

Microalghe (e Cianobatteri)

I microrganismi fotosintetici
in agricoltura

A cura di
Vincenzo Michele Sellitto



1ª edizione: ottobre 2021



© Copyright 2021 by “Edagricole - Edizioni Agricole di New Business Media Srl.”, via Eritrea, 21 - 20157 Milano Redazione: p.zza G. Galilei, 6 - 40123 Bologna Vendite: tel. 051 6575833; fax: 051 6575999 email: libri.edagricole@newbusinessmedia.it - www.edagricole.it

Proprietà letteraria riservata - printed in Italy

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguibile (art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633). Quest'opera è protetta ai sensi della legge sul diritto d'autore e delle Convenzioni internazionali per la protezione del diritto d'autore (Convenzione di Berna, Convenzione di Ginevra). Nessuna parte di questa pubblicazione può quindi essere riprodotta, memorizzata o tra-smessa con qualsiasi mezzo e in qualsiasi forma (fotomeccanica, fotocopia, elettronica, ecc.) senza l'autorizzazione scritta dell'editore. In ogni caso di riproduzione abusiva si procederà d'ufficio a norme di legge.

5614

Realizzazione grafica: Exegi snc, Via Pelagio Palagi, 3/2 - 40138 Bologna
Impianti e stampa: Centro Stampa Digitalprint S.r.l., Via A. Novella 15 - 47922 Rimini (RN)

Finito di stampare nell'ottobre 2021

ISBN 978-88-506-5614-1

Prefazione

Leggendo questo libro, mi sono ritrovato a considerare vari aspetti dell'influenza di forme di vita tanto minuscole sulla nostra. La capacità della natura di stupirci, di farci capire quanto piccoli siamo di fronte alla somma complessità dell'organismo terrestre, e quanto tutto ciò continua a sfuggire a noi miopi, mentre la natura continua con forza a regalarci. E così soprappensiero, mi sono trovato ad osservare questo libro, la sua forma.

Un piccolo parallelepipedo... mi ha portato a ricordare come, da bambino, aspettassi il Natale, i regali, sempre con un'ansia legata alla forma del regalo sotto l'albero.

La mattina della vigilia la passavo a squadrare le forme dei pacchi e classificarli in base alle aspettative; quelli tondi o poco squadrati erano, per me, meno importanti perché di certo erano maglioni o sciarpe o un pallone, mentre quelli importanti erano squadrati perché di certo sarebbero stati una scatola del gioco tanto atteso; un robot, un videogioco o chissà quale meravigliosa inaspettata sorpresa...

E così davvero questo libro ha risolto il grande dilemma, perché oltre all'incredibile contenuto scientifico, elaborato e reso fruibile al lettore, ha aperto una finestra nuova e necessaria sul mondo che ci circonda e che continuiamo spesso a non vedere. Un mondo fatto di interazioni e di alchimia tra organismi tanto piccoli su cui poggiamo, camminiamo e viviamo, in equilibrio precario e incoscienti. Bene, in questo testo ho trovato coscienza e speranza.

La coscienza del fatto che la soluzione è a portata di mano, legata alla comprensione delle interazioni tra la natura, la tecnologia, e l'umanità tutta.

La speranza poi, in questo tempo tanto confuso, che ha perso la visione di lungo termine. La speranza racchiusa in questo testo è che finalmente proviamo, oltre che a guardare, a vedere, comprendere come tutto quello che dobbiamo inventare, in realtà esiste già. Va solo capito.

Ecco la grande sintesi, un regalo atteso, un libro come questo, come fosse una piccola scatola, che contiene la sorpresa più bella, l'intero mondo.

Un mondo a cui tornare ad affezionarsi capendolo nelle sue parti minime, un mondo pronto a regalarci il futuro.

Buona lettura

Gli Autori

Andrea Baglieri, Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente, Università di Catania, Catania.

Natascia Biondi, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Firenze.

Antonella Bottalico, Dipartimento di Biologia - Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari.

Michele Caputo, CREA-Centro di ricerca Orticoltura e Florovivaismo, Pontecagnano (SA).

Gianluca Caruso, Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Napoli 'Federico II', Portici (NA).

Carolina Chiellini, Istituto di Biologia e Biotecnologia Agraria, Consiglio Nazionale delle Ricerche (IBBA-CNR), Pisa.

Raffaella Coppola, CREA-Centro di ricerca Politiche e Bioeconomia, Roma.

Luigi Paolo D'Acqui, Istituto di ricerca sugli Ecosistemi Terrestri - IRET, Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR, Sesto Fiorentino (FI).

Paola Iovieno, CREA-Centro di ricerca Orticoltura e Florovivaismo, Pontecagnano (SA).

Annamaria Mincuzzi, Dipartimento di Scienze del Suolo, delle Piante e degli Alimenti (Di.S.S.P.A.) - Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari.

Stefano Mocali, CREA - Centro di Ricerca Agricoltura e Ambiente, Firenze.

Tomas Morosinotto, Dipartimento di Biologia, Università degli Studi di Padova, Padova.

Raffaella Pergamo, CREA-Centro di ricerca Politiche e Bioeconomia, Roma.

Giorgio Perin, Dipartimento di Biologia, Università degli Studi di Padova, Padova.

Rossella Pistocchi, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, *Alma Mater Studiorum* Università di Bologna, Bologna.

Ivana Puglisi, Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente, Università degli Studi di Catania, Catania.

Liliana Rodolfi, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Firenze.

Gaia Santini, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Firenze.

Alessio Tallarita, Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Napoli 'Federico II', Portici (NA).

Valentina Torino, Università degli Studi del Molise, Campobasso.

Mario R. Tredici, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Firenze.

Francesco Vairo, CREA-Centro di ricerca Orticoltura e Florovivaismo, Pontecagnano (SA).

Massimo Zaccardelli, CREA-Centro di ricerca Orticoltura e Florovivaismo, Pontecagnano (SA).

Indice

Prefazione	III
Gli Autori	V
Introduzione (<i>Vincenzo Michele Sellitto</i>)	XI
Le Alghe: Macroalghe, Microalghe e Cianobatteri	XII
Cambiamenti climatici: un aiuto può venire dai microrganismi fotosintetici	XIII
Microrganismi fotosintetici e il Microbioma del suolo	XIII
La ficosfera come la rizosfera	XIV
Le microalghe: bio-fabbriche verdi per composti ad elevato valore aggiunto e loro uso in Agricoltura	XV
Un testo sulle “Alghe” e i Microrganismi Fotosintetici	XV
1. Metaboliti di interesse industriale da microalghe (<i>Giorgio Perin, Tomas Morosinotto</i>)	1
1.1 Biomassa delle microalghe alla base di una bioraffineria sostenibile	1
1.2 Composizione biochimica delle microalghe	4
1.2.1 Proteine	4
1.2.2 Lipidi	5
1.2.3 Carboidrati	7
1.2.4 Pigmenti	8
1.2.5 Molecole di accumulo di macronutrienti minerali	10
1.2.6 Metaboliti extracellulari	11
1.3 Prodotti commerciali a base di macromolecole e metaboliti delle microalghe	14
1.3.1 Applicazioni alimentari e nutraceutica	14
1.3.2 Applicazioni industriali e farmaceutica	16
1.3.3 Mangimi	20
1.3.4 Biofertilizzanti e fitostimolanti	21
1.3.5 Biocarburanti	22
1.4 Le limitazioni delle applicazioni delle microalghe	25
1.4.1 Ottimizzazione della produttività in biomassa delle coltivazioni di microalghe	25

1.4.2 Ottimizzazione dell'accumulo di macromolecole e metaboliti di interesse industriale	26
1.5 Conclusioni	26
Bibliografia	27
2. Microalghe, cianobatteri e suolo (<i>Carolina Chiellini, Stefano Mocali</i>)	37
2.1 Le microalghe nel suolo	37
2.2 I cianobatteri nel suolo	39
2.3 Le croste biologiche del suolo	40
Bibliografia	42
3. Biostimolanti da microalghe e cianobatteri (<i>Gaia Santini, Liliana Rodolfi, Natascia Biondi, Mario R. Tredici</i>)	45
3.1 Biostimolanti in agricoltura	45
3.2 Microalghe e cianobatteri come nuova fonte di biostimolanti	46
3.2.1 Dalla biomassa biostimolante alla pianta: metodi di lavorazione e modalità di applicazione	48
3.2.2 Principali effetti biostimolanti sulla pianta	50
3.2.3 Molecole bioattive nei biostimolanti microalgali e cianobatterici	53
3.3 Vantaggi e criticità nell'uso di microalghe e cianobatteri per biostimolanti	56
3.4 Considerazioni conclusive	57
Bibliografia	58
4. Formulati a base di microalghe e cianobatteri nei sistemi colturali erbacei (<i>Alessio Tallarita, Gianluca Caruso</i>)	63
4.1 Introduzione	63
4.2 Tecniche di produzione delle microalghe	64
4.3 Effetti delle microalghe nei sistemi colturali	66
4.3.1 Attività ormonale	67
4.3.2 Prevenzione degli stress abiotici delle piante	73
4.3.3 Biostimolazione delle piante e fertilizzazione	73
4.4 Conclusioni	76
Bibliografia	76
5. Microalghe e Cianobatteri in Agricoltura: una breve panoramica (<i>Massimo Zaccardelli, Francesco Vairo, Valentina Torino, Michele Caputo</i>)	85
5.1 Introduzione	85
5.2 Microalghe per il biocontrollo delle malattie delle piante	86
5.3 Microalghe per la biofertilizzazione	87
5.4 Microalghe per la biostimolazione delle piante	88
5.5 Conclusioni	90
Bibliografia	90

6. Cianobatteri e fertilità del suolo (<i>Luigi Paolo D'Acqui</i>)	95
6.1 Come i cianobatteri possono promuovere la fertilità del suolo?	95
6.2 Descrizione delle fasi di un esperimento per il recupero di suoli marginali in ambiente semiarido tropicale: dal laboratorio al campo	97
6.2.1 Siti studiati	99
6.2.2 Isolamento, identificazione e caratterizzazione di ceppi di cianobatteri indigeni	100
6.2.3 Isolamento e identificazione	100
6.2.4 Selezione di cianobatteri adatti	101
6.2.5 Produzione massiva di ceppi indigeni selezionati	104
6.2.6 Valutazione in laboratorio delle interazioni dei ceppi selezionati con le popolazioni microbiche nei differenti suoli	106
6.2.7 Effetti sulle proprietà fisiche del suolo: microstruttura, stabilità di struttura degli aggregati	111
6.2.8 Effetti sulle proprietà chimiche: elementi nutritivi, contenuto e qualità della sostanza organica del suolo	112
6.3 Esperimenti in serra	114
6.4 Esperimenti in campo	116
6.5 Conclusioni	117
Bibliografia	119
7. Impiego agronomico e ambientale delle microalghe <i>C. vulgaris</i> e <i>S. quadricauda</i> e dei loro estratti (<i>Andrea Baglieri e Ivana Puglisi</i>)	123
7.1 <i>Chlorella vulgaris</i> e <i>Scenedesmus quadricauda</i>	123
7.2 Coltivazione di <i>Chlorella vulgaris</i> e <i>Scenedesmus quadricauda</i> in substrati innovativi	124
7.3 Applicazioni di <i>Chlorella vulgaris</i> e <i>Scenedesmus quadricauda</i> in agricoltura	125
7.3.1 Applicazioni su pomodoro	126
7.3.2 Applicazioni su barbabietola	130
7.3.3 Applicazioni su lattuga	132
7.3.4 Effetto delle biomasse microalgali e dei loro estratti sulla biochimica del suolo	134
7.4 Impiego di <i>Chlorella vulgaris</i> e <i>Scenedesmus quadricauda</i> nella depurazione di acque reflue di origine agricola	135
7.5 Considerazioni conclusive	138
Bibliografia	139
8. La produzione di microalghe (<i>Rossella Pistocchi</i>)	141
8.1 Fattori di crescita delle microalghe in coltura	141
8.2 Processo produttivo di colture algali su larga scala	145
8.3 Sistemi industriali per la crescita di microalghe	150
8.4 Conclusioni	155
Bibliografia	156

8. L'uso delle macroalghe in agricoltura	
<i>(Antonella Bottalico, Annamaria Mincuzzi)</i>	159
9.1 Generalità e cenni di sistematica	159
9.2 Introduzione e aspetti storici ed economici	160
9.3 Fertilizzanti e biostimolanti a base di macroalghe	164
9.3.1 Ammendanti del suolo	165
9.3.2 Estratti algali e fertilizzanti liquidi	167
9.3.3 Tolleranza agli stress abiotici	171
9.3.4 Effetti sulle malattie delle piante e sugli insetti nocivi	171
9.4 Metodi di estrazione dalle alghe	173
9.5 Altre applicazioni degli estratti algali	173
9.6 Conclusioni	174
Bibliografia	174
10. Classificazione dei microrganismi fotosintetici e delle macroalghe	
<i>(Paola Iovieno, Massimo Zaccardelli)</i>	181
10.1 Generalità	181
10.1.1 Organizzazione cellulare	181
10.1.2 Organizzazione del tallo	182
10.1.3 Cicli vitali e riproduzione	183
10.2 Ecologia	183
10.3 Classificazione	184
10.4 Principali gruppi di alghe	186
10.4.1 Cianoficee (divisione <i>Cyanobacteria</i>)	186
10.4.2 Euglenoidi (divisione <i>Euglenophyta</i>)	188
10.4.3 Criptomonadi (divisione <i>Cryptophyta</i>)	188
10.4.4 Aptofite o primnesiofite (divisione <i>Haptophyta</i>)	190
10.4.5 Dinoflagellate (divisione <i>Dinophyta</i>)	191
10.4.6 Alghe dorate (classe <i>Chrysophyceae</i>)	194
10.4.7 Alghe giallo-verdi (classe <i>Xanthophyceae</i>)	195
10.4.8 Alghe brune (classe <i>Phaeophyceae</i>)	196
10.4.9 Alghe rosse (divisione <i>Rhodophyta</i>)	197
10.4.10 Alghe verdi	199
Bibliografia	203
Sitografia	204
11. Le microalghe nel contesto della bioeconomia circolare	
<i>(Raffaella Pergamo, Raffaella Coppola)</i>	205
11.1 Uno dei principali impieghi delle microalghe: i biocarburanti	206
Bibliografia	207
Indice analitico	209

Introduzione

Nell'ambito dei microrganismi fotosintetici, le microalghe e i cianobatteri sono tra i gruppi di esseri viventi più primitivi; i cianobatteri in particolare sono apparsi per la prima volta sulla Terra oltre 3 miliardi di anni fa e hanno contribuito a creare l'atmosfera che conosciamo oggi; attualmente i microrganismi fotosintetici presenti negli oceani sono responsabili della produzione di circa il 50% dell'ossigeno atmosferico globale. La maggior parte dei microrganismi fotosintetici – organismi fototrofi muniti di clorofilla e pigmenti accessori – è relativamente semplice ed eucariote, ad eccezione dei cianobatteri che sono procarioti. Grazie alla fotosintesi, questi microrganismi utilizzano la luce per fissare e convertire l'anidride carbonica in biomassa, nonché per produrre una grande varietà di molecole (metaboliti algali) con diverse potenziali applicazioni, anche nel settore agricolo. Nonostante pochissime specie di microalghe siano sfruttate commercialmente, oggi l'uso su larga scala delle biomasse algali, tra cui le più usate macroalghe, è in continuo e crescente interesse. Infatti, dai dati riportati nella relazione economica annuale sulla Blue Economy emerge che nell'UE questo settore impiega attualmente 14 mila persone e vale circa 1,7 miliardi di euro, cifra che comprende ricerca e sviluppo, produzione di attrezzature e posti di lavoro nella più ampia catena di approvvigionamento, che dipendono dalla produzione del settore delle alghe. A questo si aggiunge un valore di mercato legato ai prodotti a base di alghe che si stima in crescita, da circa 10 miliardi di dollari nel 2018 a circa 15 miliardi di dollari entro il 2024. La sfida del prossimo futuro passa attraverso lo sviluppo di impianti di coltivazione e di tecnologie, economicamente convenienti, per la raccolta della biomassa, l'ottimizzazione del metabolismo delle microalghe per massimizzarne la produttività e la produzione di nuove molecole di interesse. Tutto questo permetterà di poter usare al meglio il potenziale di tali organismi, a supporto della crescita di un'economica sostenibile. Le caratteristiche che rendono interessante e vantaggioso l'utilizzo di questi organismi fotosintetici risiede nel fatto che: hanno un'elevata e continua velocità di crescita; un ciclo di vita breve e sono capaci di vivere in diverse condizioni di crescita; la maggior parte delle risorse necessarie per sostenere la produzione di biomassa dalle microalghe non compete con l'agricoltura, rappresentando un'ideale fonte complementare alla produzione agricola tradizionale. Infine, l'efficienza di conversione dell'energia solare in biomassa delle colture algali, e quindi la produttività per ettaro, è molto

maggiore di quella ottenibile con le colture tradizionali. È da tenere in considerazione che anche sul versante delle energie rinnovabili, le colture algali costituiscono una delle soluzioni potenzialmente più interessanti e sostenibili, svolgendo un ruolo fondamentale nella riduzione dell'impatto ambientale antropico.

Le Alghe: Macroalghe, Microalghe e Cianobatteri

Con il termine “alghe” si indicano generalmente le macroalghe, le microalghe e i cianobatteri, che sono organismi fotoautotrofi molto diversi tra di loro. La differenza sostanziale tra macroalghe e microalghe sta nel fatto che: le prime sono organismi fotosintetici vegetali acquatici grandi e multicellulari, mentre le microalghe e i cianobatteri sono organismi fotosintetici vegetali acquatici unicellulari o tutt'al più coloniali. Tutti rivestono un ruolo importante nella formazione e mantenimento dell'atmosfera terrestre, producendo ossigeno e consumando anidride carbonica. Le microalghe e i cianobatteri, potendo vivere alla superficie, anche di acque profonde, sono i produttori primari principali di tutti gli ambienti acquatici, inoltre entrano in molte simbiosi, colonizzano rocce, suoli desertici, ghiacci polari ed alpini, sono presenti nel suolo agrario e forestale, costituiscono il fitoplancton e parte del fitobentos, rappresentando il primo anello della catena alimentare. Condividono il metabolismo bioenergetico (la fotosintesi ossigenica), ma differiscono tra loro per la struttura cellulare. In particolare, i cianobatteri, oltre a rappresentare gli organismi fotosintetici quantitativamente più importanti sulla terra, si caratterizzano per la capacità di produrre ossigeno e alcuni di essi anche di fissare l'azoto atmosferico. Tuttavia, se si considera che, secondo la teoria dell'endosimbiosi, i cianobatteri sotto forma di cloroplasti sono presenti nelle microalghe, così come nelle macroalghe e nei vegetali inferiori e superiori, buona parte della fotosintesi ossigenica sulla terra è operata da questi antichi microrganismi procariotici. In generale, i microrganismi fotosintetici, grazie alle loro semplicità strutturale, hanno un'efficienza fotosintetica che, a seconda delle condizioni di crescita, può spingersi fino al 7-8% della radiazione visibile in condizioni di coltura massiva e addirittura al 20% in condizioni di laboratorio, percentuale che è nettamente maggiore rispetto a quella delle piante superiori (circa 2%). Ciò grazie alla presenza dei pigmenti, necessari per catturare la radiazione solare fotosinteticamente attiva – compresa tra i 400 nm e i 750 nm – i quali rappresentano anche uno degli elementi impiegati per la classificazione tassonomica delle microalghe.

I principali pigmenti sono:

- **Clorofille.** Tutte le clorofille presentano un maggiore assorbimento tra 450-475 nm (blu-verde) e tra 630-675 nm (rosso). La clorofilla *a* è il pigmento fotosintetico primario che ritroviamo in tutte le microalghe. Come le piante superiori, Chlorophyta e Euglenophyta contengono oltre alla clorofilla *a* anche clorofilla *b*. Clorofilla *c*, *d* ed *e* è presente in alcune alghe marine e diatomee di acqua dolce;

- Carotenoidi. Presentano un picco di assorbimento tra 400 nm e 550 nm e, oltre ad essere pigmenti ausiliari nella fotosintesi, svolgono un ruolo essenziale di protezione dalla fotossidazione. I più comuni riscontrati nella maggior parte delle specie sono: β -carotene, luteina, astaxantina; ficobiliproteine. Questi ultimi sono pigmenti accessori ad alta fluorescenza, tipici dei cianobatteri.

Cambiamenti climatici: un aiuto può venire dai microrganismi fotosintetici

Una delle caratteristiche più favorevoli delle alghe è la loro capacità di stoccaggio della CO_2 , che le conferiscono una maggiore efficienza nel sequestro del carbonio atmosferico rispetto alle piante terrestri, essendo in grado di processare elevate concentrazioni di CO_2 atmosferica, in alcuni casi fino al 90%. Ciò consente la loro coltivazione in stretta connessione ad impianti industriali, dove possono contribuire a mitigare in modo sostanziale le emissioni di gas serra antropogenici. Nello specifico, le colture algali sono in grado di fissare efficientemente la CO_2 da diverse fonti, tra cui l'atmosfera, i carbonati solubili e i gas di scarico industriali, assorbendo circa due chilogrammi di CO_2 per ogni chilogrammo di biomassa algale prodotta. Inoltre, le alghe costituiscono la base principale delle catene alimentari acquatiche, e oltre ad ossigenare le acque, svolgono anche un ruolo importante sul ciclo globale del carbonio e sul sequestro della CO_2 . Ad esempio, tra tutti gli esseri viventi fotosintetici, le diatomee contribuiscono per il 25% alla produzione di ossigeno e alla fissazione del carbonio, equivalente alla somma di tutte le foreste pluviali. In sostanza, circa la metà di tutta la CO_2 prodotta dalle attività umane può essere assorbita dal fitoplancton, ovvero dall'insieme delle piccole cellule fotosintetiche vaganti nelle acque.

Microrganismi fotosintetici e il Microbioma del suolo

Il campo della ricerca sul microbioma si è evoluto rapidamente nell'ultimo decennio. Con il termine microbioma, si intende una caratteristica comunità microbica, soggetta a cambiamenti nel tempo e nello spazio, che occupa una nicchia ecologica (microecosistema) specifica, con distinte proprietà fisico-chimiche che evolvono nel tempo. Proprio le microalghe eucariotiche e i cianobatteri rappresentano, insieme a batteri, funghi e attinomiceti, la componente principale del microbioma del suolo, ovvero della totalità dei microrganismi presenti nel suolo, con una biomassa variabile da 150 a 500 kg ha^{-1} . I microrganismi fotosintetici, quindi, sono coinvolti nei fenomeni biologici che contribuiscono significativamente ai processi chimici e fisici che influenzano la fertilità complessiva del suolo. Le microalghe e i cianobatteri che vivono nel suolo contribuiscono alle richieste nutrizionali delle piante per mezzo di processi biologici in cui sono coinvolti attivamente, ad esempio attraverso la formazione del pool di sostanza organica

del suolo, ma anche direttamente, attraverso la secrezione di esopolisaccaridi e la produzione di sostanze humus-simili. Sono in grado di stimolare la crescita di altri organismi della microflora e della microfauna, promuovendo anche la mineralizzazione della sostanza organica, la biodisponibilità e l'assorbimento di nutrienti. Tutti questi fenomeni sono quindi alla base del loro utilizzo in agricoltura come i PGPR (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*).

La ficosfera come la rizosfera

Le interazioni tra i microrganismi fotosintetici e i batteri rappresentano una relazione ecologica fondamentale negli ambienti acquatici. Studi recenti indicano che questa relazione è spesso governata da interazioni su microscala che avvengono all'interno della regione immediatamente circostante le singole cellule delle microalghe. Questo microambiente, noto come ficosfera, può essere considerato l'analogo della rizosfera nelle piante (Fig. 1).

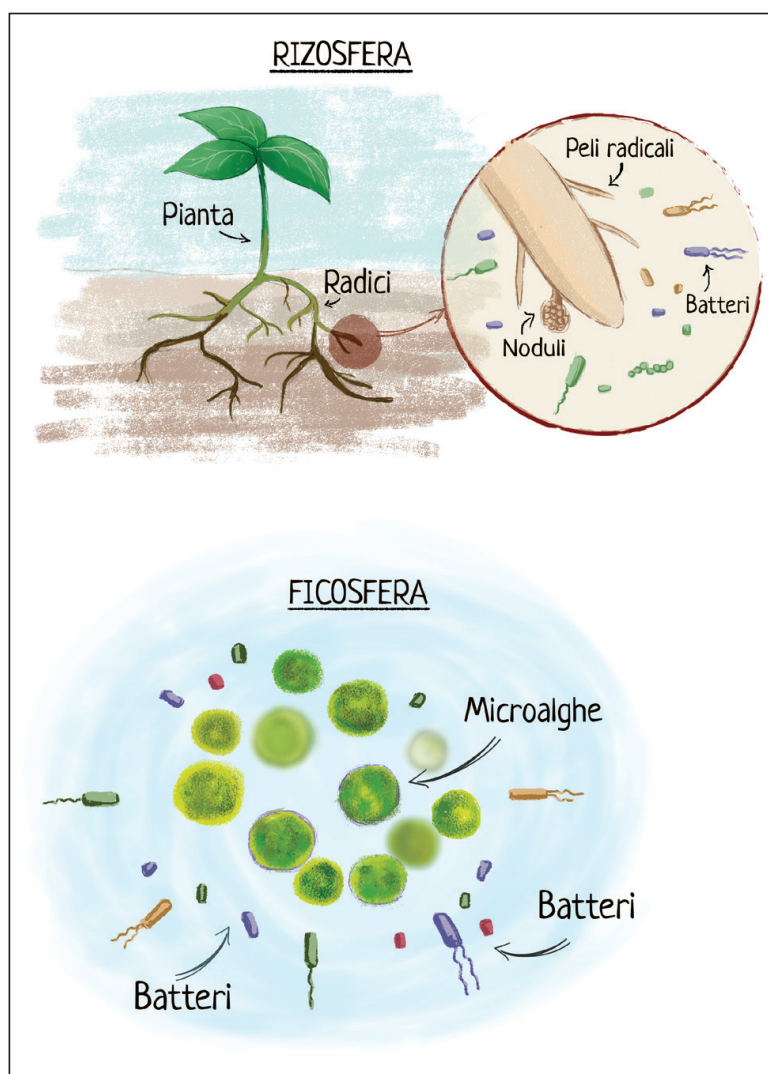


Figura 1 – *Similitudini tra la rizosfera e la ficosfera. (Illustrazione di Sonia Miele).*

Lo scambio di metaboliti in questa interfaccia regola le relazioni microrganismi fotosintetici-batteri, che abbracciano sistemi di interazione e comunicazione come il mutualismo, commensalismo, antagonismo, parassitismo e competizione. In effetti, l'importanza della ficosfera è stata postulata per diversi decenni, ma solo di recente nuove osservazioni scientifiche hanno permesso di iniziare a mettere in discussione nuovamente la natura complessa di questo habitat microbico unico. È diventato evidente che gli scambi chimici e le interazioni ecologiche tra microalghe e batteri sono molto più sofisticati di quanto si pensasse in precedenza. Così come accade per una coltura algale, le microalghe rilasciano sostanze (essudati) che favoriscono lo sviluppo dei batteri che a loro volta producono sostanze stimolanti la crescita algale. Quindi, i metaboliti algali giocano un ruolo chiave in quanto, interferendo con i meccanismi di regolazione *quorum sensing*, possono stimolare e/o inibire la crescita dei batteri. Inoltre, sta diventando sempre più chiaro che, mentre le interazioni nella ficosfera avvengono su scala dei singoli microrganismi, esse esercitano un'influenza su scala ecosistemica su processi fondamentali, tra cui la produzione e la rigenerazione di nutrienti, la produzione primaria, la biosintesi delle tossine e i cicli biogeochimici. Per conseguire un'elevata produttività e stabilità di processo, al fine di sfruttare appieno le colture massive algali, si dovranno comprendere meglio le complesse interazioni tra cellule algali, batteri e altri microrganismi ficosferici.

Le microalghe: bio-fabbriche verdi per composti ad elevato valore aggiunto e loro uso in Agricoltura

Le microalghe sono caratterizzate da una grande diversità fisiologica e metabolica e sono in grado di sintetizzare numerose molecole organiche complesse ad alto valore biologico, aventi una natura chimica spesso non riscontrabile in altri organismi. Tali molecole sono rappresentate da acidi grassi polinsaturi, sostanze antifungine, antibatteriche ed antivirali, agenti antineoplastici, vitamine e pigmenti, sfruttabili dall'industria alimentare umana ed animale, chimica e farmaceutica, in cosmesi e diagnostica, oltre all'utilizzo come biofertilizzanti e combustibili. Proprio nel settore agricolo, l'impiego delle microalghe e cianobatteri sta riscontrando un rinnovato interesse e un promettente utilizzo, con l'obiettivo, attraverso la stimolazione dell'attività microbica del suolo, di migliorare la biodisponibilità dei nutrienti, migliorare il contenuto di carbonio organico e conseguentemente la fertilità del suolo, migliorando così la crescita delle piante e la resa delle colture.

Un testo sulle “Alghe” e i Microrganismi Fotosintetici

L'obiettivo di questo volume è approfondire il tema riguardante la tecnologia e l'uso dei microrganismi fotosintetici, su cui il mondo dell'agricoltura ripone gran-

de fiducia, per migliorare lo stato di salute dei suoli e aumentare la performance delle colture. A tal uopo, sono descritte le più importanti classi di metaboliti algali e il loro maggior uso industriale. Inoltre, partendo dal Suolo e dal suo Microbioma, è proposta un'ampia documentazione sui possibili usi delle microalghe e dei cianobatteri nel settore agricolo, nei diversi sistemi colturali, sia come biostimolanti che come agenti di biocontrollo.

Il volume si amplia e si completa, oltre che per le dettagliate descrizioni dei più comuni sistemi di produzione delle colture algali, anche e soprattutto attraverso spunti ed esempi pratici sull'uso di questi speciali microrganismi utili per ripristinare la fertilità di suoli degradati e il loro utilizzo in sistemi di agricoltura protetta. Considerato che l'uso delle alghe in agricoltura assume oggi un'importanza rilevante, che il mondo e le opportunità delle microalghe è in crescita e in evoluzione, mentre quello delle macroalghe è stato già ampiamente studiato e sono attualmente utilizzate come fertilizzanti o biostimolanti naturali, si è deciso di dare spazio anche a queste ultime, per rendere l'opera ancora più pratica e utile per chi lavora nel settore agricolo. Il volume si chiude con un aggiornato approfondimento sulla tassonomia algale, per contestualizzare meglio questi importanti microrganismi che popolano la biosfera.

Vincenzo Michele Sellitto

1. Metaboliti di interesse industriale da microalghe

Giorgio Perin, Tomas Morosinotto

1.1 Biomassa delle microalghe alla base di una bioraffineria sostenibile

Le attività umane sono responsabili del rilascio massiccio di gas a effetto serra e altri inquinanti nell'ambiente causando gravi conseguenze quali l'aumento della temperatura globale, eventi meteorologici estremi, acidificazione e deossigenazione degli oceani, mettendo a rischio la sicurezza alimentare, le foreste e la biodiversità funzionale di svariati ecosistemi (Allison and Bassett, 2015). La produzione agricola dovrà aumentare del 110% entro il 2050 per rispondere alla domanda della popolazione mondiale crescente. Allo stesso tempo l'agricoltura dovrà diminuire il proprio impatto ambientale negativo, quale le emissioni di gas serra e la riduzione della biodiversità degli ecosistemi naturali (Clark and Tilman, 2017). È quindi indispensabile ed urgente riorganizzare le attività umane sviluppando processi produttivi che riducano le emissioni nette di anidride carbonica e che siano in generale più sostenibili per evitare gli scenari peggiori (Rockström *et al.*, 2017), al contempo preservando le opportunità di sviluppo economico senza limitare il benessere umano a lungo termine.

In tale contesto, la biomassa vegetale rappresenta un'alternativa promettente per soddisfare la domanda di materie prime. Infatti, gli organismi fotosintetici utilizzano la luce del sole come fonte di energia e la CO₂ atmosferica come fonte di carbonio per produrre biomassa, con un processo quindi completamente sostenibile. Questa biomassa poi può essere utilizzata per svariati scopi, dalla produzione di biocarburanti a diversi materiali e molecole. La produzione di biomassa derivata dalle colture agricole ha però bisogno di terra arabile, acqua dolce e sostanze nutritive, e il reindirizzamento di parte della pratica agricola per alimentare la produzione di altre materie prime richiederebbe quindi l'intensificazione dello sfruttamento di terra e risorse che sono già sotto pressione dal continuo aumento della domanda alimentare, con effetti negativi che potrebbero superare i benefici (Khanna *et al.*, 2017).

È quindi necessario trovare alternative per la produzione sostenibile di materie prime per alimentare l'economia globale, evitando l'ampliamento dell'area dedicata alla coltivazione delle colture agricole. Una possibilità è lo sfruttamento di terreni marginali per la produzione di biomassa vegetale. Questa risorsa, per

1. Metaboliti di interesse industriale da microalghe

quanto rilevante, non è però sufficiente a soddisfare la domanda ed è quindi strategico sviluppare l'utilizzo di fonti alternative di biomassa vegetale, proveniente da altri organismi fotosintetici, quali ad esempio le microalghe.

Le microalghe sono organismi unicellulari fotosintetici e, come le piante terrestri, alimentano il loro metabolismo attraverso la fotosintesi. Di conseguenza, potrebbero rappresentare un'ulteriore fonte di biomassa vegetale per complementare quella dalle colture agricole. Le microalghe presentano inoltre molti altri potenziali vantaggi. L'intera loro biomassa è in grado di svolgere la fotosintesi, con un'efficienza di conversione dell'energia luminosa in biomassa potenzialmente più elevata rispetto alle piante terrestri (Ooms *et al.*, 2016). Di conseguenza, le microalghe hanno anche una maggiore efficienza nel sequestro del carbonio atmosferico rispetto alle piante terrestri, con alcune specie di microalghe in grado di processare elevate concentrazioni di CO₂ atmosferica, in alcuni casi fino al 90% (Salih, 2011). Tale caratteristica consente la loro coltivazione in stretta connessione ad impianti industriali, dove possono contribuire a mitigare in modo sostanziale le emissioni di gas serra antropogenici.

La coltivazione di microalghe, inoltre, non richiede terra coltivabile visto che gli impianti di coltivazione possono essere installati in terreni marginali, improduttivi o persino urbanizzati. L'uso di specie marine che crescono in acqua salata permette anche di ridurre la pressione sulla domanda di acqua dolce. In alternativa, alcune specie di microalghe sono in grado di raccogliere sostanze nutritive dalle acque reflue civili, agricole o industriali, e sono particolarmente efficienti nella rimozione di nitrati e fosfati (Perin *et al.*, 2019b). Di conseguenza, la maggior parte delle risorse necessarie per sostenere la coltivazione di microalghe non compete con l'agricoltura e quest'ultime possono così rappresentare un'ideale fonte complementare alla produzione agricola tradizionale. È quindi possibile progettare processi altamente sostenibili in cui la produzione di biomassa dalle microalghe è combinata con il trattamento delle acque reflue e/o il riciclaggio di acqua e nutrienti (Fig. 1.1), con enormi potenziali benefici sull'ambiente (Walsh *et al.*, 2015).

Oltre all'elevata sostenibilità, una seconda importante caratteristica della biomassa delle microalghe è l'ampio spettro delle sue potenziali applicazioni. Le microalghe sono un gruppo di organismi molto diversificato, comprendente specie adattate a nicchie ecologiche molto diverse, che hanno modellato una sostanziale versatilità metabolica. Alcune specie di microalghe possono infatti accumulare naturalmente un'elevata concentrazione di molecole ad alta densità energetica, ad esempio amido e lipidi, che possono essere utilizzate come precursori di biocarburanti liquidi. Diverse specie di microalghe possono anche sintetizzare un ampio spettro di composti bioattivi (Maeda *et al.*, 2018), potenzialmente sfruttabili per la produzione di diversi prodotti, come alimenti, mangimi, coloranti, cosmetici e farmaci, per soddisfare una crescente domanda nel mercato della nutraceutica e farmaceutica (Fig. 1.1). La sintesi di molti composti bioattivi attualmente commercializzati dalle industrie farmaceutiche e chimiche si basa infatti su reazioni chimiche dannose per l'ambiente (cioè reazioni che utilizzano

1.1 Biomassa delle microalghe alla base di una bioraffineria sostenibile

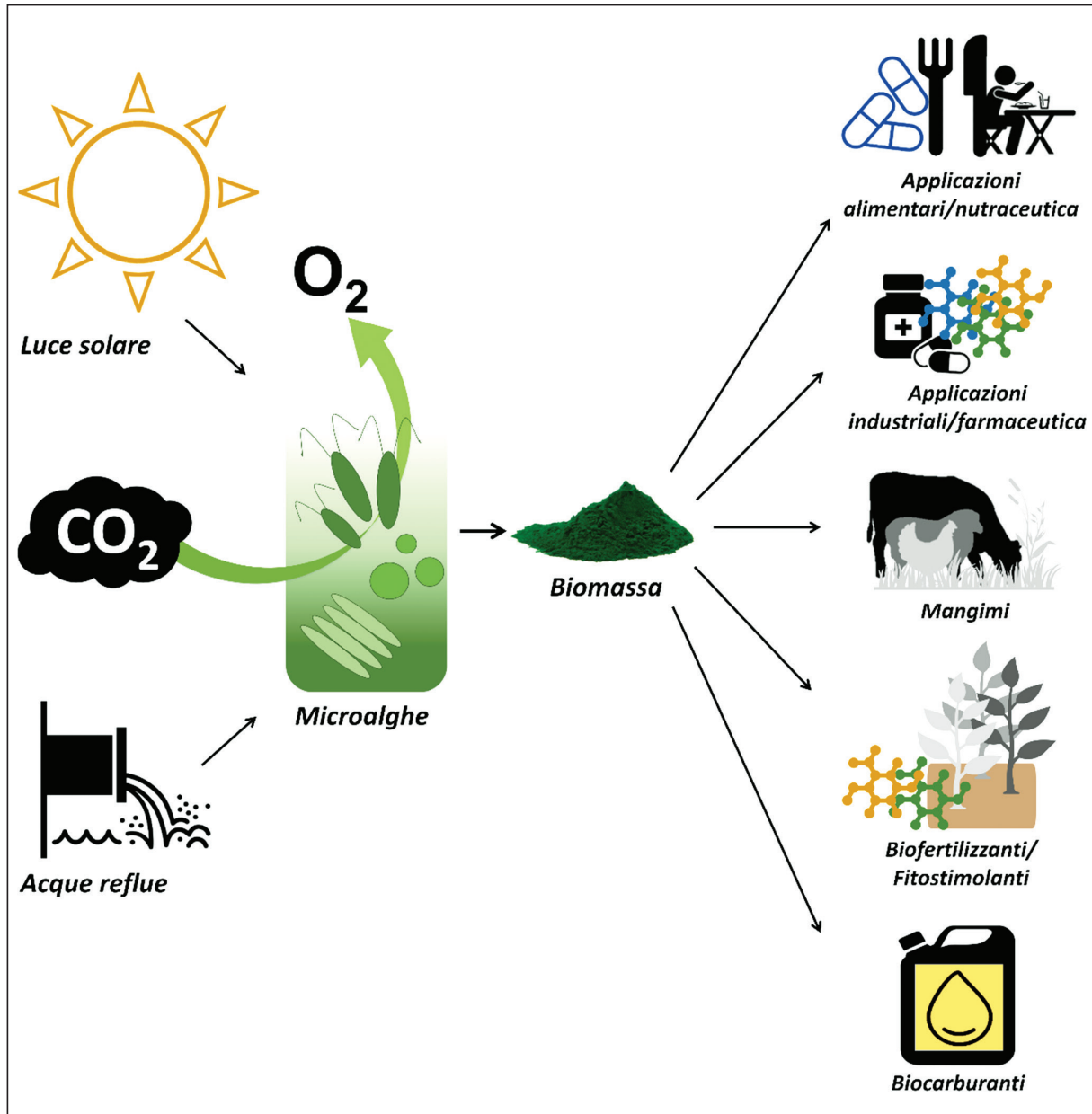


Figura 1.1 – *Biomassa delle microalghe alla base di un'economica sostenibile. Il metabolismo delle microalghe è alimentato da fonti rinnovabili di energia e carbonio (luce solare e CO₂ atmosferica) e può essere alimentato da nutrienti provenienti da acque reflue civili, agricole e industriali, incrementando ulteriormente la sostenibilità ambientale. La CO₂ utilizzata per la coltivazione può provenire da un impianto industriale, sequestrando le emissioni di gas serra ad esso connesse. La biomassa delle microalghe è una fonte di diverse molecole, che trova applicazione in vari mercati. I composti di basso valore possono essere convertiti in biocarburanti liquidi per soddisfare una parte della domanda energetica, mentre i composti bioattivi trovano ampie applicazioni nei mercati nutraceutici e farmaceutici così come di alimenti o mangimi. Acqua e nutrienti possono essere riciclati alla fine del processo aumentandone ulteriormente la sostenibilità. Immagine adattata da Perin and Morosinotto, 2019a.*

1. Metaboliti di interesse industriale da microalghe

reagenti o catalizzatori non rinnovabili o tossici) e quindi lo sviluppo di processi alternativi, basati su enzimi presenti in natura, fornirebbe un ulteriore vantaggio a lungo termine.

1.2 Composizione biochimica delle microalghe

La conoscenza della composizione biochimica della biomassa delle microalghe è fondamentale per poter sviluppare processi industriali che la utilizzino come materia di partenza per la produzione di molecole. A questo scopo, il paragrafo 1.2 descrive le principali classi di molecole presenti nella biomassa delle microalghe e la loro funzione biologica, mentre il paragrafo 1.3 si concentrerà sui potenziali utilizzi industriali di queste molecole.

1.2.1 Proteine

Le proteine sono essenziali per mantenere le funzionalità di tutte le forme di vita e perciò sono fondamentali per l'alimentazione umana ed animale. Le microalghe attualmente note accumulano proteine in quantità molto diverse, tra il 10 ed il 70% del peso secco della biomassa, a seconda della specie e delle condizioni di crescita (Derakhshandeh *et al.*, 2021). Nelle specie di microalghe che accumulano grandi quantità di proteine queste, oltre allo svolgimento di specifiche funzioni biologiche e strutturali (Fig. 1.2), rappresentano una riserva di azoto (Bleakley and Hayes, 2017), che può essere reso nuovamente disponibile previa degradazione. Grazie a questa capacità di accumulo, la biomassa di queste specie può rappresentare una preziosa fonte di proteine per l'alimentazione umana e animale (Becker, 2007).

I componenti strutturali primari delle proteine sono gli aminoacidi, ed il valore nutrizionale delle proteine è determinato dal loro contenuto ed in particolare dalla presenza di aminoacidi essenziali che gli uomini non sono in grado di sintetizzare e devono pertanto assumere tramite l'alimentazione. Il profilo aminoacidico delle proteine delle microalghe è simile a quello di fonti proteiche tradizionali, come il latte, la carne, la soia e le uova (Bleakley and Hayes, 2017) e rispetta la composizione di riferimento per una dieta proteica bilanciata, stimata dalla *World Health Organization* (WHO) e dalla *Food and Agriculture Organization* (FAO) nel 1973 (FAO and WHO, 1973). La biomassa delle microalghe potrebbe quindi rappresentare un importante complemento o sostituto alle proteine di origine animale, la cui produzione ha un notevole impatto ambientale (emissione di gas serra ed utilizzo intensivo di risorse come fertilizzanti, terra ed acqua) e non è sostenibile a lungo termine, specialmente in uno scenario di massiccio incremento della popolazione globale.

Oltre al loro valore nutrizionale, è importante sottolineare che alcune proteine presenti nelle microalghe possono anche avere un'attività biologica di interesse: ad esempio proteine bioattive come le lectine, peptidi bioattivi e le ficobiliprotei-

ne trovano applicazione nella farmaceutica, dettagliate in seguito (Bleakley and Hayes, 2017).

Nel complesso, la composizione proteica delle microalghe rende la loro biomassa estremamente preziosa per scopi alimentari e nutraceutici. In essa, infatti, il valore nutrizionale di fonti alimentari vegetali si unisce a quello di proteine di origine animale, a cui si aggiungono i vantaggi di una catena di produzione potenzialmente eco- ed auto-sostenibile.

1.2.2 Lipidi

Tutti gli organismi viventi contengono diverse classi di lipidi che si distinguono per le loro funzioni principali tra lipidi strutturali oppure di accumulo. Nel primo caso, queste classi sono costituite da lipidi polari che hanno una funzione strutturale come costituenti della membrana plasmatica o delle membrane intracellulari, mentre nel secondo caso si tratta di lipidi neutrali con una funzione principale di accumulo di energia (Fig. 1.2). La prima categoria è composta principalmente da fosfolipidi, glicolipidi e colesterolo, mentre la seconda da triacilgliceroli.

Tutti i lipidi, sia polari che neutri, contengono acidi grassi con una lunga catena carboniosa alifatica che può variare in lunghezza, grado di insaturazione e struttura. La biomassa delle microalghe presenta una composizione di acidi grassi estremamente diversificata, plasmata dalle diverse nicchie ecologiche in cui questi organismi si sono evoluti (Khozin-Goldberg, 2016) e da un'analisi di oltre 2000 diversi ceppi di microalghe sono emersi 76 diverse categorie di acidi grassi (Lang *et al.*, 2011). La composizione di acidi grassi delle microalghe si diversifica anche da quella delle piante terrestri. In quest'ultime, le categorie di acidi grassi più rappresentate presentano catene carboniose di 16 o 18 atomi di carbonio con un massimo di 3 gradi di insaturazione, mentre nelle microalghe sono presenti in abbondanza anche acidi grassi a lunga catena fino a 20 o 22 atomi di carbonio e polinsaturi quindi con un numero maggiore di gradi di insaturazione (ad esempio fino a 6 come nell'acido docosaesanoico, 22:6^{Δ4,7,10,13,16,19}, DHA) (Khozin-Goldberg, 2016). Le microalghe sono naturali produttori di questi acidi grassi polinsaturi a catena lunga, che sono importanti componenti strutturali e precursori di eicosanoidi biologicamente attivi. Tra gli acidi grassi maggiormente presenti nella biomassa delle microalghe si annoverano gli ω-3 e ω-6, così chiamati per la posizione dell'ultimo doppio legame nella catena alifatica, (ad esempio l'acido eicosapentanoico, 20:5^{Δ5,8,11,14,17}, EPA, come ω-3 e l'acido arachidonico, 20:4^{Δ4,8,11,14}, ARA, come ω-6). Le più importanti categorie di acidi grassi polinsaturi (cioè ARA, DHA ed EPA) sono poco frequenti nelle microalghe del gruppo tassonomico delle Clorofite (Lang *et al.*, 2011), ma sono invece molto frequenti tra le Rodofite (a cui appartengono specie del genere *Porphyridium*), nelle Eustigmatofite (a cui appartengono specie del genere *Nannochloropsis*), nelle Bacillariofite (a cui appartengono specie di diatomee del genere *Phaeodactylum*) e nelle Aptofite (a cui appartengono specie di microalghe del genere *Isochrysis*) (Khozin-Goldberg, 2016). Le microalghe sono i produttori primari che forniscono

1. Metaboliti di interesse industriale da microalghe

ad altri organismi dell'ecosistema acquatico questi preziosi componenti (Khozin-Goldberg, 2016) ed il pesce, ad oggi la principale fonte di questi tipi di acidi grassi per l'uomo, ha in realtà una limitata capacità di sintetizzare questi composti *de novo* che sono invece assunti tramite l'alimentazione.

1.2.2.1 Lipidi strutturali

Le principali categorie di lipidi strutturali che si trovano nella biomassa delle microalghe sono glicoglicerolipidi e fosfoglicerolipidi, entrambi lipidi polari. Essi sono composti da una porzione di diacilglicerolo (DAG) legata ad un gruppo chimico polare. Nei glicoglicerolipidi, il gruppo polare è rappresentato da uno zucchero mentre nei fosfoglicerolipidi si tratta di un gruppo fosfato. Tra i glicoglicerolipidi, le microalghe mostrano i galattolipidi che, come nelle piante, sono i lipidi più abbondanti nel cloroplasto. Le categorie più abbondanti sono i monogalattosildiacilgliceroli (MGDG), i digalattosildiacilgliceroli (DGDG) ed i sulfochinovosildiacilgliceroli (SQDG).

I fosfoglicerolipidi sono invece maggiormente rappresentati nelle membrane plasmatica ed extraplastidiali e le principali classi presenti sono il fosfatidilglicerolo (PG), fosfatidilcolina (PC), fosfatidiletanolamina (PE) e fosfatidilinositolo (PI). Le microalghe presentano una particolare categoria di glicerolipidi in cui la porzione di diacilglicerolo lega un gruppo betainico (ad esempio il lipide diacilgliceroltrimetilomoserina, DGTS), che è maggiormente presente nella membrana plasmatica delle microalghe ed è invece poco rappresentata nelle piante terrestri (Dembitsky, 1996).

1.2.2.2 Lipidi di accumulo

I lipidi neutrali includono triacilgliceroli (TAG), diacilgliceroli (DAG), steroli ed esteri sterolici anche se alcune specie di microalghe, ad esempio *Botryococcus braunii*, possono sintetizzare anche idrocarburi ed eteri lipidici. Vari organismi hanno evoluto la capacità di sintetizzare tali categorie di molecole per accumulare energia metabolica, poiché sono macromolecole con un elevato grado di riduzione e di conseguenza la loro idrolisi genera più energia metabolica rispetto a proteine e carboidrati a parità di peso [ad esempio, 1 g di triacilgliceroli può generare circa sei volte la quantità di energia metabolica della stessa quantità di amido (Berg *et al.*, 2002)]. Alcune specie di microalghe, ad esempio quelle appartenenti al genere *Nannochloropsis*, accumulano lipidi neutrali fino al 40-60% del peso della biomassa secca (Ma *et al.*, 2016), a testimonianza del fatto che una frazione consistente del carbonio assimilato viene convogliato nella loro sintesi (Wang *et al.*, 2014). I lipidi neutrali sono generalmente compartimentalizzati in corpi lipidici e separati dall'ambiente cellulare citosolico o stromale del cloroplasto da una membrana composta da glicero- e fosfolipidi (Maeda *et al.*, 2017). Il ruolo dei corpi lipidici non sembra limitato a quello di compartimenti metabolicamente inerti per l'accumulo di energia metabolica e carbonio, ma svolgono anche altre importanti funzioni biologiche (Solovchenko, 2012), quali la

partecipazione alla riorganizzazione delle membrane cellulari durante l'adattamento a cambiamenti delle condizioni di illuminazione, salinità, temperatura e disponibilità di nutrienti. L'esposizione a condizioni di stress può infatti portare al danneggiamento delle membrane, la cui riparazione può attingere agli acidi grassi presenti nei lipidi neutrali nei corpi lipidici invece di dipendere da una sintesi *de novo*, al fine di garantire una rapida risposta di adattamento (Khozin-Goldberg *et al.*, 2005).

Un'ultima funzione dei corpi lipidici è quella di deposito di pigmenti fotoprotettivi. Alcune specie di microalghe (tra cui quelle appartenenti ai generi *Haematococcus* e *Dunaliella*) sono infatti in grado di accumulare pigmenti lipofili (ad esempio caroteni come il β -carotene) nei corpi lipidici (Solovchenko and Merzlyak, 2008). Quest'ultimi assorbono la radiazione luminosa e proteggono così l'apparato fotosintetico in condizioni di stress luminoso. Anche altri pigmenti fotoprotettivi, come la xantofilla astaxantina, vengono accumulati nei corpi lipidici (ad esempio nella microalga *Haematococcus pluvialis*), ma la loro natura chimica è più polare dei caroteni e perciò richiede la loro conversione in esteri di acidi grassi (Zhekisheva *et al.*, 2002).

1.2.3 Carboidrati

I carboidrati sono un'ampia categoria di macromolecole che include zuccheri monomerici (monosaccaridi) e le loro versioni polimeriche (di-, oligo- e polisaccaridi). Il profilo saccaridico della biomassa delle microalghe è specie-specifico e quindi molto variabile (Chen *et al.*, 2013). Tuttavia, tra le categorie comunemente più abbondanti nelle specie di microalghe più studiate si annoverano il glucosio, il ramnosio, lo xilosio ed il mannosio (Markou *et al.*, 2012). Alcune delle specie di microalghe attualmente caratterizzate presentano un considerevole accumulo di carboidrati (fino al 60 % del peso della biomassa secca) quali le alghe verdi appartenenti ai generi *Chlamydomonas* spp., *Scenedesmus* spp. e *Chlorella* spp. (Ho *et al.*, 2012). I carboidrati ottemperano a due funzioni principali nelle microalghe, ossia quella di accumulo di energia e quella di componenti strutturali nella parete cellulare (Fig. 1.2). Come macromolecole di accumulo, i carboidrati permettono di immagazzinare energia metabolica che poi può essere rilasciata in condizioni di limitazione, quali mancanza di luce o di fonti di carbonio. A questa categoria appartengono il glicogeno nei cianobatteri, l'amido florideo nelle microalghe rosse, l'amido in microalghe verdi, la crisolaminarina negli eteroconti, quali specie del genere *Nannochloropsis* e diatomee, e un analogo dell'amido noto come paramilo nelle Euglenofite (Sekharam *et al.*, 1989; Nakamura *et al.*, 2005). La parete cellulare delle microalghe è costituita da diversi strati di carboidrati strutturali e glicoproteine, la cui composizione è specie-specifica. Lo strato interno della parete è principalmente composto da cellulosa ed emicellulosa, mentre lo strato esterno generalmente contiene specifici polisaccaridi quali la pectina, l'agar e l'alginato. Lo strato esterno può presentare tre laminazioni, uno strato singolo e sottile, oppure mancare del tutto, a seconda delle diverse specie. Gra-

1. Metaboliti di interesse industriale da microalghe

zie alla sua struttura diversificata, quest'ultimo può essere utilizzato anche per identificare e classificare diversi gruppi di microalghe in categorie distinte (Yamada and Sakaguchi, 1982).

1.2.4 Pigmenti

Le tre principali classi di pigmenti fotosintetici nella biomassa delle microalghe sono le clorofille, i carotenoidi, che includono i caroteni e le xantofille, e le ficobiline (Fig. 1.2). Mentre le clorofille ed i carotenoidi sono liposolubili, le ficobiline sono idrofiliche. I pigmenti sono molecole che assorbono i fotoni di luce visibile e quindi hanno un ruolo fondamentale nella cattura dell'energia luminosa (Begum *et al.*, 2016).

1.2.4.1 Clorofille

Le clorofille sono costituite da una catena laterale alifatica e da un eterociclo porfirinico, composto da quattro anelli tetrapirrolici (che includono quattro atomi di carbonio e un atomo di azoto ciascuno), che al centro coordina uno ione magnesio (Scheer, 2008). L'anello porfirinico presenta un'alternanza di singoli e doppi legami coniugati e grazie a questa struttura chimica le clorofille hanno una forte banda di assorbimento nella regione della luce visibile, consentendo alle microalghe di catturare efficientemente l'energia luminosa del sole. Nelle microalghe troviamo cinque diversi tipi di clorofille, *a*, *b*, *c*, *d* ed *f*, la cui struttura è accomunata dal medesimo anello porfirinico e si differenzia invece per la presenza di diversi sostituenti e catene laterali.

La clorofilla *a* è presente in tutte le microalghe e in generale in tutti gli organismi che fanno fotosintesi ossigenica. La clorofilla *b* è invece caratteristica delle microalghe verdi e piante terrestri (Rüdiger, 2007). Mentre la clorofilla *a* ha anche un ruolo nei centri di reazione dei fotosistemi per iniziare le reazioni fotochimiche alla base della fotosintesi, la clorofilla *b* è legata solo ai complessi antenna periferici, la cui funzione è incrementare l'efficienza di cattura dell'energia luminosa (Eggink *et al.*, 2001).

La clorofilla *c* si differenzia dalla *a* e *b* per la mancanza della catena laterale alifatica. Come per la clorofilla *b*, è un pigmento accessorio che si trova legato alle proteine antenna in microalghe brune e dinoflagellati (Zapata *et al.*, 2007). La clorofilla *d* è una delle forme più rare di clorofilla ed è stata trovata solo in alcune specie di alghe rosse e cianobatteri, adattati alla vita in ambienti estremi in cui l'energia luminosa disponibile è molto limitata ed è in grado di assorbire luce nel vicino infrarosso, oltre i 700 nm (Miyashita *et al.*, 1996). La clorofilla *e* è una rara forma di clorofilla trovata principalmente in microalghe del genere *Tribonema* e *Vaucheria* in cui funge da pigmento accessorio (Maistro *et al.*, 2016). La Clorofilla *f* è una forma recentemente scoperta nei cianobatteri e, come la Chl *d*, assorbe la luce anche nella regione del vicino infrarosso ed è implicata nella risposta ad ambienti con disponibilità di luce molto ridotta (Trinugroho *et al.*, 2020).

1.2 Composizione biochimica delle microalghe

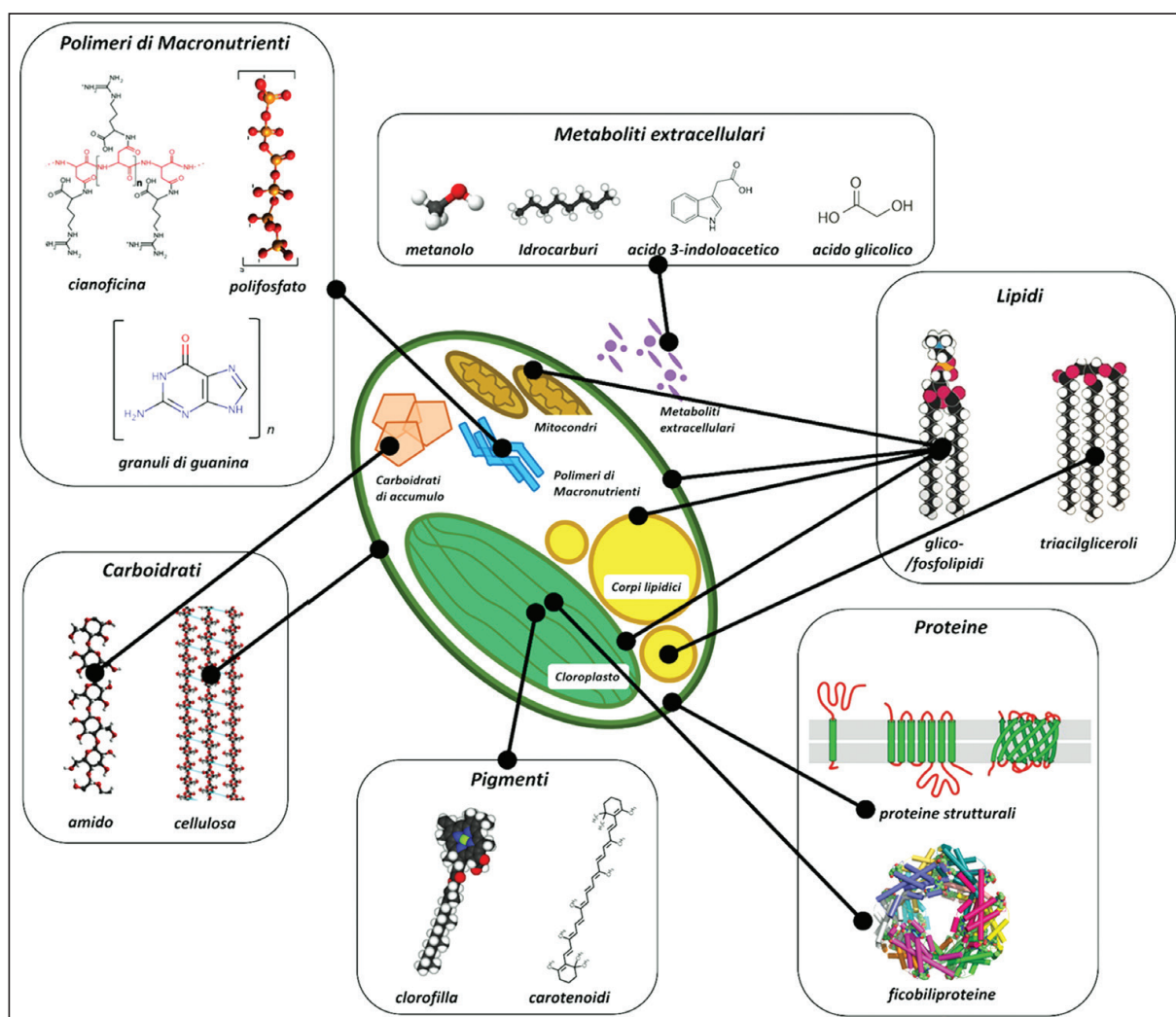
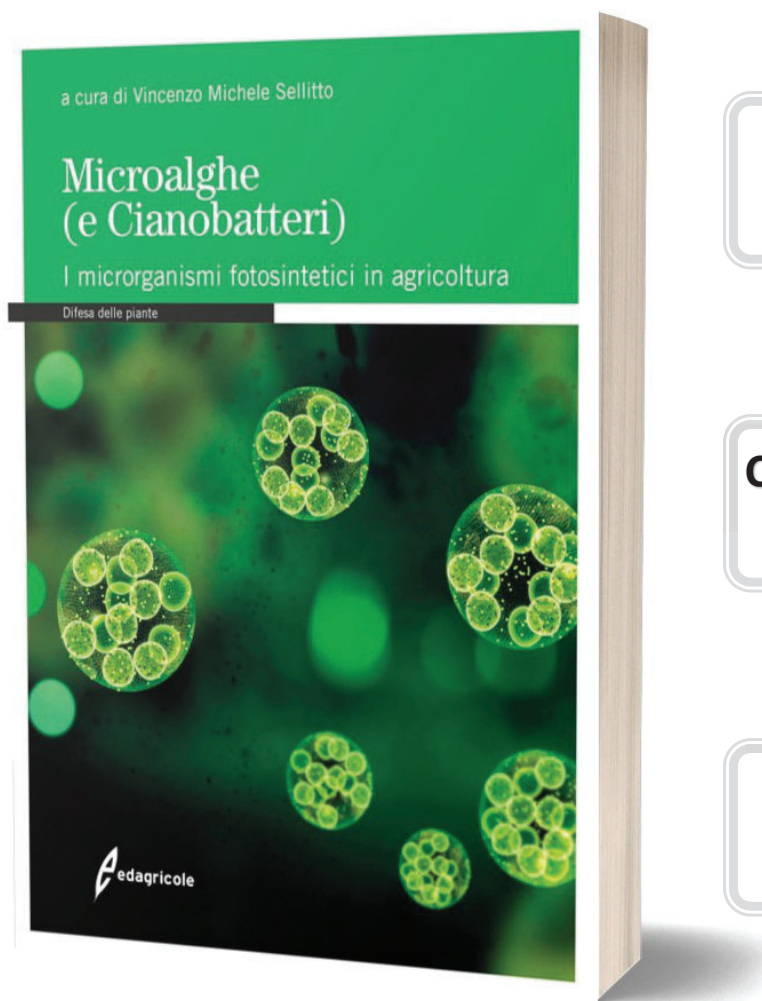


Figura 1.2 – Principali classi di macromolecole e metaboliti sintetizzate dalle microalghe. Le microalghe sintetizzano un ampio spettro di molecole con un ruolo funzionale oppure strutturale. Tra queste si annoverano polimeri di accumulo di macronutrienti nel citosol (ad esempio la cianoficina, il polifosfato ed i granuli di guanina); I carboidrati possono avere un ruolo funzionale o strutturale, come l'amido con il ruolo funzionale di accumulo di energia metabolica e la cellulosa che invece ha un ruolo strutturale come costituente della parete cellulare; I pigmenti ottemperano alla funzione di cattura dell'energia luminosa per avviare il processo della fotosintesi e si trovano nelle membrane tilacoidali del cloroplasto; Le proteine rivestono un ruolo strutturale, come quelle trovate nella membrana plasmatica, oppure un ruolo funzionale, come le ficobiliproteine che sono coinvolte nella cattura della luce per avviare il processo fotosintetico; Anche i lipidi possono presentare un ruolo funzionale oppure strutturale, come i lipidi neutrali (ed esempio i triacilgliceroli) che fungono da fonte di accumulo di energia e carbonio nei corpi lipidici oppure i fosfolipidi che svolgono un ruolo strutturale in tutte le membrane cellulari delle microalghe. Alcune specie di microalghe sono anche in grado di sintetizzare e secernere metaboliti con lo scopo di interagire con l'ambiente circostante, di cui in figura sono riportati alcuni esempi.

Microalghe (e Cianobatteri)



**Clicca QUI per
ACQUISTARE il libro ONLINE**

**Clicca QUI per scoprire tutti i LIBRI
del catalogo EDAGRICOLE**

**Clicca QUI per avere maggiori
INFORMAZIONI**