

INTERREG VI-A ITALIA SLOVENIJA 2021-2027

BeBlue Beyond Bluegrass:

Rafforzare l'agroalimentare sostenibile mediante l'acquaponica

Krepitev trajnostne agroživilske proizvodnje z akvaponiko

D1.4.2 Digital Twin per Acquaponica: principi e applicazioni. /

INTERREG VI-A ITALIA SLOVENIJA 2021-2027

Bando di Capitalizzazione/ Poziv za Kapitalizacijo N. 01/2022R

Project code: ITA-SI0100069 BeBlue

Start date: September 1st, 2023 – Duration 24 months

Partner di progetto/Projektni partnerji:

Il progetto BeBlue è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.

Projekt BeBlue sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



Università
Ca' Foscari
Venezia



UNIVERZA V LJUBLJANI
University of Ljubljana



Progetto/ Projekt:	Interreg Italia – Slovenia BeBlue – Beyond Bluegrass
No del Progetto / Številka projekta:	ITA-SI0100069
WP	WP1 - Oltre Bluegrass: digitalizzazione e diversificazione dei prodotti / Nadaljevanje Bluegrass: digitalizacija in diverzifikacija proizvodov
Attività	A1.4 Prototipo di Digital Twin
Deliverable	D1.4.2 / Digital Twin per Acquaponica: principi e applicazioni
Versione / različica:	1
Data di invio / Datum odpreme:	
Partner responsabile / Odgovorni partner:	UNIVE
Autori/ Avtorji:	Joseph Safi, Ana Slatnar, Vid Zitko, Roberto Pastres

Tipo di Deliverable / Vrsta končnega izdelka		
R	Documento, Report / Dokument, poročilo	X
DEM	Dimostratore, pilota, prototipo - Demo, pilotni projekt, prototip	
DEC	Websites, videos, etc. / Spletne strani, videoposnetki itd.	
OTHER		

Livello di divulgazione / Stopnja razširjanja		
PU	Pubblico – Javni	X
CO	Confidenziale, solo per i partners di progetto, il segretario tecnico e il Comitato di gestione del programma / zaupno, samo za projektne partnerje, tehničnega sekretarja in odbor za upravljanje programa	

Approvazione del deliverable / Odobritev izročka		
Approvato internamente Interno odobreno		
Approvato dal WP Leader Odobril WP Leader		
Approvato dal coordinatore Odobril koordinator	Roberto Pastres (UNIVE)	

Contatti del coordinator / Kontakti koordinatorja	
Project Coordinator Name	Prof. Roberto Pastres
Project Coordinator Organization	Università Ca' Foscari di Venezia
Address	Via Torino 155, 30172, Mestre (VE) - Italia
E-mail	pastres@unive.it
Project web-site	https://www.ita-slo.eu/it/beblue

BEBLUE IN SINTESI.....	5
LISTA DEGLI ACRONIMI - SEZNAM AKRONIMOV	6
INDICE DELLE FIGURE	7
INDICE DELLE TABELLE	8
SOMMARIO	9
1. INTRODUZIONE	10
1.1 Scopo del documento	10
1.2 Articolazione del deliverable	10
2. IL MODELLO CONCETTUALE.....	12
3. LA STRUTTURA DEL MODELLO DINAMICO.....	17
4. APPLICAZIONE DEL MODELLO AGLI IMPIANTI PILOTA.....	22
4.1 Modellazione di IP-UNIVE	22
4.2 Modellazione di IP-UNILJU	29
5. RISULTATI	34
5.1 IP-UNIVE: Orata e salicornia	34
5.2 IP-UNIVE: Orata e lattuga di mare.....	38
5.3 IP-UNILJU: Trota iridea e lattuga.....	41
6. CONCLUSIONI	46
7. Bibliografia	47

BeBlue Beyond Bluegrass

Rafforzare l'agroalimentare sostenibile mediante l'acquaponica

D1.4.2 Digital Twin per Acquaponica: principi e applicazioni

(Versione italiana)

BEBLUE IN SINTESI

BeBlue - Beyond Bluegrass, contribuisce al raggiungimento dell'obiettivo specifico SO2.6 del programma di cooperazione transfrontaliera Italia-Slovenia: "Promuovere la transizione verso un'economia circolare ed efficiente sotto il profilo delle risorse". Il progetto si propone di facilitare la diffusione dell'acquaponica. Mediante questa tecnologia circolare e sostenibile è possibile la co-produzione di pesce a specie vegetali in sistemi a ricircolo. BeBlue capitalizza i risultati conseguiti dal progetto di cooperazione transfrontaliera BLUEGRASS, (<https://2014-2020.ita-slo.eu/bluegrass>), che introdusse l'acquaponica nell'area di programma,

A tal fine, BeBlue predisporrà strumenti per:

1. ottimizzare la gestione degli impianti acquaponici, mediante la loro digitalizzazione e lo sviluppo di un prototipo di "Digital Twin";
2. dimostrare il potenziale utilizzo di sistemi acquaponici per ottenere prodotti innovativi ad alto valore aggiunto quali: i) macroalghe; ii) salicornia; iii) micro-ortaggi.
3. valutare la sostenibilità ambientale dei prodotti, mettendo a punto un calcolatore in grado di fornire l'impronta ambientale di prodotto (Product Environmental Footprint).
4. Valutare la sostenibilità economica di tali produzioni, mediante un'analisi di mercato, finalizzata a valutare l'accettabilità dell'uso della tecnologia acquaponica da parte di produttori e consumatori, lo sviluppo di uno strumento per valutare il ritorno sugli investimenti dei sistemi acquaponici.
5. Aumentare la conoscenza e visibilità dell'acquaponica tra gli operatori del settore e i potenziali investitori

Il piano di lavoro di BeBlue si articola in 3 pacchetti, o Work Package, i cui obiettivi specifici sono riassunti di seguito. Oltre ad attività di trasferimento tecnologico o networking, essi includono anche attività di comunicazione e divulgazione, mirate a diverse tipologie di potenziali fruitori.

WP1: Oltre Bluegrass: digitalizzazione e diversificazione dei prodotti

Obiettivi: Migliorare gli impianti pilota messi a punto in BLUEGRASS e sviluppare, mettere alla prova e divulgare strumenti digitali per supportare la gestione e l'ottimizzazione di un impianto acquaponico.

WP2: Strumenti per la valutazione della sostenibilità ambientale ed economica.

Obiettivi: Sviluppare strumenti a supporto degli investitori e operatori nella progettazione e gestione di sistemi acquaponici, fornendo linee guida per selezionare prodotti e strumenti web-based per la valutazione della sostenibilità economica e ambientale.

WP3: Networking e valorizzazione

Obiettivi: favorire lo sviluppo e la valorizzazione delle conoscenze generate dal precedente progetto Bluegrass e dalle nuove attività, rinforzando il networking transnazionale con processi partecipativi e diffusione dei risultati.

LISTA DEGLI ACRONIMI - SEZNAM AKRONIMOV

ALK	Alcalinità
BQC	Software per il controllo di qualità dei dati - BeBlue Quality Control
DO	Ossigeno Disciolto - Dissolved Oxygen
DIN	Azoto Inorganico Disciolto - Dissolved Inorganic Nitrogen
DT	Gemello Digitale -Digital Twin
DW	Peso Secco - Dry Weight
DWC	Deep Water Culture
FW	Peso Fresco - Fresh Weight
IP-UNIVE	Impianto pilota acquaponico gestito dall'Università Ca' Foscari di Venezia
IP-UNILJU	Impianto pilota acquaponico gestito dall'Università di Ljubljana
MFB	Media Filled Beds
NFT	Nutrient Film Technique
NO3	Nitrato
NO2	Nitrito
RAS	Sistema di Acquacoltura a Ricircolo - Recirculating Aquaculture System
TAN	Azoto Ammoniacale Totale - Total Ammonium Nitrogen
RP	Fosforo Reattivo - Reactive Phosphorus
TSS	Solidi Sospesi Totali - Total Suspended Solids

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1: Schematizzazione di un sistema acquaponico accoppiato, nel riquadro, e dei principali flussi di materia da e verso l'esterno.	13
Figura 4-1: Schematizzazione di IP-UNIVE che evidenzia i flussi idrici tra i componenti del sistema.	25
Figura 4-2: Rappresentazione delle matrici V e Q per la simulazione dei processi di trasporto nel Sistema acquaponico	26
Figura 4-3: Applicazione dell'equazione matriciale 3.1 ad IP-UNIVE.	28
Figura 4-4: Schematizzazione di IP-UNILJU che evidenzia i flussi idrici tra i componenti del sistema.	31
Figure 5-1: Evoluzione delle funzioni forzanti e delle variabili biotiche nel quadrimestre simulato con il Digital Twin	35
Figure 5-2: Evoluzione delle concentrazioni di TAN, nitrato, flusso di azoto escreto dal pesce e assimilato dalla salicornia, ossigeno disciolto nei 4 componenti del sistema acquaponico IP-UNIVE.	37
Figure 5-3: Evoluzione delle concentrazioni di alcalinità, carbonio inorganico disciolto e valori di pH nei 4 componenti del sistema acquaponico IP-UNIVE.	38
Figure 5-4: Evoluzione della razione alimentare, della temperatura dell'acqua e della densità di biomassa della lattuga di mare.	40
Figure 5-5: Evoluzione della razione alimentare, della temperatura dell'acqua, del peso medio delle trote, del peso medio individuale di una pianta di lattuga coltivata in DWC e dei flussi di azoto dal pesce alla soluzione e dalla soluzione alle piante, assumendo una produttività uguale dei tre sistemi.	42
Figure 5-6: Evoluzione delle concentrazioni di TAN, nitrato e ossigeno disciolto nei 5 componenti del sistema acquaponico IP-UNILJU.	44
Figure 5-7: Evoluzione delle concentrazioni di alcalinità, carbonio inorganico disciolto e valori di pH nei 5 componenti del sistema acquaponico IP-UNILJU.	45

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Principali processi associati ai flussi da e verso la soluzione acquosa schematizzati in Figura 2-1.	14
Tabella 3-1: Variabili di stato biotiche e abiotiche	17
Tabella 4-1: Funzioni forzanti e loro grado di controllo.	22
Tabella 4-2: Variabili di stato biotiche considerate nel sistema IP-UNIVE.....	23
Tabella 4-3: Interazioni tra le variabili di stato abiotiche.	26
Tabella 4-4: Flussi di materia tra organismi e soluzione e tra soluzione e aria interna.	27
Tabella 4-5: Variabili di risposta utilizzate per verificare il funzionamento del modello dinamico.....	28
Tabella 4-6: Funzioni forzanti monitorate in IP-UNILJU e loro grado di controllo.....	29
Tabella 4-7: Variabili di stato biotiche considerate in IP-UNILJU.	30
Tabella 4-8: Interazioni tra le variabili di stato abiotiche.	32
Tabella 4-9: Flussi di materia tra organismi e soluzione e tra soluzione e aria interna.	33
Tabella 5-1: Condizioni iniziali utilizzate per simulare il funzionamento della linea salicornia.	34

SOMMARIO

Il presente documento descrive la metodologia utilizzata per sviluppare il prototipo di gemello digitale o “Digital Twin”, DT, di un impianto acquaponico e presenta tre esempi applicativi. Il prototipo è stato messo a punto nell’ambito dell’attività A1.4 “Prototipo di «Digital Twin» del progetto BeBlue. In accordo con la letteratura più recente il DT può essere definito come , **“una rappresentazione digitale del sistema che fornisce indicazioni riguardo all’evoluzione del suo stato combinando: i) conoscenze a priori riguardo i processi che vi avvengono mediante modelli matematici ii) l’informazione man mano acquisita attraverso la rilevazione di dati sperimentali.”**

Questa definizione evidenzia **il ruolo centrale di un modello dinamico che simuli l’evoluzione delle variabili che caratterizzano il sistema acquaponico** in relazione a quella di variabili esterne non controllabili, come la temperatura dell’aria esterna, parzialmente controllabili, come la temperatura dell’acqua, o totalmente controllabili, come la razione alimentare fornita al pesce. Tali variabili vengono collettivamente denominate “forzanti” del sistema.

L’attività A1.4 è stata focalizzata **sulla definizione e codifica di un modello dinamico generale di un sistema acquaponico, sviluppato estendendo all’acquaponica i principi della piscicoltura di precisione o “Precision Fish Farming” (PFF)** introdotti in salmonicoltura e recentemente adattati alla trotticoltura. L’applicazione di PFF ad un sistema acquaponico ha richiesto l’introduzione di una differente terminologia, in quanto **in tale sistema convivono organismi appartenenti a tre livelli trofici**: pesci (**consumatori**), specie vegetali, terrestri o acquatiche (**produttori primari**), batteri (**decompositori**). Ad essi sono state associate le variabili di stato collettivamente denominate “biotiche”. Il modello dinamico è in grado di prevedere le risposte fisiologiche degli organismi in relazione alle forzanti: su tale base, suggerisce azioni di controllo in grado di mantenere condizioni ottimali delle “variabili abiotiche” che caratterizzano lo stato della soluzione/sospensione acquosa circolante nel sistema acquaponico, quali, ad es., la concentrazione di ossigeno disciolto, la concentrazione di nitrato, il pH. Tali azioni possono, in tutto o in parte, essere messe in opera da sistemi automatici, ad es. mangiatoie automatiche, modulazione dell’aerazione, aggiunta di composti chimici in grado di regolare l’acidità della soluzione.

Il prototipo è stato applicato ai due sistemi pilota gestiti, rispettivamente, dal Lead Partner, Università Ca’ Foscari di Venezia, e dall’Università di Ljubljana, PP2. Il primo, abbreviato in IP-UNIVE, co-produce orata, salicornia e macroalghe, il secondo, abbreviato in IP-UNILJ, co-produce trota iridea, una interessante varietà di lattuga, Salanova, e micro-ortaggi.

I risultati indicano che la struttura del prototipo di Digital Twin è robusta e in grado di simulare con sufficiente accuratezza sia la dinamica di sistemi acquaponici già consolidati, in cui venga utilizzata acqua dolce, sia quella di sistemi, maggiormente innovativi, in cui venga utilizzata acqua salmastra o marina.

In particolare, la simulazione dinamica delle concentrazioni dei due composti inorganici azotati, azoto ammoniacale totale e nitrato, consente di valutare con maggior accuratezza il rapporto tra biomassa di pesce allevata e superficie coltivabile, rispetto alle relazioni empiriche attualmente in uso. Inoltre, il DT consente la previsione a breve termine del fabbisogno alimentare e della richiesta di ossigeno del pesce in relazione alla temperatura dell’acqua, consentendo di modulare opportunamente la somministrazione del mangime e l’utilizzo degli apparati di aerazione e ossigenazione, che incidono notevolmente sui costi operativi.

1. INTRODUZIONE

I sistemi acquaponici presentano una complessità maggiore rispetto sia ai sistemi di allevamento di pesce a ricircolo o RAS (Recirculation Aquaculture Systems) sia ai sistemi idroponici di coltivazione fuori suolo. Infatti, la loro gestione deve assicurare condizioni ottimali per il benessere e l'accrescimento di pesce e vegetali, nonché mantenere la temperatura dell'acqua entro limiti che consentano una efficiente bio-conversione di azoto ammoniacale in nitrato da parte della componente batterica. Ciò richiede sia conoscenze di agronomia sia di acquacoltura, tanto più essenziali quanto maggiore è la scala produttiva e, quindi, il rischio di perdita di prodotto a causa di azioni gestionali non appropriate o non tempestive. In fase di progettazione, inoltre, è importante dimensionare correttamente le componenti del sistema e, in particolare la biomassa e densità di allevamento in relazione alla superficie allocata per la coltivazione delle specie vegetali. Attualmente, non sono disponibili strumenti, accessibili gratuitamente, che facilitino la progettazione e la gestione di sistemi acquaponici, tenendo conto della evoluzione temporale delle biomasse che si intende co-produrre.

Per questa ragione, una delle attività principali del progetto BeBlue è costituita dallo sviluppo e applicazione di un "gemello digitale" o "Digital Twin" di un impianto acquaponico, in seguito DT. Un DT può essere definito **una rappresentazione digitale del sistema che fornisce indicazioni riguardo all'evoluzione del suo stato combinando: i) conoscenze a priori riguardo i processi che vi avvengono mediante modelli matematici ii) l'informazione man mano acquisita attraverso la rilevazione di dati sperimentali.** (Fore&al., 2024). Il prototipo di Digital Twin sviluppato in BeBlue, **dovendo essere robusto e generalizzabile, include principalmente il primo elemento, cioè un modello matematico in grado di simulare dinamicamente i processi fisici, chimici, microbiologici e biologici che avvengono in un sistema acquaponico.**

1.1 Scopo del documento

Il presente documento intende presentare il quadro concettuale di riferimento in cui è stato sviluppato il DT, la struttura matematica del modello dinamico e la sua applicazione ai due impianti pilota gestiti nel progetto BeBlue. Il primo impianto estende l'utilizzo di sistemi acquaponici alla produzione di specie di pesce tipiche delle acque marine o salmastre, consentendo di ampliare notevolmente la gamma dei prodotti ittici da acquaponica. L'utilizzo di acqua salmastra o salata riduce sostanzialmente a zero l'impronta idrica dei prodotti ma restringe la gamma delle specie vegetali co-coltivabili a piante in grado di tollerare salinità elevate e di micro e macroalghe. In IP-UNIVE si è deciso di co-produrre, per la prima volta nell'area di programma, orata, piante alofite, quali la salicornia, e lattuga di mare, una macroalga commestibile. Nel secondo impianto la produzione di trota iridea è stata combinata con quella di una piccola quantità di micro-ortaggi e di una interessante varietà di lattuga, Salanova.

1.2 Articolazione del deliverable

Coerentemente con l'obiettivo di questo rapporto, il documento si articola nella presente introduzione e in altri cinque capitoli. Nel secondo capitolo viene descritto il modello

concettuale su cui si è basato lo sviluppo del prototipo di DT. Successivamente viene presentata la struttura matematica del modello dinamico che simula il funzionamento di un sistema acquaponico e si forniscono alcuni dettagli riguardo la struttura del codice che consente di risolvere numericamente le equazioni costitutive del modello. Nel quarto capitolo, viene presentata l'applicazione del modello agli impianti pilota, diversi per quanto riguarda le loro dimensioni, la loro struttura e le specie co-prodotte. I risultati sono presentati separatamente per le tre combinazioni di prodotti nel capitolo 5. Infine, nel capitolo conclusivo presentate alcune considerazioni riguardo le prospettive di applicazione del prototipo alla progettazione e gestione di impianti acquaponici.

2. IL MODELLO CONCETTUALE

Il modello concettuale del prototipo di “gemello digitale” di un impianto acquaponico accoppiato è stato sviluppato basandosi sulla definizione recentemente proposta in (Fore&al., 2024):

“una rappresentazione digitale del sistema che fornisce indicazioni riguardo all'evoluzione del suo stato combinando: i) conoscenze a priori riguardo i processi che vi avvengono mediante modelli matematici ii) l'informazione man mano acquisita attraverso la rilevazione di dati sperimentali.”

Tale approccio prevede: 1) la messa in opera di un sistema di monitoraggio in grado di fornire dati in tempo reale riguardo l'evoluzione delle principali variabili che condizionano l'accrescimento e il benessere delle specie co-prodotte; 2) **lo sviluppo di un modello dinamico che ne simuli il funzionamento e, quindi, consenta di analizzare e interpretare i dati, formulando previsioni e breve termine, utili a indicare le appropriate decisioni gestionali.** L'applicazione della definizione richiede l'utilizzo di algoritmi di assimilazione dei dati, che consentano di integrare il loro contenuto informativo nella parametrizzazione del modello, migliorandone le prestazioni predittive (Royer&Pastres, 2023). Coerentemente con gli obiettivi del progetto e tenendo conto della letteratura esistente, **il DT sviluppato in BeBlue include principalmente il modello dinamico che simula l'evoluzione temporale delle, numerose, variabili caratterizzanti un sistema acquaponico.** Il modello stato messo a punto avendo come riferimento l'approccio alla gestione intelligente dei sistemi di allevamento di pesce denominato “Piscicoltura di Precisione” o “Precision Fish Farming - PFF” (Fore&al., 2018). Tale approccio è stato finora applicato alla salmonicoltura in gabbia, alla troticoltura (Royer&al., 2023) e all'allevamento di pesce anche marino in impianti a terra (Lima&al., 2023). Nell'ambito dell'attività A1.4 del progetto BeBlue **PFF è stato esteso ai sistemi acquaponici a ricircolo, che risultano più complessi,** rispetto alle tipologie di acquacoltura sopra menzionate, in quanto includono **organismi appartenenti a tre distinti livelli trofici:**

- **consumatori: il pesce;**
- **produttori primari: piante o alghe;**
- **decompositori: batteri**

Le azioni di gestione/controllo devono quindi assicurare condizioni di qualità dell'acqua tali da garantire il benessere e la crescita ottimale o quasi ottimale di pesci e produttori primari, nonché una efficiente bio-conversione dell'azoto ammoniacale in nitrico da parte della componente batterica.

Un sistema acquaponico accoppiato include cinque componenti essenziali, schematizzati in Figura 2-1:

- 1) Un insieme di vasche per l'allevamento del pesce (FT);
- 2) Una serra per la coltivazione fuori suolo di vegetali (GH);

- 3) Un biofiltro, in cui le comunità batteriche convertono l'azoto ammoniacale in nitrico (BF)
- 4) Una unità in cui vengono rimossi i solidi sospesi, ad es. filtro a sabbia, filtro a tamburo, sedimentatore (MF).
- 5) Una vasca di raccolta o sump (SU).

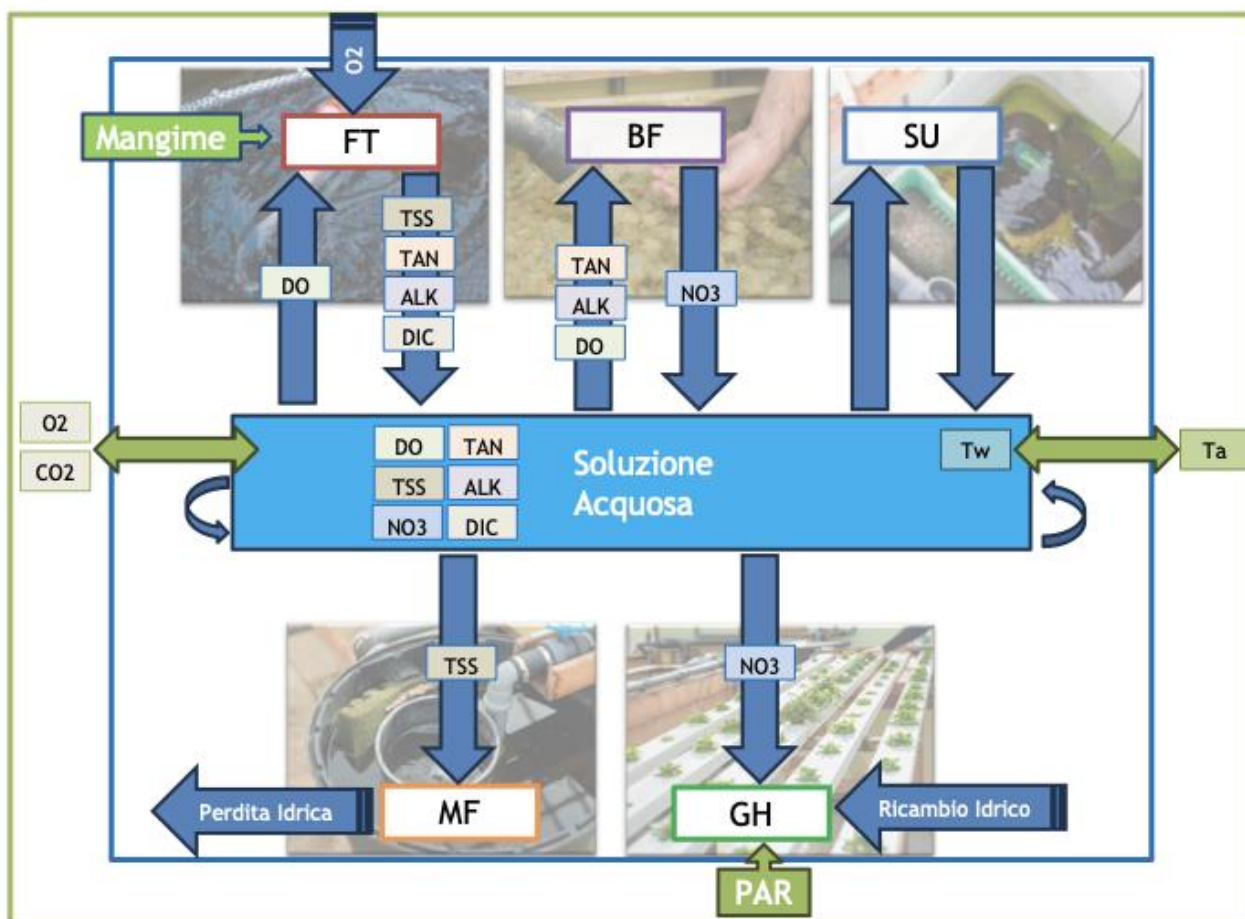


Figura 2-1: Schematizzazione di un sistema acquaponico accoppiato, nel riquadro, e dei principali flussi di materia da e verso l'esterno.

Ad essi vanno aggiunti apparati di disinfezione, ad es. lampade UV, dispositivi di illuminazione, ad es. lampade LED e, qualora il sistema sia disaccoppiato e le biomasse di pesce siano elevate, un componente in cui avvenga la rimozione di anidride carbonica ed uno in cui il nitrato venga ridotto ad azoto molecolare, attraverso il processo di denitrificazione.

Il modello dinamico sviluppato in BeBlue considera i cinque componenti essenziali di un sistema accoppiato, in cui la densità di biomassa non superi i 20 kg/m³. Inoltre, le vasche per l'allevamento del pesce e la coltivazione dei produttori primari sono state aggregate in due componenti rappresentativi, per semplificare il prototipo e renderlo accessibile all'utente attraverso l'interfaccia descritta nel Deliverable D.4.1. Con riferimento alla Figura 2-1, i

componenti vengono denominati: FT (Fish Tank), BF (Biofilter), GH (Green House), MF (Mechanical Filter), e SU (Sump). Gli organismi ospitati dal sistema vengono mantenuti in condizioni ottimali da un continuo flusso di materia ed energia. In primo luogo, il processo fotosintetico assimila anidride carbonica dall'aria e vi rilascia ossigeno, la respirazione delle piante opera al contrario. Data la biomassa vegetale non elevata si è ipotizzato che le concentrazioni di questi gas sia costante e pari a quella atmosferica. la soluzione/sospensione acquosa fornisce composti chimici inorganici essenziali per il loro metabolismo e riceve le sostanze escrete in seguito ai processi metabolici. I processi associati ai flussi di materia dagli organismi alla soluzione e viceversa sono descritti in Tabella 2-1.

Tabella 2-1: Principali processi associati ai flussi da e verso la soluzione acquosa schematizzati in Figura 2-1.

Processo	Flusso di materia
Pesce: respirazione	- Ossigeno dalla soluzione al pesce Anidride carbonica dal pesce alla soluzione
Pesce: metabolizzazione delle proteine	- Azoto ammoniacale e urea dal pesce alla soluzione
Batteri: nitrificazione	- Azoto ammoniacale e ossigeno dalla soluzione alla biomassa batterica - Nitrato dalla biomassa batterica alla soluzione
Alghe: respirazione	- Ossigeno dalla soluzione alle alghe - Anidride carbonica dalle alghe alla soluzione
Alghe: fotosintesi	- Anidride carbonica o ioni bicarbonato dalla soluzione alle alghe - Ossigeno dalle alghe alla soluzione
Piante: respirazione delle radici	- Ossigeno dalla soluzione alle radici - Anidride carbonica dalle radici alla soluzione
Piante: assimilazione di azoto	- DIN, principalmente nitrato, dalla soluzione alle radici

Gli scambi di tali composti **alterano la composizione chimica della soluzione acquosa**: in particolare:

- le **escrezioni di ammoniaca dei pesci aumentano sia la concentrazione di TAN, Total Ammonia Nitrogen, sia l'alcalinità**, cioè la capacità della soluzione di tamponare aggiunte di acido;
- la **bio-conversione di TAN in nitrato, rappresentata dall'equazione chimica**:

$$\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \quad (2.1)$$
 diminuisce anche l'alcalinità, in accordo con l'equazione 2.2c.
- l'**anidride carbonica aumenta la concentrazione di Carbonio Inorganico Disciolto o DIC** (Dissolved Inorganic Carbon).

Alcalinità e DIC influenzano in maniera determinante l'acidità della soluzione, quantificata dal pH: è quindi **indispensabile tener conto degli equilibri chimici che legano tra di loro queste variabili per poter prevedere e controllare il pH**. A propria volta, il pH condiziona la speciazione di TAN. Queste variabili sono definite dalle seguenti equazioni di bilancio di massa:

$$[\text{TAN}] = [\text{NH}_3] + [\text{NH}_4^+] \quad (2.2a)$$

$$[\text{DIC}] = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.2b)$$

$$[\text{Alk}] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] + [\text{NH}_3] \quad (2.2c)$$

In cui le parentesi quadre indicano le concentrazioni molari. Poiché, grazie all'azione del biofiltro, le concentrazioni di TAN, $[\text{H}^+]$, $[\text{OH}^-]$ sono almeno due ordini di grandezza inferiori a quella di DIC, l'alcalinità è stata approssimata in base all'equazione

$$[\text{Alk}] \sim [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.2d)$$

La soluzione scambia materia anche con l'atmosfera: in particolare, vengono scambiati **ossigeno e anidride carbonica**.

La **descrizione del sistema evidenzia** la sua complessità e, soprattutto, **la sua dinamicità**: le immissioni di energia termica e gli scambi di calore con l'esterno influenzano la temperatura dell'aria e dell'acqua, i flussi di materia tra il mezzo acquoso e i componenti del sistema ne modificano continuamente la composizione. La gestione del sistema deve quindi includere un insieme di **azioni di controllo, mirate a mantenere la temperatura e composizione della soluzione entro limiti che**:

- garantiscano il benessere e l'accrescimento ottimale dei pesci;
- garantiscano una elevata efficienza della bio-conversione di TAN in nitrato;
- garantiscano il benessere e l'accrescimento ottimale dei produttori primari, piante o alghe.

Oltre al pompaggio dell'acqua per mantenerne la circolazione, le principali azioni di controllo/regolazione includono:

- Modulazione della razione alimentare del pesce in relazione alla temperatura dell'acqua e alla taglia raggiunta dal pesce;
- Areazione o ossigenazione artificiale;
- Aggiustamento dell'acidità della soluzione, mediante aggiunta di alcalinità;
- Ricambio idrico, per compensare le perdite legate all'evaporazione e, qualora necessario, abbassare la concentrazione di nitrato in eccesso;
- Condizionamento della temperatura dell'acqua;
- Illuminazione artificiale, per aumentare il tasso di produzione primaria;

- In impianti progettati per produrre elevate quantità di biomassa ittica, si rende necessaria l'aggiunta di componenti per rimuovere il nitrato e l'anidride carbonica in eccesso.

Le azioni di controllo si concretizzano in scambi di materia/energia tra il sistema acquaponico e l'esterno che ne influenzano il funzionamento: collettivamente, le variabili associate a tali scambi vengono indicate come "funzioni forzanti":

- **non controllabili**, ad. es. la temperatura dell'aria esterna,
- **parzialmente controllabili**, ad esempio la temperatura dell'acqua,
- **totalmente controllabili**, ad es. la razione alimentare.

3. LA STRUTTURA DEL MODELLO DINAMICO

Un modello dinamico che descriva l'evoluzione di un sistema acquaponico in relazione ai flussi di materia descritti nel capitolo precedente, deve essere in grado di simulare:

- 1) i principali processi metabolici del pesce, dei produttori primari e dei batteri;
- 2) il bilancio idrico e i processi di trasporto dei metaboliti disciolti e dei solidi sospesi;
- 3) gli equilibri chimici che regolano l'acidità della soluzione.

Per raggiungere questo obiettivo, sono state definite le **variabili di stato riportate** in Tab. 3.1, suddivise in **biotiche e abiotiche**. Le sei variabili abiotiche sono state definite sulla base del modello concettuale, in accordo con (Dos Santos&al., 2023): come si può notare, esse non includono la biomassa batterica in quanto essa raggiunge piuttosto rapidamente un valore stazionario. Il processo di nitrificazione è stato quindi parametrizzato, assumendo che l'efficienza del biofiltro dipenda solo dalla temperatura. Non compare tra le variabili di stato, altresì, il pH: esso, infatti, viene calcolato in base all'alcalinità e alla concentrazione di DIC supponendo che si stabilisca istantaneamente l'equilibrio chimico (Dos Santos&al., 2023): quindi, può essere considerato una variabile di risposta del modello. Inoltre, si è assunto che le azioni di controllo consentano di mantenere costante il volume idrico totale e i volumi associati a ciascun componente: questi, quindi, non compaiono tra le variabili di stato.

Tabella 3-1: Variabili di stato biotiche e abiotiche

Variabili di stato biotiche	Simbolo
Peso vivo individuale medio del pesce [g]	X _{F1}
Numero di pesci	X _{F2}
Peso fresco individuale medio pianta [g]	X _{P1}
Numero di piante	X _{P2}
Densità biomassa algale [g/L]	X _A
Variabili di stato abiotiche	
Concentrazione di azoto ammoniacale totale [mmol/L]	C _{1,j}
Concentrazione di nitrato [mmol]/L	C _{2,j}
Concentrazione di ossigeno disciolto [mmol/L]	C _{3,j}
Concentrazione di Carbonio Inorganico Disciolto [mmol/L]	C _{4,j}
Alcalinità [mmol/L]	C _{5,j}
Concentrazione di solidi sospesi totali [g/L]	C _{6,j}

Le variabili elencate in Tabella 3-1 sono associate ad uno o più dei componenti del sistema, indicati con "j", evidenziati in Figura 2-1. In particolare:

- Le variabili associate al pesce sono associate solo al componente "FT", che aggrega le vasche di allevamento;

- Le variabili associate ai produttori primari sono associate solo al componente "GH", che aggrega la superficie coltivabile;
- Le variabili abiotiche sono associate a tutti i componenti ed evolvono anche in relazione alla circolazione idrica, regolata dall'azione delle pompe.

Le azioni di controllo devono mirare a mantenere condizioni ottimali o quasi ottimali per il benessere e l'accrescimento degli organismi: **viene quindi ipotizzato che i loro tassi di crescita siano influenzati in maniera trascurabile dalla composizione della soluzione acquosa.**

Questa ipotesi consente di **semplificare notevolmente la struttura del modello dinamico** che simula i processi metabolici e il trasporto delle variabili abiotiche in quanto **i tassi di accrescimento del pesce e dei produttori primari dipendono solo dalle forzanti e non dallo stato della soluzione.** Ciò significa che possono essere risolte parallelamente:

- le equazioni che simulano l'evoluzione delle variabili biotiche nei componenti FT e GH;
- le equazioni che simulano i processi di trasporto e gli equilibri chimici che coinvolgono le variabili abiotiche.

In altri termini, in riferimento alla Figura 2-1, i flussi di materia dalle variabili biotiche alla soluzione sono modellati come ingressi (sources) del sistema dinamico che simula l'evoluzione dello stato della soluzione, mentre i flussi dalla soluzione agli organismi dipendono dalle variabili abiotiche ma non influenzano l'evoluzione di quelle biotiche. Da qui **il ruolo essenziale delle azioni di controllo per regolare i flussi in modo che assicurino il benessere e l'accrescimento ottimale degli organismi.** Le equazioni costitutive del modello derivano in maniera logica dalla Figura 2-1.

La dinamica delle **variabili biotiche** viene simulata utilizzando moduli specie-specifici **che simulano il bilancio energetico degli organismi.** Per piante e pesci si è adottato un approccio molto flessibile, basato sulla simulazione dell'accrescimento di un insieme di organismi (Individual Based Population Model). Nel prototipo viene considerato un solo individuo, rappresentativo della media, ma questo approccio consente agevolmente di simulare le distribuzioni delle grandezze che caratterizzano la biomassa di un singolo organismo. Per quanto riguarda le alghe il modello simula l'evoluzione della densità di biomassa. Dal punto di vista matematico, i moduli risolvono un sistema dinamico che simula il bilancio energetico di ogni specie considerata e da ciò calcola il tasso di accrescimento.

In generale, l'evoluzione delle **variabili di stato abiotiche** in ogni componente deve tener conto dei flussi di materia da e verso gli organismi e dei processi di trasporto. Rispetto alla tabella 3.1, il **vettore di stato $\mathbf{x}$** è quindi composto da " $nv = 6$ " segmenti, corrispondenti alle variabili $\mathbf{c}_i$, definite negli " nc " componenti: in totale il numero delle variabili di stato, ns , è quindi pari a " $ns = nc \times nv$ ": le prime " nc " righe di $\mathbf{x}$ sono associate ai valori della prima variabile abiotica negli " nc " componenti, le successive " nc " righe a quelle della seconda variabili negli " nc " componenti e così via. L'evoluzione temporale del vettore di stato è descritta mediante il sistema dinamico:

$$\frac{dx}{dt} = (T + R)x + g = Ax + g \quad (3.1)$$

$$A (ns \times ns) = T (ns \times ns) + R (ns \times ns) \quad (3.2)$$

T è una matrice diagonale a blocchi che tiene conto dei processi di trasporto tra i componenti. Gli “*nv*” blocchi sono tutti uguali: essi dipendono dai volumi associati a ciascun componente e dalle portate idriche in ingresso e uscita, per ipotesi costanti:

$$T_i(nc \times nc) = V^{-1}(nc \times nc) Q (nc \times nc) \quad (3.3)$$

in cui: **T_i** è il blocco *i*-esimo, **V** è una matrice diagonale i cui elementi diagonali sono i volumi di ogni componente e **Q** è una matrice che specifica i flussi idrici entranti e uscenti da ogni componente.

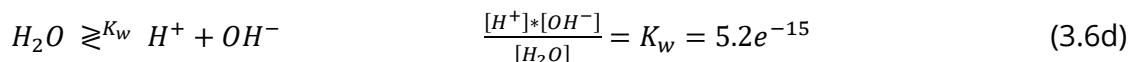
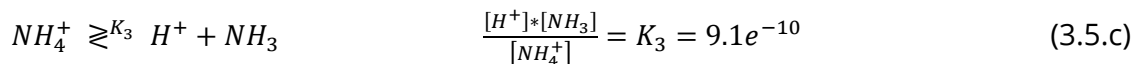
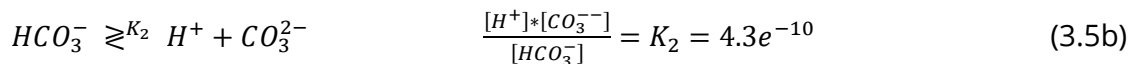
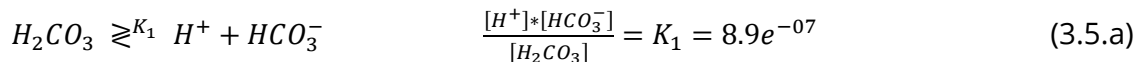
La matrice **R** è una matrice sparsa che tiene conto delle interazioni tra le variabili di stato: ad esempio, nel biofiltro TAN viene convertito in NO₃: quindi il tasso di variazione della concentrazione di NO₃ nel componente BF dipende dalla concentrazione di TAN.

L'equazione (3.1) viene risolta numericamente: la linearità del sistema consente un agevole sviluppo del codice e, inoltre, permette di determinare immediatamente lo stato del sistema in condizioni di stazionarietà, mediante la:

$$Ax = -g \quad (3.4)$$

Sebbene tutte le variabili cambino nel tempo, la soluzione (3.4) può dare indicazioni utili riguardo lo stato della soluzione nel breve periodo e, inoltre, servire per controllare l'accuratezza del metodo numerico utilizzato per risolvere la (3.1).

Per poter simulare il pH e la speciazione di DIC e TAN, è necessario aggiungere alla (3.1) un insieme di equazioni algebriche che rappresentano gli equilibri chimici:



I valori delle costanti di equilibrio chimico sono riportati da (dos Santos & al., 2023).

3.1 Il bilancio dell'azoto

La massimizzazione dell'utilizzo dell'azoto contenuto nel mangime fornito ai pesci è una delle ragioni della sostenibilità dell'acquaponica, in quanto esso viene utilizzato per produrre anche la biomassa dei produttori primari. I processi che coinvolgono l'azoto in un sistema

acquaponico sono complessi e l'indice NUE – Nitrogen Utilization Efficiency è uno degli indicatori dell'adeguato dimensionamento e dell'efficienza di tale sistema. Il modello dinamico consente di valutare l'evoluzione temporale di TAN e NO₃, nonché dell'azoto contenuto nelle biomasse coprodotte ed uscente dal sistema con i solidi sospesi catturati dal filtro meccanico.

Il flusso di azoto immesso nel sistema dalle escrezioni dei pesci sotto forma di TAN viene calcolato come segue:

$$\frac{dTAN_{in}}{dt} = N_{feed} - N_{pesc} - N_{feci} \quad (3.7)$$

in cui:

N_{feed} è la quantità di azoto presente nella razione giornaliera del mangime, calcolata in base al contenuto proteico e supponendo che le proteine contengano il 16% di azoto;

N_{pesc} è il flusso di azoto inglobato dal pesce attraverso la digestione del mangime;

N_{feci} è il contenuto di azoto nelle feci del pesce.

L'azoto inorganico presente nel sistema è pari a:

$$[DIN] = [TAN] + [NO_3] + [NO_2] \quad (3.8)$$

Il nitrito, essendo presente a concentrazioni almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a TAN e NO₃, non viene considerato nel modello.

DIN viene utilizzato dai produttori primari nella serra:

$$\frac{dDIN}{dt} = -N_{ass} \quad (3.9)$$

in cui N_{ass} è il flusso di DIN dalla soluzione ai produttori primari: poiché la concentrazione di NO₃ è molto maggiore di quella di TAN, **si assume che tutto l'azoto inorganico venga fornito dal nitrato.**

3.2 Principali ipotesi e assunzioni

La modellazione di un sistema complesso, per quanto accurata, deve necessariamente includere alcune ipotesi semplificative per garantire la robustezza del modello e facilitarne l'applicazione a casi reali. Le principali ipotesi ed assunzioni sono riassunte di seguito.

- La dinamica della popolazione batterica non è simulata esplicitamente;
- Le variabili di stato associate al pesce e ai produttori primari sono associate solo a due componenti del sistema, FT e GH.
- Le variabili abiotiche associate alla soluzione acquosa sono associate a tutti i componenti del sistema
- La razione alimentare è stata stimata in base a tabelle alimentari fornite dall'azienda produttrice di mangime.

- L'azoto entra nella soluzione come ammoniaca escretta dal pesce e ne esce a causa della rimozione dei solidi sospesi e dell'assimilazione da parte dei produttori primari.
- Il ricambio idrico assicura che il volume idrico rimanga costante.
- La temperatura e umidità relative dell'aria, la temperatura dell'acqua e la salinità vengono considerate delle forzanti, non influenzate dai flussi di materia: la loro evoluzione temporale viene stimata dai dati sperimentali.
- Il pH viene calcolato assumendo che gli equilibri acido-base che lo determinano siano all'equilibrio. In questo, per acque dolci e salmastre, può essere stimato con buona approssimazione dall'alcalinità, assumendo che questa sia approssimabile con l'alcalinità carbonatica.

4. APPLICAZIONE DEL MODELLO AGLI IMPIANTI PILOTA

In fase di progettazione, vennero individuate due tipologie di prodotti: 1) pesce marino, piante alofite e macroalghe; 2) pesce d'acqua dolce e micro-ortaggi. Durante i primi mesi del progetto BeBlue, gli impianti pilota acquaponici allestiti durante il progetto INTERREG Italia-Slovenia Bluegrass sono stati adattati alle co-produzioni sopra menzionate. In particolare, l'impianto gestito dal Dipartimento di Agronomia dell'Università di Lubljana, IP-UNILJU, è stato migliorato e predisposto alla valutazione della fattibilità della produzione di trota iridea, altre specie vegetali e micro-ortaggi mentre quello gestito presso il Campus Scientifico dell'Università di Venezia, IP-UNIVE, è stato modificato per potervi ospitare la co-produzione di orate, salicornia e macroalghe. Come descritto in dettaglio nel Deliverable D1.1.1 di BeBlue, gli impianti sono stati dotati di avanzati sistemi di monitoraggio automatico, in grado di fornire in tempo reale dati relativi alla qualità dell'acqua, dell'aria e ai consumi energetici. La notevole mole di dati rilevati quotidianamente è stata pre-processata mediante la piattaforma BQC per il controllo di qualità, pienamente operativa e descritta nel Deliverable D1.1.2.

Il modello dinamico generale descritto nel capitolo precedente è stato applicato ai due sistemi pilota, tenendo presente le loro diverse caratteristiche, sia riguardo le specie prodotte sia i sistemi di monitoraggio messi in opera per fornire i dati di ingresso e le osservazioni con cui confrontare le risposte del modello.

4.1 Modellazione di IP-UNIVE

Il sistema di monitoraggio operativo presso l'impianto gestito dal Lead Partner è descritto in dettaglio nei Deliverable D1.1.1 e D1.2.1. In Tabella 4-1 vengono elencati le principali funzioni forzanti, la loro azione e il grado di controllo. Esse vengono raggruppate in un vettore, denominato "**u**".

Tabella 4-1: Funzioni forzanti e loro grado di controllo.

	Unità di misura	Variabili di stato influenzate	Grado di controllo
u_1 : razione alimentare giornaliera	$[g_{feed}/day]$	Peso del pesce.	Controllabile
u_2 : ricambio idrico	$[m^3/h]$	Volume della soluzione e concentrazione delle sostanze sospese e disciolte.	Controllabile
u_3 : pompaggio di aria	$[m^3/h]$	Concentrazioni di Ossigeno Disciolto e Anidride Carbonica.	Controllabile

u ₄ : illuminazione artificiale con LED.	[W/m ²]	Intensità di radiazione fotosinteticamente attiva ricevuta dai produttori primary.	Parzialmente controllabile, in quanto PAR proviene anche dall'irraggiamento solare.
u ₆ : temperatura dell'acqua.	°C	Tutte le variabili biotiche.	In base alle ipotesi elencate alla fine del Cap. 3, viene considerata non controllabile
u ₇ : Temperatura dell'aria interna	[°C]	Biomassa delle piante, attraverso la modulazione della fotosintesi.	In base alle ipotesi elencate alla fine del Cap. 3, viene considerata non controllabile.
u ₈ : umidità relativa interna.	[%]	Volume idrico, attraverso il tasso di evaporazione dell'acqua,	In base alle ipotesi elencate alla fine del Cap. 3, viene considerata non controllabile.
u ₉ : Intensità della radiazione solare.	[W/m ²]	Biomassa delle piante e delle alghe, attraverso il processo di fotosintesi.	Non controllabile.

4.1.1 Dinamica delle variabili biotiche

La dinamica delle variabili biotiche dipende dalla scelta delle specie da co-produrre: è quindi necessario un modulo diverso per ogni specie. In IP-UNIVE è stata investigata la co-produzione di:

- Orata e Salicornia
- Orata e Lattuga di mare

in due linee parallele dell'impianto. I dati rilevati da aprile 2024 a febbraio 2025 sono riportati in dettaglio nel Deliverable D1.2.1. Le variabili di stato biotiche e le variabili di risposta per le due linee sono elencate in Tabella 4-2.

Tabella 4-2: Variabili di stato biotiche considerate nel sistema IP-UNIVE.

Linea Alghe - AL	Linea Salicornia - SA
x _{F1} : Peso medio individuale orate [g]	x _{F1} : Peso medio individuale orate [g]
x _{F2} : Numero di orate	x _{F2} : Numero di orate
x _{P1} : Densità di biomassa lattuga di mare [g]	x _{P1} : Peso medio di una pianta [g]
x _{P2} : concentrazione di N nella biomassa della lattuga di mare. [gN/gDW]	x _{P2} : Numero di piante

L'evoluzione temporale del peso medio delle orate è stata simulata utilizzando un modello dinamico che calcola l'accrescimento in base ad un bilancio energetico. Le equazioni sono descritte in dettaglio in (Brigolin&al., 2010) e (Bolzonella&al., 2023). Oltre a calcolare la variazione del peso in funzione della razione alimentare e della temperatura dell'acqua, il modello fornisce:

- la domanda di ossigeno e il rilascio di anidride carbonica, legati alla respirazione del pesce
- le escrezioni di azoto ammoniacale, legati alla metabolizzazione delle proteine
- l'emissione di feci.

Questi flussi di materia costituiscono dei flussi in ingresso per il modulo che simula l'evoluzione delle variabili abiotiche.

L'evoluzione temporale della densità di biomassa della lattuga di mare è stata simulata utilizzando un modello dinamico che include come variabile di stato anche la concentrazione interna di azoto, in quanto questa specie è in grado di accumularlo in organi di riserva. Le equazioni sono esposte in dettaglio in (Solidoro&al., 1997) e (Zollman&al., 2023). Le principali forzanti del modello sono PAR, temperatura dell'acqua e concentrazione di DIN in soluzione. In base ad esse, oltre alla variazione di biomassa e della concentrazione interna di azoto, il modulo consente di calcolare il flusso di azoto inorganico necessario a sostenere l'accrescimento dell'alga.

Per quanto riguarda salicornia, non sono stati reperiti in letteratura modelli dinamici per simularne l'accrescimento in base alle principali forzanti, quali PAR, temperatura di aria/acqua e concentrazioni di DIN. Si è quindi deciso di simulare l'evoluzione della biomassa mediante la funzione empirica di Gompertz, Eq. 4.1, largamente usata per prevedere l'accrescimento delle piante.

$$x_{p1} = a \exp[-b \exp(-ct)] \quad (4.1)$$

in cui x_{p1} è il peso totale di una pianta e "a", "b" e "c" sono tre parametri, stimati minimizzando gli scarti tra la funzione e le osservazioni descritte nel Deliverable D1.2.1.

Le biomasse di orate e produttori primari sono state stimate moltiplicando i pesi medi individuali rispettivamente per numero di orate e il numero di piante di salicornia: questi ultimi non sono stati inclusi nel vettore di stato ma dedotti dalle osservazioni in quanto, con pochi esemplari, variano in maniera discreta.

4.1.2 Definizione della matrice T

La simulazione dei processi di trasporto avveztivo tra i componenti di IP-UNIVE si è basata sulla schematizzazione presentata in Figura 4-1. Rispetto alla struttura generale descritta nel capitolo precedente, la vasca di raccolta è stata aggregata al volume della serra, GH, in quanto la qualità dell'acqua nei due componenti è risultata molto simile.

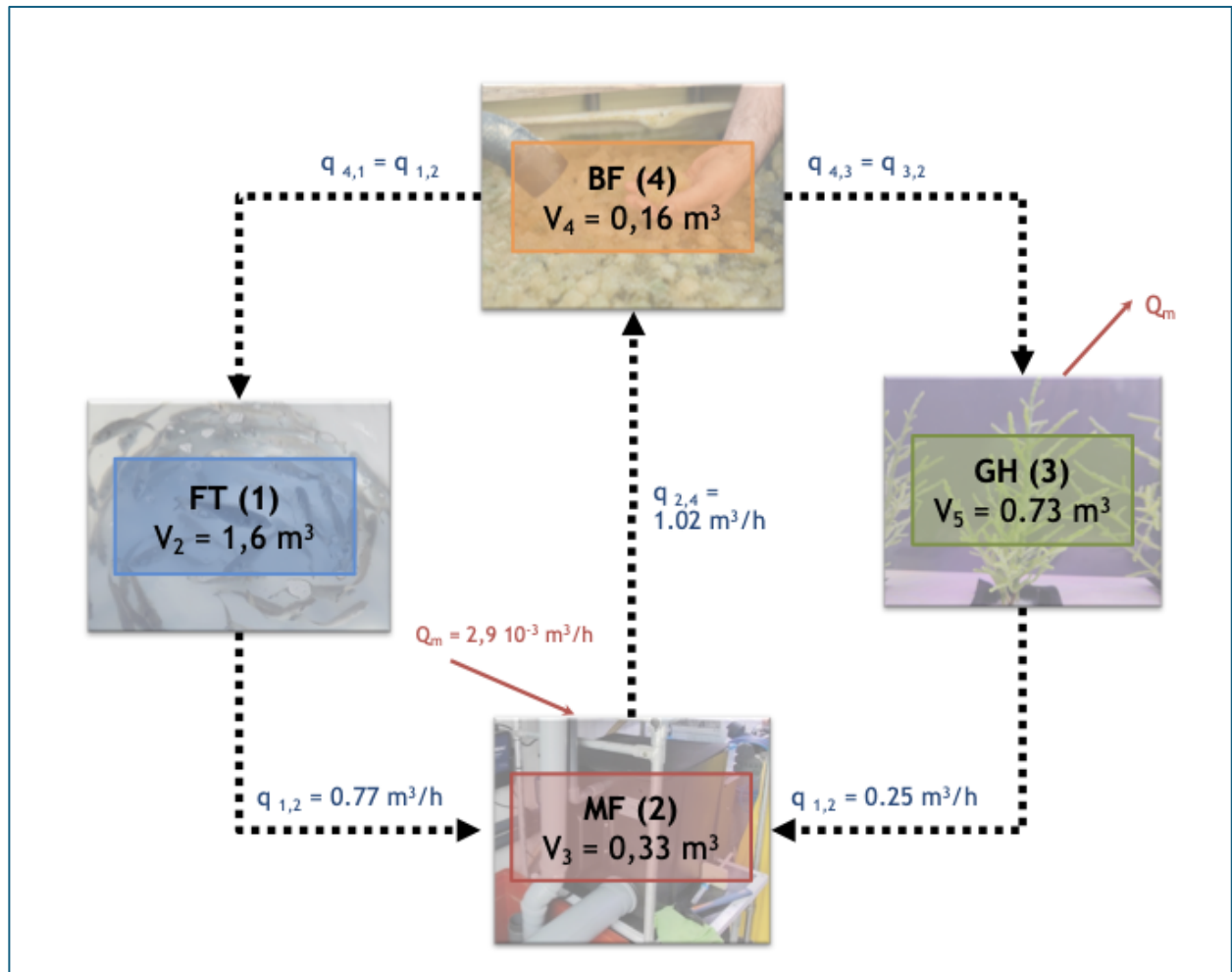


Figura 4-1: Schematizzazione di IP-UNIVE che evidenzia i flussi idrici tra i componenti del sistema.

In questo caso “ nc ” è pari a 4: i componenti sono rappresentati come altrettanti nodi, dai quali entra ed esce complessivamente la stessa portata idrica, in quanto si ipotizza che i loro volumi siano costanti. Ciò è espresso matematicamente dall’equazione:

$$\sum_{k=1}^{nn} q_k = 0 \quad (4.2)$$

in cui:

nn : è il numero di connessioni tra il componente “ j ” e gli altri.

q_k : portate volumetriche entranti o uscenti dal componente “ j ” verso il componente “ k ”. Le portate entranti hanno segno positive e sono indicate con $q_{k,j}$. Quelle uscenti sono **negative e indicate con $q_{j,k}$** .

I volumi medi e le portate medie, assunti costanti, formano gli elementi delle matrici V e Q , definite nell’equazione 3.4. Esse sono riportate in Figura 4-2: i **blocchi della matrice T** sono dati dal prodotto $V^{-1} Q$ [$nc \times nc$], che rappresenta i flussi idrici tra i blocchi. **Gli elementi diagonali di Q sono pari alla somma di tutti i flussi uscenti e quindi sono negativi**. Si ha:

$$q_{11} = -q_{21}; \quad q_{22} = -q_{42} \quad q_{33} = -q_{23} \quad q_{44} = -(q_{14} + q_{34})$$

$1/V_{11}$ $=1/1.69$	0	0	0	$q_{11} = -0.77$	0	0	$q_{14} = -q_{11}$
0	$1/V_{22}=$ $1/0.33$	0	0	$q_{21} = -q_{11}$	$q_{22} = -1.02$	$q_{23} = -q_{33}$	0
0	0	$1/V_{33}=$ $1/0.73$	0	0	0	$Q_{33} = -0.25$	$q_{34} = -q_{33}$
0	0	0	$1/V_{44}=$ $1/0.16$	0	$q_{42} = -q_{22}$		$q_{44} = -$ $(q_{14}+q_{34})$

Figura 4-2: Rappresentazione delle matrici V e Q per la simulazione dei processi di trasporto nel Sistema acquaponico

4.1.3 Definizione della matrice R

La matrice R tiene conto delle interazioni tra le variabili di stato abiotiche: la maggior parte dei suoi elementi è nulla, in quanto tali interazioni sono limitate a pochi processi. Gli elementi di R diversi da 0 sono descritti in Tabella 4-3.

Tabella 4-3: Interazioni tra le variabili di stato abiotiche.

Variabile	Processo	Unità di misura
TAN		
$R_{1,4} = -\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Nitrificazione dell'azoto ammoniacale nel biofiltro	mol/h
ξ_{BF}	Efficienza di conversione del biofiltro	-
NO3		
$R_{2,4} = +\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Nitrificazione dell'azoto ammoniacale nel biofiltro	mol/h
Alk		
$R_{3,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Variazione di Alcalinità legata alla nitrificazione di TAN	mol/h
DO		
$R_{5,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Ossigeno utilizzato nella nitrificazione dell'azoto ammoniacale nel biofiltro	mol/h
TSS		
$R_{6,2} = -\xi_{MF} \left(\frac{q_{1,2} * x_{1,6} + q_{3,2} * x_{4,6}}{V_2} \right)$	Rimozione dei solidi sospesi nel filtro meccanico.	g/h
ξ_{MF}	Efficienza del filtro meccanico	-

4.1.4 Definizione del vettore g

I flussi di materia scambiati tra gli organismi e la soluzione vengono inclusi nel vettore g , in quanto non dipendono dallo stato della soluzione, in base alle ipotesi riassunte alla fine del Cap. 3. Gli elementi di g definiti in base ad essi sono presentati in Tabella 4-4 per le due linee.

Tabella 4-4: Flussi di materia tra organismi e soluzione e tra soluzione e aria interna.

Variabile	Processo	Unità di misura
TAN		
$g_{1,1} = N_{exc} + N_{ric}$	Escrezioni di azoto ammoniacale dal pesce	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
NO3		
$g_{2,3} = N_{ass} + N_{ric}$	Assimilazione di nitrato dai produttori primari.	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
Alk		
$g_{3,1} = N_{exc} + N_{ric}$	Escrezioni di azoto ammoniacale dal pesce	$\left[\frac{mol_{eq}}{L \cdot h} \right]$
DIC		
$g_{4,1} = f_{resp} + DIC_{ric}$	Respirazione della biomassa del pesce	$\left[\frac{mol_{DIC}}{L \cdot h} \right]$
DO		
$g_{5,1} = f_{resp} + DO_{ric} + DO_{rear} + DO_{sup}$	Respirazione della biomassa del pesce	$\left[\frac{mol_{DO}}{L \cdot h} \right]$
$g_{5,3} = -DO_{photo} + DO_{resp}$ $g_{5,3} = 0$	Lattuga di mare: Fotosintesi e respirazione Salicornia	$\left[\frac{mol_{DO}}{L \cdot h} \right]$
TSS		
$g_{6,1} = f_{fec}$	Produzione delle feci del pesce	$\left[\frac{g_{TSS}}{L \cdot h} \right]$

Le matrici definite nei paragrafi precedenti vengono infine utilizzate per risolvere numericamente l'equazione 3.1, come schematizzato in Figura 4-3.

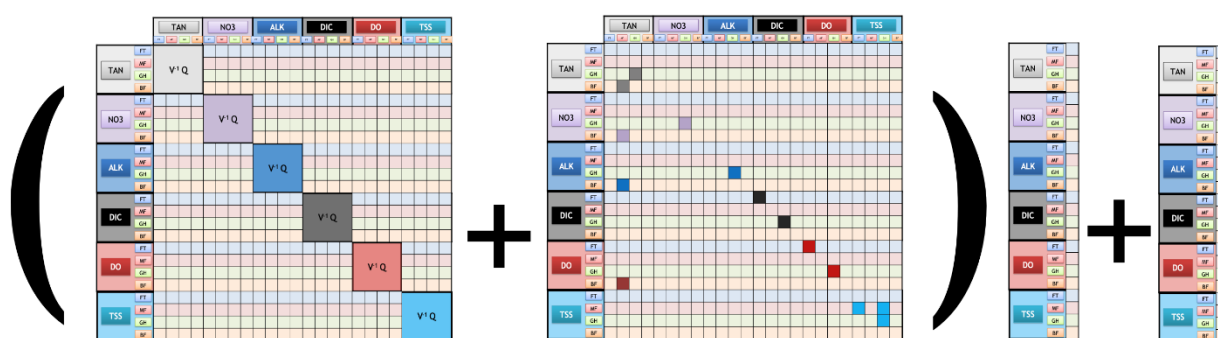


Figura 4-3: Applicazione dell'equazione matriciale 3.1 ad IP-UNIVE.

4.1.5 Variabili di risposta

Il modello è stato confrontato con i dati rilevati dal sistema di monitoraggio descritto in dettaglio nel Deliverable D1.2.1. Le variabili di risposta utilizzate sono riassunte in Tabella 4-5.

Tabella 4-5: Variabili di risposta utilizzate per verificare il funzionamento del modello dinamico.

Linea Alghe AL	Frequenza di campionamento	Linea Salicornia SA	Frequenza di campionamento
y ₁ : Peso medio individuale orate	1/mese	y ₁ : Peso medio individuale orate	1/mese
y ₂ : Densità di biomassa Algae.	1/settimana	y ₂ : Densità di biomassa Algae.	1/mese
y ₃ : concentrazione media di TAN [mmol/L] in GH e BF	1/ settimana	y ₃ : concentrazione media di TAN [mmol/L] in GH e BF	1/ settimana
y ₄ : concentrazione media di NO3 [mmol/L] in GH e BF	1/ settimana	y ₄ : concentrazione media di NO3 [mmol/L] in GH e BF	1/ settimana
y ₅ : concentrazione media di DO [mmol/L] in entrata e uscita di GH	1/15 minutes	y ₅ : concentrazione media di DO [mmol/L] in entrata e uscita di GH	1/15 minutes
y ₆ : concentrazione di DO [% di saturazione] in entrata e uscita di GH	1/15 minutes	y ₆ : concentrazione di DO [% di saturazione] in entrata e uscita di GH	1/15 minutes
y ₇ : pH in entrata e uscita di GH	1/15 minutes	y ₇ : pH in entrata e uscita di GH	1/15 minutes

4.2 Modellazione di IP-UNILJU

Il sistema di monitoraggio operativo presso l'impianto gestito da PP2, Università di Ljubljana è descritto in dettaglio nei Deliverable D1.1.1 e D1.1.2. In Tabella 4-6, analoga alla Tabella 4-1, vengono elencati le principali funzioni forzanti.

Tabella 4-6: Funzioni forzanti monitorate in IP-UNILJU e loro grado di controllo.

	Unità di misura	Variabili di stato influenzate	Grado di controllo
u ₁ : razione alimentare giornaliera	g_{feed} / giorno	Peso del pesce.	Controllabile
u ₂ : ricambio idrico	m ³ /h	Volume della soluzione e concentrazione delle sostanze sospese e disciolte.	Controllabile
u ₃ : pompaggio di aria	m ³ /h	Concentrazioni di Ossigeno Disciolto e Anidride Carbonica.	Controllabile
u ₄ : temperatura dell'acqua.	°C	Tutte le variabili biotiche.	In base alle ipotesi elencate alla fine del Cap. 3, viene considerata non controllabile
u ₅ : temperatura dell'aria interna.	°C	Biomassa delle piante, attraverso la modulazione della fotosintesi.	In base alle ipotesi elencate alla fine del Cap. 3, viene considerata non controllabile.
u ₆ : umidità relativa interna.	%	Volume idrico, attraverso il tasso di evaporazione dell'acqua,	In base alle ipotesi elencate alla fine del Cap. 3, viene considerata non controllabile.
u ₇ : Intensità della radiazione solare.	W/m^2	Biomassa delle piante e delle alghe, attraverso il processo di fotosintesi.	Non controllabile.

4.2.1 Dinamica delle variabili biotiche

Nell'impianto IP-UNILJU, vedi Deliverable D1.1.1, è stata investigata la co-produzione di:

- Trota iridea
- Lattuga, varietà Salanova

Nel periodo Marzo 2024 – Febbraio 2025, la sperimentazione riguardante Salanova è stata condotta tra il 15 marzo e il 18 maggio 2025. Il modello quindi è stato applicato a questa finestra temporale. Le variabili di stato biotiche sono elencate in Tabella 4-7.

Tabella 4-7: Variabili di stato biotiche considerate in IP-UNILJU.

Variabile di Stato Biotiche
x_{F1} : Peso medio individuale trote [g]
X_{F2} : Numero trote
x_{P1} : Peso medio di una pianta di lattuga [g]
X_{P2} : numero piante

Le biomasse di trote e lattuga sono state stimate moltiplicando i pesi medi individuali rispettivamente per numero di orate e il numero di piante di lattuga: questi ultimi non sono stato inclusi nel vettore di stato ma dedotti dalle osservazioni in quanto, con pochi esemplari, variano in maniera discreta.

L'evoluzione temporale del peso medio delle trote è stata simulata utilizzando un modello dinamico che calcola l'accrescimento in base ad un bilancio energetico. Le equazioni sono descritte in dettaglio in (Bolzonella&al., 2024). Oltre a calcolare la variazione del peso in funzione della razione alimentare e della temperatura dell'acqua, il modello fornisce:

- la domanda di ossigeno e il rilascio di anidride carbonica, legati alla respirazione del pesce
- le escrezioni di azoto ammoniacale, legati alla metabolizzazione delle proteine
- l'emissione delle feci.

Questi flussi di materia costituiscono degli ingressi per il modulo che simula l'evoluzione delle variabili abiotiche.

L'evoluzione temporale del peso fresco di una pianta di lattuga è stata simulata utilizzando un modello dinamico che simula l'evoluzione del carbonio organico contenuto nell'apparato fogliare e radicale (Ioslovich&al., 2002). Il modello calcola il tasso di accrescimento in relazione all'intensità di PAR e alla temperatura dell'aria, assumendo che la concentrazione di DIN in soluzione sia sempre sufficiente a soddisfare la richiesta della pianta, proporzionale al carbonio fissato per fotosintesi. Questa ipotesi è coerente con quanto assunto nel Cap. 3. Il peso del carbonio viene quindi convertito in peso fresco tenendo conto della percentuale media di acqua contenuta in Salanova. Oltre alla variazione di biomassa e della concentrazione interna di azoto, il modulo consente quindi di calcolare il flusso di azoto inorganico necessario a sostenere l'accrescimento della lattuga: esso viene stimato assumendo che la percentuale di proteine nella pianta sia costante, pari ad 1.3% del peso fresco.

4.2.2 Definizione della matrice T

La simulazione dei processi di trasporto avveztivo tra i componenti di IP-UNILJU si è basata sulla schematizzazione presentata in Figura 4-4, analoga alla Figura 4-1: in questo caso, come si può notare, “nc” è pari a 5.

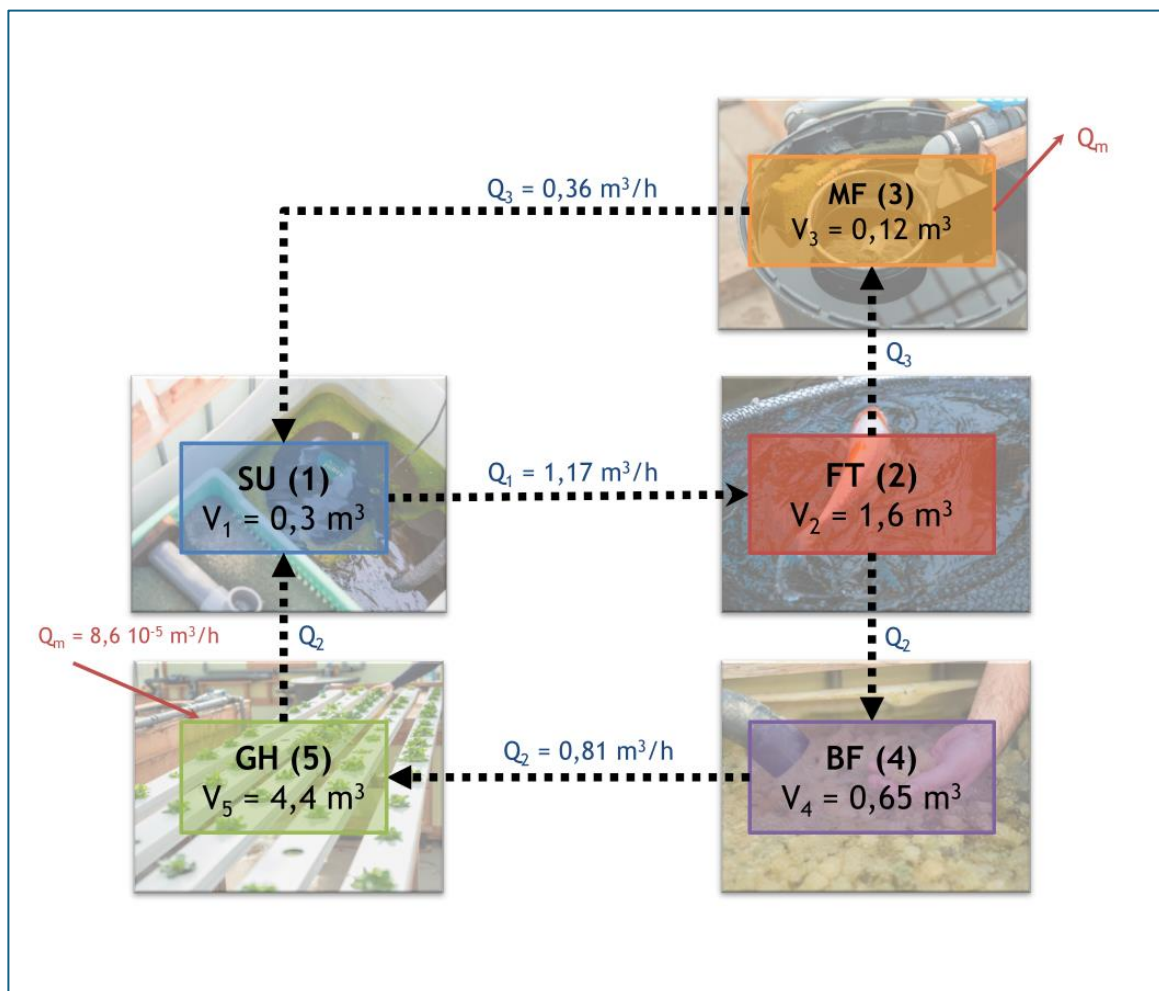


Figura 4-4: Schematizzazione di IP-UNILJU che evidenzia i flussi idrici tra i componenti del sistema.

4.2.3 Definizione della matrice R

Tabella 4-8: Interazioni tra le variabili di stato abiotiche.

Variabile	Processo	Unità di misura
TAN		
$R_{1,4} = -\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1} x_{2,1}}{V_4} \right)$	Nitrificazione dell'azoto ammoniacale nel biofiltro	mol/h
ξ_{BF}	Efficienza di conversione del biofiltro	-
NO3		
$R_{2,4} = +\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1} x_{2,1}}{V_4} \right)$	Nitrificazione dell'azoto ammoniacale nel biofiltro	mol/h
Alk		
$R_{3,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1} x_{2,1}}{V_4} \right)$	Variazione di Alcalinità legata alla nitrificazione di TAN	mol/h
DO		
$R_{5,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1} x_{2,1}}{V_4} \right)$	Ossigeno utilizzato nella nitrificazione dell'azoto ammoniacale nel biofiltro	mol/h
TSS		
$R_{6,3} = -\xi_{MF} \left(\frac{q_{2,3} * x_{2,6}}{V_3} \right)$	Rimozione dei solidi sospesi nel filtro meccanico.	g/h
ξ_{MF}	Efficienza del filtro meccanico	-

4.2.4 Definizione del vettore g

Gli elementi di g definiti sono presentati in Tabella 4-9 analoga alla Tabella 4-4.

Tabella 4-9: Flussi di materia tra organismi e soluzione e tra soluzione e aria interna.

Variabile	Processo	Unità
TAN		
$g_{1,2} = N_{exc} + N_{ric}$	Escrezioni di azoto ammoniacale dal pesce	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
NO3		
$g_{2,5} = N_{ass} + N_{ric}$	Assimilazione di nitrato dai produttori primari.	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
Alk		
$g_{3,2} = N_{exc} + N_{ric}$	Escrezioni di azoto ammoniacale dal pesce	$\left[\frac{mol_{eq}}{L \cdot h} \right]$
DIC		
$g_{4,2} = f_{resp} + DIC_{ric}$	Respirazione della biomassa del pesce	$\left[\frac{mol_{DIC}}{L \cdot h} \right]$
DO		
$g_{5,2} = f_{resp} + DO_{ric} + DO_{rear} + DO_{sup}$	Respirazione della biomassa del pesce	$\left[\frac{mol_{DO}}{L \cdot h} \right]$
TSS		
$g_{6,2} = f_{fec}$	Produzione delle feci del pesce	$\left[\frac{g_{TSS}}{L \cdot h} \right]$

4.2.5 Variabili di risposta

Il modello è stato confrontato con i dati rilevati dal sistema di monitoraggio descritto in dettaglio nel Deliverable D1_1_1. Le variabili di risposta all'IP-UNILJU utilizzate sono riassunte in Tab. 4.10

Tab. 4.10 Variabili di risposta utilizzate per verificare il funzionamento del modello dinamico.

Variabili di Risposta	Frequenza di campionamento
y_1 : Peso medio individuale trote	1/mese
y_2 : Peso medio piante di lattuga	Al raccolto
y_3 : concentrazione media di TAN [mmol/L] in SU and FT	1/ settimana
y_4 : concentrazione media di NO3 [mmol/L] in SU and FT	1/ settimana
y_5 : concentrazione di DO [mmol/L] in FT	1/10 minuti
y_6 : concentrazione di DO [% di saturazione] in FT	1/10 minuti
y_7 : pH in FT	1/5 minuti

5. RISULTATI

Il modello dinamico, parte integrante del prototipo di Digital Twin, è stato messo alla prova applicandolo a tre co-produzioni:

- Orata e lattuga di mare;
- Orata e salicornia;
- Trota iridea e lattuga, varietà Salanova

I risultati vengono presentati separatamente nel seguito del capitolo.

5.1 IP-UNIVE: Orata e salicornia

La sperimentazione relativa alla co-produzione di orate e salicornia ha dato risultati molto interessanti, esposti in dettaglio nel Deliverable D1.2.1. Il modello è stato applicato al periodo 15 aprile – 15 agosto 2024, in cui il ricambio idrico è stato limitato. Le condizioni iniziali, dedotte da stime e osservazioni, sono elencate in Tabella 5-1.

Tabella 5-1: Condizioni iniziali utilizzate per simulare il funzionamento della linea salicornia.

Variabili Biotiche	Valore	Unità	Origine
Salicornia			
Peso medio iniziale	3	grammi	stimato
Numero di Individui	20	piante	osservato
Area	1	m ²	osservato
Orate			
Peso medio Iniziale	45.3	grammi	osservato
Numero Individui	37	pesce	osservato
Variabili Abiotiche	Valore	Unità	Origine
TAN	2.77E-03	mmol-N/L	stimato
NO3	0.270	mmol-N/L	stimato
Alcalinità	4.74	mmol _{eq} /L	stimato
DIC	4.84	mmol/L	stimato
DO	0.219	mmol/L	stimato
TSS	0	mg/L	stimato

Le Figure 5-1 presentano le funzioni forzanti, e le curve di crescita del peso medio delle orate e delle piante di salicornia a confronto con le osservazioni. Come si può notare, il modello simula correttamente le evoluzioni dei pesi medi sia delle orate sia di salicornia.



Figure 5-1: Evoluzione delle funzioni forzanti e delle variabili biotiche nel quadrimestre simulato con il Digital Twin

Durante i primi due mesi la biomassa vegetale è cresciuta pressoché esponenzialmente ad un tasso di crescita specifico giornaliero, o SGR, di circa il 7%. Le osservazioni mostrano una elevata variabilità: in prospettiva, ciò indica la possibilità di selezionare le piante caratterizzate dal tasso di crescita più elevato, pari a 8%/giorno. Nel periodo simulato, il peso medio delle orate è passato da 40 a 150 grammi, in linea con gli accrescimenti osservati in impianti commerciali. La temperatura dell'acqua ha raggiunto e superato i 30 °C in luglio e agosto ma ciò non sembra aver causato eccessivo stress al pesce, mantenuto in un ambiente ben ossigenato e a bassa densità. La salinità si è mantenuta pressoché costante, a valori ben tollerati sia dal pesce sia dalla salicornia.

L'evoluzione delle variabili abiotiche e del pH simulata e osservata è mostrata nelle Figure 5-2 e Figure 5-3, che presentano le concentrazioni simulate nei quattro componenti del sistema, vedi Figura 4-1, a confronto con le variabili di risposta definite in Tabella 4-5: Variabili di risposta utilizzate per verificare il funzionamento del modello dinamico. Il modello riproduce correttamente la, complessa, dinamica delle sei variabili, influenzate dal metabolismo delle variabili biotiche ma anche dagli equilibri chimici. La Figure 5-2 evidenzia che la concentrazione di nitrato è molto simile nei quattro componenti: i valori simulati sono leggermente superiori a quelli osservati in quanto in un sistema acquaponico vi sono perdite di azoto difficilmente quantificabili: esse potrebbero essere considerate introducendo un termine correttivo nel modello. La concentrazione di TAN mostra invece i valori più elevati nella vasca di allevamento del pesce: è chiaro l'effetto del biofiltro nell'abbatterla. L'analisi dei flussi di azoto da e verso la soluzione, presentata nel terzo grafico, evidenzia che la superficie coltivata è in grado di assimilare solo una piccola parte dell'azoto escreto dall'attività metabolica del pesce: **questa informazione può essere utilizzata per dimensionare correttamente il sistema acquaponico**. Infine, la concentrazione simulata dell'ossigeno disciolto è leggermente inferiore nel biofiltro, in cui viene utilizzato dai batteri nella reazione di nitrificazione, ma il dispositivo di areazione forzata è comunque sufficiente a garantire livelli molto vicini alla saturazione, quindi ottimali per la respirazione del pesce e delle radici delle piante, ben simulati dal modello.

Le altre due variabili di stato, ALK e DIC, influenzano l'acidità della soluzione. Come si può notare dalla Figure 5-3, L'alcalinità diminuisce nel tempo, in quanto la reazione di nitrificazione riduce l'azoto ammoniacale e, quindi, anche l'alcalinità della soluzione, in base all'equazione 2.1. La concentrazione di carbonio inorganico disciolto dipende dalle immissioni di anidride carbonica legate principalmente alla respirazione del pesce ed allo scambio con l'atmosfera: in presenza di areazione forzata, il sistema tende all'equilibrio termodinamico, che si stabilisce a valori inferiori a quelli della soluzione: quindi DIC diminuisce. Coerentemente, diminuisce anche il pH: i valori simulati sono leggermente superiori a quelli osservati nella prima parte della simulazione per poi allinearsi con i dati.

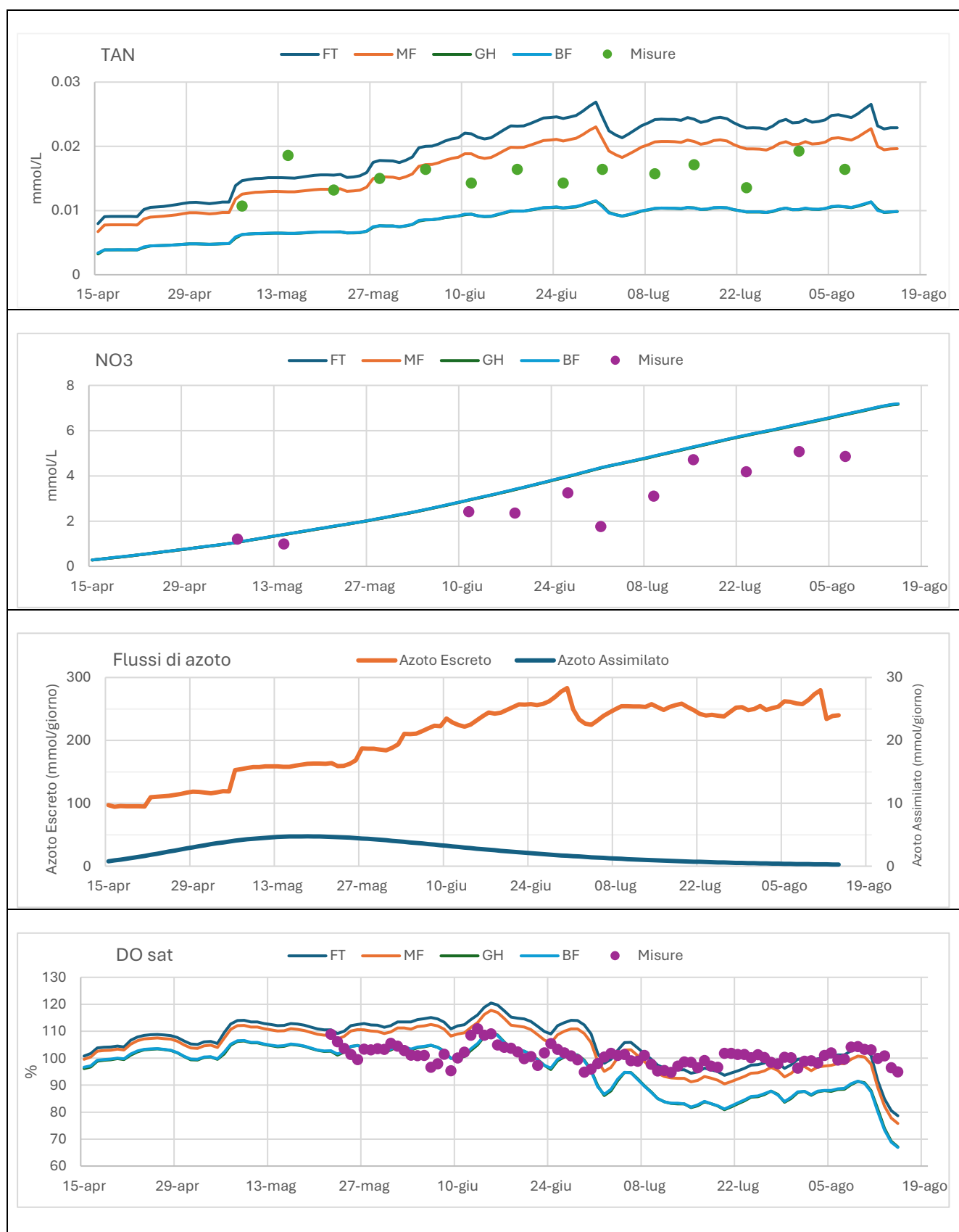


Figure 5-2: Evoluzione delle concentrazioni di TAN, nitrato, flusso di azoto escreto dal pesce e assimilato dalla salicornia, ossigeno disciolto nei 4 componenti del sistema acquaponico IP-UNIVE.

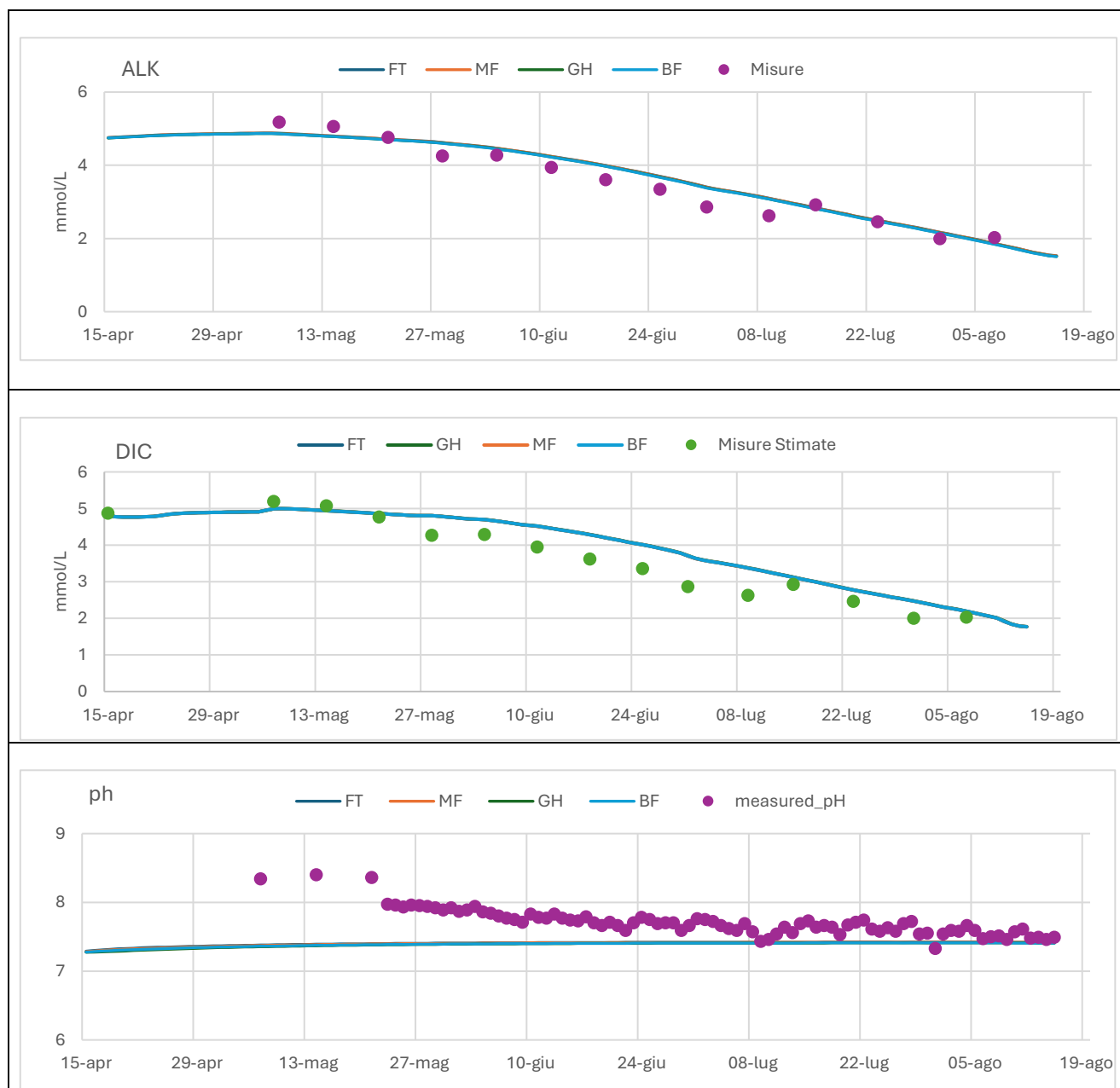


Figure 5-3: Evoluzione delle concentrazioni di alcalinità, carbonio inorganico disciolto e valori di pH nei 4 componenti del sistema acquaponico IP-UNIVE.

5.2 IP-UNIVE: Orata e lattuga di mare

La sperimentazione relativa alla co-produzione di orate e lattuga di mare ha dato risultati interessanti, ma limitati ad una finestra temporale piuttosto stretta, compresa tra aprile e giugno: si veda, a tal proposito, il Deliverable D1.2.1. Il modello è stato applicato al periodo 03 maggio al 05 luglio 2024 in cui l'alga ha mostrato gli accrescimenti più elevate: a titolo di esempio, si riportano i risultati ottenuti per un ciclo produttivo della durata di due settimane. Le condizioni iniziali, dedotte da stime e osservazioni, sono elencate in Tab. 5.3.

Tab. 5.3 Condizioni iniziali utilizzate per simulare il funzionamento della linea salicornia.

Variabili Biotiche	Valore	Unità	Origine
Ulva			

Biomassa Iniziale	524	grammi	osservata
Area	1	m ²	osservata
Orate			
Peso medio Iniziale	45.3	grammi	osservato
Numero Individui	37	pesce	osservato
Variabili Abiotiche	Valore	Unità	Origine
TAN	2.77E-03	mmol-N/L	stimato
NO3	0.270	mmol-N/L	stimato
Alcalinità	4.74	mmol _{eq} /L	stimato
DIC	4.84	mmol/L	stimato
DO	0.219	mmol/L	stimato
TSS	0	mg/L	stimato

La Figure 5-4 presenta le funzioni forzanti e le curve di crescita di orate e lattuga di mare, a confronto con le osservazioni per il ciclo di crescita iniziato il 24 maggio e terminato il 6 giugno 2024. Nel periodo simulato, il peso medio delle 35 orate della linea AL è passato da 42.4 a 55.8 grammi, mostrando un tasso di crescita giornaliero simile a quello della linea dedicata alla coltivazione della salicornia. Come si può notare, la biomassa macroalgale è cresciuta esponenzialmente ad un tasso di crescita specifico giornaliero, o SGR, pari a circa il 5% : il tempo di raddoppiamento è quindi stato di circa 14 giorni. Il modello simula correttamente l'evoluzione delle due variabili biotiche: ciò indica che la struttura descritta nel Cap. 3 è sufficientemente flessibile e robusta. Sebbene la lattuga di mare sia cresciuta ad un ritmo sostenuto in un ristretta finestra temporale, gli elevati tassi di crescita potrebbero essere sfruttati per massimizzare la produzione in primavera e poi preservare il prodotto, al fine di distribuirlo lungo il corso dell'anno. Le variabili abiotiche hanno mostrato evoluzioni simili a quelle evidenziate nelle Figure 5-2 e Figure 5-3 e non vengono qui riprodotte.

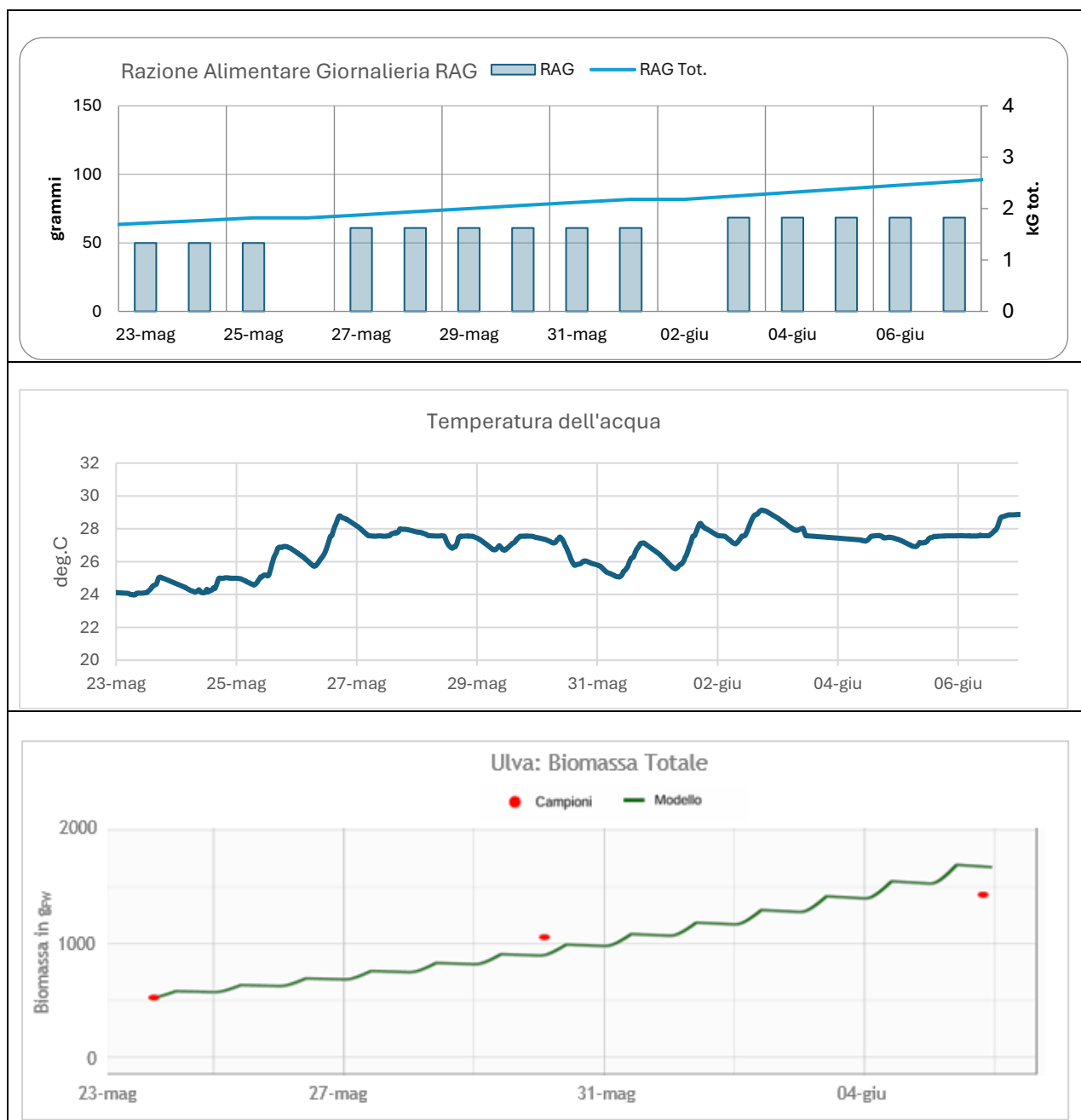


Figure 5-4: Evoluzione della razione alimentare, della temperatura dell'acqua e della densità di biomassa della lattuga di mare.

5.3 IP-UNILJU: Trota iridea e lattuga

La sperimentazione relativa alla co-produzione di trota iridea e lattuga, varietà Salanova, è stata effettuata nel periodo 15 marzo – 15 aprile 2024, in cui è stato coltivato un ciclo mensile di lattuga in tutto l'impianto. Le condizioni iniziali, dedotte da stime e osservazioni, sono elencate in Tab. 5.4. Durante questo periodo erano presenti nel sistema anche 12 esemplari di Carpa Koi, con biomassa totale pari a 2.63 kg. Le escrezioni di azoto da questa specie sono state parametrizzate assumendo che 1 kg di mangime produca 0.047 kg di NH₃, in accordo con dos Santos & al., 2022. In totale sono stati somministrati 48g di mangime al giorno.

Tab. 5.4 Condizioni iniziali utilizzate per simulare il funzionamento della linea salicornia.

Variabili Biotiche	Valore	Unità	Origine
Lattuga			
Peso medio Iniziale	3	grammi	osservato
Numero di Individui	20	piante	osservato
Area	10	m ²	misurato
Trota			
Peso (medio) Iniziale	100	grammi	osservato
Numero Individui	50	pesce	osservato
Variabili abiotiche	Valore	Unità	Origine
TAN	7.86E-02	mmol-N/L	stimato
NO ₃	1.11	mmol-N/L	stimato
Alcalinità	4.74	mmol _{eq} /L	stimato
DIC	4.84	mmol/L	stimato
DO	0.30	mmol/L	stimato
TSS	0	mg/L	stimato

La Figure 5-5 presenta le funzioni forzanti, e le curve di crescita del peso medio delle orate e delle piante di lattuga a confronto con le osservazioni. Nell'impianto la lattuga è stata coltivata utilizzando tre metodologie: DWC, NFT, MFB. Le rese sono state piuttosto diverse: quelle migliori sono state ottenute con la metodologia DWC. Il modello evidenzia che la biomassa vegetale è cresciuta pressoché esponenzialmente ad un tasso di crescita specifico giornaliero, o SGR, di circa 13%. Tuttavia, le trote non sono state alimentate in maniera sufficiente: nel periodo simulato, il peso medio delle trote è sceso da 100 a 92 grammi.

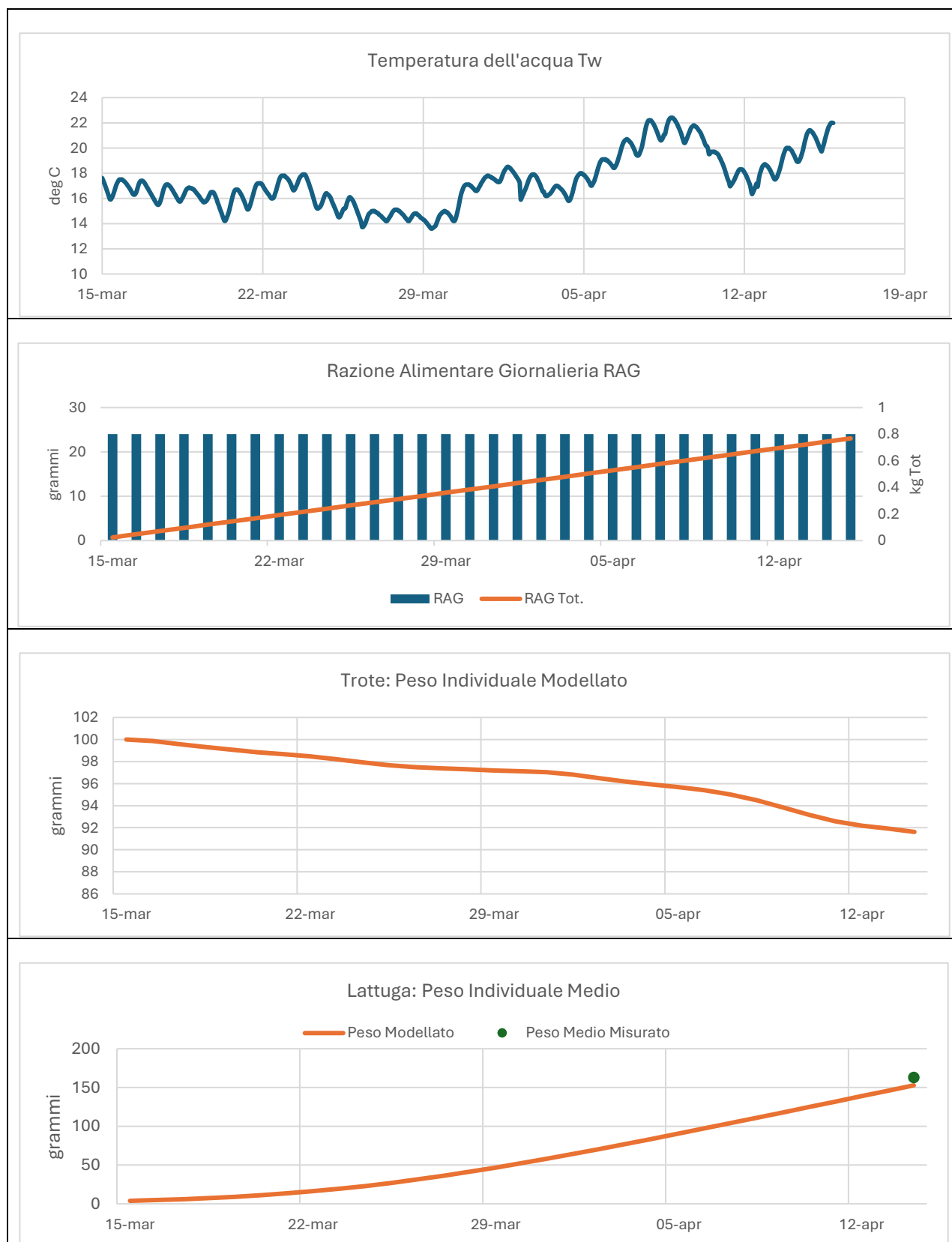


Figure 5-5: Evoluzione della razione alimentare, della temperatura dell'acqua, del peso medio delle trote, del peso medio individuale di una pianta di lattuga coltivata in DWC e dei flussi di azoto dal pesce alla soluzione e dalla soluzione alle piante, assumendo una produttività uguale dei tre sistemi.

L'evoluzione delle variabili abiotiche e del pH simulata e osservata è mostrata Figure 5-6. La Figure 5-6 evidenzia che il modello simula correttamente l'evoluzione di TAN,

mantenuto a basse concentrazioni dall'attività del biofiltro. Viene invece sovrastimata la concentrazione di nitrato: le osservazioni evidenziano una diminuzione, mentre la simulazione presenta un livello approssimativamente costante. Questo risultato può essere spiegato se si osserva il confronto tra il flusso di azoto escreto dal pesce e quello assimilato dalla lattuga, mostrato nel terzo grafico: i due termini verso la fine del ciclo si bilanciano e quindi la concentrazione nella soluzione cambia poco. Anche in questo caso, si deve quindi supporre che il sistema acquaponico perda azoto: si veda (Sumeth&al., 2017) per una rassegna dei processi che possono concorrere alla perdita. La concentrazione di ossigeno disciolto simulata si allinea con quella osservata, che rimane pressoché costante e molto vicina al livello di saturazione.

Per quanto riguarda le altre variabili, non sono disponibili confronti con l'alcalinità ma la sua evoluzione appare plausibile: il modello prevede infatti una diminuzione di questa variabile in assenza di ricambio idrico o aggiunta di composti basici in quanto la reazione di nitrificazione riduce la concentrazione di NH_3 ed aumenta il pH. Quest'ultimo presenta una differenza sistematica negativa rispetto ai dati: la mancanza di informazioni sperimentali riguardo l'alcalinità rende difficile interpretarla.

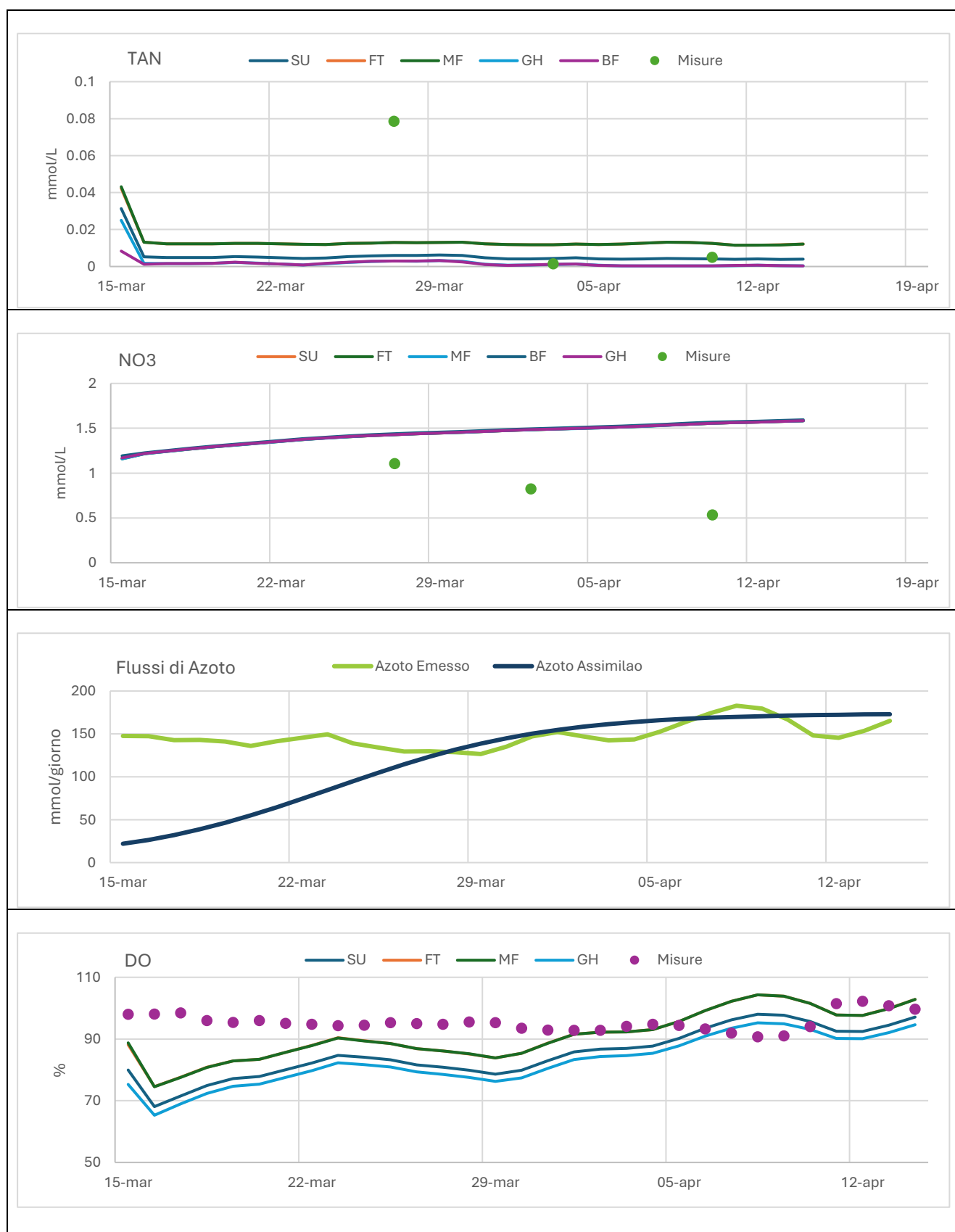


Figure 5-6: Evoluzione delle concentrazioni di TAN, nitrato e ossigeno disciolto nei 5 componenti del sistema acquaponico IP-UNILJU.

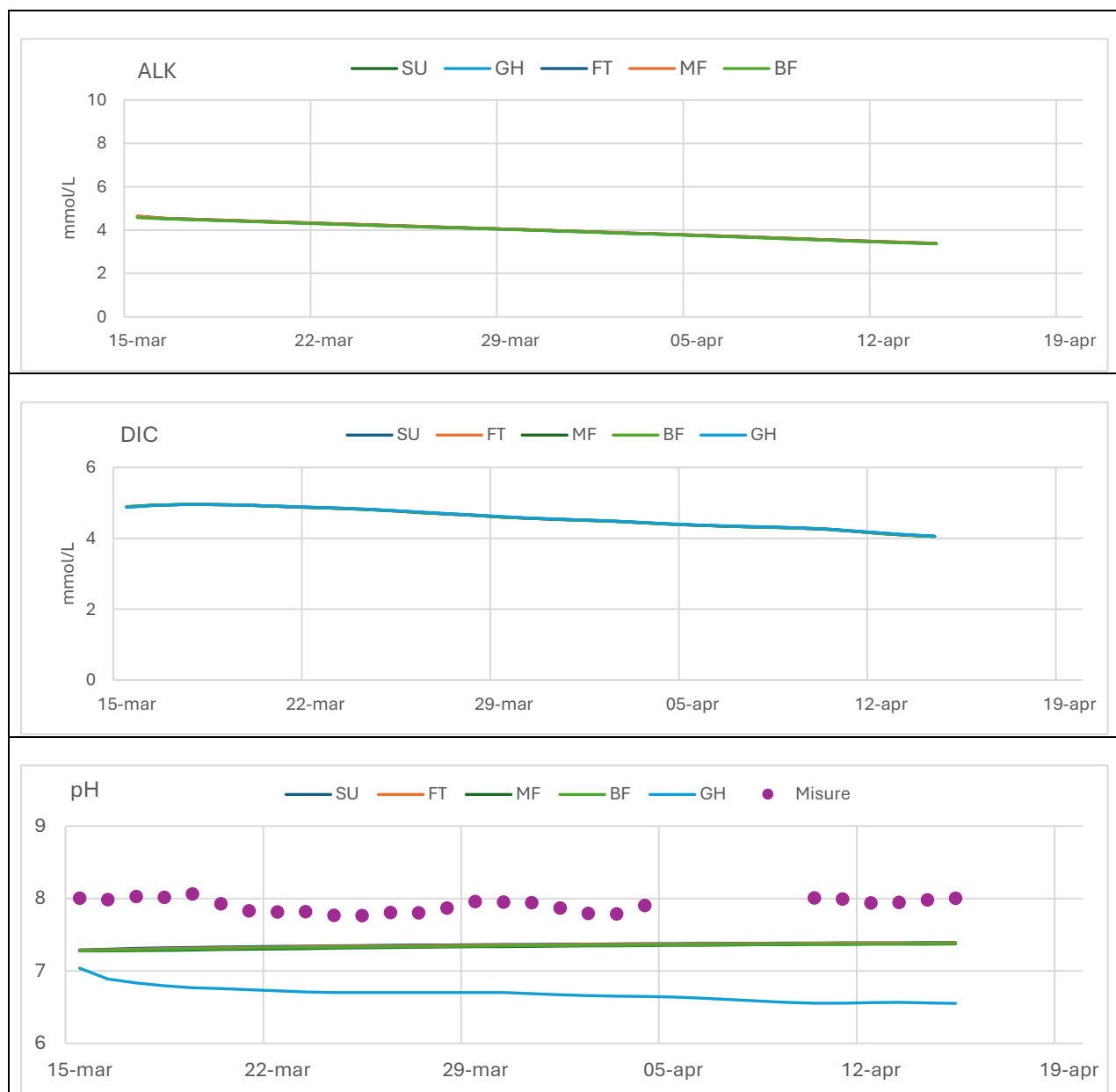


Figure 5-7: Evoluzione delle concentrazioni di alcalinit , carbonio inorganico disciolto e valori di pH nei 5 componenti del sistema acquaponico IP-UNILJU.

6. CONCLUSIONI

I risultati presentati nel capitolo precedente suggeriscono le conclusioni riassunte di seguito.

- La struttura del modello dinamico di sistema acquaponico identificata nel corso del progetto BeBlue è innovativa ed estende a questa tipologia di produzione agroalimentare circolare i principi dell'acquacoltura di precisione.
- Il modello apre la via alla digitalizzazione degli impianti acquaponici ed alla loro ottimizzazione sia della loro progettazione, sia della gestione, basate sulla quantificazione dinamica dei bilanci di massa dei principali macroelementi, in particolare dell'azoto.
- La simulazione degli equilibri chimici in soluzione, oltre ai flussi di materia scambiati tra gli organismi allevati e la soluzione, permette di valutare l'acidità della soluzione e, quindi di regolarla, mediante aggiunte di composti basici o acidi.
- L'applicazione dello stesso modello a tre casi studio, investigati negli impianti pilota gestiti dal LP, UNIVe e da PP2, UNILJU evidenzia la sua capacità di simulare correttamente la dinamica dei diversi sistemi acquaponici, ivi incluse le due linee di acquaponica marina, in cui sono state prodotte: 1) orate e salicornia; 2) orate e lattuga di mare. Questa tipologia di acquaponica è del tutto nuova per l'area di programma.
- Le buone prestazioni del modello nei tre casi pilota testimonia la flessibilità della sua struttura generale: ciò significa che, predisponendo moduli di accrescimento per specie ittiche e vegetali differenti, sia possibile simulare la dinamica di una grande varietà di combinazioni di prodotti acquaponici.
- In prospettiva, il modello potrà fornire prestazioni ancora più interessanti, soprattutto a livello gestionale, introducendo algoritmi di assimilazione dei dati: in tal modo si potrà completare il lavoro iniziato in BeBlue, passando dal prototipo di Digital Twin, qui descritto, ad un Digital Twin operativo ed adattato alle diverse esigenze aziendali.

7. Bibliografia

Bolzonella, 2024. Development and application of mathematical models for the implementation of the Precision Fish Farming approach. Tesi di Dottorato, Univ. Ca' Foscari Venezia.

Bolzonella, M., R. Rizzi, R. Pastres, R. Modelling system for the eco-intensification of a seabass and seabream inland fish farming. Deliverable D4.2 NewTechAqua H2020 project. <https://cordis.europa.eu/project/id/862658>.

Brigolin D., R. Pastres, P. Tomassetti, S. Porrello, 2010. Modelling the biomass yield and the impact of seabream mariculture in the Adriatic and Tyrrhenian Seas (Italy). *Aquacult Int* (2010) 18:149–163 DOI 10.1007/s10499-008-9232-4

dos Santos, A. M., Bernardino, L. F., Attramadal, K. J. K., & Skogestad, S. (2023). Steady-state and dynamic model for recirculating aquaculture systems with ph included. *Aquacultural Engineering*, 102, 102346. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102346>

Fore M., Frank K., Norton T., Svendsen E., Alfredsen J.O., Dempster T., Eguiraun H., Watson W., Stahl A., Sunde L.M., Schellewald C., Skoien K.R., Alver M.O., Berckmans D., 2018. Precision fish farming: a new framework to improve production in aquaculture. *Biosyst Eng* 173:176–193. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014>

M. Føre, M. O. Alver, J. A. Alfredsen, A. Rasheed, T. Hukkelås, H. V. Bjelland, B. Su, S. J. Ohrem, E. Kelasidi, T. Norton, N. Papandroulakis, 2024. Digital Twins in intensive aquaculture—Challenges, opportunities and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture* 218 (2024) 108676. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108676>

Ioslovich, I., Seginer I., Baskin, 2002. A. Fitting the Nicolet Lettuce Growth Model to Plant-spacing Experimental Data *Biosystems Engineering* (2002) 83 (3), 361–371. doi:10.1016/S1537-5110(02)00197-6

O'Leary, J. W., Glenn, E. P., & Watson, M. C. (1985). Agricultural production of halophytes irrigated with seawater. *Biosalinity in Action: Bioproduction with Saline Water*, 311–321. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5111-2_21

Royer, E. & Pastres, R., 2022. Data assimilation as a key step towards the implementation of an efficient management of dissolved oxygen in land-based aquaculture. *Aquaculture International*. <https://doi.org/10.1007/s10499-022-01028-w>.

Shpigel, M., Ben-Ezra, D., Shauli, L., Sagi, M., Ventura, Y., Samocha, T., & Lee, J. J. (2013). Constructed wetland with *Salicornia* as a biofilter for mariculture effluents. *Aquaculture*, 412–413, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.038>

Solidoro, C. , V.E. Brando, C. Dejak, D. Franco, R. Pastres, G. Pecenic. 1997. Long term simulations of population dynamics of *Ulva* r. in the lagoon of Venice. *Ecological Modelling* 102 (1997) 259–272

Sumeth Wongkiewa, Zhen Hub, Kartik Chandranc, Jae Woo Leed, Samir Kumar Khanala,* Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering* 76 (2017) 9–19

Zollmann, Meiron & Liberzon, Alex & Golberg, Alexander. (2023). Modeling of growth of the macroalga *Ulva* sp. in a controlled photobioreactor based on nitrogen accumulation dynamics. *Applied Phycology*. 4. 121-140. 10.1080/26388081.2023.2224423.