

Les microalgues com a alternativa de futur en l'alimentació

Treball d'aprofundiment bibliogràfic

Paula Mas Franco

Treball de Fi de Grau

Grau de Nutrició Humana i Dietètica

Juny 2023



Universitat de Barcelona

Departament de Nutrició, Ciències de l'Alimentació i Gastronomia

Facultat de Farmàcia i Ciències de l'Alimentació



Aquesta obra està subjecta a una llicència [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Les microalgues com a alternativa de futur en l'alimentació

Paula Mas Franco ¹

¹ Facultat de Farmàcia i Ciències de l'Alimentació, Universitat de Barcelona

* Correspondència: pmasfran50@alumnes.ub.edu

Resum: Les fonts proteiques actuals majoritàries tenen un greu impacte sobre el medi ambient i el seu consum per a l'alimentació humana està augmentant atès el creixement de la població. És necessària la cerca de noves fonts i les microalgues poden esdevenir una opció sostenible per nodrir als humans, així com a la vegada respectuosa amb el medi ambient. Són organismes aquàtics amb molt potencial, degut al contingut en proteïnes, àcids grassos omega-3, minerals, vitamines i prebiòtics, entre d'altres. També contenen altres compostos bioactius que poden resultar d'interès. Aquest article de revisió pretén recollir la informació actual sobre les diferents espècies de microalgues, comparant-les nutricionalment amb altres fonts alimentàries, així com mostrar si poden resultar una opció saludable per l'alimentació humana en un futur pròxim. Tot i el seu potencial, actualment existeixen reptes com l'organolèptic i la innocuïtat, entre d'altres, els quals s'han d'abordar perquè pugui esdevenir un aliment quotidià.

Keywords: biomassa microalgues; microalgues; omega-3; proteïna; sostenibilitat; valor nutricional.

Abstract: The majority of current protein sources have a serious impact on the environment and their consumption for human feeding is increasing due to population growth. The search for new sources is necessary and microalgae can become a sustainable option for feeding humans, as well as being environmentally friendly. They are aquatic organisms with great potential, due to their protein content, omega-3 fatty acids, minerals, vitamins and prebiotics, among others. They also contain other bioactive compounds that may be of interest. This review article aims to gather current information on the different species of microalgae, comparing them nutritionally with other food sources, as well as to show whether they may prove to be a healthy option for human consumption in the near future. Despite its potential, there are currently challenges such as organoleptic and security issues, among others, which must be addressed so that it can become an everyday food.

Keywords: microalgae biomass; microalgae; omega-3; protein; sustainable; nutritional value.

Citation: Mas Franco, Paula. Les microalgues com alternativa de futur en l'alimentació.

Academic Editor: Paula Mas Franco

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Objectius de Desenvolupament Sostenibles (ODS): OD2 "Gana zero": les microalgues són una font de nutrients sostenible en comparació amb altres, ja que aquestes no competeixen amb la producció d'aliments pel consum humà i no requereixen d'aigua dolça per créixer. Concretament la meta 2.4 sobre "assegurar la sostenibilitat dels sistemes de producció d'aliments i aplicar pràctiques agrícoles resil·lients que augmentin la productivitat i la producció, contribueixin al manteniment dels ecosistemes, enforixin la capacitat d'adaptació al canvi climàtic, els fenòmens meteorològics extrems, les sequeres, inundacions i altres desastres, i millorin progressivament la qualitat i el terra"; OD3 "Salut i benestar": les microalgues contenen compostos nutricionals vitals per una bona salut i benestar, com àcids grassos omega-3 i proteïnes. Concretament la meta 3.4. sobre "reduir un terç la mortalitat prematura per malalties no transmissibles mitjançant la prevenció i el tractament i promoure la salut mental i el benestar"; OD13 "Acció pel clima": les microalgues utilitzades com aliment podrien mitigar l'efecte del canvi climàtic, ja que poden créixer ràpidament i no necessiten terres cultivables ni pluges regulars, poden esdevenir una alternativa a la ramaderia o l'aquicultura i tenen la capacitat de donar suport a la producció de cultius i ramaderia [1].

Sustainable Development Goals (SDG): OD2 “Zero hunger”: microalgae are a sustainable source of nutrients compared to other sources, they don't compete with the production of food for human consumption and do not require fresh water to grow up. Specifically goal 2.4 on "ensure the sustainability of food production systems and apply resilient agricultural practices that increase productivity and production, contribute to the maintenance of ecosystems, strengthen the capacity to adapt to climate change, extreme weather phenomena, droughts, floods and other disasters, and progressively improve the quality and the land"; OD3 “Health and well-being”: microalgae contain vital nutritional compounds for good health and well-being, such as omega-3 fatty acids and proteins. Specifically, goal 3.4. on "reducing premature mortality from non-communicable diseases by a third through prevention and treatment and promoting mental health and well-being"; OD13 “Climate action”: microalgae used as food can mitigate the effect of climate change, because they grow quickly and don't need arable land or regular rainfall, they can become an alternative to livestock or aquaculture and have the capacity to support crop and livestock production [1].

1. Introducció

S'estima que el nombre de persones a nivell mundial augmenti fins als 9,7 bilions per l'any 2050 [2], provocant un creixement en la demanda d'aliments que oscil·la entre un 35% i 56%, respecte al 2010 [3]. Actualment, prop del 45% dels nens que moren, ho fan a causa de la desnutrició i es considera que 100.000 milions de persones no assoleixen els requeriments de proteïnes, segons l'Organització Mundial de la Salut (OMS) [4]. La fam és un problema actual, sobretot en països en vies de desenvolupament i s'estima que el risc de patir fam podria augmentar fins a un 8% en el període de 2010-2050 [3]. El creixement exponencial de la població exacerba el deteriorament de la inseguretats alimentària a escala mundial, entenent aquesta com aquella falta de disponibilitat dels aliments [5]. Successos com la pandèmia de COVID-19 i la guerra a Europea intensifiquen el problema d'inseguretats [6]. Així mateix, la producció del gènere de microalga *Spirulina* compta amb el suport de les Nacions Unides en la lluita contra la desnutrició [7].

Pel que fa a l'alimentació, un dels nutrients més importants en la dieta dels humans és la proteïna, la qual actualment es basa en aquelles que provenen d'animals, en la que les fonts terrestres i aquàtiques són prop del 40% de la ingesta de proteïna mundial [7,8]. Els sistemes de producció de proteïna d'origen animal actuals tenen un greu impacte sobre el medi ambient per mitjà de les emissions a l'aire, l'aigua i el sòl, així com la utilització dels recursos naturals. Les fonts alimentàries que ocupen més terreny són aquelles provinents de la ramaderia (carn, llet i ous), així com microalgues com la *Chlorella* i la *Spirulina* requereixen menys terreny comparades amb les anteriors [7]. Així mateix, produir 1 kg d'aminoàcids essencials (EAA) provinents de la vedella requereix 148.000 litres d'aigua i 125 m² de terra fèrtil. En canvi, per produir 1 kg d'EAA provinent de microalgues es requereix 20 litres d'aigua i 1,6 m² de terra [9].

Els recursos de la Terra són limitats i, per tant, és convenient generar estratègies i protocols d'adaptació per la inclusió d'alternatives que ajudin a satisfer aquestes necessitats alimentàries d'un futur pròxim. El sistema alimentari actual hauria de canviar per fer front a la crisi climàtica [10] i en conseqüència, trobar una alternativa que impacti menys en el canvi climàtic que les fonts actuals [11]. Entre les alternatives que existeixen en l'actualitat es troben les noves fonts proteïques, les quals tenen la intenció de produir volums considerables de forma relativament ràpida, per tal de nodrir a la població i alhora mitigar els efectes del canvi climàtic. Dintre d'aquest grup d'aliments es troben els insectes, la carn cultivada, les microalgues, les basades en vegetals (*plant-based*, en anglès), les proteïnes unicel·lulars (*Single cell proteins*, en anglès) com per exemple les micoproteïnes, i, en últim lloc, les obtingudes de residus agro-industrials.

L'interès per les microalgues ha crescut en els últims anys, gràcies al seu gran potencial. Un dels motius és que creixen ràpidament si es comparen amb les plantes terrestres i

també tenen una gran capacitat de producció amb poca inversió. Un altre dels motius és que podrien ajudar a mitigar la contaminació ambiental, perquè “són capaces de captar 1×10^{11} de CO_2 diari i produir el 50% d' O_2 de la Terra” [12], sent més eficients pel que fa a la fixació de CO_2 que les plantes terrestres [13,14]. A més a més, les microalgues poden créixer en condicions extremes, suportant els canvis que poguessin ocórrer en un futur, a causa del canvi climàtic [15]. A causa de l'interès i els potencials beneficis, aquest treball intenta profunditzar sobre el paper que pot tenir incloure-les en l'alimentació humana.

2. Materials i Mètodes

Per tal de fer aquesta revisió bibliogràfica s'ha fet ús de cercadors com “Web of Science” i “Google Acadèmic”. Per la introducció s'ha cercat articles sobre l'impacte en el medi ambient de les fonts dietètiques actuals.

Les paraules de cerca emprades han sigut: “microalgae”, “alternative proteins”, “microalgae biomass”, “nutritional value”, “protein”, “omega-3”, “prebiotic”, “astaxanthin”.

Els criteris d'inclusió van ser aquells articles que parlessin de microalgues i el seu mètode de cultiu, classificació, innocuïtat, composició nutricional, impacte mediambiental i acceptació dels consumidors. D'altra banda, els criteris d'exclusió han sigut articles publicats abans del 2002, tot i que la majoria d'ells es situen al voltant del 2020–2023. També s'han exclòs aquells que parlin sobre microalgues en àmbits com l'aqüicultura, química, o enginyeria de biosistemes, entre d'altres. Finalment, s'han exclòs aquells que no fossin en castellà o anglès. Amb tot, en aquesta revisió s'han inclòs 93 referències.

Respecte a la realització de figures pròpies s'ha emprat el programa Microsoft PowerPoint.

3. Què són les microalgues?

Les algues es divideixen en macroalgues i microalgues, les quals es diferencien pel seu tamany i el contingut d'òrgànuls [16]. Les microalgues són un grup d'organismes aquàtics eucariotes o procariotes de mida microscòpica, normalment unicel·lulars. La majoria d'espècies són fotosintètiques, i en conseqüència redueixen el CO_2 i produeixen O_2 . Tot i que els cianobacteris i les microalgues tenen diferències, en aquesta revisió s'ha inclòs als cianobacteris quan es parla de microalgues, per la similitud en el que pertoca a l'article.

Les microalgues són l'arrel de les cadenes alimentàries aquàtiques, ja que formen part del fitoplàncton marí. Tenen un metabolisme molt flexible, perquè el cultiu pot ser de tres formes diferents: de forma autòtrofa, les quals utilitzen l'energia de la fotosíntesi, per tant, CO_2 i llum; heteròtrofa, usant com a font d'energia compostos orgànics com glicerol, carbohidrats o àcids orgànics en absència de llum (poques espècies); i, en últim lloc, de forma mixòtrofica, que combina autòtrof i heteròtrof i així poder créixer amb ambdós mètodes [17], per exemple *Chlorella*, *Haematococcus sp.* o *Dunaliella salina* [18]. La majoria són autòtrofes i poques espècies poden créixer en condicions mixotròfiques o heteròtrofes [17]. De forma general, fixen el carboni per tal de convertir-lo en aliment (fotosíntesi) i després s'obté una biomassa. La seva producció és en medi aquàtic, i acostumen a necessitar llum solar, CO_2 , minerals, aigua (tant salada com dolça) i temperatura elevada, depenent el mètode emprat. Creixen en sistemes tancats en *fotobioreactors*, els quals són uns tubs de vidre, o bé en sistemes oberts, com són les anomenades piscines/estanys (Figura 1) [19,20].

En l'alimentació humana s'acostumen a comercialitzar en càpsules, pols, escates o com a complementos alimentosos [21]. També és costum, cada cop més, enriquir alguns aliments amb biomassa de microalgues [22]. S'utilitzen també en altres àmbits, com per exemple com a eina per produir biocombustible i, per tant, energia renovable, també com a alimentació del bestiar o el tractament d'aigües residuals (Figura 1).

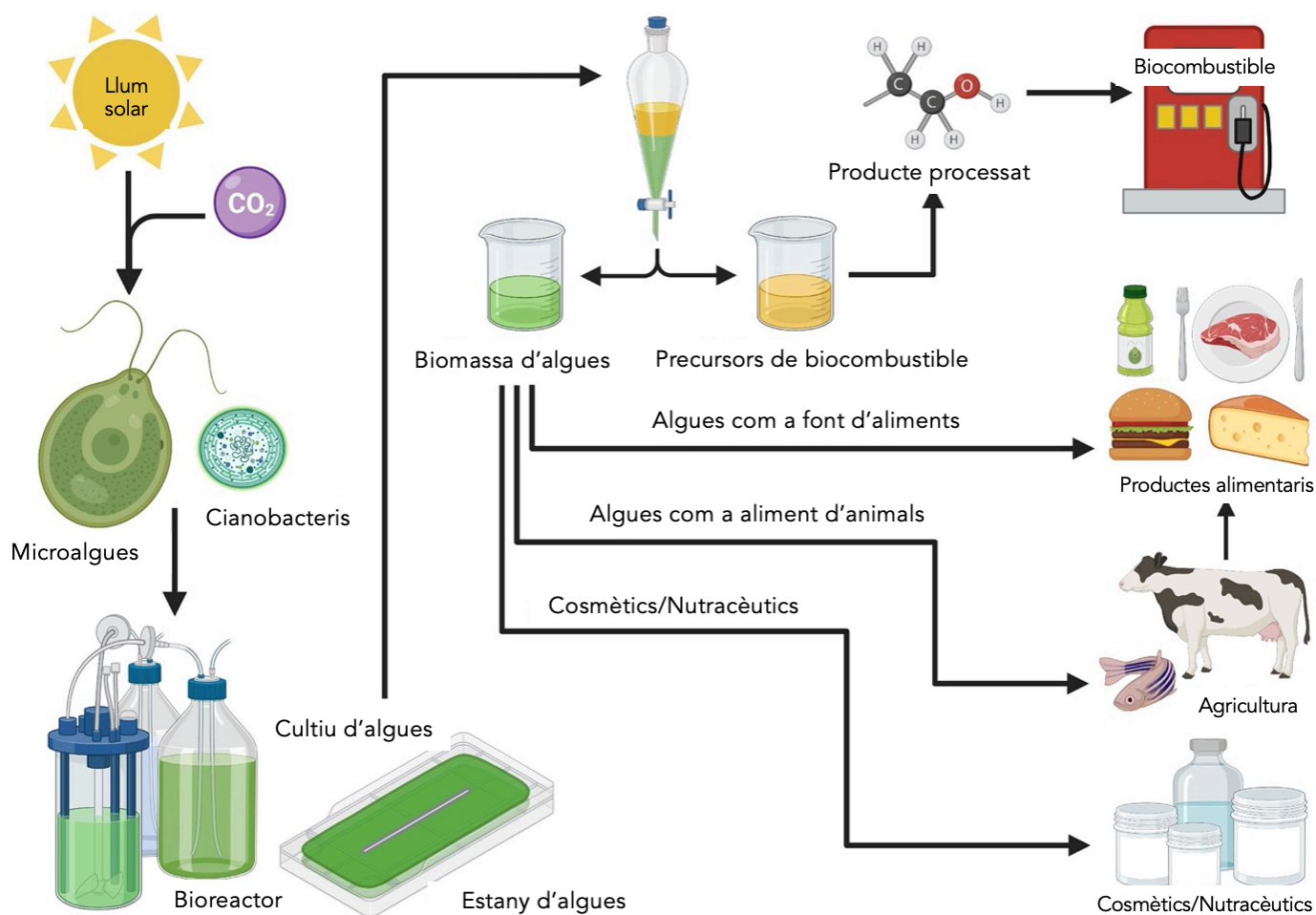


Figura 1. Producció de microalgues i usos. Extreta de Diaz, et al. [19]

142

143

4. Classificació de les microalgues

144

Pel que fa a la classificació, actualment no existeix una classificació específica que facin servir en taxonomia [16]. La Figura 2 mostra un resum de les espècies de microalgues que es poden trobar al mercat en l'actualitat i la seva taxonomia, sent les més comunes *Spirulina (Arthrospira)*, *Chlorella*, *Haematococcus* i *Dunaliella*. Els gèneres *Schizochytrium sp.* i *Ulkenia sp.*, de fet, no són microalgues sinó protistes tot i que sovint s'inclouen com a microalgues, possiblement com a estratègia de màrqueting [23]. Existeixen diversos grups de microalgues, en funció de les seves característiques, com per exemple el color; les de color blau-verd com *Arthrospira platensis*, les verdes com *Chlorella sp.* i *Haematococcus sp.*, així com les vermelles, entre elles *Porphyridium sp.* Si bé abans s'utilitzaven els noms d'*Arthrospira* i *Spirulina* depenent de si es parlava del complement o del gènere de microalgues, ara s'usen ambdós indistintament per referir-se al mateix.

155

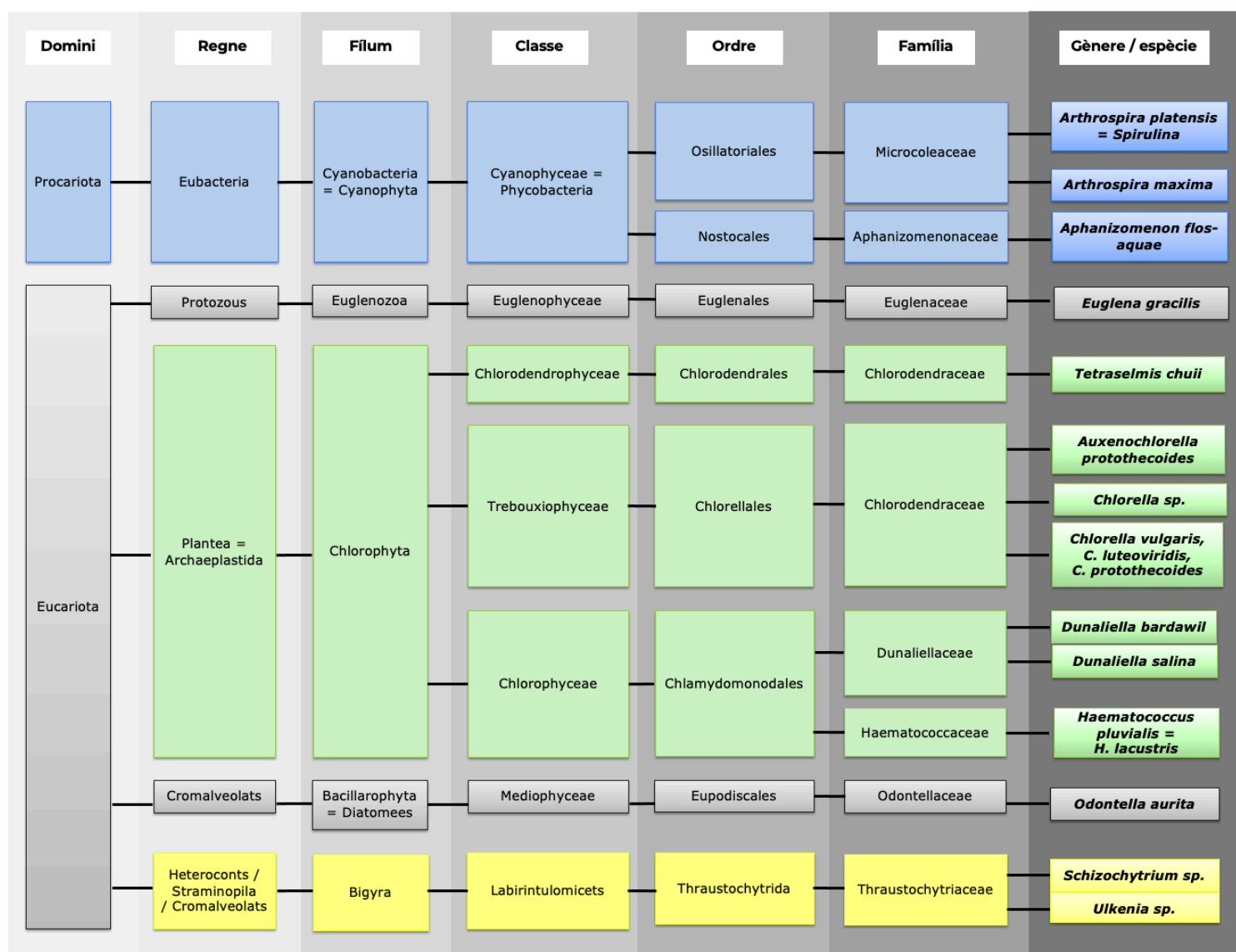


Figura 2. Classificació taxonòmica de les microalgues. Elaboració pròpia a partir de la referència [24].

156

5. Legislació

157

Existeixen moltes espècies de microalgues, però actualment hi ha 11 autoritzades a la Unió Europea (UE) per l'àmbit alimentari (Figura 3), aquestes poden ser utilitzades tant com ingredient com per complement alimentós, depenent de l'espècie. Pel que fa al consum alimentari humà, els aliments que s'han consumit en un grau significatiu a qualsevol país membre de la UE abans del 15 de maig del 1997 es consideren segurs per ser consumits [25]. Aquells que ho fan a posteriori han de sotmetre's a una avaluació de seguretat per part de l'EFSA (European Food Safety Authority) per poder comercialitzar-se [25], així com trobar-se legisats pel Reglament Novel Food (Reglament (UE) 2015/2283. Als EUA (Estats Units d'Amèrica), en canvi, es regeixen per un altre tipus de normativa, com són les substàncies GRAS (Generally Recognized As Safe), les quals les reconeix la FDA (Food and Drug Administration) [26]. D'altra banda, la regulació alenteix la venda i presència al mercat de soques amb molt potencial com serien *Nanochloropsis*, *Isochrysis* o *Dunaliella* [27].

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

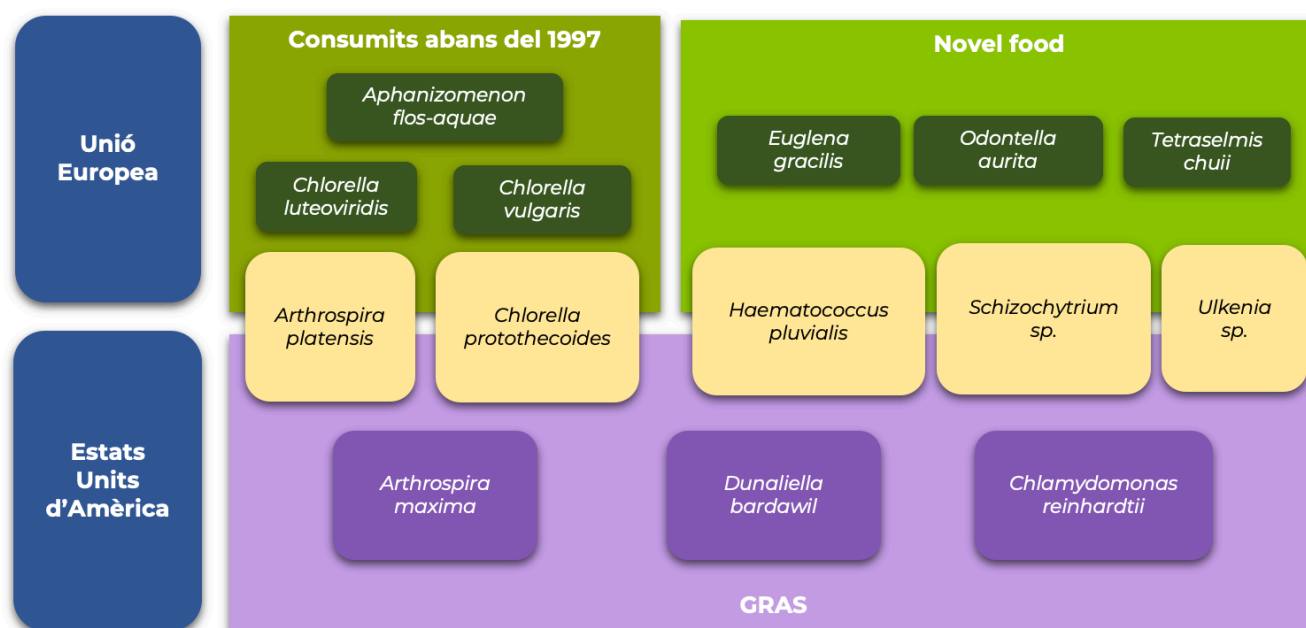


Figura 3. Microalgues autoritzades pel consum alimentari a la UE i als EUA. Elaboració pròpia a partir de la referència [4].

6. Valor i composició nutricional

Les microalgues tenen interès pel contingut en proteïnes, però no és l'únic aspecte destacable nutricionalment. Així mateix, contenen àcids grassos no essencials de tipus omega-3, importants per la dieta humana, ja que les fonts més destacables són les que provenen de peixos i marisc. També destaca el contingut de carbohidrats en forma de polisacàrids i oligosacàrids, els quals són potencialment prebiòtics. A més a més, poden contenir compostos d'interès nutricional com els carotenoides, ficocianina i vitamines. En qualsevol cas, s'ha de tenir en compte que el contingut nutricional tant de macronutrients com de micronutrients varia entre les diferents espècies de microalgues.

6.1. Proteïnes

La proporció de proteïna com a biomassa seca pot representar fins al 70% del seu pes [4]. Aquest, varia entre les diferents espècies d'entre les quals destaca l'*Arthrospira platensis*, amb una mitja de 44,5% i l'*Aphanizomenon flos-aquae* amb un 62%, tal com es troba resumit a la Taula 1.

Actualment, pel que fa al mercat alimentari, la biomassa de les microalgues s'acostuma a afegir en forma de pols a altres productes. Si es pren com a mitja una ració de 100 g de pollastre i peix, i per tal d'arribar a la quantitat que aquests proporcionen, s'haurien d'afegir 34,7 g d'*A. flos-aquae* per arribar als 21,5 g de proteïna de pollastre i 32,09 g per arribar als 19,9 g de proteïna provinent del peix. Pel que fa a l'*A. platensis* seria necessari afegir 48,3 g per tal d'arribar als 21,5 g de proteïna de pollastre i 44,7 g per arribar als 19,9 g proteïna de peix, tenint en compte les mitjanes de cada font. Per tant, amb uns 34-49 g de biomassa d'aquestes dues microalgues s'obtidria la quantitat de proteïna equivalent a una ració de 100 g de pollastre o peix. En últim lloc, per obtenir-ne de la proteïna de l'ou s'haurien d'afegir 75 g d'*A. flos-aquae* i 105 g d'*A. Platensis*, així com per la farina de soja haurien de ser 58 g de biomassa per aconseguir la proteïna d'*A. flos-aquae* i 80 g d'*A. Platensis*.

La quantitat que s'afegeix de microalgues a productes alimentaris acostuma a ser d'entre l'1% i 5%. Tenint en compte això, si s'afegeixen 3 g d'*A. flos-aquae*, s'obtidrien 1,86 g de proteïna, així com si s'afegeixen 3 g d'*A. platensis* equivaldrien a 1,59-2,1 g de proteïna. Considerant aquest fet, la incorporació hauria de ser major per tal que pugui ser rellevant en el contingut de proteïnes.

Taula 1. Contingut de proteïnes de l'ou, pollastre, peix, farina de soja i diferents espècies de microalgues. Recull d'informació a partir de diferents fonts.

Font alimentària	Proteïna (% matèria seca)	Referència
Pollastre	19–24	[14]
Peix	19,2–20,6	[14]
Ou	47	[14]
Farina de soja	36	[14]
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	62	[14]
<i>Arthrospira platensis</i>	17–72	[4,28]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	[14]
<i>Chlorella vulgaris</i>	48–58	[14,28]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57–60	[14,28]
<i>Dunaliella salina</i>	29–57	[14,28]
<i>Euglena gracilis</i>	39–61	[14,28]
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25–48	[4,14,28,29]
<i>Isochrysis galbana</i>	27–56	[14,28]
<i>Schizochytrium sp.</i>	12	[4]
<i>Tetraselmis chuii</i>	31–47	[28]

Pel que fa a la qualitat proteica, ve determinada per diversos paràmetres entre els quals destaquen el balanç total d'aminoàcids, la proporció d'EAA, la digestibilitat, la bioaccessibilitat i biodisponibilitat de les proteïnes [4]. Respecte als EAA, les fonts animals com la carn o els ous contenen tots els EAA, i algunes microalgues contenen tots els EAA en quantitats suficients (Taula 2) i, per tant, es poden considerar proteïnes completes [30]. De tota manera, existeixen variacions entre publicacions científiques, com comenta Van De Walle, et al., atès que el contingut i la composició de proteïnes depenen de factors com per exemple les condicions ambientals, les de creixement, els mètodes d'extracció i determinació d'aminoàcids [31].

Taula 2. Contingut d'aminoàcids de diferents espècies de microalgues i els valors de referència de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), mesurat en mg/g de proteïna. Adaptació de la referència [31].

Aminoàcid	<i>Arthrospira platensis</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Dunaliella bardawil</i>	<i>Tetraselmis chuii</i>	Valors de referències FAO
Histidina	22	18–20	18	16–22	18
Isoleucina	45–67	36–38	42	34–40	31
Leucina	98	88–93	110	66–75	63
Lisina	48–71	48–84	70	53–57	52
Metionina	25	22	23	19	nd
Fenilalanina	53	50	58	61	nd
Treonina	62	48	54	53	27
Triptòfan	3	21	7	15	7,4
Valina	71–78	55–60	58	48–58	42
SAA (Met + Cys)	34	36	35	32	26
AAA (Phe + Tyr)	106	84	95	105	46

nd: no disponible

Per tal d'avaluar la biodisponibilitat dels aminoàcids es recomana la puntuació corregida d'aminoàcids per la digestibilitat de les proteïnes (PDCAAS) i la digestibilitat individual dels aminoàcids indispensables a la dieta (DIAAS). Existeixen diferències entre ambdós, i una de les més importants és que la puntuació PDCAAS fa servir la digestibilitat a nivell fecal, en canvi el DIAAS la utilitza a nivell d'ili [32]. Per tant, la FAO recomana fer servir el DIAAS, ja que és més precís [33]. Actualment, no hi ha dades disponibles sobre els valors de DIAAS de la biomassa de microalgues o els productes proteics en base a microalgues pels humans. Aleshores, es necessiten més estudis emprant DIAAS per l'avaluació de la qualitat proteica [4,34].

Les puntuacions de PCAAS majors a 1 es trunquen a 1 i les que són inferiors es consideren subòptimes [35]. En l'article elaborat per Lucakova, et al. argumenten com les xifres que s'han obtingut de PDCAAS de les diferents microalgues són menors d'1, les quals es poden deure a factors antinutricionals com les parets cel·lulars, aquestes es poden unir a la proteïna disponible en elles i limitar la digestió completa per part dels humans [4]. Algunes de les poques dades que es tenen de PDCAAS són l'*Arthrospira platensis* amb un 0,84 i la *Chlorella vulgaris* amb 0,77 [4]. Altres proteïnes com l'ou, la proteïna del sèrum de llet o la soja tenen PDCAAS al voltant de l'1,0 [35] i proteïnes com les mongetes, pèsols i cigrons tenen valors inferiors als de les microalgues [6]. Amb tot això, el PDCAAS no és un mètode òptim per si sol, degut, en part, a no poder diferenciar proteïnes que tenen nombre elevat de PDCAAS [36].

Per tal de fer la proteïna més biodisponible es poden dur a terme tècniques de ruptura de la paret cel·lular. Com per exemple, en *Chlorella vulgaris* es va augmentar d'un valor de PDCAAS de 0,63 a 0,77 [28].

Per tant, tot i que tenen un alt contingut proteic i un bon perfil aminoacídic, equiparable a les fonts actuals riques en proteïna, és important fer més estudis *in vivo* per tal d'avaluar la digestibilitat i biodisponibilitat de les seves proteïnes [37].

6.2. Lípids

En relació amb el contingut de lípids en les microalgues, acostuma a ser d'entre 8% i 30% en condicions normals, tot i que altres estudis mostren d'entre 20% i 50% [38,39]. Tot i això, s'ha de tenir en compte que la seva biomassa pot arribar fins a un 85% de lípids si aquestes són sotmeteses a condicions d'estrès [40,41].

La composició varia depenent de l'espècie, per exemple la *Chlorella vulgaris* conté àcid oleic, palmític i linolènic, mentre que la *Spirulina* és font d'àcid gamma-linolènic (omega-6), esterols, àcid palmític, làuric i oleic [16].

D'entre els àcids grassos (AG) que contenen les microalgues, es troben els essencials (AGE) en quantitats importants, sempre depenent de l'espècie. Aquests AGE, per l'organisme humà solen ser de tipus poliinsaturats (AGPI), els quals predominen els omega-3 i omega-6. Els AGE són indispensables a la dieta dels mamífers, ja que no poden sintetitzarlos *de novo* o en quantitats suficients a les necessàries [41].

Els AG omega-3 més importants són l'àcid linolènic (ALA), l'àcid eicosapentaenoic (EPA) i l'àcid docosahexanoic (DHA) i es troben principalment en peixos, especialment els grassos [5]. L'ALA, per la seva banda, s'obté de fonts vegetals com l'oli de llavors de lli, de colza o soja, o bé llavors de xia i ous [42]. L'EPA i DHA són sintetitzats a partir d'ALA, però el rendiment d'aquesta via en els mamífers és baixa i s'obtenen majoritàriament de la dieta. Les microalgues, junt amb protists, bacteris i fongs sí que són capaços de sintetitzar EPA i DHA *de novo*, i posteriorment ingereixen peixos i altres animals, així com els humans [43].

Les microalgues acumulen EPA i DHA (Taula 3), entre d'altres, a la membrana o al reservori lipídic [43]. El contingut d'EPA d'espècies com *Nannochloropsis oculata*, així com el DHA provinent de *Schizochytrium sp.* pot arribar a ser més elevat que els olis provinents de peixos greixosos (Taula 3).

Taula 3. Contingut d'àcids grassos poliinsaturats d'algunes fonts animals i de microalgues. Recull d'informació de diferents fonts.

Font alimentària	% omega-3 respecte al total d'AG		Referència
	EPA	DHA	
Oli de sardines	12,4–14,5	9,8–12,5	[44]
Oli de salmó	12,7–13,4	10,0–10,2	[44]
Oli d'anxova	9,0–18,2	8,7–13,0	[44]
Salmó	7,9	15,2	[45]
Verat enllaunat	2,3	7,8	[46]
Sardines enllaunades	10,9	5,0	[46]
<i>Isochrysis galbana</i>	25	nd	[4]
<i>Nannochloropsis oculata</i>	20–49	nd	[4,20]
<i>Pavlova lutheri</i>	12–18,2	9,8	[4,20]
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18,4–20	1,4	[4,20]
<i>Schizochytrium sp.</i>	5–15	5–50	[4,20]
<i>Thraustochytrium sp.</i>	7,5	69	[20]

nd: no disponible

Es necessita un equilibri entre omega-3 i omega-6 en l'organisme, ja que els dos AG competeixen entre ells per la seva síntesi. Tots dos tenen funcions rellevants en l'organisme, però les dietes com les occidentals, molt freqüents avui dia, contenen predominantment omega-6, i per tant desplaça la síntesi d'omega-3, així com els seus beneficis en l'organisme [47].

L'EPA i DHA provinent de microalgues té potencials efectes saludables en l'organisme; l'EPA pot tenir beneficis a nivell cardiovasculars, en el desenvolupament i suport mental, antiinflamatori, així com en la protecció contra l'aterosclerosi; pel que fa al DHA, podria tenir beneficis cardiovasculars, en la millora el desenvolupament del sistema nerviós, així com en la funció del cervell [38]. Un estudi fet amb 38 persones durant deu setmanes, de tipus creuat aleatoritzat, controlat amb placebo i doble cec amb microalgues versus oli de gira-sol, va mostrar com el consum d'aliments enriquits amb DHA a partir d'oli de microalgues de forma diària s'associa amb una reducció dels signes clínics i bioquímics d'inflamació en pacients amb artritis reumatoide [48].

La població no cobreix els requeriments diaris d'EPA i DHA [49], els quals són d'entre 0,250 g i 2 g/dia del conjunt EPA+DHA, segons la FAO [50]. Les principals fonts actuals d'omega-3 es troben peixos greixosos (blaus) com el salmó i el verat [51]. La quantitat de peix provinent del mar està en perill, a causa de la sobrepesca, el canvi climàtic (per exemple, l'augment en la temperatura del mar) i la contaminació ambiental [43,52]. S'estudien altres formes d'obtenir fonts riques en omega-3, com ara les plantes no modificades genèticament, però actualment tenen poca capacitat per produir-ne de bona qualitat [41]. És per aquests motius, que les microalgues poden esdevenir una alternativa viable per suplir les necessitats mundials d'omega-3. A més a més, podria ser útil per població vegetariana i vegana. Tal com mostra l'estudi fet per Ryckebosch, et al., alguns olis de microalgues com poden ser *Isochrysis*, *Nannochloropsis*, *Phaeodactylum*, *Pavlova* i *Thalassiosira* contenen EPA i DHA en nivells equiparables a l'oli de peix (Taula 3) [39].

L'EPA i/o DHA, en la majoria d'espècies de microalgues es troben en major quantitat a la fracció polar lipídica [53], comparat amb els peixos, els quals contenen únicament lípids neutres [47]. La presència d'aquests lípids a la fracció polar sembla ser més biodisponible i estable [39], tot i que existeixen estudis que mostren el contrari [54].

6.3. Hidrats de carboni

Quant al contingut d'hidrats de carboni d'algunes espècies de microalgues es troba resumit a la Taula 4. Tanmateix, la productivitat i el contingut de carbohidrats es pot modificar a través del sistema de cultiu i paràmetres ambientals [5]. Algunes espècies de microalgues com *Porphyridium*, *Phaeodactylum*, *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Isochrysis* i *Rhodella* són utilitzades per l'explotació de polisacàrids [55].

Taula 4. Contingut d'hidrats de carboni de diferents espècies de microalgues, expressat en % per matèria seca. Adaptat de la referència [56].

Espècie	Carbohidrats	Midó	Fibra dietètica	Oligosacàrids	
				XOS ¹	GOS ²
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	60,0	55,0	nd	nd	4,5
<i>Chlorella vulgaris</i>	55,0	37,0	1,4	7–19	14–26
<i>Chlorococcum sp.</i>	32,5	26,0	nd	27,0	9,0
<i>Nitzschia Closterium</i>	32,6	nd	nd	7,0	18,4
<i>Spirulina platensis</i>	54,4	2,7	0,4	5,4	13,3
<i>Tetraselmis sp.</i>	26,0	28,0	nd	nd	nd

¹XOS: xilooligosacàrids

²GOS: galactooligosacàrids

nd: no disponible

Els hidrats de carboni són els principals productes de la fotosíntesi i existeixen en forma de polisacàrids a les microalgues, majoritàriament [57]. Aquests són molt diferents depenent de l'espècie així com de l'estat de cultiu. Contenen polisacàrids d'emmagatzematge i estructurals (relacionats amb la paret cel·lular), els quals es troben localitzats en llocs diferents, i per tant amb funcions diferents.

Els cianobacteris com *Spirulina* acumulen glicògen i semi-amilopectina, les algues verdes com *Chlorella* sintetitzen midó i, per últim, les diatomees com *Odontella aurita* produeixen crisolaminarina i β -glucà [38]. Quant als estructurals, les microalgues eucariòtiques tenen de tipus cel·lulosa i hemicel·lulosa, i els cianobacteris acumulen peptidoglicans. Els cianobacteris secreten EPS (polisacàrids extracel·lulars), un compost que sembla tenir activitats especials com antioxidant i antibacterià, entre d'altres [57]. Tot i això, es necessiten més assajos, especialment realitzats en humans, per tal de donar afirmacions veraces al respecte.

A més, les microalgues també són potencialment font de prebiòtics, atès el contingut xilooligosacàrids (XOS), galactooligosacàrids (GOS) (Taula 4), entre d'altres [56]. Els prebiòtics tenen beneficis en la salut dels humans, ja que com no es produeix la digestió al sistema digestiu superior, permet a la microbiota utilitzar-la com a substrat [58]. No s'han trobat estudis on comparin el contingut de XOS i GOS de les microalgues amb altres aliments rics en aquests compostos, per tant, caldria dur a terme més investigacions en aquest camp per poder observar si existeixen diferències significatives.

6.4. Minerals

D'entre els minerals destaquen el calci i el ferro, on per exemple la *Spirulina* conté 910 mg de calci (Ca) i 9,36 mg de ferro (Fe) per cada 100g (Taula 5) [59,60], aquesta quantitat es compara amb la llet, pot arribar a tenir 1,8 cops més de Ca, així com si es compara amb els espinacs, pot contenir fins a 51 cops més de Fe [14]. L'avantatge de les microalgues front els espinacs és que poden tenir una millor biodisponibilitat perquè no presenten fitats ni oxalats [61].

Taula 5. Quantitats de minerals de la biomassa d'algunes espècies de microalgues i Ingestes Nutricional de Referència (diàries). Adaptat de les referències [59,60]

Mineral	<i>Chlorella vulgaris</i> (verda)	<i>Chlorella vulgaris</i> (taronja)	<i>Diacronema vlkianum</i>	<i>Haematococcus pluviialis</i>	<i>Isochrysis galbana</i>	<i>Spirulina maxima</i>	Ingesta Nutricional de Referència (INR)	
							14-19 anys	>20 anys
P	1,53%	1,01%	1,49%	1,31%	2,65%	1,29%	800 mg	700 mg
K	0,98%	0,45%	0,72%	0,97%	1,19%	2,58%	3500 mg	3500 mg
Ca	4,73%	0,80%	0,91%	0,25%	0,56%	0,91%	1150 mg	950 mg
Mg	1,46%	0,18%	0,53%	0,22%	0,96%	0,35%	350 mg H; 330 mg D	350 mg H; 330 mg D
Na	0,98%	4,84%	1,03%	5,87%	1,60%	8,53%	1500 mg	1500 mg
Cu	2,2 mg/kg	1,0 mg/kg	1,9 mg/kg	334,0 mg/kg	8,6 mg/kg	1,1 mg/kg	1,3 mg H; 1,1 mg D	1,3 mg H; 1,1 mg D
Mn	471,5 mg/kg	11,7 mg/kg	2548,7 mg/kg	111,9 mg/kg	801,0 mg/kg	24,6 mg/kg	3 mg	3 mg
Zn	17,5 mg/kg	17,8 mg/kg	91,3 mg/kg	232,2 mg/kg	19,2 mg/kg	3,5 mg/kg	11 mg H; 9 mg D	11 mg H; 8 mg D
Fe	166,3 mg/kg	17,2 mg/kg	208,1 mg/kg	822,7 mg/kg	14,6 mg/kg	93,6 mg/kg	11 mg H; 15 mg D	9,1 mg H; 18 mg D i 15 mg PM

H: homes; D: dones; PM: postmenopausa

La deficiència de Fe és una de les deficiències nutricionals més comunes [62]. Els estudis mostren que la *Chlorella* i la *Spirulina* poden ajudar a disminuir les deficiències de Fe i àcid fòlic, així com altres mostren com la *Spirulina* pot arribar a contrarestar l'anèmia [63]. Pel que fa a la biodisponibilitat d'aquest ferro provinent de microalgues, existeixen estudis en animals on se suplementen amb *Nannochloropsis oceànica*, els quals conclouen que poden millorar les reserves de Fe i les concentracions d'hemoglobina en sang dels ratolins amb anèmia [64].

Alguns estudis mostren com amb 3 g de biomassa seca de *Spirulina*, per exemple, es poden obtenir 6,5 mg de Fe [65]. Un altre estudi realitzat amb pa sense gluten va mostrar concentracions de Fe de 3,8 mg i 8,3 mg per cada 100 g en els pans, els quals contenen entre 1% i 3% de *Chlamydomonas sp* [66]. Si es comparen aquestes dades amb fonts riques en Fe com poden ser 3,4% en vedella cuinada o 3,2% en xai cuinat, s'aprecia que poden resultar valors similars [67]. Tot i això la carn té una biodisponibilitat en l'organisme elevada, en comparació amb fonts vegetals, degut a l'elevat contingut de Fe de tipus hemo, entre altres motius [68]. Per tant, és necessària l'avaluació i comparació de productes rics en microalgues i la seva biodisponibilitat. Si bé és cert que el Fe és un mineral essencial per l'organisme, també és prooxidant i alguns estudis, de tipus casos i controls, troben una associació entre el risc de patir càncer colorectal amb la ingesta elevada de Fe [69]. Per tant, és important tenir precaució per tal de donar recomanacions de forma general.

Pel que fa al Ca, es necessiten més estudis per poder saber quina és la seva biodisponibilitat en productes enriquits amb microalgues. Com es pot veure a la Taula 5, també contenen minerals com fòsfor, potassi, magnesi, sodi, coure, manganès i zinc.

6.5. Vitamines

Algunes espècies destaquen pel seu contingut en algunes vitamines, com per exemple *Dunaliella salina* conté grans quantitats de vitamina C. Altres espècies com *Arthrospira*

sp. i *Chlorella sp.* destaquen en el contingut en provitamina A, vitamina B3 i àcid fòlic (vitamina B9) (Taula 6). Atès el contingut de vitamines, algunes espècies poden ser d'interès en l'àmbit de la suplementació nutricional, tot i que és necessari esbrinar quina és la seva biodisponibilitat en complements alimentosos, així com en aliments amb microalgues [70].

Taula 6. Contingut de vitamines de diferents espècies de microalgues, calculat per matèria seca. Adaptació de la referència [4]

Espècie de microalga	Vitamina A		Vitamina B3		Vitamina B9		Vitamina C	
	mg/100g	RDA (µg)	mg/100g	RDA (mg)	mg/100g	RDA (µg)	mg/100g	RDA (mg)
<i>Arthrospira sp.</i>	0,34		12,8		0,094		10,1	
<i>Chlorella sp.</i>	30,77	800	23,8	18	0,094	200	10,4	60
<i>Dunaliella salina</i>	nd		nd		nd		2500	

nd: no disponible; RDA: Recommended Dietary Allowance (quantitat diària recomanada)

D'altres espècies contenen també alts continguts de vitamina B₁₂. La forma activa d'aquesta vitamina és sintetitzada per bacteris i arquea, així com acumulada en diversos organismes on es consumeix en forma de carn, peix, ous o llet. La *Spirulina* conté vitamina B₁₂ en grans quantitats, però aquesta és en forma de pseudocobalamina, la qual no és la forma activa que necessita l'organisme humà, ja que no té activitat fisiològica en els mamífers. En l'estudi de Van den Oever i Mayer [71] es van recollir 57 suplementos nutricionals en base d'algues, on es troben quantitats des de no detectables fins a 445,9 µg i d'entre 92,8 µg i 164,1 µg de vitamina B₁₂ per 100 g de matèria seca en *Chlorella* i *Spirulina*, respectivament. Les mostres de *Chlorella* contenen principalment vitamina B₁₂ en la forma activa, i, en canvi, les de *Spirulina* predominava la pseudocobalamina. Per tant, és necessari dur a terme més estudis per poder considerar la *Chlorella* una forma activa de vitamina B₁₂, així com es necessiten estudis per descartar la *Spirulina* com a font de vitamina B₁₂ [71].

6.6. Pigments

Les microalgues produeixen tres tipus de pigments: les clorofil·les (verd), els carotenoides (groc/taronja) com són carotens i xantofil·les i l'últim grup són les ficobiliproteïnes/ficobilines (vermell/blaves), entre d'altres [57].

Entre els carotenoides, destaquen el β-carotè i l'astaxantina, els quals es produeixen principalment a partir de *Dunaliella salina* (pot contenir fins 14% de β-carotè per matèria seca) i *Haematococcus pluvialis* (pot contenir fins 5% d'astaxantina per matèria seca), sent aquest últim la major font d'astaxantina pel consum humà [4,72]. L'EFSA va establir l'any 2019 una Ingesta Diària Acceptable (IDA) d'astaxantina de 0,2 mg/kg de pes corporal, segons el Panell FEEDAP. També es va arribar a la conclusió de que la ingesta de 8 mg al dia d'astaxantina obtinguda de complements alimentaris en conjunt amb una dieta amb presència d'astaxantina (de peixos i mariscs) és segura [73]. L'astaxantina ha guanyat popularitat, ja que com a molècula té propietats antioxidants [74]. Alguns estudis *in vivo* i *in vitro* mostren també efectes contra el càncer, antihipertensius, en la sensibilitat a la insulina, entre d'altres [72]. També s'han dut a terme estudis amb persones, però aquests són amb un nombre baix de participants i no són suficients per poder extreure una declaració de propietats saludables per l'*Haematococcus pluvialis*. Per tant, es necessiten més estudis per poder conèixer bé els mecanismes [27].

Les ficobiliproteïnes són un grup de proteïnes que es troben a les algues verd-blaves i segons l'espectre d'absorció es troben les ficocianines i altres [75]. Les ficocianines s'utilitzen en la indústria alimentària per afegir com a colorant blau a gelats, xiclets i productes làctics, entre d'altres [5]. Aquestes semblen tenir diversos beneficis per l'organisme humà

com ara antioxidant i antiinflamatori, però es necessiten més assajos en humans per poder establir recomanacions [76].

7. Seguretat envers les microalgues

Com s'ha comentat anteriorment, algunes espècies són reconegudes com a segures pel consum humà, sent un aspecte essencial per poder esdevenir una opció saludable i viable. Malgrat això, la biomassa es pot contaminar durant el cultiu o durant el processament *downstream* de la biomassa collida. Per exemple, amb contaminants com metalls pesants, els quals són aquells elements amb densitats moleculars majors de 5 g/ml de cadmi, plom, mercuri o arsènic, entre d'altres, que provoquen efectes perjudicials per a la salut [77]. Les microalgues poden adsorbir aquests metalls, els quals depenen de les condicions de cultiu [77]. Metalls pesants tòxics com l'arsènic, níquel i plom es van trobar en concentracions diferents entre 10 productes comercials, tot i que a nivells per sota dels límits de seguretat, segons l'EFSA [69,78].

Un altre dels aspectes rellevants és el contingut d'àcids nucleics, ja que el seu consum de forma regular pot formar àcid úric i cristal·litzar al ronyó, podent provocant gota i càlculs renals [34]. Tot i això, existeix controvèrsia en aquest camp.

Així mateix, resulta preocupant la presència de cianotoxines, les quals poden ser produïdes per cianobacteris i esdevenir un risc en la salut, com per exemple la microcistina la qual és carcinogènica [77]. L'estudi realitzat per Papadimitriou, et al. ha conclòs com les concentracions que es troben de toxines en suplementes de *Spirulina* no són un risc per la salut dels adults, ja que no superen les IDT (dosi diària tolerable) pel que fa a microcistina, la qual en adults és de 0,04 µg/kg de pes corporal i dia, per tant, una persona adulta de 60 kg tindria una TDI de 2,4 µg. Però sí que superava els límits per infants [79]. Tot i això, si se segueixen les recomanacions de producte, no s'excedirien els límits [69]. Existeixen altres estudis sobre la presència de citotoxicitat en cèl·lules humanes (*in vitro*) en suplementes d'*Arthrospira spp.* i *Chlorella spp.*, tot i no tenir les toxines presents [80]. Altres estudis han trobat microcistina a productes comercialitzats a Alemanya elaborats amb *Aphanizomenon flos-aquae* [81]. Per tant, s'han de realitzar més estudis per arribar a conclusions fermes pel que fa a cianotoxines en complementos alimentosos i com a ingredient, així com per entendre el mecanisme de citotoxicitat en l'organisme humà.

Pel que fa a les al·lèrgies alimentàries, les dades són inadequades i fins i tot contradictòries [77], existint únicament un cas clínic el qual ha sigut documentat [57].

8. Acceptació dels consumidors i altres desafiaments

El consum de microalgues es remunta al segle XVI al llac Texcoco (Mèxic), on els azteques collien la *Spirulina* i preparaven *tecuilatli*, el qual era una mena de pa/pastís amb gust de formatge [82,83]. De forma similar, al llac Chad, a l'Àfrica Central, produeixen el *dihé*, també fet amb *Spirulina*, el qual utilitzen per fer salses [82,84]. Però, és al voltant del 1940 quan les microalgues van començar a guanyar terreny [26]. Actualment, existeix un projecte de recerca anomenat Profuture, el qual està finançat per la UE i que pertany al programa Horizonte 2020 i que té com a objectius potenciar la producció i l'ús d'ingredients rics en proteïnes de microalgues, així com pinsos [85].

Les microalgues autoritzades pel consum humà es troben en forma de complementos o en forma de pols, majoritàriament. La biomassa s'usa per fer menjar com ara cremes vegetals, bastonets de pa (*grissinis*), fideus de tipus *noodles*, pa, pasta, gelats, galetes, xocolata, iogurts i formatge [4] (Figura 4). Avui dia, l'espècie més utilitzada tant mundialment com a Espanya en aliments és la *Spirulina* [86].



Figura 4. Cremes vegetals, grissinis i crackers elaborats amb microalgues. Obtingut de [85].

Els aliments a base de microalgues acostumen a ser un gran repte organolèptic, un dels motius és el color verdós que li aporta al menjar [82]. S'està invertint en la cerca de noves soques que no tinguin una coloració tan forta, com són les dues variants de *Chlorella vulgaris* les quals són blanques i grogues, ja que tenen una quantitat baixa de clorofil·la [87]. Un altre de les limitacions és l'aroma que recorda al peix o, si més no, aporta un sabor intens [88]. Amb aquestes dues variants de *Chlorella*, a banda del color, també s'aconsegueix eliminar aquest gust [87]. Sembla que incloure microalgues en productes secs com són el pa, les galetes o la pasta té més acceptació que afegides a iogurts i productes làctics [57]. Una altra idea és la incorporació a preparacions a base de peix, aprofitant l'aroma de les microalgues [82].

Generalment, la quantitat que s'acostuma a introduir de biomassa de microalgues als productes és baixa, el màxim que s'inclou és aproximadament del 5%, degut principalment a aquests obstacles sensorials que troba el consumidor [89].

Un estudi fet a Espanya va mostrar com els consumidors trobaven com una barrera la manca d'informació disponible sobre el producte i també la falta d'hàbits de consum de les microalgues. També es va observar com els espanyols consideraven les microalgues com a sostenibles, respectuoses amb el medi ambient, saludables i segures [90,91]. Un altre estudi va trobar com la neofòbia, la qual s'entén com la reticència a consumir aliments nous, té efectes positius pel que fa a l'actitud dels consumidors front aliments fets amb microalgues, tot i que es necessiten més estudis per tal de comprendre aquest fet.

Tal i com mencionen Hosseinkhani, et al.: "La comprensió de les perspectives dels consumidors sobre els productes alimentaris basats en microalgues ens permetrà prendre consciència dels consumidors objectiu, les seves demandes i expectatives per millorar la qualitat dels productes i ampliar el mercat" [91].

Un altre dels reptes actuals per tal d'augmentar la presència al mercat de productes fets a base de biomassa de microalgues és el cost de producció, els quals un estudi realitzat a Espanya el 2016 estimava que són de 3,4 €/kg per pes sec [92], així com altres estudis mostren que és de 0,93–5,22 USD/kg que equival a 0,86–4,85 €/kg. Aquests són costos elevats si es compara amb fonts com la soja [93]. Els costos associats al processat (recol·lecció, deshidratació i assecat) poden arribar a representar el 40% dels costos totals de producció [78]. Aleshores, per tal de comparar aquests costos vers al dels altres aliments freqüents a la dieta, es necessiten més estudis, ja que el nombre que es té actualment són escassos [19].

9. Conclusions i futures direccions

En aquest treball s'ha volgut obtenir informació sobre els beneficis que podria suposar incloure les microalgues a l'alimentació, així com comparar amb algunes fonts actuals.

Incloure-les, per exemple, podria suposar beneficis pel planeta, per tal de mitigar l'impacte mediambiental que generen les dietes convencionals.

Conté proteïna completa i el contingut de proteïna és elevat, equiparable a aliments com la carn o l'ou, però la quantitat que s'inclou en l'actualitat als productes disponibles al mercat no arriba a tenir una proteïna en tal quantitat com la d'aquests aliments amb els quals es compara. Es necessiten més estudis per tal de conèixer amb certesa la digestibilitat i biodisponibilitat d'aquestes proteïnes, com per exemple aconseguint valors com el DIAAS.

La disponibilitat d'omega-3 a escala global es troba en perill i les microalgues poden esdevenir una bona alternativa per suplir aquesta necessitat. Algunes espècies com són *Nannochloropsis*, *Phaeodactylum* o *Paolova* tenen un alt contingut en omega-3, equiparable al que proporcionen els peixos, però aquestes espècies no es troben autoritzades pel consum humà en l'àmbit europeu i suposa un impediment. A més a més, seria d'interès comprovar quina és la biodisponibilitat en els humans de l'omega-3 provinent de microalgues, tant per aliments com per complementos alimentosos.

També poden esdevenir interessants pel que fa a prebiòtics, tot i que es necessiten estudis per tal de comparar amb altres fonts. Així mateix, poden esdevenir una opció rica en minerals com el calci i pot arribar a ajudar en les anèmies gràcies al contingut en ferro. El contingut d'algunes vitamines com per exemple la vitamina C també poden resultar d'interès, tot i que es necessita saber en profunditat si un cop afegides als aliments es conserva la biodisponibilitat. Alguns dels seus compostos tenen atracció gràcies als efectes beneficiosos en l'organisme humà, com són l'astaxantina i les ficocianines. Tanmateix, es necessita més evidència per poder establir declaracions de propietats saludables i per entendre els mecanismes.

Malgrat el seu alt potencial, és important abordar la innocuïtat, en especial aspectes com els àcids nucleics i les cianotoxines. Un altre de les qüestions que es necessita abordar per tal d'arribar a més consumidors és l'aspecte organolèptic dels productes basats en microalgues. Aquests productes, més enllà dels beneficis pel que fa a rapidesa productiva, així com respectuosa amb el medi ambient, també poden resultar d'interès pel ventall de població adulta a la qual poden arribar, ja que compliria amb requisits ètics per ser consumits per les persones que porten una dieta vegetariana o vegana.

Per tant, es requereix continuar innovant en el processament d'aquests aliments, així com en l'educació del consumidor, per poder esdevenir un aliment quotidià. També invertir en noves soques i esbrinar quins productes poden ser més agradables pel que fa al perfil sensorial quan s'introdueix biomassa d'algunes espècies. Tot i això, l'adopció de productes a base de microalgues pot ser valuosa per poder enriquir les dietes de la població.

Referències

- [1] Siedenburg J. Could microalgae offer promising options for climate action via their agri-food applications? *Front Sustain Food Syst* 2022;6:333. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2022.976946>.
- [2] United Nations Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects 2022: Summary of Results 2022. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf (accessed April 16, 2023).
- [3] van Dijk M, Morley T, Rau ML, Saghay Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food* 2021 2:7 2021;2:494–501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>.

- [4] Lucakova S, Branyikova I, Hayes M. Microalgal Proteins and Bioactives for Food, Feed, and Other Applications. *Applied Sciences* 2022, Vol 12, Page 4402 2022;12:4402. <https://doi.org/10.3390/APP12094402>.
- [5] Kusmayadi A, Leong YK, Yen HW, Huang CY, Chang JS. Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans – Biotechnological and environmental aspects. *Chemosphere* 2021;271:129800. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.129800>.
- [6] Eilam Y, Khattib H, Pintel N, Avni D. Microalgae—Sustainable Source for Alternative Proteins and Functional Ingredients Promoting Gut and Liver Health. *Global Challenges* 2023;2200177. <https://doi.org/10.1002/GCH2.202200177>.
- [7] Parodi A, Leip A, De Boer IJM, Slegers PM, Ziegler F, Temme EHM, et al. The potential of future foods for sustainable and healthy diets. *Nat Sustain* 2018;1:782–9. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0189-7>.
- [8] The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022* 2022. <https://doi.org/10.4060/CC0461EN>.
- [9] Moomaw W, Berzin I, Tzachor A. Cutting Out the Middle Fish: Marine Microalgae as the Next Sustainable Omega-3 Fatty Acids and Protein Source. *Industrial Biotechnology* 2017;13:234–43. <https://doi.org/10.1089/ind.2017.29102.wmo>.
- [10] Mellor C, Embling R, Neilson L, Randall T, Wakeham C, Lee MD, et al. Consumer Knowledge and Acceptance of “Algae” as a Protein Alternative: A UK-Based Qualitative Study. *Foods* 2022, Vol 11, Page 1703 2022;11:1703. <https://doi.org/10.3390/FOODS11121703>.
- [11] Chen Y, Liang H, Du H, Jesumani V, He W, Cheong KL, et al. Industry chain and challenges of microalgal food industry—a review. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2145455> 2022. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2145455>.
- [12] Gohara-Beirigo AK, Matsudo MC, Cezare-Gomes EA, Carvalho JCM de, Danesi EDG. Microalgae trends toward functional staple food incorporation: Sustainable alternative for human health improvement. *Trends Food Sci Technol* 2022;125:185–99. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.04.030>.
- [13] Yang S, Fan Y, Cao Y, Wang Y, Mou H, Sun H. Technological readiness of commercial microalgae species for foods. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2023;1–25. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2194423>.
- [14] Koyande AK, Chew KW, Rambabu K, Tao Y, Chu DT, Show PL. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. *Food Science and Human Wellness* 2019;8:16–24. <https://doi.org/10.1016/J.FSHW.2019.03.001>.
- [15] Ferdous UT, Yusof ZNB, Ferdous UT, Yusof ZNB. Climate Change and Algal Communities. *Progress in Microalgae Research - A Path for Shaping Sustainable Futures* 2022. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.104710>.
- [16] Hachicha R, Elleuch F, Hlima H Ben, Dubessay P, de Baynast H, Delattre C, et al. Biomolecules from Microalgae and Cyanobacteria: Applications and Market Survey. *Applied Sciences* 2022, Vol 12, Page 1924 2022;12:1924. <https://doi.org/10.3390/APP12041924>.
- [17] Jareonsin S, Pumas C. Advantages of Heterotrophic Microalgae as a Host for Phytochemicals Production. *Front Bioeng Biotechnol* 2021;9. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2021.628597>.
- [18] Castillo T, Ramos D, García-Beltrán T, Brito-Bazan M, Galindo E. Mixotrophic cultivation of microalgae: An alternative to produce high-value metabolites. *Biochem Eng J* 2021;176:108183. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2021.108183>.

- [19] Diaz CJ, Douglas KJ, Kang K, Kolarik AL, Malinovski R, Torres-Tiji Y, et al. Developing algae as a sustainable food source. *Front Nutr* 2023;9:3147. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.1029841>. 595
596
- [20] Ren X, Liu Y, Fan C, Hong H, Wu W, Zhang W, et al. Production, Processing, and Protection of Microalgal n-3 PUFA-Rich Oil. *Foods* 2022;11. <https://doi.org/10.3390/foods11091215>. 597
598
- [21] Verni M, Demarinis C, Rizzello CG, Pontonio E. Bioprocessing to Preserve and Improve Microalgae Nutritional and Functional Potential: Novel Insight and Perspectives. *Foods* 2023, Vol 12, Page 983 599
2023;12:983. <https://doi.org/10.3390/FOODS12050983>. 600
601
- [22] Hernández H, Nunes MC, Prista C, Raymundo A. Innovative and Healthier Dairy Products through the Addition of Microalgae: A Review. *Foods* 2022, Vol 11, Page 755 2022;11:755. 602
<https://doi.org/10.3390/FOODS11050755>. 603
604
- [23] Leyland B, Leu S, Boussiba S. Are Thraustochytrids algae? *Fungal Biol* 2017;121:835–40. 605
<https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2017.07.006>. 606
- [24] AlgaeBase: Listing the World's Algae n.d. <https://www.algaebase.org/> (accessed May 30, 2023). 607
- [25] Torres-Tiji Y, Fields FJ, Mayfield SP. Microalgae as a future food source. *Biotechnol Adv* 2020;41:107536. 608
<https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2020.107536>. 609
- [26] García JL, de Vicente M, Galán B. Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Microb Biotechnol* 2017;10:1017. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12800>. 610
611
- [27] Villaró S, Ciardi M, Morillas-españa A, Sánchez-zurano A, Ación-fernández G, Lafarga T. Microalgae Derived Astaxanthin: Research and Consumer Trends and Industrial Use as Food. *Foods* 2021, Vol 10, 612
Page 2303 2021;10:2303. <https://doi.org/10.3390/FOODS10102303>. 613
614
- [28] Wang Y, Tibbetts SM, McGinn PJ. Microalgae as Sources of High-Quality Protein for Human Food and Protein Supplements. *Foods* 2021, Vol 10, Page 3002 2021;10:3002. 615
<https://doi.org/10.3390/FOODS10123002>. 616
617
- [29] Dolganyuk V, Sukhikh S, Kalashnikova O, Ivanova S, Kashirskikh E, Prosekov A, et al. Food Proteins: Potential Resources. *Sustainability (Switzerland)* 2023;15. <https://doi.org/10.3390/su15075863>. 618
619
- [30] Day L, Cakebread JA, Loveday SM. Food proteins from animals and plants: Differences in the nutritional and functional properties. *Trends Food Sci Technol* 2022;119:428–42. 620
<https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.12.020>. 621
622
- [31] Van De Walle S, Broucke K, Baune MC, Terjung N, Van Royen G, Boukid F. Microalgae protein digestibility: How to crack open the black box? <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2181754> 2023. 623
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2181754>. 624
625
- [32] Wolfe RR, Rutherfurd SM, Kim IY, Moughan PJ. Protein quality as determined by the Digestible Indispensable Amino Acid Score: evaluation of factors underlying the calculation. *Nutr Rev* 2016;74:584–99. <https://doi.org/10.1093/NUTRIT/NUW022>. 626
627
628
- [33] Reynaud Y, Buffière C, Cohade B, Vauris M, Liebermann K, Hafnaoui N, et al. True ileal amino acid digestibility and digestible indispensable amino acid scores (DIAASs) of plant-based protein foods. *Food Chem* 2021;338:128020. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128020>. 629
630
631
- [34] Kumar R, Hegde AS, Sharma K, Parmar P, Srivatsan V. Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides – Current trends and future prospects. *Food Research International* 2022;157:111338. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.111338>. 632
633
634
- [35] Hertzler SR, Lieblein-Boff JC, Weiler M, Allgeier C. Plant Proteins: Assessing Their Nutritional Quality and Effects on Health and Physical Function. *Nutrients* 2020;12:1–27. <https://doi.org/10.3390/NU12123704>. 635
636

- [36] FAO. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation. 2013. 637
- [37] Bleakley S, Hayes M. Algal Proteins: Extraction, Application, and Challenges Concerning Production. 638
Foods 2017, Vol 6, Page 33 2017;6:33. <https://doi.org/10.3390/FOODS6050033>. 639
- [38] Barkia I, Saari N, Manning SR. Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and 640
Nutrition. Marine Drugs 2019, Vol 17, Page 304 2019;17:304. <https://doi.org/10.3390/MD17050304>. 641
- [39] Ryckebosch E, Bruneel C, Termote-Verhalle R, Goiris K, Muylaert K, Foubert I. Nutritional evaluation of 642
microalgae oils rich in omega-3 long chain polyunsaturated fatty acids as an alternative for fish oil. Food 643
Chem 2014;160:393–400. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.03.087>. 644
- [40] Santos-Sánchez NF, Valadez-Blanco R, Hernández-Carlos B, Torres-Ariño A, Guadarrama-Mendoza PC, 645
Salas-Coronado R. Lipids rich in ω -3 polyunsaturated fatty acids from microalgae. Applied Microbiology 646
and Biotechnology 2016 100:20 2016;100:8667–84. <https://doi.org/10.1007/S00253-016-7818-8>. 647
- [41] Magoni C, Bertacchi S, Giustra CM, Guzzetti L, Cozza R, Ferrari M, et al. Could microalgae be a strategic 648
choice for responding to the demand for omega-3 fatty acids? A European perspective. Trends Food Sci 649
Technol 2022;121:142–55. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.01.030>. 650
- [42] Patel A, Desai SS, Mane VK, Enman J, Rova U, Christakopoulos P, et al. Futuristic food fortification with 651
a balanced ratio of dietary ω -3/ ω -6 omega fatty acids for the prevention of lifestyle diseases. Trends Food 652
Sci Technol 2022;120:140–53. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.01.006>. 653
- [43] Qiu X, Xie X, Meesapyodsuk D. Molecular mechanisms for biosynthesis and assembly of nutritionally 654
important very long chain polyunsaturated fatty acids in microorganisms. Prog Lipid Res 2020;79:101047. 655
<https://doi.org/10.1016/J.PLIPRES.2020.101047>. 656
- [44] Hossain MA. Fish as Source of n-3 Polyunsaturated Fatty Acids (PUFAs), Which One is Better-Farmed 657
or Wild? Advance Journal of Food Science and Technology 2011;3:455–66. 658
- [45] Blanchet C, Lucas M, Julien P, Morin R, Gingras S, Dewailly É. Fatty acid composition of wild and farmed 659
Atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Lipids 2005;40:529–31. 660
<https://doi.org/10.1007/S11745-005-1414-0>. 661
- [46] Garcia T, Cardoso C, Afonso C, Gomes A, Mesquita C, Tanni S, et al. A Study of Lipid Bioaccessibility in 662
Canned Sardine (*Sardina pilchardus*) and Chub Mackerel (*Scomber japonicus*). <https://doi.org/10.1080/1049885020191594481> 2019;28:402–12. 663
<https://doi.org/10.1080/10498850.2019.1594481>. 664
- [47] Ryckebosch E, Bruneel C, Muylaert K, Foubert I. Microalgae as an alternative source of omega-3 long 665
chain polyunsaturated fatty acids. Lipid Technol 2012;24:128–30. <https://doi.org/10.1002/LITE.201200197>. 666
- [48] Dawczynski C, Dittrich M, Neumann T, Goetze K, Welzel A, Oelzner P, et al. Docosahexaenoic acid in 667
the treatment of rheumatoid arthritis: A double-blind, placebo-controlled, randomized cross-over study 668
with microalgae vs. sunflower oil. Clinical Nutrition 2018;37:494–504. 669
<https://doi.org/10.1016/J.CLNU.2017.02.021>. 670
- [49] Adarme-Vega TC, Thomas-Hall SR, Schenk PM. Towards sustainable sources for omega-3 fatty acids 671
production. Curr Opin Biotechnol 2014;26:14–8. <https://doi.org/10.1016/J.COPBIO.2013.08.003>. 672
- [50] Food and Agriculture Organization of the United Nations Fats and fatty acids in human nutrition 2010. 673
- [51] Baruah U, Marak NR, Bhattacharya R. Fish Oils in Health and Disease. Int J Curr Microbiol Appl Sci 674
2020;9:1337–43. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.911.157>. 675
676

- [52] Rizzo G, Baroni L, Lombardo M. Promising Sources of Plant-Derived Polyunsaturated Fatty Acids: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2023, Vol 20, Page 1683 2023;20:1683. <https://doi.org/10.3390/IJERPH20031683>. 677
678
679
- [53] Foseid L, Natvik I, Devle H, Ekeberg D. Identification of fatty acids in fractionated lipid extracts from *Palmaria palmata*, *Alaria esculenta* and *Saccharina latissima* by off-line SPE GC-MS. *J Appl Phycol* 2020;32:4251–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10811-020-02193-2>. 680
681
682
- [54] Na BR, Lee JH. In Vitro and In Vivo Digestibility of Soybean, Fish, and Microalgal Oils, and Their Influences on Fatty Acid Distribution in Tissue Lipid of Mice. *Molecules* 2020, Vol 25, Page 5357 2020;25:5357. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25225357>. 683
684
685
- [55] Ji J, Shi L, Ampofo J, Abbey, Lord. Microalgae: Bioactive Composition, Health Benefits, Safety and Prospects as Potential High-Value Ingredients for the Functional Food Industry. *Foods* 2022, Vol 11, Page 1744 2022;11:1744. <https://doi.org/10.3390/FOODS11121744>. 686
687
688
- [56] Gouda M, Tadda MA, Zhao Y, Farmanullah F, Chu B, Li X, et al. Microalgae Bioactive Carbohydrates as a Novel Sustainable and Eco-Friendly Source of Prebiotics: Emerging Health Functionality and Recent Technologies for Extraction and Detection. *Front Nutr* 2022;9. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.806692>. 689
690
691
- [57] Chen C, Tang T, Shi Q, Zhou Z, Fan J. The potential and challenge of microalgae as promising future food sources. *Trends Food Sci Technol* 2022;126:99–112. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.06.016>. 692
693
- [58] Patel AK, Singhania RR, Awasthi MK, Varjani S, Bhatia SK, Tsai ML, et al. Emerging prospects of macro- and microalgae as prebiotic. *Microbial Cell Factories* 2021 20:1 2021;20:1–16. <https://doi.org/10.1186/S12934-021-01601-7>. 694
695
696
- [59] Batista AP, Gouveia L, Bandarra NM, Franco JM, Raymundo A. Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Res* 2013;2:164–73. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2013.01.004>. 697
698
699
- [60] Calleja CA, Hurtado C, Daschner Á, Fernández Escámez P, Manuel C, Abuín F-C, et al. Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre Ingestas Nutricionales de Referencia para la población española. 2019. 700
701
702
- [61] Bature A, Melville L, Rahman KM, Aulak P. Microalgae as feed ingredients and a potential source of competitive advantage in livestock production: A review. *Livest Sci* 2022;259:104907. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2022.104907>. 703
704
705
- [62] Coad J, Pedley K. Iron deficiency and iron deficiency anemia in women. <Http://DxDoiOrg/103109/003655132014936694> 2014;74:82–9. 706
<https://doi.org/10.3109/00365513.2014.936694>. 707
708
- [63] Selmi C, Leung PSC, Fischer L, German B, Yang CY, Kenny TP, et al. The effects of Spirulina on anemia and immune function in senior citizens. *Cell Mol Immunol* 2011;8:248. <https://doi.org/10.1038/CMI.2010.76>. 709
710
711
- [64] Bhatnagar RS, Miller DD, Padilla-Zakour OI, Lei XG. Supplemental Microalgal Iron Helps Replete Blood Hemoglobin in Moderately Anemic Mice Fed a Rice-Based Diet. *Nutrients* 2020;12:1–13. <https://doi.org/10.3390/NU12082239>. 712
713
714
- [65] View of Pharmaceutical applications and consequent environmental impacts of Spirulina (*Arthrospira*): An overview n.d. <https://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/view/1760/2396> (accessed May 27, 2023). 715
716
717

- [66] Khemiri S, Khelifi N, Nunes MC, Ferreira A, Gouveia L, Smaali I, et al. Microalgae biomass as an additional ingredient of gluten-free bread: Dough rheology, texture quality and nutritional properties. *Algal Res* 2020;50:101998. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2020.101998>. 718
719
720
- [67] Lombardi-Boccia G, Martinez-Dominguez B, Aguzzi A. Total Heme and Non-heme Iron in Raw and Cooked Meats. *J Food Sci* 2002;67:1738–41. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2002.TB08715.X>. 721
722
- [68] Piskin E, Cianciosi D, Gulec S, Tomas M, Capanoglu E. Iron Absorption: Factors, Limitations, and Improvement Methods. *ACS Omega* 2022;7:20441–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01833>. 723
724
725
- [69] Sánchez-Parra E, Boutarfa S, Aboal M. Are Cyanotoxins the Only Toxic Compound Potentially Present in Microalgae Supplements? Results from a Study of Ecological and Non-Ecological Products. *Toxins* 2020, Vol 12, Page 552 2020;12:552. <https://doi.org/10.3390/TOXINS12090552>. 726
727
728
- [70] Del Mondo A, Smerilli A, Sané E, Sansone C, Brunet C. Challenging microalgal vitamins for human health. *Microbial Cell Factories* 2020 19:1 2020;19:1–23. <https://doi.org/10.1186/S12934-020-01459-1>. 729
730
- [71] van den Oever SP, Mayer HK. Biologically active or just “pseudo”-vitamin B12 as predominant form in algae-based nutritional supplements? *Journal of Food Composition and Analysis* 2022;109:104464. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2022.104464>. 731
732
733
- [72] Fakhri S, Abbaszadeh F, Dargahi L, Jorjani M. Astaxanthin: A mechanistic review on its biological activities and health benefits. *Pharmacol Res* 2018;136:1–20. <https://doi.org/10.1016/J.PHRS.2018.08.012>. 734
735
- [73] Turck D, Castenmiller J, de Henauw S, Hirsch-Ernst KI, Kearney J, Maciuk A, et al. Safety of astaxanthin for its use as a novel food in food supplements. *EFSA Journal* 2020;18. <https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2020.5993>. 736
737
738
- [74] Ciccone MM, Cortese F, Gesualdo M, Carbonara S, Zito A, Ricci G, et al. Dietary intake of carotenoids and their antioxidant and anti-inflammatory effects in cardiovascular care. *Mediators Inflamm* 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/782137>. 739
740
741
- [75] Holdt SL, Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology* 2011 23:3 2011;23:543–97. <https://doi.org/10.1007/S10811-010-9632-5>. 742
743
- [76] Romay C, González R, Ledón N, Ramirez D, Rimbau V. C-Phycocyanin: A Biliprotein with Antioxidant, Anti-Inflammatory and Neuroprotective Effects. vol. 4. 2003. 744
745
- [77] Markou G, Chentir I, Tzovenis I. Microalgae and cyanobacteria as food: Legislative and safety aspects. *Cultured Microalgae for the Food Industry: Current and Potential Applications*, Elsevier; 2021, p. 249–64. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821080-2.00003-4>. 746
747
748
- [78] Mendes MC, Navalho S, Ferreira A, Paulino C, Figueiredo D, Silva D, et al. Algae as Food in Europe: An Overview of Species Diversity and Their Applicationt. *Foods* 2022;11:1871. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods11131871>. 749
750
751
- [79] Papadimitriou T, Kormas K, Vardaka E. Cyanotoxin contamination in commercial Spirulina food supplements. *Journal Fur Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit* 2021;16:227–35. <https://doi.org/10.1007/s00003-021-01324-2>. 752
753
754
- [80] Hadi J, Brightwell G. Safety of Alternative Proteins: Technological, Environmental and Regulatory Aspects of Cultured Meat, Plant-Based Meat, Insect Protein and Single-Cell Protein. *Foods* 2021, Vol 10, Page 1226 2021;10:1226. <https://doi.org/10.3390/FOODS10061226>. 755
756
757
- [81] Heussner AH, Mazija L, Fastner J, Dietrich DR. Toxin content and cytotoxicity of algal dietary supplements. *Toxicol Appl Pharmacol* 2012;265:263–71. <https://doi.org/10.1016/J.TAAP.2012.10.005>. 758
759

- [82] Lafarga T, Fernández-Sevilla JM, González-López C, Ación-Fernández FG. Spirulina for the food and functional food industries. *Food Research International* 2020;137:109356. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109356>.
- [83] Joshi M, Kaur K, Mishra T, Singh S. To evaluate Lab scale Cultivation of Spirulina by using different substrates and to Evaluate its Chlorophyll and Protein content. *International Research Journal of Biological Sciences* 2014;3.
- [84] Carcea M, Sorto M, Batello C, Narducci V, Aguzzi A, Azzini E, et al. Nutritional characterization of traditional and improved dihé, alimentary blue-green algae from the lake Chad region in Africa. *LWT - Food Science and Technology* 2015;62:753–63. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2014.10.039>.
- [85] ProFuture n.d. <https://www.pro-future.eu/> (accessed May 22, 2023).
- [86] Boukid F, Castellari M. Food and Beverages Containing Algae and Derived Ingredients Launched in the Market from 2015 to 2019: A Front-of-Pack Labeling Perspective with a Special Focus on Spain 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10010173>.
- [87] Schüler L, Greque de Moraes E, Trovão M, Machado A, Carvalho B, Carneiro M, et al. Isolation and Characterization of Novel *Chlorella Vulgaris* Mutants With Low Chlorophyll and Improved Protein Contents for Food Applications. *Front Bioeng Biotechnol* 2020;8:469. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00469>.
- [88] Zhang C, Guan X, Yu S, Zhou J, Chen J. Production of meat alternatives using live cells, cultures and plant proteins. *Curr Opin Food Sci* 2022;43:43–52. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2021.11.002>.
- [89] Boukid F, Castellari M. Algae as Nutritional and Functional Food Sources. *Foods* 2023, Vol 12, Page 122 2022;12:122. <https://doi.org/10.3390/FOODS12010122>.
- [90] Lafarga T, Rodríguez-Bermúdez R, Morillas-España A, Villaró S, García-Vaquero M, Morán L, et al. Consumer knowledge and attitudes towards microalgae as food: The case of Spain. *Algal Res* 2021;54:102174. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2020.102174>.
- [91] Hosseinkhani N, McCauley JI, Ralph PJ. Key challenges for the commercial expansion of ingredients from algae into human food products. *Algal Res* 2022;64:102696. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2022.102696>.
- [92] Ruiz J, Olivieri G, De Vree J, Bosma R, Willems P, Reith JH, et al. Towards industrial products from microalgae. *Energy Environ Sci* 2016;9:3036–43. <https://doi.org/10.1039/C6EE01493C>.
- [93] Almomani F, Hosseinzadeh-Bandbafha H, Aghbashlo M, Omar A, Joo SW, Vasseghian Y, et al. Comprehensive insights into conversion of microalgae to feed, food, and biofuels: Current status and key challenges towards implementation of sustainable biorefineries. *Chemical Engineering Journal* 2023;455:140588. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.140588>.