

Progetto SIMTAP (2019-2022)

Introduzione

Il progetto internazionale intitolato “*Self-sufficient Integrated Multi-Trophic AquaPonic systems for improving food production sustainability and brackish water use and recycling – SIMTAP*” è stato approvato nel novembre del 2018 nell’ambito del programma PRIMA (Partnership for Research and Innovation in the Mediterranean Area), bando 2018 (Sezione 2) ed è ufficialmente iniziato il 1° giugno 2019. Il progetto è coordinato dal Prof. Alberto Pardossi dell’Università di Pisa (UNIPi), che partecipa al progetto con due dipartimenti: il Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali (DiSAAA), al quale appartiene il Prof. Pardossi, e il Dipartimento di Scienze Veterinarie (DiSVe), al quale appartengono il Prof. Carlo Bibbiani e il Dott. Baldassare Fronte. Il team dell’Università di Pisa DiSAAA comprende anche il Prof. Luca Incrocci, e le Dott.sse Adriana Ciurli, Giulia Carmassi, Rita Maggini, Martina Puccinelli, Chiara Sangiacomo e Elisa Meregà.

Fanno parte del progetto SIMTAP altri sette partner italiani o stranieri: Università di Bologna, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Bologna (Italia) (UNIBO; team leader: Prof. Daniele Torreggiani); Università di Milano, Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali, Milano (UNIMI; team leader: Dott. Jacopo Bacenetti); INRAE-Agrocampus, SAS Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, Rennes (Francia) (INRAE; team leader: Dott. Joel Aubin); Lycée de la Mer et du Littoral, Bourcefranc le Chapus (Francia) (LML; team leader: Dott. Vincent Gayet); Mediterranean Fisheries Research Production and Training Institute, Antalya (Turchia) (MEDFRI; team leader: Dott. Mehmet Ali Turan Koçer); Ministry for Agriculture, Fisheries and Animal Rights, Agriculture Directorate Marsa (Malta) (MAFA; team leader: Marcelle Agius); Korolev GmbH, Bonn (Germany) (KOROLEV; team leader: Dott. Rainer Linke). Il progetto ha ottenuto un finanziamento di circa 953 mila euro, con circa 280 mila euro destinati all’Università di Pisa.

L’idea progettuale

Il progetto SIMTAP ha come oggetto di studio una catena multi-trofica a ciclo chiuso in acqua salmastra per la produzione di pesci di mare (orate e spigole) e piante destinate al consumo fresco o alla trasformazione industriale (estrazione di principi attivi di interesse nutrizionale o medicinale). Il pesce è alimentato con alghe, vermi e molluschi (o altri organismi detritivori/filtratori), in sostituzione parziale o totale dei tradizionali mangimi a base di olio e farina di pesce. Il sistema SIMTAP è costituito fondamentalmente da un impianto acquaponico, cioè integra un impianto di acquacoltura con una coltura idroponica di piante in grado di crescere e svilupparsi ai livelli di salinità vicini a quelli dell’acqua di mare. L’acquaponica è una tecnica che consente di accrescere organismi acquatici (in genere pesci) e piante in modo simbiotico in un impianto dove l’acqua proveniente dalle vasche dei pesci (alimentati con specifici mangimi) fornisce, grazie alla flora microbica, gli elementi nutritivi necessari alle piante che, dal canto loro, depurano l’acqua a vantaggio dei pesci. La principale trasformazione microbica che si verifica nel sistema è quella riguardante l’ammoniaca prodotta dai pesci e per questi ultimi molto tossica, che viene trasformata in nitrato ad opera dei batteri nitrificanti. Il nitrato è poi assorbito insieme ad altri elementi (es. fosforo, potassio ecc.) dalle piante.

Il concetto che sta alla base del sistema SIMTAP è la separazione di ciascun compartimento trofico e l’utilizzazione dei reflui e degli effluenti, provenienti da uno o più compartimenti, come fonte nutrizionale e di elementi base del ciclo vitale. Il sistema SIMTAP deve essere in grado di allevare

produttori primari (alghe, i.e. fitoplancton), piante (specie alofite o glicofite alo-tolleranti), organismi decompositori filtratori e/o detritivori (es. mitili, vermi marini, crostacei, ecc.) e pesci (es. branzini, spigole, cefali) in unità interconnesse in un sistema chiuso (**Figure 1 e 2**). L'acqua dell'impianto SIMTAP circola continuamente tra le varie sezioni dello stesso, secondo una specifica sequenza: l'acqua in uscita dalle vasche di allevamento dei pesci viene depurata dagli organismi detritivori/filtratori, per poi passare al biofiltro, dove i batteri nitrificanti convertono l'ammonio in nitrato. Segue la sezione dedicata alla coltivazione della macroalghe (*Ulva rigida*) e delle piante alofite. A questo punto, l'acqua viene reintrodotta nelle vasche dei pesci. Nel SIMTAP, i reflui e le produzioni provenienti da un livello del sistema di coltivazione multi-trofico vengono riciclati ed utilizzati, diventando gli input (ad esempio, fertilizzanti, mangimi) per un altro livello, sostituendo così l'attuale mangime per pesci con ingredienti alternativi come alghe, vermi policheti o altri filtratori e/o detritivori. Infatti, i detritivori ed i filtratori rappresentano una fonte di proteine adatta e rinnovabile e di acidi grassi polinsaturi (PUFA) alternativi alla farina di pesce e agli oli di pesce.

Nel SIMTAP, gli input sono i fertilizzanti (somministrati alle colture algali direttamente o indirettamente, cioè attraverso la biomassa algale prodotta nei fotobioreattori), la luce, l'acqua e l'energia per il funzionamento degli impianti. La luce è necessaria per la crescita delle alghe tramite la fotosintesi e i nutrienti, in particolare azoto (N) e fosforo (P), sono essenziali per la crescita delle piante. L'acqua è necessaria per la fotosintesi e per il bilancio di massa del sistema (evapotraspirazione, biomassa degli organismi).

L'obiettivo del progetto SIMTAP è valutare fino a che punto un'alimentazione integrata con alghe unicellulari (microalghe), filtratori e/o detritivori può sostituire la alimentazione classica, costituita da mangimi prodotti in stabilimento, che ha notevoli impatti ambientali dovuti al sovrasfruttamento delle risorse ittiche mondiali e alla coltivazione estensiva di cereali e legumi.

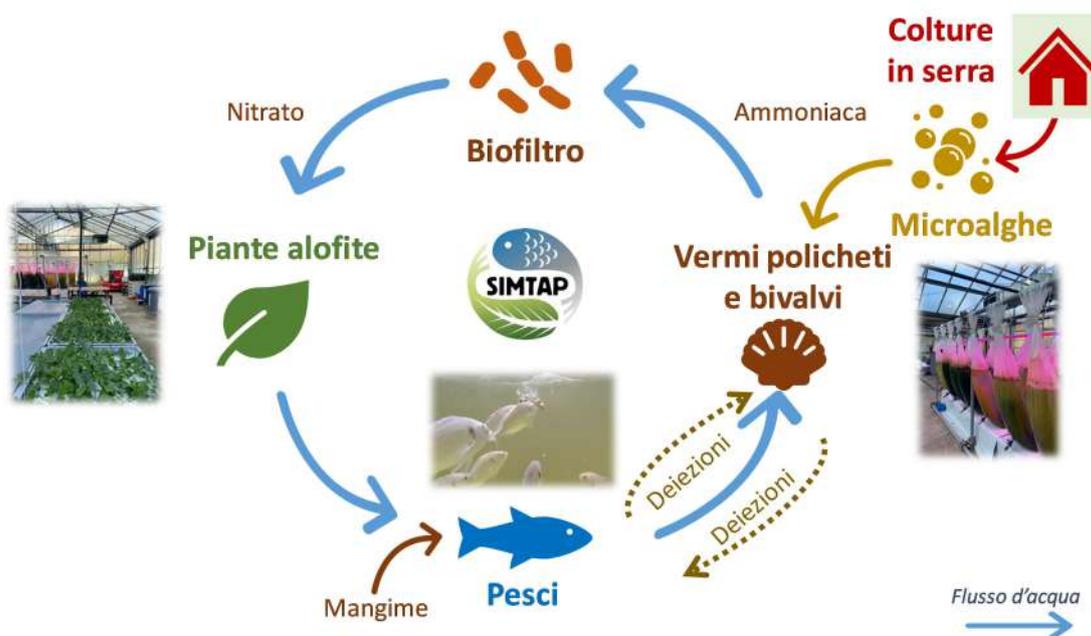


Fig. 1. Il sistema SIMTAP.

Progetto SIMTAP



Fig. 2. Alcune immagini dell'impianto SIMTAP costruito a Pisa. Dall'alto in basso e da sinistra a destra: la sezione per l'allevamento dei pesci; la sezione per gli organismi filtratori/detritivori; la sezione per le macroalghe e le alofite.

Di seguito si riportano i principali risultati di una serie di esperimenti condotti tra marzo 2021 e maggio 2022. Nel 2021, l'impianto è stato riempito con acqua di mare diluita (25 g/L invece di 35-40 g/L) preparata sciogliendo nell'acqua potabile l'Instant Ocean, un sale marino sintetico largamente utilizzato nel settore degli acquari. Nel 2022 la salinità è stata abbassata a 10 g L⁻¹, un livello che consentirebbe di coltivare molte più specie vegetali. Nel 2022, infatti, sono stati condotti degli studi sul basilico, una pianta glicofita abbastanza resistente alla salinità ma ha fatto registrare produzioni interessanti (i dati sono ancora in fase di elaborazione)

Esperimenti sui pesci (2021-2022)

Nel corso del 2021 sono state effettuate alcune prove di alimentazione di orate (*Sparus aurata*) allo scopo di studiare, in confronto con un mangime commerciale, gli effetti sulla crescita e alcune caratteristiche qualitative dei pesci di una dieta a base di organismi (cozze, vongole e policheti) potenzialmente producibili all'interno del sistema SIMTAP e utilizzati freschi, cioè senza ulteriori trattamenti. Dal momento che non è stato possibile ottenere un'adeguata produzione di molluschi e policheti all'interno del prototipo SIMTAP, sono stati utilizzati ingredienti surgelati. Le cozze (*Mytilus platensis*) e le vongole (*Chamelea gallina* e *Paphia textile*) congelate sono state gentilmente fornite dalla azienda Arbi Dario S.p.A. (Monsummano Terme, Italia), nell'ambito di un accordo tra Blue Resolution® e il DiSAAA, mentre i policheti congelati sono stati acquistati da TopsyBaits (Paesi Bassi). I mangimi commerciali sono stati forniti da "Inve Aquaculture Inc." (Belgio) e da VRM Srl (Italia), che ha fornito anche una premiscela di sali minerali. Lo stesso approccio sperimentale è stato seguito negli esperimenti condotti nel 2022 con esemplari di spigola (*Dicentrarchus labrax*). Le analisi chimiche sui campioni di orate raccolti nel 2021 al raggiungimento della taglia commerciale (>300 g) e gli esperimenti sulle spigole sono ancora in corso.

Negli esperimenti con le orate, 1255 giovani (circa 6 g di peso corporeo) forniti da un'azienda di acquacoltura toscana ("Il Vigneto - soc. agricola a r.l.", Orbetello, Italia) sono stati introdotti nel marzo 2021 nelle vasche del SIMTAP. I pesci sono stati allevati fino al raggiungimento della taglia commerciale (circa 350 g) verso la fine di dicembre 2021 dopo circa 9 mesi dalla loro introduzione nell'impianto. Gli esperimenti sono stati condotti con una salinità dell'acqua di 25 g L⁻¹.

Nella **Figura 3** è mostrata la crescita delle orate nel 2021. Dopo la prima prova (fino a circa 23 g di peso corporeo) i pesci alimentati con un misto di cozze e vongole (50 % su base di sostanza secca di entrambi gli ingredienti) hanno raggiunto un peso inferiore rispetto ai pesci alimentati con dieta commerciale (-12%). Durante la seconda prova, i pesci sono stati nutriti con una miscela di cozze, vongole e policheti (50, 30 e 20 % rispettivamente su una base di sostanza secca, vedi Figura 2) a partire da 37 g di peso corporeo medio. Alla fine della seconda prova, i pesci alimentati con mangimi commerciali hanno raggiunto circa 125 g mentre il peso dei pesci alimentati con la dieta mista era di circa 115 g (-8%). Successivamente, pesci del peso medio di circa 250 g sono stati portati fino alla dimensione commerciale (circa 350 g). La dieta sperimentale era composta da cozze, vongole, policheti e una premiscela minerale (rispettivamente 49, 30, 20 e 1 % su base di sostanza secca). Alla fine dell'esperimento, i pesci alimentati con la miscela di ingredienti freschi hanno mostrato un maggior accrescimento rispetto ai pesci alimentati con i mangimi commerciale, recuperando lo svantaggio accumulato precedentemente e raggiungendo un peso quasi identico.

Nella **Figura 4** sono riportati due individui di orata campionati alla fine della prima prova e al raggiungimento della taglia commerciale.

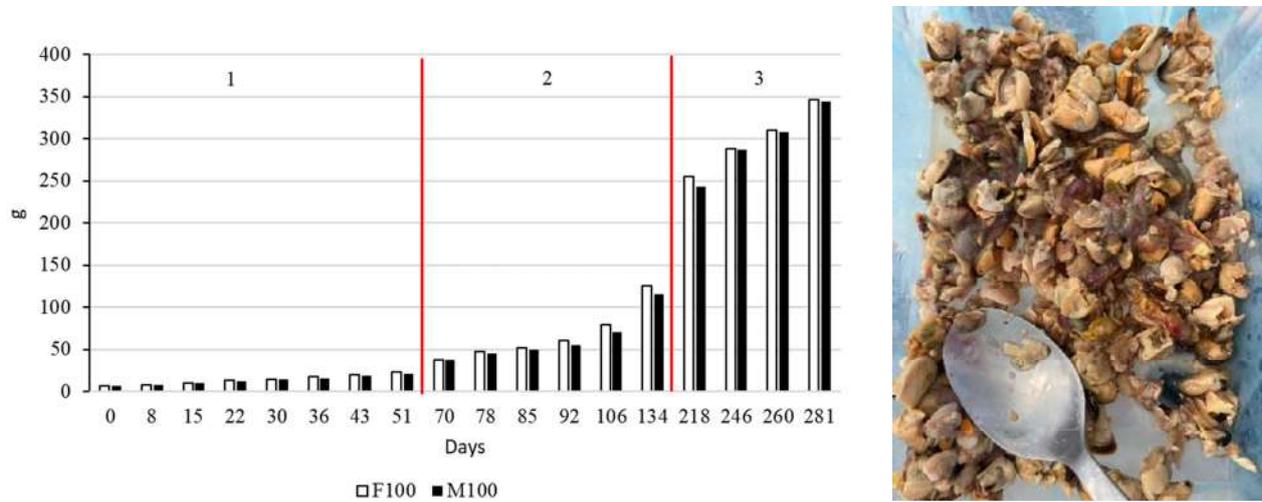


Figura 3. Peso corporeo medio individuale dell'orata nei tre esperimenti condotti nell'impianto SIMTAP (a sinistra). F100 rappresenta l'alimentazione dei pesci con mangimi commerciali mentre M100 rappresenta la dieta a base di cozze, vongole, policheti (a destra).

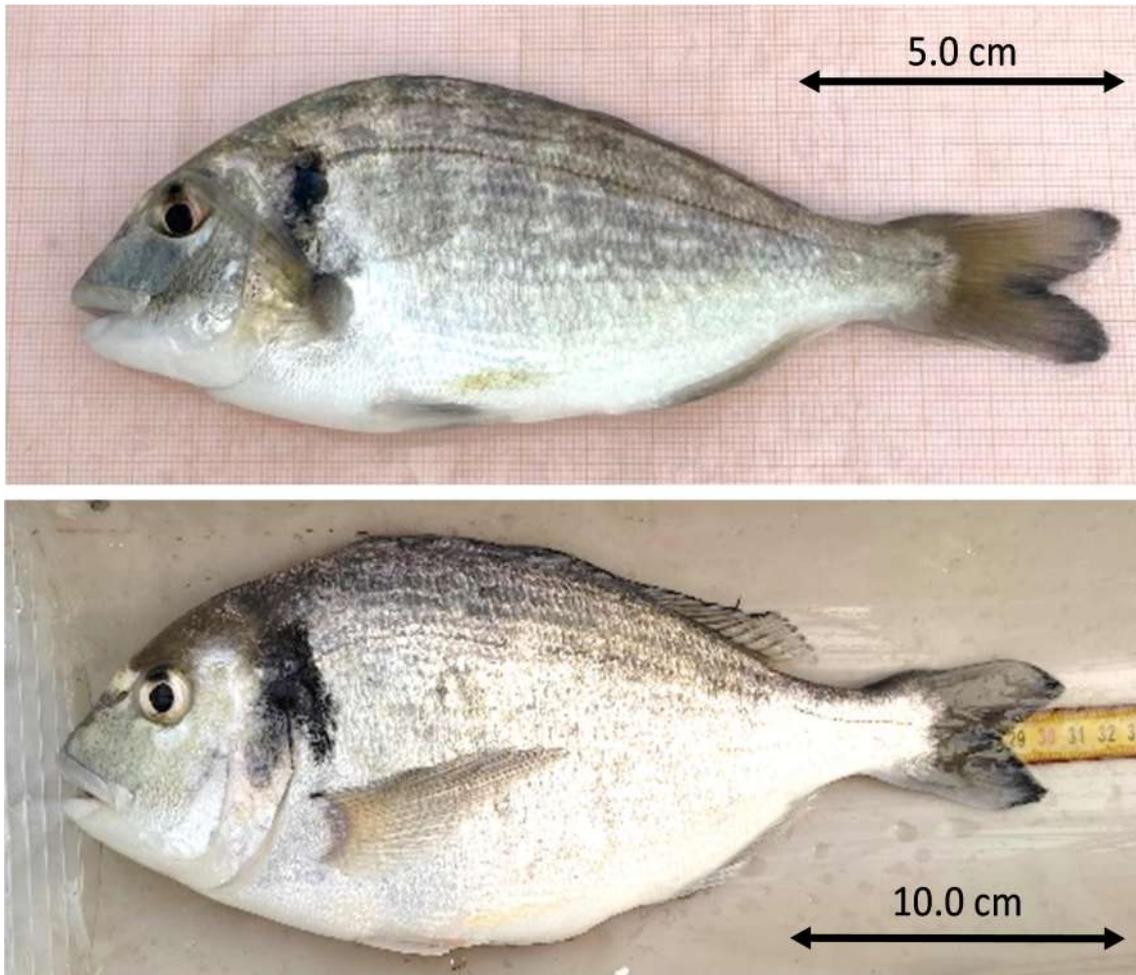


Figura 4. Orata durante la fase di accrescimento (in alto) e alla taglia commerciale (in basso).

Nel 2022 sono stati acquistati dalla stessa azienda di Orbetello che aveva fornito le orate 1251 giovanili di spigola (peso medio 5.9 g). I pesci sono stati acclimatati alla bassa salinità abbassando gradualmente la concentrazione di IO di circa 0.4 g/L al giorno, passando dai 25 g/L iniziali a 10 g/L finali in 42 giorni. Al termine dell'acclimatamento, è stata registrata una mortalità inferiore al 4%. In un esperimento condotto nella primavera 2022 è stata testata la medesima dieta impiegata con le orate alla taglia commerciale. Dopo circa un mese, i pesci alimentati con la miscela di ingredienti freschi hanno mostrato una riduzione della crescita dell'11% rispetto al controllo (mangime commerciale). In una seconda fase dell'esperimento è stato aggiunto un 4% di sale marino alla dieta con l'obiettivo di cercare di compensare la maggiore spesa energetica dei pesci costretti ad una più intensa attività di osmoregolazione a causa della bassa salinità. L'aggiunta del sale ha consentito un certo incremento nel tasso di crescita dei pesci, anche se il peso finale è rimasto inferiore rispetto al trattamento di controllo (34 g vs 37 g; -8%).

In tutti gli esperimenti condotti nei due anni, i pesci alimentati con ingredienti freschi misti hanno mostrato una minore incidenza delle viscere sul peso corporeo totale rispetto ai pesci alimentati con mangimi commerciali. Nell'esperimento sui pesci allevati fino alla taglia commerciale anche l'incidenza del fegato sul peso corporeo totale era inferiore.

In conclusione, la dieta costituita da ingredienti freschi consente risultati migliori rispetto ai mangimi commerciali nella fase di aumento di peso per il raggiungimento delle taglie di mercato, anche se nei giovani è stata osservata una leggera riduzione della crescita sia nelle orate che nelle

spigole. Le due diete poste a confronto erano isoenergetiche ma con un maggior rapporto 'proteine:lipidi' nella dieta a base di ingredienti freschi rispetto al mangime commerciale. La maggior frazione proteica ha stimolato maggiormente l'aumento di peso piuttosto che la deposizione di grasso, come dimostrato dalla minore incidenza di visceri. Inoltre, l'aggiunta della premiscela minerale ha fornito i micronutrienti necessari all'accrescimento e ha permesso di ridurre la perdita di crescita osservata negli esperimenti con gli individui giovanili.

Esperimenti sulle alghe (2021-2022)

I fotobioreattori dell'impianto SIMTAP (**Figure 1 e 2**) hanno un triplice scopo: 1) produrre biomassa algale come nutrimento per gli organismi detritivori e filtratori (policheti, bivalvi) presenti nell'impianto; 2) reintegrare le perdite di acqua dell'impianto acquaponico (evapotraspirazione); 3) depurare le acque reflue di colture idroponiche in serra (run-off) che sono anche ricche di degli elementi necessari alla crescita delle microalghe. Come le piante terrestri, infatti, le microalghe richiedono elementi minerali e in particolare azoto (N) e fosforo (P), che d'altra parte sono i maggiori responsabili dell'azione inquinante delle acque di runoff. Le microalghe sono quindi organismi ideali per il trattamento di una vasta gamma di acqua inquinate, comprese quelle originate da processi di produzione agricole e zootecnica. La letteratura scientifica riporta numerosi lavori sulla fitodepurazione di acque inquinate con diverse specie di microalghe. In alcuni di questi lavori, si utilizzano oltre alle 'vere' acque reflue (eventualmente diluite), effluenti artificiali o ricostruiti come mezzo di crescita delle alghe in modo da identificare le eventuali cause di effetti negativi dei reflui sulla crescita e sulle caratteristiche biochimiche delle alghe.

I fotobioreattori a basso costo (*big bag*) usati per gli esperimenti sono quelli mostrati nella Figura X. Sono costituiti da sacchi tubolari di polietilene, ripiegati a V, con volume di circa 100 litri e un diametro di 50 cm. La sospensione algale è continuamente arieggiata grazie a dei diffusori (pietre porose) collegati ad una soffiante; l'areazione serve anche mantenere le microalghe in sospensione, perché tenderebbero a sedimentare per gravità.

Per gli esperimenti condotti in laboratorio e/o nei *big bag* sono stati utilizzati tre ceppi algali raccolti nel 2019 in zone lacustri dove confluiscono acque contaminate provenienti da aree agricole e denominati SEC_LI_Ch11, IDRO e NATIVE. I primi due sono stati caratterizzati molecularmente: il primo appartiene al clade *Chlorella*-*Micractinium* mentre il secondo è tassonomicamente correlato a *Chlorella sorokiniana*. La caratterizzazione molecolare del terzo ceppo è ancora in corso.

Il ceppo SEC_LI_Ch11 è stato coltivato su acque scaricate da impianti di coltivazione fuori suolo di pomodoro in serra, che sono state utilizzate senza alcun trattamento, tranne una semplice filtrazione per togliere i solidi sospesi e la correzione del pH. Sono stati svolti tre esperimenti in autunno (ottobre-dicembre 2021), inverno (gennaio-febbraio 2022) e primavera-estate (giugno-luglio 2022) mettendo a confronto tre tipi di mezzo di crescita (**Figura 5**): mezzo standard di controllo preparato con sali da laboratorio (TAP modificato, usato generalmente in colture di laboratorio), l'acqua reflua della coltura idroponica di pomodoro (RO) e una soluzione nutritiva preparata con acqua potabile e sali fertilizzanti idrosolubili, la cui composizione minerale era pressoché identica all'acqua reflua (RRO). Nel primo esperimento la biomassa raccolta due settimane dopo l'inizio della coltura è stata mediamente 0,30 g/L, senza differenze significative tra i tre mezzi di crescita.

Nel secondo esperimento, la crescita algale è stata molto lenta a causa delle basse temperature in serra e la biomassa raccolta dopo nove settimane dall'inizio della coltura è stata di 0,60, 0,30 e 0,40 g/L, rispettivamente, nel controllo, nel RO e nel RRO.

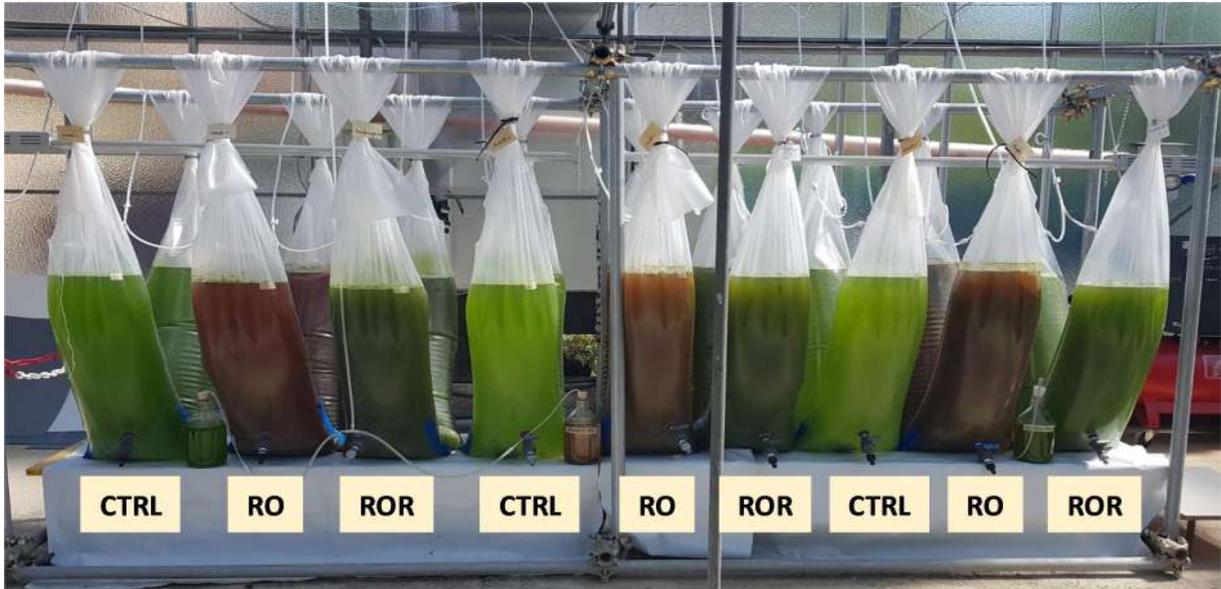


Figura 5. Fotobioreattori a basso costo (*big bag*) utilizzati per le colture di microalghe (ceppo SEC_LI_Ch11) associate all'impianto acquaponico SIMTAP. I fotobioreattori contengono un mezzo nutritivo di controllo (CTRL, mezzo TAP), una soluzione nutritiva scaricata da un impianto di coltivazione di pomodoro su substrato (RO) o una soluzione nutritiva preparata con acqua potabile e con la stessa composizione minerale di RO.

Esperimenti sulle macroalghe (2021)

Le alghe del genere *Ulva*, appartengono alla classe delle *Ulvophyceae*, e sono comunemente note con il nome di lattughe di mare (**Figura 6**). Sono consumate in tutto il mondo, riconosciute per la loro presenza cosmopolita e la capacità di vivere in diverse condizioni climatiche ed ecologiche. La loro rilevanza economica risiede nel fatto che sono fonti di nutrienti essenziali per il nostro organismo, quali proteine, fibre e minerali. L'ulva è inoltre ricca di polisaccaridi con numerose proprietà funzionali; il principale polisaccaride solubile in acqua è l'ulvano, contenuto nella parete cellulare.

Nel sistema SIMTAP le macroalghe, che sono organismi notoriamente nitrofilo, svolgono lo stesso ruolo delle piante alofite, cioè assorbono le forme inorganiche dell'azoto che sono tossiche per i pesci.



Figura 6: *Ulva rigida* al momento della raccolta nella laguna di Orbetello (sinistra) o prelevata dall'impianto SIMTAP (destra).

Nella seconda metà del 2021 sono state monitorate la crescita e la composizione contenuto minerale della macroalga *Ulva rigida* (*Ulva*), che agli inizi di giugno era stata prelevata dalla laguna di Orbetello e posta in sei vasche come quelle utilizzate per la coltivazione delle alofite. La biomassa algale è stata raccolta periodicamente, indicativamente ogni mese. Della biomassa complessiva raccolta in ogni vasca, circa 0,80 kg venivano stati reintrodotti nella vasca corrispondente mentre il resto è stato analizzato in laboratorio per determinare il contenuto di azoto e di altri elementi nutritivi. Dai rilievi effettuati è emerso che, nel mese di giugno, la *Ulva* ha raggiunto una biomassa di 1.9 kg/m³ dopo solo 15 giorni di crescita nell'impianto acquaponico. Nei mesi successivi, l'aumento della biomassa è calato progressivamente, raggiungendo il suo minimo in ottobre (0.9 kg/m²).

Su alcuni campioni di *Ulva* inviati al laboratorio della Prof.ssa Anna Maria Raspolti (Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, Università di Pisa) è stato determinato il contenuto di ulvano, che è stato di circa il 27% (in peso), pari a circa l'80% del contenuto totale di zuccheri.

Esperimenti sulle piante alofite (2020 - 2021)

Dopo alcuni esperimenti preliminari condotti nel 2020, nel 2021 gli studi si sono concentrati su tre specie: *Beta vulgaris* var. *cicla*, *Beta vulgaris* ssp. *maritima* (L.) e *Salicornia europaea* L., La prima specie è una glicofita molto tollerante alla salinità mentre le altre due sono specie alofite.

Gli esperimenti sono stati condotti in serra nel periodo febbraio-luglio 2021 coltivando le piante su pannelli galleggianti posti in alcune vasche del prototipo SIMTAP prima descritto (sistema acquaponico accoppiato) oppure in vasche separate usando l'acqua di scarico dell'impianto acquaponico come soluzione nutritiva (acquaponica disaccoppiata) (**Figura 7**). La specie ittica allevata nell'impianto acquaponico era l'orata (*Sparus aurata* L.).

In alcuni esperimenti, le piante coltivate nell'impianto acquaponico o con i suoi effluenti (tal quali o diluiti con acqua potabile per abbassarne la salinità) sono state poste a confronto con altre coltivate in idroponica con soluzioni nutritive standard (o soluzione di controllo) o con una composizione di elementi minerali pressoché identica a quella dell'effluente acquaponico, per verificare gli eventuali effetti sulla crescita delle piante legati alla presenza di composti organici originati dal metabolismo

dei pesci. Nel caso della salicornia, la soluzione di controllo aveva una salinità di 15 g/L di IO, poiché per questa specie è necessario salinizzare la soluzione nutritiva per stimolare la crescita e soprattutto per ottenere steli succulenti e di un colore verde brillante.

Le determinazioni effettuate sui campioni di piante raccolte alla fine di ogni esperimento hanno riguardato la crescita (produzione di biomassa fresca e secca), il contenuto minerale e alcune caratteristiche qualitative, come ad esempio il contenuto di nitrati (composti potenzialmente tossici per la salute umana per i quali uno specifico regolamento europeo (no. 1169/2011), ha stabilito dei limiti massimi per alcune colture come lattuga (4000 mg/kg peso fresco), spinacio (3500 mg/kg) e rucola (7000 mg/kg) e di sodio, e la capacità antiossidante, che in genere dipende dal contenuto di metaboliti secondari come pigmenti, flavonoidi, fenoli ecc.). Nella **Tabella 1** sono riportati i risultati più importanti ottenuti nei vari esperimenti, che sono riassunti di seguito:

- In acquaponica le produzioni di foglie di bietole o steli freschi di salicornia oscillano tra 1,53 e 6,80 kg m⁻²;
- La riduzione della crescita delle piante in acquaponica rispetto a quelle coltivate in idroponica con soluzioni standard è causata nelle bietole dalla maggiore salinità e la composizione minerale non ideale (soprattutto a causa di un ridotto contenuto di microelementi come il ferro). Nella salicornia, la minore crescita è imputabile solo alla seconda causa.
- Le bietole accumulano grandi quantità di nitrati a causa anche della bassa intensità luminosa tipica della stagione invernale
- A causa dell'elevata concentrazione di sodio nella acqua ricircolante o scaricata dall'impianto acquaponica, questo elemento si accumula moltissimo nelle bietole e nella salicornia, ma assumendo una ragionevole quantità di foglie o steli assunti giornalmente (100 g/persona) in nessun esperimento le produzioni presentavano il rischio di un superamento del quantitativo giornaliero di assunzione del sodio (2 g nel caso di persone adulte).

In base ai risultati degli esperimenti condotti nel 2020 e nel 2021, si può concludere che la *S. europaea* è la pianta alofita che meglio si adatta alle condizioni tipiche dell'acquaponica marina. Questa specie è un prodotto molto interessante anche dal punto di vista commerciale, che ha già un mercato importante in alcune nazioni (Francia, Israele, Spagna) ed è sempre più presente anche nei nostri supermercati tra i prodotti orticoli freschi, a prezzi che arrivano anche a 9-10 €/kg. Il consumo di salicornia è promosso anche dalla cucina gourmet e dalle proprietà nutraceutiche, anche se il suo consumo presenta dei rischi legati all'elevato contenuto di sodio (si usa infatti anche come sostituto del sale da cucina), ossalati e nitrati.



Figura 7. Piante di bietola di mare (a sinistra) e di salicornia (a destra) coltivate nell'impianto SIMTAP nell'inverno del 2021.

Tabella 1. Produzione fresca, capacità antiossidante (indice FRAP) e contenuto di nitrato e di sodio di foglie di bietola e di salicornia coltivate in acquaponica o in idroponica con soluzioni costituite da acque di scarico dall'impianto acquaponico (acquaponica disaccoppiata).

Esperimenti in acquaponica (gennaio-aprile 2021)

Trattamento	Durata coltura	Foglie FW (produzione)	FRAP	Contenuto minerale		Assorbimento medio giornaliero	
				Nitrato	Sodio	Azoto	Fosforo
	giorni	kg m ⁻²	mmol kg ⁻¹ FW	mg kg ⁻¹ FW		g m ⁻² d ⁻¹	
Esperimenti #1-3 (gennaio - aprile 2021)							
<i>B. cicla</i>	75 (4 tagli)	2,11	8,41 C	2328	12348	0,126	0,009
<i>B. maritima</i>	61 (2 tagli)	1,53	10,60 B	2333	21001	0,128	0,010
<i>S. europea</i>	90 (1 taglio)	6,80	12,88 A	1492	17280	0,164	0,016
Esperimento #4 (Salicornia, maggio - luglio 2021)							
Acquaponica	72	2,70 B	11,92 B	ND	1997 A	9,87 A	0,098
Idroponica	(4 tagli)	7,57 A	14,51 A	ND	1698 A	7,80 B	0,220

Esperimenti in acquaponica disaccoppiata (ottobre 2021 – gennaio 2022)

Trattamento	Durata	Foglie FW	FRAP	Contenuto minerale	Assorbimento medio
-------------	--------	-----------	------	--------------------	--------------------

Progetto SIMTAP

	coltura	(produzione)		giornaliero			
				Nitrato	Sodio	Azoto	Fosforo
	giorni	kg m ⁻²	mmol kg ⁻¹ FW	mg kg ⁻¹ FW		g m ⁻² d ⁻¹	
Esperimento #5 (<i>B. maritima</i>, ottobre - novembre 2021)							
CTRL	29 (1 taglio)	4,63 A	8,41 C	1297 C	250 C	0,233 A	0,010 A
AQ50		2,20 B	10,60 B	1935 B	3280 B	0,170 B	0,008 B
AQ100		1,06 C	12,88 A	2831 A	8629 A	0,178 B	0,006 C
Esperimento #6 (<i>B. maritima</i>, novembre - dicembre 2021)							
CTRL	35 (1 taglio)	2,21 A	6,69 A	1968 B	1148 C	0,254 A	0,023 A
AQ50		1,43 B	7,72 A	3325 A	5523 B	0,176 B	0,013 B
AQ100		0,96 B	6,62 A	3437 A	10105 A	0,119 C	0,013 B
Esperimento #7 (<i>Salicornia</i>, ottobre 2021 – gennaio 2022)							
CTRL-12.5	67 (1 taglio)	1,87 A	4,95 C	892 A	717 C	0,040 A	0,011 A
CTRL-15		1,62 A	6,69 C	886 A	1062 A	0,040 A	0,010 A
AQ50		1,51A	7,48 C	310 B	605 C	0,032 A	0,010 A
AQ100		1,68 A	7,10 C	746 A	947 AB	0,037 A	0,010 A
SAQ50		1,49 A	7,86 C	810 A	992 AB	0,054 A	0,09 B
SAQ100		1,59 A	16,33 C	726 A	849 B	0,034 A	0,009 B

Pubblicazioni

- Puccinelli, M.; Carmassi, G.; Botrini, L.; Bindi, A.; Rossi, L.; Fierro-Sañudo, J.F.; Pardossi, A.; Incrocci, L. 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* **2022**, *8*, 638. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070638>.
- Puccinelli, M.; Fierro-Sañudo, J.F.; Bibbiani, C.; Fronte, B.; Maibam, C.; Dubois, T.; Pardossi, A.; Incrocci, L.; Rossi, L. Multi-Criteria DEXi Analysis for the Selection of Crop Species for Saltwater Aquaponics. *Horticulturae* **2022**, *8*, 703. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080703>. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080703>
- Rossi L., Bibbiani C., Fierro-Sañudo J.F., Maibam C., Incrocci L., Pardossi A., Fronte B. (2021). Selection of marine fish for integrated multi-trophic aquaponic production in the Mediterranean area using DEXi multi-criteria analysis. *Aquaculture* **535**, 736402. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.736402
- Rossi L., Bibbiani C., Pardossi A., Sangiacomo C., Fronte B., (2021). Commercial feed replacement for a sustainable and self-sufficient integrated marine aquaponic production. Book of Abstracts, **Aquaculture Europe 2021** (<https://aquaeas.org/Meeting/AE2021>) p. 451-452.
- Rossi L., Puccinelli M., Marchioni I., Incrocci L., Fronte B., Bibbiani C., Pardossi A. (2022). Aquaponics as a closed loop agricultural system. In “**Developing circular agricultural production systems**” (Chapter 14), Ed. Barbara Amon, Burleigh Dodds Science Publishing Ltd.