresentazione del suo valore (ad esempio lo stock). La disposizione dei segni sulla rete specifica lo stato del sistema. Sono presenti, inoltre, delle espressioni che indicano la velocità della trasformazione da input a output. In particolare, il modello applicato alla laguna di Venezia ha studiato 13 SE, e le loro interazioni, prodotti dalla laguna. Il modello si è concentrato principalmente nell'ottenimento di una topologia in grado di cogliere i molteplici SE, le loro interazioni e le relazioni causa-effetto con i driver di cambiamento, senza alcuna ambizione di essere calibrati quantitativamente. Nel modello sono state sviluppate delle strutture di raggruppamento di SE simili, e a partire da queste delle ulteriori sotto-strutture più compatte. Inoltre, nel modello sono stati inclusi in modo semplificato anche i processi ecologici e l'intervento umano per includere i trend della componente sociale. Simulando gli effetti dovuti all'innalzamento del livello medio del mare (RSLR) e della temperatura media, oltre che gli effetti delle barriere mobili del MOSE, sono stati creati diversi scenari a partire da condizioni iniziali:

- BAU (Business As Usual): simula le deviazioni dallo stato stazionario della situazione attuale della laguna: aumento di turisti; decremento dei residenti; perdita di barene incontrollata; incremento delle praterie di fanerogame.
- 3 scenari BAU + CC (Business As Usual + Climate Change): oltre allo scenario BAU, include delle pressioni dovute al cambiamento climatico: prevede un aumento del RSLR in tre scenari (+15, +25 e +50 cm alla fine del secolo) combinato ad uno scenario di incremento della temperatura (di +1°C alla fine del secolo).
- Tre scenari BAU + CC + MOSE: nei quali oltre ai precedenti, è stato aggiunto il funzionamento del MOSE in base allo scenario di cambiamento climatico.
- Scenari che includono opzioni di management: include altri scenari di management come la variazione singola o combinata dei campi di sistema di governance. Per i servizi mediati, è stata inserita una variazione del 50%. Per altri (manutenzione degli habitat e dragaggio), è stata scelta una variazione del 1%. (Rova et al., 2019a)

Seppur presentando già dei risultati molto utili ai fini di gestione, nello studio vengono evidenziati diversi limiti. In particolare, viene evidenziata la necessità di utilizzare altri strumenti in grado di simulare in modo dinamico i meccanismi di relazione tra i SE, oltre che nuovi metodi per integrare le interazioni di SE. Viene evidenziato inoltre il limite dei modelli che considerano i SE senza interazioni e singolarmente.

A partire da questo primo modello, si è pensato di sviluppare un modello esplorativo più efficace per applicarlo alla laguna di Venezia, il quale raccoglie in eredità quanto fatto con il modello a reti di Petri, ma implementa la teoria della dinamica dei sistemi (System Dynamics). Questa teoria offre un metodo per lo sviluppo di modelli che aiutano a studiare e comprendere la dinamica dei sistemi complessi, basato sulla teoria dei feedback e sulla modellizzazione basata su equazioni differenziali. Il vantaggio di questo approccio modellistico può essere utilizzato per comunicare risultati essenziali alla comprensione del comportamento del sistema integrando approcci di pensiero sistemico. Il

pensiero sistemico è un metodo che serve per descrivere e comprendere la causalità e le interrelazioni tra le variabili all'interno di un sistema. System Dynamics quantifica l'impatto di tali interazioni. Il pensiero sistemico è un approccio olistico guidato dalla causalità per descrivere le relazioni interattive tra le componenti all'interno di un sistema e le influenze dall'esterno del sistema. L'approccio si concentra sulla costruzione di modelli informatici che rappresentano e simulano problemi complessi in cui il comportamento cambia. Questi modelli portano alla luce relazioni meno visibili, complessità dinamica, ritardi e conseguenze indesiderate delle interazioni. System Dynamics è quindi una branca della teoria dei sistemi che include simulazioni di modelli per comprendere il comportamento dinamico di sistemi complessi mentre cambiano nel tempo. I diagrammi dei circuiti di feedback primari nel sistema sono spesso convertiti in simulazioni al computer per modellare come i cambiamenti in una parte del sistema possono influenzare gli altri e il modello generale di sviluppo (System Dynamics Society).

È così nato EST – Ecosystem Services Screening Tool, un modello deterministico di dinamica dei sistemi, implementato nel software Simile (Simulistics).

Essendo basato su equazioni differenziali e su una struttura a box, EST è grado di rappresentare la dinamica dei servizi ecosistemici multipli, considerando anche l'effetto di diversi scenari "what-if" di tipo gestionale e climatico.

Nel caso di un ecosistema peculiare come la laguna di Venezia, è stato sviluppato un nuovo approccio per la modellazione della dinamica dei SE. Le principali caratteristiche di questo approccio sono:

- a) La rappresentazione dei SE multipli forniti dalla laguna di Venezia, e delle loro interazioni, in un unico modello;
- b) L'adozione di una prospettiva socio-ecologica per identificare gli elementi sociali ed ecologici che intervengono nella generazione dei diversi SE. Questo offre la possibilità di poter effettuare simulazioni dinamiche dei vari SE, in risposta a diversi scenari di cambiamento delle forzanti.

Tuttavia, essendo uno dei primi modelli esplorativi con questa struttura, presenta diverse limitazioni. Tra queste: la semplificazione matematica di alcune equazioni relative alla dinamica delle risorse; la disconnessione tra alcune variabili modellate e i dati disponibili nell'ambito di studi di modellistica ecologica (in particolare modelli di rete trofica); l'assenza di alcuni feedback tra sistema ecologico e sociale, come quelli esistenti tra SE e attori, e l'impossibilità di simulare specifici target gestionali e una gestione adattativa delle risorse. Inoltre, se da un lato le reti di Petri sono risultate ideali per una prima esplorazione della rappresentazione dei SE multipli come una singola "rete" di elementi ed interazioni, dall'altro la struttura bipartita tra "posti" e "transizioni" e la codifica delle equazioni (si vedano Esparza & Nielsen (1994), Girault & Valk, (2003) e Murata (1989) per informazioni sulle caratteristiche delle reti di Petri) rendono particolarmente complessa l'implementazione dei feedback tra le diverse variabili. Per queste ragioni, il modello presentato da (Rova et al., 2019b) è da considerarsi non tanto come uno strumento pronto all'uso per supportare decisioni gestionali concrete ma come un punto di partenza da cui procedere con ulteriori sviluppi.

In particolare, rispetto al modello preesistente, il modello EST qui descritto vuole focalizzarsi sui seguenti punti:

- a) Rappresentazione della dinamica delle risorse ecologiche e degli impatti che le attività antropiche possono provocare sulle risorse;

- b) Possibilità di utilizzare come elementi di input alcuni output del modello di rete trofica (sviluppato nell'ambito della Linea 4.1 del progetto Venezia 2021), come la rappresentazione della dinamica degli habitat vegetati e delle principali specie target delle attività di pesca;
- c) Rappresentazione dei feedback tra utilizzo dei SE e reazioni degli attori coinvolti;
- d) Possibilità di simulare una gestione adattativa delle attività, in relazione a diverse strategie gestionali.

## Descrizione del modello EST

### Razionale

Questo modello è finalizzato ad esplorare la dinamica potenziale dei SE forniti dalla laguna di Venezia in risposta a diversi scenari "what-if", sia di tipo gestionale che climatico. L'approccio è stato quello di adottare una visione sistemica, che considera contestualmente i SE forniti dall'ecosistema lagunare e le principali interazioni tra gli stessi, includendo dunque SE di regolazione, di approvvigionamento e culturali (suddivisione dei SE secondo il framework CICES (CICES))

La visione sistemica è basata sulla "Social-ecological systems framework" (McGinnis & Ostrom, 2014a; Ostrom, 2009a), mantenendo un approccio analogo a quello adottato nel precedente modello (Rova et al., 2019b). La "Social-ecological systems framework", ha come scopo l'analisi della sostenibilità dei socio-ecosistemi, ed è costituita da quattro sottosistemi di primo livello: i sistemi di risorse, le unità di risorse, gli attori e la governance (McGinnis & Ostrom, 2014a; Ostrom, 2009a). Sulla base di questa struttura concettuale, i SE forniti dal sistema lagunare possono essere rappresentati considerando le seguenti classi di variabili (fig. 3):

- Due "sistemi di risorse", ovvero elementi del paesaggio lagunare e fauna, a loro volta suddivisi in una serie di variabili di stato ("unità di risorse") come rappresentato in figura 3. Gli elementi del paesaggio lagunare racchiudono sia habitat caratterizzati da specie vegetali "strutturanti" (praterie di fanerogame e fondali colonizzati da diatomee bentoniche), sia elementi morfologici lagunari (barene, habitat subtidali associati alle barene, canali), sia elementi che derivano da interazioni del passato tra uomo e ambiente (come il patrimonio culturale tangibile e quello intangibile). Le variabili di stato che caratterizzano la fauna si focalizzano invece sui principali gruppi o specie oggetto di prelievo da parte di diversi tipi di pesca (professionale e ricreativa) e di caccia.
- Attori, la cui classe comprende una serie di variabili di stato che rappresentano i gruppi di attori che intervengono nella generazione dei SE mediati.

Il flusso di SE emerge dalle interazioni che avvengono tra queste variabili (fig. 3). Il modello comprende i SE di regolazione, di approvvigionamento, e culturali. I SE di regolazione sono SE "diretti" (Rova & Pranovi, 2017) cioè che emergono dai processi ecologici relativi ai sistemi di risorse, senza un intervento diretto degli attori. Sono dunque rappresentati in funzione dei soli elementi del paesaggio, in particolare quelli relativi ai diversi habitat ed elementi morfologici. I SE di approvvigionamento e culturali sono invece SE "mediati" (Rova & Pranovi, 2017), ovvero SE il cui flusso dipende dalle attività svolte dagli attori. Nel caso dei SE di approvvigionamento sono state modellate le attività di prelievo della fauna (pesca artigianale e ricreativa, raccolta della vongola e caccia), mentre nel caso dei SE culturali è stato il flusso di informazioni derivante dallo svolgimento delle attività ricreative (visita alle aree lagunari e diportismo), educative (educazione ambientale) e tradizionali (voga alla veneta) che si svolgono nell'ambiente lagunare.

- Il sistema Governance, infine, racchiude una serie di processi che rappresentano i diversi ambiti su cui agisce (o può potenzialmente agire) la governance del sistema lagunare, dalla regolamentazione delle attività antropiche coinvolte nella generazione dei SE al ripristino degli habitat, fino alla gestione del sistema MOSE. Questa influisce sulla dinamica delle variabili di stato sopra descritte.

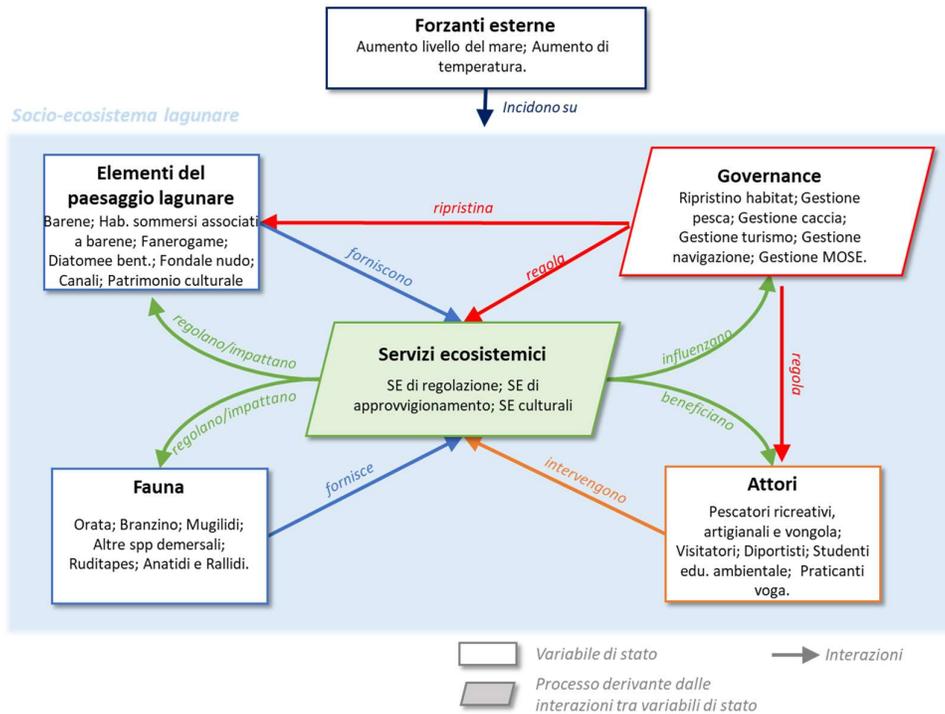


Figura 3 - Variabili di stato incluse nel modello e principali tipologie di interazioni, rappresentate secondo il "Social-ecological systems framework" (McGinnis & Ostrom, 2014a; Ostrom, 2009a).

Una delle caratteristiche chiave del modello, grazie alla rappresentazione di SE multipli, è quella di andarne ad esplorare la dinamica che risulta dalle interazioni che avvengono tra le variabili del socio-ecosistema lagunare. Il modello propone quindi una rappresentazione semplificata dei principali feedback positivi e negativi, riconducibili ai diversi SE:

- SE di regolazione e mantenimento delle risorse (mantenimento dei canali e dei bassifondi vegetati grazie al SE di prevenzione dell'erosione, e la regolazione delle popolazioni di fauna ittica da parte del SE di mantenimento dei cicli vitali);
- Impatti dei SE mediati sulle risorse. Tra questi, distinguiamo:
  - a) l'impatto del prelievo sulle popolazioni target, che si realizza come interazione tra SE nel momento in cui queste risorse sono condivise tra più SE, come nel caso della pesca artigianale e ricreativa;
  - b) le esternalità legate alla fruizione di alcuni SE mediati, come la pesca della vongola, i cui attrezzi meccanici utilizzati per il prelievo danneggiano gli habitat bentonici e risospingono i sedimenti contribuendo all'interramento dei canali, e le attività turistiche e diportistiche, le cui attività di navigazione contribuiscono a fenomeni erosivi che impattano le barene e i canali lagunari.

- il beneficio che gli attori derivano dalla fruizione dei SE, che va ad influenzare la dinamica degli attori stessi.
- l'influenza dei SE sul sistema di governance, che dipende in molti casi dell'effettiva fruizione dei SE.

Infine, il modello vuole cercare di esplorare l'evoluzione dei SE in relazione alle principali forzanti esterne che agiscono sul sistema lagunare. In particolare, vengono considerate due funzioni legate agli effetti del cambiamento climatico, ovvero, l'aumento di temperatura e l'innalzamento relativo del livello del mare (RSLR, Relative Sea Level Rise), che agiscono sulle variabili di stato considerate nel modello.

## **Modello concettuale e descrizione matematica**

L'approccio che caratterizza la costruzione di questo modello abbraccia l'approccio "systems thinking", che vede il 'mondo da analizzare' come un sistema complesso, in cui ogni cosa è connessa con tutte le altre (Sterman, 2000). Per descrivere concettualmente il modello, si è scelto l'utilizzo del "Causal Loop Diagram", uno strumento concettuale ampiamente utilizzato per rappresentare i feedback che caratterizzano un sistema complesso sotto esame (Sterman, 2000). La notazione grafica dei "causal loop diagrams" consiste in variabili connesse tra loro da frecce (link causali), che evidenziano le influenze tra variabili stesse. Ogni freccia ha una polarità, positiva o negativa:

- un collegamento positivo significa che, a parità di altre condizioni, ad una variazione della variabile indipendente è atteso un effetto dello stesso segno nella variabile dipendente (aumento/aumento o riduzione/riduzione);
- un collegamento negativo significa che, a parità di altre condizioni, ad una variazione della variabile indipendente è atteso un effetto di segno opposto nella variabile dipendente (aumento/riduzione o riduzione/aumento).

Le principali retroazioni possono essere sottolineate con una notazione che esprima se si tratta di retroazioni positive (auto-rinforzante, che amplifica il cambiamento) o negative (bilanciante, che si oppone al cambiamento).

Il "causal loop diagram" relativo a questo modello è mostrato in figura 4. Nonostante non sia di immediata lettura, questo diagramma fornisce una rappresentazione semplificata del modello vero e proprio, poiché le variabili con caratteristiche affini sono qui rappresentate in forma aggregata. In particolare, il diagramma rappresenta i seguenti elementi:

- Variabili di stato (grassetto nero), distinguendo tra:
  - elementi del paesaggio - habitat non vegetati, che comprendono canali navigabili, bassifondi colonizzabili da vegetazione, barene e relativi ghebi;
  - elementi del paesaggio - habitat vegetati, che comprendono praterie di fanerogame e diatomee bentoniche;
  - elementi del paesaggio - patrimonio culturale;
  - fauna, che comprende le specie ed i gruppi target della caccia e della pesca, tra cui orata, branzino, mugilidi, demersali, vongola filippina, anatidi e rallidi (target caccia);
  - attori, sono fruitori dei servizi, che comprendono pescatori artigianali, pescatori ricreativi, pescatori di vongole professionali, cacciatori, visitatori, diportisti, studenti che praticano educazione ambientale, praticanti di voga alla veneta.
- SE (colore rosso), distinguendo tra:
  - SE di regolazione, che comprendono tutti i SE di regolazione elencati in tabella 1;

- SE culturali ricreativi, che comprendono turismo e navigazione ricreativa (diporto);
- SE culturali educativi e tradizionali, che comprendono informazioni per lo sviluppo cognitivo e tradizioni;
- SE di approvvigionamento, che comprendono tutti i SE di approvvigionamento elencati in tabella 1.
- Interventi gestionali (colore verde), distinguendo tra:
  - gestione delle attività relative ai SE di approvvigionamento;
  - gestione delle attività ricreative;
  - gestione del sistema MOSE;
  - ripristino degli habitat;
  - dragaggio dei canali.
- Forzanti esterne (colore blu), distinguendo tra:
  - RSLR (Relative Sea Level Rise);
  - Aumento di temperatura (delta\_T).

Alcuni processi chiave nel modello sono inoltre rappresentati in colore nero.

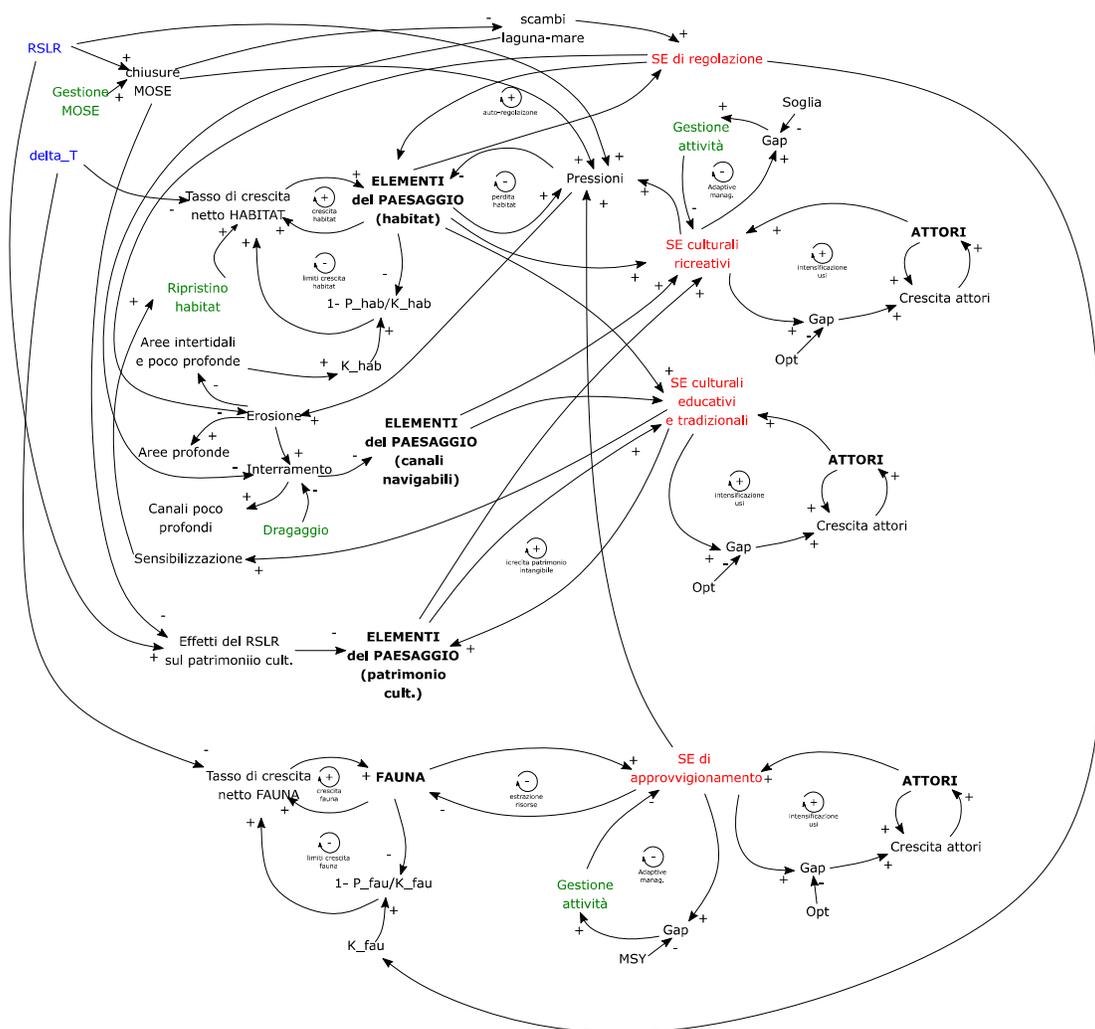


Figura 4 – Casual loop diagram

La dinamica delle variabili di stato è determinata da diversi tipi di processi:

- Gli habitat vegetati sommersi presentano un tasso di crescita dipendente dall'aumento di temperatura ( $\Delta T$ ). La crescita è limitata dalla disponibilità di spazio potenzialmente colonizzabile,  $f(\text{space})$ , a sua volta dipendente dall'estensione delle aree intertidali e poco profonde. La perdita di habitat è legata agli effetti negativi indotti dalla fruizione di SE culturali, ricreativi e di approvvigionamento.
- Gli habitat che non vedono la presenza di specie strutturanti, quali le barene, prevedono una dinamica dipendente dai processi di accumulo di sedimento e sensibile agli effetti dell'aumento del livello medio mare. La superficie occupata dai ghebi è ritenuta proporzionale alla superficie dell'intera struttura barenicola, secondo un fattore che tiene in considerazione le diverse forme di barene esistenti in laguna.
- I canali navigabili presentano una dinamica dipendente da processi di interrimento, a loro volta dipendenti dall'evoluzione morfologica lagunare.
- La fauna è caratterizzata da una funzione di crescita di tipo logistico, con un tasso di crescita dipendente dall'aumento di temperatura ( $\Delta T$ ). In questo caso, la crescita è limitata dalla capacità portante dell'ecosistema per ciascuna specie o gruppo di specie, a sua volta modulato dal SE di mantenimento dei cicli vitali. La fauna è soggetta al prelievo esercitato dai diversi SE di approvvigionamento.
- Il patrimonio culturale non ha una funzione di crescita poiché rappresenta un'eredità del passato. Tuttavia, è sensibile agli effetti del RSLR. Questi effetti non sono continui, ma prevedono un aumento entro certi valori di innalzamento, ed una successiva diminuzione, mediata dall'azione regolativa del sistema Mose.
- Gli attori relativi a ciascun SE di tipo "mediato" sono caratterizzati da una crescita dipendente dal flusso del rispettivo SE. In particolare, la crescita viene regolata sulla base di quanto la fruizione del SE si avvicina ad un livello ottimale desiderato dagli attori stessi: se la fruizione eccede il valore ottimale si considera un "sovraccarico" nella fruizione del servizio, con conseguente diminuzione degli attori (il tasso di crescita diventa negativo).

La dinamica dei SE è descritta in questo modo:

- I SE di regolazione dipendono dagli elementi del paesaggio lagunare, genericamente denominati habitat e, nel caso del SE di mantenimento dei cicli vitali, dagli scambi laguna-mare. Alcuni di questi servizi a loro volta contribuiscono all'auto-regolazione dei processi erosivi (SE di prevenzione dell'erosione), degli elementi del paesaggio o della fauna (SE di mantenimento dei cicli vitali).
- I SE culturali e ricreativi provengono dagli elementi del paesaggio lagunare (habitat, patrimonio culturale e canali, che rappresentano, rispettivamente, l'attrattività naturale, quella culturale e l'accessibilità), nonché dagli attori che svolgono le attività attraverso cui avviene il flusso di questi SE. L'utilizzo di alcuni di questi SE (visite turistiche, navigazione diportistica) genera delle pressioni, che contribuiscono all'aumento dei processi di erosione dei bassofondi, di interrimento dei canali e di danneggiamento dell'habitat a barene e vegetati, rispettivamente mediante l'erosione dei margini e l'aumento della torbidità. Questi SE sono regolati mediante una gestione adattativa, che dipende da quanto la fruizione si avvicina ad un valore soglia di utilizzo massimo (parametro modulabile in base allo scenario gestionale che si vuole esplorare).

- I SE culturali educativi e tradizionali, analogamente a quelli culturali ricreativi, dipendono dagli elementi del paesaggio lagunare e dagli attori che fruiscono dei rispettivi SE (studenti di ogni ordine e grado che praticano attività di educazione ambientale, e praticanti di voga alla veneta). Diversamente dalla precedente categoria di SE culturali, però, questi servizi generano attività principalmente sostenibili. Si è quindi assunto che questi SE non generino pressioni sul sistema lagunare e non necessitino di gestione. Al contrario, come precedentemente menzionato in relazione al patrimonio culturale, questi SE sono essenziali per tramandare tradizioni e conoscenze lagunari, e dunque vanno a contribuire all'aumento del patrimonio culturale intangibile. Inoltre, la maggiore consapevolezza dell'ambiente lagunare da parte di chi pratica queste attività risulta in quello che è stato modellato come "sensibilizzazione", ovvero una pressione da parte dei cittadini a favore di attività di ripristino ambientale.
- I SE di approvvigionamento, il cui flusso corrisponde al prelievo di risorse, dipendono dallo stato degli stock di fauna oggetto di prelievo, oltre che dal numero di attori che praticano le rispettive attività. Il numero di attori viene qui considerato come un proxy dello sforzo di pesca o di prelievo venatorio. Tutti questi SE comportano come pressione principale l'estrazione di risorse faunistiche, mentre per la raccolta della vongola sono state modellate anche una serie di esternalità a carico degli habitat e della morfologia lagunare, dovute alle tecniche di pesca particolarmente impattanti impiegate per questo SE (Pranovi et al., 2004). Per tutti questi SE viene simulato un meccanismo di gestione adattativa, nella quale il prelievo viene limitato in relazione alla dimensione della popolazione, con un valore soglia definito in corrispondenza del massimo prelievo sostenibile.

Le due forzanti esterne agiscono come segue:

- L'aumento di temperatura agisce modulando i processi di espansione degli habitat (attraverso effetti sulla crescita delle specie strutturanti) e i processi di crescita della fauna;
- Il RSLR provoca una pressione sugli elementi del patrimonio culturale, comportando un danneggiamento strutturale legato all'aumento di frequenza ed intensità dei fenomeni di "acqua alta". Tale effetto è modulato dalla frequenza delle chiusure del sistema MOSE. Nell'ambito del modello, le chiusure del MOSE agiscono nel modo seguente: limitando gli effetti negativi del RSLR sul patrimonio culturale; generando delle pressioni sul servizio di regolazione e mantenimento dei cicli vitali, che risente dei ridotti scambi tra mare e laguna e del ridotto idrodinamismo.

Il modello integra una rappresentazione estremamente semplificata dei principali processi morfologici in atto nell'ecosistema lagunare, che può essere riassunta come segue. La superficie lagunare complessiva viene suddivisa tra terre emerse, canali e altre zone sommerse/intertidali, a loro volta suddivisi secondo criteri batimetrici. Per i canali viene distinta la porzione navigabile (corrispondente ai canali navigabili compresi tra gli elementi del paesaggio, che contribuisce ai SE culturali come elemento di accessibilità) da quella poco profonda (che invece viene considerata non navigabile). Per le zone sommerse/intertidali si vanno a distinguere da un lato le aree intertidali e poco profonde, che costituiscono, complessivamente, la superficie nella quale possono svilupparsi gli habitat vegetati inclusi tra gli elementi del paesaggio, e dall'altro quelle profonde, che per l'eccessivo approfondimento non risultano più colonizzabili dai suddetti habitat. Nel modello vengono simulati dei processi di approfondimento che comportano la transizione della superficie lagunare da intertidale/poco profonda a profonda, e contestualmente innescano processi di interrimento dei canali (che comportano il passaggio dei canali da navigabili a poco profondi). I

processi di approfondimento hanno un tasso di base dipendente dagli input di sedimenti dal bacino scolante, qui non modellati esplicitamente. L'approfondimento viene ampliato dalle pressioni generate dai SE culturali ricreativi attraverso le attività di navigazione, nonché dalle attività di pesca della vongola, mentre viene mitigato dai SE di prevenzione dell'erosione. L'interramento dei canali è dipendente dai processi erosivi attivi nei bassifondi, amplificato dai SE culturali ricreativi attraverso le attività di navigazione, mentre può essere mitigato da eventuali interventi di dragaggio.

Nella sua rappresentazione attuale il sistema studiato viene descritto mediante un insieme di equazioni differenziali ordinarie, riportate in appendice, che permettono di considerarne la dinamica temporale. Gli elementi che descrivono lo stato del sistema fanno riferimento all'unità spaziale in cui viene applicato il modello, ossia l'intera laguna oggetto di studio.

Si è scelto di effettuare la modellizzazione con un approccio di dinamica dei sistemi (System Dynamics, da qui in poi SD). Questo approccio risponde alle necessità di applicare il pensiero sistemico al socio-ecosistema della laguna di Venezia. Inoltre, l'applicazione del SD è stata esplorata con successo in ecologia per esplorare le interazioni uomo-natura (Elsawah et al., 2017). Il vantaggio di questo approccio, rispetto ad altri modelli più riduzionistici, è che esso può rappresentare dei validi strumenti predittivi per simulare i processi biofisici all'interno di un sistema ambientale e dedurre la possibile evoluzione, sulla base dell'applicazione di forzanti naturali o artificiali.

## **Implementazione del modello in SIMILE**

Nella modellizzazione di sistemi complessi come quello della laguna di Venezia, si possono seguire diversi approcci (Duggan, 2016; Elsawah et al., 2017; Martin & Schlüter, 2015). La scelta può ricadere su un tipo di approccio modellistico in particolare e questo può dipendere sia dalla quantità di informazioni del sistema possedute, sia dagli obiettivi della simulazione. Uno degli approcci più comuni nell'analisi dei sistemi socio-ecologici complessi è quello della teoria dei Sistemi Dinamici (Chen et al., 2011). In questi modelli (chiamati modelli SD), il sistema oggetto di studio può essere descritto nella sua interezza. Gli elementi del sistema possono essere rappresentati sotto forma di stock e legati tra loro da interazioni raffigurate come collegamenti. Ad ogni link viene associata un'equazione differenziale che lo descrive e permette di rappresentare la natura dell'interazione tra gli elementi collegati. In questo modo è possibile analizzare l'evoluzione nel tempo degli stock in maniera quantitativa. Ogni elemento del sistema non ha una quantità massima di link che possono entrare o uscire, pertanto, un modello SD permette di simulare le dinamiche di un numero anche molto elevato di interazioni. Nel caso di sistemi o di analisi particolarmente complessi, gli elementi del modello possono essere aggregati in sotto-moduli (sub-modules), sulla base di dinamiche tipiche o della natura degli elementi in comune.

Il modello EST utilizza la rappresentazione del socio-ecosistema lagunare presentata in Rova et al. (2019). Nonostante EST rappresenti in modo semplificato le interazioni che hanno luogo nell'ecosistema lagunare, esso permette di ricostruire il comportamento del socio-ecosistema, e di effettuare delle simulazioni sui possibili effetti delle forzanti climatiche e delle strategie di governance, evidenziando possibili evoluzioni del sistema a lungo termine. Questo diventa possibile perché grazie alle potenzialità della teoria dei sistemi dinamici, si possono considerare anche le relazioni caratterizzate da retroazioni e non-linearità in maniera integrata (van den Belt, 2004). Pertanto, può essere descritto il comportamento del sistema e può essere seguita l'evoluzione complessiva.

Il modello è stato implementato a livello informatico utilizzando il software Simile v. 6.11 (Simulistics Ltd.), un software progettato per la modellazione visuale dei sistemi dinamici complessi nelle scienze biologiche, ambientali e sociali (Muetzelfeldt & Massheder, 2003).

L'implementazione del modello EST nel software Simile si è focalizzata in primo luogo sulla creazione di un diagramma modulare, che presenta le caratteristiche principali del modello (fig. 5). Secondariamente si è proceduto a completare gli elementi del diagramma con l'inserimento delle equazioni differenziali e delle informazioni quantitative.

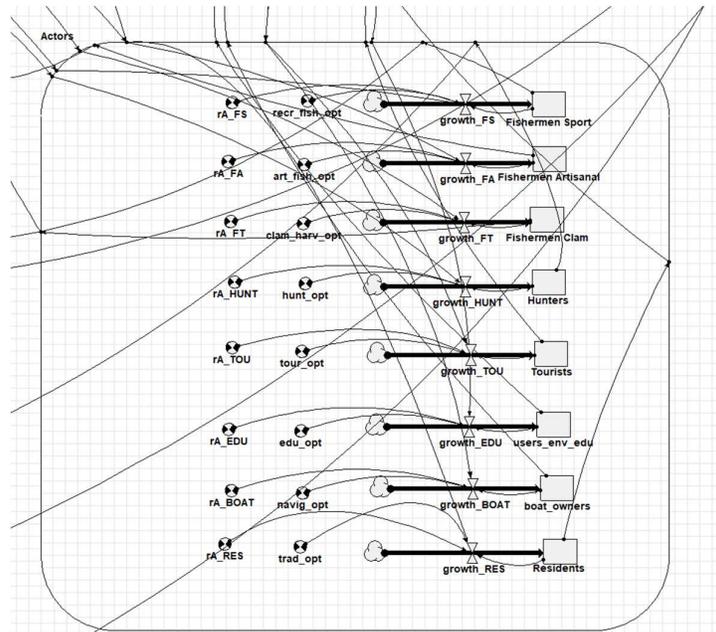


Figura 5 - Un esempio di rappresentazione grafica di stock e flow nel modello EST, come appare nella GUI di Simile (v. 6.11).

Ad ogni freccia che collega comparti o elementi diversi, è possibile inserire un'equazione differenziale (scritta nel linguaggio proprietario di Simile), che viene convertita in codice C++ dal programma stesso, ed eseguibile tramite la funzione "Run" del software (fig. 6). Il risultato della simulazione viene poi raffigurato attraverso grafici, nei quali possono essere rappresentate le evoluzioni dei valori assunti dalle variabili di stato e dagli altri parametri in funzione del tempo. E' possibile in questa schermata impostare i timestep di interesse e selezionare le variabili che si vogliono rappresentare nel grafico risultante.

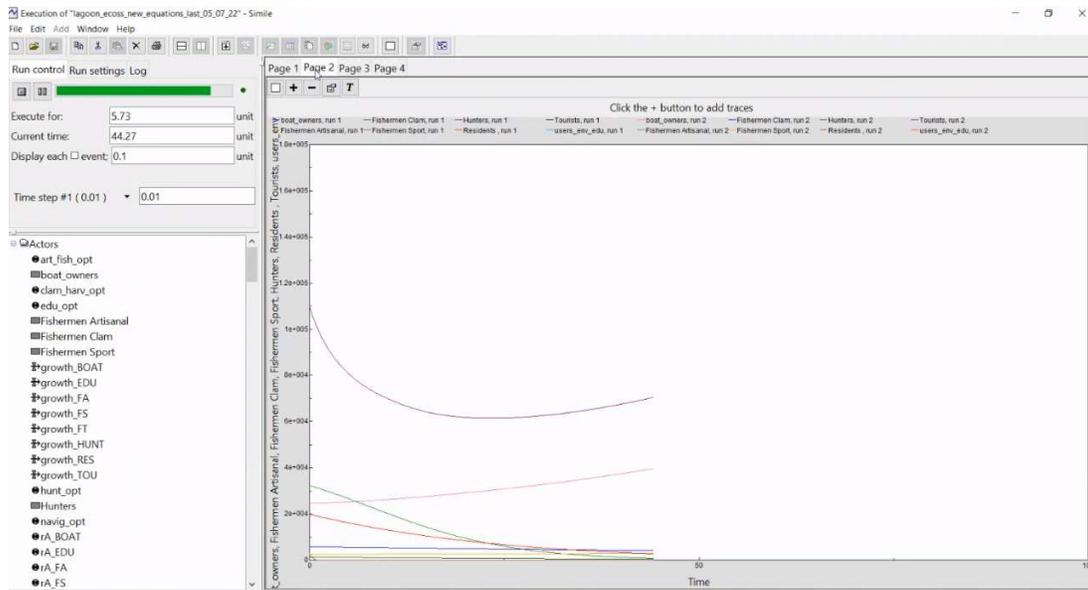


Figura 6 - Il livello dell'interfaccia grafica di Simile dedicato all'avvio delle simulazioni, durante la generazione dei risultati.

La figura 7 mostra l'intero modello nel *canvas* di Simile evidenziando i molteplici collegamenti tra gli elementi e i sotto-moduli del socio-ecosistema oggetto di studio. I sotto-moduli (sub-modules) vengono rappresentati dai riquadri di delimitazione (box).

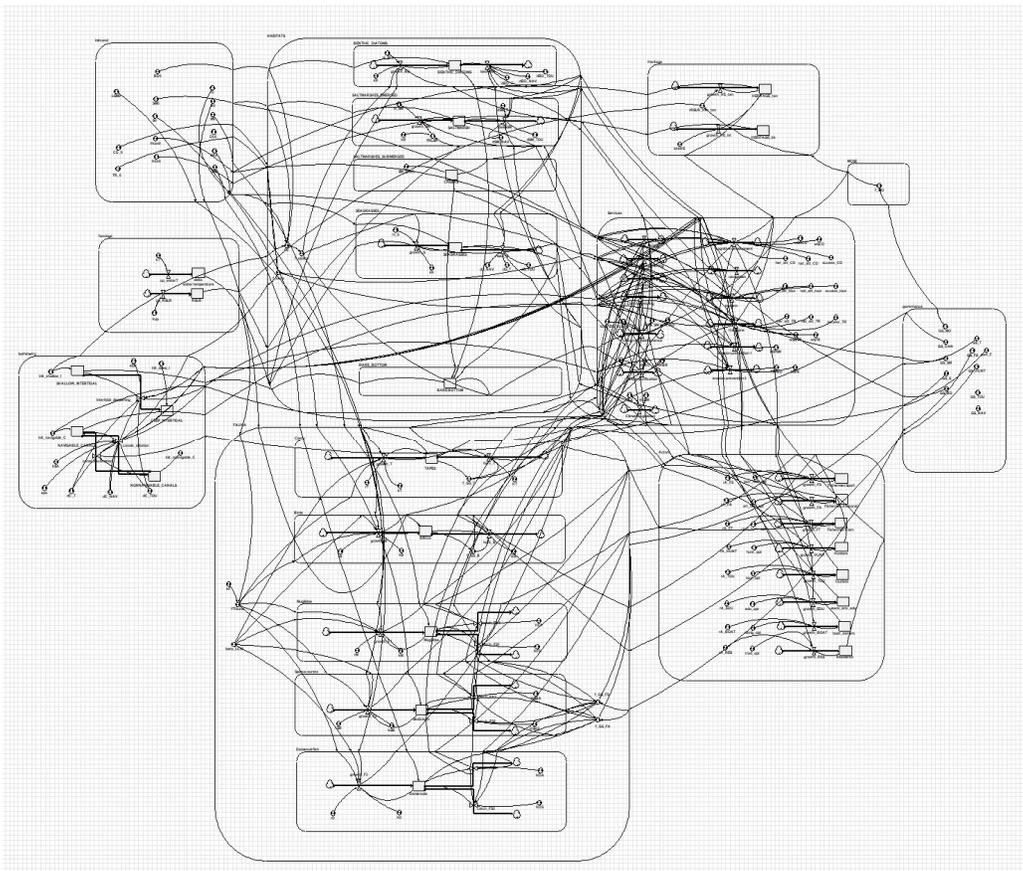


Figura 7 - Il modello EST visualizzato nella GUI di Simile.

Il modello EST presenta una suddivisione del socio-ecosistema lagunare in diversi sotto-sistemi che interagiscono tra loro. In particolare, i sotto-moduli nei quali è stato suddiviso l'ambiente lagunare sono:

- Un sistema di risorse rappresentato dagli elementi del paesaggio, che comprende vari sotto-sistemi: habitat, fauna, batimetria e patrimonio culturale.
- Gli attori, che vengono considerati variabili di stato, suddivisi a loro volta in raggruppamenti omogenei di attori che utilizzano i SE sia in modo diretto che indiretto.
- La governance, formata dalle componenti che gestiscono e governano sia il numero di attori che utilizzano una determinata risorsa (e determinano il flusso del relativo servizio), che le strategie di adattamento e mitigazione alle pressioni tramite l'utilizzo del sistema MOSE, del dragaggio dei canali e degli interventi di ripristino degli habitat.
- I servizi, che derivano dalle interazioni fra le risorse, gli elementi del paesaggio e gli attori.

Servizi ecosistemici		Descrizione
<b>Regolazione e mantenimento</b>	Regolazione del clima	Sequestro di carbonio dall'atmosfera
	Purificazione delle acque	Capacità di assorbire/riciclare eccessivi carichi di nutrienti, evitando fenomeni di eutrofizzazione e le loro conseguenze
	Prevenzione dell'erosione	Capacità di mitigare l'erosione dei sedimenti, contribuendo al mantenimento della morfologia lagunare
	Mantenimento dei cicli vitali	Funzione di nursery per specie ittiche migratorie
<b>Approvvigionamento</b>	Pesca artigianale	Catture di specie ittiche da attività di pesca artigianale
	Raccolta della vongola	Catture di vongola filippina ( <i>Ruditapes philippinarum</i> ) mediante raccolta meccanica professionale
	Pesca ricreativa	Catture di specie ittiche da attività di pesca ricreativa
	Caccia	Catture di avifauna da attività venatorie
<b>Culturali</b>	Turismo	Visite turistiche alla laguna e alle sue isole (centro storico escluso)
	Navigazione ricreativa	Navigazione ricreativa mediante imbarcazioni private da diporto
	Informazioni per lo sviluppo cognitivo	Attività di educazione ambientale svolte in laguna
	Tradizioni	Attività tradizionali legate all'ecosistema lagunare (voga alla veneta)

Tabella 1 - Servizi ecosistemici inclusi nel modello EST

Come anticipato, nel linguaggio del software Simile, i sotto-sistemi che costituiscono il sistema completo vengono definiti *sub-modules*. Questi sub-modules sono il corrispettivo dei sotto-sistemi del modello concettuale e sono rappresentati come box che racchiudono le variabili di stato, che si collegano agli elementi di altri *sub-modules* tramite i link.

Segue ora una presentazione dei sub-modules come rappresentati in SIMILE.

### Sub-module “initial conditions”

Questo *sub-module* (fig. 8) contiene le condizioni iniziali che permettono l'avvio del modello, ossia le variabili di stato che determinano gli input iniziali degli altri sotto-moduli, tramite collegamenti uscenti rappresentati da frecce.

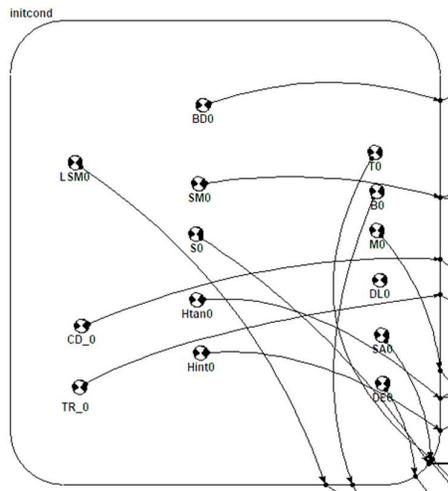


Figura 8 - Diagramma del sub-module "Initial conditions"

### Sub-module "forcings"

Il sub-module "forcings" (fig. 9) contiene i parametri e le informazioni che descrivono le forzanti considerate dal modello.

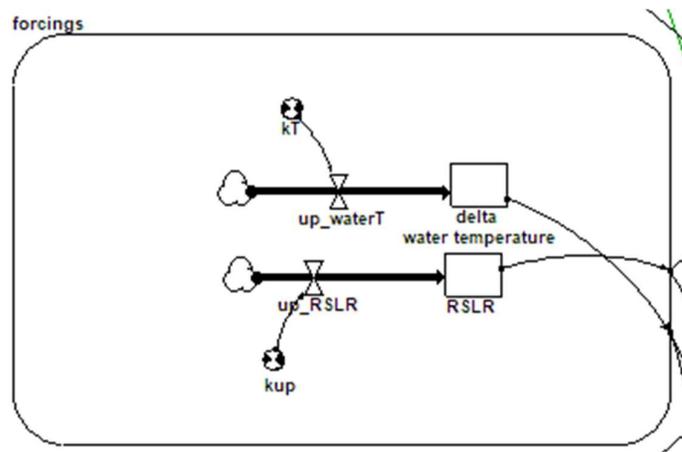


Figura 9 - Diagramma del sub-module "forcings"

Le forzanti considerate sono l'aumento della temperatura dell'acqua e l'aumento del RSLR causati dal cambiamento climatico. In questo modello, l'aumento di temperatura agisce in modo diretto sulle dinamiche di espansione degli habitat vegetati e sulla crescita di popolazione della fauna. La forzante RSLR agisce invece direttamente sugli habitat a barana e sul patrimonio culturale, rappresentando per questi una pressione. Queste forzanti intervengono anche indirettamente, insieme ad altre variabili, nel SE di mantenimento dei cicli vitali, nei SE caccia e pesca e nella frequenza di innalzamento delle barriere del MOSE.

### Sub-module “bathymetry”

Questo sotto-modulo, rappresentato in figura 10, contiene le informazioni batimetriche dei fondali, suddividendoli in funzione della profondità in canali navigabili, canali non navigabili, fondali intertidali profondi (“deep intertidal”) e fondali poco profondi (“shallow intertidal”).

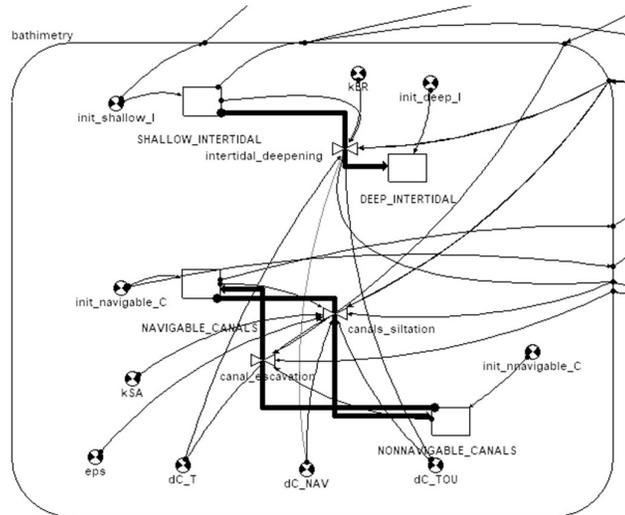


Figura 10 Diagramma del sub-modulo “bathymetry”

Le dinamiche di questo sotto-modulo integrano informazioni e descrizioni matematiche sia dei processi erosivi, che delle perdite sedimentarie. Inoltre, vengono descritti anche i processi di modifica dei canali navigabili a causa della sedimentazione e del dragaggio pianificato che avvengono simultaneamente.

### Sub-module “habitats”

Il sub-modulo relativo agli habitat (fig. 11) riceve come dati in ingresso le variabili di stato di altri sotto-moduli, ossia quello con le condizioni iniziali e quello con i dati della batimetria. I valori in uscita, a loro volta, vanno ad influenzare direttamente la fauna, il patrimonio culturale ed i servizi ecosistemici.

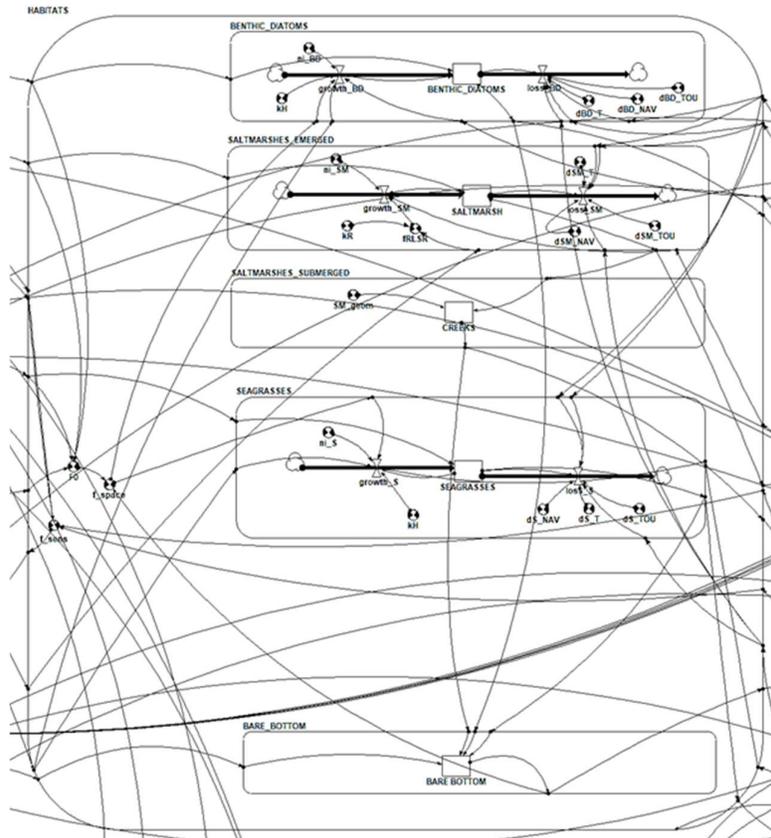


Figura 11 Diagramma del sub-module "habitats"

Gli habitat sono rappresentati da altri sotto-compartmenti che ne agevolano la visualizzazione delle interazioni:

- "Saltmarshes emerged": habitat di barena emersa;
- "Saltmarshes submerged": habitat di velma;
- "Bare bottom": habitat sommerso rappresentato da fondale non vegetato;
- "Seagrasses": habitat sommerso popolato da fanerogame marine, intese come specie strutturanti;
- "Benthic diatoms": habitat sommerso colonizzato da diatomee bentoniche, anch'esse strutturanti;

Tutti gli habitat interagiscono tra di loro, e lo spazio potenzialmente occupabile influenza la loro estensione. Inoltre, nel caso degli habitat popolati da vegetazione, la crescita in termini di superficie occupata dipende anche dall'aumento di temperatura dell'acqua. Per gli habitat non vegetati invece, la dinamica dipende dai processi di sedimentazione e dall'aumento del livello medio mare (RSLR). La superficie occupata dai canali che attraversano le barene (ghebi) è inoltre regolata da un "fattore di forma" della barena, ossia un valore che descrive e varie tipologie di barena presenti in laguna sulla base di quanto esse siano frastagliate e percorse da ghebi. Le dinamiche e gli output di questi sotto-moduli poi, vanno ad influenzare a loro volta i sotto-moduli degli elementi morfologici oltre che le relazioni tra i comparti di fauna, servizi ecosistemici e patrimonio culturale.

## Sub-module “fauna”

Questo sotto-modulo, rappresentato in figura 12, comprende vari elementi strutturali e le dinamiche di popolazione di vari gruppi di fauna, tra cui *Tapes philippinarum*, uccelli acquatici oggetti di caccia, e della fauna ittica oggetto di pesca da parte degli attori coinvolti nella fruizione dei relativi SE. Questo sotto-modulo riceve in ingresso i valori definiti nelle condizioni iniziali, e le dinamiche che caratterizzano questo sub-modulo sono influenzate a loro volta dalle forzanti e dagli habitat. Gli output vanno ad influenzare direttamente i valori dei sotto-moduli relativi ai SE e agli attori, che a loro volta agiscono sui sotto-compartmenti di fauna.

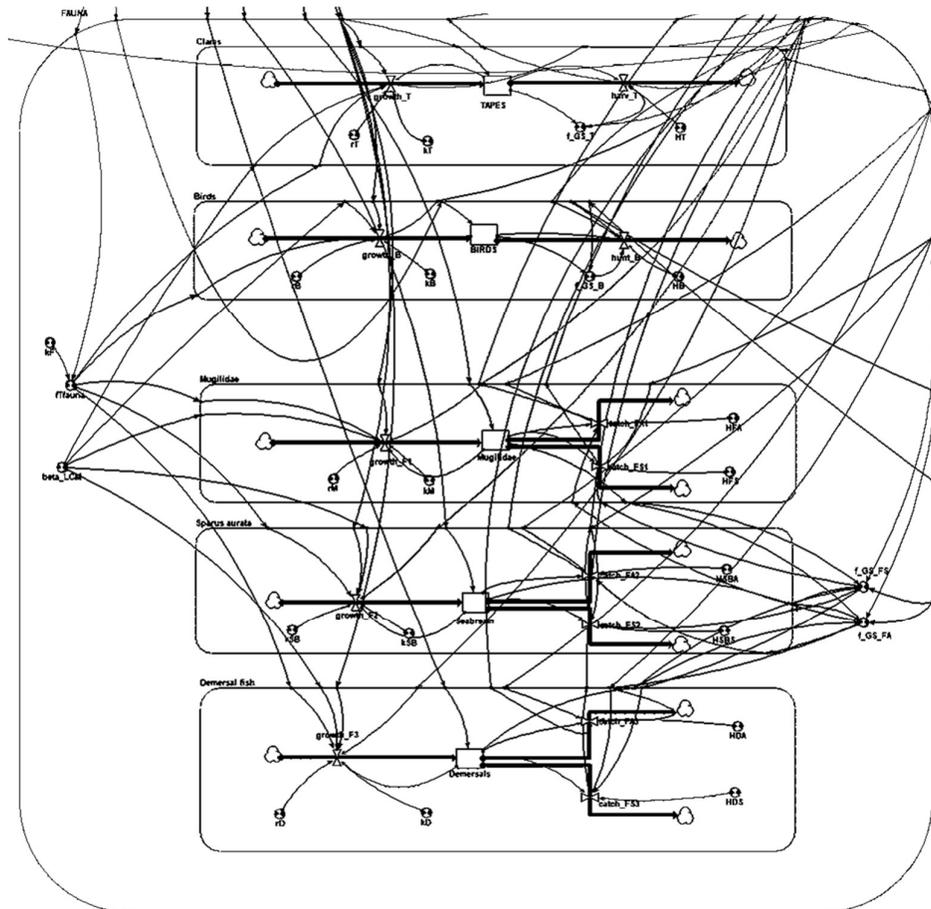


Figura 12 Diagramma del sub-modulo “fauna”

Le dinamiche che regolano i sotto-compartmenti dipendono da parametri di popolazione intrinseci alla specie (o al gruppo di specie), ma anche dalla capacità portante dell’ecosistema e dall’intensità di prelievo, a sua volta funzione del numero di attori e delle caratteristiche dell’attività di pesca o di caccia.

## Sub-module “Heritage”

Il sub-modulo Heritage (rappresentato in fig. 13) include sia quello che viene definito patrimonio culturale tangibile, che quello intangibile. Questi elementi ricevono come input i valori delle condizioni iniziali e dipendono dall’innalzamento del livello medio del mare (RSLR).

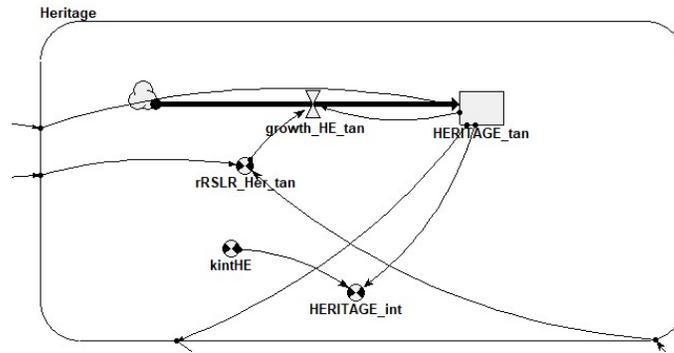


Figura 13 Diagramma del sub-module "Heritage"

Il sub-module "Heritage" è stato rappresentato considerando un'ipotetica funzione di crescita, in cui diventano essenziali gli effetti del RSLR. Questa relazione tiene conto però degli effetti del sistema MOSE nella modulazione degli impatti.

### Sub-module "Actors"

Questo sotto-modulo (fig. 14) viene suddiviso nei diversi gruppi di attori che fruiscono dei SE e utilizzano l'ecosistema lagunare. In particolare, essi sono:

- Cacciatori;
- Pescatori professionali di vongole;
- Pescatori artigianali;
- Pescatori ricreativi;
- Turisti;
- Studenti (che utilizzano il SE "informazioni per lo sviluppo cognitivo");
- Diportisti;
- Praticanti dell'attività tradizionale di voga alla veneta.

Essi ricevono le condizioni iniziali come input e le loro azioni sono connesse con i moduli relativi ai SE, alla fauna, agli habitat e alla governance.

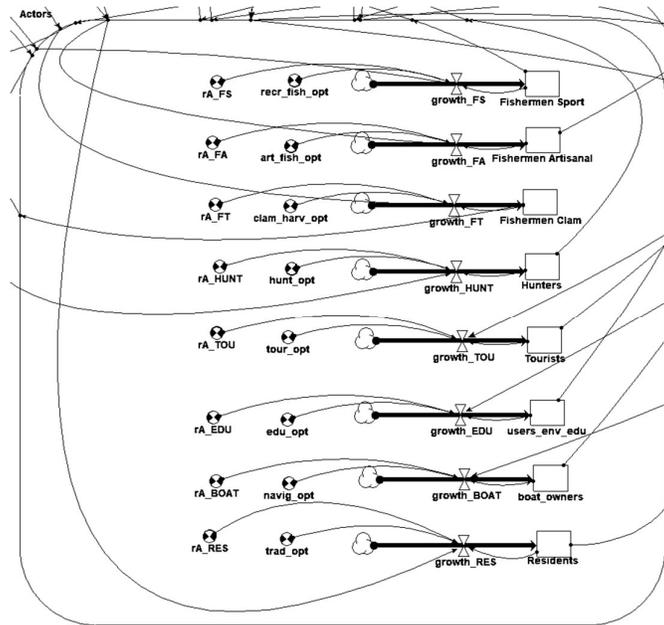


Figura 14 Diagramma del sub-module "Actors"

Gli attori non vengono influenzati direttamente dalle forzanti di RSLR ed aumento della temperatura, ma prevedono una funzione di crescita che ne considera il valore ottimale e ne impedisce la crescita incontrollata ed illimitata anche in presenza di valori di risorse molto elevati.

### Sub-module "services"

Come si può vedere in figura 15, questo sotto-modulo contiene le informazioni circa le relazioni che caratterizzano i SE considerati nel modello. Queste relazioni dipendono perlopiù dai sotto-moduli di fauna, habitat e patrimonio culturale e dai valori impostati per i gruppi di attori e dalle loro abitudini di prelievo. Gli input di questo sub-module comprendono sia le condizioni iniziali che sono state impostate, che i valori degli altri sotto-moduli fin qui descritti.

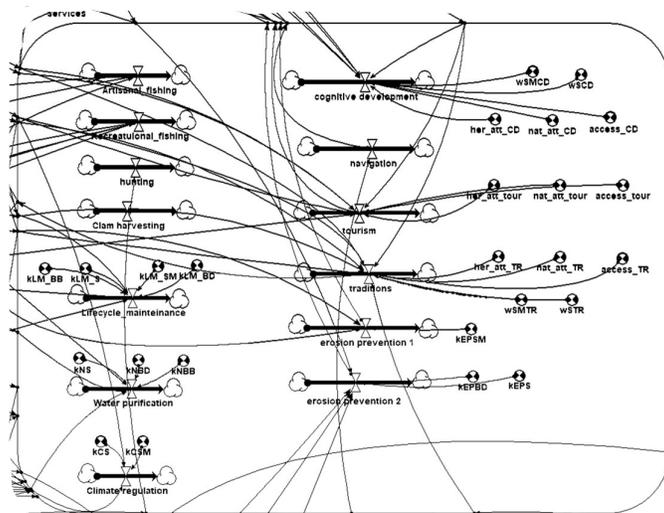


Figura 15 Diagramma del sub-module "Services"

Ogni SE ha delle relazioni dinamiche caratteristiche che sono state incluse in questo modello.

In generale, i SE di regolazione (climate regulation, water purification, erosion prevention 1 e 2, lifecycle maintenance) dipendono dagli habitat e, nel caso del SE di mantenimento di cicli vitali, anche dal sotto-modulo “fauna”.

Le relazioni dei SE culturali sono in funzione della batimetria, degli habitat, del patrimonio culturale e degli attori. Questi comparti instaurano un processo auto regolativo che influenza le dinamiche di crescita degli attori. Tuttavia, mentre il turismo e il diportismo generano soprattutto delle pressioni sugli ecosistemi, intensificando i processi erosivi, i SE di educazione ambientale e le attività tradizionali generano al contrario un fenomeno di sensibilizzazione che si può ipotizzare influenzi le attività di governance relative alla conservazione e al ripristino ambientale. Le pressioni causate dai servizi appena descritti invece possono essere ipotizzate come trascurabili. I SE di approvvigionamento infine sono descritti nel modello in termini di prelievo di biomassa di risorse faunistiche da parte degli attori. Il prelievo può essere limitato o controllato dalla governance ed è soggetto all’influenza dei fattori collegati al massimo prelievo sostenibile. Per la raccolta della vongola sono stati aggiunti inoltre dei link che rappresentano le pressioni esercitate dai pescatori sugli habitat e sulla morfologia lagunare, dovute principalmente alle tecniche di pesca utilizzate (Pranovi et al., 2004).

**Sub-modules “Governance” e “MOSE”**

Questi due sotto-moduli (fig. 16) sono essenziali per poter consentire l’esplorazione di scenari gestionali e sociali di diverso tipo. Nel sotto-modulo “governance”, le variabili di stato rappresentano le possibili azioni gestionali che possono essere applicate dai soggetti responsabili delle decisioni collettive (come la componente politica, le associazioni di varia natura o gli organismi di gestione di aree protette). Ad esso è direttamente collegato il secondo sotto-modulo, chiamato “MOSE”, che rappresenta la risposta alla forzante di RSLR sotto forma di variazione nella frequenza di innalzamento delle barriere alle bocche di porto, sulla base dello scenario climatico esplorato. Ogni variabile di Governance può agire sugli attori o ha il potere di influenzare le caratteristiche degli habitat.

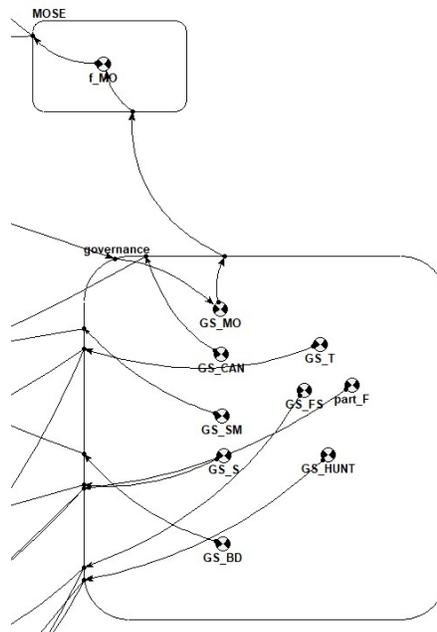


Figura 16 – Sub-modules relativi a MOSE e Governance

## Parametrizzazione del modello

L'approccio ad un modello di dinamica dei sistemi, richiede che a tutti gli elementi in input (variabili di stato e parametri) vengano attribuiti valori realistici e rappresentativi dello stato iniziale del sistema, da cui possa partire poi la simulazione. Nel caso dello strumento EST, i valori iniziali corrispondono alla situazione dello stato attuale degli habitat e dell'attuale grado di fruizione dei SE in laguna di Venezia.

In questo lavoro di tesi, ci si è focalizzati in particolare nella fase di parametrizzazione del modello EST. Ci si è occupati quindi di quantificare e determinare, in modo più accurato possibile, il valore delle 22 variabili e dei 79 parametri allo stato attuale, e dove non fosse possibile quantificarlo, di stimarne un valore o un range rappresentativo. La parametrizzazione si è basata su vari metodi di lavoro come la revisione di dati provenienti dalla letteratura scientifica, stime di valori o range derivanti da altri modelli matematici ed elaborazioni geostatistiche condotte in ambiente informatico mediante software di Geographic Information System (GIS). Le prime simulazioni esplorative sono state utilizzate per verificare i parametri dal punto di vista dimensionale e correggere o rifinire, dove necessario, i valori dei parametri precedentemente inseriti.

Vengono ora presentate le variabili e i parametri suddivisi per ogni sotto-modulo. Ogni elemento viene descritto con una sigla identificativa, una descrizione breve, l'unità di misura, il valore singolo dove è stato possibile stimarlo, oppure un range di valori. Vengono inoltre indicate le fonti che hanno permesso di quantificare o stimare un determinato valore o range.

### Condizioni iniziali

La quantificazione delle condizioni iniziali è stata condotta mediante una valutazione dell'estensione degli habitat e delle risorse lagunari al presente, con successiva mappatura in ambiente GIS e spazializzazione di alcuni dati raccolti dalla letteratura (tab. 2).

<i>Variabile</i>	<i>Descrizione</i>	<i>u.d.m.</i>	<i>valore</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>Fonti</i>
<i>HSI</i>	Estensione della superficie dei bassofondi colonizzabili da vegetazione	[km <sup>2</sup> ]	293.906	-	-	- Batimetria: (Sarretta et al., 2010) - Per individuazione zona eufotica: (Sorokin et al., 2002) - Analisi QGIS mediante layer scaricati da Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> ) - Distribuzione fanerogame: Layer disponibili sul sito di SOLVe ( <a href="http://solve.corila.it/">http://solve.corila.it/</a> )
<i>HCN</i>	Estensione della superficie occupata da canali navigabili	[km <sup>2</sup> ]	48.496	-	-	Layer disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> ); Confronto canali con Multibeam: (Madricardo et al., 2017)
<i>HBB</i>	Estensione dei bassofondi non vegetati	[km <sup>2</sup> ]	362.349	-	-	Layer disponibili su Atlante della Laguna

						( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> )
<i>HSM</i>	Estensione della superficie occupata da barene	[km <sup>2</sup> ]	50.899	-	-	Layer disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> )
<i>HCR</i>	Estensione della superficie occupata da ghebi	[km <sup>2</sup> ]	3.257	-	-	Layer disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> )
<i>HSG</i>	Estensione della superficie con copertura di fanerogame superiore a 500 g WW m <sup>-2</sup>	[km <sup>2</sup> ]	67.957	-	-	Layer disponibili sul sito di SOLVe ( <a href="http://solve.corila.it/">http://solve.corila.it/</a> )
<i>HBD</i>	Estensione della superficie con copertura di diatomee bentoniche superiore a 100 µg C ml <sup>-1</sup>	[km <sup>2</sup> ]	216.453	-	-	Mappa tratta da Facca & Sfriso, 2007

Tabella 2 - Valori dei parametri per le condizioni iniziali

### Forzanti

Le forzanti inserite all'interno del modello, come precedentemente descritto, sono state identificate nell'aumento della temperatura media e nell'aumento relativo del livello medio del mare, a causa del cambiamento climatico in corso. I valori di  $\Delta T$  e RSLR sono stati attribuiti considerando lo scenario RCP 8.5 (modello climatico IPCC CMIP 5).

### Batimetrie

La stima della variabile che compone questo sotto-modulo (*GSCN*), che riguarda l'influenza di alcuni processi fisici sulla batimetria e sulla morfologia degli elementi lagunari, è avvenuta mediante l'utilizzo di layer geospaziali in ambiente GIS. In particolare, per determinare la superficie di canali navigabili, dei bassifondi vegetati e non, sono stati elaborati i dati ricavati dalle mappe e reperiti tramite fonti bibliografiche, i tassi relativi a fenomeni come l'interramento dei canali, la sedimentazione e i dragaggi di canali (tab. 3).

Variabile	Descrizione	u.d.m.	valore	min	max	Fonti
<i>GSCN</i>	Tasso di recupero dei canali mediante dragaggi	[y <sup>-1</sup> ]	0.0594	-	-	(Sarretta et al., 2010) Spazializzazione aree dragate da: (Madricardo et al., 2019)

Tabella 3 - Valori del parametro relativo alla batimetria. Estensione dei canali e bassifondi sono collegati ai valori impostati come condizioni iniziali

## Habitat

La definizione dei valori relativi agli habitat, ossia barene, bassifondi, habitat vegetati a fanerogame o a diatomee bentoniche, è stata eseguita mediante l'elaborazione di dati in ambiente GIS. Le mappe sono state scaricate da database open-source (Atlante della Laguna, SolVe) in formato ShapeFile (.shp) o in formato raster e poi elaborate in ambiente mediante gli strumenti e i plugin forniti dal programma QGIS. Per quanto riguarda le barene, si è provveduto a categorizzare quelle presenti in laguna di Venezia sulla base della superficie occupata dai ghebi, rapportata alla superficie della barena. In termini operativi, sono stati scaricati ed elaborati dei layer in formato .shp dall'Atlante della Laguna (Atlante Della Laguna Di Venezia) e importati nel software QGIS 3.16.9. Con riferimento all'atlante, è stato scaricato il layer comprendente le barene, rappresentate da poligoni, in modo disaggregato. A questo layer, sono state eliminate le barene che ricadevano all'interno di valli da pesca lagunari (non oggetto di studio), a partire dal layer raffigurante le valli, scaricabile dalla pagina web dell'atlante. Successivamente, i poligoni delle barene disaggregati, sono stati aggregati, per raggruppare le porzioni di barena appartenenti alla stessa, in un unico elemento. In seguito, è stato possibile, tramite alcune funzioni del software, ricavare la superficie della barena totale (compresi i ghebi). Da qui è stato possibile ricavare un layer con la superficie dei ghebi per differenza. Con il calcolatore di campi di QGIS poi, è stato calcolato il rapporto tra la superficie delle Barene e la superficie dei ghebi, per ogni elemento di barena. Si è passati poi a categorizzare ogni barena mediante questo "fattore di forma". In particolare, per fare ciò si sono analizzati i rapporti ottenuti e tramite un'indagine di cluster analysis si è potuto osservare che principalmente erano presenti 3 gruppi. Si è prodotto poi un raster che rispecchiasse queste 3 categorie che sono state denominate:

- "Compatte": per le barene con rapporto tra superficie dei ghebi e superficie della barena compreso tra 0 e 0,02;
- "Mediamente Capillarizzate": per le barene con rapporto tra superficie dei ghebi e superficie della barena compreso tra 0,03 e 0,07;
- "Molto Capillarizzate": per le barene con rapporto tra la superficie dei ghebi e quella delle barene, compreso tra 0,08 e 0,81.

L'estensione dei bassifondi vegetati e non vegetati, è stata ottenuta mediante l'elaborazione di mappe contenenti informazioni relative a batimetria, profondità della zona eufotica, estensione della superficie occupata da barene, velme, terre emerse e vegetazione. Queste informazioni sono state reperite mediante letteratura scientifica o tramite database open-source. L'estensione degli habitat vegetati da fanerogame marine è stata ricavata da mappe risultanti da monitoraggi condotti da SOLVe e riferiti alla situazione del 2017. In aggiunta, per stimare il valore di parametri come il tasso di espansione, il tasso di rimozione di C e N, sono stati reperiti dati relativi alla biologia delle specie di fanerogame presenti in laguna di Venezia mediante la consultazione di bibliografia e letteratura scientifica. Per le diatomee bentoniche, l'estensione degli habitat colonizzati è stata ricavata mediante una georeferenziazione della mappa con le stazioni presenti nella pubblicazione di Facca e Sfriso (2007) su QGIS e in seguito sono stati spazializzati i dati delle diatomee bentoniche tenendo conto della diminuzione di superficie colonizzata dalle diatomee bentoniche all'allontanarsi dalla stazione considerata (Facca & Sfriso, 2007).

<i>Parametro</i>	<i>Descrizione</i>	<i>u.d.m.</i>	<i>valore</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>Fonti</i>
$k_{ER}$	Tasso di perdita medio delle superfici colonizzabili da habitat vegetati, in conseguenza a erosione "diffusa"	[y-1]	0.005	-	-	Stima da giudizio esperto
$\mu_{FC}$	Tasso di perdita delle superfici colonizzabili da habitat vegetati, in conseguenza alla fruizione del SE FC	[ind-1 y-1]	0.00479	-	-	Stima da giudizio esperto
$\mu_{TU}$	Tasso di perdita delle superfici colonizzabili da habitat vegetati, in conseguenza alla fruizione del SE TU	[ind-1 y-1]	0.00479	-	-	Stima da giudizio esperto
$\mu_{NA}$	Tasso di perdita delle superfici colonizzabili da habitat vegetati, in conseguenza alla fruizione del SE NA	[ind-1 y-1]	0.00000184	-	-	Stima da giudizio esperto
$k_{SA}$	Tasso di perdita medio delle superfici di canali navigabili, come conseguenza dell'accumulo di sedimenti	[y-1]	0.0001	-	-	Dati ricavati da: (Sarretta et al., 2010)
$\varepsilon$	Frazione di sedimento risospeso che sedimenta nei canali navigabili	[-]	0.35095	0,2575	0,4444	Dati ricavati da: (Sarretta et al., 2010)
$\varphi_{FC}$	Tasso di perdita delle superfici occupate da SM, conseguenti alla fruizione del SE FC	[ind-1 y-1]	0.00479	-	-	ShapeFile delle barene disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> ) Sono stati attribuiti dei ranking per dare un peso ai servizi di FC, TU e NA
$\varphi_{TU}$	Tasso di perdita delle superfici occupate da SM, conseguenti alla fruizione del SE TU	[ind-1 y-1]	0.00000184	-	-	ShapeFile delle barene disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> ) Sono stati attribuiti dei ranking per dare un peso ai servizi di FC, TU e NA

$\varphi_{NA}$	Tasso di perdita delle superfici occupate da SM, conseguenti alla fruizione del SE NA	[ind-1 y-1]	0.00000184	-	-	ShapeFile delle barene disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> ) Sono stati attribuiti dei ranking per dare un peso ai servizi di FC, TU e NA
$k_{shape}$	Fattore di forma delle barene. Proporzione tra superficie occupata da ghebi e superficie di barena	[-]	0.17			Categoria 1: 0-0,2; Categoria 2: 0,03-0,07; Categoria 3: 0,08-0,81 Elaborazione geospaziale su base degli ShapeFile delle barene disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> )
$\theta_{FC}$	Tasso di perdita delle superfici occupate da habitat vegetati, conseguenti alla fruizione del SE FC	[ind-1 y-1]	0.00479	-	-	(Curiel et al., n.d.) Sono stati attribuiti dei ranking per dare un peso ai servizi di FC, TU e NA
$\theta_{TU}$	Tasso di perdita delle superfici occupate da habitat vegetati, conseguenti alla fruizione del SE TU	[ind-1 y-1]	0.00000184	-	-	Sono stati attribuiti dei ranking per dare un peso ai servizi di FC, TU e NA
$\theta_{NA}$	Tasso di perdita delle superfici occupate da habitat vegetati, conseguenti alla fruizione del SE NA	[ind-1 y-1]	0.00000184	-	-	Sono stati attribuiti dei ranking per dare un peso ai servizi di FC, TU e NA
$\nu_{SG}$	Tasso netto di espansione dell'habitat vegetato a fanerogame marine SG	[y-1]	0.00805	0.001	0.0061	(Pastres et al., 2004)
$\nu_{BD}$	Tasso netto di espansione dell'habitat vegetato a diatomee bentoniche BD	[y-1]	0.009	-	-	(Rova et al., 2019c)
$k_H$	Fattore di modulazione della crescita degli habitat vegetati in funzione della temperatura	[1/°C]	0.7	-	-	1)(Sawall et al., 2021) 2) <a href="http://www.SeagrassLI.org">www.SeagrassLI.org</a> Cornell Cooperative Extension Eelgrass Restoration. Retrieved June 10, 2022, from <a href="http://www.seagrassli.org/ecology/physical_environment/temperature.html">http://www.seagrassli.org/ecology/physical_environment/temperature.html</a> ; 3) MarLIN - The Marine Life Information Network - Dwarf eelgrass (Zostera

						<p>noitei. (n.d.). Retrieved June 10, 2022, from <a href="https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1409">https://www.marlin.ac.uk/species/detail/1409</a>;</p> <p>4) USDA Plants Database. (n.d.). Retrieved June 10, 2022, from <a href="https://plants.usda.gov/home/plantProfile?symbol=RUMAS5">https://plants.usda.gov/home/plantProfile?symbol=RUMAS5</a>;</p> <p>5) (Rasmusson et al., 2021)</p> <p>6) Wigeongrass (<i>Ruppia maritima</i>): A Literature Review. (n.d.);</p> <p>7) (Tsioli et al., 2019)</p> <p>8) (Terrados &amp; Ros, 1995)</p>
$kR$	Fattore di modulazione della crescita delle barene in funzione del RSLR	[1/cm]	-0.00641	-	-	(Fitzgerald & Hughes, 2019)
$FD$	Coefficiente di semi-saturazione per la superficie libera colonizzabile da habitat vegetati	[km <sup>2</sup> ]	16.5	-	-	10% della superficie libera colonizzabile inizialmente
$GSSM$	Tasso di recupero delle barene mediante interventi di protezione	[y-1]	0.00864457	-	-	(Volpe, 2012)
$GSSG$	Tasso di ripristino delle praterie mediante piantumazione	[y-1]	0.0367879	-	-	<a href="http://www.lifesteresto.eu/lifesteresto/wp-content/uploads/2018/03/4_Sfriso_Risultati-accrescimenti1.pdf">http://www.lifesteresto.eu/lifesteresto/wp-content/uploads/2018/03/4_Sfriso_Risultati-accrescimenti1.pdf</a>

Tabella 4 - Valori dei parametri per gli habitat

## Fauna

I parametri e le variabili relative alla fauna, comprendenti informazioni sulla biomassa dei gruppi di fauna, sui tassi di crescita delle popolazioni, sui tassi di prelievo e sulle capacità portante, sono stati stimati tramite ricerche bibliografiche e analisi di letteratura scientifica, oltre che mediante l'utilizzo di dati provenienti dal modello Ecopath-Ecosim, sviluppato nell'ambito della Linea 4.1 del progetto Venezia 2021.

Ai fini della stima della biomassa presente in laguna di Venezia di avifauna acquatica cacciabile, sono stati considerati i capi presenti in laguna dal censimento annuale degli uccelli acquatici svernanti in provincia di Venezia. Per stimare quindi la biomassa, è stato moltiplicato il numero dei capi censiti

in laguna per il peso medio di ogni singola specie, considerata cacciabile secondo la normativa vigente. Per il calcolo del peso medio di ogni specie, sono state analizzate fonti di letteratura scientifica. Analogamente la letteratura scientifica disponibile è stata utilizzata anche per la stima dei parametri relativi ai tassi di crescita della popolazione.

La densità di biomassa della vongola filippina (*Tapes philippinarum*) invece è stata stimata a partire dai raster di distribuzione della biomassa sia di individui adulti che giovanili e aggregando i dati dei due gruppi separati. Il tasso di prelievo, di crescita e la capacità portante invece sono stati stimati mediante letteratura scientifica. I parametri e le variabili dei gruppi di fauna ittica che includono demersali, mugilidi, orata e spigola, sono stati ricavati dagli output del modello sviluppato nell'ambito della Linea 4.1 (Ecopath-Ecosim).

Parametro	Descrizione	u.d.m.	valore	min	max	Fonti
<i>FBR</i>	Densità di biomassa specie target caccia (anatidi, rallidi)	[ton FW km-2]	0.331	-	-	- Dati reperiti da censimento annuale svernanti (Associazione Faunisti Veneti, 2013) - (Licheri & Spina, 2005); - <a href="https://eol.org/">https://eol.org/</a>
<i>FMU</i>	Densità di biomassa mugilidi ( <i>Liza</i> spp.)	[ton FW km-2]	136.6881	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>FDE</i>	Densità di biomassa demersali ( <i>Solea solea</i> , <i>Sepia officinalis</i> , <i>Platichthys flesus</i> )	[ton FW km-2]	9.0583	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>FSA</i>	Densità di biomassa <i>Sparus aurata</i>	[ton FW km-2]	7.0118	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>FDL</i>	Densità di biomassa <i>Dicentrarchus labrax</i>	[ton FW km-2]	11.2648	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>FRP</i>	Densità di biomassa <i>Ruditapes philippinarum</i>	[ton FW km-2]	16.415	-	-	Spazializzazione dati densità di giovanili e adulti: (G.R.A.L., 2016)
<i>rMU</i>	Tasso netto di crescita per i mugilidi	[y-1]	0.68	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>hMU</i>	Tasso di prelievo dei mugilidi	[ind-1 y-1]	0.00003	-	-	Dati sulla pesca artigianale spazializzati da: ( <i>Piano per La Gestione Delle Risorse Alieutiche Delle Lagune Della Provincia Di Venezia</i> , 2000)
<i>CCMU</i>	Capacità portante per i mugilidi	[ton FW km-2]	206	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>rDE</i>	Tasso netto di crescita per i demersali	[y-1]	0.53	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)

<i>hDE</i>	Tasso di prelievo dei demersali	[ind-1 y-1]	0.00003	-	-	Dati sulla pesca artigianale spazializzati da: ( <i>Piano per La Gestione Delle Risorse Alieutiche Delle Lagune Della Provincia Di Venezia, 2000</i> )
<i>CCDE</i>	Capacità portante per i demersali	[ton FW km-2]	18	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>rSA</i>	Tasso netto di crescita per l'orata	[y-1]	0.12	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>hSA</i>	Tasso di prelievo dell'orata	[ind-1 y-1]	0.00003	-	-	Dati sulla pesca artigianale spazializzati da ( <i>Piano per La Gestione Delle Risorse Alieutiche Delle Lagune Della Provincia Di Venezia, 2000</i> )
<i>CCSA</i>	Capacità portante per l'orata	[ton FW km-2]	14	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>rRP</i>	Tasso netto di crescita per la vongola	[y-1]	0.14	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>hRP</i>	Tasso di prelievo della vongola	[ind-1 y-1]	0.00006	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>CCRP</i>	Capacità portante per la vongola	[ton FW km-2]	181.318	-	-	(Vincenzi et al., 2011)
<i>rBR</i>	Tasso netto di crescita per anatidi e rallidi	[y-1]	0.1	-	-	(Green & Pain, 2016)
<i>hBR</i>	Tasso di prelievo di anatidi e rallidi	[ind-1 y-1]	0.00006	-	-	Adattato da dati ricavati da assessment caccia in Laguna di Venezia
<i>CCBR</i>	Capacità portante per anatidi e rallidi	[ton FW km-2]	181.318	-	-	(Huang & Isobe, 2012)
<i>kF</i>	Fattore di modulazione della dinamica dei gruppi di fauna in funzione della temperatura	[1/°C]	0.9	-	-	Stima da giudizio esperto
<i>kLBB</i>	Biomassa di fauna supportata da BB	[ton FW km-2 y-1]	0.5	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>kLSG</i>	Biomassa di fauna supportata da SG	[ton FW km-2 y-1]	1	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>kLCR</i>	Biomassa di fauna supportata da LCR	[ton FW km-2 y-1]	1	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)
<i>kLBD</i>	Biomassa di fauna supportata da LBD	[ton FW km-2 y-1]	0.5	-	-	(Anelli Monti et al., 2021)

<i><math>\beta_{LCM}</math></i>	Fattore di risposta della capacità portante al SE di LCM	[-]	0.1	-	-	Stima da giudizio esperto
---------------------------------	--	-----	-----	---	---	---------------------------

Tabella 5 - Valori dei parametri e delle variabili di stato per i gruppi di fauna

## Attori

Il valore attuale del numero di ciascun gruppo di attori è stato quantificato in base a valutazioni e quantificazioni di vario tipo. Le metodologie si sono basate principalmente sui più comuni metodi socio-culturali come la diffusione di questionari, interviste e interrogazione di database statistici (ISTAT, Regione Veneto, Città Metropolitana di Venezia).

Parametro	Descrizione	u.d.m.	valore	min	max	Fonti
<i>ARE</i>	Numero praticanti di voga alla veneta	[n° ind]	3034	2939	3129	Interviste Associazioni Remiere 2019-2020
<i>ATU</i>	Numero turisti che visitano la laguna (eccetto c. storico)	[n° ind]	110000	-	-	Stima da questionari e spazializzazione anno 2019
<i>AED</i>	Numero studenti che praticano educazione ambientale	[n° ind]	19785	-	-	Stima da questionari e spazializzazione anno 2019
<i>ABO</i>	Numero diportisti	[n° ind]	24700	-	-	Stima da questionari e spazializzazione anno 2019
<i>AFA</i>	Numero pescatori artigianali	[n° ind]	32246	30873	33619	Stima da interviste a cooperative e dati dal mercato ittico
<i>AFC</i>	Numero pescatori di vongole professionali	[n° ind]	5750	-	-	Stima da interviste a cooperative e dati dal mercato ittico
<i>AFS</i>	Numero pescatori ricreativi	[n° ind]	2500	1250	4000	(FIPSAS Venezia, 2014)
<i>AHU</i>	Numero cacciatori	[n° ind]	1320	-	-	Ambito Territoriale di Caccia Lagunare (A.T.C. 5 Regione Veneto) - numero iscritti
<i>rARE</i>	Tasso di crescita degli attori RE	[y-1]	-0.0471	-	-	Dati 2019-2020 provenienti da interviste ad Associazioni Remiere; Dati 2002: (de Cecco, 2002)
<i>rATU</i>	Tasso di crescita degli attori TU	[y-1]	0.0500	-	-	<a href="https://www.comune.venezia.it/sites/comune.venezia.it/files/immagini/Turismo/Adt19%20ing%20ver%204%201%202021%281%29.pdf">https://www.comune.venezia.it/sites/comune.venezia.it/files/immagini/Turismo/Adt19%20ing%20ver%204%201%202021%281%29.pdf</a>
<i>rAED</i>	Tasso di crescita degli attori ED	[y-1]	0.0478	-	-	<a href="https://dati.istruzione.it/espscu/index.html?area=anagStu">https://dati.istruzione.it/espscu/index.html?area=anagStu</a>

<i>r<sub>ABO</sub></i>	Tasso di crescita degli attori BO	[y-1]	0.0285	-	-	(Defrancesco & Rosato, 2000)
<i>r<sub>AFA</sub></i>	Tasso di crescita degli attori FA	[y-1]	0.1130	-	-	Report di Veneto Agricoltura (Veneto Agricoltura, 2020)
<i>r<sub>AFR</sub></i>	Tasso di crescita degli attori FR	[y-1]	0.0120	-	-	Stima da giudizio esperto
<i>r<sub>AFC</sub></i>	Tasso di crescita degli attori FC	[y-1]	0.01	-	-	Impostato al 10% del valore relativo alla pesca artigianale
<i>r<sub>AHU</sub></i>	Tasso di crescita degli attori HU	[y-1]	0.0272	-0,0251	-0,0293	Report giornalistico: (Vallini, 2019)

Tabella 6 - Valori dei parametri e delle variabili di stato per i gruppi di attori

## Governance

La parametrizzazione della governance è avvenuta considerando i possibili valori target desiderabili per la gestione lagunare, sia come riportati da letteratura scientifica, sia analizzando i dati e le tendenze attuali.

Parametro	Descrizione	u.d.m.	valore	min	max	Fonti
<i>SECDO</i>	Valore target di riferimento per il SE di sviluppo cognitivo	[ind]	107514	-	-	<a href="https://dati.istruzione.it/espscu/index.html?area=anagStu">https://dati.istruzione.it/espscu/index.html?area=anagStu</a>
<i>SETRO</i>	Valore target di riferimento per il SE tradizioni	[ind]	5000	-	-	<a href="https://istruzione.cittametropolitana.ve.it/sites/default/files/pagina_base/OPIV%20OD%202019_per%20sito_agg%2030%20set.pdf">https://istruzione.cittametropolitana.ve.it/sites/default/files/pagina_base/OPIV%20OD%202019_per%20sito_agg%2030%20set.pdf</a>
<i>SELCMO</i>	Valore target di riferimento per il SE di LCM	[ton FW]	300	-	-	Basato sui dati attuali
<i>GSSF</i>	Valore soglia di riferimento per la riduzione delle catture della pesca	[ton FW]	60	-	-	<a href="https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-32-2019-INIT/en/pdf">https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-32-2019-INIT/en/pdf</a>
<i>GGBR</i>	Valore soglia di riferimento per la riduzione delle catture della caccia	[ton FW]	0.15	-	-	(Sorrenti & Lenzone, 2009)
<i>GSRP</i>	Valore soglia di riferimento per la riduzione delle catture della raccolta vongole	[ton FW]	8	-	-	(LegaCoop del Veneto & Agriteco, 2015)
<i>SECF0</i>	Valore target di riferimento per il SE CF	[ton FW]	8	-	-	Relazione con stima del maximum sustainable yield

<i>SEHUO</i>	Valore target di riferimento per il SE HU	[ton FW]	0.15	-	-	Relazione con stima del maximum sustainable yield
<i>SEAF0</i>	Valore target di riferimento per il SE AF	[ton FW]	42	-	-	Valore impostato arbitrariamente come il valore attuale per mancanza di fonti attendibili
<i>SERFO</i>	Valore target di riferimento per il SE RF	[ton FW]	18	-	-	Valore impostato arbitrariamente come il valore attuale per mancanza di fonti attendibili
<i>SENA0</i>	Valore target di riferimento per il SE NA	[ind]	24700	-	-	Valore impostato arbitrariamente come il valore attuale per mancanza di fonti attendibili
<i>SETUO</i>	Valore target di riferimento per il SE TU	[ind]	36431	-	-	(Russo, 2000)

Tabella 7 - Valori dei parametri per la governance

## MOSE

I giorni di chiusura delle barriere mobili del sistema MOSE invece, sono stati parametrizzati in base alle previsioni di innalzamento del livello del medio mare, considerando sia dati da letteratura, sia le previsioni ottenute dalla linea 5.2 del progetto Venezia2021. Per questo, il valore viene calcolato nel modello in base al parametro della forzante “RSLR”.

Variabile	Descrizione	u.d.m.	relazione	Fonte
<i>GSMO</i>	Giornate di attivazione del MOSE nell'arco dell'anno	[d]	$GSMO = 8.5 + (1.75 * RSLR)$	Umgiesser 2020; risultati WP 5.2

Tabella 8 - Relazione per il sotto-modulo MOSE

## Servizi Ecosistemici

I valori caratteristici dei parametri e delle variabili di stato che compongono le interazioni tra uomo e ambiente nei SE sono stati dedotti dall'assessment di capacity e flow dei SE in un deliverable precedente della linea 4.2.

Parametro	Descrizione	u.d.m.	valore	min	max	Fonti
<i>HE</i>	Patrimonio culturale tangibile – areale di estensione dei siti di interesse	[km2]	81.644	-	-	Layer disponibili su Atlante della Laguna ( <a href="http://www.atlantedellalaguna.it/">http://www.atlantedellalaguna.it/</a> )
<i>αNAT</i>	Fruizione dei servizi culturali collegata a valenze naturalistiche	[y-1]	0.49	-	-	Stima proveniente da questionari anno 2019

$\omega_{SM}$	Peso relativo assegnato ai fruitori di servizi culturali a SM	[-]	0.55	-	-	Stima proveniente da questionari anno 2019
$\omega_{SG}$	Peso relativo assegnato ai fruitori di servizi culturali a SG	[-]	0.45	-	-	Stima proveniente da questionari anno 2019
$\alpha_{HE}$	Fruizione dei servizi culturali collegata al patrimonio culturale	[y-1]	0.51	-	-	Stima proveniente da questionari anno 2019
$\alpha_{AC}$	Fruizione dei servizi culturali collegata all'accessibilità	[y-1]	0.4	-	-	Stima da giudizio esperto
$k_{NBB}$	Tasso di rimozione di N in BB	[ton N km <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> ]	0.35	-	-	Analogia con Diatomee Bentoniche
$k_{CSM}$	Tasso di rimozione di C in SM	[ton C km <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> ]	130	-	-	(D'alpaos & D'alpaos, 2021)
$k_{EPSM}$	Fattore di controllo del tasso di erosione dei bassofondi ed interrimento dei canali per unità di superficie barenicola	[-]	5	-	-	In analogia con gli habitat vegetati
$k_{NSG}$	Tasso di rimozione di N in SG	[ton N km <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> ]	1.4	9	11	(Svensson and Carrer 2000)
$k_{NBD}$	Tasso di rimozione di N in BD	[ton N km <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> ]	0.35	-	-	Adattato da Fennel et al. (2008)
$k_{CSG}$	Tasso di rimozione di C in SG	[ton C km <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> ]	138	100	176	(Greiner et al., 2013)
$k_{EPSG}$	Fattore di controllo del tasso di erosione dei bassofondi ed interrimento dei canali per unità di superficie vegetata a fanerogame	[-]	1.4	-	-	(Rova et al., 2015)
$k_{EPBD}$	Fattore di controllo del tasso di erosione dei bassofondi ed interrimento dei canali per unità di superficie vegetata a diatomee bentoniche	[-]	1.5	-	-	(Rova et al., 2015)

Tabella 9 - Valori dei parametri per i servizi ecosistemici

# Risultati

## Generazione degli scenari e simulazioni

Successivamente alla parametrizzazione del modello, si è passati alla predisposizione di possibili scenari tendenziali da esplorare. Gli scenari che si sono ipotizzati si possono distinguere sulla base del fatto che considerino forzanti esterne, oppure tendenze di gestione predisposte dalla governance nei confronti di attori ed elementi lagunari. Si è quindi deciso di considerare due tipologie di scenari di evoluzione del sistema:

- una prima tipologia legata alle tendenze attese di cambiamento climatico;
- una seconda tipologia legata alle conseguenze delle ipotetiche decisioni assunte dalla governance sul sistema oggetto di studio.

Per confrontare questi scenari, è stato usato uno scenario di riferimento che considera l'evoluzione del sistema studiato alla situazione attuale, senza interventi indotti dalla governance ed effetti dovuti al cambiamento climatico (BAU – Business As Usual).

Le condizioni iniziali degli scenari sono le stesse per ognuno e corrispondono ai valori impostati a seguito della fase di parametrizzazione, come presentato precedentemente. Per le simulazioni si è scelto di utilizzare un orizzonte temporale di 50 anni. Tutte le simulazioni sono state realizzate in Simile v. 6.11, le equazioni sono state integrate numericamente con un metodo Runge-Kutta e considerando un timestep di 0.01 anni.

Vengono ora riportati gli scenari ipotizzati con la descrizione dei principali valori impostati per ognuno.

- BAU (Business-As-Usual): questo scenario considera lo stato attuale del sistema, senza considerare le possibili variazioni indotte dai cambiamenti climatici. Le azioni di governance del sistema invece sono impostate sui valori attuali e derivano da un'analisi delle azioni operata in fase di parametrizzazione. Il valore di attivazione del sistema MOSE è stato impostato a 8,5 giorni all'anno, pari al valore attuale.
- CC+MOSE (Climate Change + MOSE): questo scenario simula il sistema considerando le tendenze di cambiamento climatico sotto lo scenario RCP8.5, e tenendo conto delle variazioni attese rispetto all'innalzamento del livello medio del mare (RSLR) ed all'aumento della temperatura media annua nell'area. In particolare, si è considerato che la temperatura media annua aumenti di 5 °C nell'arco di 100 anni, in accordo con il downscaling dell'RCP8.5 operato dal CMCC per la laguna di Venezia (Report Venezia - CMCC). Lo scenario considera un RSLR di +75 cm nell'arco di 100 anni, in accordo con Zanchettin et al. (2021), la frequenza di azionamento del sistema MOSE aumenta in funzione di RSLR.
- GOV (Governance): in questo scenario si esplora contemporaneamente una diminuzione della pressione turistica, una limitazione alla navigazione da diporto ed un incentivo alla pesca artigianale, oltre ad un'incentivazione alla residenzialità. Il tasso di diminuzione di pescatori artigianali, residenti e fruitori delle attività di educazione ambientale sono stati dimezzati rispetto allo scenario di riferimento mentre i tassi di incremento di turisti e diportisti sono stati dimezzati sempre rispetto allo scenario di riferimento;

- TUR (Tourists): Scenario dove si considera il raddoppio del numero di turisti rispetto al valore attuale.
- RES (Residents): Scenario dove si inverte il trend di crescita demografica che attualmente risulta in calo, ipotizzando un valore uguale in termini assoluti ma con segno opposto.

Gli scenari generati sono poi stati confrontati tra loro. In particolare, considerando la suddivisione degli scenari tra la prima tipologia (cambiamento climatico) e la seconda tipologia (Governance), si sono confrontati in primis i risultati dei trend attuali (scenario BAU) con i risultati previsti dallo scenario comprendente i cambiamenti climatici (CC+MOSE); secondariamente i risultati dello scenario BAU sono stati messi a confronto con i risultati di quello comprendente le azioni di governance (GOV) tra cui gli scenari TUR e RES.

## Scenario BAU

Lo scenario BAU (Business As Usual) considera la situazione attuale per l'ecosistema lagunare, con gli attuali tassi di crescita degli attori, le attuali tendenze delle variabili ambientali considerate, e le politiche di governance ad oggi attive. In particolare, come si può osservare della figura 17, le tendenze previste dal modello per i prossimi 50 anni senza interventi di modifica alle policy o all'ecosistema lagunare, mostrano una decrescita generalizzata per gli attori che fruiscono dell'ecosistema stesso ad eccezione dei diportisti e dei praticanti di pesca sportiva. Le variazioni dei valori riferiti agli attori sono diverse a seconda della categoria riservata. Alcune categorie, infatti, mostrano una variazione molto più brusca e marcata, come per esempio i pescatori artigianali o i turisti, mentre per altre tipologie queste variazioni sono molto più dolci e meno marcate (ad esempio i raccoglitori di vongole o i cacciatori).

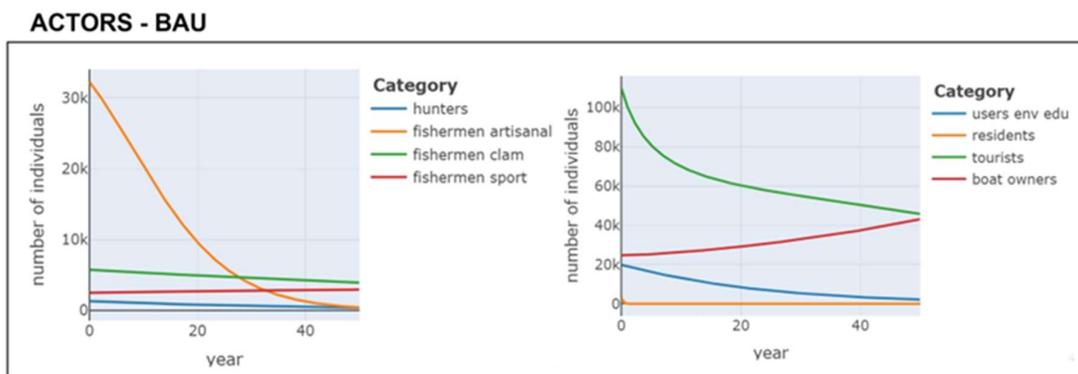


Figura 17 – Trend del sotto-modulo Attori riferito allo scenario BAU

Dalla figura 18 si può notare che, allo stato attuale, anche gli elementi morfologici risultano essere tendenzialmente in calo nei prossimi 50 anni. Le eccezioni maggiori a questa tendenza riguardano principalmente il trend del patrimonio culturale tangibile e quello dei bassifondi non vegetati. Nel primo caso, il grafico mostra un aumento quasi costante o in leggero aumento, mentre nel secondo caso si prevede un iniziale aumento con decremento dopo una fase di stabilità.

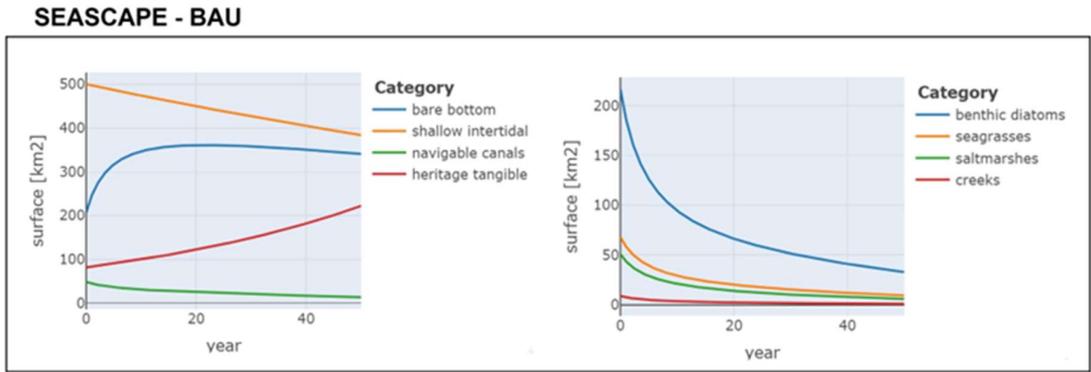


Figura 18 – Tendenze relative al sotto-modulo degli elementi morfologici, come da previsioni dello scenario BAU

Per quanto riguarda le risposte funzionali del sistema allo stato attuale, si può osservare in figura 19 un trend praticamente costante per quanto riguarda lo spazio e la fauna da un lato, con una diminuzione della risposta relativa alla sensibilizzazione. Per quanto riguarda il secondo grafico si può notare un aumento delle politiche di governance a fronte di un mantenimento delle giornate di attivazione del sistema MOSE.

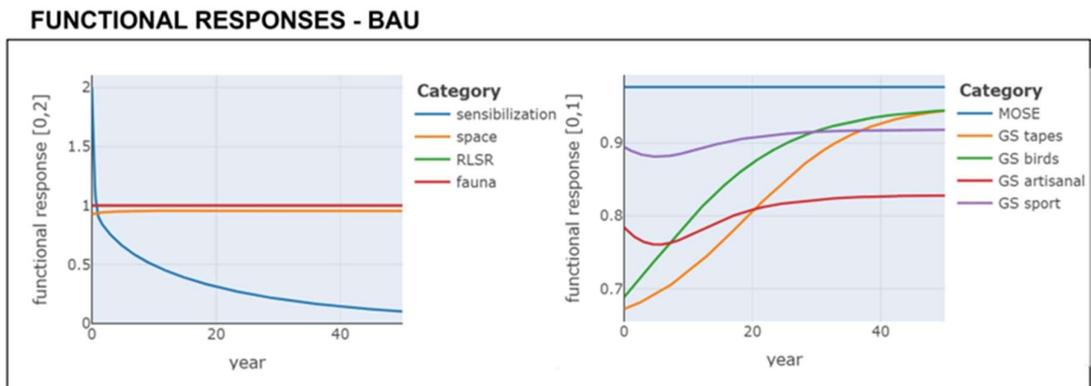


Figura 19 – Trend riferiti al sotto-modulo delle risposte funzionali del sistema relative allo scenario BAU

Nel comparto relativo ai gruppi di fauna (fig. 20), la tendenza prevista nei prossimi anni, è quella di un iniziale calo in alcuni gruppi (pesci) mentre per l'avifauna e le vongole, il trend previsto è di un aumento continuo. Tutti i gruppi sembrano poi tendere a una stabilizzazione negli ultimi anni della simulazione.

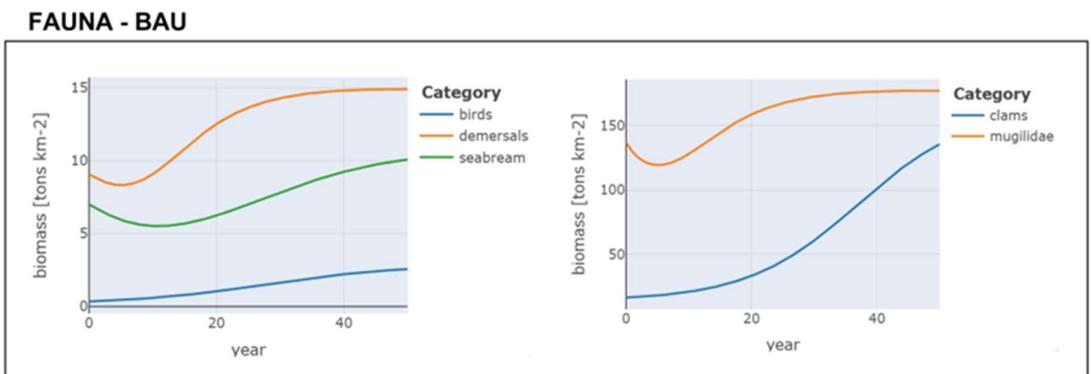


Figura 20 – Sotto-modulo relativo alla fauna per lo scenario BAU

In figura 21 i trend previsti per i SE forniti dalla laguna di Venezia risultano essere generalmente in calo ad eccezione del SE relativo alla pesca ricreativa ed al turismo, che dopo una fase di calo molto marcata, vede una stabilizzazione in un valore ritenuto maggiormente accettabile. Tra i SE, alcune particolarità nei trend si possono osservare per esempio nel gruppo dei SE culturali, che tende a scendere per poi stabilizzarsi su un determinato valore (circa 12000 individui per il SE di sviluppo cognitivo e 2100 per la voga alla veneta). I comparti dei SE di regolazione e supporto mostrano un calo molto marcato e continuo.

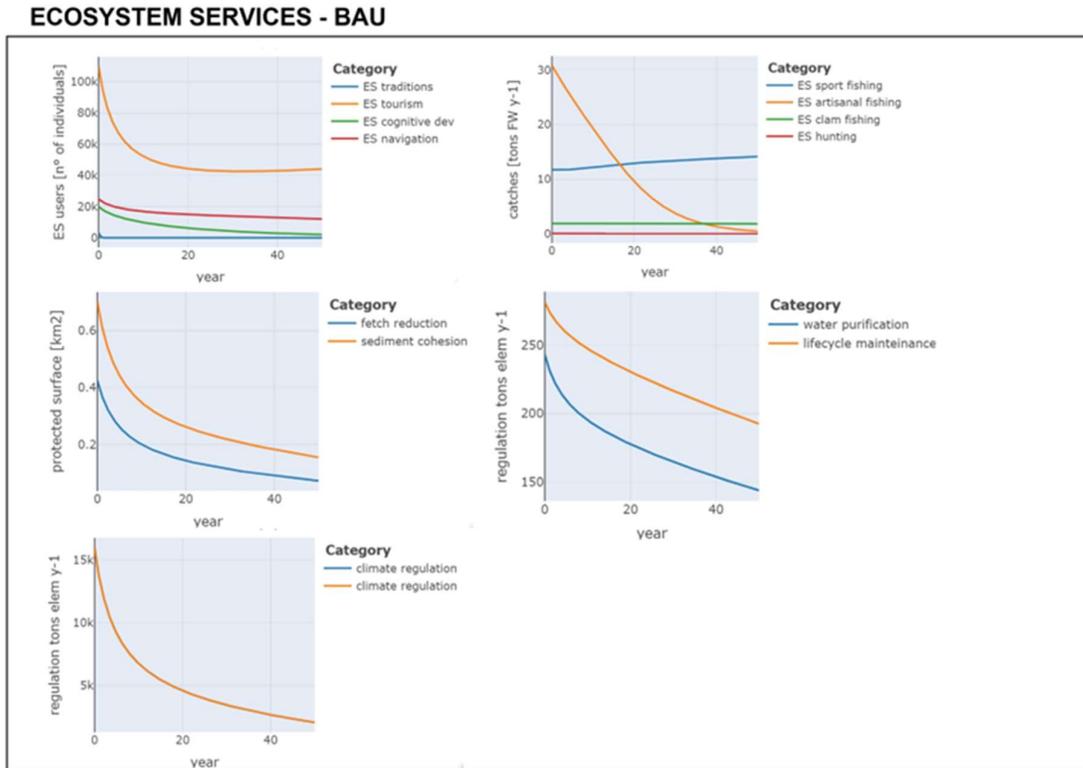


Figura 21 – Grafici relativi ai trend dei SE forniti nello scenario BAU

## Scenario CC+MOSE

Nelle seguenti immagini vengono mostrati i grafici dei trend risultanti dalle simulazioni per quanto riguarda lo scenario relativo ai cambiamenti climatici (CC+MOSE). Nei grafici il confronto avviene per sotto-sistemi come per esempio attori, risorse, elementi del paesaggio, fauna e servizi ecosistemici. Come per lo scenario BAU (fig. 17), la dinamica degli attori che fruiscono dei servizi di approvvigionamento risulta in calo, con l'eccezione dei pescatori sportivi e dei diportisti. Si può notare infatti una flessione marcata dei pescatori artigianali, la cui dinamica è largamente influenzata dal tasso di accrescimento per questo gruppo, stimato sulla base dei trend attualmente osservati. Di conseguenza, nonostante le risorse non risultino essere in flessione (ad esempio come si può notare in figura 22 clams, mugilidae, seabream, etc.), queste attività vedono una sostanziale diminuzione. Inoltre si può osservare come, sebbene non ci sia nel modello una precisa relazione che colleghi i turisti al climate change, il sistema nella sua interezza fa emergere che, se esposto a un driver esterno come il climate change, la dinamica dei turisti è diversa rispetto allo scenario senza

climate change in quanto il numero di attori dapprima cala rapidamente, per poi riprendersi più lentamente.

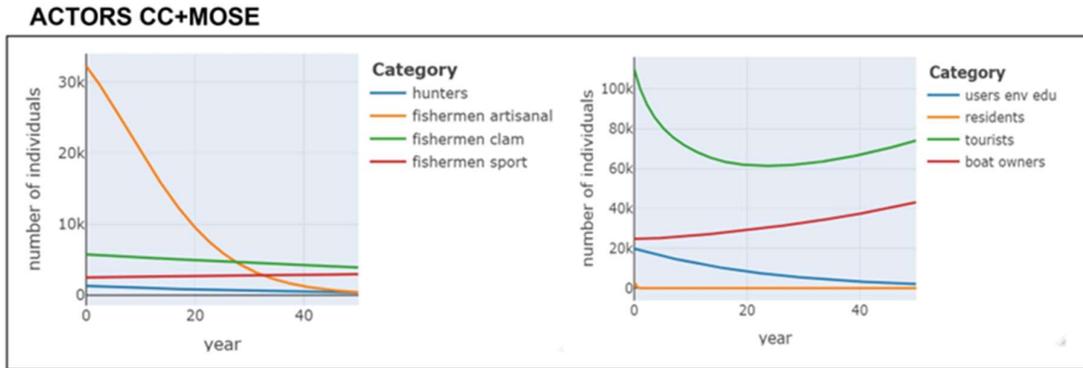


Figura 22 – Grafici dello scenario CC+MOSE per il sotto-modulo attori

Nello scenario analizzato, gli elementi morfologici mostrano dinamiche simili allo scenario BAU (fig. 18), con una generale perdita di bassifondi colonizzabili da vegetazione, come conseguenza dei fenomeni di erosione e successivo approfondimento dei fondali. Le porzioni non vegetate, o bare bottom invece, risultano essere in aumento nei primi 10 anni di simulazione come conseguenza di un generale decremento delle superfici vegetate, per poi stabilizzarsi. Le superfici vegetate infatti, sia nel caso delle praterie di fanerogame che dei bassifondi caratterizzati da popolazioni di diatomee bentoniche con elevate densità, decrescono. Complessivamente, i trend previsti risentono soprattutto nella seconda parte dell’intervallo di tempo degli effetti prodotti dall’aumento di temperatura (scenario CC+MOSE). La dinamica delle barene e dei ghebi (saltmarshes, creeks) presenta una situazione analoga a quella delle superfici vegetate dello scenario BAU, ma nel caso dello scenario CC+MOSE, questa dinamica risponde al cambiamento nel RSLR.

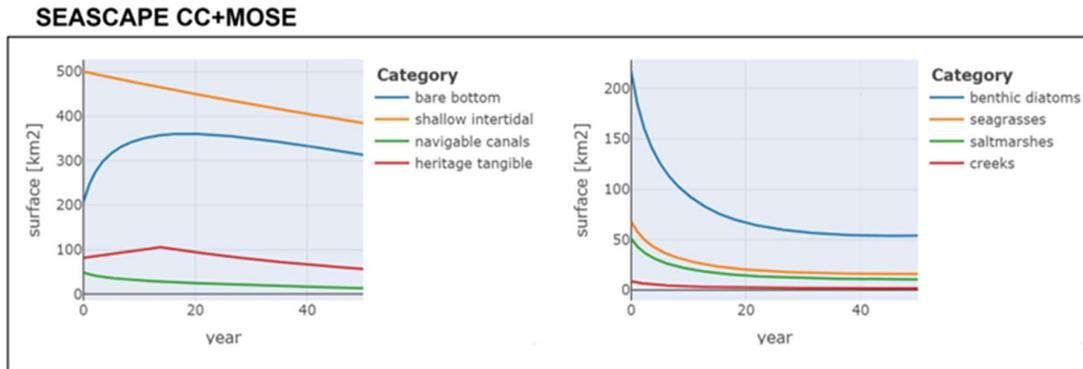


Figura 23 – Grafici dello scenario CC+MOSE per il sotto-modulo degli elementi lagunari.

Per facilitare l’interpretazione dei risultati, la dinamica delle principali risposte funzionali utilizzate è riportata in figura 24. Rispetto agli elementi del paesaggio lagunare (fig. 23), il patrimonio culturale presenta una differenza più marcata rispetto allo scenario BAU. Questo elemento presenta infatti uno dei pochi elementi di discontinuità introdotti nel modello, e considera un iniziale aumento del patrimonio culturale tangibile come effetto del RSLR, al quale però segue un’inversione di tendenza una volta superata una soglia critica di innalzamento (fissata nel modello a 10 cm). Si può infatti

ipotizzare che entro una certa soglia, il fenomeno dell'acqua alta possa attrarre un maggior numero di turisti vista la peculiarità della città di Venezia.

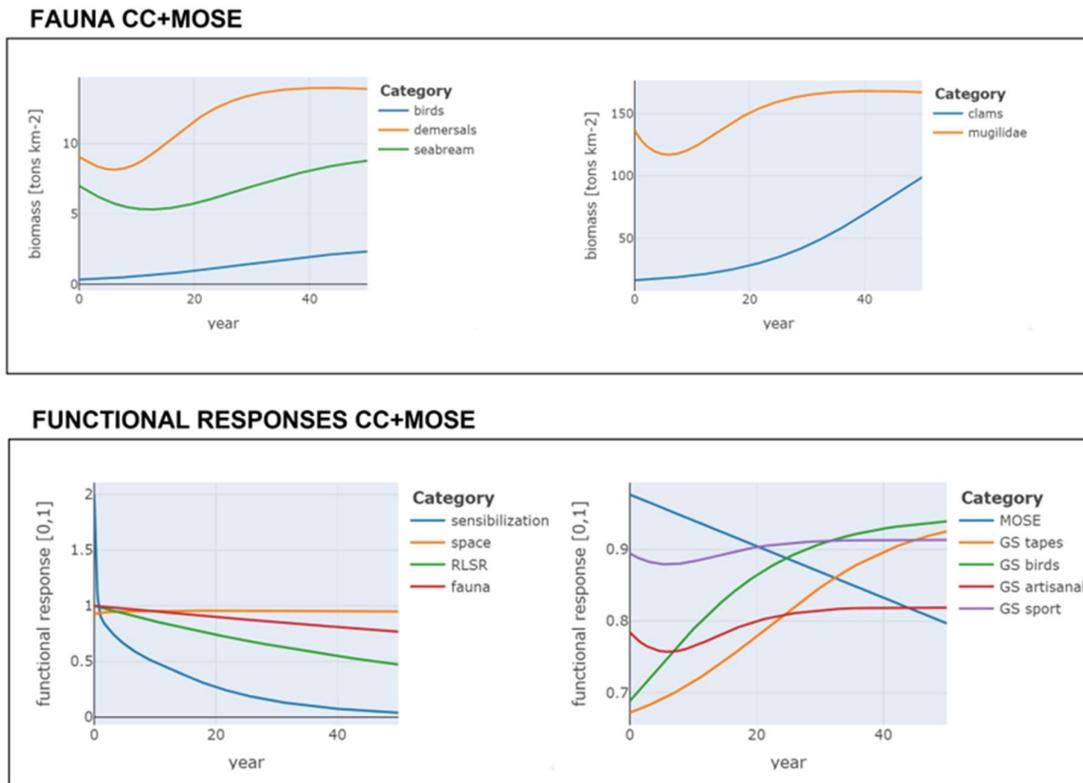


Figura 24 – Trend relativi allo scenario CC+MOSE per i sotto-moduli fauna e risposte funzionali

Come si può osservare, le biomasse dei gruppi fauna (fig. 24) risentono inizialmente di una pressione maggiore da parte delle attività di pesca. Questi livelli, tuttavia, non richiedono interventi importanti dal punto di vista della gestione della risorsa (GS per la pesca artigianale è intorno a 0.8). La successiva flessione dell'attività di pesca artigianale porta, comunque, come nello scenario BAU, a raggiungere la capacità portante stimata per ciascuno dei gruppi considerati (maggiore per mugilidi e tapes rispetto a demersali ed orate). Le simulazioni relative ai gruppi di fauna presentano alcune differenze rispetto allo scenario BAU sia nelle dinamiche che nei valori raggiunti. Queste differenze sono interpretabili principalmente in relazione all'effetto della temperatura sui tassi di accrescimento (come per esempio la risposta funzionale fauna, figura 24), che come risultato della flessione del servizio ecosistemico di regolazione dei cicli vitali (lifecycle maintenance, figura 25), che considera le zone di ghebi e praterie di fanerogame come aree di nursery, e che all'interno del modello risponde a variazioni nella frequenza delle chiusure delle barriere mobili alle bocche di porto (come ad esempio il MOSE – fig. 24).

## ECOSYSTEM SERVICES CC+MOSE

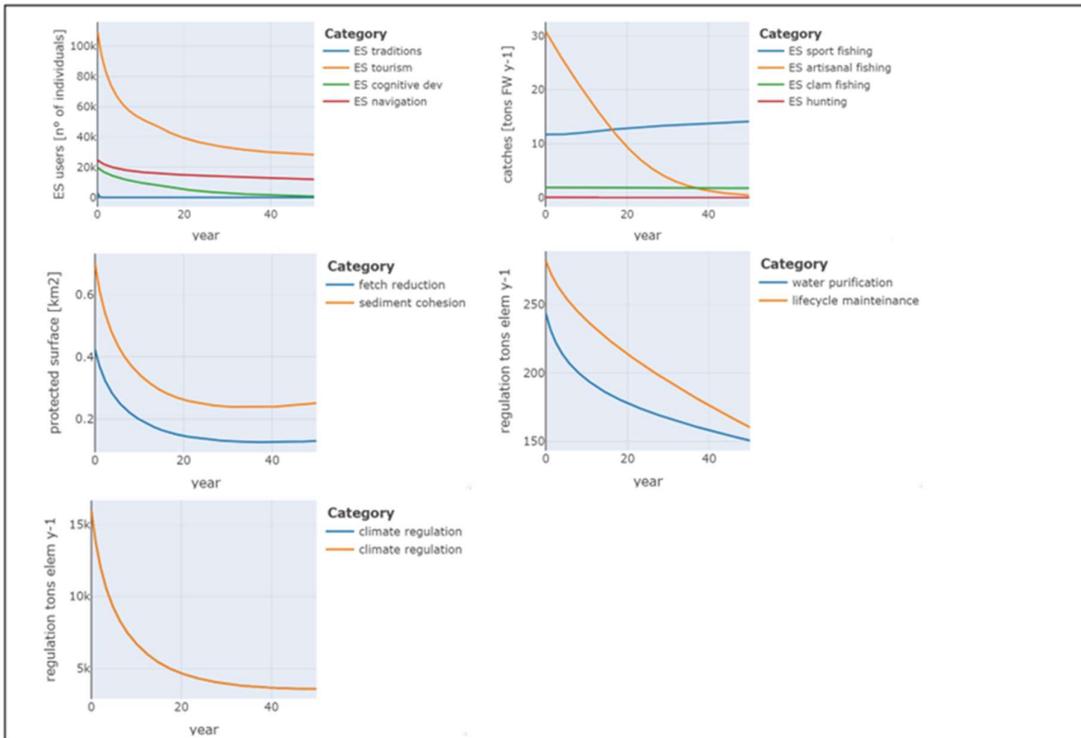


Figura 25 – Tendenze dello scenario CC+MOSE per il sotto-modulo relativo ai servizi ecosistemici

Come si può osservare in figura 25, i servizi ecosistemici presentano differenze rispetto allo scenario BAU nella dinamica simulata, interpretabili se si considerano le conseguenze delle variazioni delle variabili di stato del modello fin qui esposte. L'andamento dei servizi di approvvigionamento è principalmente controllato dagli attori, in funzione della disponibilità della risorsa. Gli stessi attori controllano la dinamica dei servizi culturali, come nel caso del servizio di sviluppo cognitivo e quello relativo alle tradizioni, la cui diminuzione è associata all'attuale flessione dei residenti lagunari e della relativa popolazione scolastica. L'iniziale flessione del turismo (tourism in figura 25) può essere interpretata come conseguenza della perdita di elementi del paesaggio lagunare (fig. 23), ma si mantiene in seguito su valori elevati, dato il notevole tasso di crescita degli attori. Per quanto riguarda i SE di regolazione e supporto, anche in questo caso il calo è molto marcato.

## Scenario GOV

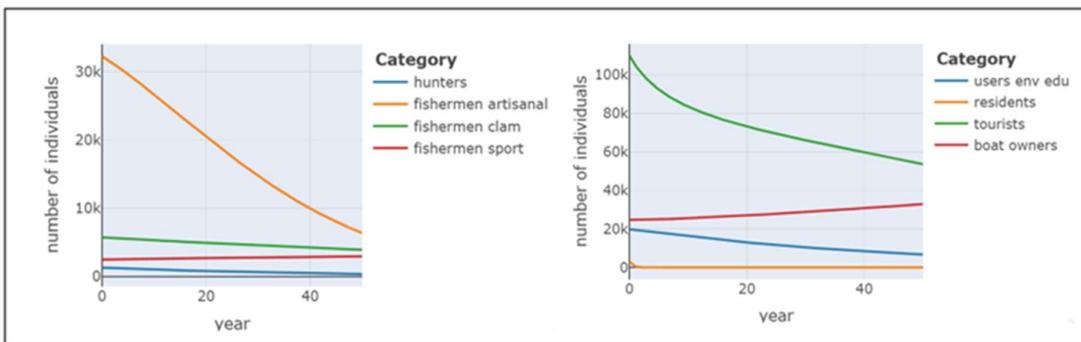
Come per lo scenario precedente, nelle seguenti immagini vengono mostrati i grafici dei trend risultanti dalle simulazioni per quanto riguarda lo scenario relativo alle azioni di governance (GOV). Lo scenario GOV considera la limitazione di turismo e navigazione da diporto e il tentativo di gestire in modo sostenibile la pesca artigianale.

Dai risultati visibili in figura 26 ci si attende una diminuzione nelle velocità di variazione delle diverse classi di attori e, nel caso dei pescatori artigianali, un contenimento della perdita complessiva, che non arriva alla completa "scomparsa" di questo tipo di attori che si verificherebbe invece nello scenario BAU. Ciò si riflette sia nei valori del servizio ecosistemico pesca artigianale che, come atteso, nelle biomasse dei principali gruppi target dell'attività di pesca, con una flessione più

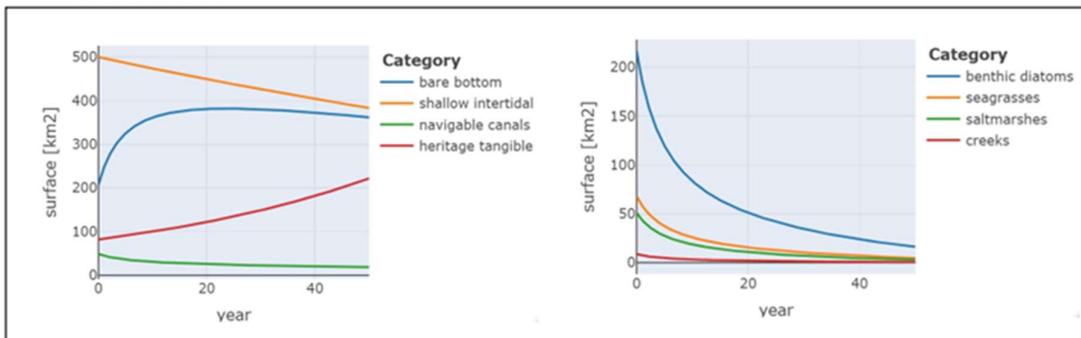
marcata su orate e demersali che a loro volta sostengono il mantenimento della stabilità dei pescatori artigianali. Le dinamiche degli habitat risultano essere influenzate in modo minore, indicazione del fatto che la riduzione del 50% del tasso di crescita di turisti e diportisti non è sufficiente per produrre delle retroazioni negative su canali e barene che ne permettono la conservazione, secondo l'attuale parametrizzazione considerata.

In questo scenario tutti i gruppi di fauna crescono, più o meno velocemente in base al gruppo considerato. Ad ogni modo, le risposte funzionali della fauna sono di piccola entità e si bilanciano con la risposta funzionale della governance che tende ad aumentare nel corso del tempo, nonostante la sensibilizzazione decresca. Questo ultimo risultato è collegato alla decrescita iniziale dei SE culturali. I SE di regolazione calano, ma più lentamente di quanto non accada negli scenari in assenza di governance, specialmente per i servizi di supporto al ciclo vitale.

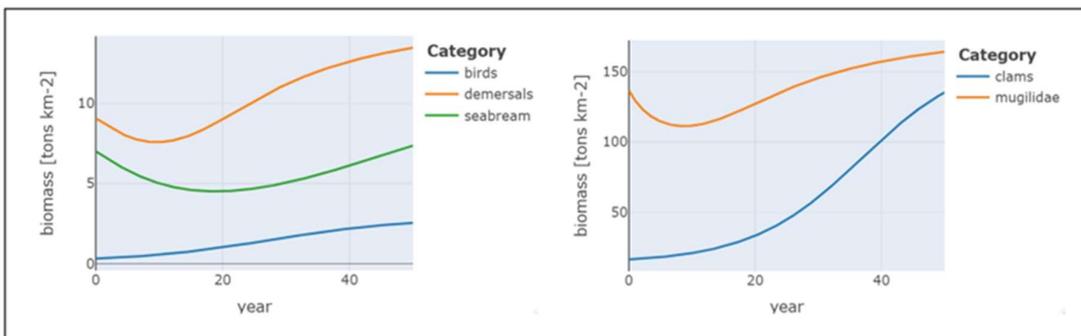
### ACTORS GOV



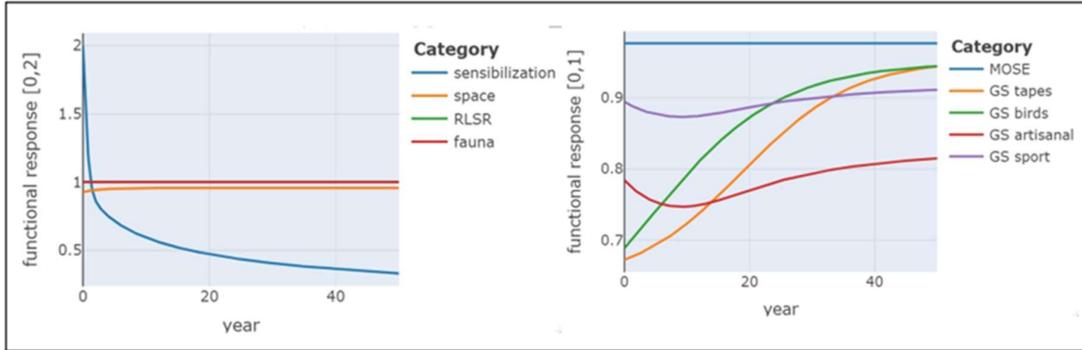
### SEASCAPE GOV



### FAUNA GOV



## FUNCTIONAL GOV



## ECOSYSTEM SERVICES GOV

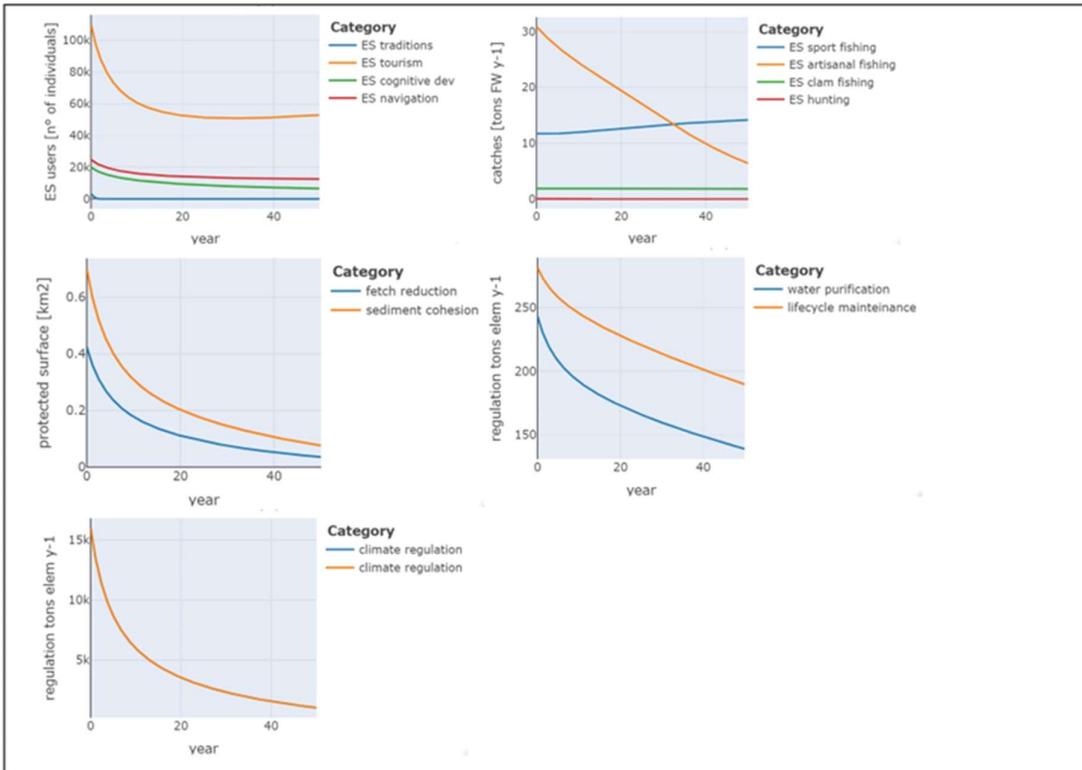


Figura 26 – Grafici relativi allo scenario GOV per tutti i sotto-moduli considerati

## Scenario TUR

Per quanto riguarda lo scenario che prevede il raddoppio del numero di turisti, si può notare in figura 27 come oltre ai turisti, non vi siano particolari differenze per quanto riguarda il resto degli attori coinvolti nello sfruttamento della laguna.

## ACTORS - TUR

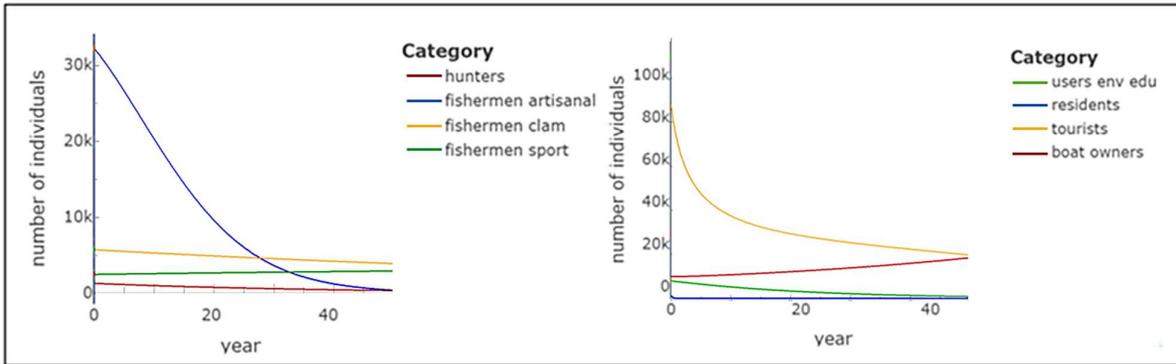


Figura 27 – Scenario TUR relativo al sotto-modulo attori

Per quanto riguarda invece gli elementi morfologici, si può notare in figura 28 che gli impatti del numero di turisti influenzano maggiormente le diatomee bentoniche rispetto agli altri elementi che invece si comportano come lo scenario BAU.

## SEASCAPE - TUR

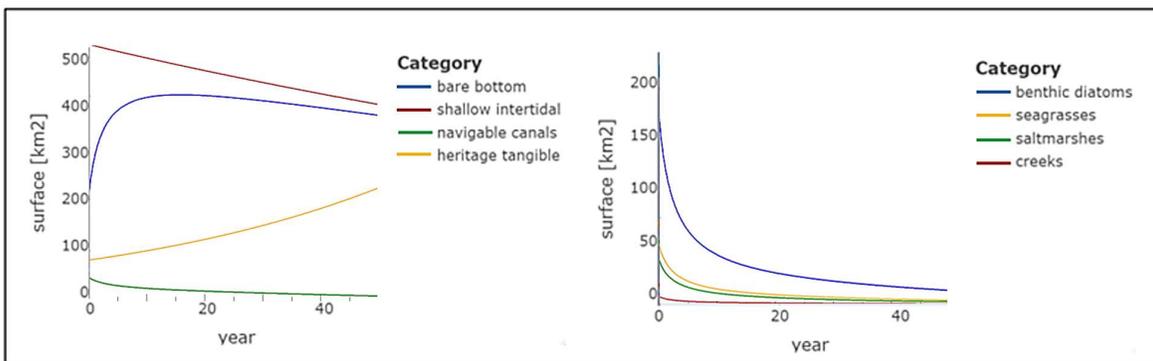


Figura 28 - Sotto-modulo degli elementi morfologici lagunari relativamente allo scenario TUR

Dalle simulazioni effettuate e visibili in figura 29 non risultano cambiamenti evidenti nel comparto della fauna, sia nei gruppi di pesci che di uccelli e molluschi, rispetto allo scenario BAU.

## FAUNA - TUR

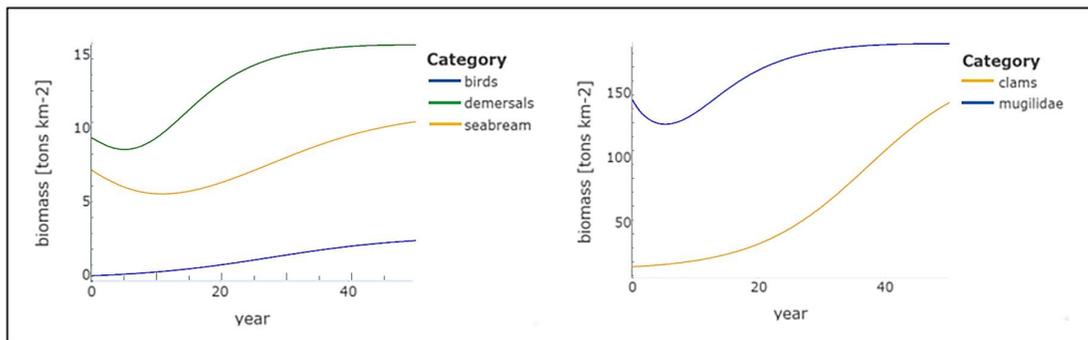


Figura 29 - Scenario TUR relativo al sotto-modulo della fauna

Analogamente a quanto descritto per la fauna, non si notano differenze sostanziali rispetto allo scenario BAU neppure in quello relativo alle simulazioni effettuate per le risposte funzionali del sistema (fig. 30).

### FUNCTIONAL RESPONSES - TUR

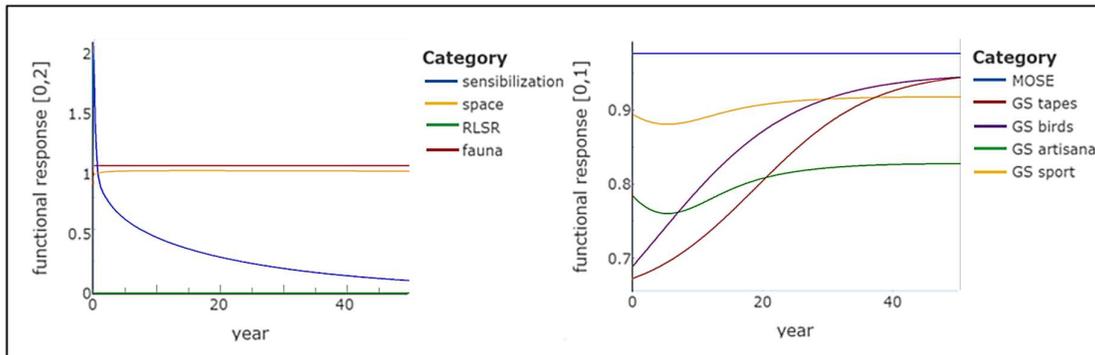


Figura 30 - Sotto-modulo delle risposte funzionali relativamente allo scenario TUR

Nelle simulazioni effettuate per la fornitura dei SE, visibile in figura 31 non si osservano differenze significative rispetto allo scenario BAU relativamente ai SE di tradizioni, turismo, pesca, navigazione, sviluppo cognitivo, caccia, prevenzione dall'erosione e regolazione del clima. Anche per i servizi di mantenimento dei cicli vitali e purificazione dell'acqua non sembrano esserci evidenti modificazioni delle tendenze.

### ECOSYSTEM SERVICES - TUR

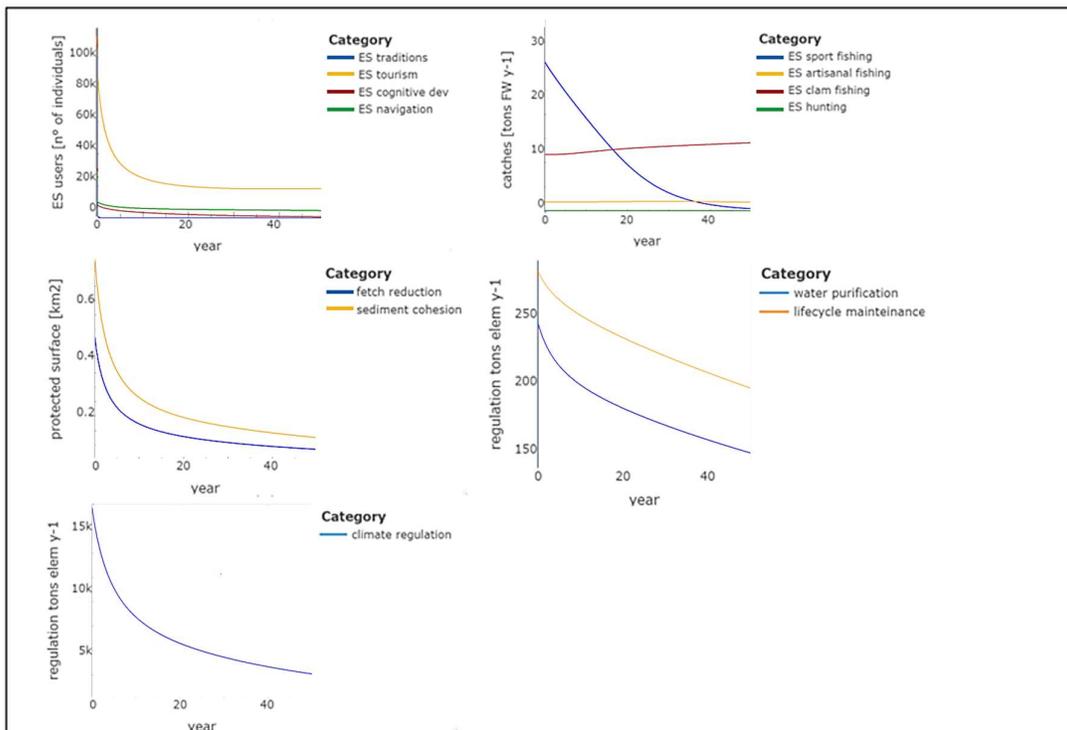


Figura 31 – Grafici relativi al sotto-modulo delle risposte funzionali per lo scenario TUR

## Scenario RES

In questo scenario si prevede l'inversione del tasso di crescita dei residenti (negativo nel caso dello scenario BAU). Per quanto riguarda il sotto-modulo degli attori (fig. 32), non si osservano variazioni significative rispetto allo scenario BAU, se non nel numero dei residenti che incrementa, dapprima molto velocemente, per poi stabilizzarsi e rimanere circa costante.

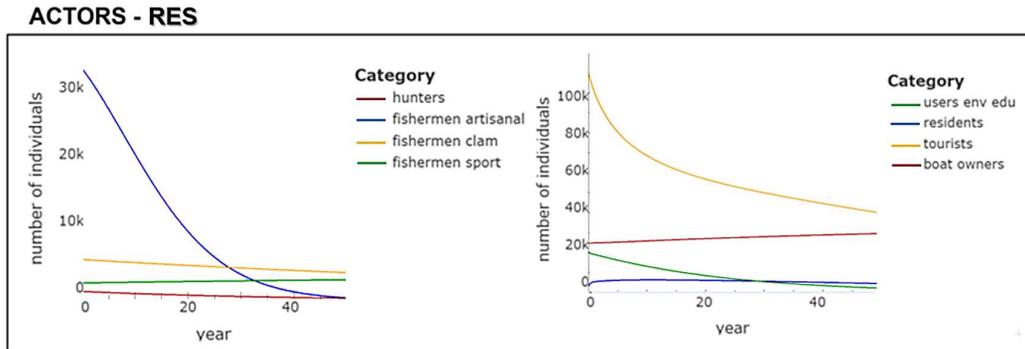


Figura 32 – Simulazioni dello scenario RES per il sotto-modulo degli attori

Come si può osservare dalle figure 33 e 34, non si osservano particolari variazioni neppure nel sotto-modulo delle morfologie ed elementi lagunari così come per il sotto-modulo della fauna rispetto allo scenario di riferimento.

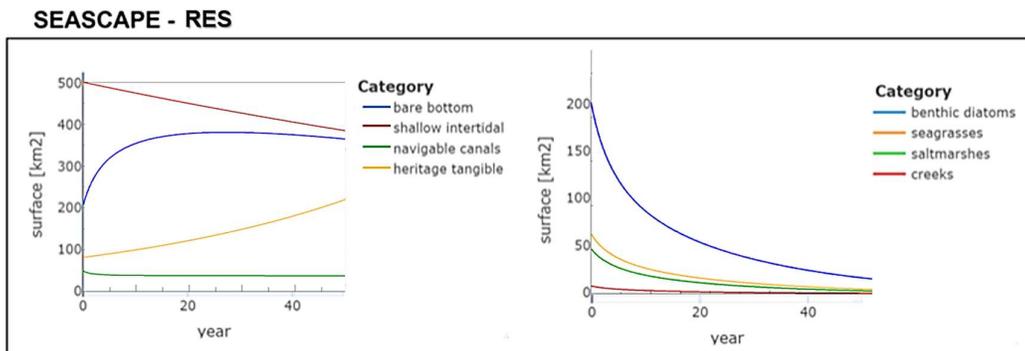


Figura 33 - Scenario RES per il sotto-modulo degli elementi lagunari

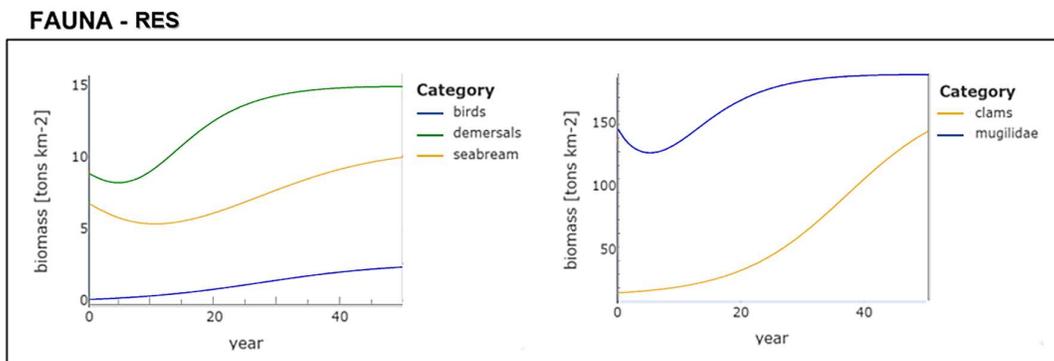


Figura 34 – Simulazioni relative allo scenario RES per il sotto-modulo “fauna”

Nel sotto-modulo delle risposte funzionali (fig. 35) si osserva l'effetto maggiore in particolare nell'elemento sensibilizzazione che invece di decrescere direttamente fin da subito, prevede una iniziale salita per poi scendere in modo più dolce rispetto alla curva dello scenario BAU (fig. 19).

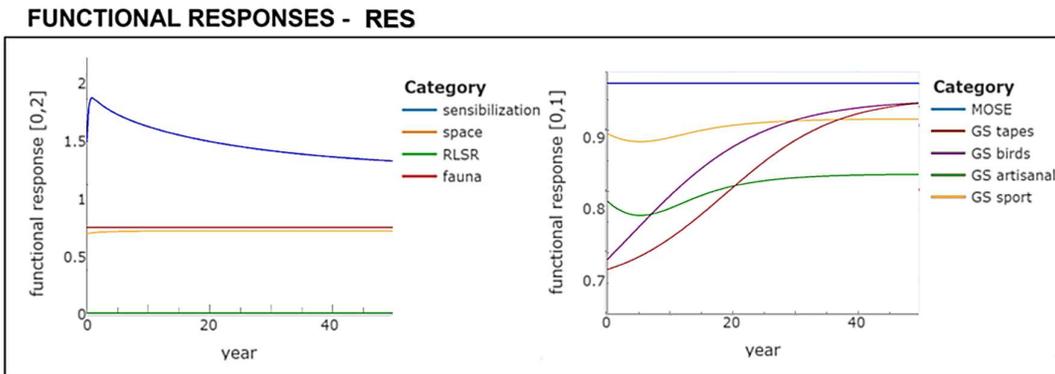


Figura 35 – Tendenze delle risposte funzionali relative allo scenario RES

Anche per quanto riguarda i SE (fig. 36) non si osservano particolari variazioni nello scenario RES rispetto allo scenario BAU (fig. 21) dovute all'aumento dei residenti nella zona di laguna di Venezia.

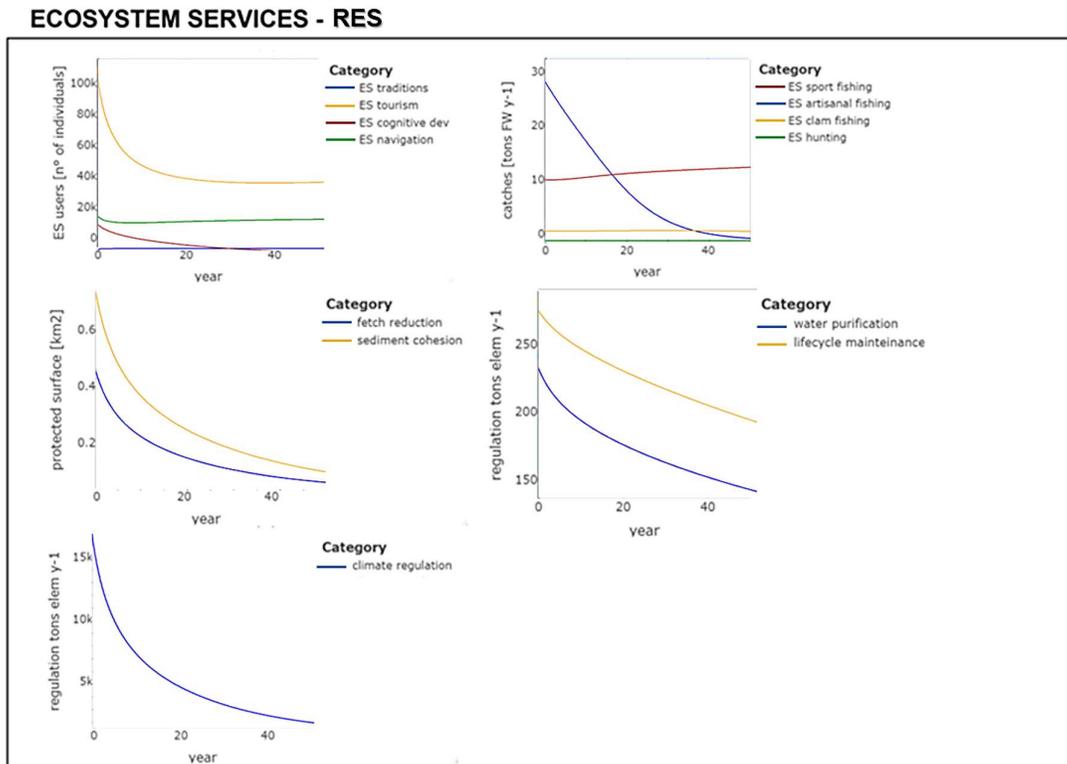


Figura 36 – Grafici relativi allo scenario RES per il sotto-modulo dei servizi ecosistemici

## Analisi di sensitività

Nel corso della fase di parametrizzazione del modello, alcuni parametri sono risultati più difficoltosi di altri nella stima del valore o del range di valori da assegnare. Questo per una serie di motivi, tra i quali: mancanza di fonti attendibili nella stima di determinati parametri; presenza di fonti in letteratura non recenti; presenza di dati o di fonti riferite non alla laguna di Venezia, bensì ad altre zone; mancanza o carenza di studi relativi ad un determinato parametro; mancanza di univocità tra i valori riscontrati in fonti diverse; approssimazione di alcune stime; incertezza dovuta alla stima mediante giudizio esperto.

Per questo motivo si è scelto di condurre un'analisi di sensitività su alcuni parametri, per vedere se il valore stimato fosse ben tollerato dal modello, oppure se una variazione di quest'ultimo portasse a variazioni considerevoli nello scenario analizzato.

L'analisi di sensitività è stata condotta utilizzando lo scenario BAU (Business As Usual) all'interno del software SIMILE variando ogni singolo parametro considerato critico e lasciando invariati i valori degli altri parametri. La variazione del valore del parametro è stata eseguita incrementando o decrementando il valore del parametro di  $\pm 5\%$  e  $\pm 10\%$ .

## Numero di cacciatori ed effetto sull'avifauna

Come evidenziato dai grafici proposti nelle figure 37, 38, 39 e 40, anche una variazione compresa tra un  $+10\%$  e un  $-10\%$  del valore rappresentante il numero di cacciatori in laguna di Venezia, sembra non influire in modo significativo all'andamento del comparto di fauna, in particolare agli uccelli.

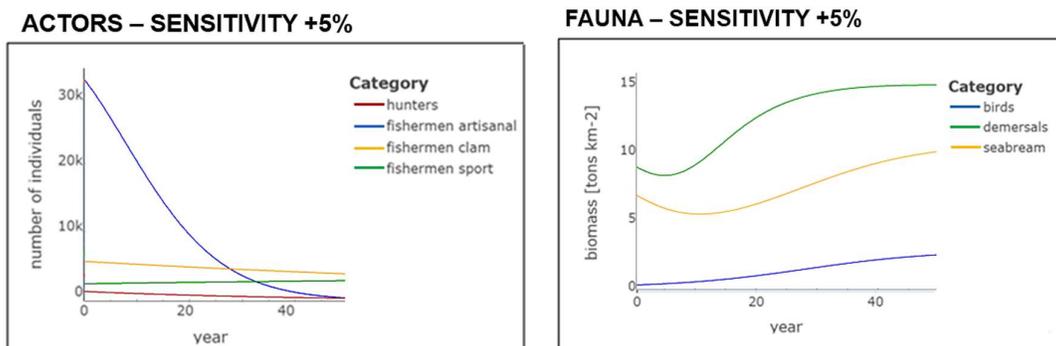


Figura 37 – Analisi di sensitività condotta con un incremento di  $+5\%$

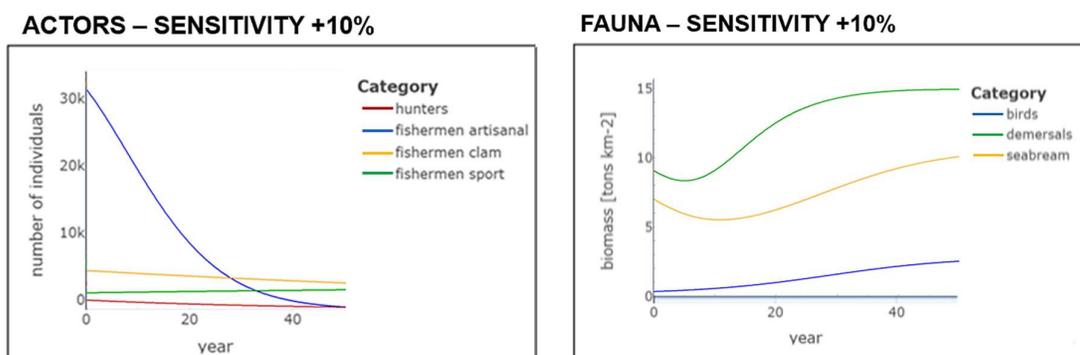
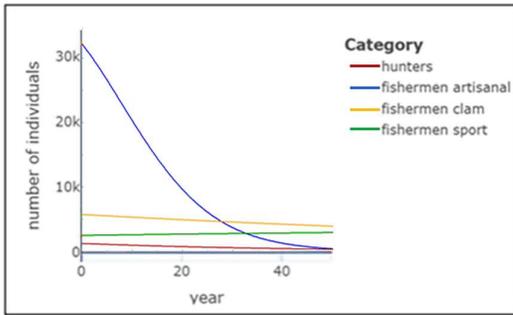


Figura 38 – Analisi di sensitività condotta con un incremento di  $+10\%$

**ACTORS – SENSITIVITY -5%**



**FAUNA – SENSITIVITY -5%**

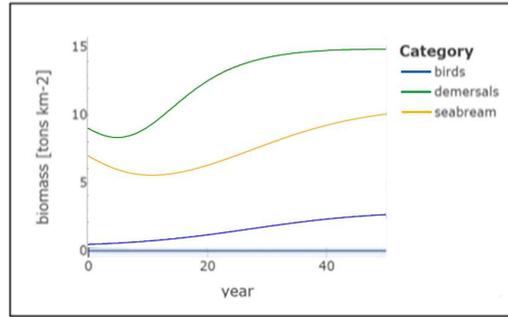
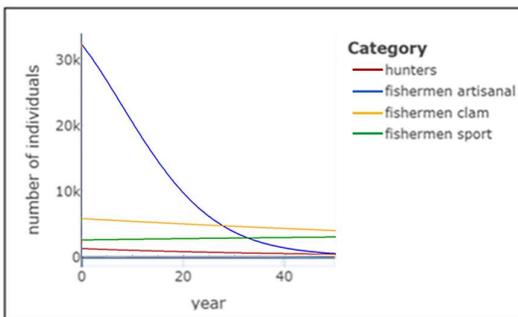


Figura 39 – Analisi di sensitività condotta con un decremento di -5%

**ACTORS – SENSITIVITY -10%**



**FAUNA – SENSITIVITY -10%**

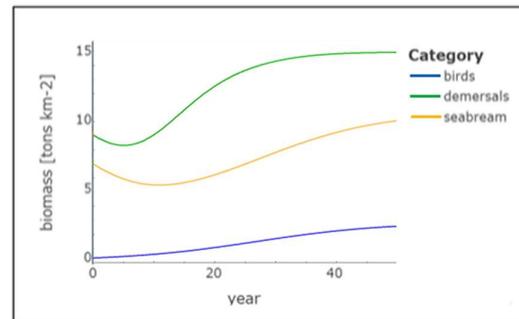
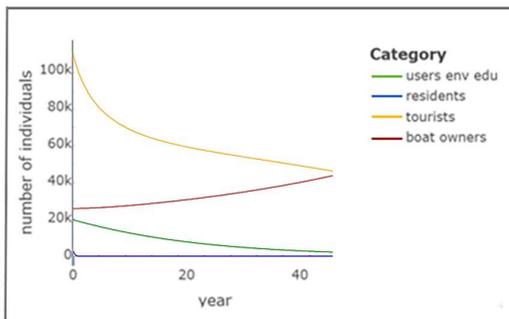


Figura 40 – Analisi di sensitività condotta con un decremento di -10%

## Diportisti con plot su elementi della morfologia lagunare e sui SE

Anche i grafici relativi all'analisi condotta (fig. 41, 42, 43, 44) su un valore incerto come il numero di diportisti, non sembrano evidenziare particolari difformità rispetto agli andamenti senza variazione del valore in oggetto di analisi.

**ACTORS – SENSITIVITY +5%**



**SEASCAPE – SENSITIVITY +5%**

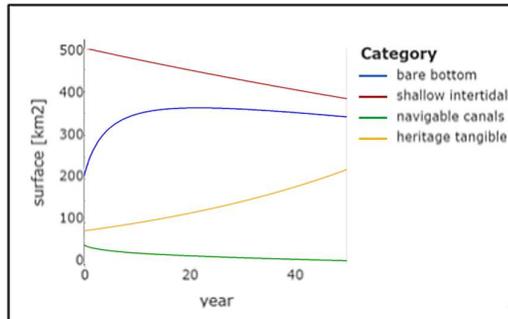
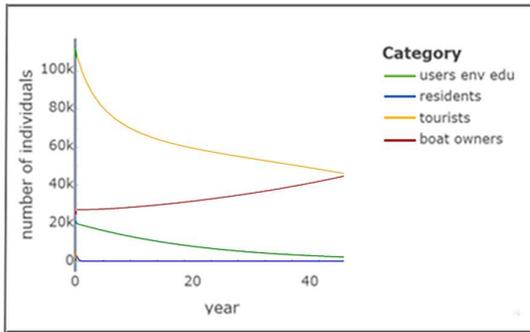


Figura 41 – Analisi di sensitività condotta con un incremento di +5%

**ACTORS – SENSITIVITY +10%**



**SEASCAPE – SENSITIVITY +10%**

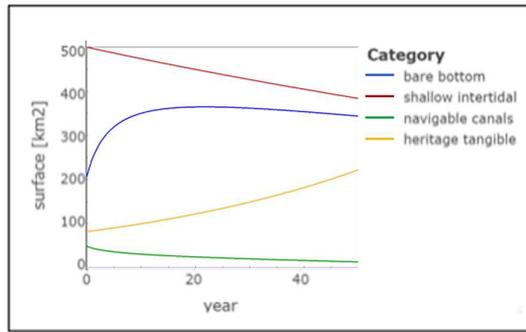
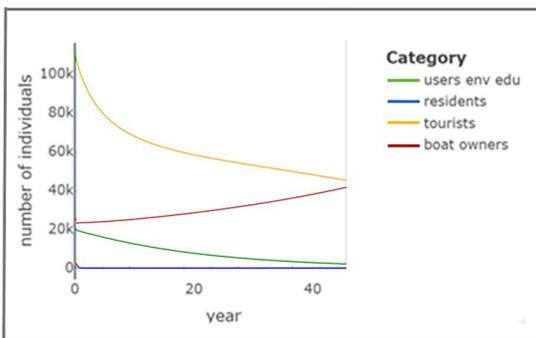


Figura 42 – Analisi di sensitività condotta con un incremento di +10%

**ACTORS – SENSITIVITY -5%**



**SEASCAPE – SENSITIVITY -5%**

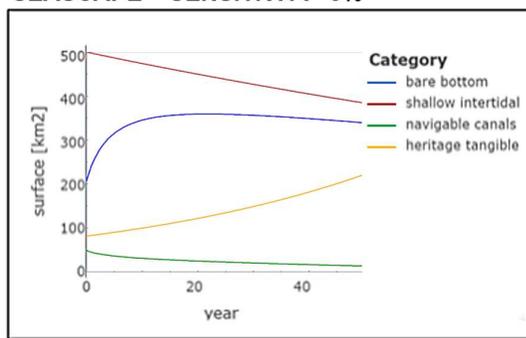
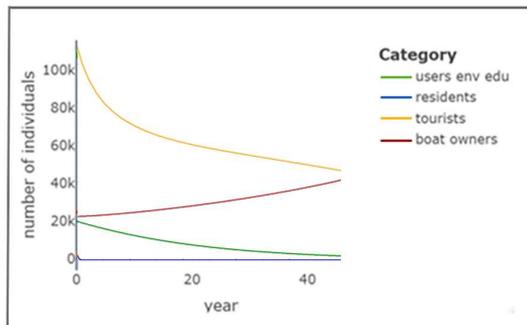


Figura 43 – Analisi di sensitività condotta con un decremento di -5%

**ACTORS – SENSITIVITY -10%**



**SEASCAPE – SENSITIVITY -10%**

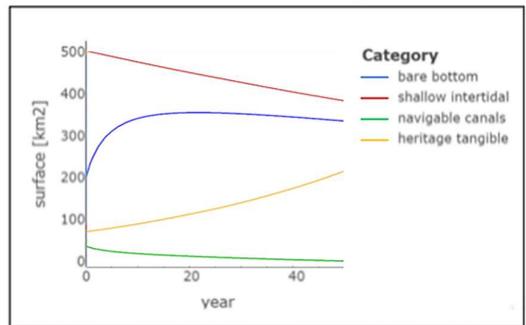


Figura 44 – Analisi di sensitività condotta con un decremento di -10%

## Discussione e conclusioni

Come si è potuto evidenziare, l'approccio modellistico utilizzato risulta essere inserito in un contesto di continuo miglioramento per quanto concerne gli approcci modellistici dei SE ed in particolare nell'ambito della laguna di Venezia. Grazie al framework offerto dall'approccio SES proposto da Ostrom (McGinnis & Ostrom, 2014c; Ostrom, 2009b), è stato possibile considerare non solo la componente ambientale, ma anche le componenti economica e sociale. Il riconoscimento delle variabili e dei processi principali che agiscono in laguna non è immediato, e questo tipo di analisi necessita di semplificazioni che non sempre sono facilmente conciliabili con sistemi complessi e con l'approccio offerto dalla dinamica dei sistemi. L'approccio integrato tra sistema sociale ed ecologico è la base per poter comprendere meglio le interazioni che intercorrono tra SE multipli (Bennett et al., 2009). A questo proposito, i risultati mostrano che l'integrazione delle interazioni sociali ed ecologiche sono cruciali per comprendere le tendenze dei vari SE, e che sono causate da diversi fattori.

Inoltre, la dinamica offerta da questo approccio permette di poter simulare gli effetti di diverse politiche di governance e degli effetti sulla laguna. Gli output che vengono offerti possono essere utilizzati dai soggetti coinvolti nella governance dell'ambiente lagunare per poter pianificare le politiche da adottare e misurare i progressi (Martinez-Harms et al., 2015).

Alcuni esempi derivano proprio da questi output. Tra le considerazioni che si possono effettuare sui trend ottenuti dalle simulazioni, si può evidenziare, ad esempio, che allo stato attuale la laguna di Venezia mostra degli andamenti tendenzialmente negativi e con perdita sempre maggiore di elementi caratteristici degli ambienti acquatici di transizione, come le barene o i bassifondi vegetati.

In alcuni scenari, il patrimonio culturale tangibile risulta essere in crescita a causa della maggior attrattività ipotizzata per la città di Venezia con la peculiarità di sorgere sull'acqua. Si è ipotizzato, infatti, che il fenomeno dell'acqua alta possa attirare, entro una certa soglia, un numero maggiore di turisti. Oltrepassata questa soglia (impostata a +10 cm), l'acqua alta potrebbe invece rappresentare motivo di disagio, per questo motivo le dinamiche del turismo risultano in aumento e poi si stabilizzano.

La diminuzione degli elementi di bassifondi vegetati e delle aree intertidali è causata in prima analisi dall'aumento del livello del mare (RSLR). L'aumento del livello del mare porta ad un approfondimento dei bassifondi e ad una perdita di superficie vegetata a causa dell'aumento della profondità della colonna d'acqua, che rende l'habitat meno idoneo alla colonizzazione delle fanerogame e delle diatomee bentoniche per via della minor luce disponibile alla profondità sempre maggiore. I bassifondi non vegetati quindi aumentano in prima fase perché c'è una diminuzione delle specie strutturanti come le fanerogame e le diatomee bentoniche. La fauna invece mostra in tutti gli scenari dei trend positivi dovuti probabilmente alla diminuzione generalizzata degli attori e quindi alla possibilità di crescere nelle popolazioni fino a raggiungere la capacità portante. Per quanto riguarda lo scenario con le attività di governance (GOV), la situazione della laguna rimane comunque molto difficile a causa della compromissione degli elementi che possono fornire i SE considerati. Questi SE, infatti, risultano essere comunque in calo in linea generale, salvo per qualche eccezione.

Lo scenario relativo al raddoppio del numero di turisti (TUR) mostra una situazione della laguna ulteriormente peggiorata nella fornitura dei SE e nelle risposte funzionali rispetto a quanto previsto nello scenario BAU. Lo scenario relativo all'inversione del tasso di crescita dei residenti (RES) invece,

non mostra particolari differenze rispetto allo scenario di riferimento (BAU). Questo potrebbe essere dovuto al fatto che, seppur il tasso di crescita sia positivo, il numero dei residenti di partenza risulta essere abbastanza basso, pertanto nell'orizzonte temporale considerato (50 anni), la crescita del numero di residenti potrebbe non essere sufficiente per evidenziare particolari effetti sul sistema in generale. La perdita generale di SE evidenziata dalle simulazioni esplorative risulta essere in ogni caso molto marcata. Questo dovrebbe essere scongiurato mettendo in campo azioni di governance maggiormente mirate ed efficaci, rispetto a quelle ipotizzate, per evitare perdite irreversibili a carico del fragile ecosistema lagunare che si riverserebbero sul benessere umano, inteso sia in termini sociali, che economici e ambientali.

Dalle analisi condotte grazie al modello EST e sul modello stesso, è stato possibile evidenziare diversi aspetti positivi così come diverse criticità. In particolare, è stato possibile sottolineare come la quantità di parametri e variabili inserite, oltre che di link e feedback, sia cruciale nel modello per la stabilità e la possibilità di poter cambiare i singoli parametri con fini esplorativi delle possibili traiettorie gestionali. I risultati ottenuti come output delle simulazioni mostrano come la laguna sia interconnessa nei suoi sotto-moduli e che la presenza di variabili rappresentative del cambiamento climatico (RSLR e Temperatura) sono essenziali per capire i driver di cambiamento e le implicazioni di gestione future. I risultati ottenuti tuttavia sono da considerarsi in un'ottica dimostrativa, volta ad esplorare le potenzialità di utilizzo dello strumento. È opportuno sottolineare come tale risultato vada necessariamente approfondito con ulteriori simulazioni, al fine di comprendere al meglio le complesse interdipendenze all'interno del sistema e le loro retroazioni. Oltre all'ulteriore affinamento della parametrizzazione, sembrerebbe di interesse considerare, tra le future direzioni di sviluppo di questa attività di modellazione, quella di affinare l'interazione con i modelli attualmente in uso per la simulazione delle reti trofiche lagunari, largamente utilizzati nella parametrizzazione del presente strumento. Inoltre, un miglioramento della parametrizzazione, che permetta di confrontare i risultati tra diversi sottosistemi lagunari, rappresenterebbe un importante passo in avanti in un'ottica di comprensione delle dinamiche studiate e dei processi alla loro base. L'incertezza del modello risiede principalmente nell'aggregazione di variabili diverse e nella semplificazione di alcuni dei processi rappresentati, a causa della necessità di approssimare degli andamenti di popolazione sotto forma di equazione derivabile in punti diversi della funzione. Ciò è dovuto al fatto che il considerare SE multipli e le loro interazioni aumenta la complessità del modello e degli scenari. In questo contesto, l'analisi di sensitività condotta, seppur limitata a due parametri di prova, mostra complessivamente dei risultati che possono essere considerati ecologicamente verosimili, sebbene si sia riscontrata una sensitività relativamente bassa alle variazioni dei dati in input. Di conseguenza, il modello può essere considerato abbastanza affidabile nella rappresentazione delle tendenze generali prodotte dai principali driver di cambiamento e dalle diverse strategie gestionali, ma attualmente può ancora essere considerato un modello esplorativo.

Per quanto concerne l'applicazione del modello alla laguna di Venezia, possiamo sicuramente fare alcune valutazioni generali sulle tendenze ricavate dagli scenari trattati. In dettaglio, con le politiche gestionali e i trend attuali, la componente di cambiamento climatico risulta essere molto importante nel determinare gli output osservati. Dal modello presentato si possono notare gli andamenti di vari sotto-moduli che mostrano un calo generale per quanto riguarda gli attori (ad eccezione del turismo in alcuni tratti), gli elementi morfologici (come le superfici vegetate), la perdita di elementi cruciali come le barene a causa del RSLR e, come conseguenza, la perdita di molte funzioni e dei relativi servizi ecosistemici. Negli scenari gestionali adattativi, sebbene meno verosimili, si è provato ad immaginare la situazione dovuta ad un raddoppio del numero di turisti (scenario possibile solo se la governance dovesse permettere lo sfruttamento della laguna a fini turistici in modo incontrollato)

oppure ad un aumento dei residenti (con inversione del trend attualmente evidenziato). Quest'ultimo scenario potrebbe essere possibile grazie a strumenti di governance che incentivino la residenzialità e l'insediamento nelle aree della laguna oggetto di spopolamento.

Per concludere, si può affermare che il modello EST, basato sul framework SES proposto da Ostrom (2009), sia utile ed efficace come strumento che possa esplorare le interazioni complesse tra i SE e tra questi e gli elementi del sistema. Tra i punti di forza si può menzionare la capacità del modello di rappresentare ed esplorare scenari diversi, modificando pochi semplici parametri inseriti in un'interfaccia tutto sommato semplice ed intuitiva. Questo modello potrebbe permettere già in questa fase di rappresentare scenari verosimili da parte degli stakeholder, per esplorare i possibili effetti di azioni e politiche concrete. Nonostante non sia un modello sociale, le componenti inserite relativamente agli attori e ai SE, permettono di comunicare in modo più efficace eventuali tendenze ambientali sull'intero socio-ecosistema. Ciò conferma che, nonostante le difficoltà derivate dalla rappresentazione con equazioni matematiche delle interazioni multiple con le necessarie semplificazioni, la teoria della dinamica dei sistemi si sposa bene con il framework SES. In questo senso, il modello proposto risulta essere una delle chiavi per monitorare e cercare di prevedere l'evoluzione di un socio-ecosistema complesso come quello della laguna di Venezia, in risposta sia a forzanti esterne che ad azioni gestionali, integrandosi sempre più con gli strumenti ad oggi disponibili. L'integrazione tra più strumenti di ambito diverso infatti potrebbe allargare gli orizzonti offerti da un singolo modello. Tra le criticità sollevate nel periodo di ricerca, possiamo evidenziare la difficoltà nella parametrizzazione di alcuni parametri, legati soprattutto alla componente sociale e culturale. I feedback proposti all'interno del modello potrebbero inoltre essere ulteriormente implementati per considerare quante più interazioni possibile tra i vari elementi. Alcuni esempi possono essere la mancanza della modellazione del moto ondoso causato da turisti e da diportisti sulle strutture della laguna di barena, oppure la considerazione della laguna come sistema chiuso senza scambio di risorse con il mare. Un'altra criticità potrebbe essere la mancanza di informazioni all'interno del modello relativamente alla spazializzazione degli impatti e degli effetti sugli elementi morfologici o sugli stock di fauna. La struttura del modello potrebbe quindi essere modificata in un'ottica di miglioramento, andando ad integrare variabili o parametri sempre meno generici e più puntuali, per cercare di cogliere quante più dinamiche e processi possibili. In questo modo, sarà possibile affinare di pari passo la fase di parametrizzazione, per poter irrobustire sempre più la struttura e l'affidabilità del modello. Questo permetterebbe di presentare uno strumento modellistico più efficace agli attori e soprattutto ai gestori che tramite le politiche locali hanno il compito di salvaguardare la laguna e i suoi ecosistemi, in uno scenario di cambiamento climatico sempre più accentuato che necessita di processi partecipativi e convinzione nell'adozione di misure gestionali volte all'adattamento e alla mitigazione dei vari impatti.

## Bibliografia

- Anelli Monti, M., Brigolin, D., Franzoi, P., Libralato, S., Pastres, R., Solidoro, C., Zucchetta, M., & Pranovi, F. (2021). Ecosystem functioning and ecological status in the Venice lagoon, which relationships? *Ecological Indicators*, 133. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.108461>
- Associazione Faunisti Veneti. (2013). *Censimento degli uccelli acquatici svernanti in provincia di Venezia*. <https://www.faunistiveneti.it/pubblicazioni/#1478699679065-38d7dc79-8a6f>
- Atlante della laguna di Venezia*. (n.d.). Retrieved 19 September 2022, from <http://www.atlantedellalaguna.it/>
- Bennett, E. M., Peterson, G. D., & Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12(12), 1394–1404. <https://doi.org/10.1111/J.1461-0248.2009.01387.X>
- Boumans, R., Costanza, R., Farley, J., Wilson, M. A., Portela, R., Rotmans, J., Villa, F., & Grasso, M. (2002). Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model. *Ecological Economics*, 41, 529–560. [www.elsevier.com/locate/ecolecon](http://www.elsevier.com/locate/ecolecon)
- Boumans, R., Roman, J., Altman, I., & Kaufman, L. (2015). *The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.004>
- Chen, Q., Han, R., Ye, F., & Li, W. (2011). Spatio-temporal ecological models. *Ecological Informatics*, 6(1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2010.07.006>
- CICES. (n.d.).
- CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY UNITED NATIONS 1992. (n.d.).
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. v., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Curiel, D., Miotti, C., Checchin, E., Rismondo, A., & Pierini, A. (n.d.). *DISTRIBUZIONE DELLE FANEROGAME MARINE NELLA LAGUNA DI VENEZIA (NORD ADRIATICO) AL 2017 E CONFRONTO STORICO CON IL PASSATO*. Retrieved 10 June 2022, from <http://www.igmi.org/voli/>
- D'alpaos, C., & D'alpaos, A. (2021). The Valuation of Ecosystem Services in the Venice Lagoon: A Multicriteria Approach. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9485*, 13(17), 9485. <https://doi.org/10.3390/SU13179485>
- de Cecco, D. (2002). *Le associazioni di voga: una realtà molto vitale*.
- Defrancesco, E., & Rosato, P. (2000). *Recreation Management in Venice Lagoon*.
- Duggan, J. (2016). *An Introduction to System Dynamics*. 1–24. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-34043-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-34043-2_1)

- Elsawah, S., Pierce, S. A., Hamilton, S. H., van Delden, H., Haase, D., Elmahdi, A., & Jakeman, A. J. (2017). An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Texas Advanced Computing Center*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.001>
- Esparza, J., & Nielsen, M. (1994). Decidability issues for Petri Nets - a survey. *Journal Inform. Process. Cybernet. EIK*, 30(3), 143–160.
- Facca, C., & Sfriso, A. (2007). *Epipellic diatom spatial and temporal distribution and relationship with the main environmental parameters in coastal waters*. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.033>
- Fennel, K., Brady, D., Ditoro, D., Fulweiler, R. W., Gardner, W. S., Giblin, A., Mccarthy, M. J., Rao, A., Seitzinger, S., Thouvenot-Korppoo, M., & Tobias, C. (2008). *Modeling denitrification in aquatic sediments*. <https://doi.org/10.1007/S10533-008-9270-Z>
- Ferrarin, C., Madricardo, F., Rizzetto, F., Mc Kiver, W., Bellafiore, D., Umgiesser, G., Kruss, A., Zaggia, L., Foglini, F., Ceregato, A., Sarretta, A., & Trincardi, F. (2018). Geomorphology of Scour Holes at Tidal Channel Confluences. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(6), 1386–1406. <https://doi.org/10.1029/2017JF004489>
- FIPSAS Venezia. (2014). *Carta Ittica della Provincia di Venezia 2014-2019*. [http://www.fipsasvenezia.com/carta\\_ittica.php](http://www.fipsasvenezia.com/carta_ittica.php)
- Fitzgerald, D. M., & Hughes, Z. (2019). Marsh Processes and Their Response to Climate Change and Sea-Level Rise. <https://doi.org/10.1146/Annurev-Earth-082517-010255>, 47, 481–517. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-EARTH-082517-010255>
- Gatto, P., & Carbognin, L. (2009). The Lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification / La Lagune de Venise: l'évolution naturelle et les modifications humaines. <http://dx.doi.org/10.1080/02626668109490902>, 26(4), 379–391. <https://doi.org/10.1080/02626668109490902>
- Girault, C., & Valk, R. (2003). *Petri Nets for Systems Engineering*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05324-9>
- G.R.A.L. (2016). *PIANO DI GESTIONE DELLE AREE NURSERY DI TAPES PHILIPPINARUM*.
- Green, R. E., & Pain, D. J. (2016). Possible effects of ingested lead gunshot on populations of ducks wintering in the UK. *Ibis*, 158(4), 699–710. <https://doi.org/10.1111/IBI.12400>
- Greiner, J. T., McGlathery, K. J., Gunnell, J., & McKee, B. A. (2013). Seagrass Restoration Enhances “Blue Carbon” Sequestration in Coastal Waters. *PLOS ONE*, 8(8), e72469. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0072469>
- Haines, P. E., Tomlinson, R. B., & Thom, B. G. (2006). Morphometric assessment of intermittently open/closed coastal lagoons in New South Wales, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1), 321–332. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.12.001>
- Hallouin, T., Bruen, M., Christie, M., Bullock, C., & Kelly-Quinn, M. (2018). Challenges in Using Hydrology and Water Quality Models for Assessing Freshwater Ecosystem Services: A Review. *Geosciences* 2018, Vol. 8, Page 45, 8(2), 45. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES8020045>

- Homepage | Convention on Wetlands. (n.d.). Retrieved 19 September 2022, from <https://www.ramsar.org/>
- Huang, G., & Isobe, M. (2012). Carrying capacity of wetlands for massive migratory waterfowl. *Hydrobiologia*, 697(1), 5–14. <https://doi.org/10.1007/S10750-012-1165-2/FIGURES/15>
- Ioana, A., Hanspach, J., Abson, D., Fischer, J., Ioana Milcu, A., Hanspach, J., Abson, D., & Fischer, J. (2013). Cultural Ecosystem Services: A Literature Review and Prospects for Future Research. *Ecology and Society, Published Online: Sep 30, 2013* | Doi:10.5751/ES-05790-180344, 18(3). <https://doi.org/10.5751/ES-05790-180344>
- Kjerfve, B. (1994). Coastal lagoon processes. *Coastal Lagoon Processes*, 60, 1–8.
- Kjerfve, B., & Magill, K. E. (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 88(3–4), 187–199. [https://www.academia.edu/4068388/Geographic\\_and\\_hydrodynamic\\_characteristics\\_of\\_shallow\\_coastal\\_lagoons](https://www.academia.edu/4068388/Geographic_and_hydrodynamic_characteristics_of_shallow_coastal_lagoons)
- LegaCoop del Veneto, & Agriteco. (2015). Sperimentazione di un piano di gestione delle principali risorse alieutiche della laguna di Venezia. Progetto realizzato con finanziamento regionale nell'ambito del programma Fondo Europeo per la Pesca 2007-2013 'Sviluppo delle zone di pesca' - Misura 3.5 progetti/Operazioni Pilota. *Progetto FEP 03/OPI/2013*.
- Licheri, D., & Spina, F. (2005). *Biodiversità dell'avifauna italiana: variabilità morfologica nei non-passeriformi*. Istituto nazionale per la fauna selvatica "Alessandro Ghigi. <https://books.google.it/books?id=4Z1onQEACAAJ>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H., & Taylor, W. W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317(5844), 1513–1516. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1144004>
- Madricardo, F., Foglini, F., Campiani, E., Grande, V., Catenacci, E., Petrizzo, A., Kruss, A., Toso, C., & Trincardi, F. (2019). Assessing the human footprint on the sea-floor of coastal systems: the case of the Venice Lagoon, Italy. *Scientific Reports 2019 9:1*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43027-7>
- Madricardo, F., Foglini, F., Kruss, A., Ferrarin, C., Pizzeghello, N. M., Murri, C., Rossi, M., Bajo, M., Bellafiore, D., Campiani, E., Fogarin, S., Grande, V., Janowski, L., Keppel, E., Leidi, E., Lorenzetti, G., Maicu, F., Maselli, V., Mercorella, A., ... Trincardi, F. (2017). *Data Descriptor: High resolution multibeam and hydrodynamic datasets of tidal channels and inlets of the Venice Lagoon Background & Summary*. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.121>
- Marsh, G. P. (George P., & Lowenthal, D. (n.d.). *Man and nature*. Retrieved 19 September 2022, from <https://uwapress.uw.edu/book/9780295983165/man-and-nature>
- Martin, R., & Schlüter, M. (2015). Combining system dynamics and agent-based modeling to analyze social-ecological interactions—an example from modeling restoration of a shallow lake. *Frontiers in Environmental Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00066>
- Martin Svensson, J., & Marco Carrer, G. (2000). Nitrogen cycling in sediments of the Lagoon of Venice, Italy. *Marine Ecology Progress Series*, 199, 1–11.

- Martinez-Harms, M. J., Bryan, B. A., Balvanera, P., Law, E. A., Rhodes, J. R., Possingham, H. P., & Wilson, K. A. (2015). Making decisions for managing ecosystem services. *Biological Conservation*, *184*, 229–238. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2015.01.024>
- McGinnis, M. D., & Ostrom, E. (2014a). Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, *19*(2). <https://doi.org/10.5751/es-06387-190230>
- McGinnis, M. D., & Ostrom, E. (2014b). Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, *Published Online: May 20, 2014* / *Doi:10.5751/ES-06387-190230*, *19*(2). <https://doi.org/10.5751/ES-06387-190230>
- McGinnis, M. D., & Ostrom, E. (2014c). Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, *Published Online: May 20, 2014* / *Doi:10.5751/ES-06387-190230*, *19*(2). <https://doi.org/10.5751/ES-06387-190230>
- Millennium Ecosystem Assessment*. (n.d.). Retrieved 19 September 2022, from <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>
- Molinaroli, E., Guerzoni, S., Sarretta, A., Masiol, M., & Pistolato, M. (2009). Thirty-year changes (1970 to 2000) in bathymetry and sediment texture recorded in the Lagoon of Venice sub-basins, Italy. *Marine Geology*, *258*(1–4), 115–125. <https://doi.org/10.1016/J.MARGE.2008.12.001>
- Muetzelfeldt, R., & Massheder, J. (2003). The Simile visual modelling environment. *European Journal of Agronomy*, *18*(3–4), 345–358. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00112-0)
- Murata, T. (1989). Petri Nets : Properties , Analysis and Applcations. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, *77*(4), 541–580.
- Ochoa, V., & Urbina-Cardona, N. (2017). Tools for spatially modeling ecosystem services: Publication trends, conceptual reflections and future challenges. *Ecosystem Services*, *26*, 155–169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.011>
- Ostrom, E. (2009a). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, *325*(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Ostrom, E. (2009b). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, *325*(5939), 419–422. [https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1172133/SUPPL\\_FILE/OSTROM.SOM.PDF](https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1172133/SUPPL_FILE/OSTROM.SOM.PDF)
- Pastres, R., Brigolin, D., Petrizzo, A., & Zucchetta, M. (2004). Testing the robustness of primary production models in shallow coastal areas: A case study. *Ecological Modelling*, *179*(2), 221–233. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2004.06.006>
- Piano per la gestione delle risorse alieutiche delle lagune della provincia di Venezia*. (2000).
- Pranovi, F., Da Ponte, F., Raicevich, S., & Giovanardi, O. (2004). A multidisciplinary study of the immediate effects of mechanical clam harvesting in the Venice Lagoon. *ICES Journal of Marine Science*, *61*(1), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2003.10.003>
- Rasmusson, L. M., Nualla-Ong, A., Wutiruk, T., Björk, M., Gullström, M., & Buapet, P. (2021). Sensitivity of photosynthesis to warming in two similar species of the aquatic angiosperm

- ruppia from tropical and temperate habitats. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16), 9433. <https://doi.org/10.3390/SU13169433/S1>
- Report Venezia - CMCC. (n.d.). Retrieved 19 September 2022, from <https://www.cmcc.it/it/report-venezia>
- Rieb, J. T., Chaplin-Kramer, R., Daily, G. C., Armsworth, P. R., Böhning-Gaese, K., Bonn, A., Cumming, G. S., Eigenbrod, F., Grimm, V., Jackson, B. M., Marques, A., Pattanayak, S. K., Pereira, H. M., Peterson, G. D., Ricketts, T. H., Robinson, B. E., Schröter, M., Schulte, L. A., Seppelt, R., ... Bennett, E. M. (2017). When, Where, and How Nature Matters for Ecosystem Services: Challenges for the Next Generation of Ecosystem Service Models. *BioScience*, 67(9), 820–833. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIX075>
- Rova, S., Meire, P., Müller, F., Simeoni, M., & Pranovi, F. (2019a). A Petri net modeling approach to explore the temporal dynamics of the provision of multiple ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 655, 1047–1061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.184>
- Rova, S., Meire, P., Müller, F., Simeoni, M., & Pranovi, F. (2019b). A Petri net modeling approach to explore the temporal dynamics of the provision of multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 655, 1047–1061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.184>
- Rova, S., Meire, P., Müller, F., Simeoni, M., & Pranovi, F. (2019c). A Petri net modeling approach to explore the temporal dynamics of the provision of multiple ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 655, 1047–1061. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.184>
- Rova, S., & Pranovi, F. (2017). Analysis and management of multiple ecosystem services within a social-ecological context. *Ecological Indicators*, 72, 436–443. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.050>
- Rova, S., Pranovi, F., & Müller, F. (2015). Provision of ecosystem services in the lagoon of Venice (Italy): an initial spatial assessment. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 15(1), 13–25. <https://doi.org/10.1016/J.ECOHYD.2014.12.001>
- Rova, S., Stocco, A., & Pranovi, F. (2022). Ecosystem services' capacity and flow in the Venice Lagoon and the relationship with ecological status. *One Ecosystem 7: E79715*, 7, e79715-. <https://doi.org/10.3897/ONEECO.7.E79715>
- Russo, A. P. (2000). *The 'vicious Circle' of Tourism Development In Heritage Cities The 'vicious circle' of tourism development in heritage destinations.*
- Sarretta, A., Pillon, S., Molinaroli, E., Guerzoni, S., & Fontolan, G. (2010). Sediment budget in the Lagoon of Venice, Italy. *Continental Shelf Research*, 30(8), 934–949. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2009.07.002>
- Sawall, Y., Ito, M., & Pansch, C. (2021). Chronically elevated sea surface temperatures revealed high susceptibility of the eelgrass *Zostera marina* to winter and spring warming. *Limnology and Oceanography*, 66(12), 4112–4124. <https://doi.org/10.1002/LNO.11947>
- Sorokin, P. Y., Sorokin, Y. I., Zakuskina, O. Y., & Ravagnan, G. P. (2002). On the changing ecology of Venice lagoon. *Hydrobiologia* 2002 487:1, 487(1), 1–18. <https://doi.org/10.1023/A:1022939426396>

- Sorrenti, M., & Lenzoni, A. (2009). *ANALISI RAPPORTO ISPRA (EX INFS) SULLE SPECIE CACCIABILI - UCCELLI ACQUATICI-*.  
<http://www.bighunter.it/LinkClick.aspx?fileticket=T8fjW1Evc74%3d&tabid=922>
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics - Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill.
- System Dynamics Society | Home for Systems Thinkers and Modelers*. (n.d.). Retrieved 19 September 2022, from <https://systemdynamics.org/>
- Terrados, J., & Ros, J. D. (1995). Temperature Effects on Photosynthesis and Depth Distribution of the Seagrass *Cymodocea nodosa* (ucris) Ascherson in a Mediterranean Coastal Lagoon: the Mar Menor (SE Spain). *Marine Ecology*, 16(2), 133–144.  
<https://doi.org/10.1111/J.1439-0485.1995.TB00400.X>
- Tosi, L., Rizzetto, F., Zecchin, M., Brancolini, G., & Baradello, L. (2009). Morphostratigraphic framework of the Venice Lagoon (Italy) by very shallow water VHRS surveys: Evidence of radical changes triggered by human-induced river diversions. *Geophysical Research Letters*, 36(9). <https://doi.org/10.1029/2008GL037136>
- Tsioli, S., Orfanidis, S., Papathanasiou, V., Katsaros, C., & Exadactylos, A. (2019). Effects of salinity and temperature on the performance of *Cymodocea nodosa* and *Ruppia cirrhosa*: A medium-term laboratory study. *Botanica Marina*, 62(2), 97–108.  
<https://doi.org/10.1515/BOT-2017-0125>
- Umgiesser, G. (2020). The impact of operating the mobile barriers in Venice (MOSE) under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 54, 125783.  
<https://doi.org/10.1016/J.JNC.2019.125783>
- Umgiesser, G., Ferrarin, C., Cucco, A., de Pascalis, F., Bellafiore, D., Ghezzi, M., & Bajo, M. (2014). Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerical modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(4), 2212–2226.  
<https://doi.org/10.1002/2013JC009512>
- Vallini, M. (2019). *Il numero (vero) dei cacciatori*.
- van den Belt, Marjan. (2004). *Mediated modeling: a system dynamics approach to environmental consensus building*. 339.
- Veneto Agricoltura. (2020). *La Marineria di Venezia*.
- Vincenzi, S., Zucchetta, M., Franzoi, P., Pellizzato, M., Pranovi, F., de Leo, G. A., & Torricelli, P. (2011). *Ruditapes philippinarum* in the Venice lagoon. *Italy. Ecol. Model.*  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.007>
- Volpe, V. (2012). *LA GESTIONE DEI SEDIMENTI NELLA LAGUNA DI VENEZIA: LE PREVISIONI DELL' AGGIORNAMENTO DEL PIANO PER IL RECUPERO MORFOLOGICO E AMBIENTALE DELLA LAGUNA DI VENEZIA*. <https://www.slideshare.net/eambiente/volpe-gestione-sedimenti-piano-morfologicoadp8marzo2012>
- Zanchettin, D., Bruni, S., Raicich, F., Lionello, P., Adloff, F., Androsov, A., Antonioli, F., Artale, V., Carminati, E., Ferrarin, C., Fofonova, V., Nicholls, R. J., Rubinetti, S., Rubino, A., Sannino, G., Spada, G., Thiéblemont, R., Tsimplis, M., Umgiesser, G., ... Zerbini, S. (2021). Sea-level

rise in Venice: Historic and future trends (review article). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(8), 2643–2678. <https://doi.org/10.5194/NHESS-21-2643-2021>

## Appendice – Equazioni del modello

Equazione	Descrizione	#
ELEMENTI DI PAESAGGIO e PATRIMONIO CULTURALE		
$\dot{H}_{SI} = -k_{ER} \cdot (H_{SI} - EP_1 - EP_2) - \sum \mu_j \cdot H_{SI} \cdot SE_j, \quad (j = FC, TU, NA)$	Evoluzione di SI in risposta a processi di erosione	1.1
$\dot{H}_{CN} = -k_{SA} \cdot (H_{CN} - EP_1 - EP_2) - \varepsilon \cdot \sum \mu_j \cdot H_{CN} \cdot SE_j + f_{GS} \cdot H_{CN}, \quad (j = FC, TU, NA)$	Evoluzione di CN in risposta a processi di accumulo dei sedimenti	1.2
$H_{BB} = H_{SI} - (H_{SG} - H_{CR} - H_{BD})$	Superficie di BB	1.3
$\dot{H}_{SM} = k_{SM} \cdot f(RSLR) \cdot H_{SM} - \sum \varphi_j \cdot H_{SM} \cdot SE_j + f_{GS} \cdot H_{SM}, \quad (j = FC, TU, NA)$	Evoluzione di SM in risposta ad accrescimento ed erosione	1.4
$H_{CR} = H_{SM} \cdot k_{shape}$	Superficie CR	1.5
$\dot{H}_i = [v_i \cdot f_i(\Delta T) \cdot f_{space}] \cdot H_i - \sum \theta_j \cdot H_i \cdot SE_j + f_{GS} \cdot H_i, \quad (i = SG, BD; j = FC, TU, NA)$	Equazione per gli habitat vegetati	1.6
$f_i(\Delta T) = k_H^{\Delta T}$	Funzione di risposta della crescita di habitat vegetati alla variazione di temperatura	1.7
$f(RSLR) = e^{-k_R \cdot RSLR}$	Funzione di risposta della crescita di SM a RSLR	1.8
$f_{space} = \frac{BB}{F_0 + BB}$	Funzione di risposta della crescita di habitat subtidali alla disponibilità di spazio	1.9
$f_{GS} = GS_i \cdot f_{SENS}, \quad (i = SM, SG, CN)$	Funzione di risposta alla governance degli habitat	1.10

$f_{SENS} = \left[ 1 + \left( \frac{SE_{CD} - SE_{CD0}}{SE_{CD0}} \right) + \left( \frac{SE_{TR} - SE_{TR0}}{SE_{TR0}} \right) \right]$	Funzione di risposta alla sensibilizzazione	1.11
$\dot{H}E = k_{RSLR} \cdot HE$	Equazione per il patrimonio culturale	1.12
$k_{RSLR} = \begin{cases} 0.2, & 0 \leq RSLR \leq 10 \\ -0.2 \cdot f_{MO}, & RSLR > 10 \end{cases}$	Tasso di variazione del patrimonio culturale in funzione del Sea level rise	1.13
$f_{MO} = \frac{365 - GS_{MO}}{365}$	Funzione di risposta all'azionamento del MOSE	1.14
<b>FAUNA</b>		
$\dot{F}_k = r_k \cdot f_k(\Delta T) \cdot F_k \cdot \left( 1 - \frac{F_k}{f_{CC}} \right) - h_k \cdot f_{GSF} \cdot F_k \cdot (A_{FA} + A_{FS}),$ ( $k = MU, DE, SA, DL$ )	Equazione per le specie target della pesca sportiva e ricreativa	2.1
$\dot{F}_{RP} = r_{RP} \cdot f_k(\Delta T) \cdot F_{RP} \cdot \left( 1 - \frac{F_{RP}}{f_{CC}} \right) - h_{RP} \cdot F_{RP} \cdot A_{FC} \cdot (1 - f_{GSRP})$	Equazione per la vongola filippina	2.2
$\dot{F}_{BR} = r_{BR} \cdot f_k(\Delta T) \cdot F_{BR} \cdot \left( 1 - \frac{F_{BR}}{f_{CC}} \right) - h_{BR} \cdot F_{BR} \cdot A_{HU} \cdot (1 - f_{GSBR})$	Equazione per le specie target della caccia	2.3
$f_k(\Delta T) = k_F^{\Delta T}$	Funzione di risposta della crescita della fauna alla variazione di temperatura	2.4
$f_{CC} = CC_k \cdot \left[ 1 + \beta_{LCM} \cdot \frac{(SE_{LCM} - SE_{LCM0})}{SE_{LCM0}} \right],$ ( $k = MU, DE, SA, DL$ )	Funzione di risposta della carrying capacity al SE di LCM	2.5
$f_{GSF} = 1 - \left[ \frac{\sum F_k}{GSF + \sum F_k} \right],$ ( $k = MU, DE, SA, DL$ )	Funzione di risposta alla governance per la pesca	2.6
$f_{GSBR} = 1 - \left[ \frac{BR}{GSBR + BR} \right]$	Funzione di risposta alla governance per la caccia	2.7
$f_{GSRP} = 1 - \left[ \frac{RP}{GSRP + RP} \right]$	Funzione di risposta alla governance per	2.8

	la raccolta della vongola	
<b>ATTORI</b>		
$\dot{A}_l = rA_l \cdot A_l \cdot \frac{(SE_{j0} - SE)}{SE_{j0}},$ $(l = RE, TU, ED, BO, FA, FR, FC, HU; j$ $= CF, HU, AF, RF, TR, TU, NA, CD)$	Equazione per la dinamica degli attori	3.1
<b>SERVIZI ECOSISTEMICI</b>		
$SE_{FC} = h_{RP} \cdot F_{RP} \cdot A_{FC} \cdot (1 - f_{GS_{RP}})$	Servizio ecosistemico di approvvigionamento: raccolta del tapes [ton FW y <sup>-1</sup> ]	4.1
$SE_{HU} = h_{BR} \cdot F_{BR} \cdot A_{HU} \cdot (1 - f_{GS_{BR}})$	Servizio ecosistemico di approvvigionamento: caccia [ton FW y <sup>-1</sup> ]	4.2
$SE_{AF} = h_k \cdot f_{GS_F} \cdot F_k \cdot A_{FA}, \quad (k = MU, DE, SA, DL)$	Servizio ecosistemico di approvvigionamento: pesca artigianale [ton FW y <sup>-1</sup> ]	4.3
$SE_{RF} = h_k \cdot f_{GS_F} \cdot F_k \cdot A_{FS}, \quad (k = MU, DE, SA, DL)$	Servizio ecosistemico di approvvigionamento: pesca ricreativa [ton FW y <sup>-1</sup> ]	4.4
$SE_{LCM} = f_{MO} \cdot [k_{LBB} \cdot H_{BB} + k_{LSG} \cdot H_{SG} + k_{LCR} \cdot H_{CR} + k_{LBD} \cdot H_{BD}]$	Servizio ecosistemico di regolazione: mantenimento dei cicli di vita [ton FW y <sup>-1</sup> ]	4.5
$SE_{NRG} = k_{NBB} \cdot H_{BB} + k_{NSG} \cdot H_{SG} + k_{NBD} \cdot H_{BD}$	Servizio ecosistemico di regolazione: regolazione dei nutrienti disciolti [ton N y <sup>-1</sup> ]	4.6

$SE_{CRG} = k_{CSM} \cdot H_{SM} + k_{CSG} \cdot H_{SG}$	Servizio ecosistemico di regolazione: sequestro di C [ton C y <sup>-1</sup> ]	4.7
$SE_{EP1} = k_{EPSM} \cdot \frac{H_{SM}}{H_{SI} + H_{SM} + H_{CN}}$	Servizio ecosistemico di regolazione: protezione dall'erosione mediante riduzione del fetch [km <sup>2</sup> ]	4.8
$SE_{EP2} = k_{EPSG} \cdot \frac{H_{SG}}{H_{SI} + H_{SM} + H_{CN}} + k_{EPBD} \cdot \frac{H_{BD}}{H_{SI} + H_{SM} + H_{CN}}$	Servizio ecosistemico di regolazione: protezione dall'erosione mediante consolidamento del sedimento [km <sup>2</sup> ]	4.9
$SE_{TR} = A_{RE} \cdot \left\{ \alpha_{NAT} \cdot \left[ 1 + \frac{\omega_{SM} \cdot (H_{SM} - SM_0) + \omega_{SG} \cdot (H_{SG} - SG_0)}{\omega_{SM} \cdot SM_0 + \omega_{SG} \cdot SG_0} \right] + \alpha_{HE} \cdot \left[ 1 + \frac{(HE - HE_0)}{HE_0} \right] + \alpha_{AC} \cdot \left[ 1 + \frac{(H_{CN} - CN_0)}{CN_0} \right] \right\}$	Servizio culturale: praticanti di attività di voga alla veneta [n° ind y <sup>-1</sup> ]	4.10
$SE_{TU} = A_{TU} \cdot \left\{ \alpha_{NAT} \cdot \left[ 1 + \frac{(H_{SM} - SM_0)}{SM_0} \right] + \alpha_{HE} \cdot \left[ 1 + \frac{(HE - HE_0)}{HE_0} \right] + \alpha_{AC} \cdot \left[ 1 + \frac{(H_{CN} - CN_0)}{CN_0} \right] \right\}$	Servizio culturale: turisti che visitano la laguna [n° ind y <sup>-1</sup> ]	4.11
$SE_{NA} = A_{BO} \cdot \left[ 1 + \frac{(H_{CN} - CN_0)}{CN_0} \right]$	Servizio culturale: navigazione da diporto [n° ind y <sup>-1</sup> ]	4.12
$SE_{CD} = A_{ED} \cdot \left\{ \alpha_{NAT} \cdot \left[ 1 + \frac{\omega_{SM} \cdot (H_{SM} - SM_0) + \omega_{SG} \cdot (H_{SG} - SG_0)}{\omega_{SM} \cdot SM_0 + \omega_{SG} \cdot SG_0} \right] + \alpha_{HE} \cdot \left[ 1 + \frac{(HE - HE_0)}{HE_0} \right] + \alpha_{AC} \cdot \left[ 1 + \frac{(H_{CN} - CN_0)}{CN_0} \right] \right\}$	Servizio culturale: fruitori di attività di educazione ambientale in laguna [n° ind y <sup>-1</sup> ]	4.13