



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti

Risorse naturali e Ambiente

Corso di laurea Magistrale Scienze e Tecnologie Agrarie

EFFETTO DELLA SALINITÀ SU COLTIVAZIONE E QUALITÀ  
DI BIETA DA COSTA IN ACQUAPONICA

Relatore: Prof. Nicoletto Carlo

Correlatore: Dott.ssa De Bonis Marina

Laureando: Grisi Riccardo

Matricola n. 2107656

ANNO ACCADEMICO 2025/2026



## Indice

Riassunto.....	7
Abstract.....	9
1. Introduzione.....	11
1.1 Sfide globali e consumo delle risorse in agricoltura: .....	11
1.2 La risorsa idrica: .....	11
1.3 Coltivazioni fuori suolo:.....	11
1.4 Sistemi idroponici: .....	12
1.4.1 Deep Flow Technique (DFT): .....	12
1.4.2 Nutrient Film Technique (NFT): .....	12
1.4.3 Aeroponics: .....	12
1.5 Acquaponica: .....	13
1.5.1 Introduzione ai sistemi: .....	13
1.5.2 Sistemi acquaponici: .....	14
1.5.3 Funzionamento dei sistemi: .....	14
1.5.4 Acquaponica accoppiata e disaccoppiata: .....	15
1.5.5 Acquaponica in acqua dolce:.....	16
1.5.6 Acquaponica in acqua salmastra o salata: .....	17
1.5.7 Specie resistenti alla salinità e meccanismi di resistenza: .....	18
1.5.8 Meccanismi di resistenza allo stress salino: .....	18
1.5.9 Principali specie studiate utilizzando acqua marina: .....	19
1.6 Scelta e descrizione delle specie coinvolte nell'esperimento: .....	19
1.6.1 Bietola da costa (Beta vulgaris var. Ciela): .....	20
1.6.2 Mazzancolla Tropicale (Litopenaeus vannamei): .....	20
2. Scopo del lavoro: .....	21
3. Materiali e metodi .....	23
3.1 Struttura della serra: .....	23
3.2 Trattamenti sperimentali:.....	23
3.3 Struttura del sistema acquaponico:.....	23
3.3.1 Componente vegetale del sistema:.....	25
3.3.2 Componente animale del sistema: .....	26
3.3.3 Biofiltro:.....	26
3.4 Fasi iniziali dell'esperimento:.....	26
3.4.1 Trapianto: .....	26
3.4.2 Messa a dimora dei gamberi:.....	27
3.4.3 Concimazione iniziale:.....	27

3.4.4	Aumento graduale della salinità della soluzione nutritiva: .....	27
3.5	Mantenimento dei sistemi: .....	28
3.5.1	Reintegro delle perdite di acqua dei sistemi: .....	28
3.5.2	Pulizia dei gocciolatori e dei filtri: .....	28
3.5.3	Innalzamento di pH: .....	28
3.5.4	Concimazione complementare: .....	28
3.6	Scambio di acqua tra i sistemi: .....	29
3.7	Rilievi non distruttivi: .....	30
3.7.1	Conducibilità elettrica (EC): .....	30
3.7.2	Reazione (pH): .....	30
3.7.3	Concentrazione di clorofilla, antociani e flavonoli: .....	30
3.7.4	Intensità luminosa: .....	31
3.7.5	Peso dei gamberi, tasso di sopravvivenza e contenuto di nitrati: .....	31
3.8	Rilievi distruttivi: .....	32
3.8.1	Raccolta finale: .....	32
3.8.2	Peso fresco (biomassa): .....	33
3.8.3	Indici di area fogliare, LAI e SLA: .....	33
3.8.4	Peso secco: .....	33
3.8.5	Analisi degli anioni e dei cationi: .....	34
3.8.6	Qualità: .....	34
3.8.7	Frap e Folin: .....	35
3.8.8	Analisi dei pigmenti: .....	36
3.9	Analisi statistiche: .....	36
4.	Risultati .....	37
4.1	Parametri dell'acqua: .....	37
4.1.1	Conducibilità elettrica e pH della vasca delle piante: .....	37
4.1.2	Refill delle vasche: .....	37
4.1.3	Contenuto di nitrati nell'acqua: .....	38
4.2	Rilievi non distruttivi: .....	39
4.2.1	Concentrazione di clorofilla, antociani e flavonoli e NBI: .....	39
4.2.2	Radiometria .....	42
4.3	Rilievi produttivi: .....	44
4.3.1	Biomassa totale: .....	44
4.3.2	LAI e SLA: .....	45
4.3.3	Peso dei gamberi: .....	46
4.4	Analisi di laboratorio: .....	47
4.4.1	Anioni e cationi: .....	47
4.4.2	Qualità: .....	48

4.4.3	Pigmenti: .....	51
5.	Discussione.....	53
5.1	Parametri dell'acqua: .....	53
5.2	Produzione vegetale: .....	54
5.3	Qualità vegetale: .....	54
5.4	Produzione animale:.....	54
6.	Conclusioni.....	55
	Bibliografia .....	57



## Riassunto

L'acquaponica rappresenta un potenziale sistema di coltivazione per produrre cibo aumentando l'efficienza d'uso di acqua e nutrienti; permette inoltre di utilizzare aree non adatte alla coltivazione su terreno e impiegare acque salate o salmastre.

Il presente lavoro presenta la sperimentazione di un sistema di acquaponica salmastra coniugando la coltivazione di bietola da costa (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) con l'allevamento di mazzancolla tropicale (*Penaeus vannamei* Boone) in vertical farming. L'esperimento prevede tre diversi trattamenti di salinità allo studio (6, 9 e 12 g/L), al fine di valutare la tolleranza della pianta e l'adattamento dell'animale ai diversi livelli di salinità e di comprendere quale interazione abbia favorito una produttività e una qualità maggiore in entrambi. Nel corso dell'esperimento sono stati misurati e successivamente analizzati i parametri dell'acqua delle vasche di coltivazione della bietola da costa e della mazzancolla tropicale, così come i parametri fogliari della pianta e di produzione dell'animale. Alla fine dell'esperimento sono state inoltre condotte analisi di laboratorio atte a valutare la concentrazione di pigmenti, clorofilla, anioni e cationi presenti nei tessuti vegetali ma anche l'analisi di parametri qualitativi come il grado Brix, il pH, la conducibilità elettrica e l'acidità titolabile dei succhi vegetali. La bietola da costa è risultata in grado di adattarsi a tutti i livelli di salinità con valori di biomassa simili tra i trattamenti; i parametri fogliari quali clorofille e NBI sono risultati più elevati nelle tesi a 9 e a 12 g/L. Al contempo, la mazzancolla tropicale si è adattata bene a tutti i livelli di salinità osservati con un peso medio di 10 g a 6 e 9 g/L. Il trattamento salino a 9 g/L è risultato essere la migliore combinazione per la coltivazione di bietola da costa e mazzancolla tropicale in un sistema acquaponico disaccoppiato. Ulteriori studi andranno a osservare l'effetto di salinità più elevate (15 g/L o 20 g/L) per valutare la possibile coltivazione di bieta con pesci marini in sistemi acquaponici accoppiati.



## Abstract

Aquaponics is a potential cultivation system for producing food while reducing the need for fertilizers and waste; it also allows areas unsuitable for soil cultivation to be used, as well as saltwater or brackish water. This study presents the testing of a brackish aquaponics system combining the cultivation of Swiss chard (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) with the farming of tropical shrimp (*Penaeus vannamei* Boone) in vertical farming. The experiment involves three different salinity treatments (6, 9, and 12 g/L) in order to assess the tolerance of the plant and the adaptation of the animal to different salinity levels and to understand which interaction has favored greater productivity and quality in both. During the experiment, the water parameters of the cultivation tanks for sea kale and tropical shrimp were measured and subsequently analyzed, as were the leaf parameters of the plant and the production parameters of the animal. At the end of the experiment, laboratory analyses were also carried out to assess the concentration of pigments, chlorophyll, anions, and cations present in plant tissues, as well as qualitative parameters such as Brix degree, pH, electrical conductivity, and titratable acidity of plant juices. Swiss chard proved capable of adapting to all salinity levels, with similar biomass values across treatments; leaf parameters such as chlorophyll and NBI were higher in the 9 and 12 g/L treatments. At the same time, tropical shrimp adapted well to all salinity levels observed, with an average weight of 10 g at 6 and 9 g/L. The 9 g/L saline treatment proved to be the best combination for growing Swiss chard and tropical shrimp in a decoupled aquaponics system. Further studies will look at the effect of higher salinity levels (15 g/L or 20 g/L) to evaluate the possible cultivation of chard with marine fish in continuous aquaponic systems.



## **1. Introduzione**

### **1.1 Sfide globali e consumo delle risorse in agricoltura**

La sfida maggiore che l'agricoltura sta affrontando è la necessità di soddisfare le esigenze alimentari di una popolazione mondiale in continua crescita. Stime recenti indicano una popolazione attuale di oltre 7,2 miliardi e la prospettiva di raggiungere i 9,6 miliardi entro il 2050, di cui oltre il 75% sarà distribuita nelle aree urbane (Nazioni Unite, 2013). Per riuscire a sfamare la popolazione mondiale nel 2050 la produzione agricola dovrà incrementare tra il 70 e 100 % (SOLAW, 2021). Nel 2019 il settore dell'agricoltura ha usato 1,5 milioni di ettari di terreno per la coltivazione (comprendenti di colture permanenti ed annuali) e 3,1 milioni di ettari per l'allevamento (comprese le strutture e i pascoli) (FAO, 2021).

Le rese delle produzioni agricole delle regioni del Nord America e dell'Europa Meridionale sono stimate di essere già all'80% del loro potenziale e un ulteriore incremento significherebbe un aumento dei costi non economicamente conveniente. Al contrario il margine di miglioramento delle rese nelle nazioni in via di sviluppo è molto più ampio (FAO 2005 *et al.*, 1995).

I report dell'IPCC (International Panel on Climate Change) dal 2007 al 2016 stimano il contributo del settore agro-silvicoltura (AFOLU) al cambiamento climatico come pari al 23% delle emissioni globali di gas serra quali diossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e ossido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Yermiyahu *et al.*, 2007).

### **1.2 La risorsa idrica**

Il volume di acqua totale presente sulla Terra è di 1,4 miliardi di km<sup>3</sup>, sia come acqua superficiale che sotterranea. Di questa parte l'acqua salata rappresenta circa il 97% e un 2% è sotto forma di ghiaccio. L'acqua dolce disponibile è circa l'1% e di essa circa il 70% è usato per l'irrigazione (FAO, 1995). Lo sfruttamento dell'acqua dolce è maggiore della sua rigenerazione per cui sono necessarie misure per preservare questa risorsa. Una possibilità consiste nell'usare fonti alternative per l'irrigazione, in particolare acqua salata, desalinizzata o mescolata con acqua dolce (Yermiyahu *et al.*, 2007). L'acqua salata ha un alto contenuto di sali (circa il 75% di NaCl e il 10% di Mg<sub>2</sub>Cl) che ne limitano molto l'utilizzo in agricoltura; al contempo ha un contenuto ionico bilanciato, essendo fornita di tutti gli elementi nutritivi necessari alle piante (Sakamoto, 2014). I suoli salini sono circa il 7% dei terreni e circa il 5% dei terreni coltivati nel mondo, e la loro elevata salinizzazione che ne causa una perdita di produttività (Munns, 2002).

### **1.3 Coltivazioni fuori suolo**

L'impiego dei sistemi di coltivazione fuori suolo consente di aumentare significativamente l'efficienza d'uso dell'acqua rispetto alla coltivazione tradizionale in pieno campo. In particolare, nei sistemi a ciclo chiuso, il recupero e il riutilizzo della soluzione nutritiva permettono di ridurre le perdite di nutrienti, limitando fenomeni di inquinamento del suolo ed eutrofizzazione dei corpi idrici associati alle pratiche di fertilizzazione convenzionali (Goddek *et al.*, 2019).

Per coltivazione fuori suolo si intende qualsiasi metodo di produzione vegetale realizzato in assenza di terreno, nel quale gli elementi minerali necessari alla crescita sono forniti direttamente attraverso

l'acqua di irrigazione (El-Kazzaz, 2017). Tali sistemi rappresentano un'alternativa particolarmente efficace in contesti caratterizzati da limitata disponibilità idrica o da problematiche di degradazione e salinizzazione dei suoli agricoli.

All'interno del fuori suolo rientrano diverse tipologie di sistemi produttivi, tra cui l'idroponica in soluzione nutritiva, le coltivazioni su substrato solido e l'aeroponica. I sistemi idroponici possono operare a ciclo aperto o chiuso, in funzione del recupero della soluzione nutritiva, mentre le coltivazioni su substrato utilizzano materiali inerti quali perlite, vermiculite o fibra di cocco, scelti per la loro capacità di garantire adeguata ritenzione idrica, aerazione radicale e drenaggio. Grazie a questa elevata flessibilità tecnologica, i sistemi fuori suolo risultano adattabili a differenti condizioni ambientali e disponibilità di risorse, offrendo soluzioni produttive efficienti e sostenibili.

## **1.4 Sistemi idroponici**

### *1.4.1 Deep Flow Technique (DFT)*

La tecnologia DFT è la coltivazione di piante su strutture galleggianti o su supporti appesi in contenitori contenenti 10-20 cm di soluzione nutritiva (van Os *et al.*, s.d.) (Fig.1a). Questi sistemi si distinguono in base al tipo di supporti, al volume di acqua e al metodo di aerazione e ricircolo della soluzione nutritiva. Le piante sono sostenute dai supporti e le radici affondano direttamente nella soluzione nutritiva. Il vantaggio di questi sistemi sono i costi di gestione ridotti, soprattutto se usati per colture a ciclo breve (es. lattuga), dove la sostituzione o l'integrazione della soluzione nutritiva può essere fatta solo a fine ciclo.

### *1.4.2 Nutrient Film Technique (NFT)*

I sistemi NFT sono costituiti da un film di soluzione di 1-2 mm che circola sul fondo del contenitore (che può essere una canalina, un sacco, ecc.) andando direttamente a contatto con le radici (Fig. 1b). Nonostante possano essere molto diffusi, un difetto di questi sistemi è che sono molto sensibili a occlusioni o malfunzionamenti nel sistema di pompaggio, in quanto il basso flusso della soluzione nutritiva e l'assenza di substrato possono portare a forti stress idrici e, in caso siano prolungati, a morte delle piante.

### *1.4.3 Aeroponics*

In questi sistemi le piante sono inserite in pannelli di plastica sospesi in contenitori sigillati. Al loro interno scorre il sistema di irrigazione che spruzza la soluzione nutritiva direttamente sulle radici (Fig. 1c). La durata degli spruzzi va dai 30 ai 60 secondi e la frequenza delle irrigazioni dipende dal tipo di coltura, dallo stadio di crescita e dalla temperatura esterna.

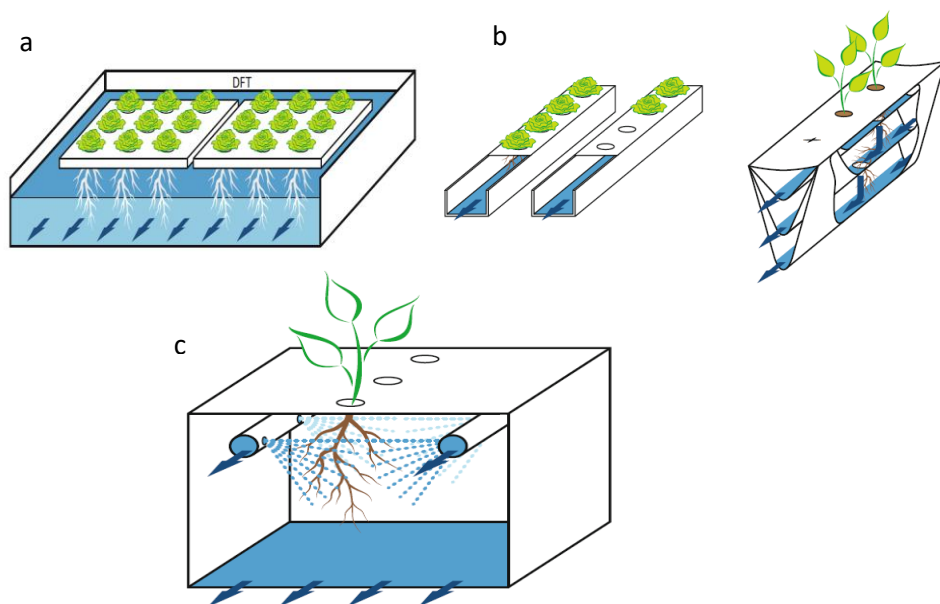


Figura 1: Schema dei sistemi idroponici, (a) Deep Flow Technique, (b) Nutrient Film Technique, (c) Aeroponica (Maucieri et al., 2019).

## 1.5 Acquaponica

### 1.5.1 Introduzione ai sistemi

Un'applicazione avanzata delle tecniche di coltivazione fuori suolo è rappresentata dai sistemi acquaponici, nei quali vengono integrati principi propri dell'acquacoltura e dell'idroponica in un unico sistema produttivo circolare. In tali sistemi, l'acqua proveniente dall'allevamento ittico, arricchita dai metaboliti di scarto degli animali, viene convogliata attraverso un biofiltro biologico in cui la componente microbica trasforma i composti azotati in forme assimilabili dalle piante. La soluzione nutritiva così ottenuta viene successivamente riutilizzata per la coltivazione vegetale, consentendo una sostanziale riduzione dell'impiego di fertilizzanti di sintesi e limitando l'impatto ambientale associato allo smaltimento dei reflui di allevamento.

L'efficienza dei sistemi acquaponici può essere ulteriormente incrementata attraverso la progettazione di configurazioni capaci di chiudere i cicli dei nutrienti, riproducendo il funzionamento degli ecosistemi naturali e favorendo l'equilibrio tra comparto animale, vegetale e microbico (Francis et al., 2003). A differenza dei sistemi idroponici intensivi, che richiedono apporti significativi di nutrienti di origine minerale e industriale, nell'acquaponica tali elementi derivano prevalentemente dai processi biologici legati all'allevamento ittico.

**Un ulteriore vantaggio riguarda l'elevata efficienza nell'uso della risorsa idrica. Mentre la produzione di 1 kg di carne bovina richiede mediamente tra 5.000 e 20.000 L di acqua (Fox, 2013) e l'allevamento ittico semi-intensivo può richiederne da circa 2.500 fino a oltre 300.000 L per kg di pesce prodotto (Al-Hafedh et al., 2003), i sistemi acquaponici a ricircolo chiuso consentono il riutilizzo continuo dell'acqua di allevamento, raggiungendo efficienze di utilizzo pari al 95–98% (Dalsgaard et al., 2013). In tali condizioni, il consumo idrico si riduce a circa**

**100 L di acqua per kg di pesce prodotto (Martins et al., 2010), evidenziando il potenziale dell'acquaponica come modello produttivo altamente sostenibile.**

#### *1.5.2 Sistemi acquaponici:*

I sistemi acquaponici, seppur siano relativamente recenti, hanno attirato molta attenzione negli ultimi anni. Nonostante ciò, i sistemi di medie e grandi dimensioni rimangono pochi.

In un censimento degli Stati Uniti del 2018 le aziende che praticavano l'acquaponica erano solo 82. La produzione principale di queste aziende prevedeva la combinazione di Tilapia e ortaggi a foglia e il valore medio di queste produzioni era compreso tra i 100000 e i 25000 \$ («2018 Census of Aquaculture»). In un sondaggio condotto nel 2014, sono state intervistate persone che lavoravano in ambito acquaponico ed è emerso che la maggior parte degli intervistati aveva un sistema acquaponico principalmente per hobby; di questi il 51% erano insegnanti nel campo dei sistemi acquaponici, privatamente o a livello istituzionale (Love *et al.*, 2014). Come fonte di acqua i partecipanti al sondaggio usavano principalmente acqua dolce, derivante da acquedotto o da pozzo, anche se spesso la integravano con cisterne per la raccolta di acqua piovana. La specie ittica maggiormente allevata era la tilapia (*Oreochromis niloticus*), seguita da specie ornamentali (es. carpe koi, pesci rossi, pesci tropicali). Invece le specie vegetali coltivate erano principalmente basilico, pomodoro e orticole da foglia. Complessivamente solo il 31% degli impianti acquaponici dava un guadagno economico. Un altro studio ha analizzato la convenienza economica di un sistema acquaponico di medie dimensioni in acqua dolce con coltivazione di lattuga e tilapia. I risultati ottenuti suggeriscono come il maggior elemento di profitto sia la commerciabilità dei prodotti vegetali piuttosto che il prodotto ittico in sé. Per rendere economicamente sostenibile questi sistemi è necessario trovare segmenti di mercato che permettano di valorizzare queste produzioni (Zappernick *et al.*, 2022).

#### *1.5.3 Funzionamento dei sistemi*

I sistemi acquaponici sfruttano una simbiosi tra piante, pesci e microorganismi e promuovono l'uso sostenibile di acqua e nutrienti (Fig. 2). In questo modo i punti deboli dei sistemi idroponici e di acquacoltura vengono compensati. Le piante necessitano di macro-, meso- e micronutrienti per la loro crescita, per cui le soluzioni idroponiche necessitano dell'aggiunta periodica di questi nutrienti. Nei sistemi acquaponici invece i nutrienti vengono forniti in parte dagli escrementi dell'animale convertiti in nutrienti dal biofiltro. Per evitare situazioni di carenza è necessario però monitorare attentamente la loro concentrazione. Inoltre periodicamente può essere necessario implementarli (Seawright *et al.*, 1998).

Per poter funzionare, i sistemi acquaponici devono essere in grado di ospitare differenti comunità di microorganismi che sono coinvolti nei processi di trasformazione e solubilizzazione dei nutrienti, tali microorganismi vengono chiamati "biofiltri". L'ammonio derivante dalle deiezioni animali ( $\text{NH}_4^+$ ) viene convertito in nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) da batteri ammonio-ossidanti (AOB) e successivamente il nitrito in nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) da batteri nitrito-ossidanti (NOB) (Tyson *et al.*, 2008); il nitrato viene successivamente assorbito dalla pianta come fonte di azoto per la sua crescita. Un elemento fondamentale nella gestione dei sistemi acquaponici è il bilanciamento tra la produzione di nutrienti da parte degli animali e l'uptake di nutrienti delle piante; alcuni studi riportano che questo equilibrio si basa

prevalentemente sulla quantità di mangime giornaliero in rapporto alla superficie (in m<sup>2</sup>) delle piante (Rakocy 2007).

Tra gli elementi per elaborare il giusto bilanciamento tra piante ed animali bisogna considerare (Goddek *et al.*, 2015):

- il tipo di specie allevata e il loro consumo di mangime: è importante scegliere specie con una buona adattabilità e calcolare i quantitativi di mangime in modo da prevenire eccessi che vadano a diminuire la qualità dell'acqua.
- la composizione del mangime (es. frazione proteica convertita in ammonio (NH<sup>4+</sup>))
- la frequenza della somministrazione del mangime
- il tipo di sistema idroponico e la sua struttura
- gli stadi fenologici della pianta allevata
- la densità d'impianto: in modo da evitare competizione eccessiva tra le piante
- la composizione chimica dell'acqua, influenzata dal tasso di mineralizzazione delle deiezioni animali
- fattori ambientali: temperatura, umidità, CO<sub>2</sub> e intensità luminosa

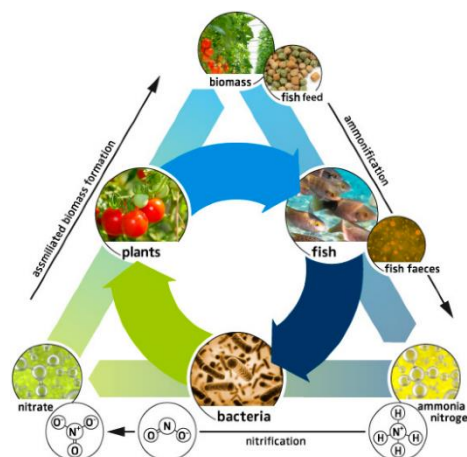


Figura 2: Schema del ciclo dei sistemi acquaponici (Goddek *et al.*, 2015).

#### 1.5.4 Acquaponica accoppiata e disaccoppiata

Tradizionalmente i sistemi acquaponici sono principalmente accoppiati, dove l'acqua viene costantemente fatta riciclare tra la vasca degli animali e quella delle piante e viene condivisa tra le due componenti (Davison, 2019). Il limite di questi sistemi è la necessità costante di mantenere corretti tutti i parametri dell'acqua di allevamento tra cui: pH, EC, temperatura, ossigeno ecc., monitorando attentamente entrambi i sottosistemi. Per poter mantenere entrambi i sistemi quindi è ulteriormente necessario trovare un compromesso tra questi parametri, per non limitare troppo la crescita delle piante o degli animali (Kloas *et al.*, 2015).

In alternativa, negli ultimi anni sono stati proposti sistemi acquaponici disaccoppiati, i quali permettono di ottimizzare le soluzioni nutritive di entrambi i sottosistemi (Goddek *et al.*, 2019). Nei

sistemi disaccoppiati piante e animali hanno ognuna il loro sistema per il ricircolo dell'acqua. I vantaggi di questa tipologia sono notevoli, è possibile integrare meglio i nutrienti tramite un serbatoio per i fertilizzanti riducendo le carenze delle piante. Mentre al contempo è inoltre possibile disinfettare o sanitzare meglio l'acqua mediante raggi UV, ozono, clorazione o altro. Usare il cloro è vietato in acquacoltura, ma avendo i sistemi separati è possibile usarlo per migliorare la salubrità dei prodotti vegetali (Tyson, 2017).

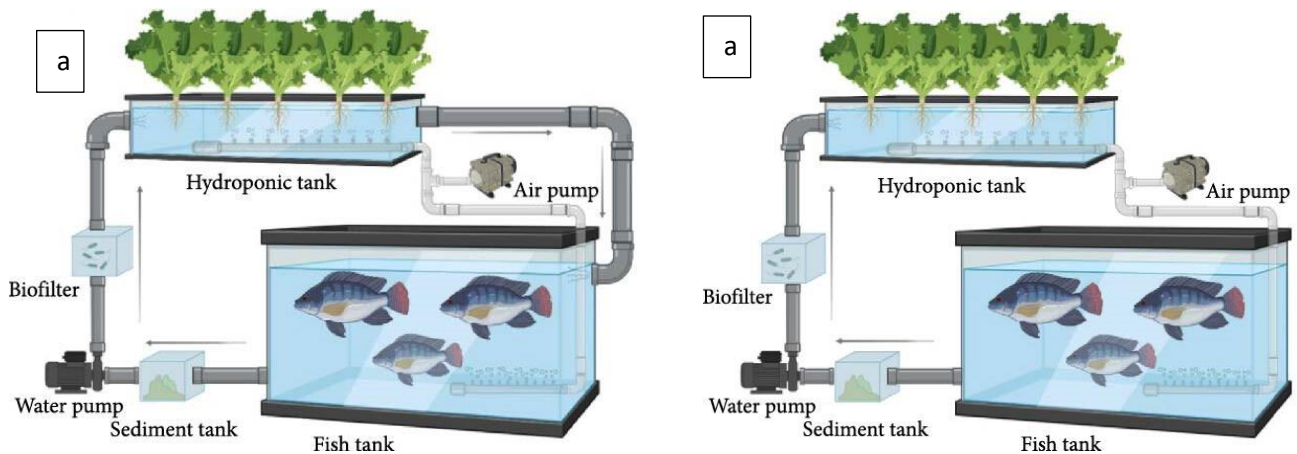


Figura 3: Sistemi acquaponici: (a) accoppiati e (b) disaccoppiati (Hussain e Brown 2024).

### 1.5.5 Acquaponica in acqua dolce

L'acquaponica è stata inizialmente sperimentata usando acqua dolce in Giappone per l'allevamento di carpe cercando di ottimizzare le risorse idriche a disposizione (Murray *et al.*, 2014). La maggior parte delle colture normalmente allevate in un contesto orticolo sono sensibili alla salinità, per cui l'uso di acqua dolce permette di avere una più ampia scelta nelle specie coltivabili; tra queste le più comuni sono ortaggi a foglia verde (lattuga, spinaci), pomodoro e basilico (Fig. 4a). Tra le specie ittiche di maggiore interesse vi sono pesci quali tilapia, pesce gatto, pesce persico ma anche crostacei come gambero di fiume (Fig. 4b). Questi sistemi permettono di risparmiare acqua rispetto alla coltivazione in pieno campo, arrivando a un'efficienza idrica fino al 90% in alcuni sistemi (Goddek *et al.*, 2019).

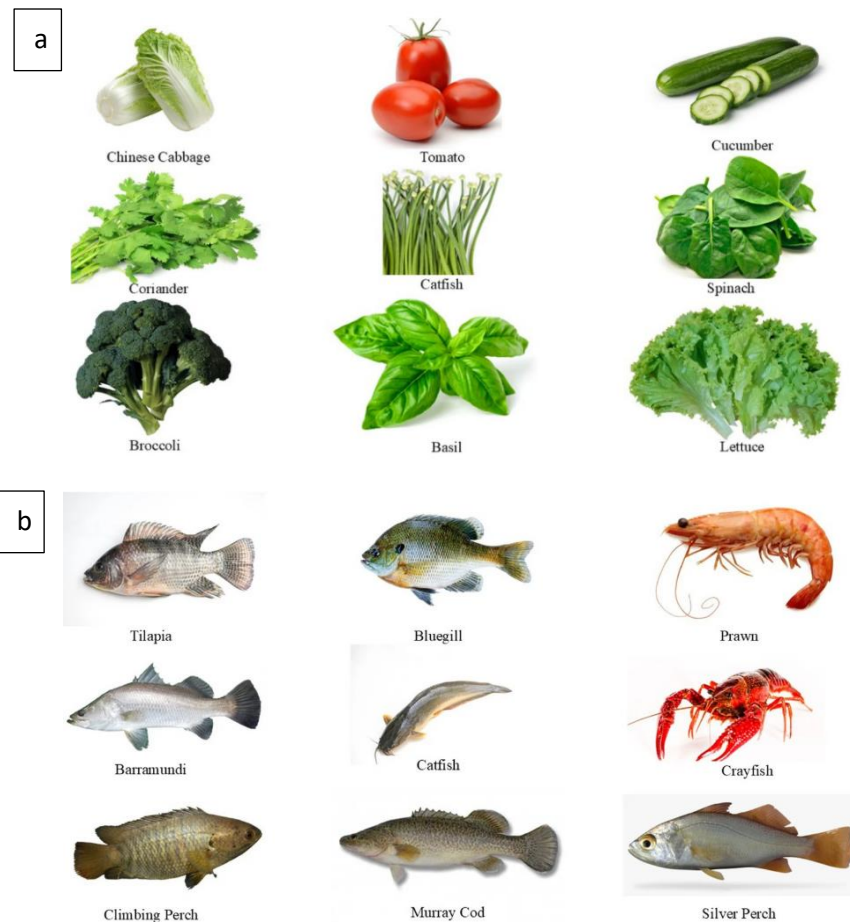


Figura 4: Sistemi acquaponici: (a) piante coltivate e (b) pesci e crostacei allevati (Debroy et al., 2025).

#### 1.5.6 Acquaponica in acqua salmastra o salata

L'acqua salata è la fonte idrica più abbonante nel mondo e nonostante molti impianti di desalinizzazione siano stati costruiti negli ultimi anni, essi consumano molte risorse, soprattutto dal punto di vista energetico. Per questo motivo l'acquaponica salmastra o salata, anche detta "aloponica" permette di usare queste fonti idriche alternative, riducendo l'impatto ambientale di questi sistemi rispetto all'acquaponica in acqua dolce. L'aloponica, permette inoltre di allevare specie eurialine.

L'aloponica trova una buona collocazione nelle località costiere o insulari dove l'accesso all'acqua dolce è ridotto e permette di espandere la coltivazione di specie eurialine di maggior pregio come Mazzancolla tropicale (*Litopenaeus vannamei*) e specie vegetali alofite. Per specie alofita si intende una pianta che è in grado di tollerare alte concentrazioni di salinità (fino a 35 g/L) mentre per specie eurialina si intende un organismo acquatici che è in grado di vivere a diverse condizioni di salinità.

È importante distinguere tra acqua salmastra e salata: l'acqua salmastra ha un contenuto di cloruro di sodio compreso tra gli 1 e i 15g/L mentre l'acqua salata ha un contenuto di cloruro di sodio compreso tra i 15 e i 35g/ L.

La possibilità di usare acqua marina nei sistemi aloponici permette non solo di risparmiare acqua dolce, ma anche di sfruttare il contenuto di nutrienti contenuti in essa. Di contro però l'uso di acqua salata ad alte concentrazioni provoca uno stress salino nelle piante, ne riduce la resa e aumenta il contenuto di sodio e cloruri nelle parti commerciali (Ullah *et al.*, 1994).

#### 1.5.7 *Specie resistenti alla salinità e meccanismi di resistenza*

Negli ultimi anni molti esperimenti scientifici si sono concentrati sulla valutazione dello stress salino su alcune colture, usando acqua marina pura o diluendola. In generale negli esperimenti è stato osservato un rallentamento del tasso di crescita, variabile a seconda delle specie vegetali e delle varietà osservate, che porta quindi a una minore resa (Atzori *et al.*, 2019a). Questa riduzione è causata da una serie di fattori quali: l'alterazione della fotosintesi, della biosintesi delle proteine e del metabolismo lipidico ed energetico (Parida e Das, 2005a). In generale l'abilità di resistere allo stress salino migliora se le piante non subiscono uno stress improvviso ma vengono acclimatate gradualmente ad un'elevata salinità (Parida e Das, 2005b). Per mantenere delle buone rese nei sistemi aloponici è importante impiegare piante adatte a crescere in condizioni saline, quindi piante tolleranti alla salinità o piante alofite. Le specie alofite possono essere suddivise in alofite obbligate, che necessitano di acqua salina per crescere (incrementando il tasso di crescita del 50% in questi casi) o in alofite facoltative, dotate di meccanismi di resistenza allo stress salino che permette loro di crescere in condizioni saline o non saline (come bietola da costa) (Parida e Das, 2005a). Tra le specie maggiormente studiate vi sono *Salicornia persica*, *Salicornia fruticosa*, *Salicornia dolichostachya* Moss, *Plantago coronopus* L. e *Chenopodium quinoa*. (Atzori *et al.*, 2019b).

#### 1.5.8 *Meccanismi di resistenza allo stress salino:*

La resistenza allo stress salino è l'abilità di una pianta di crescere e completare il suo ciclo biologico in un substrato contenente alte concentrazioni di sali. I meccanismi di resistenza sono numerosi e sono causati dalla maggiore espressione di specifiche vie biochimiche (Parida e Das 2005b) che portano a cambiamenti fisiologici tra cui:

- accumulo selettivo o esclusione degli ioni: l'assorbimento eccessivo di sale altera l'omeostasi cellulare per cui le piante accumulano il sodio in eccesso nel vacuolo o in tessuti cellulari per mantenere i normali processi osmotici (Zhu, 2003);
- controllo dell'assorbimento e trasporto degli ioni nelle foglie;
- compartimentalizzazione degli ioni a livello cellulare;
- sintesi di soluti compatibili: le piante producono osmoliti, che hanno la funzione di regolare l'osmosi della cellula, proteggono le sue strutture e consentono di regolare l'ingresso di acqua. Gli osmoliti sono principalmente prolina, glicinetaina, zuccheri e polialcoli (Hasegawa *et al.*, 2000);
- cambiamento delle vie fotosintetiche: lo stress salino riduce il potenziale idrico e inibisce la fotosintesi. Per cui per poter mantenere la fotosintesi attiva più a lungo è necessario incrementare

l'efficienza d'uso dell'acqua, come nel caso dell'alofita facoltativa *M. crystallinum* che cambia il suo metabolismo da C<sub>3</sub> a CAM in condizioni di salinità (Cushman *et al.*, 1989);

- produzione di enzimi antiossidanti: la reazione a stress, tra cui quello salino, induce una carenza idrica che porta alla formazione di specie reattive dell'ossigeno (ROS), quali superossido, perossido di idrogeno o ione ossidrilico. I ROS possono danneggiare fortemente il metabolismo, per cui come meccanismo di resistenza le piante producono enzimi, tra i quali la superossido-dismutasi (SOD), che converte il superossido in perossido di idrogeno e perossidasi che converte il perossido di idrogeno in acqua (Chang *et al.*, 1984);

- produzione di ormoni vegetali: gli ormoni principalmente coinvolti sono acido abscissico (ABA), che promuove la trascrizione di geni coinvolti nello stress salino, ed etilene (de Bruxelles *et al.*, 1996). L'ABA inoltre riduce l'effetto inibitorio del cloruro di sodio su fotosintesi, crescita e traslocazione degli assimilati (Popova *et al.*, 1995).

#### 1.5.9 Principali specie studiate utilizzando acqua marina:

- Pomodoro (*Solanum lycopersicum* L.): viene classificato come una pianta moderatamente tollerante alla salinità e molti studi sono stati condotti per valutarne la resistenza a vari livelli. In particolare alcuni studi hanno dimostrato che la diluizione di una parte di acqua marina (10-12%) su pomodoro ciliegino, nonostante la riduzione della resa, ne aumenti la sostanza secca e i solidi solubili, migliorando la qualità delle bacche (Cela *et al.*, 2024).

- Lattuga (*Lactuca sativa* L.): i risultati di questi studi emergono che fino a diluizioni del 5% di acqua marina non ci sono differenze rispetto alla tesi di controllo. Oltre questi valori solidi solubili, zuccheri, e proteine si riducono all'aumentare della salinità (Turhan *et al.*, 2014). Altri studi inoltre dimostrano un aumento della qualità per la riduzione del contenuto di nitrati all'aumentare della salinità (Miceli *et al.*, 2003).

- Bietola da costa (*Beta vulgaris* var. *cicla*): alcuni studi hanno dimostrato come per diluizioni pari al 15% di acqua marina (5,25 g/L di NaCl) la produzione di biomassa, il peso fresco e il peso secco erano comparabili alla tesi di controllo. Dimostrando una resistenza alta alla salinità (Atzori *et al.*, 2016). Questa particolare resistenza sembra essere legata ad alcuni antenati resistenti alla salinità, come la Bietola di mare selvatica (*Beta vulgaris* subsp. *maritima*) (Shannon e Grieve 1998).

- Salicornia (*Salicornia persica*): la resistenza alla salinità è stata testata con livelli pari al 20 e al 40% (7 e 14 g/L di NaCl rispettivamente) di diluizione di acqua marina, dimostrando una crescita relativa incrementata a tutti i trattamenti allo studio, stimolandone la crescita (Katschnig *et al.*, 2013).

## 1.6 Scelta e descrizione delle specie coinvolte nell'esperimento

La bietola da costa, essendo un'alofita facoltativa, è in grado di crescere a diverse condizioni di salinità; infatti, precedenti esperimenti hanno dimostrato come diluizioni fino al 15 % di acqua marina hanno avuto rese paragonabili ai trattamenti di controllo. Inoltre, rispetto ad altre alofite come Salicornia, la bieta ha un maggiore mercato ed è quindi più facilmente commerciabile.

La mazzancolla tropicale è stata scelta in quanto è una delle specie maggiormente preferita dai consumatori e quindi la specie maggiormente allevata a livello mondiale (FAO, 2018). Inoltre, è una specie eurialina che quindi si adatta a diversi livelli di salinità.

#### 1.6.1 *Bietola da costa (Beta vulgaris var. Cicla)*

Appartiene alla famiglia delle Chenopodiacee. È una specie emicriptofita scaposa, avente ciclo biologico biennale in natura e annuale in coltura. Nel primo stadio di sviluppo forma una rosetta di foglie con radice fittonante, che può raggiungere il metro di profondità. Le foglie della rosetta basale sono carnose, la lamina fogliare è glabra e può essere bollosa o liscia. Il fusto inizialmente raccorciato, si allunga dopo l'induzione a fiore. La pianta può raggiungere il metro e mezzo di altezza. (Pardossi, 2018)

#### 1.6.2 *Mazzancolla tropicale (Litopenaeus vannamei)*



Figura 5: *Mazzancolla tropicale (Litopenaeus vannamei)* (NamuWiki, 2026).

Crostaceo appartenente alla famiglia dei *Penaeidae*. È dotato di un rostro moderatamente lungo con 7-10 denti dorsali e 2-4 ventrali. La fase pre-larvale comprende 6 età allo stadio di naupilus, 3 allo stadio protozoico e 3 allo stadio di misi. La colorazione è normalmente di un bianco traslucido, ma può cambiare in base al substrato di allevamento, al mangime e alla torbidità dell'acqua. Le femmine crescono più velocemente e hanno dimensioni maggiori del maschio (FAO, 2016).



Figura 6: *Bietola da costa (Beta vulgaris var. Cicla)* nel sistema acquaponica a fine ottobre.

## **2. Scopo del lavoro**

Lo scopo della tesi è stato quello di valutare come i diversi trattamenti di salinità (6, 9 e 12 g/L) abbiano interagito con la crescita e lo sviluppo delle bietole da costa e delle mazzancolle tropicali. Si è cercato di comprendere quale salinità permetta di avere la maggior qualità e produzione delle due specie coltivate e se, con futuri esperimenti, sia possibile spingersi a salinità maggiori in modo da poter aumentare la diluizione di acqua salata e quindi ridurre i consumi di acqua dolce. Durante la prova sono state svolte analisi fisiologiche sulla pianta e successivamente ne è stata valutata la produzione e la qualità misurandone il contenuto nutrizionale. Per il gambero sono stati misurati l'accrescimento durante la fase di sviluppo e il peso finale alla raccolta. La prova oggetto di questa tesi fa parte del progetto "VerticHaloponics" Progetto PRIN in collaborazione con Università di Pisa, Università di Perugia e CNR.



### **3. Materiali e metodi**

#### **1.7 Struttura della serra**

L'esperimento è stato condotto in serra dall'11 settembre al 16 dicembre 2025, nell'azienda agricola sperimentale Lucio Toniolo dell'Università di Padova, in una delle serre del gruppo di ortofloricoltura. La struttura impiegata, orientata sull'asse Nord-Sud, è stata una serra con tetto a capriata, con falde di forma semicircolare. Gli elementi portanti sono in ferro zincato e il materiale di copertura è un telo singolo in polietilene. Il pavimento è ricoperto con un telo anti-alga in polipropilene e l'ambiente è diviso in due parti mediante una parete in policarbonato. Sono presenti finestrate su entrambi i lati lunghi e sul colmo, che vengono manovrati elettronicamente da un sistema di controllo, in funzione della temperatura dell'aria della serra. All'interno di ognuna delle due parti della serra sono presenti due riscaldatori aerotermini e un destratificatore per gestire la temperatura.

#### **1.8 Trattamenti sperimentali**

Il fattore sperimentale oggetto di studio è rappresentato dalla salinità della soluzione nutritiva impiegata sia per la coltivazione delle piante sia per l'allevamento dei gamberi. Sono state considerate tre differenti tesi sperimentali, corrispondenti a concentrazioni saline pari a 6, 9 e 12 g L<sup>-1</sup>. Il disegno sperimentale ha previsto tre repliche per ciascun trattamento, distribuite secondo uno schema a blocchi randomizzati lungo l'asse longitudinale della serra, al fine di minimizzare possibili effetti dovuti a gradienti ambientali interni. Il numero complessivo di unità sperimentali è stato pertanto pari a nove sistemi.

All'interno di ciascun sistema sono state installate nove colonne di coltivazione (Fig. 7), successivamente raggruppate in funzione della loro posizione rispetto all'orientamento della serra, distinguendo tre settori: Nord, Centro e Sud. Per garantire una corretta identificazione durante le attività di monitoraggio e campionamento, le colonne sono state numerate progressivamente da 1 a 9, procedendo da sinistra verso destra e dal fronte verso il retro, considerando come riferimento il lato destinato alla coltivazione delle piante (Fig. 7).

#### **1.9 Struttura del sistema acquaponico**

Il sistema acquaponico adottato, integrato in un impianto di vertical farming, era costituito da tre principali componenti funzionalmente connesse. La prima era rappresentata dalla vasca destinata alla coltivazione idroponica verticale della bieta da costa (Fig. 8a), progettata per consentire una crescita multilivello delle piante e ottimizzare l'utilizzo dello spazio disponibile. La seconda componente comprendeva la vasca dedicata all'allevamento delle mazzancolle tropicali (Fig. 8b), nella quale venivano mantenute le condizioni ambientali idonee allo sviluppo della specie.

Elemento centrale del sistema era il biofiltro, collegato sia alla vasca delle piante sia a quella dei gamberi, con ricircolo verso quest'ultima. Il biofiltro era costituito da due contenitori nei quali erano alloggiati i batteri nitrificanti responsabili della conversione dei composti azotati e gli elementi riscaldanti necessari al mantenimento della temperatura operativa del sistema (Fig. 9a e 9b).

A partire dal 10 ottobre è stato effettuato uno scambio settimanale di 100 L di acqua tra la vasca di allevamento e quella di coltivazione vegetale, al fine di favorire il trasferimento dei nutrienti derivanti

dal metabolismo animale verso il comparto vegetale. Nel complesso, l'impianto può essere definito come un sistema acquaponico disaccoppiato, in cui la componente vegetale è gestita mediante coltivazione verticale in ambiente controllato.

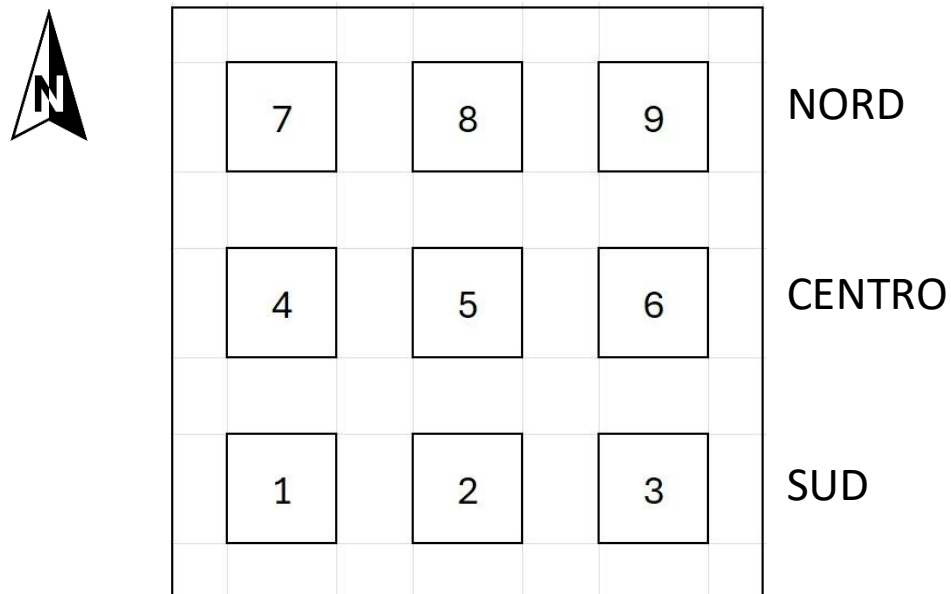


Figura 7: Schema della disposizione e dell'orientamento dei sistemi.

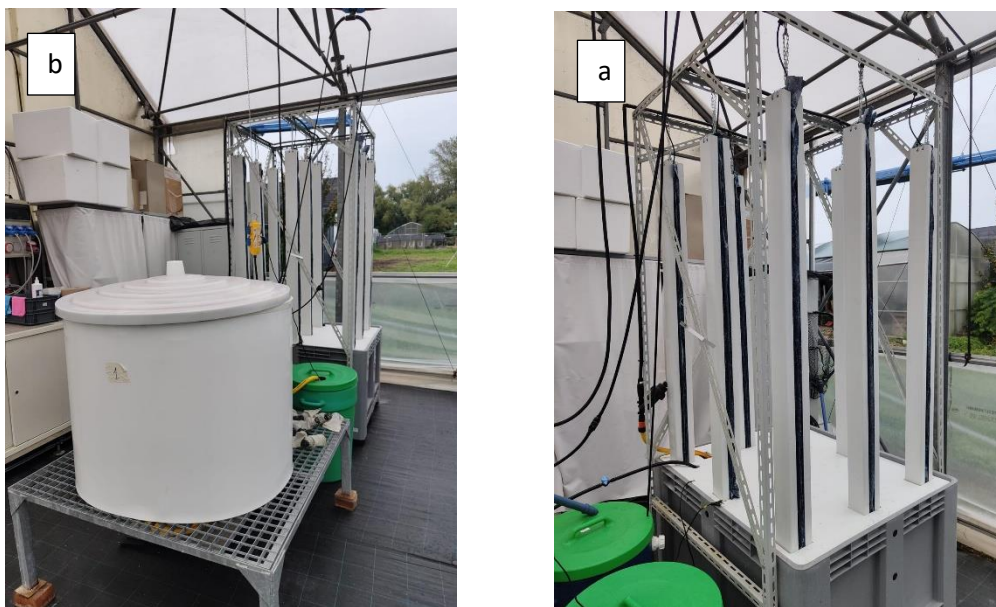


Figura 8: Vasca per l'allevamento dei gamberi (Fig. 8a) e sistema idroponico per la coltivazione della bieta da costa (Fig. 8b).

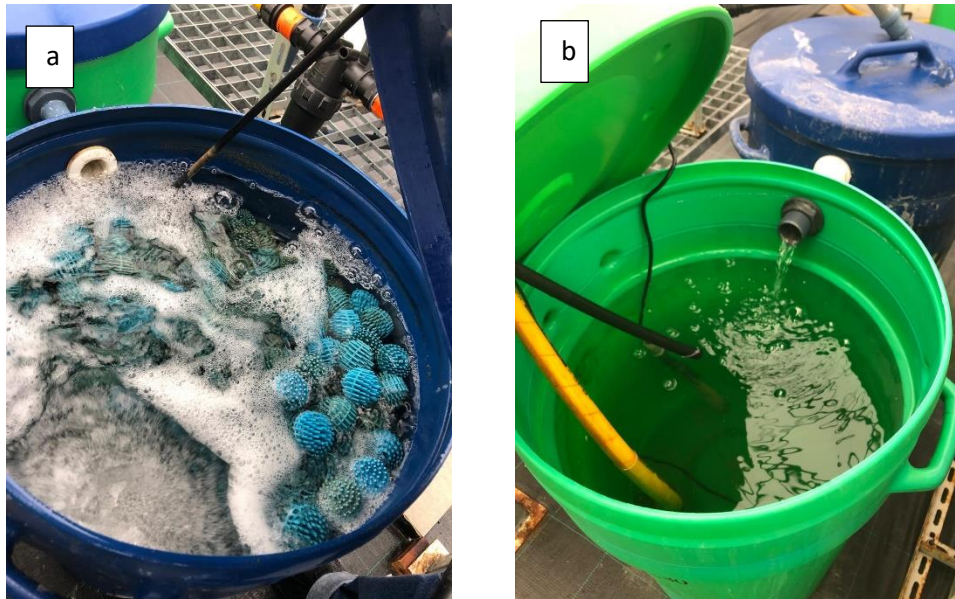


Figura 9: Biofiltro: (a) si può vedere il primo contenitore con gli elementi plastici per la colonizzazione dei batteri nitrificanti e (b) il secondo contenente i riscaldatori.

### 1.9.1 Componente vegetale del sistema

Il sistema di coltivazione era costituito da vasche quadrate in materiale plastico, ciascuna con una superficie di base pari a circa 1 m<sup>2</sup>. Le vasche sono state riempite fino a un volume operativo di 500 L mediante l'impiego di un contaltri meccanico (Schlumberger), garantendo uniformità tra le unità sperimentali.

Al di sopra di ogni vasca destinata alla coltivazione vegetale è stato posizionato uno schermo plastico bianco con funzione schermante, finalizzato a limitare la penetrazione della luce e prevenire la proliferazione algale. All'interno dello schermo sono stati realizzati appositi fori quadrati per l'alloggiamento delle colonne di coltivazione.

Le colonne di supporto alle piante sono state ottenute da canaline in materiale plastico bianco (11 cm × 9 cm × 160 cm). Su un lato di ciascuna canalina era presente una fessura longitudinale larga 4,5 cm, all'interno della quale è stato inserito un supporto plastico spugnoso contenente un tessuto assorbente. In tale substrato sono state collocate le piante a radice nuda, consentendo la distribuzione uniforme della soluzione nutritiva lungo tutta la colonna. Le colonne sono state sospese mediante catene a una struttura metallica portante, che fungeva anche da supporto per il sistema irriguo.

L'irrigazione era assicurata da una pompa sommersa che convogliava l'acqua dalla vasca verso ali gocciolanti in polietilene da mezzo pollice di diametro. A queste erano collegati gocciolatori dinamici terminanti con tubicini in polietilene inseriti nella parte superiore del tessuto assorbente di ciascuna colonna, uno per ogni unità colturale. A valle delle pompe erano installati filtri a rete, necessari per trattenere eventuali concrezioni o precipitati formati nella soluzione circolante.

Le pompe erano collegate a temporizzatori programmati con cicli di funzionamento di cinque minuti alternati a cinque minuti di pausa, configurazione adottata per garantire adeguata distribuzione idrica e ridurre il rischio di occlusione dei filtri.

Il livello dell'acqua nelle vasche veniva monitorato quotidianamente. Considerando una superficie di base pari a 1,0925 m<sup>2</sup>, il volume operativo di 500 L corrispondeva a un'altezza della colonna d'acqua

di circa 45,7 cm. Qualora il livello risultasse inferiore a tale valore, il volume di reintegro veniva calcolato moltiplicando la differenza di altezza misurata per l'area di base della vasca. L'acqua necessaria veniva quindi reintegrata mediante contaltri meccanico Schlumberger (Fig. 11a), assicurando precisione nei volumi apportati.

### *1.9.2 Componente animale del sistema*

Le mazzancolle tropicali erano allevate in vasche circolari in materiale plastico con coperchio. Per fornire alle mazzancolle dei rifugi in cui nascondersi durante la muta all'interno delle vasche sono stati posizionati dei vassoi forati, impilati uno sull'altro e fermati da un peso. Le vasche avevano inoltre un aeratore in pietra pomice per ossigenare l'acqua e un termometro collegato a un attuatore che, tramite due riscaldatori posizionati nel secondo secchio del biofiltro mantenevano l'acqua di esso a 25° C.

### *1.9.3 Biofiltro*

Il biofiltro era costituito da due contenitori cilindrici in materiale plastico, entrambi dotati di coperchio e collegati tra loro mediante una tubazione di raccordo; ciascun secchio presentava un volume utile di circa 120 L.

Il primo contenitore riceveva l'acqua proveniente dalla vasca di allevamento delle mazzancolle ed era riempito con elementi plastici ad elevata superficie specifica, destinati alla colonizzazione da parte dei batteri nitrificanti. In questa sezione avveniva la trasformazione biologica dei composti azotati derivanti dal metabolismo animale, favorendo la conversione dell'ammoniaca in forme assimilabili dalle piante. L'acqua trattata fluiva successivamente nel secondo secchio per gravità.

Il secondo contenitore aveva la funzione di rilancio dell'acqua verso la vasca dei gamberi mediante una pompa sommersa dello stesso modello utilizzato nel comparto vegetale. All'interno dello stesso erano inoltre installati due riscaldatori per acquario collegati a un sistema di controllo automatico dotato di sonda termica, posizionata nella vasca di allevamento. Il sistema consentiva il mantenimento costante della temperatura dell'acqua a 25 °C, valore considerato ottimale per l'accrescimento e il benessere delle mazzancolle tropicali.

## **1.10 Fasi iniziali dell'esperimento**

### *1.10.1 Trapianto*

Le piantine di bietola da costa, appartenenti alla tipologia pugliese e fornite in contenitori alveolati in polistirolo da 124 fori, sono state trapiantate l'11 settembre quando avevano raggiunto lo stadio di 3 foglie vere. Il trapianto è stato effettuato a radice nuda direttamente sulle colonne di coltivazione.

Prima dell'inserimento nel sistema, le piantine sono state accuratamente lavate con acqua dolce al fine di rimuovere completamente il substrato torboso aderente all'apparato radicale. Successivamente, le piante sono state collocate all'interno del tessuto assorbente con un'inclinazione di circa 45° rispetto all'asse longitudinale della colonna, assicurando l'esposizione della parte epigea e il corretto inserimento della porzione radicale. Tale disposizione è stata adottata per favorire un

portamento vegetativo eretto, ottimizzare l'intercettazione luminosa e migliorare il contatto tra le radici e il film di soluzione nutritiva distribuito lungo la colonna.

Su ciascuna colonna sono state posizionate otto piante equidistanti, per un totale di 72 piante per sistema e 648 piante complessive nell'intero impianto sperimentale

#### *1.10.2 Messa a dimora dei gamberi*

Le mazzancolle tropicali (*Litopenaeus vannamei*), acquistate allo stadio larvale PL14 per un numero iniziale complessivo di circa 11.000 individui, sono state acclimatate prima dell'introduzione nei sistemi sperimentali. A tal fine, l'acqua delle vasche è stata preliminarmente corretta in termini di salinità e pH, così da ridurre lo stress osmotico e fisiologico associato alle fasi iniziali di allevamento. Al raggiungimento di un peso medio compreso tra 0,8 e 1 g, gli individui sono stati conteggiati e distribuiti nelle vasche sperimentali, introducendo tra 65 e 70 gamberi per ciascun sistema.

#### *1.10.3 Concimazione iniziale*

In attesa dell'avvio del primo scambio idrico tra comparto animale e vegetale, e al fine di sostenere la fase iniziale di accrescimento della bietola, due settimane dopo il trapianto è stata effettuata una concimazione di avviamento. Le vasche destinate alla coltivazione vegetale sono state integrate con 2 g/L del fertilizzante commerciale "Ferti3" (Planta), caratterizzato da un titolo NPK 15-10-15 arricchito con 2% di magnesio, così da garantire un adeguato apporto nutrizionale nelle prime fasi di sviluppo.

#### *1.10.4 Gestione della salinità*

Successivamente, per raggiungere i livelli di salinità previsti dal disegno sperimentale (6, 9 e 12 g/L), è stato impiegato sale sintetico in polvere "Marine Habitat" (Oceanlife). L'incremento della salinità è stato effettuato in modo graduale, mediante aggiunte successive di 1,5 g/L ogni due giorni, al fine di evitare fenomeni di stress osmotico nelle giovani piante. Il valore target di salinità per ciascun trattamento è stato raggiunto entro due settimane dal trapianto, consentendo una progressiva stabilizzazione delle condizioni di coltivazione nei diversi sistemi acquaponici.



*Figura 10: piantine di bietola prima e dopo il lavaggio dell'apparato radicale.*

## **1.11 Mantenimento dei sistemi**

### *1.11.1 Reintegro delle perdite di acqua dei sistemi*

Durante il ciclo sperimentale, parte dell'acqua contenuta nella vasca destinata alla coltivazione delle piante veniva progressivamente persa a causa dei fenomeni di evapotraspirazione e del gocciolamento dovuto alle foglie sporgenti oltre la sagoma della vasca. Per garantire il mantenimento costante del volume operativo del sistema, all'inizio della sperimentazione è stata determinata l'area della base della vasca, pari a 1,0925 m<sup>2</sup>. Rapportando il volume nominale di 500 L a tale superficie è stata calcolata l'altezza ideale della colonna d'acqua, corrispondente a 45,7 cm.

Il livello idrico veniva quindi monitorato mediante misurazione diretta con metro graduato; la differenza tra l'altezza misurata e quella teorica consentiva di stimare il volume d'acqua da reintegrare, ottenuto moltiplicando tale differenza per l'area della base della vasca. Il reintegro veniva effettuato utilizzando un contalitri meccanico "Schlumberger", dispositivo basato su un sistema di ingranaggi interni in grado di misurare direttamente il volume d'acqua transitato nella tubazione. Lo strumento, comunemente impiegato negli impianti irrigui per il controllo dei consumi e delle prestazioni idrauliche, forniva le letture in metri cubi, successivamente convertite in litri ai fini della gestione sperimentale.

### *1.11.2 Pulizia dei gocciolatori e dei filtri*

Il lume dei gocciolatori veniva ridotto dalla formazione di accumuli di sali al loro interno, riducendo il volume di acqua e causando il potenziale disseccamento delle colonne. Creando depressione con una siringa, tali concrezioni venivano eliminate. I filtri a rete, posizionati a valle delle pompe, venivano smontati e puliti dalle alghe e dall'accumulo di sali, residui e mangime dei gamberi ogni settimana.

### *1.11.3 Gestione del pH*

Per poter effettuare lo scambio di acqua è necessario che il valore di pH della vasca delle piante sia vicino al valore ideale per l'allevamento delle mazzancolle tropicali (quindi compreso tra 6,5 e 7,5). Durante la prova il valore di pH delle vasche è sceso a valori prossimi a 6 per cui, per poter consentire lo scambio d'acqua, è stato necessario alzare il pH mediante idrossido di potassio 1M (KOH 1M). Ad ogni vasca sono stati aggiunti inizialmente 150 mL di soluzione, è stato misurato il pH per valutarne il suo aumento e sono stati aggiunti ulteriori 150 mL, per un totale di 300.

### *1.11.4 Concimazione complementare*

Dopo circa 40 giorni dall'impianto, per supportare l'aumento della biomassa della coltura, è stata aggiunta una soluzione nutritiva alla soluzione circolante. La soluzione nutritiva era priva di azoto in quanto in un sistema acquaponico correttamente funzionante tale componente è fornita dalla nitrificazione della componente di scarto ammoniacale prodotta dagli animali allevati.

La soluzione nutritiva con concentrazione stock di 1:100 (L:L), è stata suddivisa in due soluzioni, così composte:

- sol. A : ferro chelato eddha 37,23 g (titolo Fe 6)
- sol. B :
- solfato di magnesio 50 g (MgO 16 e SO<sub>3</sub> 32)
- fosfato monopotassico 180 g (titolo NPK 0-52-34)
- solfato di potassio 680 g (titolo NPK 0-0-50 e SO<sub>3</sub> 50)



Figura 11: operazione di mantenimento dei sistemi: (a) reintegro delle perdite di acqua nei sistemi e (b) pulizia dei gocciolatori.

### 1.12 Scambio di acqua tra i sistemi

La connessione funzionale tra la vasca di allevamento delle mazzancolle e quella destinata alla coltivazione delle piante è stata attivata a partire da un mese dall'avvio dell'impianto, mediante uno scambio settimanale bidirezionale di circa 100 L di acqua tra i due comparti. Tale procedura prevedeva inizialmente lo spegnimento della pompa di ricircolo della vasca dei gamberi e dei sistemi di riscaldamento, consentendo l'accumulo di acqua nel secondo comparto del biofiltro fino al raggiungimento del volume prefissato, successivamente trasferito nella vasca delle piante. Lo stesso procedimento veniva quindi effettuato in senso opposto, trasferendo analogo volume dalla vasca vegetale a quella di allevamento.

Questa operazione ha rappresentato un passaggio cruciale per il corretto funzionamento del sistema acquaponico, poiché la soluzione nutritiva non veniva integrata con apporti esterni di azoto e dipendeva pertanto esclusivamente dai reflui dell'allevamento ittico. Durante la sperimentazione sono emerse alcune criticità operative legate alla gestione del pH, che doveva essere mantenuto entro un intervallo compreso tra 6,5 e 7,5 per evitare condizioni di stress fisiologico nei gamberi. Per garantire tale equilibrio è stato necessario intervenire mediante correzioni della soluzione nutritiva e

un monitoraggio continuo dei valori di pH nelle due vasche, assicurando la stabilità chimica del sistema e la compatibilità tra comparto animale e vegetale.

### **1.13 Rilievi non distruttivi**

#### *1.13.1 Conducibilità elettrica (EC)*

È stata misurata settimanalmente nella vasca delle piante mediante un misuratore portatile di EC/pH del produttore “HANNA”, modello “H1991301”. Il conduttivimetro è uno strumento che misura la conducibilità elettrica di una soluzione, e quindi la concentrazione di sali, mediante una sonda; la misurazione non discrimina però il tipo di sali presenti nella soluzione stessa. Prima di ogni misurazione il pHmetro veniva tarato mediante una soluzione standard con EC pari a 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### *1.13.2 Reazione (pH)*

È stata misurata settimanalmente mediante lo stesso misuratore portatile usato per la conducibilità elettrica. Il pHmetro è uno strumento che misura la prevalenza di ioni idrogeno ( $\text{H}^+$  soluzione acida  $<7$ ), di ioni ossidrile ( $\text{OH}^-$  soluzione basica  $>7$ ) o la loro equivalenza (soluzione neutra  $=7$ ); la misurazione avviene per mezzo di una sonda dotata di un elettrodo, formato da una membrana di vetro sensibile agli ioni idrogeno. La sonda misura il potenziale elettrico generato dalla concentrazione degli ioni idrogeno nella soluzione rispetto all'interno di essa e a dei valori di riferimento. Prima di ogni misurazione il pHmetro veniva tarato mediante due soluzioni standard con pH di 4,01 e 7,01.

#### *1.13.3 Concentrazione di clorofilla, antociani e flavonoli:*

Sono stati misurati ogni settimana, possibilmente sempre lo stesso giorno, tramite il “Dualex” del produttore “Pessl instruments”, modello Force A (Fig. 12a). Le misurazioni sono state eseguite partendo dal sistema 1 e seguendo in ordine crescente il numero delle colonne, in 3 punti ogni colonna, dal basso verso l'alto. Il Dualex è uno strumento che consente di misurare la concentrazione di clorofilla e di flavonoidi nelle foglie, in quanto essa è positivamente correlata con lo stato di salute della foglia e quindi della pianta. La foglia viene posizionata in una pinza che, una volta chiusa, misura i livelli di clorofilla, antociani e flavonoidi, fornendo inoltre un valore dato dal rapporto tra di essi, definito NBI (Nitrogen Balanced Index, Indice Bilanciato dell'Azoto). Il valore di NBI è dato dal rapporto tra clorofilla e flavonoidi ed è correlabile positivamente con lo stato di nutrizione azotata della pianta. Un alto valore di NBI indica una concentrazione di clorofilla molto maggiore rispetto ai flavonoidi quindi una prevalenza del metabolismo primario della pianta; al contrario una concentrazione prevalente di flavonoidi indica una prevalenza del metabolismo secondario e quindi una situazione di stress e/o di carenza azotata.

La concentrazione della clorofilla viene determinata per il fenomeno della sua diversa trasmittanza nel rosso e nell'infrarosso e si calcola come:

$$\text{Concentrazione in clorofilla} = \frac{\text{Trasmittanza infrarosso} - \text{Trasmittanza rosso}}{\text{Trasmittanza rosso}}$$

La concentrazione di flavonoidi si determina usando il diverso assorbimento e la diversa fluorescenza di essi nelle frequenze dell'ultravioletto e del rosso e si calcola come:

$$\text{Concentrazione in flavonoidi} = \text{Log} \frac{\text{Fluorescenza Infrarosso eccitata nel rosso}}{\text{Fluorescenza Infrarosso eccitata nell'UV}}$$

#### 1.13.4 Intensità luminosa

È stata misurata ogni due settimane, sempre con cielo sereno tramite il radiometro del produttore DeltaOHM, modello DO9721 (Fig. 12b).

Le misurazioni sono state condotte partendo dal sistema 1 e seguendo in ordine crescente il numero delle colonne, per tre punti per colonna, dall'alto verso il basso, negli stessi punti usati con il Dualex.

Il radiometro è uno strumento che misura, tramite una sonda, il flusso di fotoni nel campo della radiazione attiva della fotosintesi (PAR Photosynthetic Active Radiation); il valore viene fornito come  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^1$ . Il valore di PAR cambia nel tempo e in base alle posizioni più o meno interne delle piante nei sistemi di coltivazione.

#### 1.13.5 Peso dei gamberi, tasso di sopravvivenza e contenuto di nitrati

Ogni settimana i gamberi venivano pescati, e ogni singolo gambero veniva pesato, al fine di poter valutare l'accrescimento settimanale medio. Il peso totale dei gamberi per ogni vasca è stato usato per adattare le dosi di mangime durante l'esperimento.

Durante le misurazioni sono stati contati gli individui morti settimanalmente in modo da poter valutare il tasso di sopravvivenza di ogni trattamento.

Il contenuto di nitrati nella vasca dei gamberi è stato misurato in due date, la prima il 16 ottobre (35 GDT) e la seconda il 13 novembre (63 GDT). Per la misurazione venivano raccolti 50 mL di acqua da tutte le vasche, congelati a  $-20^\circ\text{C}$  per l'analisi di anioni e cationi (ammonio, nitriti, nitrati e fosfati) mediante cromatografia ionica (HPLC, Dionex ICS-900).

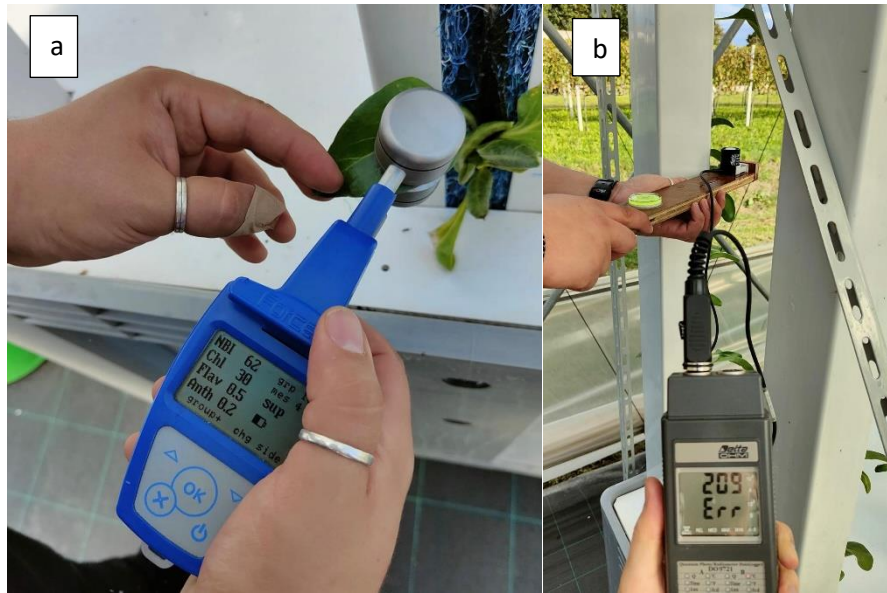


Figura 12: rilievi non distruttivi: (a) concentrazione di clorofilla e pigmenti mediante Dualox (a) e (b) intensità luminosa mediante radiometro.

## 1.14 Rilievi distruttivi

### 1.14.1 Raccolta finale:

La raccolta finale delle piante di bietola è stata effettuata il 16 dicembre su tutti i sistemi sperimentali. Le operazioni di campionamento sono state condotte seguendo un ordine prestabilito, procedendo dal primo al nono sistema e, all'interno di ciascuno, dalle colonne orientate a Nord verso quelle a Sud, da sinistra verso destra.

Le piante sono state rimosse dalle colonne di coltivazione mediante taglio al colletto, poiché l'apparato radicale risultava fortemente intrecciato al tessuto assorbente e non poteva essere estratto in condizioni idonee a consentire misurazioni affidabili. Successivamente ogni pianta è stata pesata singolarmente e destinata alle diverse analisi previste.

Per la determinazione dell'area fogliare (LAI) sono state selezionate le quinte piante appartenenti alle colonne 7, 9, 4, 6, 1 e 3. Ulteriori campioni costituiti da 2–3 piante per ciascun orientamento (Nord, Centro e Sud) di ogni sistema sono stati raccolti per la determinazione del peso secco e per le analisi ioniche (anioni e cationi), per un totale di 27 campioni.

Un ulteriore set di 3–4 piante per ciascun gruppo di colonne è stato suddiviso in quarti, disponendo porzioni opposte in sacchetti distinti e successivamente congelandole, ottenendo complessivamente 54 campioni. Una parte dei campioni è stata liofilizzata e utilizzata per le determinazioni della capacità antiossidante (FRAP), del contenuto fenolico totale (Folin) e dei pigmenti fotosintetici, mentre la restante aliquota è stata destinata all'estrazione del succo vegetale per l'analisi del grado Brix, dell'acidità titolabile, del pH e della conducibilità elettrica (EC).



Figura 13: (a) sistema acquaponico e (b) dettaglio dell'apparato radicale alla raccolta, fortemente adeso al tessuto.

#### 1.14.2 Peso fresco (biomassa)

Una volta rimosse le piante dal sistema esse sono state tagliate al colletto e sono state eliminate le foglie marcie e ingiallite tenendo quindi solo la parte commercialmente vendibile della pianta. Il peso della biomassa della parte aerea di ogni pianta è stato misurato con una bilancia.

#### 1.14.3 Indici di area fogliare, LAI e SLA

I campioni sono stati preparati tagliando le foglie per poterle distendere meglio e successivamente pressate in buste di plastica per qualche giorno. Il valore del LAI è stato ottenuto grazie a un misuratore di area fogliare del produttore "LI-COR", modello "LI-3100C". Il macchinario è dotato di due nastri trasportatori che muovono le foglie verso uno scanner che misura la loro area; lo strumento calcola in tempo reale l'area complessiva delle foglie di ogni singola pianta ed esprime il risultato in  $\text{cm}^2$ . Il valore di SLA (Specific Leaf Area) è calcolato come il rapporto tra LAI e sostanza secca, la sostanza secca è stata calcolata come differenza percentuale tra il peso fresco e il peso secco delle singole piante.

#### 1.14.4 Peso secco

I campioni sono stati preparati tagliando da 2-3 cm sopra il colletto e le foglie sono state tagliate grossolanamente in modo da favorirne l'essiccazione, fino a raggiungere un peso fresco minimo di 500 g. I campioni sono stati inseriti in contenitori di alluminio ed essiccati in stufa a  $65^\circ\text{C}$  per circa 10 giorni. Una volta secchi, i campioni sono stati pesati e macinati tramite un macinacaffè e inseriti in buste di plastica a chiusura ermetica. Successivamente, usando una bilancia di precisione del

produttore “Gibertini”, modello “Europe 60”, sono stati pesati circa 200 mg per campione, che sono stati inseriti in delle falcon per l’analisi degli anioni e dei cationi.

#### *1.14.5 Analisi degli anioni e dei cationi:*

La prima analisi è effettuata mediante cromatografia ionica (I.C.). In questa operazione sono stati pesati 200 mg di campione disidratato a 65°C ai quali sono stati aggiunti 50 mL di acqua demineralizzata. È stata eseguita un’agitazione su piastra rotante per 20 minuti a 150 rpm e successivamente, con aiuto di imbuto e carta da filtro (589 Schleicher diametro 125 mm), è stato filtrato il campione. Il filtrato ottenuto è stato nuovamente filtrato con filtri per siringa in acetato di cellulosa da 20 µm ed iniettato nel cromatografo. Per l’analisi degli anioni è stata utilizzata una colonna Ion Pac AS23 con dimensioni 4x250 mm mentre per l’analisi dei cationi è stata utilizzata una colonna Ion Pac CS12A con dimensioni 4x250mm, entrambe a temperatura ambiente. La corsa cromatografica è stata eseguita ad una velocità di flusso pari a 1 mL/min. L’eluente utilizzato è costituito da sodio carbonato 4.5 mM, sodio bicarbonato 0.8 mM per l’analisi degli anioni e da acido metansolfonico 20 mM per l’analisi dei cationi. La velocità di flusso utilizzata è 1 mL/min. L’identificazione dei composti nella miscela in esame è avvenuta mediante il confronto dei tempi di ritenzione con i composti standard. Per l’analisi degli anioni è stata utilizzata una miscela costituita da fluoruri, cloruri, nitriti, bromuri, nitrati, fosfati, e solfati mentre per l’analisi dei cationi è stata utilizzata una miscela costituita da litio, sodio, ammonio, potassio, magnesio e calcio. L’analisi quantitativa è stata eseguita mediante curva di calibrazione creata in seguito a diluizioni seriali delle soluzioni madre.

#### *1.14.6 Qualità*

I campioni, una volta scongelati, sono stati spremuti per estrarne il succo vegetale, sul quale sono state eseguite varie analisi, tra cui:

- ° Brix (grado Brix): il grado Brix indica il quantitativo di solidi disciolti in un liquido e di solito indica il quantitativo di zuccheri disciolti. Il grado Brix è stato misurato mediante il rifrattometro del produttore “HANNA” modello “HI96801”. Nel pozzetto di destra dello strumento venivano versate due-tre gocce di succo vegetale e si premeva il pulsante; tra un campione e l’altro il pozzetto veniva pulito con acqua distillata e tra un sistema e l’altro lo strumento veniva calibrato con acqua distillata.
- pH e EC: misurati mediante un pHmetro e conduttivimetro del produttore “XS instruments”, modello “PC7”.

Lo strumento è dotato di due sonde, una per la misurazione del pH e una per l’EC; prima delle analisi le sonde sono state calibrate mediante le soluzioni tampone a 7,00, 4,01 e 10,01 per il pH e 475 mV per l’EC.

Le sonde sono state posizionate all’interno dei vasetti con il campione di succo vegetale e tra un campione e l’altro sono state risciacquate con acqua distillata. I valori per l’EC sono stati forniti in mS/cm.

- acidità titolabile: misurata mediante un titolatore automatico del produttore “Steroglass” modello “TitrexAct Full 1-1”.

L'acidità titolabile misura la quantità di sostanze acide presenti in un liquido e viene determinata per titolazione mediante una base (NaOH, idrossido di sodio) fino a un pH determinato.

Il campione da analizzare consisteva di 10 mL di succo vegetale e 40 mL di acqua distillata, portando a un volume totale di 50 mL. Il campione veniva posizionato a lato del macchinario dove era presente una sonda per la misura del pH, un agitatore di vetro per mescolare la soluzione e un tubicino che iniettava NaOH.

#### 1.14.7 *Analisi antiossidanti e polifenoli con metodo Frap e Folin*

Le analisi e la quantificazione di polifenoli e composti antiossidanti sono state effettuate su campioni liofilizzati di foglie ottenuti nella raccolta distruttiva di dicembre. Sono stati quindi prelevati e posti in falcon numerate contenenti 0.2 g di biomassa liofilizzata per ciascun campione ai quali sono stati aggiunti 20 mL di metanolo. La sospensione ottenuta è stata sottoposta ad un processo di omogeneizzazione per 1 h in agitatore orbitale al fine di favorire la rottura delle cellule vegetali e la fuoriuscita dei composti in esse contenuti. Al termine del processo, grazie all'uso di carta filtrante, sono state ottenute 24 provette contenenti un estratto purificato limpido, punto di partenza per la determinazione di polifenoli e antiossidanti.

La determinazione dell'attività antiossidante e dei fenoli totali ha previsto l'impiego delle metodiche indicate da Kang *et al.*, (2002) 40 che riprendono quelle di Ke e Saltveit (1989)41, Singleton e Rossi 32 (1965)42 e Benzie e Strain (1996)43 con opportuni aggiustamenti per adattare le metodiche alla matrice da analizzare.

L'attività antiossidante è stata determinata con il metodo FRAP (FerricReducingAbility of Plasma). Il reagente FRAP (soluzione 1 mM di 2,4,6-tripiridil-2 triazina [TPTZ], 2 mM cloruro ferrico e 250 mM di acetato di sodio a pH 3.6) è stato preparato a partire da soluzioni madri di 300 mM di buffer acetato, 12 mM di TPTZ (in acido cloridrico 48 mM) e 24 mM di cloruro ferrico in rapporto 10:1:1. A 100 µL di estratto sono stati aggiunti 1900 µL di reagente FRAP e si è omogeneizzato con l'ausilio di un vortex; dopo 4' a 20 °C è stata letta l'assorbanza a 593 nm (Shimadzu UV-1800). La lettura è stata confrontata con una curva di calibrazione costituita da soluzione di solfato di ammonio ferroso con concentrazione da 0 a 800 µg mL<sup>-1</sup> di ione ferroso. L'attività antiossidante è stata quindi successivamente espressa come mg di Fe<sup>2+</sup> equivalenti (Fe<sup>2+</sup>E) per kg di campione secco. Per la determinazione dei fenoli, invece, si sono prelevati 200 µL dell'estratto, si sono aggiunti 1000 µL di reattivo di Folin-Ciocalteu e 800 µL di carbonato di sodio anidro al 7.5%. Si è quindi proceduto con 15" di agitazione e successivo riposo per 30' a temperatura ambiente prima di leggere allo spettrofotometro ad una lunghezza d'onda di 765 nm (Shimadzu UV-1800). L'assorbanza è stata confrontata con quella letta per soluzioni a concentrazione nota di acido gallico (da 0 a 400 µg mL<sup>-1</sup>) che hanno subito lo stesso procedimento dei campioni. Il contenuto totale di fenoli è stato espresso come mg di acido gallico equivalenti (GAE) per kg di campione secco.

### 1.14.8 Analisi dei pigmenti

La determinazione del contenuto di clorofilla *a* e *b*, xantofille e carotenoidi ha previsto la pesata di 200 mg di biomassa fogliare a cui sono stati aggiunti 20 mL di etanolo al 96% (Lichtenthaler, 1987)44 in Falcon. Queste ultime sono state completamente avvolte con carta stagnola per evitare la degradazione dei pigmenti in presenza della luce. I campioni sono stati quindi filtrati e lasciati in frigorifero al buio per 48 ore per consentire all'etanolo l'estrazione dei pigmenti. In seguito, sono state lette le assorbanze dei filtrati alle lunghezze d'onda di 665, 649 e 470 nm allo spettrofotometro Shimadzu UV-1800.

Inserendo l'assorbanza letta allo spettrofotometro si è risaliti al contenuto dei pigmenti considerati:

$$\text{Chl a} = 13.95 * A_{665} - 6.88 * A_{649}$$

$$\text{Chl b} = 24.96 * A_{649} - 7.32 * A_{665}$$

$$\text{Xan+Car} = (1000 * A_{470} - 2.05 * \text{Chl a} - 114.8 * \text{Chl b}) / 245.33$$

I valori ricavati dalle formule esprimono i  $\mu\text{g}$  di pigmento/ml di soluzione; successivamente questi valori sono stati trasformati in  $\mu\text{g}$  pigmento  $\text{g}^{-1}$  peso secco

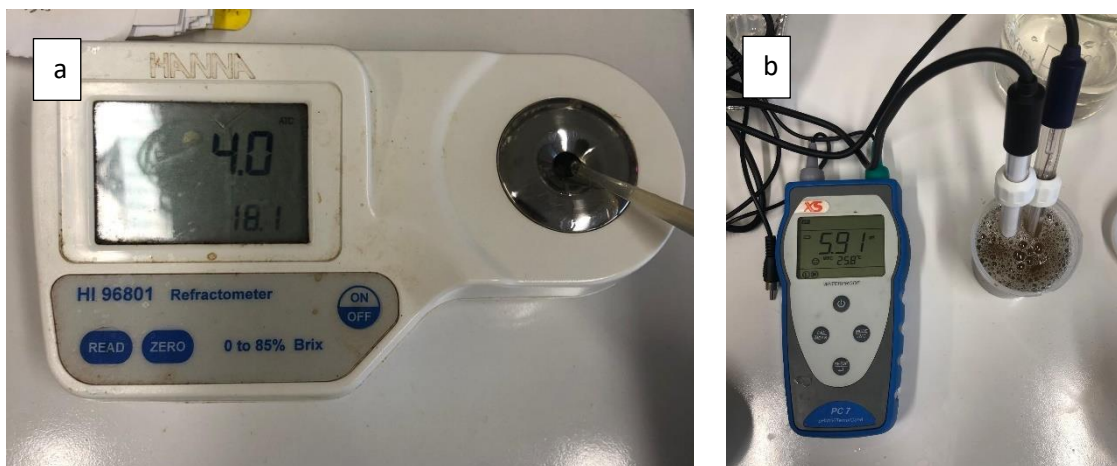


Figura 14: (a) analisi distruttive: rifrattometro e (b) pHmetro/conduktivimetro.

### 1.15 Analisi statistiche

Nel corso della sperimentazione sono state condotte numerose analisi, sia di tipo distruttivo sia non distruttivo, finalizzate alla valutazione delle risposte produttive, fisiologiche e qualitative delle piante nei diversi trattamenti sperimentali. I dati raccolti sono stati successivamente elaborati mediante il software statistico *Statgraphics Centurion 19*. L'analisi dei risultati è stata effettuata applicando l'analisi della varianza (ANOVA) al fine di verificare l'effetto dei trattamenti studiati sulle variabili considerate. Nel caso di differenze statisticamente significative tra le medie, è stato applicato il test post-hoc HSD (*Honestly Significant Difference*) di Tukey, con livello di significatività pari al 95%, per il confronto multiplo tra i trattamenti.

## 4. Risultati

### 2.1 Parametri dell'acqua

#### 2.1.1 Conducibilità elettrica e pH della vasca delle piante

La conducibilità elettrica è rimasta stabile nel tempo (Fig. 15), è possibile affermare che la tesi a 12 g/L ha mantenuto in maniera statisticamente significativa il valore di EC più alto come atteso seguita dal trattamento a 9 g/L e da quello a 6 g/L, con significatività (con  $p < 0,05$ ). Il pH è rimasto stabile nel tempo, dove la tesi a 9 g/L e la tesi a 12 g/L sono rimaste più basse in modo statisticamente significativa rispetto alla tesi a 6 g/L (Fig. 16). Da notare l'incremento nel pH di tutti i trattamenti al 46° giorno dal trapianto per l'aggiunta in tutte le vasche di 300 mL di KOH 1M.

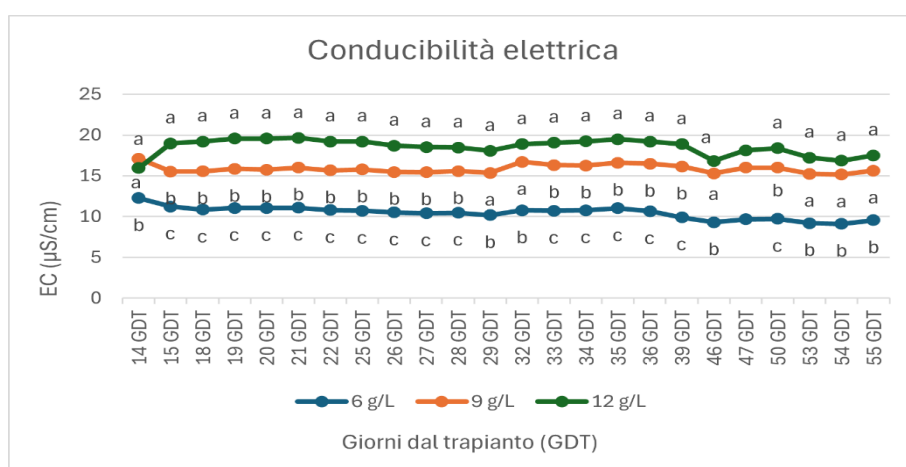


Figura 15: Effetto della salinità sulla conducibilità elettrica delle vasche di coltivazione della bietta da costa. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p\text{-value} < 0.05$ ) tra i trattamenti secondo il test di Tukey.

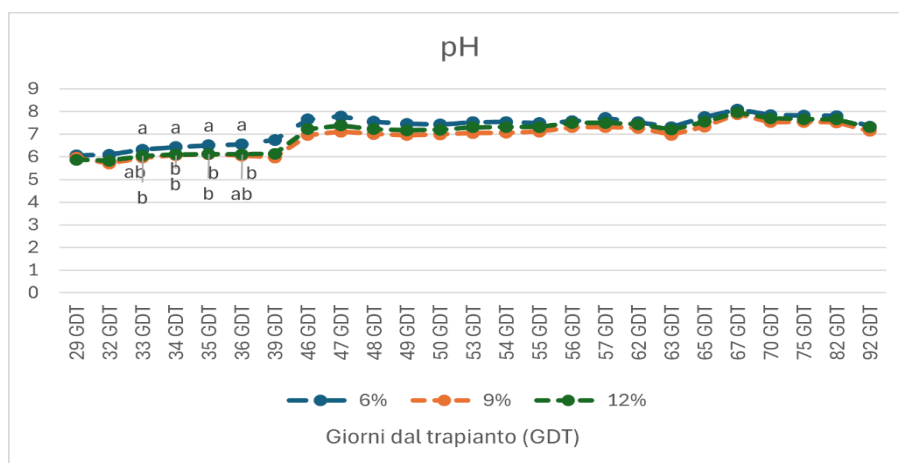


Figura 16: grafico del pH delle vasche delle piante. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p\text{-value} < 0.05$ ) tra i trattamenti secondo il test di Tukey.

#### 2.1.2 Refill delle vasche

Il refill delle vasche è stato significativo in quattro occasioni, a settembre e a ottobre. A 18 GDT, il trattamento a 6 g/L aveva perso più acqua rispetto agli altri, a 22 GDT, dove le vasche a 6 g/L e a 12 g/L avevano avuto maggiori perdite rispetto a quelle a 9 g/L, a 34 GDT dove la tesi a 6 g/L aveva perso più acqua rispetto a quella a 9 g/L e a 12 g/L; infine, a 39 GDT dove la tesi a 6 g/L era di molto maggiore rispetto alle altre tesi (Fig. 17a). Le operazioni di riempimento di novembre e dicembre non sono risultate significative in nessuna data (Fig.17b).

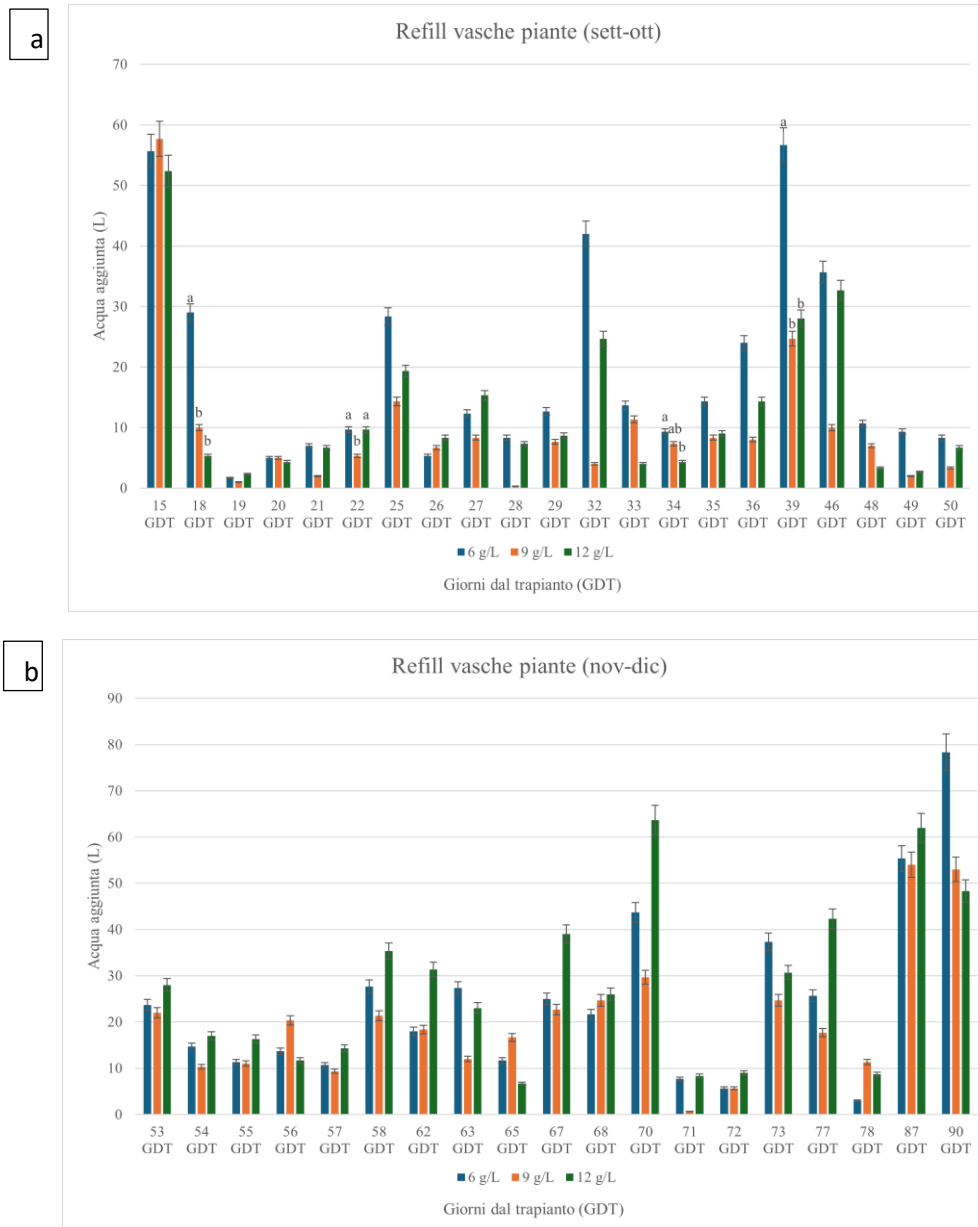


Figura 17: grafici del refill di acqua nella vasca delle piante (a) da settembre a ottobre e (b) da novembre a dicembre. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p$ -value $<0.05$ ) tra i trattamenti secondo il test di Tukey.

### 2.1.3 Contenuto di nitrati nell'acqua

Il contenuto di nitrati delle vasche dei gamberi è stato misurato a 35 e a 63 GDT ed è risultato non significativo in tutte e due le misurazioni. Si può notare come il contenuto di nitrati sia cresciuto nel tempo, per la maggiore produzione di deiezioni dovuto all'aumento del peso medio dei gamberi.

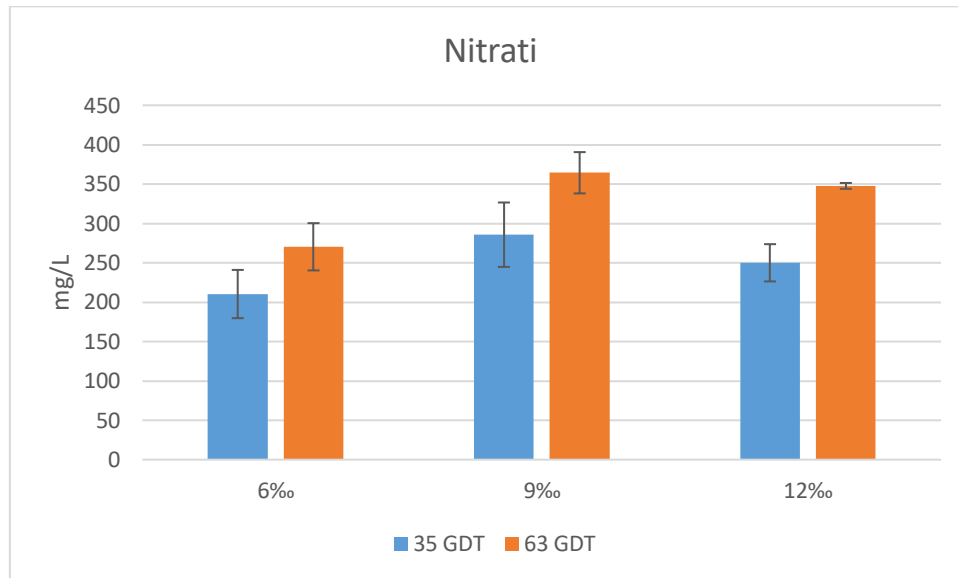


Figura 18: Effetto della salinità dell'acqua sul contenuto di nitrati a 35 e a 63 GDT in bieta da costa. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p\text{-value} < 0.05$ ) tra i trattamenti secondo il test di Tukey.

## 2.2 Rilievi non distruttivi

### 2.2.1 Concentrazione di clorofilla, antociani e flavonoli e NBI

La concentrazione di clorofilla, ad eccezione del rilievo a 20° GDT, è risultata sempre significativa e come illustra la figura 18 il trattamento a 12 g/L ne aveva il maggior contenuto nel mese di ottobre. A partire da novembre e fino alla fine dell'esperimento, il trattamento a salinità 9 g/L è divenuto statisticamente comparabile a quello a 12 g/L. Durante tutta la durata dell'esperimento la tesi a 6 g/L ha avuto il minor contenuto di clorofilla.

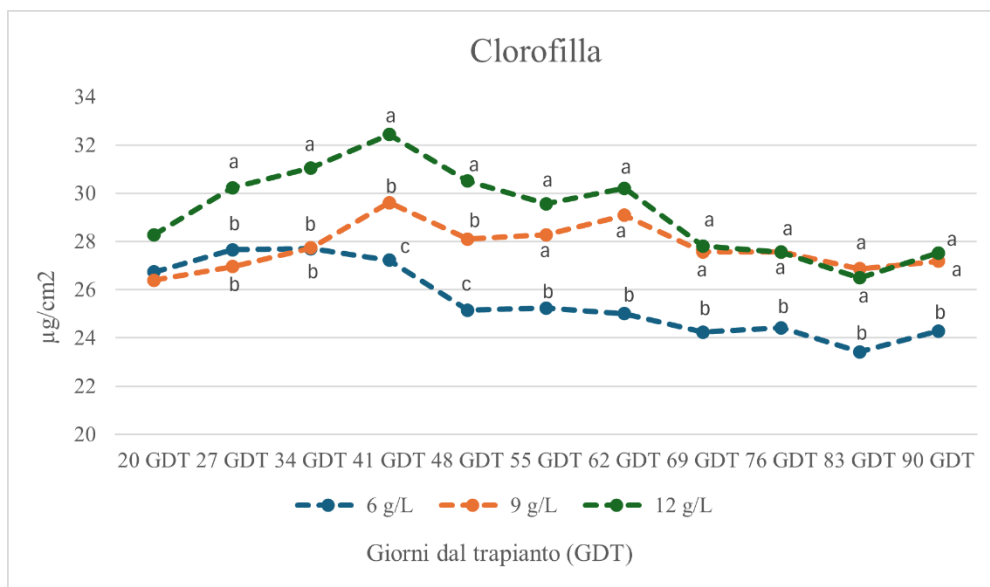


Figura 19: Effetto della salinità dell'acqua sulla concentrazione di clorofilla nelle foglie di bieta da costa durante l'esperimento. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p$ -value < 0.05) tra i trattamenti secondo il test di Tukey.

L'indice NBI (*Nitrogen Balance Index*), espresso come rapporto tra contenuto di clorofilla e pigmenti secondari (antociani e flavonoidi), ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i trattamenti durante l'intero periodo di monitoraggio (Fig. 20). Nelle prime fasi di crescita, fino a circa 48 giorni dal trapianto (GDT), la tesi caratterizzata da salinità pari a 12 g/L ha mostrato i valori di NBI più elevati, indicando un migliore equilibrio nutrizionale dell'azoto e una maggiore attività fotosintetica rispetto agli altri trattamenti. A partire dal 55° GDT si osserva tuttavia una progressiva convergenza tra le tesi a 9 e 12 g/L, che risultano statisticamente comparabili fino al termine della prova. Nel medesimo intervallo temporale, la tesi a 6 g/L ha mantenuto valori di NBI generalmente inferiori, evidenziando un minore stato nutrizionale relativo all'azoto.

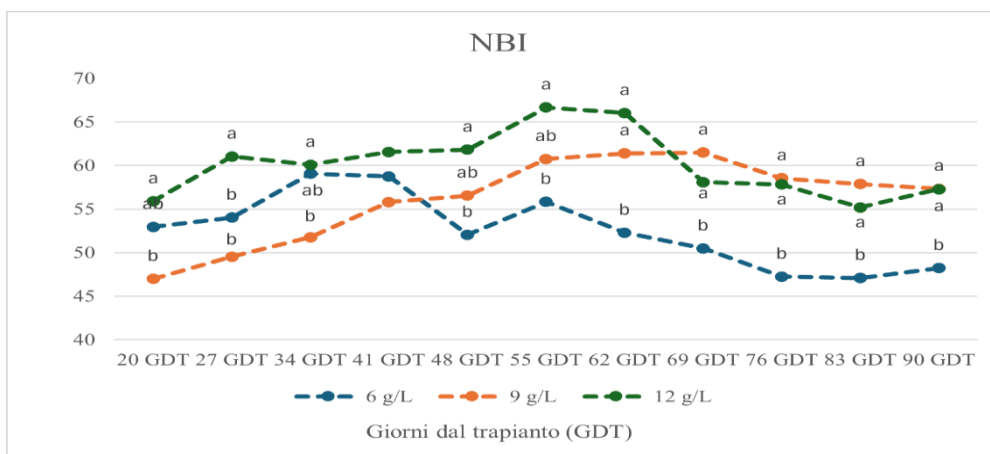


Figura 20: Effetto della salinità dell'acqua sull'indice NBI (*Nitrogen Balanced Index*) in bieta da costa. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p$ -value < 0.05) tra i trattamenti secondo il test di Tukey.

Le concentrazioni di flavonoidi e antociani non sono risultate significative per tutta la durata dell'esperimento; l'unica misurazione statisticamente significativa è stata a 41° GDT dove la tesi a 6

g/L aveva una concentrazione di flavonoidi minore, rispetto alle altre (Fig. 20). La concentrazione di flavonoidi è rimasta nel range di 0,51-0,52 mentre quella di antociani tra 0,27 e 0,31.

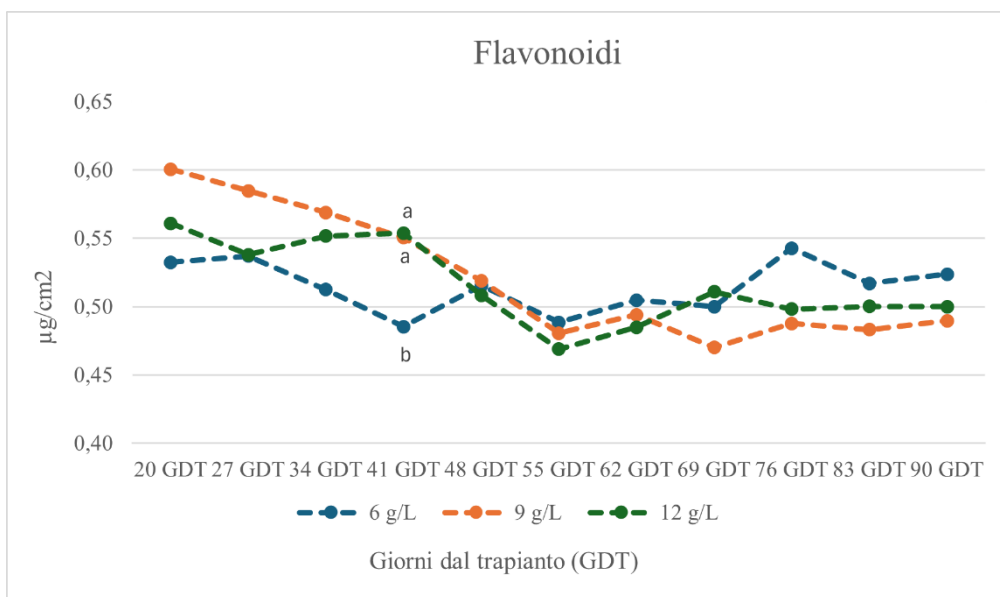


Figura 21: Effetto della salinità sul contenuto di flavonoidi in bieta da costa. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p\text{-value} < 0.05$ ) tra i trattamenti secondo il test HSD di Tukey.

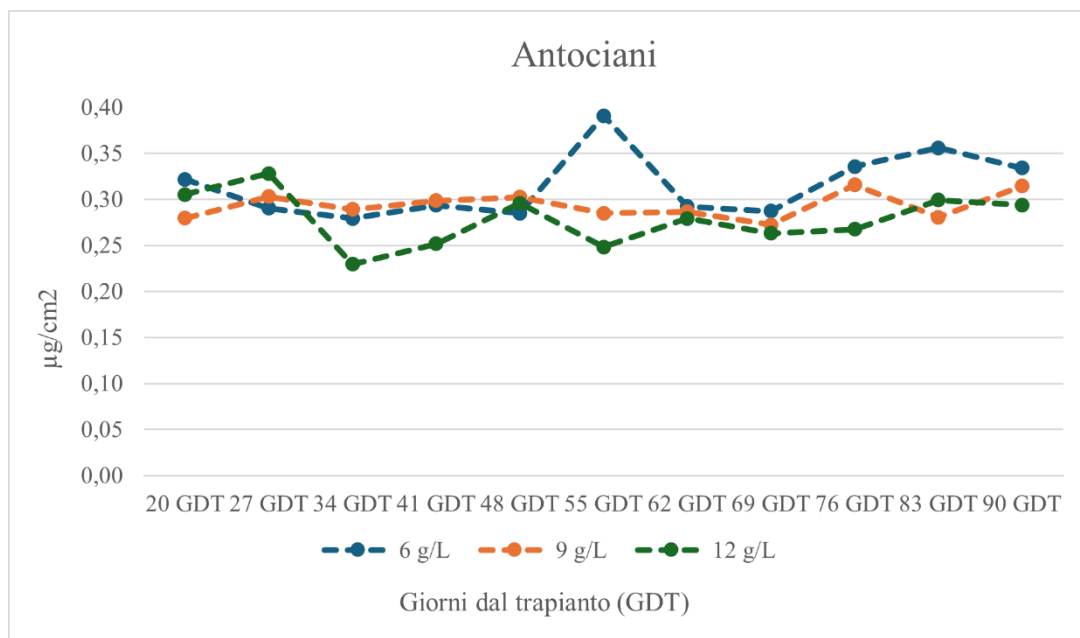


Figura 22: Effetto della salinità sul contenuto di antociani in bieta da costa. Lettere diverse corrispondono a differenze significative ( $p\text{-value} < 0.05$ ) tra i trattamenti secondo il test HSD di Tukey.

### 2.2.2 Radiometria

I rilievi della radiometria sono stati analizzati e trasformati in forma grafica mediante il software Origin (2026.1.1). Come si può vedere dalla figura 23, i rilievi di ottobre mostrano come il livello medio del sistema era generalmente più ombreggiato, mentre il livello alto il 1° ottobre e le parti esterne erano più esposte, con differenze anche di  $400 \mu\text{Mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Per quanto il range di intensità luminosa si sia ridotto rispetto a ottobre, nella figura 23a e 23b si evidenzia che i livelli che hanno intercettato la maggiore luce siano quelli alti, con differenze anche di  $200 \mu\text{Mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; infine le parti più esterne ed esposte al lato della serra (a destra nelle figure) mostravano valori maggiori di intensità luminosa rispetto alle parti opposte, sia nei livelli medi che in quelli bassi.

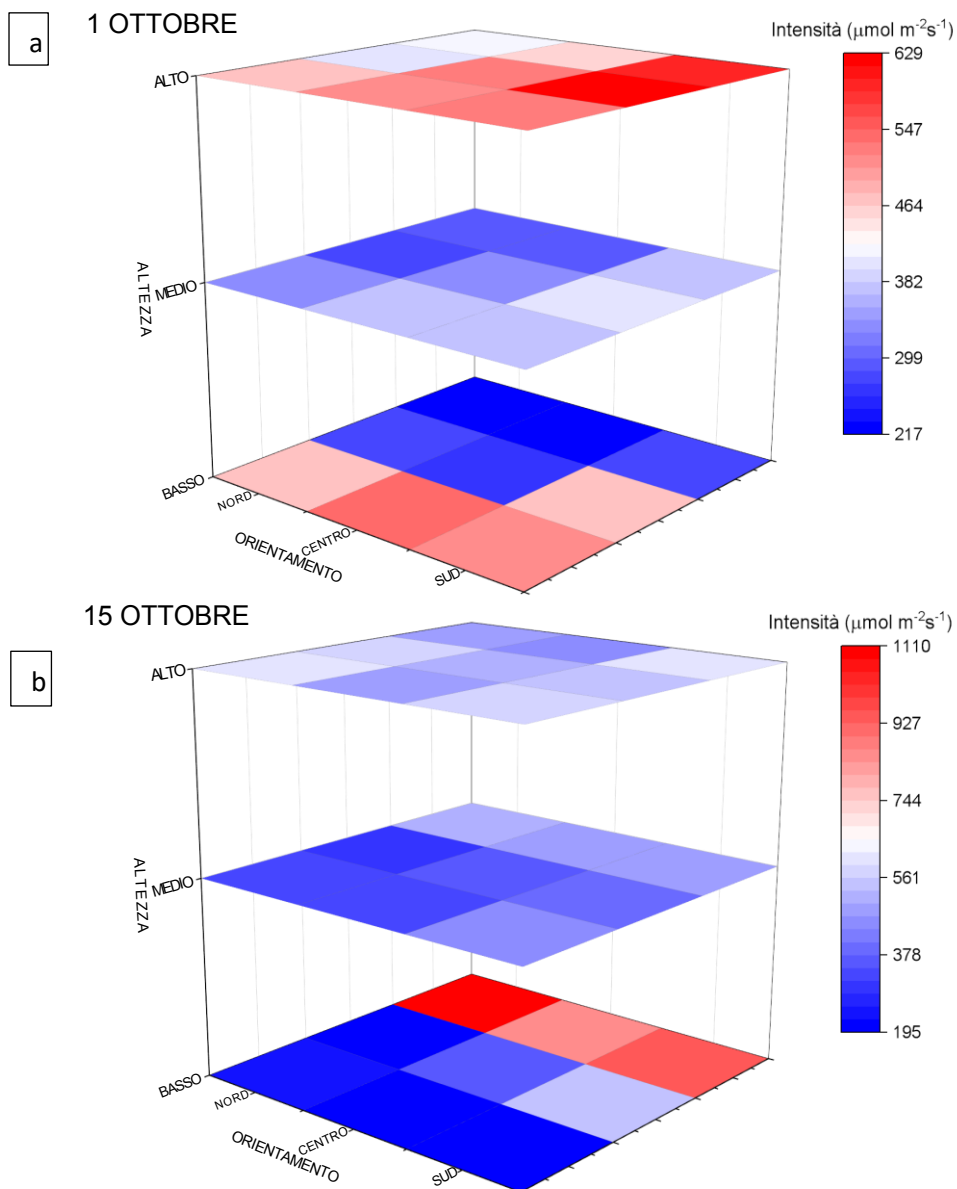


Figura 23: Intensità luminosa media dei sistemi (a) il 1 ottobre (20 GDT) e (b) il 15 ottobre (34GDT)

12 NOVEMBRE

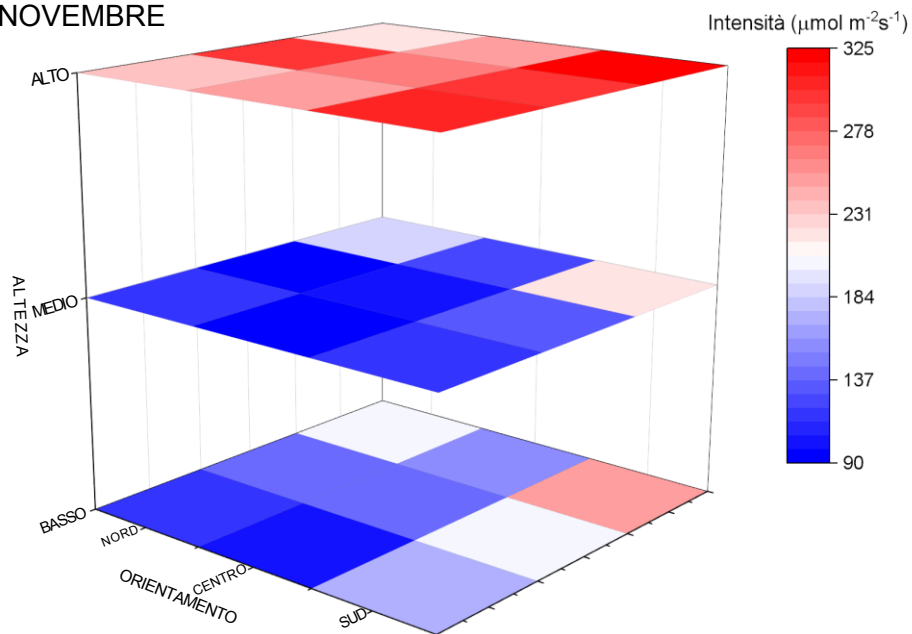


Figura 24: Intensità luminosa media dei sistemi il 12 novembre (62 GDT).

27 NOVEMBRE

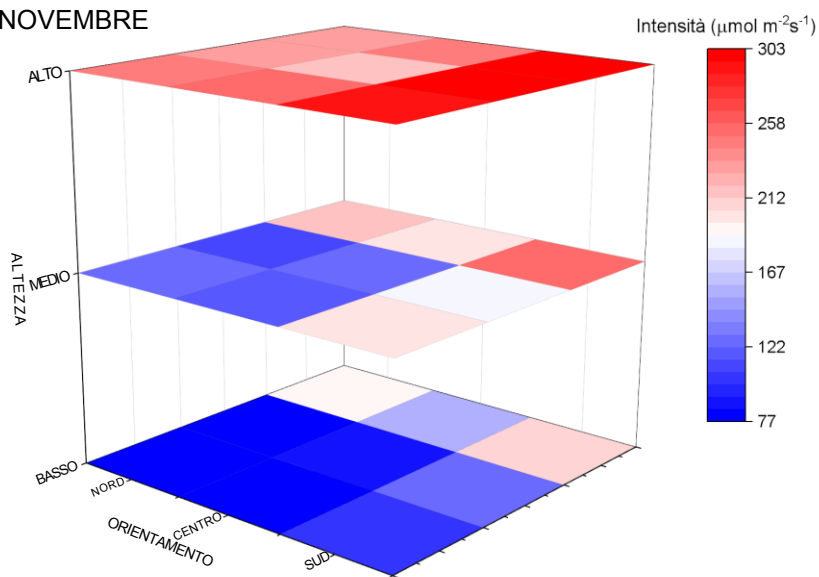


Figura 25: Intensità luminosa media dei sistemi il 27 novembre (77 GDT).

## 2.3 Rilievi produttivi:

### 2.3.1 Biomassa totale:

La biomassa prodotta dai sistemi è stata espressa usando due parametri diversi, peso medio della singola pianta (in grammi) e resa al m<sup>2</sup>. Come illustrato in figura 26 per il peso medio della singola pianta, il trattamento che ha prodotto di più è stato quello a 12 g/L con 223 g medi, seguito dal trattamento a 6 e a 9 g/L, con riduzioni dell'8% e dell'11% rispettivamente. Alla stessa maniera, per il parametro della resa al m<sup>2</sup>, la tesi migliore è stata quella a 12 g/L, con 16,07 kg/m<sup>2</sup>, seguita dalla tesi a 6 g/L e a 9 g/L, con riduzioni dell'8% e dell'11% rispettivamente, come si evince in figura 27.

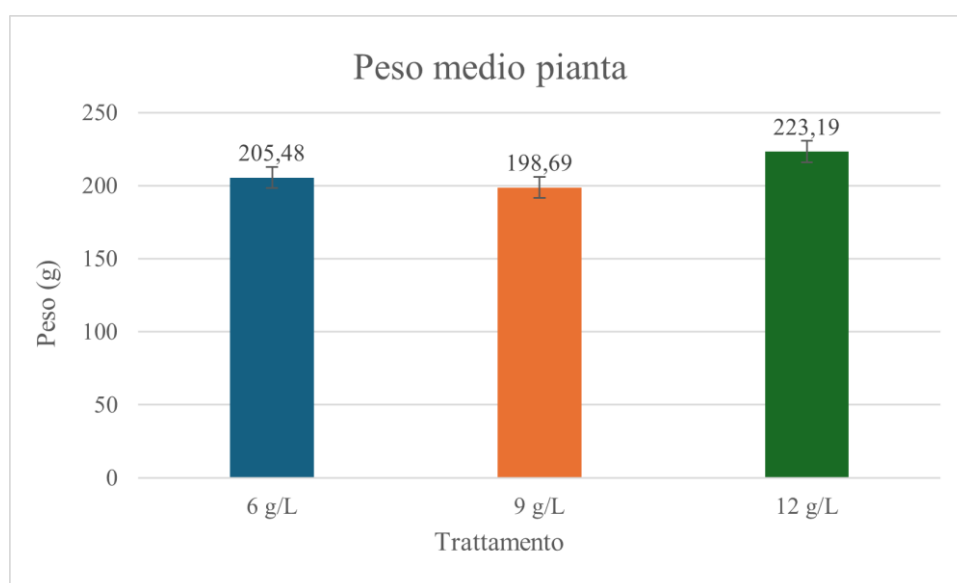


Figura 26: Effetto della salinità sul peso medio per pianta di bieta da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value  $< 0.05$ ) secondo il test di HDS di Tukey.

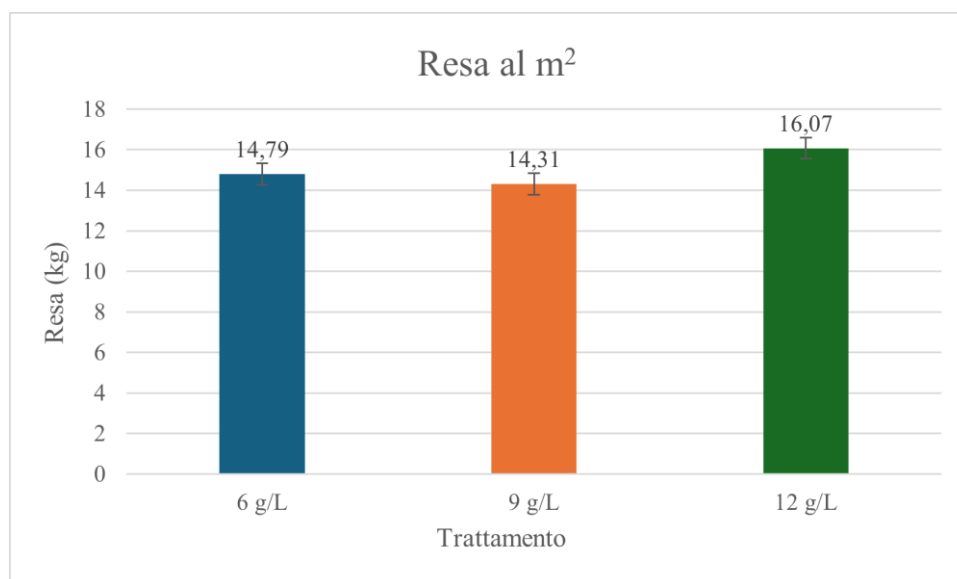


Figura 27: Effetto della salinità sulla resa di bieta da costa al m<sup>2</sup> per trattamento espresso in kg m<sup>-2</sup>. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value  $< 0.05$ ) secondo il test di HDS di Tukey.

### 2.3.2 LAI e SLA

Sono stati calcolati due diversi parametri di area fogliare: LAI e SLA, ovvero la superficie fogliare rapportata alla sostanza secca (SS). Per l'indice LAI la tesi che ha ottenuto il risultato più alto è stata quella a 9 g/L mentre le tesi a 6 g/L e a 12g/L hanno avuto una riduzione del 7% e del 20% rispettivamente (Fig. 28a). Per l'indice SLA i trattamenti sono risultati tutti statisticamente significativi, con le tesi a 6 e 9 g/L che avevano i valori più alti, seguiti dalla tesi a 12 g/L (Fig. 28b).

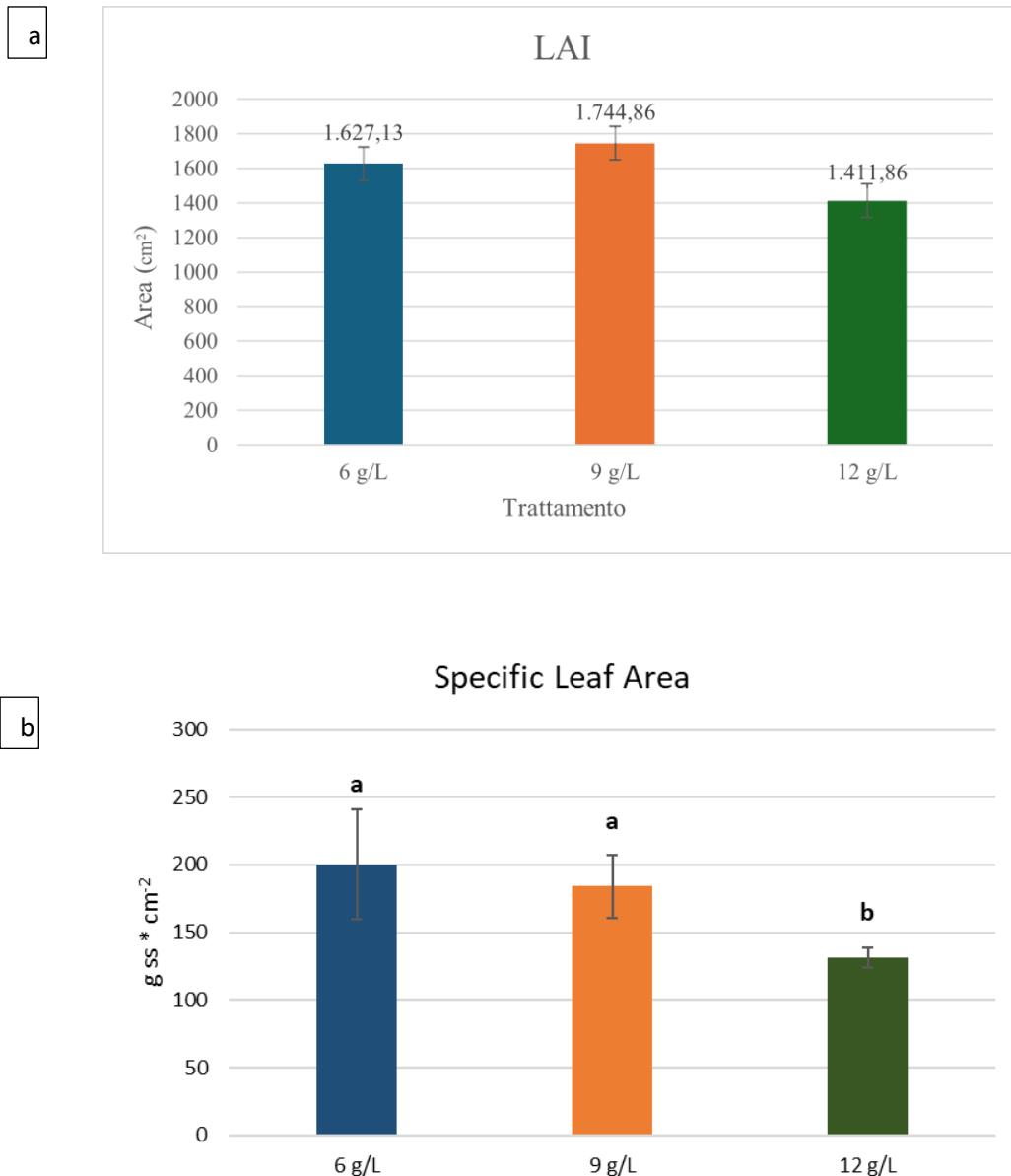


Figura 28: Effetto della salinità dell'acqua su LAI (a) e SLA (b) in bieta da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value  $< 0.05$ ) secondo il test di HDS di Tukey.

### 2.3.3 Peso dei gamberi

Il peso medio dei gamberi ha seguito un andamento crescente in tutte le tesi ed è risultato significativo in due momenti. Nel primo a 120 giorni dall'inizio dell'esperimento dove la tesi a 6 g/L ha prodotto i gamberi di maggior peso, seguita da quella a 9 g/L e da quella a 12 g/L. A 132 giorni invece le tesi a 6 e 9 g/L hanno prodotto gamberi di dimensioni comparabili ma maggiori di quelli del trattamento a 12 g/L. Il trattamento a 6 g/L e a 9 g/L hanno prodotto gamberi di peso medio pari a 10-11 g, mentre quello a 12 g/L ha prodotto gamberi di peso medio pari circa a 8 g.

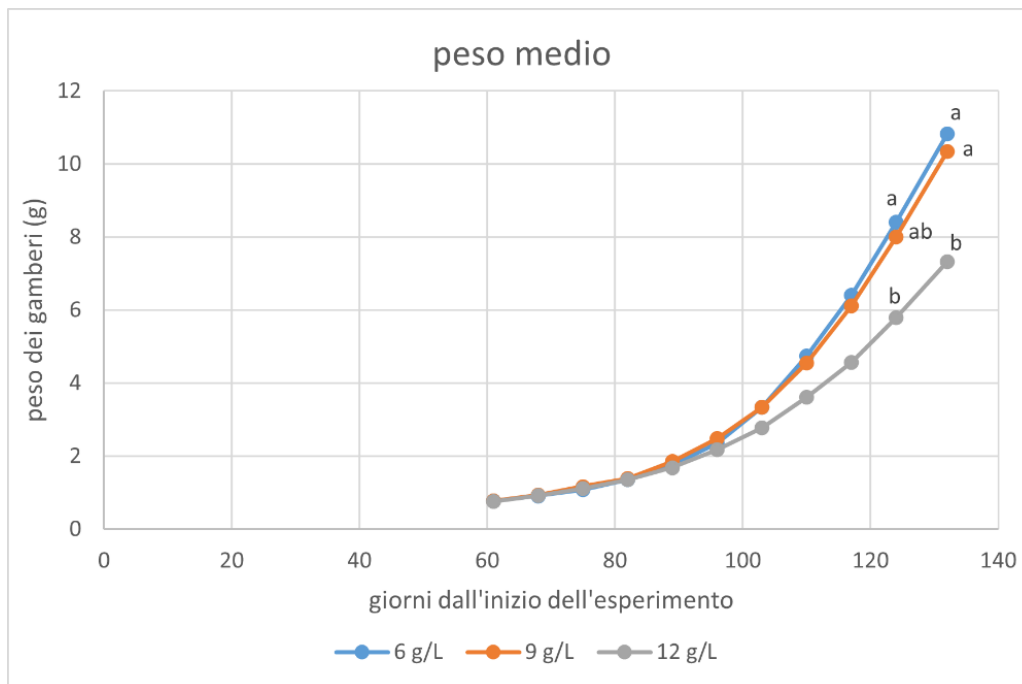


Figura 29: Effetto della salinità sul peso medio dei gamberi. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value  $< 0.05$ ) secondo il test di HDS di Tukey.

### 2.3.4 Tasso di sopravvivenza

Il tasso di sopravvivenza è stato calcolato a partire dai 65-70 individui per vasca ed è risultato significativo in quattro momenti. A partire dal 103esimo giorno dall'inizio dell'esperimento e fino al penultimo rilievo (ovvero quello del 132esimo giorno) le tesi a 12 g/L e a 9 g/L hanno avuto un tasso di sopravvivenza maggiore (e quindi una minor mortalità) rispetto a quella a 6 g/L.

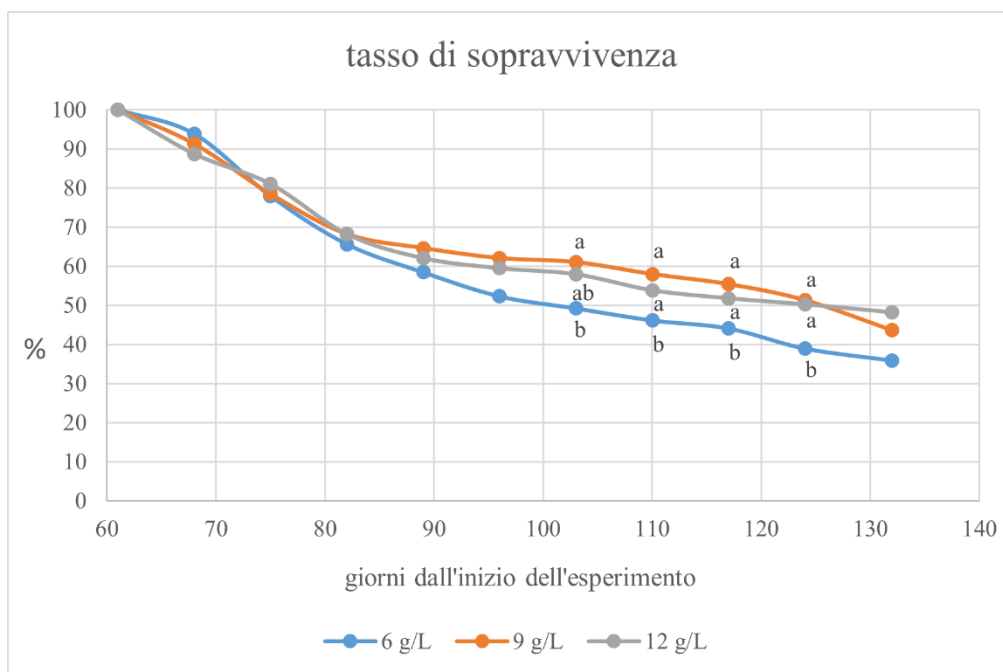


Figura 30: Effetto della salinità sul tasso di sopravvivenza dei gamberi . Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value < 0.05) secondo il test di HDS di Tukey.

## 2.4 Analisi qualitative

### 2.4.1 Anioni e cationi

L'analisi del profilo ionico ha evidenziato differenze statisticamente significative esclusivamente per il contenuto di nitrati ( $\text{NO}_3^-$ ) e magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (Tabella 31a).

Il contenuto di nitrati è risultato massimo nella tesi a 9 g/L, con valori pari a  $3481,7 \text{ mg g}^{-1}$  di sostanza secca (SS%), mentre nelle tesi a 12 e 6 g/L si è osservata una riduzione rispettivamente del 26% e del 42%. Considerata la rilevanza nutrizionale e normativa di questo parametro negli ortaggi a foglia, i valori ottenuti sono stati convertiti in  $\text{mg kg}^{-1}$  di peso fresco, in funzione del contenuto di sostanza secca. I valori medi risultanti sono stati pari a 2025, 3481 e  $2568 \text{ mg kg}^{-1}$  di peso fresco rispettivamente per le tesi a 6, 9 e 12 g/L. Tali concentrazioni risultano inferiori al limite massimo di  $3500 \text{ mg kg}^{-1}$  stabilito dal Regolamento (UE) n. 2023/915 per ortaggi a foglia destinati al consumo fresco. Sebbene il riferimento normativo riguardi lattuga e spinacio, quest'ultimo appartenente alla stessa famiglia botanica della bietola (*Chenopodiaceae*), il confronto risulta indicativo della conformità del prodotto ottenuto.

Per quanto riguarda il magnesio, i risultati mostrano una relazione inversa con l'incremento della salinità della soluzione nutritiva. La concentrazione più elevata è stata registrata nella tesi a 6 g/L ( $1379,3 \text{ mg g}^{-1}$  SS%), mentre nelle tesi a 9 e 12 g/L si è osservata una riduzione rispettivamente del 22% e del 27%, suggerendo un possibile effetto competitivo tra ioni in condizioni di maggiore salinità. Gli altri elementi analizzati non hanno mostrato differenze statisticamente significative (Tabella 31b). Tuttavia, emerge un chiaro andamento tendenziale: l'aumento della salinità è associato a un incremento del contenuto di sodio e cloruri nei tessuti vegetali, mentre il potassio mostra una progressiva diminuzione. I contenuti di solfati, ammonio, calcio e fosfati si sono invece mantenuti

relativamente stabili tra i trattamenti, mentre i nitriti sono risultati inferiori al limite di rilevabilità in tutte le condizioni sperimentali.

Tabella 31: Effetto della salinità dell'acqua sul contenuto di anioni e cationi in bieta da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value  $< 0.05$ ) secondo il test di HDS di Tukey.

a	Nitrati	Magnesio	Sodio	Cloruri	Fosfati
	mg/g di SS%				
Trattamenti di salinità					
6 g/L	2025,4 <b>b</b>	1379,3 <b>a</b>	7790	9571,5	1303,6
9 g/L	3481,7 <b>a</b>	1002,9 <b>b</b>	8775,6	10165,1	1322,0
12 g/L	2568,7 <b>ab</b>	1079,5 <b>ab</b>	9504,9	11681,2	1184,5

b	Solfati	Nitriti	Ammonio	Calcio	Potassio
	mg/g di SS%				
Trattamenti di salinità					
6 g/L	1421,7	< 0,25	221,2	4,27	3561,9
9 g/L	1147,1	< 0,25	316,3	4,33	3381,9
12 g/L	1334,4	< 0,25	196,4	4,71	3089,9

#### 2.4.2 Qualità

Tra le analisi condotte sulla qualità dei succhi vegetali l'unica a essere risultata statisticamente significativa è stata quella della conducibilità elettrica (EC) (Fig. 32). Le tesi a 9 g/L e a 12 g/L avevano i valori più alti, compresi tra 24 e 26 mS/cm mentre la tesi a 6 g/L era di circa 21 mS/cm. I valori di pH erano compresi tra 5,9 e 6,1 mentre il grado Brix era compreso tra 3,8 e 4. Infine, i valori di acidità titolabile erano compresi tra 1,7 e 2,2 (Fig. 33).

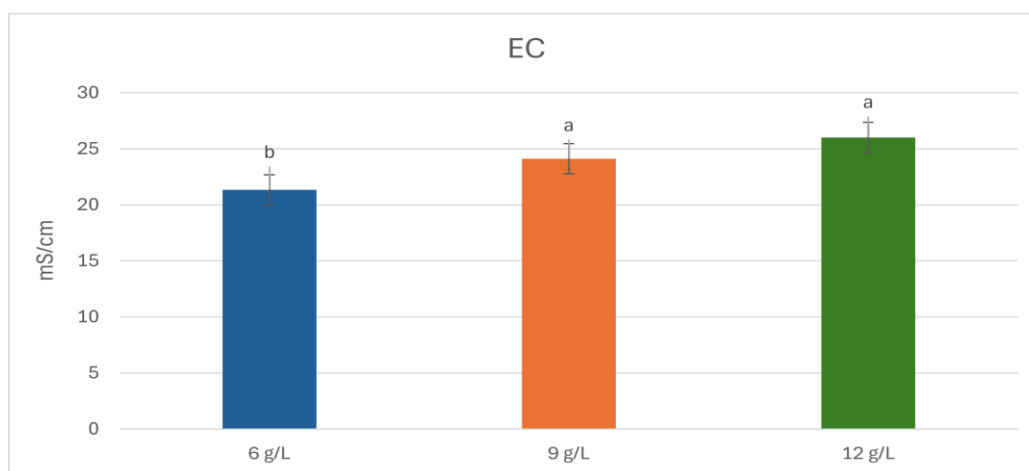
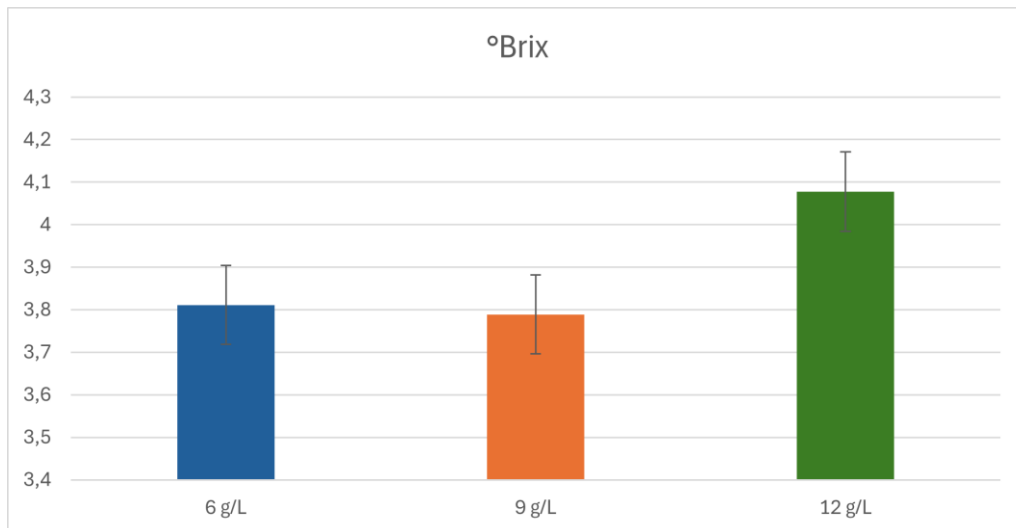
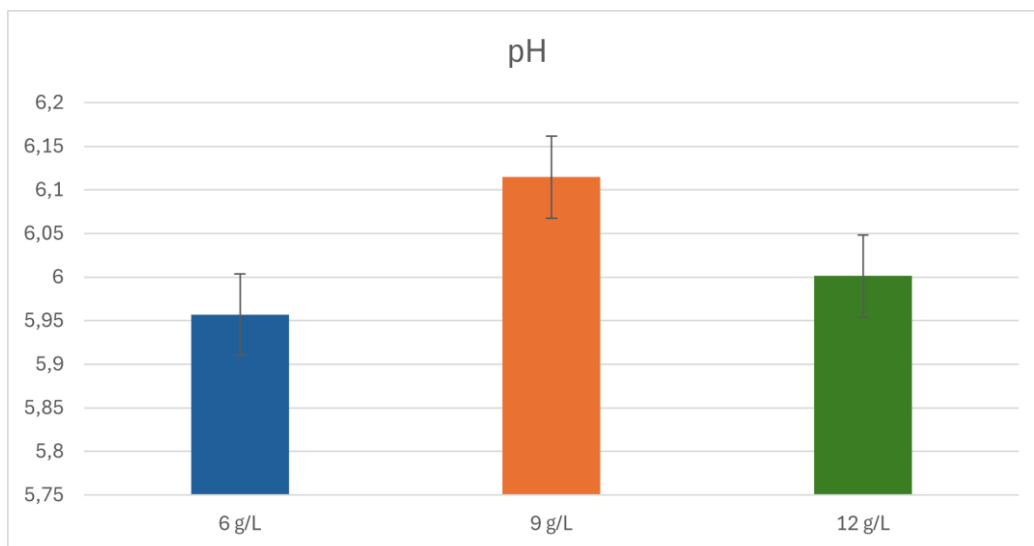


Figura 32: Effetto della salinità dell'acqua sulla conducibilità elettrica (espressa in mS/cm) di bieta da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value  $< 0.05$ ) secondo il test di HDS di Tukey

a



b



c

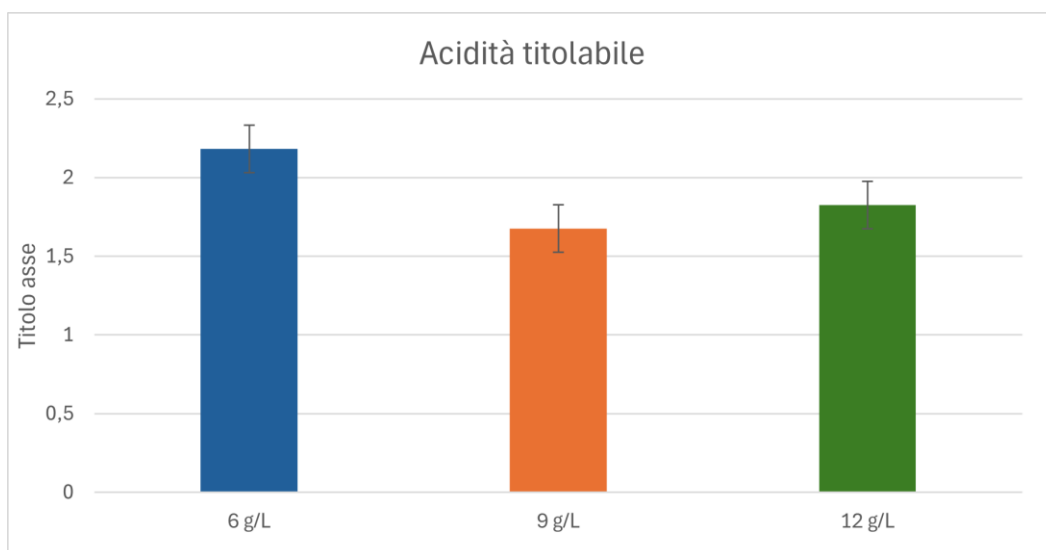


Figura 33: Effetto della salinità dell'acqua su (a) grado Brix, (b) pH e (c) acidità titolabile dei succhi vegetali di bietola da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value  $< 0.05$ ) secondo il test di HDS di Tukey.

## Contenuto di antiossidanti e polifenoli

Le analisi del contenuto di antiossidanti e polifenoli non sono risultate significative; i valori di antiossidanti erano compresi in un range di 2824 e 3221 mg Fe<sup>2+</sup>eq/kg di peso secco (Fig.34). Infine, i valori di fenoli erano compresi tra 3285 e 3621 mg GAE/kg di peso secco (Fig. 35).

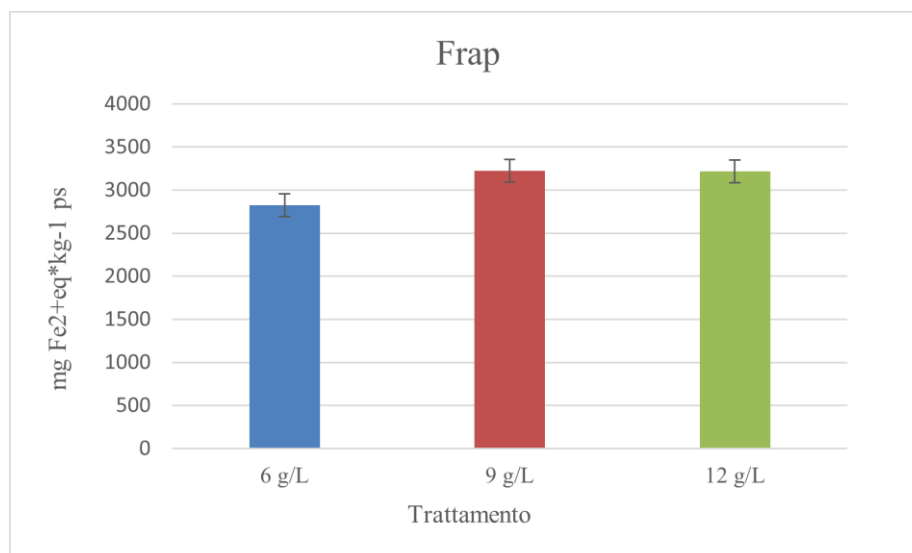


Figura 34: Effetto della salinità sul contenuto di antiossidanti in bieta da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value <0.05) secondo il test di HDS di Tukey.

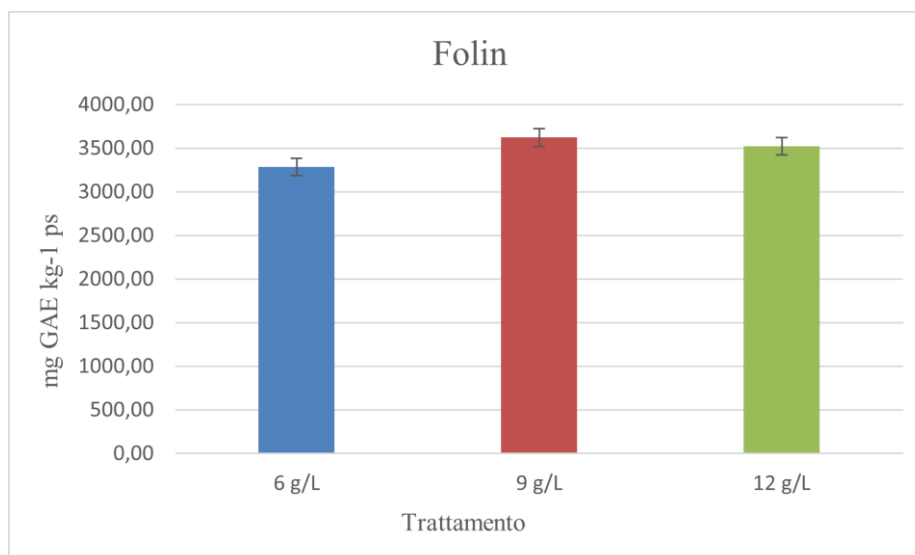


Figura 35: Effetto della salinità sul contenuto di polifenoli in bieta da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value <0.05) secondo il test di HDS di Tukey..

### 2.4.3 Pigmenti

L'analisi del contenuto di pigmenti ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i trattamenti per tutte le frazioni considerate (Fig. 36), indicando un effetto rilevante della salinità sulla risposta fotosintetica delle piante.

In particolare, il contenuto di clorofilla a (ChlA) è risultato significativamente più elevato nei trattamenti a 9 e 12 g/L, che non hanno mostrato differenze statistiche tra loro, mentre la tesi a 6 g/L ha evidenziato valori inferiori, con una riduzione di circa il 17%. Questo andamento suggerisce una minore efficienza del sistema fotosintetico nelle condizioni di salinità più bassa.

Per quanto riguarda la clorofilla b (ChlB), il valore massimo è stato registrato nella tesi a 9 g/L, statisticamente superiore rispetto al trattamento a 6 g/L e leggermente più elevato rispetto alla tesi a 12 g/L, che ha mostrato una riduzione contenuta (circa 6%), mentre la diminuzione rispetto alla tesi a 6 g/L ha raggiunto circa il 21%.

Il contenuto complessivo di xantofille e carotenoidi (Xan+Car) ha invece raggiunto i valori più elevati nel trattamento a 12 g/L. Le tesi a 9 e 6 g/L hanno mostrato concentrazioni progressivamente inferiori, con riduzioni rispettivamente del 6% e del 12%. L'aumento di questi pigmenti accessori alle salinità più elevate può essere interpretato come una risposta adattativa delle piante a condizioni di maggiore stress osmotico, finalizzata alla protezione foto-ossidativa dell'apparato fotosintetico.

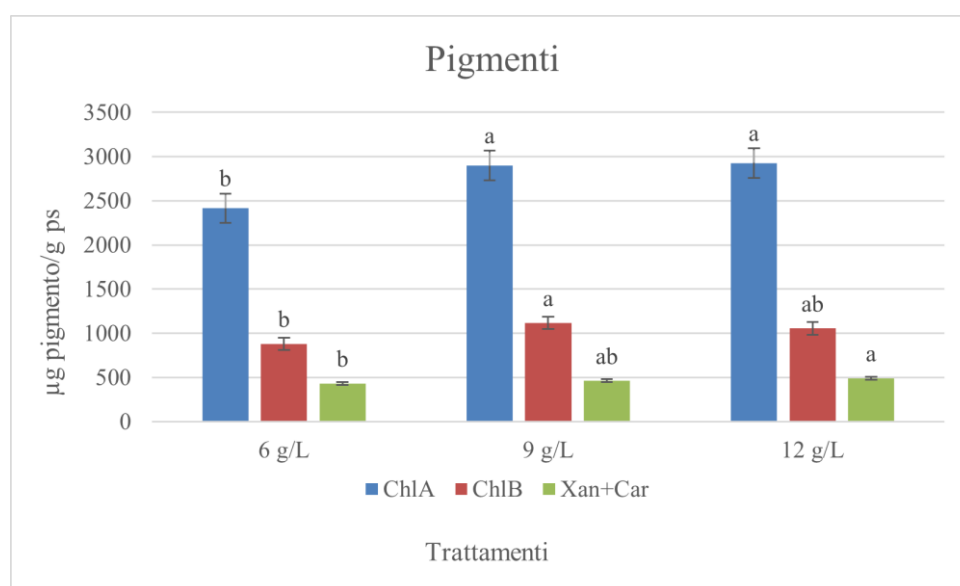


Figura 36: Effetto della salinità sul contenuto di Clorofilla A (ChlA), Clorofilla B (ChlB) e Xantofille e Carotenoidi (Xan+Car) in bieta da costa. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ( $p$ -value < 0.05) secondo il test di HDS di Tukey.



## 5. Discussione

Nel corso della sperimentazione i principali parametri chimico-fisici dell'acqua si sono mantenuti complessivamente stabili, evidenziando una buona gestione dei sistemi acquaponici e la corretta applicazione dei trattamenti salini. La conducibilità elettrica ha infatti mostrato valori costanti e coerenti con i livelli di salinità impostati, confermando il mantenimento delle condizioni sperimentali durante l'intero ciclo colturale. Le operazioni di reintegro idrico hanno inoltre evidenziato come, all'aumentare della salinità, le piante di bietola abbiano ridotto i fenomeni di evapotraspirazione, determinando minori perdite d'acqua dal sistema, in accordo con quanto riportato in letteratura (Song et al., 2006; Mat Fahrur et al., 2024).

Il pH delle vasche è risultato influenzato dai diversi livelli di salinità, mostrando una progressiva diminuzione nel tempo riconducibile ai processi di assorbimento radicale dei nutrienti e alla conseguente estrusione di ioni  $H^+$  nella soluzione nutritiva. Tale dinamica ha reso necessario un periodico aggiustamento del pH per mantenerlo entro l'intervallo ottimale per l'allevamento della mazzancolla tropicale (6,5–7,5), garantendo condizioni compatibili con il benessere animale (Taylor et al., 2025).

La biomassa vegetale prodotta, espressa sia come resa per unità di superficie sia come peso medio per pianta, è risultata elevata e in linea, o superiore, rispetto a studi analoghi condotti su bietola da costa in condizioni saline. Le rese ottenute (14–16 kg m<sup>-2</sup>) superano infatti quelle riportate da Bordignon et al. (2024), Puccinelli et al. (2022) e He et al. (2022), suggerendo una buona adattabilità della coltura al sistema acquaponico verticale anche a salinità relativamente elevate.

L'incremento della salinità ha determinato modificazioni morfo-fisiologiche tipiche delle condizioni di stress osmotico controllato. In particolare, è stata osservata una riduzione dell'indice di area fogliare (LAI) compresa tra il 7 e il 20%, inferiore rispetto a quanto riportato in altri studi (He et al., 2022; Deveci et al., 2019), indicando una risposta adattativa moderata finalizzata alla limitazione delle perdite idriche per traspirazione. Parallelamente, la diminuzione della Specific Leaf Area (SLA), soprattutto nella tesi a 12 g/L, evidenzia un ispessimento fogliare associato a un maggiore accumulo di sostanza secca, strategia morfologica comunemente adottata dalle piante per aumentare la resistenza allo stress salino.

L'analisi ionica della biomassa vegetale ha confermato un progressivo aumento dell'accumulo di sodio e cloruri all'aumentare della salinità, comportamento coerente con la natura alofita della bietola. Tale incremento è risultato associato a una riduzione del contenuto di potassio, attribuibile all'antagonismo competitivo tra i due cationi monovalenti (Benlloch et al., 1994; Kaburagi et al., 2014). Le variazioni osservate suggeriscono quindi un adattamento nutrizionale della coltura attraverso la sostituzione parziale del potassio con il sodio nei processi fisiologici cellulari.

Il maggiore contenuto di nitrati riscontrato nelle tesi a 9 e 12 g/L può essere interpretato come conseguenza dell'aumentato assorbimento ionico in condizioni saline. In specie alofite come la bietola, il sodio può infatti sostituire il potassio nei meccanismi di co-trasporto dei nitrati quando quest'ultimo diviene limitante (Subbarao et al., 2003; Puccinelli et al., 2022). L'ipotesi di un accumulo dei nitrati come osmoliti appare invece poco probabile, considerando le concentrazioni relativamente contenute presenti nella soluzione nutritiva (Song et al., 2006).

Il maggiore contenuto di clorofilla osservato nelle tesi a salinità intermedia ed elevata risulta coerente con la maggiore disponibilità di azoto nitrico necessario alla biosintesi delle metalloporfirine clorofilliane, molecole contenenti azoto e magnesio essenziali per l'attività fotosintetica (Ebrahimi et al., 2023). La contemporanea riduzione del contenuto di magnesio nei tessuti vegetali potrebbe riflettere un suo maggiore impiego metabolico nei processi di sintesi pigmentaria.

Le analisi relative ai composti antiossidanti non hanno evidenziato differenze significative tra i trattamenti, suggerendo l'assenza di condizioni di stress ossidativo marcato. I valori riscontrati, inferiori rispetto a quelli osservati in coltivazioni di pieno campo (Mzoughi et al., 2019), indicano che le piante sono state in grado di adattarsi efficacemente all'intervallo di salinità compreso tra 6 e 12 g/L senza attivare risposte difensive rilevanti. Analogamente, tra i parametri qualitativi dei succhi vegetali, solo la conducibilità elettrica è risultata influenzata dalla salinità, riflettendo il maggiore accumulo di sali nei tessuti fogliari.

Nonostante la bietola sia una specie naturalmente accumulatrice di nitrati, i valori medi rilevati sono rimasti inferiori ai limiti stabiliti dal Regolamento (UE) 2023/915 per ortaggi a foglia destinati al consumo fresco. Ciò è probabilmente riconducibile alla moderata produzione di azoto nel sistema, legata alla densità relativamente contenuta di gamberi allevati.

Per quanto riguarda la componente animale, la valutazione dell'allevamento di mazzancolla tropicale ha evidenziato differenze tra i trattamenti in termini di sopravvivenza e accrescimento. La tesi a 9 g/L ha garantito la maggiore produzione complessiva di biomassa, grazie a un equilibrio ottimale tra crescita individuale e tasso di mortalità. Al contrario, nella tesi a 6 g/L, pur registrando pesi medi comparabili, è stato osservato un maggiore tasso di mortalità, indicando condizioni meno favorevoli. Nel complesso, i risultati suggeriscono che livelli intermedi di salinità rappresentino il miglior compromesso tra performance vegetale e produttività animale nel sistema acquaponico studiato.

## 6. Conclusioni

Questo lavoro ha valutato la praticabilità di un sistema aloponico in vertical farming che ha previsto la combinazione tra la coltivazione di bietola da costa (*Beta vulgaris* var. *Cicla*) e l'allevamento di Mazzancolla tropicale (*Litopenaeus vannamei*).

Il trattamento allo studio è stata la salinità, alle tesi di 6, 9 e 12 g/L. L'obiettivo è stato quello di comprendere quale tesi permettesse di ottenere i migliori risultati produttivi e di qualità complessivi di Bietola da costa e Mazzancolla tropicale. Dai risultati si può affermare che il sistema è risultato praticabile, a condizione di monitorare attentamente i parametri dell'acqua e fogliari, in modo da poter intervenire ed ottimizzare lo sviluppo e la crescita delle componenti vegetali e animali quando risulti necessario.

Dal punto di vista della coltivazione di bietola da costa, essa ha confermato di avere una buona adattabilità a salinità diverse, mantenendo buoni parametri di produttività, paragonabili a quelli di esperimenti simili. I parametri di qualità influenzati dalla salinità in questo esperimento sono stati principalmente la conducibilità elettrica (EC), dovuta all'accumulo proporzionale di sale e il contenuto di nitrati; il livello di nitrati è rimasto entro i valori soglia previsti dal regolamento europeo (UE) n. 1258/2011. Infine, i parametri fogliari sono risultati migliori nelle tesi a 9 e a 12 g/L, mostrando quindi un effetto di stimolazione della crescita e dello sviluppo a salinità medio-alte. Per quanto riguarda l'allevamento del gambero, in quanto specie eurialina, esso ha confermato la capacità di adattarsi e crescere a diversi livelli di salinità. Tra i parametri studiati, la tesi a 6 g/L di salinità ha avuto un effetto maggiormente negativo sul tasso di sopravvivenza e per il peso medio le tesi migliori sono state quelle a 6 e a 9 g/L. Quindi è possibile affermare che la tesi a 9 g/L abbia prodotto la maggior biomassa. Il trattamento migliore per l'associazione di bietola da costa e mazzancolla tropicale è risultato essere quello a 9 g/L. Futuri studi saranno necessari, vista la tolleranza della bietola e la capacità di adattamento del gambero alle alte salinità, per sperimentare sistemi acquaponici a livelli di salinità più alti, spingendosi oltre i 12 g/L.



## Bibliografia

- «2018 Census of Aquaculture». s.d. Consultato 11 febbraio 2026.  
[https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2017/Online\\_Resources/Aquaculture/index.php](https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2017/Online_Resources/Aquaculture/index.php).
- Al-Hafedh, Yousef S., Aftab Alam, e M. Afaque Alam. 2003. «Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)». *Aquacultural Engineering* 29 (3): 139–54. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00065-7).
- Atzori, Giulia, Werther Guidi Nissim, Stefania Caparrotta, *et al.*, 2016. «Potential and constraints of different seawater and freshwater blends as growing media for three vegetable crops». *Agricultural Water Management* 176 (ottobre): 255–62. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.016>.
- Atzori, Giulia, Stefano Mancuso, e Elisa Masi. 2019a. «Seawater potential use in soilless culture: A review». *Scientia Horticulturae* 249 (aprile): 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.035>.
- Atzori, Giulia, Stefano Mancuso, e Elisa Masi. 2019b. «Seawater potential use in soilless culture: A review». *Scientia Horticulturae* 249 (aprile): 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.035>.
- Benlloch, M., M. A. Ojeda, J. Ramos, e A. Rodriguez-Navarro. 1994. «Salt Sensitivity and Low Discrimination between Potassium and Sodium in Bean Plants». *Plant and Soil* 166 (1): 117–23.  
<https://doi.org/10.1007/BF02185488>.
- Bernstein, Sylvia. 2011. *Aquaponic Gardening: A Step-by-Step Guide to Raising Vegetables and Fish Together*. Mother Earth News Books for Wiser Living Series. New Society Publishers.
- Bordignon, Francesco, Marco Birolo, Cecilia Fanizza, *et al.*, 2024. «Effects of water salinity in an aquaponic system with rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), black bullhead catfish (*Ameiurus melas*), Swiss chard (*Beta vulgaris*), and cherry tomato (*Solanum lycopersicum*)». *Aquaculture* 584 (aprile): 740634. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740634>.
- Bruxelles, G. L. de, W. J. Peacock, E. S. Dennis, e R. Dolferus. 1996. «Abscisic Acid Induces the Alcohol Dehydrogenase Gene in Arabidopsis». *Plant Physiology* 111 (2): 381–91.  
<https://doi.org/10.1104/pp.111.2.381>.
- CABI Databases. s.d. «Review of Recirculation Aquaculture System Technologies and Their Commercial Application. Final Report March 2014.» Consultato 13 febbraio 2026.  
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20143257029>.
- Cela, Fatjon, Giulia Carmassi, Basma Najar, *et al.*, 2024. «Salinity Impact on Yield, Quality and Sensory Profile of 'Pisanello' Tuscan Local Tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) in Closed Soilless Cultivation». *Horticulturae* 10 (6): 570. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060570>.
- Chang, Healani, B. Z. Siegel, e S. M. Siegel. 1984. «Salinity-induced changes in isoperoxidases in taro *Colocasia esculenta*». *Phytochemistry* 23 (2): 233–35. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)80308-8](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)80308-8).
- Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on Maximum Levels for Certain Contaminants in Food and Repealing Regulation (EC) No 1881/2006 (Text with EEA Relevance) (2025).  
<http://data.europa.eu/eli/reg/2023/915/2025-10-08>.

- Cushman, J. C., G. Meyer, C. B. Michalowski, J. M. Schmitt, e H. J. Bohnert. 1989. «Salt stress leads to differential expression of two isogenes of phosphoenolpyruvate carboxylase during Crassulacean acid metabolism induction in the common ice plant.» *The Plant Cell* 1 (7): 715–25. <https://doi.org/10.1105/tpc.1.7.715>.
- Dalsgaard, Johanne, Ivar Lund, Ragnheidur Thorarinsdottir, Asbjørn Drengstig, Kaj Arvonen, e Per Bovbjerg Pedersen. 2013. «Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives». *Aquacultural Engineering*, Workshop on Recirculating Aquaculture Systems, vol. 53 (marzo): 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.008>.
- Davison, Andy. 2019. *Recirculating Aquaculture Systems*. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/chapter-epub/10.1002/9781118250105.ch11?saml\\_referrer](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/chapter-epub/10.1002/9781118250105.ch11?saml_referrer).
- Debroy, Pragnaleena, Priyanka Majumder, Parijata Majumdar, Amrit Das, e Lalu Seban. 2025. «Analysis of Opportunities and Challenges of Smart Aquaponic System: A Summary of Research Trends and Future Research Avenues». *Sustainable Environment Research* 35 (1): 18. <https://doi.org/10.1186/s42834-025-00255-z>.
- Deveci, Murat, Şükrü Öztürk, Süreyya Altıntaş, e Levent Arın. 2019. «The Effect of Irrigation Water Salinity on the Morphological and Physiological Traits of Swiss Chard (Beta Vulgaris L. Var. Cicla Moq.)». *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology* 7 (6): 903–7. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i6.903-907.2501>.
- Ebrahimi, Peyman, Zahra Shokramraji, Setareh Tavakkoli, Dasha Mihaylova, e Anna Lante. 2023. «Chlorophylls as Natural Bioactive Compounds Existing in Food By-Products: A Critical Review». *Plants* 12 (7): 1533. <https://doi.org/10.3390/plants12071533>.
- El-Kazzaz, Aa. 2017. «Soilless Agriculture a New and Advanced Method for Agriculture Development: an Introduction». *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal* 3 (2). <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.03.555610>.
- FAO, a c. di. 2018. *Meeting the Sustainable Development Goals. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018*. Rome.
- FAO 2005, T. Loftas, e J. Ross. 1995. *Dimensions of Need: An Atlas of Food and Agriculture*.
- Fox, Tim. 2013. *Global Food Waste Not, Want Not*.
- Francis, C., G. Lieblein, S. Gliessman, et al., 2003. «Agroecology: The Ecology of Food Systems». *Journal of Sustainable Agriculture* 22 (3): 99–118. [https://doi.org/10.1300/J064v22n03\\_10](https://doi.org/10.1300/J064v22n03_10).
- Goddek, Simon, Boris Delaide, Utra Mankasingh, Kristin Vala Ragnarsdottir, Haissam Jijakli, e Ragnheidur Thorarinsdottir. 2015. «Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics». *Sustainability* 7 (4): 4199–224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>.
- Goddek, Simon, Alyssa Joyce, Benz Kotzen, e Gavin M. Burnell, a c. di. 2019. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>.
- Goddek, Simon, e Oliver Körner. 2019. «A Fully Integrated Simulation Model of Multi-Loop Aquaponics: A Case Study for System Sizing in Different Environments». *Agricultural Systems* 171 (maggio): 143–54. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.010>.

- Hasegawa, Paul M., Ray A. Bressan, Jian-Kang Zhu, e Hans J. Bohnert. 2000. «PLANT CELLULAR AND MOLECULAR RESPONSES TO HIGH SALINITY». *Annual Review of Plant Biology* 51 (Volume 51, 2000): 463–99. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>.
- He, Hua, Weiwei Zhou, Haofeng Lü, e Bin Liang. 2022. «Growth, Leaf Morphological and Physiological Adaptability of Leaf Beet (*Beta Vulgaris* Var. *Cicla*) to Salt Stress: A Soil Culture Experiment». *Agronomy* 12 (6): 1393. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061393>.
- Hussain, Aya S., e Paul B. Brown. 2024. «A Literature Review of Tilapia/Lettuce Aquaponics—Production Status, Varieties, and Research Gaps». *Aquaculture Research* 2024 (1): 2642434. <https://doi.org/10.1155/2024/2642434>.
- Kaburagi, Emi, Yumi Morikawa, Mina Yamada, e Hideyasu Fujiyama. 2014. «Sodium enhances nitrate uptake in Swiss chard (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)». *Soil Science and Plant Nutrition* 60 (5): 651–58. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.938595>.
- Katschnig, Diana, Rob Broekman, e Jelte Rozema. 2013. «Salt tolerance in the halophyte *Salicornia dolichostachya* Moss: Growth, morphology and physiology». *Environmental and Experimental Botany, Sustainable cultivation and exploitation of halophyte crops in a salinizing world*, vol. 92 (agosto): 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.002>.
- Kloas, Werner, Roman Groß, Daniela Baganz, *et al.*, 2015. «A New Concept for Aquaponic Systems to Improve Sustainability, Increase Productivity, and Reduce Environmental Impacts». *Aquaculture Environment Interactions* 7 (ottobre): 179–92. <https://doi.org/10.3354/aei00146>.
- Kotiya, A. S., e K. H. Vadher. 2021. «Effect of Different Stocking Density on Growth, Survival on *Litopenaeus Vannamei* (Boone, 1931) in Summer and Monsoon Crop in Province of Gujarat States in India». *Journal of Survey in Fisheries Sciences* 7 (3): 71–99. <https://doi.org/10.18331/SFS2021.7.3.7>.
- Love, David C., Jillian P. Fry, Laura Genello, *et al.*, 2014. «An International Survey of Aquaponics Practitioners». *PLOS ONE* 9 (7): e102662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>.
- Martins, C. I. M., E. H. Eding, M. C. J. Verdegem, *et al.*, 2010. «New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability». *Aquacultural Engineering* 43 (3): 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>.
- Mat Fahrur, Mat, Dody Trijuno, Zainuddin Zainuddin, *et al.*, 2024a. «AQUAPONICS OF VANNAMEI SHRIMP (*LITOPENAEUS VANNAMEI*) AND WATER SPINACH (*IPOMOEA AQUATIC FORSK*) AT LOW SALINITY». *Indonesian Aquaculture Journal* 19 (luglio): 57. <https://doi.org/10.15578/iaj.19.1.2024.57-73>.
- Mat Fahrur, Mat, Dody Trijuno, Zainuddin Zainuddin, *et al.*, 2024b. «AQUAPONICS OF VANNAMEI SHRIMP (*LITOPENAEUS VANNAMEI*) AND WATER SPINACH (*IPOMOEA AQUATIC FORSK*) AT LOW SALINITY». *Indonesian Aquaculture Journal* 19 (luglio): 57. <https://doi.org/10.15578/iaj.19.1.2024.57-73>.
- Maucieri, Carmelo, Carlo Nicoletto, Erik van Os, Dieter Anseeuw, Robin Van Havermaet, e Ranka Junge. 2019. «Hydroponic Technologies». In *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, a cura di Simon Goddek, Alyssa Joyce, Benz Kotzen, e Gavin M. Burnell. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4).
- Miceli, A., A. Moncada, e F. D’Anna. 2003. «EFFECT OF SALT STRESS IN LETTUCE CULTIVATION». *Acta Horticulturae*, fasc. 609 (maggio): 371–75. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.56>.

- Munns, R. 2002. «Comparative Physiology of Salt and Water Stress». *Plant, Cell & Environment* 25 (2): 239–50. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>.
- Mzoughi, Zeineb, Hassiba Chahdoura, Yasmine Chakroun, *et al.*, 2019. «Wild edible Swiss chard leaves (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*): Nutritional, phytochemical composition and biological activities». *Food Research International* 119 (maggio): 612–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.039>.
- NamuWiki. 2026. «Vannamei Shrimp». gennaio 1. <https://en.namu.wiki/w/%ED%9D%B0%EB%8B%A4%EB%A6%AC%EC%83%88%EC%9A%B0>.
- Nations, United. 2013. «Human Development Report 2013». In *Human Development Reports*. United Nations. <https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2013>.
- Os, E. A. van, Th H. Gieling, e J. H. Lieth. s.d. *Technical Equipment in Soilless Production Systems*.
- Parida, Asish Kumar, e Anath Bandhu Das. 2005a. «Salt tolerance and salinity effects on plants: a review». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60 (3): 324–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>.
- Parida, Asish Kumar, e Anath Bandhu Das. 2005b. «Salt tolerance and salinity effects on plants: a review». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60 (3): 324–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>.
- «(PDF) Effect of pH on Nutrient Removal and Crop Production of Hydroponic Systems Treating Brewery Effluent». 2025. *ResearchGate*, pubblicazione online ad accesso anticipato, dicembre 26. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.330>.
- Popova, Losanka P., Zhivka G. Stoinova, e Liliana T. Maslenkova. 1995. «Involvement of Abscisic Acid in Photosynthetic Process in *Hordeum Vulgare* L. during Salinity Stress». *Journal of Plant Growth Regulation* 14 (4): 211–18. <https://doi.org/10.1007/BF00204914>.
- Puccinelli, Martina, Giulia Carmassi, Luca Botrini, *et al.*, 2022. «Growth and Mineral Relations of *Beta Vulgaris* Var. *Cicla* and *Beta Vulgaris* Ssp. *Maritima* Cultivated Hydroponically with Diluted Seawater and Low Nitrogen Level in the Nutrient Solution». *Horticulturae* 8 (7): 638. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070638>.
- Rakocy, James. s.d. *Ten Guidelines for Aquaponic Systems*.
- Sakamoto. 2014. «Effects of Salinity and Nutrients in Seawater on Hydroponic Culture of Red Leaf Lettuce». [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ecb/52/3/52\\_189/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ecb/52/3/52_189/_article).
- Seawright, Damon E., Robert R. Stickney, e Richard B. Walker. 1998. «Nutrient dynamics in integrated aquaculture–hydroponics systems». *Aquaculture* 160 (3): 215–37. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00168-3).
- Shannon, M. C., e C. M. Grieve. 1998. «Tolerance of vegetable crops to salinity». *Scientia Horticulturae* 78 (1): 5–38. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00189-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00189-7).
- «Sodium--A Functional Plant Nutrient | Request PDF». s.d. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1080/713989756>.
- Song, Jie, Gu Feng, Chang-Yan Tian, e Fu-Suo Zhang. 2006. «Osmotic adjustment traits of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* in field or controlled conditions». *Plant Science* 170 (1): 113–19. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.08.004>.

- The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point (SOLAW 2021)*. 2021. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>.
- Turhan, Ahmet, Hayrettin Kuscü, Nese Özmen, Mehmet Sitki Serbeci, e Ali Osman Demir. 2014. «Effect of different concentrations of diluted seawater on yield and quality of lettuce». *Chilean journal of agricultural research* 74 (1): 111–16. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000100017>.
- Tyson, Richard V. 2017. «Can Aquaponics Be Mainstreamed through Decoupling?» *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 130 (giugno): 263–65.
- Tyson, Richard V., Eric H. Simonne, Danielle D. Treadwell, James M. White, e Amarat Simonne. 2008. «Reconciling pH for Ammonia Biofiltration and Cucumber Yield in a Recirculating Aquaponic System with Perlite Biofilters». *HortScience*. *HortScience* 43 (3): 719–24. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.719>.
- Ullah, S. M., M. H. Gerzabek, e G. SOJAL. s.d. *Effect of Seawater and Soil Salinity on Ion Uptake, Yield and Quality of Tomato (Fruit)*.
- Wang, Ya-Yun, Po-Kai Hsu, e Yi-Fang Tsay. 2012. «Uptake, allocation and signaling of nitrate». *Trends in Plant Science* 17 (8): 458–67. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.006>.
- What Is the Difference between Brackish Water and Seawater? - Consolidated Water - Building, Maintaining and Operating Water Desalination Plants*. s.d. Consultato 12 febbraio 2026. <https://cwco.com/faq/how-to-make-the-theme-load-faster/>.
- Yermiyahu, U., A. Tal, A. Ben-Gal, A. Bar-Tal, J. Tarchitzky, e O. Lahav. 2007. «Rethinking Desalinated Water Quality and Agriculture». *Science* 318 (5852): 920–21. <https://doi.org/10.1126/science.1146339>.
- Zappernick, Natalia, K. V. Nedunuri, K. R. Islam, *et al.*, 2022. «Techno-economic analysis of a recirculating tilapia-lettuce aquaponics system». *Journal of Cleaner Production* 365 (settembre): 132753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132753>.
- Zhu, Jian-Kang. 2003. «Regulation of ion homeostasis under salt stress». *Current Opinion in Plant Biology* 6 (5): 441–45. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00085-2).