UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biotecnologie

ELABORATO DI LAUREA

INVESTIGAZIONE DEL POTENZIALE DELLA BIOMASSA DI MICROALGHE PER UN'ECONOMIA PIÙ SOSTENIBILE

Tutor: Prof. Giorgio Perin
Dipartimento di Biologia DiBio

Laureando: Davide Agosti

ANNO ACCADEMICO 2024/2025

INDICE

ABSTRACT.....1

1. INTRODUZIONE.....2
1.1 Microalghe.....2
1.2 Microalghe come mezzo per bioremediation.....3
1.3 Microalghe come fonte per la produzione di biopolimeri.....4
1.4 Specie oggetto di studio.....5
1.5 Obiettivo dello studio.....6

2. MATERIALI E METODI.....7
2.1 Microalghe come trattamento dei sottoprodotti dell'industria lattiero-casearia.....7
2.2 Microalghe come mezzo di depurazione delle acque reflue.....7
2.3 Microalghe come fonte di bioplastiche.....8

3. RISULTATI.....9
3.1 Microalghe per il trattamento degli scarti dell'industria lattiero-casearia.....10
3.2 Microalghe come trattamento delle acque reflue.....11
3.2.1 Rimozione dell'azoto.....12
3.2.2 Rimozione del fosforo.....13
3.2.3 Rimozione del carbonio.....13
3.3 Microalghe come fonte di bioplastiche.....13

4. DISCUSSIONE.....16

5. CONCLUSIONE.....18

6. BIBLIOGRAFIA.....19

ABSTRACT

Le microalghe sono organismi fotosintetici che possono essere sfruttati in diversi settori per uno sviluppo più sostenibile. La loro biomassa, o i prodotti da essa estratti, può essere utilizzata in vari ambiti, tra cui la produzione di biocarburanti, additivi alimentari e biofertilizzanti. Allo stesso tempo, le microalghe possono essere impiegate per assorbire CO_2 dall'ambiente e per il trattamento delle acque reflue, diminuendo quindi i danni ambientali. Questa tesi intende svolgere un'analisi critica sulla fattibilità dell'utilizzo delle microalghe nell'economia attuale, sulle possibili applicazioni, valutando gli utilizzi e le implicazioni sulla sostenibilità, focalizzandosi sulle specie *Nannochloropsis* e *Spirulina*

1.INTRODUZIONE

1.1. Microalghe

Le microalghe sono un gruppo di microrganismi eucariotici unicellulari in grado di assimilare CO_2 attraverso la fotosintesi che prosperano in diversi ambienti, dall'acqua marina all'acqua dolce. A livello globale vengono prodotte ogni anno circa 30.000 tonnellate di biomassa algale, con *Spirulina* e *Chlorella vulgaris* che ne costituiscono la quota principale (Vieira et al., 2025). Sono soggetto di crescente interesse da parte della comunità scientifica e del mondo industriale, per il loro potenziale come fonte di prodotti commerciali come biocarburanti o farmaci (Fig 1). Le microalghe sono importanti anche per la possibilità di uno sviluppo ecologico, i prodotti da loro ottenibili, come biopolimeri e biocarburanti hanno infatti un impatto ambientale minore rispetto alle alternative tradizionali. Possono inoltre essere utilizzate come strumento per la depurazione delle acque reflue e la biomassa generata da questo trattamento sfruttata per generare altri prodotti. Uno dei problemi più attuali è il cambiamento climatico. Lo sviluppo economico ed industriale ha portato al rilascio di grandi quantità di gas serra (GHG) e altri contaminanti nell'atmosfera. Se si dovesse continuare così la concentrazione di gas serra emessi dall'uomo aumenterebbe del 30% dal 2010 al 2100, questo potrebbe portare ad un innalzamento della temperatura globale media di 3°C (Walsh et al., 2015). A questo problema si somma la previsione di un aumento della popolazione globale fino ai 10 miliardi entro il 2050. Sommando questi effetti si rischia di avere ad un danno a livello della sicurezza alimentare e idrica globale. Per evitare o mitigare questo possibile scenario si pone a livello globale la sfida di trovare alternative più sostenibili alle attuali produzioni di energia, carburante, materiale e cibo. La biomassa proveniente da microalghe può essere una valida risorsa in questa sfida, in quanto può essere una fonte alternativa e sostenibile per essere trasformata in biocarburante, biopolimeri o essere utilizzata nell'industria farmaceutica ed alimentare. La fotosintesi delle microalghe può rappresentare un metodo economico ed efficiente per la rimozione di carbonio dall'ambiente. Alcune specie sono in grado di resistere ad alte concentrazioni di CO_2, caratteristica che le rende adatte ad essere coltivate in prossimità di impianti industriali. Sono inoltre in grado di rimuovere ed incorporare nutrienti come azoto e fosfato dalle acque reflue degli impianti, venendo così considerate un valido metodo di depurazione. La biomassa prodotta durante questo processo può essere poi riutilizzata come

prodotto a valore aggiunto, ad esempio per la produzione di biocarburante. Integrando il processo di trattamento delle acque reflue con la produzione di biocarburante si contribuisce alla realizzazione di un'economia circolare.

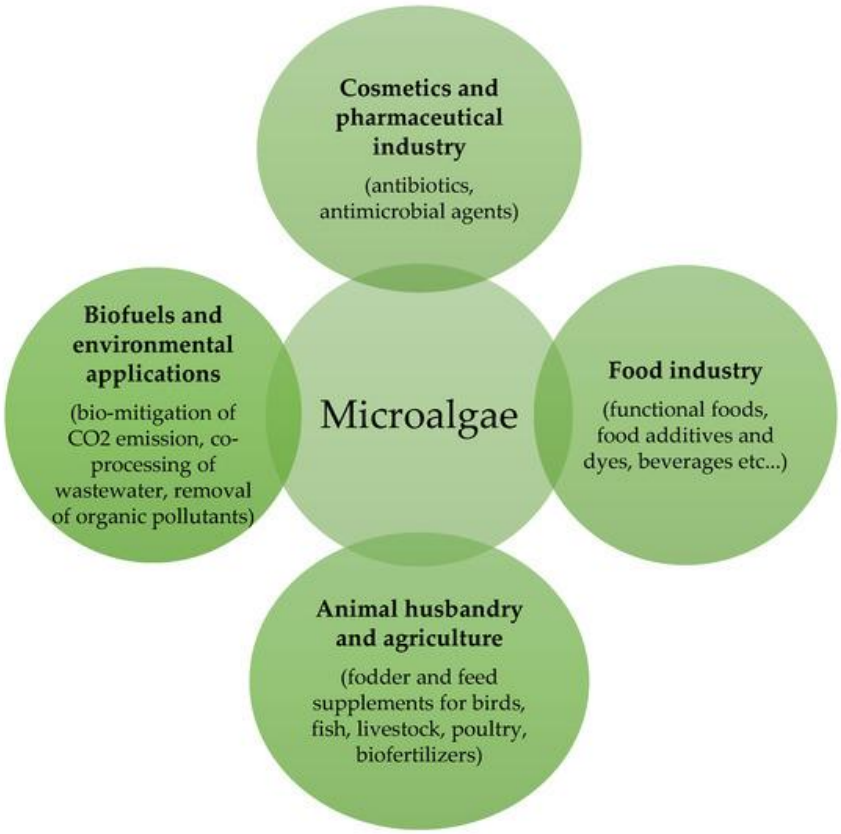

Figura 1: *Applicazioni delle microalghe* (Ferrazzano et al., 2020)

L'immagine presenta schematicamente i vari campi di applicazione delle microalghe

1.2. Microalghe come mezzo per bioremedation:

Nannochloropsis piò essere impiegata per la purificazione degli scarti dell'industria lattiero-casearia. Le acque reflue e il siero di latte prodotti sono inquinanti, in quanto contengono materia organica e prodotti chimici. Il loro trattamento richiede diversi passaggi per lo smaltimento, portando ad un grosso impatto ambientale. La presenza di nutrienti nel siero di latte lo rendono un ottimo substrato per la crescita delle microalghe, le quali possono rimuovere i contaminanti e produrre simultaneamente utile biomassa, rimuovere CO_2 dall'ambiente. La biomassa prodotta è inoltre ricca di acido eicosapentanoico (EPA), un acido grasso polinsaturo omega-3 (ω-3 PUFA), comunamente proveniente da olio di pesce. La produzione primaria di

EPA è attualmente l'olio di pesce ottenuto da pesci pescati in natura, di conseguenza produrlo a partire da biomassa algale allevierebbe il peso sugli ecosistemi marini.

Il trattamento delle acque reflue municipali può essere effettuato tramite separazione a membrana, detta osmosi inversa. L'acqua reflua viene fatta passare attraverso una membrana semipermeabile sottoposta a una pressione superiore a quella osmotica. La membrana trattiene quindi i contaminanti e la sostanza organica presente lasciando passare l'acqua. Questo trattamento è molto efficiente a livello di rimozione dei contaminanti, porta però alla formazione di concentrati da osmosi inversa (ROC: reverse osmosis concentrate) altamente inquinanti. Questi, infatti, presentano un alto contenuto di contaminanti come nutrienti (fosforo e azoto), sostanza organica e inorganica e sali. Il loro smaltimento risulta quindi complicato, il suo rilascio nell'ambiente causerebbe danni biologici, è quindi necessario trovare un modo per trattarlo. Una possibile soluzione a questo problema si può trovare nell'utilizzo di microalghe, in questo caso *Chlorella vulgaris* e *Nannochloropsis* salina, per il trattamento dei ROC. Queste riescono a crescere bene a contatto con i ROC e ad estrarne i contaminanti e la materia organica incorporandoli nella loro biomassa. In questo modo è quindi possibile combinare la depurazione dai contaminanti con la sintesi di utile biomassa successivamente valorizzabile, nell'intento di sviluppare un'economia circolare.

1.3. Microalghe come fonte per la produzione di biopolimeri

La plastica è uno dei materiali più utilizzati a livello globale e il suo consumo continua ad aumentare. Dal 1950 al 2022 la produzione globale di plastica è aumentata da 2 a 400Mt, con un aumento annuale medio dell'8,4% (Houssini et al., 2025). Non è un materiale biodegradabile e viene smaltita principalmente in discarica o attraverso l'incenerimento. Questi metodi, insieme alla plastica dispersa nell'ambiente, portano ad un grave danno ambientale. Una possibile alternativa all'utilizzo della plastica tradizionale si trova nell'impiego di biopolimeri derivanti dalle microalghe. Nello studio di Chalermthai et al (Charlemthai et al., 2023) viene eseguita un'analisi per valutare la possibilità di creare un impianto che vada a produrre *Spirulina* su larga scala simultaneamente come polvere alimentare e come bioplastica da imballaggi. L'obiettivo a livello produttivo è quello di ottenere un impianto che abbia una produzione che arrivi all'1% del fabbisogno mondiale di polvere alimentare e l'1% del fabbisogno nazionale (Thailandia) di

bioplastica per imballaggi

1.4. Specie oggetto di studio

Le specie oggetto di studio in questo lavoro di tesi sono:

Spirulina:

Spirulina (*Arthrospira* spp.) è un cianobatterio filamentoso fotosintetico, appartenente al genere *Arthrospira*. Le tre specie più utilizzate sono *Arthrospira platensis*, *Arthrospira maxima*, and *Arthrospira fusiformis*.

È comunemente utilizzata nell'industria alimentare, infatti può essere utilizzata direttamente come supplemento alimentare oppure si possono sfruttare elementi da essa derivati come i pigmenti. Può però essere utilizzata anche in altre applicazioni, come la produzione di bioplastiche. La *Spirulina* prodotta oggi viene considerata un superalimento, viene venduta come polvere, fiocchi o capsule e la sua commercializzazione è regolamentata nell'Unione Europea. Contiene alte quantità di proteine (fino al 60-70% in peso secco) con una porzione rilevante di amminoacidi essenziali, proteine importanti ad alto valore commerciale sono le ficocianine, alloficocianina e ficoeritrine, utilizzate in diversi tipi di industrie; contiene inoltre acidi grassi come PUFAs, EPA, DHA, palmitico e linoleico, vitamine del gruppo B come tiamina (B1), riboflavina (B2) e vitamina B12, minerali, carotenoidi utilizzabili come pigmenti naturali (Lafarga et al., 2020). Proprio per queste sue caratteristiche è la specie di microalghe più utilizzata arrivando a rappresentare più del 30% della biomassa algale prodotta a livello mondiale (Lafarga et al., 2020).

Nannochloropsis:

Nannochloropsis è un genere di microalghe tra le più studiate per la loro versatilità di utilizzo. Sono particolarmente apprezzate per il loro alto contenuto di lipidi, che possono raggiungere fino al 69% sul peso secco. Una delle applicazioni principali è quindi la produzione di lipidi, in particolare acidi grassi polinsaturi (PUFAs). Un esempio è l'acido eicosapentanoico (EPA), rappresentante un'alternativa sostenibile all'olio di pesce e utilizzato in mangimi e nutraceutica. Viene utilizzata in acquacoltura come alimento diretto o come integratore di mangimi. È inoltre utilizzata per le sue capacità di risanamento, dove la biomassa ottenuta può essere ulteriormente valorizzata. Infine, viene utilizzata nella produzione di carburanti grazie al suo elevato contenuto lipidico. È inoltre apprezzata per il suo relativamente

elevato tasso di crescita in diverse condizioni ambientali. Le specie di *Nannochloropsis* identificate finora sono *Nannochloropsis* australis, N. granulata, *N. limnetica*, *N. oceanica*, *N. oculata*, *N. gadinata* e *N. salina* (Paterson et al., 2023).

1.5. Obiettivo dello studio→ Valutare l'impiego delle microalghe all'interno di un'economia circolare, ad esempio nel trattamento delle acque reflue e per la produzione di biopolimeri. Il potenziale della biomassa algale come alternativa ad alcuni attuali processi industriali e come risorsa per l'industria alimentare sono ben riconosciuti. La principale difficoltà si ha nell'implementazione su scala industriale. Gli sforzi attuali della comunità scientifica devono quindi indirizzarsi verso la scalabilità di questi processi.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Microalghe come trattamento dei sottoprodotti dell'industria lattiero-casearia

L'esperimento di Li Et al ha previsto l'utilizzo di due ceppi di *Nannochloropsis*, *N.oceanica* e *N. limnetica*, per la purificazione dei sottoprodotti dell'industria lattiero-casearia, ovvero il siero di latte in polvere. Per la preparazione del mezzo di coltura il siero di latte in polvere è stato aggiunto ad acqua Milli-Q al 5% (w/v), mescolato e centrifugato per rimuovere le particelle insolubili. Si è ottenuto così un mezzo di coltura liquido, di questo un'aliquota è stata autoclavata mentre l'altra è rimasta non autoclavata, per valutare eventuali differenze nella crescita delle microalghe. *Nannochloropsis* ha inoltre la capacità di secernere l'enzima β-galattosidasi, enzima in grado di idrolizzare il lattosio. Questo elimina la necessità di trattamenti con prodotti chimici per convertire il lattosio. Sono state fatte 5 diverse colture cellulari, sia nel mezzo autoclavato che in quello non autoclavato è stato trasferito rispettivamente l'inoculo di *N. oceanica* e *N. limnetica*, inoltre una coltura con il solo mezzo autoclavato è stata considerata come riferimento.

2.2. Microalghe come mezzo di depurazione delle acque reflue

Nello studio di Mohseni et al vengono utilizzate per la purificazione dei ROC le microalghe *Chlorella vulgaris* e *Nannochloropsis* salina, la loro attività è stata testata come colture in sospensione e come cellule immobilizzate su alginato sia in modalità di crescita in batch che in semi-continua. La coltivazione in sospensione viene spesso utilizzata su larga scala; tuttavia, il recupero della biomassa risulta complicato, considerato la piccola dimensione cellulare (2–20 μm) e la bassa concentrazione (< 400 g m^{-3}) (Mohseni et al., 2020). Per facilitare il recupero della biomassa si possono utilizzare colture di cellule algali immobilizzate in sfere di alginato, questa metodologia permette una raccolta facile, efficiente e a basso costo. Nell'esperimento di mohseni et al si sono svolte diverse reazioni per valutare le differenze tra l'efficacia delle due specie di microalghe utilizzate nel rimuovere i contaminanti e il metodo di coltivazione, per valutare quale fornisse le condizioni ottimali di sviluppo. Sono state preparate due reazioni in sospensione, nelle quali un inoculo di cellule algali appartenenti alle due specie, entrambi prelevati da colture algali in fase esponenziale, è stato inserito direttamente nel mezzo ROC fino ad ottenere una concentrazione iniziale di 2×10^6 cellule mL^{-1}, la reazione è stata poi svolta sia in modalità

batch che in modalità semi-continua (Mohseni et al., 2020). Si sono poi preparate due reazioni con cellule immobilizzate in sfere di alginato: la coltura algale è stata aggiunta ad una reazione al 4% di sodio alginato, questa miscela è stata poi inserita in una soluzione al 2% di CaCl2 in agitazione, le sfere sono state stabilizzate mantenendole in agitazione per 30 minuti a 200 rpm, anche in questo caso la reazione è stata svolta sia in modalità batch che in modalità semi-continua (Mohseni et al., 2020). Come reazioni di controllo sono state considerate due reazioni, una contenente il solo ROC e una contenente ROC e sfere di alginato senza inclusione di alghe. Per le reazioni batch il ROC non è stato cambiato durante l'esperimento, mentre per le reazioni in semi-continua le microalghe venivano separate del mezzo di coltura e aggiunte a nuovo ROC ogni 48 ore (Mohseni et al., 2020).

2.3. Microalghe come fonte di bioplastiche

Il progetto messo a punto da Chalermthai et al prevede una valutazione tecnico-economica (Techno-Economic assessment TEA) per la realizzazione di un impianto destinato alla coltivazione e trattamento di *Spirulina*, ottenendo come prodotti finali polvere alimentare e bioplastica (Charlemthai et al., 2023). Per la TEA è stato utilizzato il software SuperPro designer versione 12 build 3 (Intelligen Inc., Scotch Plains, NJ, USA), un programma che permette la simulazione dell'impianto valutando dimensioni, materiali ed energia utilizzati e ottimizzando i processi di trattamento delle microalghe coinvolte. L'Analisi è stata perfezionata sulle condizioni ambientali della Thailandia ma i risultati sono da considerarsi estendibili a stati con condizioni climatiche simili. Per la coltivazione delle microalghe è stato considerato l'utilizzo di vasche all'aperto, in quanto queste risultano il metodo di coltivazione più semplice ed economico su grande scala. Dopo la coltivazione la biomassa algale viene raccolta e sottoposta a filtrazione tramite centrifuga, si procede poi con un lavaggio per rimuovere le impurità e successivamente si essicca la biomassa. Una volta essiccata la biomassa è stata macinata e venduta come polvere o ulteriormente processata per ottenere bioplastica. Per la produzione di bioplastica a partire da microalghe, in questo studio è stato adottato il metodo descritto da Zeller et al (Zeller et al., 2013), che prevede la plastificazione con glicerolo: il glicerolo viene miscelato con la *Spirulina* in rapporto 1:4 ad alte temperature. Successivamente per ottenere il prodotto finito è stato usato il processo di estrusione, una tecnica termoplastica consolidata e apprezzata soprattutto per la possibilità di ottenere diverse forme di bioplastica

3.RISULTATI

3.1. Microalghe per il trattamento di Scarti dell'industria lattiero-casearia

L'esperimento di Li et al voleva valutare la capacità di *N. limnetica* nella purificazione degli scarti dell'industria lattiero-casearia, ovvero siero di latte in polvere. *N.limnetica* è stata in grado di crescere sia nel mezzo di coltura, ovvero il siero di latte con aggiunta di acqua Milli-Q, autoclavato che in quello non autoclavato, senza necessità di correzioni di salinità o aggiunta di nutrienti (Li et al., 2024). La specie è stata molto efficiente a livello di purificazione dei contaminanti, riuscendo ad eliminare più dell'80% dell'azoto e fosfato presente nel mezzo in due giorni (Li et al., 2024). Nel mezzo di coltura è stata identificata la presenza di batteri, questi sono risultati essere derivati direttamente dal siero di latte o presenti insieme all'inoculo di microalghe. In entrambi i casi *Nannochloropsis* è stata in grado di stabilire interazioni stabili con i batteri presenti nel mezzo, risultando la popolazione dominante (dal 53 all'80% delle cellule totali) nelle colture, tuttavia, nel mezzo non autoclavato risultava meno dominante rispetto al mezzo autoclavato (Fig 2). Il trattamento con *N. limnetica* ha portato alla produzione di β-galattosidasi, secreta direttamente dalle microalghe come mezzo per scindere il lattosio. Questo enzima ha avuto un duplice ruolo nello studio: da un lato ha rimosso la necessità di ulteriori trattamenti con prodotti chimici per stimolare l'idrolisi di lattosio, inoltre la β-galattosidasi è utilizzabile come precursore di probiotici come i galatto-oligosaccaridi, utilizzabili in formule per l'infanzia. Sommando questi due effetti la produzione di β-galattosidasi ha un importante ruolo per rimuovere parte del costo del processo e come prodotto a valore aggiunto. L'alto contenuto di batteri iniziale ha avuto diversi effetti sullo sviluppo delle microalghe, promuovendo la sintesi di β-galattosidasi, riducendo però la velocità di crescita della biomassa a causa della competizione per i nutrienti.

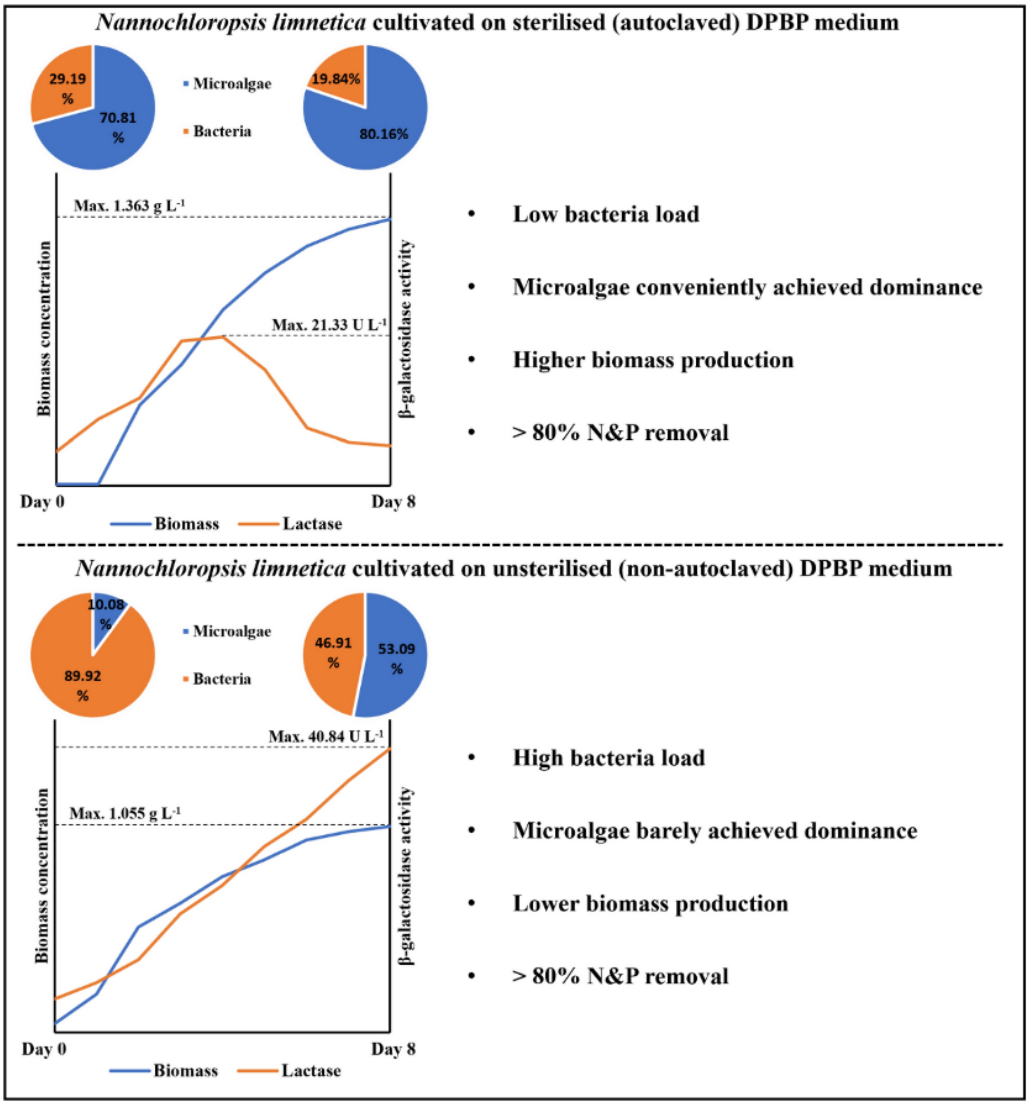

Figura 2*: Crescita algale in coltura batterica*

Nel grafico è rappresentata la concentrazione di biomassa algale nel tempo (linea blu) con evidenziata la concentrazione massima, e l'attività dell'enzima lattasi (linea arancione) nel tempo. Viene mostrata la differenza tra mezzo autoclavato (sopra) e non autoclavato (sotto) (Li et al., 2024).

3.2. Microalghe come trattamento delle acque reflue

L'esperimento di Mohseni et valuta la capacità di *N. salina* e *C. vulgaris* come mezzo per il trattamento delle acque reflue, in particolare i ROC ottenuti dal trattamento tramite osmosi inversa. Le due specie di microalghe sono state prese in esame per valutare la differenza tra un'alga d'acqua salata (*N. salina*) e una d'acqua dolce (*C. vulgaris*). Sono state utilizzate colture della durata di 10 giorni per permettere l'analisi nella fase esponenziale di crescita. Le microalghe sono state fatte crescere parallelamente in colture

con cellule in sospensione e altre con cellule immobilizzate in sfere di alginato. Oltre a questi due differenti metodi di crescita le modalità di crescita esaminate sono state batch e semi-continua. È stato osservato come le microalghe possano crescere rapidamente nelle acque reflue municipali portando a un'elevata efficacia di rimozione dei contaminanti, inoltre la biomassa generata può successivamente essere utilizzata come feedstock per la produzione di biocarburanti, fertilizzanti o altri prodotti per fare in modo che il costo del trattamento diminuisca grazie a questi nuovi prodotti, rendendo tutto il processo più sostenibile. I risultati hanno dimostrato la capacità di entrambe le specie di crescere in ROC sia in sospensione che immobilizzate. Le differenze tra i diversi metodi di crescita non sono risultate molto significative, con tassi di crescita simili tra le cellule immobilizzate e quelle in sospensione; tuttavia, una differenza è presente nei metodi di crescita, in quanto le cellule coltivate in modalità semi-continua risultano avere tassi di crescita maggiori rispetto alla crescita in batch. Per quanto riguarda la produzione di biomassa questa risulta significativamente maggiore in modalità semi-continua rispetto alla modalità batch, così come le cellule in sospensione rispetto a quelle immobilizzate in alginato. Inoltre *C. vulgaris* risulta produrre più biomassa rispetto a *N. salina*.

3.2.1. RIMOZIONE DELL'AZOTO

La rimozione di azoto da ROC è stata considerata sia come azoto totale (TN), sia come singoli componenti: nitrato (NO3-N), presente in maggior quantità (86% del totale), nitrito (NO2-N) 4%, ammoniaca (NH3-N) 6% ed è stata più rapida nei primi 6 giorni della fase di crescita esponenziale (Mohseni et al., 2020). La rimozione dei diversi contaminanti è stata molto efficace, la quantità di NO3-N è stata ridotta del 65-85%, quella di NO2-N del 85-98% e quella di NH3-N del 88-95%, in generale la quantità di azoto totale presente è stata ridotta a meno di 12 mg/L indipendentemente dal tipo di reazione eseguita (Fig 3). Inoltre non si sono viste differenze sostanziali nella capacità di rimozione dell'azoto tra le due specie coltivate.

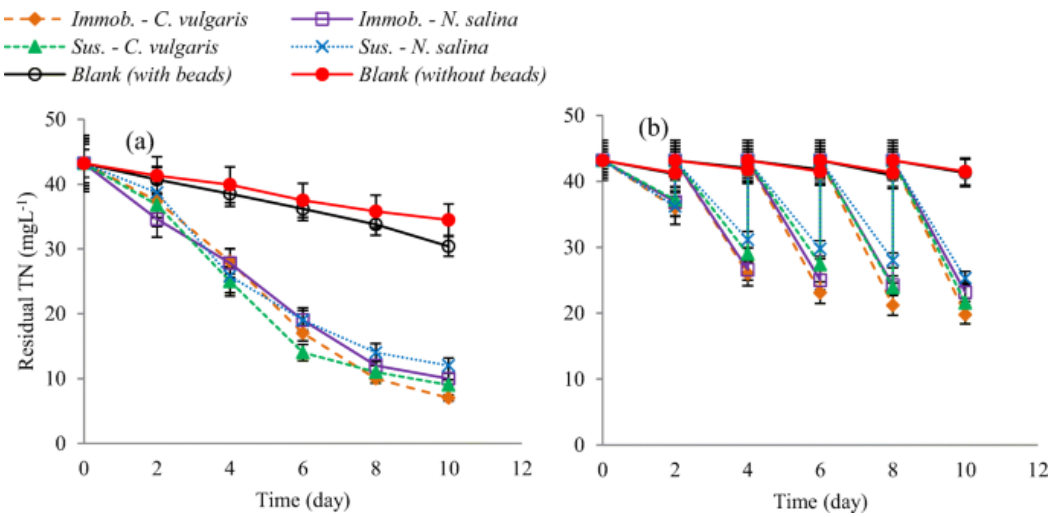

Figura 3: *Rimozione dell'azoto totale da parte di C. vulgaris e N. salina in modalità batch (a) e in semi-continua (b) in funzione del tempo (Mohseni et al., 2020)*

La crescita in modalità semi-continua è risultata avere un tasso di rimozione dell'azoto significativamente più elevato rispetto alla reazione in batch in entrambe le specie analizzate.

3.2.2. RIMOZIONE DEL FOSFORO

La rimozione del fosforo dalle colture è stata estremamente rapida ed efficace. La maggior parte del fosforo (>70%) è stata rimossa nelle prime 48 ore sia per *C. vulgaris* che per *N. salina*, con un livello di fosforo finale minore di 1.9 mg/L per tutte le colture (Fig 4). Inoltre non si sono osservate differenze significative tra cellule in sospensione e cellule immobilizzate.

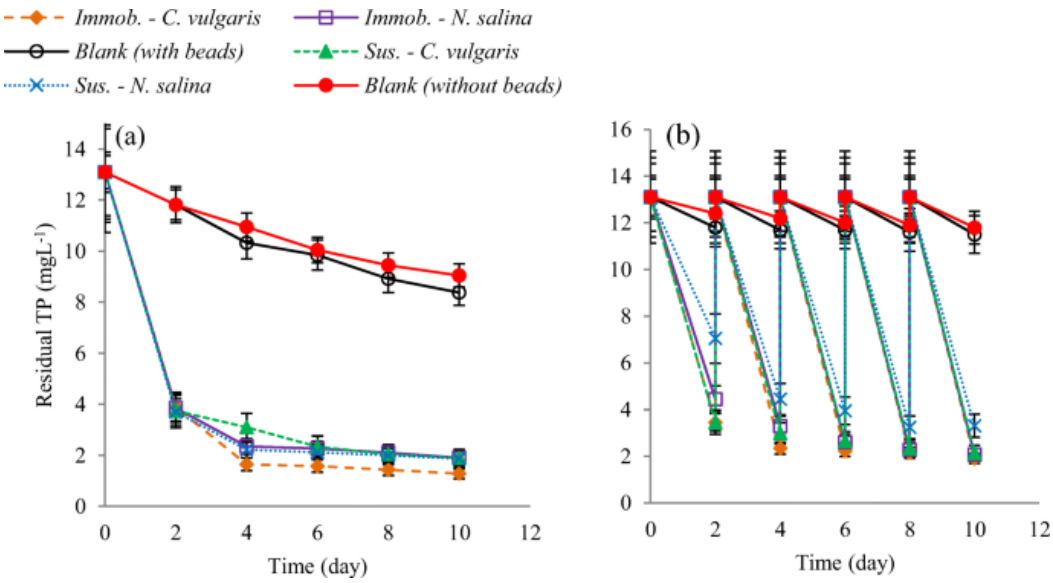

Figura 4: *Rimozione del fosforo in C. vulgaris e N. salina in modalità batch (a) e in semi-continua (b) in funzione del tempo (Mohseni et al., 2020)*

La modalità semi-continua è risultata più efficace per la rimozione del fosforo, con una media di più dell'80% del fosforo totale rimosso per ogni ciclo di crescita di due giorni. Una differenza è stata inoltre osservata nella rimozione abiotica, ovvero la perdita di nutrienti dovuta a meccanismi non biologici tra le due modalità. In batch questa è stata più significativa, con un contributo pari al 27-36% della rimozione totale, nella modalità semi-continua il tasso di rimozione abiotico ammontava invece a meno del 6% del totale (Mohseni et al., 2020). Questo va a dimostrare come la modalità di crescita in semi-continua riesca a sfruttare in maniera migliore i nutrienti in soluzione.

3.2.3. RIMOZIONE DEL CARBONIO

Sono state considerate due diverse forme di carbonio, ovvero il carbonio disciolto inorganico (DIC) e quello organico (DOC), entrambi assimilati come fonte di carbonio per la crescita delle microalghe in coltura. In batch la concentrazione del DIC è stata ridotta del 52-60% nei primi 4 giorni per entrambe le specie di microalghe, senza differenze tra le cellule in sospensione e quelle immobilizzate. In semi-continuo la rimozione di DIC è risultata maggiore rispetto alla batch, con una rimozione media di più del 50% ogni 48 ore. In batch, la rimozione di DOC è stata simile per le colture in sospensione e immobilizzate, con una rimozione media di più del 50% per *C. vulgaris* e più del 60% in *N. salina*. In semi-continua la rimozione di DOC è risultata maggiore del 60% per ogni ciclo svolto (Mohseni et al., 2020).

3.3 Microalghe come fonte di bioplastiche

Lo studio di Charlemthai et al va ad effettuare un'analisi tecno-economica per la realizzazione di un impianto per la produzione simultanea di bioplastica e polvere alimentare derivante da biomassa di *Spirulina*. Dal risultato della TEA per la produzione su larga scala di *Spirulina* come polvere alimentare e bioplastica le dimensioni dell'impianto simulato sono risultate di 22ha, in grado di ospitare 16 piscine per la crescita della *Spirulina* e gli altri macchinari coinvolti (Charlemthai et al., 2023). La produzione totale dell'impianto risulta essere di 1000MT/y come *Spirulina* in forma di polvere alimentare e 1200MT/y come bioplastica, produzioni sufficienti a soddisfare rispettivamente l'1% della domanda locale di polvere di *Spirulina* e globale di bioplastica (Charlemthai et al., 2023). La TEA svolta aveva come obiettivo valutare il possibile ritorno economico su un investimento in un impianto di produzione di grandi dimensioni. Dalle analisi il CAPEX è risultato 55,7 mln di $, mentre l'OPEX ammonta a 34,9mln $, investimenti elevati ma corretti

considerando la scala di produzione dell'impianto (Fig 5).

13

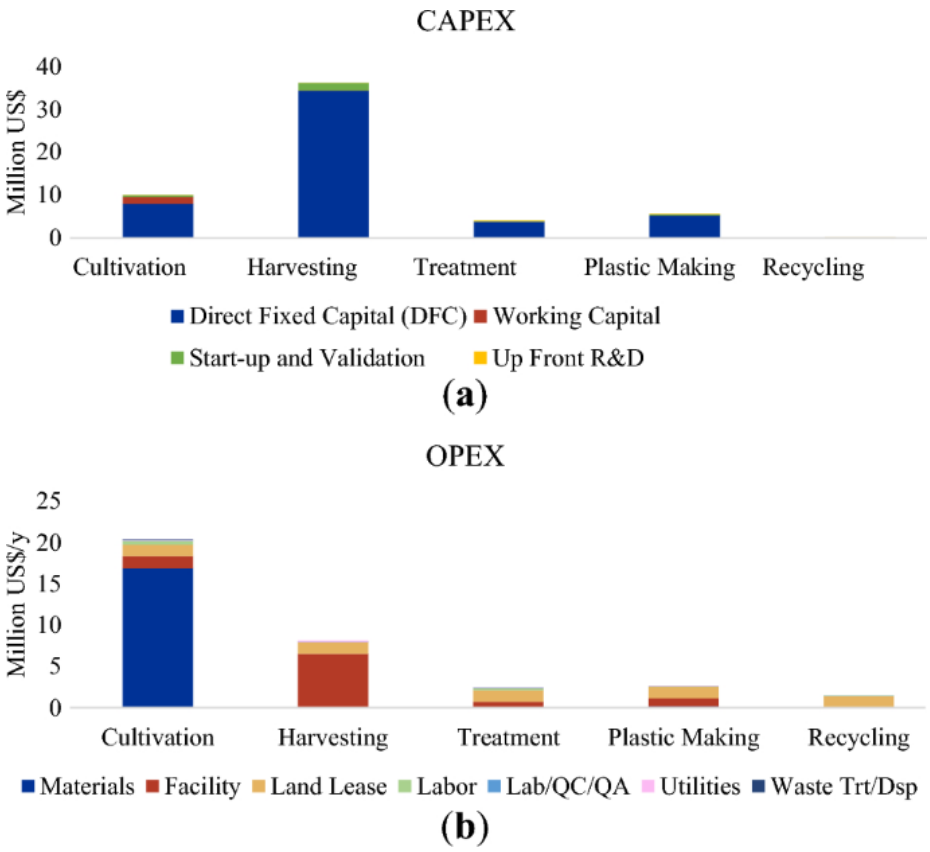

Fig 5 *Grafico raffigurante le varie spese componenti le spese operative (OPEX: Operative Expenditures) e gli investimenti di capitale iniziale (CAPEX: Capital Expenditures) ottenute dalla simulazione. (Charlemthai et al., 2023)*

Secondo la simulazione effettuata il guadagno annuale ottenibile dall'impianto è stato stimato a 55,6 mln US$/y. Di questi 43 mln US$ (74% del totale) ottenuti dalla vendita di bioplastica, mentre gli altri 14,3 mln US$ (26%) generati dalla vendita di *Spirulina* in polvere (Charlemthai et al., 2023). Per la *Spirulina* in polvere è stato considerato un prezzo di vendita di 15$/kg, basato su una media di 10-20$/kg online, più economica rispetto ai prezzi retail venduti in Thailandia pari a 90-95$/kg (Charlemthai et al., 2023). Per la bioplastica si è invece considerato un prezzo di vendita di 35$/kg, prezzo basso, considerato come riferimento il prezzo di vendita delle aziende Notpla e Evoware (30-250$/kg) (Charlemthai et al., 2023). Considerando investimenti e profitti ottenuti dalla simulazione il Payback Time è stato calcolato a 2.6 anni con un ritorno sull'investimento del 38,5% e un valore attuale netto al 2% di interessi di 125,8 mln US$ con rapporto costi-benefici

calcolato alla fine del progetto (10 anni) è di 1,37 (Charlemthai et al., 2023). A livello di impatto ambientale la quantità di CO_2 prodotta è stata simulata a 0.504 MT di CO_2 all'anno, quantità sufficientemente bassa, pari al consumo di 215L di gasolio, per poter considerare la produzione di *Spirulina* sostenibile (Charlemthai et al., 2023).

4.DISCUSSIONE

Nannochloropsis è risultata utile non solo come strumento a basso impatto ambientale per trattare il siero di latte. È in grado di rimuovere efficacemente i nutrienti in soluzione, e catturare al tempo stesso CO_2 dall'ambiente. Inoltre, produce acido eicosapentaenoico (EPA) senza andare a pesare sugli ecosistemi marini, e produce β-galattosidasi, usata nel trattamento del siero di latte. L'utilizzo di microalghe risulta in un processo più sostenibile, in quanto si rimuove la necessità di utilizzare prodotti chimici e energia per utilizzare il metodo della flocculazione. Infine, mendeleyla produzione di ω-3 PUFA è un'alternativa al suo ottenimento dal pesce selvatico, usato attualmente come fonte primaria.

Nell'esperimento di mohseni et al viene evidenziata la capacità di *C. vulgaris* e *N. salina* di crescere in ROC, ciò dimostra la possibilità di utilizzare microalghe sia di acqua dolce che salata per la rimozione di contaminanti da quest'ultimo. È stato inoltre dimostrato come le cellule in sospensione producano più biomassa rispetto alle cellule immobilizzate, inoltre la modalità di crescita in semi-continuo ha ottenuto risultati migliori rispetto alla batch nell'efficienza di rimozione dei contaminanti in esame. Non è stata riscontrata differenza significativa nella capacità di rimozione dei contaminanti da parte delle specie in esame. Nell'ottica di un utilizzo delle due microalghe analizzate come strumento per la depurazione dei ROC la scelta del tipo di microalga tra le due può essere influenzato anche dall'utilizzo successivo della biomassa, per diminuire i costi del trattamento e poterlo utilizzare su scala più ampia sfruttando la biomassa prodotta come fonte di altri prodotti a valore aggiunto.

Un altro campo di applicazione biotecnologia delle microalghe riguarda la produzione di bioplastica. Avere la possibilità di produrre packaging biodegradabile prodotto in questo caso dalla *Spirulina* è un'ottima risorsa per limitare i danni ambientali. Uno dei problemi principali della coltivazione di *Spirulina* e delle microalghe in generale è lo scaling-up della produzione e lo studio di Charlemthai et al dimostra come la produzione su larga scala con alti guadagni sia possibile. Considerando i costi iniziali il guadagno possibile ottenuto dall'investimento permette di considerare il progetto di Charlemthai et al altamente profittevole. Nonostante lo studio sia molto promettente non è certo che i risultati ottenuti coincidano con le previsioni effettuate, questo è dovuto al fatto che i dati utilizzati considerano come riferimento esperimenti di laboratorio e scala pilota e uno scaling-up potrebbe portare

ad una variazione dei risultati. Un altro problema si trova nell'utilizzo delle vasche all'aperto, le quali sono soggette a evaporazioni, contaminazioni e fluttuazioni di temperature stagionali, considerando questi fattori sono state calcolate spese aggiuntive riguardanti il mantenimento dell'impianto. Una possibilità per ulteriori studi è quella di considerare produzioni già su larga scala per poter avere dei dati più correlabili alla scala di interesse. Considerando però l'alta profittabilità ottenuta dalla simulazione è ragionevole pensare che eventuali fluttuazioni nei dati reali portino comunque a un risultato sufficientemente profittevole da giustificarne l'investimento.

5.CONCLUSIONE

Le microalghe sono una risorsa importante per un futuro più sostenibile. *Spirulina* è già riconosciuta ampiamente come un'importante risorsa a livello alimentare e anche *Nannochloropsis* mostra interessanti campi di applicazione. Come già detto finora ci sono numerose sfide da affrontare per permettere un utilizzo di queste microalghe, come l'ottimizzazione del loro sclaing up, risolti questi problemi si aprirebbero nuove possibilità per il loro impiego. È importante notare come l'utilizzo delle microalghe possa essere ottimizzato se esiste una sinergia tra più processi, utilizzando ad esempio la biomassa prodotta da trattamenti di depurazione di acque reflue per la produzione simultanea di più prodotti, secondo il concetto della bioraffineria. Una volta ottimizzate le condizioni di coltivazione e sfruttando simultaneamente le microalghe per più utilizzi contemporanei, permettendo di ammortizzare il costo di coltivazione, queste saranno in futuro una vitale risorsa per lo sviluppo umano. A contribuire a uno sviluppo più sostenibile è inoltre la loro capacità di catturare CO_2 e diminuire quindi l'effetto serra.

6.BIBLIOGRAFIA

Chalermthai, B., Charoensuppanimit, P., Nootong, K., Olsen, B. D., & Assabumrungrat, S. (2023). Techno-economic assessment of co-production of edible bioplastic and food supplements from Spirulina. *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-37156-3

Li, Y., Miros, S., Eckhardt, H. G., Blanco, A., Mulcahy, S., Tiwari, B. K., & Halim, R. (2024). Freshwater microalgae Nannochloropsis limnetica for the production of β-galactosidase from whey powder. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-65146-6

Mohseni, A., Kube, M., Fan, L., & Roddick, F. A. (2020). Potential of Chlorella vulgaris and Nannochloropsis salina for nutrient and organic matter removal from municipal wastewater reverse osmosis concentrate. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(21), 26905–26914. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09103-6

Ferrazzano, G. F., Papa, C., Pollio, A., Ingenito, A., Sangianantoni, G., & Cantile, T. (2020). Cyanobacteria and microalgae as sources of functional foods to improve human general and oral health. In *Molecules* (Vol. 25, Issue 21). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/molecules25215164

Houssini, K., Li, J., & Tan, Q. (2025). Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth and Environment*, *6*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-025-02169-5

Walsh, B. J., Rydzak, F., Palazzo, A., Kraxner, F., Herrero, M., Schenk, P. M., Ciais, P., Janssens, I. A., Peñuelas, J., Niederl-Schmidinger, A., & Obersteiner, M. (2015). New feed sources key to ambitious climate targets. *Carbon Balance and Management*, *10*(1). https://doi.org/10.1186/s13021-015-0040-7

Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J. M., González-López, C., & Acién-Fernández, F. G. (2020). Spirulina for the food and functional food industries. In *Food Research International* (Vol. 137). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356

Zeller, M. A., Hunt, R., Jones, A., & Sharma, S. (2013). Bioplastics and their thermoplastic blends from Spirulina and Chlorella microalgae. *Journal of Applied Polymer Science*, *130*(5), 3263–3275. https://doi.org/10.1002/app.39559

Paterson, S., Gómez-Cortés, P., de la Fuente, M. A., & Hernández-Ledesma, B. (2023). Bioactivity and Digestibility of Microalgae Tetraselmis sp. and Nannochloropsis sp. as Basis of Their Potential as Novel Functional Foods. In *Nutrients* (Vol. 15, Issue 2). MDPI. https://doi.org/10.3390/nu15020477

Vieira, V. V., Benemann, J., Vonshak, A., Belay, A., Ras, M., Unamunzaga, C., Cadoret, J. P., & Rizzo, A. (2025). Spirulina in the 21st century: Five reasons for success in Europe. In *Journal of Applied Phycology*. Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/s10811-025-03536-7