



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
Curso de Graduação Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia

Laura Silva Soares

**REVISÃO TEÓRICA: CULTIVO DE MICROALGAS PARA A
PRODUÇÃO DE CAROTENOIDES**

Araraquara, SP

2021

Laura Silva Soares

**REVISÃO TEÓRICA: CULTIVO DE MICROALGAS PARA A
PRODUÇÃO DE CAROTENOIDES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Araraquara, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Otavio Cerri

Araraquara, SP

2021

S676r Soares, Laura Silva.
Revisão teórica: cultivo de microalgas para a produção de carotenoides / Laura Silva Soares. – Araraquara: [S.n.], 2021.
44 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) – Universidade Estadual Paulista. “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Área de Bioprocessos e Biotecnologia.

Orientador: Marcel Otávio Cerri.

1. Carotenoides. 2. Microalgas. 3. β -caroteno. 4. Astaxantina. I. Cerri, Marcel Otávio, orient. II. Título.

Agradecimentos

Aos meus pais por confiarem em mim e por todo o suporte, sem vocês nada disso seria possível.

A minha irmã Nathalia, pelo apoio e cumplicidade de sempre.

Ao meu orientador e professor Dr. Marcel Cerri, pela orientação deste trabalho e pela amizade.

Aos meus amigos da UFSJ e da UNESP por terem tornado esses anos mais prazerosos e pela amizade.

A todos os grupos de atividades extracurriculares que tive a oportunidade de participar: ATP Jr., Catálise Jr., Jornada Farmacêutica, Núcleo São Carlos e AIESEC, por todo aprendizado, pelas experiências e principalmente pelas pessoas que conheci.

E a todos que contribuíram de alguma forma na minha jornada.

Resumo

A indústria de microalgas tem recebido atenção significativa com a busca por produtos mais naturais e a preocupação com o meio ambiente tem se tornando cada vez mais frequente. Esses microrganismos são capazes de produzir diversos metabólitos com alto valor agregado, entre eles, os carotenoides. Por conta dos benefícios à saúde e seus pigmentos, a demanda por carotenoides naturais aumentou nos últimos anos. Os carotenoides podem ser utilizados nas indústrias de alimentos, rações, cosméticos e nutracêuticos, entretanto existem desafios associados à produção em massa dos carotenoides por microalgas, o principal é o custo não competitivo, em comparação com produtos alternativos obtidos por síntese química. Esta revisão objetivou o estudo dos carotenoides produzidos por microalgas; os principais fatores que influenciam; e a análise da viabilidade industrial desse pigmento, principalmente, no Brasil. De acordo com as estimativas, o mercado global de carotenoide deve chegar a USD 2,0 bilhões em 2026, e o Brasil, em 2019, importou USD 3,5 milhões de carotenoides. Os corantes produzidos nacionalmente são majoritariamente por via de extração vegetal, o que torna a produção por via biotecnológica um potencial a ser explorado no país. O uso de microalgas como matérias-primas para os carotenoides deve crescer, têm-se realizado muitas pesquisas com intuito de otimizar essa produção e torná-la cada vez mais comerciável.

Palavras-chave: Carotenoides, Microalgas, β -caroteno, Astaxantina.

Abstract

The microalgae industry has received significant attention with the search for more natural products and as the concern for the environment has become increasingly frequent. These microorganisms are capable of producing several metabolites with high added value, including carotenoids. Due to health benefits and their pigments, the demand for natural carotenoids has increased in recent years. They can be used in food, animal feed, cosmetics, and nutraceutical industries, however there are challenges associated with their microalgae mass production, the main one being the uncompetitive cost compared to alternative products obtained by chemical synthesis. This review aimed to study the carotenoids produced by microalgae; the main influencing factors; and the analysis of the industrial viability of this pigment, mainly in Brazil. According to estimates, the global carotenoid market is expected to reach USD 2.0 billion in 2026, and Brazil, in 2019, imported USD 3.5 million of carotenoids. The dyes nationally produced are mostly through vegetal extraction, which makes the production by biotechnological way a potential to be explored in the country. The use of microalgae as raw material for carotenoids is expected to grow as much research has been carried out with the aim of optimizing this production and making it more and more marketable.

Keywords: Carotenoids, Microalgae, β -carotene, Astaxanthin

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microalgas no meio aquático	14
Figura 2 – Exemplo de um cultivo fechado de microalgas	16
Figura 3 - Estrutura química de alguns carotenoides	22
Figura 4 - Corantes naturais	27
Figura 5 - Tamanho do mercado de carotenoides por regiões	29
Figura 6 - Estimativa de participação dos carotenoides no mercado mundial em 2021	30
Figura 7 - Efeitos de estresses nutricionais e ambientais na produção de lipídios e carotenóides em microalgas e as estratégias de cultivo em dois estágios	36
Figura 8 - Matriz SWOT	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de diferentes condições de cultivo.	16
Tabela 2- Composição da biomassa da microalga (em% de matéria seca).	18
Tabela 3 - Principais aplicações de algumas espécies de microalgas	19
Tabela 4 - Exemplos de fontes produtoras e os principais carotenoides	25
Tabela 5 - Produtos comercializados que apresentam carotenoides em sua composição	27
Tabela 6 - Empresas que produzem carotenoides a partir de rota metabólicas	30
Tabela 7 -Empresas localizadas no Brasil que atuam no ramo de carotenoides	31
Tabela 8 - Porcentagem de carotenoides e principal produto produzido.	33

Sumário

1. Introdução	10
2. Objetivo	12
2.1 Objetivos específicos	12
3. Metodologia	13
4. Referencial Teórico	14
4.1 Microalgas	14
4.1.2 Cultivo das microalgas	15
4.1.3 Principais aplicações	17
4.1.4 Mercado de microalgas	19
4.2 Carotenoides	20
4.2.1 Fatores que afetam a concentração de carotenoides nas microalgas	22
4.2.2 Obtenção de carotenoides	23
4.2.3 Aplicações dos carotenoides	26
4.2.3 Mercado dos carotenoides	27
5. Resultado e discussão	33
6. Conclusão	39
7. Referências bibliográficas	40

1. Introdução

O crescente interesse em produtos naturais não prejudiciais ao meio ambiente tornaram as microalgas foco de estudo, por serem microrganismos capazes de acumular importantes componentes como lipídeos, carboidratos e pigmentos, que podem ser convertidos nos mais diversos produtos.

As microalgas representam um grupo altamente especializado com capacidade de biofixação de CO₂ através de sua atividade fotossintética e por acumular biomassa rápida e eficientemente. Além disso, podem usar diferentes metabolismos energéticos para manutenção de suas estruturas como a respiração e fixação/assimilação de nitrogênio, o que torna - algumas espécies - organismos únicos, com amplo espectro de aplicação tecnológica (SOUZA, 2016).

O cultivo de microalgas tem sido realizado visando à produção de biomassa para diversas aplicabilidades, como a obtenção de compostos naturais com alto valor no mercado, entre elas, a produção de carotenoides, os quais podem ser utilizados nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica (MUTANDA et al., 2020).

Os carotenoides possuem uma diversidade estrutural e várias funções benéficas aos organismos que dependem essencialmente das propriedades físico-químicas relacionadas a cada estrutura (SUN et al., 2016). A importância desses compostos no aumento da expectativa de vida deve ser ressaltada, uma vez que podem ser considerados nutracêuticos, ou seja, alimentos ou parte de um alimento que proporciona benefícios à saúde, incluindo a prevenção e/ou tratamento de doenças, além de serem precursores de vitamina A (MESQUITA et al., 2017).

Os carotenoides utilizados como pigmentos naturais têm tido uma participação cada vez mais importante no mercado, devido às restrições maiores no uso de corantes sintéticos. Essas restrições são consequência da preocupação quanto ao aspecto de alterações orgânicas que possam ser causadas pela ingestão destas substâncias a longo prazo (SOUZA, 2016).

A previsão da taxa de crescimento anual composta (CARG) para o mercado global de carotenoides do ano de 2019 para o ano de 2026 é 4,2%, parte desse mercado é referente aos carotenoides sintéticos. No entanto, os carotenoides naturais devem crescer devido à alta demanda por busca de produtos mais naturais e com as inovações tecnológicas para a extração dos mesmos (CAROTENOIDS Market, 2020).

Os carotenoides são extremamente importantes na dieta humana e podem ser usados em diversas indústrias. Com seu mercado em crescimento, junto a busca por produtos naturais, torna os carotenoides sintetizados por microalgas produtos de interesse. Por isso, este trabalho tem como objetivo o estudo dos carotenoides a partir de microalgas, análise do mercado e o potencial aplicação industrial.

2. Objetivo

Este trabalho teve como objetivo realizar a revisão bibliográfica sobre a produção dos carotenoides a partir das microalgas, avaliando o potencial industrial deste processo.

2.1 Objetivos específicos

- Estudo sobre as microalgas e carotenoides, principais aplicações e principais fatores que interferem na sua produção.
- Análise do rendimento de carotenoides produzido por diferentes espécies de microalgas.
- Análise de viabilidade econômica industrial dos carotenoides via microalgas.

3. Metodologia

O presente trabalho foi realizado a partir de pesquisas bibliográficas e online. No primeiro momento foi realizada uma busca e seleção dos trabalhos de conclusão de cursos e artigos que discorrem sobre o tema de produção de carotenoides a partir de microalgas, usando palavras chaves: “microalgae” e “carotene”. Para a análise de mercado, o acesso às revistas online e sites especializados nesse assunto contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

Após a primeira leitura exploratória de todo o material selecionado, com o objetivo de verificar se a obra consultada era de interesse para o trabalho, foi realizada a leitura seletiva, mais aprofundada das partes realmente relevantes para o trabalho e posteriormente registraram-se as informações extraídas como: autores, ano, método, resultados e conclusões.

Em seguida, realizou-se a organização e a condensação das informações coletadas; e estas foram analisadas e discutidas para a escrita deste material teórico. Para análise do potencial de produção de carotenoides sintetizadas por microalgas no mercado brasileiro, uma matriz SWOT foi construída.

4. Referencial Teórico

4.1 Microalgas

Microalgas são microrganismos encontrados tanto na água do mar quanto na água doce e que podem ser classificados como eucarióticos e procarióticos. A estrutura celular dos eucarióticos podem ser representadas nas Divisões *Chlorophyta*, *Euglenophyta*, *Rhodophyta*, *Haptophyta* (*Prymnesiophyta*), *Heterokontophyta* (*Bacillariophyceae*, *Chrysophyceae*, *Xantophyceae* etc.), *Cryptophyta* e *Dinophyta*; e a estrutura procariótica é representada nas Divisões *Cyanophyta* (cianobactérias) e *Prochlorophyta* (GUIMARÃES, 2016). Na figura 1 mostra as microalgas em meio aquático.

Figura 1 - Microalgas no meio aquático.



Fonte: Bioblog, 2019.

Atualmente, as algas estão divididas de acordo com seu conteúdo pigmentar em três grandes grupos: as que possuem clorofila-a, algas com clorofilas a e b, e algas com clorofilas a e c. Com a possibilidade de diversos esquemas taxonômicos, o número de divisões ou filos das algas pode variar de 4 a 13, com até 24 classes (Bold and Wayne, 1985 aput PRATOOMYOT et al.,2005)

Existem cerca de 50.000 espécies de microalgas, dentre estas aproximadamente 30.000 espécies são descritas (SOUZA, 2016 aput RICHMOND, 2004). Os estudos em laboratório se iniciaram no ano de 1890, quando Beijerinck conseguiu cultivar culturas puras de *Chorella vulgaris*, entretanto o uso desse microrganismo na agricultura comercial se iniciou há cerca de 60 anos (SANCHÉZ et al., 2019).

As microalgas, normalmente, são consideradas organismos fotoautotróficos,

isto é, utilizam a energia proveniente da fotossíntese para o crescimento e manutenção do metabolismo. Porém existem algumas microalgas heterótrofos, ou seja, dependem de substratos e são capazes de crescer em ambientes escuros, as microalgas também são capazes de crescer em cultivos mixotróficos, quer dizer, se comportam como autotrófico ou heterotróficos, dependendo da disponibilidade de luz e CO₂. (SOUZA, 2016).

Dentre as características que fazem das microalgas organismos de grande importância, destaca-se a diversidade de metabólitos que produzem e a capacidade de alterarem rapidamente seu metabolismo como resposta às mudanças das condições ambientais. Quando submetidas a condições físicas e químicas específicas, produzem moléculas bioativas de alto valor agregado como antioxidantes, carotenoides, polissacarídeos, ácidos graxos, proteínas, lipídeos e carboidratos.

Para o crescimento das microalgas são necessárias as condições e nutrientes adequados. Os elementos mais importantes que constituem as células das algas são carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre. Outros elementos essenciais incluem ferro, magnésio, elementos traços e, em alguns casos, silício (MOTA, 2017).

Além dos nutrientes, alguns fatores afetam o crescimento das microalgas, os principais são a intensidade da luz, o pH, o oxigênio, meio de cultivos e problemas de contaminação. O controle desses fatores influencia na composição da biomassa produzida, portanto o ponto ótimo desses fatores depende do produto de interesse e varia de acordo com a espécie ou cepa da microalga manipulada (MOTA, 2017).

4.1.2 Cultivo das microalgas

As microalgas podem ser cultivadas em meio de cultivo marinho, água doce e salobra, também existem diferentes modelos de sistemas de cultivos possíveis para obtenção de biomassa, esses devem ser escolhidos de acordo com a fisiologia da microalga (MESQUITA et al., 2017).

Um possível modelo são os sistemas abertos, também conhecidos como lagoas, que são comumente utilizados para o cultivo em larga escala. O sistema aberto pode ser subdividido em: extensivo, no qual não existe esforço para manejo da cultura, como ocorre nas lagoas abertas; e o intensivo, nesse tipo de sistema inclui alguma estrutura para otimizar o crescimento da microalga, um exemplo são as lagoas circulares que possuem braço giratório para agitação da cultura. (MOTA, 2017).

A microalga *Dunaliella salina* se adapta muito bem ao cultivo em larga escala em sistemas abertos, devido às suas características de tolerância a temperaturas altas e baixas e a alta salinidade. Outro exemplo é a microalga *Chlorella*, entretanto esse tipo de microalga ocorre normalmente em lagoas circulares (MESQUITA et al., 2017).

Outro modelo são os sistemas fechados, ilustrado na figura 2, esses normalmente chamados de fotobiorreatores e foram criados com o objetivo de solucionar alguns dos problemas gerados no cultivo em lagoas abertas. Neste modelo de cultivo pode-se controlar a intensidade luminosa, quantidade dos nutrientes, temperatura, pH e reduzir risco de contaminação. (MESQUITA et al., 2017).

Figura 2 - Exemplo de um cultivo fechado de microalgas



Fonte: Engenharia360, 2019.

Para a construção de um fotobiorreator devem ser considerados diversos critérios como: geometria, razão superfície-volume, orientação e inclinação. Os fotobiorreatores mais utilizados possuem configurações tubular, placas planas, verticais ou helicoidais.

Os sistemas fechados não são normalmente utilizados industrialmente devido ao seu alto custo de construção e manutenção. Entretanto a microalga *Haematococcus pluvialis* não se adapta aos sistemas abertos por necessitar de meios neutros, com baixa salinidade e apresentar alta probabilidade de contaminação, então para o cultivo se utiliza de sistemas fechados ou sistemas híbridos (MESQUITA et al., 2017).

Os sistemas híbridos são a combinação dos sistemas fechados com os sistemas abertos, com a intenção de maximizar a produção e minimizar as

desvantagens de ambos os sistemas. Cada sistema é influenciado pelas características intrínsecas de cada cepa utilizada, bem como as condições climáticas e os custos associados (MOTA, 2017). A tabela 1 elucida a comparação entre as características das microalgas com as condições de cultivo.

Tabela 1 Características de diferentes condições de cultivo.

Condição de cultivo	Fonte de energia	Fonte de carbono	Densidade celular	Reator	Custo	Problemas associados com aumento de escala
Fototrófico	Luz	Inorgânica	Baixa	Fotobiorreatores aberto	Baixo	Baixa densidade celular Alto custo de condensação
Heterotrófico	Orgânico	Orgânica	Alta	Fermentador convencional	Médio	Contaminação Alto custo do substrato
Mixotrófico	Luz e orgânico	Inorgânica e orgânica	Média	Fotobiorreator fechado	Alto	Contaminação Alto custo do equipamento Alto custo do substrato

Fonte: Adaptado de Chen et. al (2011)

4.1.3 Principais aplicações

Os produtos produzidos a partir das microalgas provêm principalmente das indústrias de cosméticos, higiene pessoal, nutrição humana e animal. Diferentes espécies de microalgas são cultivadas e estudadas, uma vez que são capazes de sintetizar compostos considerados nutracêuticos, tais como os ácidos graxos poliinsaturados (ácido araquidônico - ARA, ácido eicosapentaenóico - EPA e ácido docosahexaenóico – DHA, por exemplo) e pigmentos carotenoides (astaxantina, betacaroteno, luteína, cantaxantina etc.), que apresentam propriedades terapêuticas (PRIYADARSHANI, 2012).

As pesquisas já possibilitaram conhecer as espécies, o potencial de cultivo e também os compostos que são sintetizados pelas microalgas. A biomassa produzida pelas microalgas é composta por três principais componentes: carboidratos, proteínas e lipídios (PRIYADARSHANI, 2012). A tabela 2 traz a composição da biomassa de diferentes microalgas.

Tabela 2- Composição da biomassa da microalga (em% de matéria seca).

Espécie	Proteína(%)	Carboidratos(%)	Lipídios (%)
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Botryococcus braunii</i>	40	2	33
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorella vulgaris</i>	41-58	12-17	10-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	29	14	11
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8-18	21-52	16-40
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Spirogyra sp</i>	6-20	33-64	11-21
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Spirulina platensis</i>	42-63	8-14	4-11
<i>Synechococcus sp</i>	63	15	11
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3

Fonte: Adaptada PRIYADARSHAN (2010)

A partir da biomassa é possível extrair uma variedade de produtos com potenciais aplicações biotecnológicas. Os produtos comumente extraídos são carotenoides, ácidos graxos, carboidratos, vitaminas e nutracêuticos (MUTANDA et al., 2020).

As aplicações desses produtos extraídos das microalgas são diversas, alguns exemplos: alimentos, medicamentos, tratamento de água, produção de biocombustível, entre outros (MUTANDA et al., 2020). A tabela 3 exemplifica alguns tipos de microalgas, os produtos extraídos e as principais aplicações.

Tabela 3 - Principais aplicações de algumas espécies de microalgas

Espécies	Grupo	Principais produtos	Principais aplicações
<i>Chlorella vulgaris</i>	Chlorophyta	Carotenoides e lipídios	Suplementos e Nutrição saudável
<i>Dunaliella salina</i>	Chlorophyta	Carotenoides	Suplementos e Nutrição saudável
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Chlorophyta	Carotenoides	Nutrição saudável
<i>Odontella aurita</i>	Bacillariophyta	Ácido graxos	Cosméticos e produtos farmacêuticos
<i>Porphyridium cruentum</i>	Rhodophyta	Polissacarídeos	Cosméticos e produtos farmacêuticos
<i>Isochrysis galbana</i>	Chlorophyta	Ácido graxos	Nutrição animal
<i>Phaedactylum tricorutum</i>	Bacillariophyta	Lipídios e ácido graxo	Nutrição e produção de combustível

Fonte: Adaptada PRIYADARSHAN (2010)

Dentre as aplicações citadas na tabela 3, destaca-se a aplicação comercial das microalgas com alta concentração de proteínas e de compostos nutracêuticos para a suplementação alimentar. As principais espécies cultivadas para esse fim são: *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella* e *Haematococcus* (CAMACHO et al., 2019).

As microalgas são consideradas um produto promissor para a indústria alimentícia, devido às suas características nutricionais. Além disso, os referidos compostos nutricionais dependem das espécies utilizadas e das condições de crescimento proporcionadas, nomeadamente em termos de luz, temperatura e perfil nutricional (CAMACHO et al., 2019).

4.1.4 Mercado de microalgas

A exploração comercial das microalgas apresenta diversos atrativos, visto que é possível extrair produtos de alto valor agregado. O cultivo das microalgas não compete com a produção de alimentos, por não necessitar de terra e nem de água potável. Além disso, as microalgas podem ser utilizadas para a captura de carbono, podendo reduzir os níveis de CO₂ na atmosfera (OLAIZOLA, 2000).

Algumas espécies de microalgas já são cultivadas comercialmente em vários países e a biomassa gerada é utilizada principalmente na indústria de alimentos. Países como França, Estados Unidos e China já vêm utilizando microalgas no mercado de alimentos funcionais, há algum tempo (MORDOR INTELLIGENCE, 2020).

De acordo com o relatório publicado pela Markets and Markets, o mercado global de produtos de algas é estimado em US \$ 4,7 bilhões em 2021 e projetado para chegar a US \$ 6,4 bilhões em 2026. Um dos motivos para esse crescimento é o uso das microalgas na indústria alimentícia, e como mencionado anteriormente as microalgas possuem propriedades que permitem a sua utilização em diferentes produtos.

A preocupação com a saúde e o aumento por busca de produtos mais saudáveis influenciaram positivamente nesse mercado, um exemplo é o uso de lipídios, como o ômega-3 em produtos nutracêuticos e suplementos dietéticos, fator que ofereceu uma oportunidade de mercado para produtos ômega-3 à base de algas (NOVOVESKÁ et al.,2019).

Um dos desafios para esse mercado é o alto custo, embora haja um aumento na adoção e procura por novas tecnologias de baixo custo. A produção normalmente tem um alto custo, já que consiste em processos de extração, concentração e purificação. Após a extração e purificação, as algas devem ser formuladas para aplicação posterior e algumas vezes a formulação envolve processos complicados (NOVOVESKÁ et al.,2019).

Com isso, empresas líderes de mercado como Koninklijke DSM NV (Holanda), BASF SE (Alemanha) e DowDupont (EUA) representam uma grande participação no mercado.

4.2 Carotenoides

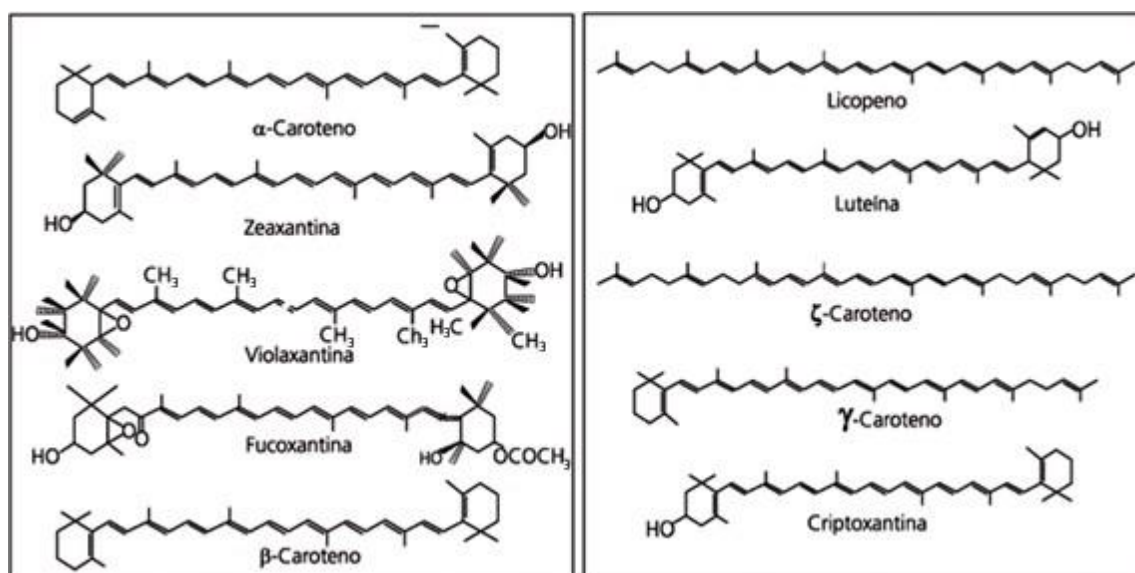
Carotenoides são compostos fitoquímicos que podem ser sintetizados por plantas, algas, alguns tipos de bactérias e fungos. Estes pigmentos possuem a coloração vermelha, laranja ou amarela e são os responsáveis pela coloração de algumas frutas, verduras e até de alguns animais aquáticos. (SUN et al., 2016)

Existem duas classes de carotenoides que podem ser encontradas na natureza, os carotenos e as xantofilas. Os carotenos possuem uma cadeia hidrocarbônica linear ou ciclizada, em um ou nos dois terminais da molécula, este

composto é o responsável pela tonalidade de amarelo-alaranjado. Já as xantofilas são substâncias derivadas dos carotenos e possuem oxigênio em sua estrutura, como grupos: hidroxila, cetado e aldeído, e são elas que contribuem para a coloração marrom-avermelhado (MESQUITA et al., 2017).

As duas classes são compostos lipofílicos, ou seja, solúveis em óleos e solventes orgânicos. E ambas são consideradas moderadamente termoestáveis e podem sofrer uma perda de cor quando oxidadas (VARELA et al., 2015). Na figura 3 são ilustrados alguns exemplos de estruturas dos carotenoides.

Figura 3 - Estrutura química de alguns carotenoides



Fonte: AMBRÓSIO et al. 2006

A maior parte dos carotenoides são encontrados nas membranas tilacoides, localizadas no interior dos cloroplastos das plantas e também presentes nas cianobactérias, e com isso alguns dos carotenoides exercem funções importantes na fotossíntese. (VARELA et al., 2015; NISAR et al., 2015).

Os carotenoides primários, como a luteína, podem auxiliar na transferência de energia absorvida para as clorofilas, expandindo assim o espectro de absorção de luz de algas ou plantas (YE et al., 2008). Além disso, os carotenoides secundários, como astaxantina e cantaxantina, atuam com o papel de proteção celular nos organismos.

Atualmente, existem mais de 600 carotenoides já conhecidos, entretanto apenas 40 são encontrados na dieta alimentar humana, os principais são β - caroteno,

β - caroteno, licopeno e luteína. Um componente importante presente nos carotenoides é a vitamina A (AMBATI et al.,2019).

O corpo humano não realiza a síntese da vitamina A, então torna-se necessário ingeri-la, uma vez que essa vitamina é importante para o desenvolvimento embrionário, proteção do organismo contra estresse oxidativo, funcionamento da visão, do sistema imune e entre outros.

A inserção dessa vitamina pode ser realizada a partir de diversos alimentos e entre eles aqueles que possuem carotenoides como precursores, como: cenoura, abóbora e espinafre (MESQUITA et al., 2017). Porém nem todos os carotenoides possuem vitamina A, entre os carotenoides, o β - caroteno é o de maior destaque por ser abundante e apresentar maior capacidade de síntese dessa vitamina (UENOJO et. al., 2007). Os carotenoides que não possuem vitamina A, como o licopeno e a luteína, exercem atividades antioxidantes ou de corantes e também parecem apresentar ação protetora contra o câncer (AMBRÓSIO et al., 2006).

Os carotenoides também possuem relevância no aumento da expectativa de vida dado que também são considerados nutracêuticos, ou seja, proporcionam benefícios à saúde e dentre esses: prevenção/tratamentos de doenças (HUGENHOLTZ; SMID, 2002).

Mediante a essa informação, compreende-se que os carotenoides possuem uma diversidade estrutural e várias funções benéficas aos organismos, os quais dependem essencialmente das propriedades físico-químicas relacionadas a cada estrutura. Portanto se torna um grupo muito importante de pigmentos naturais e foco de estudos de diferentes áreas entre elas a alimentícia, farmacêutica e cosmética (MADEIRA,2015).

4.2.1 Fatores que afetam a concentração de carotenoides nas microalgas

O controle de alguns fatores no cultivo das microalgas torna-se necessário para a obtenção de uma alta concentração de carotenoides na biomassa total. Entretanto, os parâmetros desses fatores variam e dependem do carotenoide de interesse e da microalga escolhida (MOTA, 2017).

Quando ocorre um aumento das espécies reativas de oxigênio (ERO), geradas em grande quantidade durante o estresse oxidativo, tende a aumentar a produção dos

carotenoides. Condições ambientais como a irradiação intensa, deficiência de nutrientes e fotossíntese excessiva, reduzem a taxa de transferência de elétrons e consequentemente gera estresse e a foto-oxidação. (SOLOVCHENKO et al., 2011). A temperatura influencia na composição bioquímica das algas, e segundo alguns estudos, o aumento da temperatura pode induzir a um acúmulo de carotenoides, esse fato ocorre, porque o aumento da temperatura causa estresse foto-oxidativo (MA et al., 2020 apud TRIPATHI et al., 2002). No entanto, em algumas pesquisas para a produção de astaxantina e o β - caroteno, o aumento da temperatura não obteve tanta interferência na produção (MINHAS et al., 2016).

A intensidade e disponibilidade da luz têm um papel importante nos cultivos fotoautotróficos, já que as microalgas utilizam luz como fonte de energia, logo a intensidade da luz afeta a produção da biomassa. E normalmente a alta intensidade de luz gera um aumento da produção dos pigmentos fotoprotetores, como os carotenoides (RICHMOND, 2013).

Os nutrientes que compõem o meio de cultivo e a quantidade dos mesmos são capazes de estimular ou inibir o crescimento dos microrganismos. O carbono, o nitrogênio, o fósforo, o enxofre e o ferro são os principais elementos presentes nos meios de cultura (LOURENÇO, 2006; RICHMOND, 2013).

O excesso ou a limitação desses elementos podem interferir diretamente na composição da microalga. Ao limitar nutrientes como: nitrogênio, fósforo e enxofre podem aumentar a produção dos carotenoides. Quando limita o nitrogênio no meio cultivo consequentemente inibe a síntese proteica e a produção da clorofila, portanto a produção de carotenoides ocorre para proteger a clorofila dos possíveis danos causados pela a luz.

A salinidade é uma fator que também interfere no cultivo das microalgas, normalmente, o aumento da salinidade no meio de cultura pode estimular o maior acúmulo de carotenoides, porém deve se tomar cuidado uma vez que o excesso de salinidade danificar o metabolismo das microalgas.(MINHAS et al., 2016).

4.2.2 Obtenção de carotenoides

Existem três vias para obtenção dos carotenoides disponíveis no mercado: por síntese química, a partir de vegetais e rota biotecnológica como é o caso das microalgas(GONG; BASSI, 2016).

Os carotenoides de origem química são compostos majoritariamente da forma trans. Já os carotenoides naturais normalmente são compostos por uma mistura complexa de vários isômeros com outros compostos bioativos. A ingestão de misturas naturais é mais segura do que a ingestão de isômeros sintéticos. Diante disso e com o interesse por consumo de produtos mais saudáveis ganhando cada vez mais atenção, torna os carotenoides naturais mais atrativos do que os carotenoides sintetizados quimicamente (GONG; BASSI, 2016).

Os carotenoides a partir de vegetais dependem de fatores como a variação climática, além da necessidade de uma grande área para plantio. Diferentemente dos carotenoides produzidos a partir de rotas biotecnológicas, que necessitam de pequenas áreas para produção, são independentes de estações do ano e composição do solo e também possuem maior facilidade de controle das condições de cultivo a fim de garantir maior produtividade (MESQUITA et al., 2017).

A produção dos carotenoides sintetizados por rota biotecnológica pode ser originada de bactérias, algas e leveduras. Na tabela 4, encontram-se alguns exemplos de fontes produtoras e os principais carotenoides extraídos.

Tabela 4 - Exemplos de fontes produtoras e os principais carotenoides

Espécies	Carotenoides principais
Cianobactérias	
<i>Anabaena variabilis</i>	Cantaxantina
<i>Aphanizomenon flos-aqa</i>	Cantaxantina
<i>Nostoc commune</i>	Cantaxantina
Algas	
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Luteína
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cantaxantina, astaxantina
<i>Dunaliella salina</i>	β - caroteno
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	β - caroteno
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxantina, cantaxantina, luteína
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	Luteína, β - caroteno
Fungos e leveduras	
<i>Blakeslea trispora</i>	β - caroteno e licopeno
<i>Dacrymyces deliquescens</i>	Luteína
<i>Rhodospiridium sp.</i>	Toruleno, β - caroteno
<i>Xanthophyllomyces dendrorhous</i>	Astaxantina
Bactérias	
<i>Mycobacterium lacticola</i>	Astaxantina
<i>Rhodococcus maris</i>	Cantaxantina

Fonte: Adaptado de Guedes et al. (2011) e Valduga et al.(2009)

4.2.3 Aplicações dos carotenoides

Como mencionado anteriormente, os carotenoides oferecem diversos benefícios à saúde humana, eles apresentam caráter anti-inflamatório, antioxidante e existem estudos que mostram que o alto teor em carotenoides está associado à redução na incidência de câncer e prevenção de algumas doenças como Alzheimer. Isso tornou os carotenoides compostos de grande interesse para a indústria farmacêutica (GONG; BASSI, 2016).

Na indústria alimentícia a utilização de corantes tornou-se indispensável, uma vez que garante aspectos visuais em diversos produtos e aumenta aceitação e o seu valor no mercado. Após armazenamento e no processamento quando são expostos a altas temperaturas, alguns alimentos sofrem alterações na cor natural e perdas nutricionais (MESQUITA et. al, 2017) (SOUZA, 2016). Na figura 4 esta apresentando alguns corantes que pode ser extraídos da microalga *Chorella vulgaris*.

Figura 4 - Corantes naturais



Fonte: Elementa-ingredientes, 2020.

Com isso os carotenóides são utilizados para colorir os alimentos, além de aumentar a vida de prateleira visto que podem inibir as reações de oxidação. Na aquicultura a utilização dos carotenoides, como corantes, se tornou comum para a criação de salmões, trutas e crustáceos (CAMACHO et al., 2019). Ao adicionar pigmentos nos alimentos faz com que os mesmos possuam a coloração característica da espécie.

Os carotenoides também podem ser encontrados nas indústrias de alimentação animal, alimentos nutricionais e cosméticos.

Na tabela 5, há alguns exemplos de carotenoides, produtos e aplicações.

Tabela 5 - Produtos comercializados que apresentam carotenoides em sua composição

Carotenoide	Produto	Marca/Fabricante	Aplicação/Função
Astaxatina	Carophyll Stay Pink	DSM	Aditivo para rações de aves, peixes e camarões
β -caroteno	Beta Caroteno	Syndow Naturais	Suplemento alimentar (cápsulas)
β -caroteno	CaroCare	DSM	Suplemento alimentar (cápsulas)
β -caroteno	Rivimix	DSM	Suplemento para ruminantes
β -caroteno	Doce Marrom Glacê	Predilecta	Corante
β -caroteno	Suco de maracujá com soja	Shefa	Corante
β -caroteno	Suco de Tangerina	Maguary	Corante
β -caroteno e licopeno	Inneov Solar	Nestlé e L'Oreal	Suplemento alimentar (cápsulas)
Luteína	Teína	Eurofarma	Suplemento alimentar (cápsulas)
Luteína	Linha Profuse	Aché	Antioxidante em dermocosmético
Urucum	Picolé de maracujá	Sorvete Itália	Corante
Urucum	Gelatina sabor abacaxi	Dr.Oetcker	Corante
Urucum	Freegells Naturals	Riclan	Corante
Urucum	Itambezinho	Itambé	Corante

Fonte: Mesquita et al. (2017)

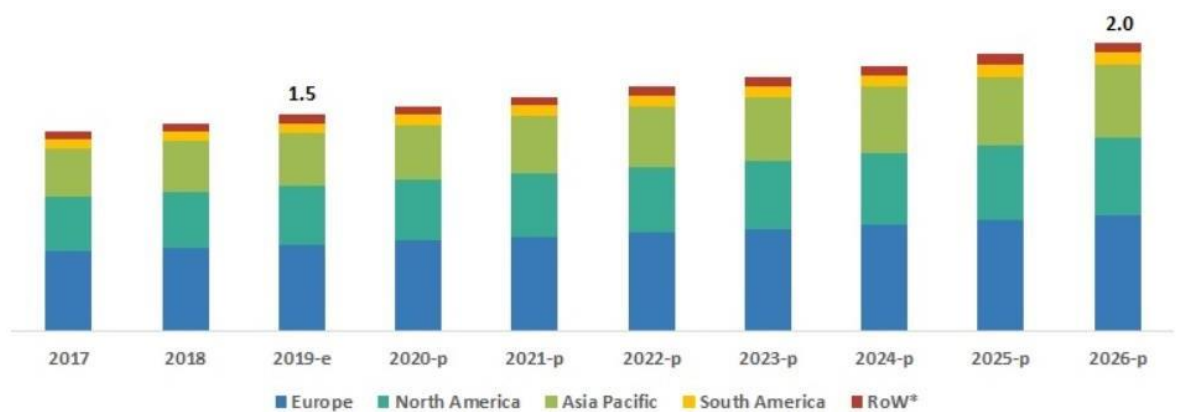
4.2.3 Mercado dos carotenoides

O mercado de carotenoides possui uma tendência de crescimento de USD 1,5 bilhões em 2019 para USD 2,0 bilhões em 2026, essa projeção deve-se ao uso crescente de carotenoides naturais como corantes em alimentos e também as novas tecnologias de extração desse produto. Apesar de grande parte desse mercado ainda corresponder aos carotenoides sintéticos, existem estáticas que demonstram que nos próximos anos a busca por carotenoides naturais aumentará, devido à mudança de

preferência dos consumidores que estão cada vez mais em busca de produtos naturais e benéficos à saúde (NOVOVESKÁ et al.,2019; AMBATI et al., 2019).

A figura 5 ilustra o mercado de carotenoides por região e percebe que a Europa, representada na figura pela a cor azul, possui a maior participação no mercado, isso ocorre devido à presença de alguns fabricantes como: DSM, na Holanda, Chr. Hansen, Dinamarca. BAS e Dohler Group, na Alemanha. Outro movimento, para que a Europa possua grande participação no mercado, é o envelhecimento da população que aumentou a demanda por produtos benéficos à saúde, como a luteína, licopeno e beta-caroteno que auxiliam e reduzem o risco de diabetes, câncer e outros problemas relacionados ao coração (NOVOVESKÁ et al.,2019).

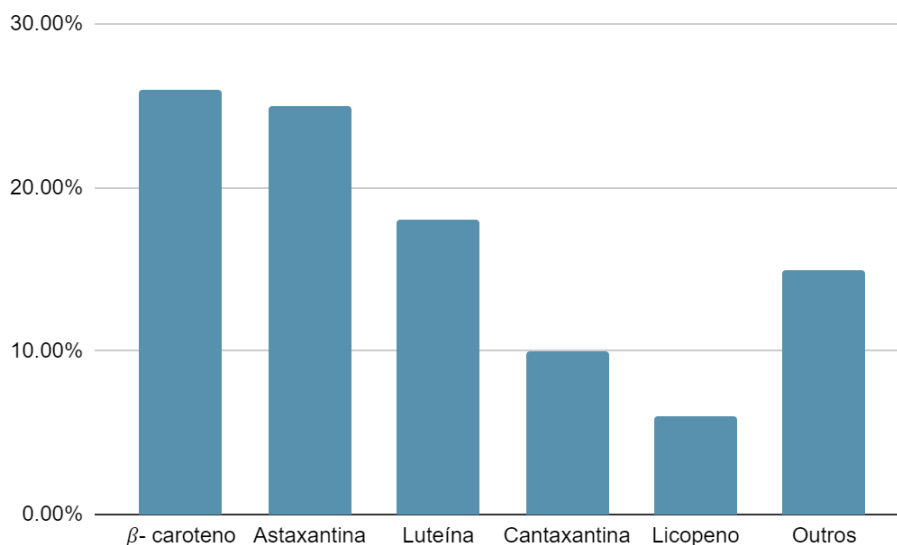
Figura 5 - Tamanho do mercado de carotenoides por regiões.



Fonte: Revista Markets and Market 2021

De acordo com as pesquisas, estima-se que em 2021, no mercado mundial, os carotenoides mais utilizados serão o β -caroteno e Astaxantina, que representam respectivamente cerca de 26% e 25% do mercado total de carotenoides, juntos somam mais da metade, em seguida tem a Luteína com participação de 18%, Cantaxantina com 10%, Licopeno com 6% e os outros somam cerca de 15%, essa porcentagem está ilustrada na figura 6 (RAMUNNI et al., 2018).

Figura 6 - Estimativa de participação dos carotenoides no mercado mundial em 2021



Fonte: Apatado Ramunni et al (2018)

Os carotenoides β -caroteno, licopeno, astaxantina e luteína são considerados os mais relevantes, diante de suas aplicações. Entretanto, a fucoxantina e a cantaxantina estão entrando no mercado com potencial econômico significativo (NOVOVESKÁ et al.,2019).

A receita global do β - caroteno, em 2015, representou cerca de US\$432,2 milhões, sendo que 35% desse valor é referente aos carotenoides que utilizam algas como matéria-prima. O valor de mercado por quilograma dos carotenoides naturais é de R \$7.500,00, um valor bem mais alto aos carotenoides sintéticos que é de R\$3,75 (NOVOVESKÁ et al.,2019) (MORDOR INTELLIGENCE, 2019).

O interesse pela síntese biotecnológica de carotenoides tem se destacado há algum tempo no mercado. Empresas de diversos países já investem na produção de carotenoides naturais por via biotecnológica, utilizando microalgas. A BASF, empresa alemã e uma das maiores nesse mercado, se inseriu na produção biotecnológica de carotenoides por microalgas, em 2010, quando concretizou a aquisição da empresa Cognis Nutrition & Care, empresa instalada na Austrália (MESQUITA et al., 2017) (SUN et al. 2016).

A tabela 6 demonstra as principais empresas de produção de carotenoides por rota metabólica e os seus respectivos produtos.

Tabela 6 - Empresas que produzem carotenoides a partir de rota metabólicas

Empresa	País	Produto
Alga Technologies	Israel	Oleoresina, cápsulas, pó e emulsão de astaxantina Israel
BASF	Austrália	Mistura de carotenóides
BlueBiotech	Alemanha	Pó de microalga com astaxantina
Cyanotech	EUA	Cápsulas de astaxantina
Fuji Chemical Industries	EUA e Suécia	Astaxantina em cápsulas gelatinosas, tabletes, pó e em biomassa de microalga
Parry Nutraceuticals	Índia	Mistura de β -caroteno e luteína
Plankton Australia Pty Limited	Austrália	Mistura de β -caroteno, caroteno e luteína

Fonte: Adaptada de Mesquita et al (2017)

O Brasil, em 2019, importou quase US \$3,5 milhões de carotenoides, enquanto exportou apenas US \$409,00. Os três principais países exportadores de carotenoides em 2018 foram a Alemanha (14,8%), China (14,40%) e França (11,50%). E o Brasil com a representatividade de apenas 0,39% (VIANNA et. al, 2020)

Na tabela 7, encontra-se um levantamento das empresas que atuam no ramo de carotenoides no Brasil no ano de 2017, nota-se que quase todas as empresas produzem o corante à base de urucum, este corante é produzido via extração vegetal.

Tabela 7 -Empresas localizadas no Brasil que atuam no ramo de carotenoides

Empresas	Produto Comercial
Corantec	PA LIPO; PA HIDRO; PA3 HS; PA3 Colorífico
Duas Rodas Industrial	Corante Urucum Hidrossolúvel Líquido e Corante Urucum Hidrossolúvel em Pó
Sanrisil	Corante Natural Urucum
Tecnocor Corantes Naturais	Hidrovita – Urucum
Baculerê Corantes Naturais	Extrato Lipossolúvel de Urucum; Extrato Hidrossolúvel de Urucum; Suspensão Concentrada de Urucum; Bixina em pó e Norbixina em pó.
Aditivos e condimentos IBRAC	Solução de Corante Vegetal de Urucum para Revestimento de Carne; Solução de Corante Vegetal de Urucum e Curcuma para Revestimento de Carne.
Kratos corantes naturais	Corante natural de urucum hidrossolúvel; Suspensão oleosa de urucum lipossolúvel; Bixina em pó.
Tebracc – Técnica brasileira de corantes e condimentos	Bixon; Mix-Cor; Hidromix; Urucum em Pó; Colorífico; Mix Cor C; Vitamassa-U; Vitamassa-U Hidro; Vitamassa e Vitamassa Hidrossolúvel
Proregi Aditivos para Alimentos	Corante de urucum
New Max	Corante Natural de Urucum Hidrossolúvel C166; Corante Natural de Urucum Hidrossolúvel C206; Corante Natural de Urucum Hidrossolúvel C266; Corante Natural de Urucum Hidrossolúvel Conc. 1,5.
Firace	Xantêne Original; Xantêne Super; Xantêne Churros; Xantêne Pó; Xantêne Pão de Queijo; Cortêne Red; Cortêne Hidro; Colorífico; Protenê.
Vivare Insumos	Corante Natural de Urucum

Fonte: Mesquita et. al (2017)

Uma análise que costuma ser usada por empresas que estão entrando no mercado, lançando novos projetos ou entrando em novos mercados é a análise SWOT, uma técnica de planejamento estratégico, usada para analisar cenários e auxiliar nas tomadas de decisões.

A análise SWOT foi inventada na década de 1960 por Albert Humphrey, consultor em gestão do instituto de pesquisas da Universidade de Stanford. Desde da

criação a matriz já passou por algumas alterações para adaptar-se às necessidades de cada projeto. A análise se tornou popular, visto que é uma ferramenta simples e rápida de aplicar e por trazer resultados efetivos para o planejamento de projetos (CASAROTTO, 2019).

A sigla SWOT remete a Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats que traduzido para o português significa Força, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças, respectivamente e que também é conhecida como FOFA.

Com a matriz é possível a identificação dos principais aspectos em relação ao posicionamento no mercado de uma empresa ou de um projeto, considerando o ambiente interno e externo. Os quadrantes de oportunidades e ameaças correspondem a uma análise externa, e os quadrantes de forças e fraquezas correspondem a análise interna (REZ, 2016).

5. Resultado e discussão

A produção de carotenoides por microalgas tem sido foco de muitos estudos, com o intuito de produzir diferentes tipos de carotenoides por meio de diversas espécies de microalgas, entretanto escalar essa produção e a comercialização do produto possui alguns desafios.

A tabela 8 reúne algumas espécies de microalgas e a quantidade de carotenoides produzidos por cada uma delas.

Tabela 8 - Porcentagem de carotenoides e principal produto produzido.

Microalga	% carotenoides	Principal carotenoides produzido	Referência
<i>Haematococcus pluvialis</i>	3-7%	Astaxantina	Regnier et al., 2015;
<i>Chlorella vulgaris</i>	12%	Astaxantina	Cha et al., 2008
<i>Dunaliella salina</i>	3-13%	β -caroteno	EI-Baz et al., 2002;
<i>Chlorella zofingiensis</i>	0,9%	β -caroteno	Bar et al., 1995
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	0,2-0,4%	Luteína	Wu et al., 2007
<i>Coelastrella striolata</i> Var. <i>multistriata</i>	4,7%	Cantaxantina	Abe et al., 2007

Fonte: Adaptada de Ambati et al. (2018)

De acordo com os artigos lidos, as espécies de microalgas que se destacam com o potencial de serem produzidas comercialmente são as dos gêneros *Chlorella* e *Dunaliella*, e uma característica comum entre elas são a capacidade de serem cultivadas a céu aberto e ainda permanecerem relativamente livres de contaminação por outras microalgas e protozoários.

O cultivo comercial da *Dunaliella salina* ocorre em tanques abertos, principalmente em regiões de salinas, em que há uma alta incidência de luz, o que gera um estresse (desequilíbrio osmótico) nas células, consequentemente gera a síntese de glicerol e carotenoides.

Um dos desafios enfrentados para a produção em larga escala de carotenoides a partir da *Dunaliella salina* é que o acúmulo dos compostos normalmente está relacionado ao crescimento lento da biomassa.

Almeida (2020) realizou um estudo com o objetivo de avaliar o rendimento da produção de carotenoides por *Dunaliella salina* em condições de cultivos induzidas por estresse de privação de nitrogênio e intensidade excessiva de luz, o que resultou em uma taxa de crescimento mais baixa, porém com mudança rápida de cor devido à produção de carotenoides. Assim, Almeida (2020) concluiu que a privação de nitrogênio não é capaz de sustentar a divisão celular para aumentar a produção de carotenoides ao longo do crescimento da biomassa, mas pode aumentar a velocidade de produção.

No mesmo estudo, o pesquisador realizou um levantamento em escala laboratorial da cinética de crescimento sob diferentes condições de cultivo de fotoperíodo, aeração e agitação, o qual foi realizado para sete espécies de microalgas verdes *Ankistrodesmus fusiformis*, *Chlamydocapsa*, *Desmodesmus brasiliensis*, *Kirchneriella lunaris*, *Pseudokirchneriella subcapitata* e *Scenedesmus obliquus* e notou que a aeração do ar atmosférico sem enriquecimento de CO₂ foi capaz de aumentar a taxa de crescimento, em 35-56%, das espécies de microalgas verdes, portanto, pode ser suficiente para aumentar de forma satisfatória o custo-benefício dos sistemas de produção envolvendo as linhagens estudadas.

O estresse com alta incidência de luz é a melhor técnica de indução para a alta produção de carotenoides em várias espécies, esse fato foi verificado no estudo realizado por Xie et. al (2013), em que o aumento da intensidade da luz resultou em uma produtividade aumentada de luteína de 3,6 mg L/ dia na espécie *Desmodesmus sp.*

Lamers et. al (2010) estudou o efeito de um aumento repentino de luz no metabolismo de carotenoides e ácidos graxos usando um fotobiorreator de tela plana para garantir um regime de luz constante ao longo dos experimento, observou que após aumentar a intensidade de luz, a produção de β-caroteno começou imediatamente, e obteve como uma produção máxima de β-caroteno cerca de 30 pg célula⁻¹ dia⁻¹ (equivalente a 37 mg LRV⁻¹ dia⁻¹) em *Dunaliella salina*, considerado uma ordem de magnitude maior do que a produtividade média relatada para uma instalação comercial de produção de β- caroteno.

Sun et al. (2018) discutiu sobre as estratégias para a manipulação do estresse na produção de carotenoides e lipídios a partir de microalgas e uma das soluções descritas para resolver o conflito entre o crescimento celular e a produção de

carotenoides é o cultivo em dois estágios, em que no primeiro estágio as microalgas são cultivadas em condições ótimas de crescimento para obtenção da produção máxima de biomassa, enquanto o segundo processo é dedicado ao acúmulo dos carotenoides através de condições de estresse.

A Figura 7 ilustra os principais efeitos dos estresses nutricionais e ambientais na produção de lipídios e carotenoides com a utilização da técnica em dois estágios. A utilização da técnica em cultivo de dois estágios pode ser realizada em grande escala.

Figura 7 - Efeitos de estresses nutricionais e ambientais na produção de lipídios e carotenoides em microalgas e as estratégias de cultivo em dois estágios



Fonte: Adaptada de Sun et. al (2018)

Vale ressaltar que já se encontram diversos artigos com objetivo de tornar o cultivo de microalgas, comumente utilizadas ou as ainda inexploradas, cada vez mais rentável, dentre esses, estudos que propõem a produção simultânea de dois bioprodutos.

Gong et al. (2020) caracterizou o potencial de quatro microalgas ainda inexploradas para produção de lipídios e carotenoides utilizando um conjunto de abordagens aprimoradas para o controle das variantes, ele concluiu que as microalgas estudadas possuem potencial para a coprodução dos metabólitos, tendo potencial para produção comercial, atrativa para os lipídios e para a luteína.

E Rearte et al. (2020) realizou uma pesquisa para otimização da produção de lipídios e carotenoides na microalga *Golenkinia aff. brevispicula*, microalga verde e

que apresenta poucos relatos de sua biomassa produção e aplicações, foi utilizada a técnica de cultivo em dois estágios, uma primeira etapa para a produção de biomassa em culturas semi-contínuas, e uma segunda etapa para o acúmulo de lipídios e carotenoides sob batelada em estresse salino. Ele confirmou que o cultivo em dois estágios otimiza a produtividade tanto de carotenoides como de lipídios nesta cepa.

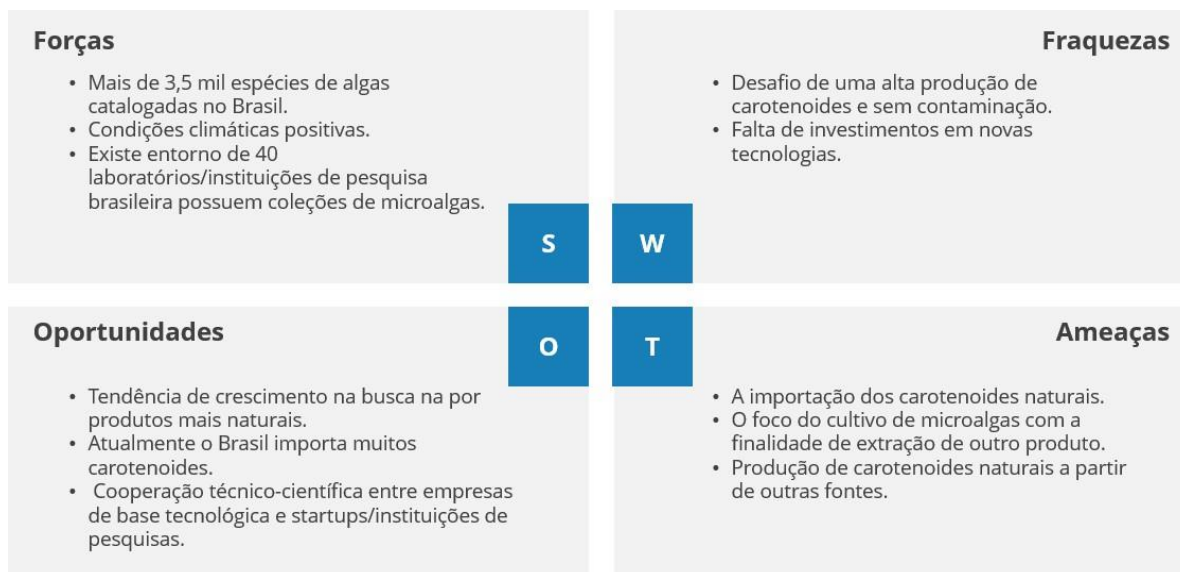
Ao mudar a unidade de produção do laboratório para uma grande escala, deve-se considerar algumas variáveis, como o fotobiorreator de grande escala, a disponibilidade de dióxido de carbono, a incidência da luz e a disponibilidade dos nutrientes, o que torna a produção em larga escala economicamente viável um desafio.

Como exposto na seção 4.2.3, o mercado dos carotenoides possui uma tendência de crescimento e um dos motivos é a preocupação com a saúde e com o meio ambiente, aumentando a busca por corantes naturais. Desse modo, o mercado para produção a partir de microalgas se torna um mercado promissor.

De acordo com Mordor Intelligence, empresa especializada em estudo de mercado, a Europa e América do Norte têm o maior mercado de carotenoides devido à crescente demanda por alimentos com rótulos limpos, contudo, há a expectativa de que esse comportamento se repita em mercados emergentes como Ásia-Pacífico e América do Sul.

Considerando essa expectativa na América do Sul, realizou-se uma matriz SWOT, ferramenta que identifica os strengths (pontos fortes), weaknesses (pontos fracos), opportunities (oportunidades para o negócio) e threats (ameaças para o negócio) - ilustrada na figura 8 - para analisar o potencial de comercialização dos carotenoides a partir de microalgas no mercado brasileiro.

Figura 8 - Matriz SWOT



Fonte: Elaboração Própria

Como forças para esse processo, destaca-se que o Brasil possui uma grande área costeira e conta com 12% do abastecimento de água doce mundial, além de receber altos níveis de incidência de luz em grande parte do seu território.

O país também é considerado rico em flora e possui mais de 3,5 mil espécies de algas catalogadas. E o Brasil consta com cerca de 40 laboratórios/instituições de pesquisa que cultivam diversas microalgas, entre elas, a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), que mantém centenas de cepas de microalgas e cianobactérias isoladas de corpos d'água localizados no Estado de São Paulo. A pesquisa também é incentivada pela empresa Embrapa Agroenergia, que tem como intuito melhorar geneticamente espécies nativas de microalgas para a otimização da produção industrial.

O crescente interesse por consumir produtos mais naturais é tendência mundial e deve continuar crescendo entre os brasileiros, nos próximos anos. Hoje, no Brasil, já existem empresas privadas que buscam desenvolver a comercialização de microalgas, um exemplo é a joint venture entre a Bunge e a empresa americana TerraVia, apesar do foco da empresa ser a produção de óleos de alto valor agregado, demonstra que há a oportunidade para a produção de carotenoides.

Entretanto existem alguns desafios internos a serem enfrentados como a produção alta de carotenoides, e a não contaminação deles durante o processo de extração. Além disso, o processo de downstream - normalmente - possui um custo

elevado, o que faz com que haja necessidade de investimento financeiro de grandes empresas. O alto valor dos carotenoides também pode ser considerado uma franqueza.

Como ameaça ao mercado brasileiro, há a possibilidade de importar os carotenoides naturais de outros países com mais desenvolvimento neste assunto. Também o fato de que os cultivos das microalgas estudadas - atualmente - no Brasil terem o foco na produção de outro bioprodutos. Além da chance de produzir carotenoides naturais por síntese de vegetais, fungos e bactérias.

Contudo, acredita-se que o mercado de carotenoides por microalgas provavelmente continuará a se expandir, com a possibilidade de identificação de novas metodologias para a produção de carotenoides, avanços nas metodologias upstream e downstream de forma a tornar o processo economicamente atrativo para as indústrias.

6. Conclusão

O uso de carotenoides está crescendo globalmente, uma vez que podem ser utilizados em indústrias alimentícia, cosmética, ração animal e farmacêutica. E a busca por alimentação mais saudável e preocupação com o meio ambiente ressaltaram o potencial de produzir os carotenoides a partir de microalgas. Porém o custo de produção em larga escala ainda não é competitivo, em comparação com produtos alternativos obtidos por síntese química, resultando em diversos estudos em relação aos fatores que influenciam no crescimento da biomassa e na produção dos carotenoides, entre esses, tipo de fotobiorreator, disponibilidade de nutrientes e intensidade luminosa.

Outros estudos propõem uma produção em dois estágios, em que o primeiro tem o propósito do crescimento da biomassa e o segundo a indução da produção de carotenoides, há também pesquisas sobre a produção simultânea de dois ou mais bioprodutos com valores agregados, as quais têm como objetivo tornar o processo melhor e economicamente viável.

O investimento para a produção em larga escala ocorre principalmente em países das principais empresas do ramo, apesar do Brasil não estar entre esses países, acredita-se que é um país com potencial para produzir carotenoides naturais por via biotecnológica, visto seus recursos naturais e a estimativa crescente desse mercado para os próximos anos.

7. Referências bibliográficas

ALMEIDA, Cíntia Jesus et al. Biotechnological Assessment of Culture Conditions on the Stress-Induced Carotenoid Production of *Dunaliella salina* and Growth Kinetics of Chlorophyceae Microalgae Strains. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 63, 2020.

AMBATI, Ranga Rao *et al.* Industrial potential of carotenoid pigments from microalgae: Current trends and future prospects. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 59, n. 12, p. 1880-1902, 2019.

AMBRÓSIO, Caímen Lygia Buígos; CAMPOS, Floísbela de Aíúda Camaía e Siqueíia; FARO, Zelyta Pinheíio de. Caíotenóides como alteínativa contía a hipovitaminose A. **Revista de Nutiçãõ**, [S. l.], v. 19, p. 233-243, 4 dez. 2006.

CAMACHO, F.; Macedo, A.; Malcata, F. Potential industrial applications and commercialization of microalgae in the functional food and feed industries: **A short review. Mar. Drugs** v. 17 p. 312, 2019.

CAROTENOIDS Market by Type (Astaxanthin, Beta-Carotene, Lutein, Lycopene, Canthaxanthin, and Zeaxanthin), Application (Feed, Food & Beverages, Dietary Supplements, Cosmetics, and Pharmaceuticals), Source, Formulation, and Region - Global Forecast to 2026. **Markets and Markets** , [S. l.], 4 fev. 2020. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/carotenoid-market-158421566.html>. Acesso em: 13 out. 2021.

CASAROLI, Camila. O que é análise SWOT, ou análise FOFA, e saiba como fazer uma análise estratégica do seu negócio: **Análise SWOT é uma ferramenta de gestão que se serve para fazer o planejamento estratégico de empresas e novos projetos. In: Análise SWOT**. [S. l.], 20 dez. 2019.

CHEN, C.; YEH, K; AISYAH, R.; LEE, D.; CHANG, J. Cultivation, Photobioreactor Design and Harvesting of Microalgae for Biodiesel Production: A Critical Review. **Bioresour. Technol.**, v. 102, 2011.

GUIMARÃES, Bruna da Silveira et al. Estudo da cinética de crescimento da microalga *Scenedesmus* sp. em meios de cultivo salobros. 2016.

GONG, Mengyue, and Amarjeet Bassi. Carotenoids from microalgae: A review of recent developments. **Biotechnology advances** v. 34, 2016. doi:10.1016/j.biotechadv.2016.10.005

GONG, Yuhao; HUANG, Junchao. Characterization of four untapped microalgae for the production of lipids and carotenoids. **Algal Research**, v. 49, p. 101897, 2020.

HUGENHOLTZ, Jeroen; SMID, Eddy J. Nutraceutical production with food-grade microorganisms. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 13, n. 5, p. 497-507, 2002.

LAMERS, Packo P. et al. Carotenoid and fatty acid metabolism in light-stressed *Dunaliella salina*. **Biotechnology and bioengineering**, v. 106, n. 4, p. 638-648, 2010.

LOURENÇO, S. O. **Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações**. São Carlos: RIMA, 2006.

MA, Ruijuan et al. Comprehensive utilization of marine microalgae for enhanced co-production of multiple compounds. **Marine Drugs**, v. 18, n. 9, p. 467, 2020.

MADEIRA, Ana de Maros Beja. **Extração e quantificação de carotenoides provininetes de diferentes cultivares de Capsicum Annum L. com interesse para a indústria farmacêutica**. 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas) – Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2015.

MERCADO DE CAROTENÓIDES - CRESCIMENTO, TENDÊNCIAS, IMPACTO DO COVID-19 E PREVISÕES (2021 - 2026). **Mordor Intelligence** , 20 nov. 2020. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/carotenoids-market-industry>. Acesso em: 4 out. 2021.

MESQUITA, Sabrina *et al.* Carotenoides: Propriedades, Aplicações e Mercado. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 9, 11 abr. 2017. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/MesquitaNoPrelo.pdf>. Acesso em: 9 out.. 2021

MINHAS, P. Hodgson, C.J. Barrow, A. Adholeya, A review on the assessment of stress conditions for simultaneous production of microalgal lipids and carotenoids, **Front. Microbiol.** v. 7, Article 546, 2016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00546>.

MOTA, MARIA FERNANDA DOS SANTOS. **“AVALIAÇÃO DE PROCESSOS PARA EXTRAÇÃO DE CAROTENOIDES DE UMA PREPARAÇÃO COMERCIAL DA MICROALGA *Chlorella sp.*** 2016. Dissertação (Mestrado) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

MUTANDA, T *et al.* Biotechnological Applications of Microalgal Oleaginous Compounds: Current Trends on Microalgal Bioprocessing of Products. **Frontiers in Energy Research** , [S. l.], v. 8, p. 299, 17 dez. 2020

NISAR, Nazia et al. Carotenoid metabolism in plants. **Molecular plant**, v. 8, n. 1, p. 68-82, 2015.

NOVOVESKÁ, Lucie et al. “Microalgal Carotenoids: A Review of Production, Current Markets, Regulations, and Future Direction.” **Marine drugs** v. 17, n. 11, 640, 13 Nov. 2019. doi:10.3390/md17110640.

OLAIZOLA, M. Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. **Biomolecular Engineering**, v. 20, n. 4-6, p. 459-466, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(03\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(03)00076-5).

PIENKOS, P.T.; DARZINS, A. The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining** , v.3, n. 4, p. 431-440, 2009.

PRIYADARSHANI, Indira; RATH, Biswajit. Commercial and industrial applications of micro algae—A review. **Journal of Algal Biomass Utilization**, v. 3, n. 4, p. 89-100, 2012.

- PRATOOMYOT, Jarunan et al. Fatty acids composition of 10 microalgal species. **Songklanakarin J. Sci. Technol**, v. 27, n. 6, p. 1179-1187, 2005.
- RAMMUNI, M. N.; ARIYADASA, T. U.; NIMARSHANA, P. H. V.; ATTALAGE, R. A. Comparative assessment on the extraction of carotenoids from microalgal sources: Astaxanthin from *H. pluvialis* and β -carotene from *D. salina*. **Food Chemistry, Amsterdam**, v. 277, p. 128 -134, 2019.
- REARTE, T. A. et al. Optimization of the production of lipids and carotenoids in the microalga *Golenkinia aff. brevispicula*. **Algal Research**, v. 51, p. 102004, 2020.
- REZ, Rafael. Análise SWOT. In: **Nova Escola de Marketing**. [S. l.], 22 nov. 2006
- RICHMOND, A.; HU, Q. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Appl Phycol. 2nd edition Oxford: Wiley Blackwell Publishing, 2013.
- SÁNCHEZ, Javier et al. Biomass resources. In: **The Role of Bioenergy in the Bioeconomy**. Academic Press, 2019. p. 25-111.
- SOLOVCHENKO, Alexei et al. Probing the effects of high-light stress on pigment and lipid metabolism in nitrogen-starving microalgae by measuring chlorophyll fluorescence transients: studies with a $\Delta 5$ desaturase mutant of *Parietochloris incisa* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae). **Algal Research**, v. 2, n. 3, p. 175-182, 2013.
- SOUZA, Luana. **Caracterização morfofisiológica, produção de lipídios e Carotenóides em diferentes condições de cultivo de duas microalgas com potencial biotecnológico**. 2016. Tese (Doutorado em Biotecnologia e Biociências) - Centro de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.
- VALDUGA, Eunice et al. Produção de carotenoides: microrganismos como fonte de pigmentos naturais. **Química Nova**, v. 32, n. 9, p. 2429-2436, 2009.
- Varela, J. C., H. Pereira, M. Vila, and R. Leon. 2015. Production of carotenoids by microalgae: Achievements and challenges. **Photosynthesis Research** 125:423–436., 2015.
- VIANA, Natália Moreno et al. Caracterização do mercado de betacaroteno a partir da microalga *Dunaliella sp.* In: **Embrapa Agroenergia-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 6., 2020, Brasília, DF. Anais... Brasília, DF: Embrapa, 2020., 2020.
- YE, Zhi-Wei; JIANG, Jian-Guo; WU, Guang-Hong. Biosynthesis and regulation of carotenoids in *Dunaliella*: progresses and prospects. **Biotechnology advances**, v. 26, n. 4, p. 352-360, 2008.
- XIE, Youping et al. Phototrophic cultivation of a thermo-tolerant *Desmodesmus sp.* for lutein production: effects of nitrate concentration, light intensity and fed-batch operation. **Bioresource technology**, v. 144, p. 435-444, 2013.